

# Luft-Erdwärmetauscher L-EWT

## Planungsleitfaden Teil 2



## Technische Planung

Version 0.9 August 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 besteht aus mehreren Modulen.

Das Anwendungsziel der einzelnen Module ist in der Datei LEWT\_PLF2\_EINLEITUNG\_09.pdf detailliert beschrieben. Insgesamt existieren folgende Module:

LEWT_PLF2_LIESMICH_09.pdf	Übersicht
LEWT_PLF2_EINLEITUNG_09.pdf	Einleitung
LEWT_PLF2_SIMULATION_09.pdf	Numerisches Simulationsprogramm
LEWT_PLF2_BENCHMARK_09.pdf	Überschlägiges Abschätzverfahren
LEWT_PLF2_KENNZAHLE_09.pdf	Qualitätsbewertung
LEWT_PLF2_DATENBLATT_09.pdf	Standardisierte Datenblätter
<b>LEWT_PLF2_TECHNISCHEDetails_09.pdf</b>	<b>Planungshinweise, Mathematik und Details</b>
LEWT_PLF2_PROJEKTE_09.pdf	Projektberichte
LEWT_PLF2_ANHANG_09.pdf	Anhang, Tabellen, Einzeldetails

Jedes Modul kann unter [www.ag-solar.de](http://www.ag-solar.de) als PDF-Version einzeln geladen werden.

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

Hauptautoren dieses Moduls:

Dr.-Ing. Gerd Dibowski  
Dipl.-Ing. Ralph Wortmann

Kontakt: [gerd.dibowski@dlr.de](mailto:gerd.dibowski@dlr.de)  
[r.wortmann@wortmann-scheerer.de](mailto:r.wortmann@wortmann-scheerer.de)

## INHALTSVERZEICHNIS

1	Planung und Auslegung .....	4
1.1	Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit auf das Betriebsergebnis .....	7
1.2	Systemvorauswahl mit v und VL .....	9
1.3	Wirkungsgrad-Verbesserung im Wärmerückgewinnungsgerät (WRG) durch L-EWT .....	13
1.4	Bestimmung der Bodeneigenschaften .....	14
1.4.1	Widersprüchliche Aussagen in der Literatur über Bödenfeuchte .....	19
2	L-EWT Ausführung .....	20
2.1	L-EWT Typen .....	22
2.1.1	Einzelrohr-L-EWT .....	23
2.1.2	Rohrregister-L-EWT .....	24
2.2	Bauausführung .....	27
2.3	Rohrmaterialauswahl .....	29
2.4	Kondensation .....	33
2.5	Kondensatableitung .....	34
3	Integration in die Haustechnik .....	37
3.1	Prinzipielle Überlegungen .....	37
3.2	Der L-EWT im Gesamtsystem Chance und Grenzen .....	39
3.3	Regelung .....	44
3.4	Ventilator .....	49
3.5	Ansaugsysteme und Filter .....	50
3.6	Wartung und Revision .....	52
4	Wirtschaftliche Aspekte .....	55
4.1	Kapitalgebundene Kosten – Investition .....	55
4.1.1	Baukosten .....	57
4.1.2	Rohre und Sonderbauteile .....	58
4.2	Verbrauchsgebundene Kosten .....	59
4.3	Betriebsgebundene Kosten .....	59

5	Lufthygiene.....	61
5.1	Definition der Belastungsarten .....	63
5.1.1	Schimmelpilze.....	63
5.1.2	MVOC .....	64
5.1.3	Bakterien.....	64
5.1.4	Partikelförmige Verunreinigungen .....	64
5.1.5	Chemische Schadstoffe.....	64
5.1.6	Radon .....	65
5.2	Anforderungen der VDI-Richtlinie 6022.....	66
5.3	Untersuchungsmethoden der lufthygienischen Messungen .....	67
5.4	Messergebnisse an Luft-Erdwärmetauschern.....	70
5.4.1	Ergebnisse der lufthygienischen Untersuchung der Versuchsanlage Köln .....	70
5.4.2	Untersuchungen von Frau Dr. med. Thora Schneiders.....	72
5.5	Umweltaspekte .....	75
5.5.1	Thermische Auswirkungen auf den Untergrund .....	75
5.5.2	Rückbau.....	76
5.5.3	Primärenergiebedarf und CO <sub>2</sub> -Emissionen .....	76

# 1 Planung und Auslegung

Der vorliegende Leitfaden beschäftigt sich grundsätzlich mit größeren Luft-Erdwärmehaustauschern (L-EWT), deutlich über  $1.000\text{m}^3/\text{h}$ , die mittels Ventilatoreinheit mit einem definierten Volumenstrom betrieben werden, auch wenn dieser variabel sein kann. Frei über thermischen Auftrieb o.ä. angetriebene L-EWT, werden hier nicht betrachtet. Auch wenn die Wärmeaustauschmechanismen ähnlich sind, wäre die Auslegung solcher frei strömenden Systeme unterschiedlich, da i.d.R. der sich einstellende Volumenstrom wesentlich geringer ist.

Der L-EWT muss in das gesamte Klimakonzept eines modernen Gebäudes frühzeitig integriert werden. Seine besondere Charakteristik ist nicht einfach mit den klaren Spezifikationen einer Kältemaschine vergleichbar. Die Leistung eines L-EWT ist immer von einem Kennfeld sich gegenseitig beeinflussender Größen bestimmt, daran sollte der Planer immer denken. Aus diesem Grund muss er sich an den Gedanken gewöhnen, dass wegen der komplexen Abhängigkeiten niemals eine ganz exakte, von äußeren Faktoren unbeeinflussbare Leistung des L-EWT vorausberechenbar sein wird. Dies sollte er im Planungsteam offen ansprechen und vor allem seinem Auftraggeber schriftlich mitteilen.

Im gleichen Zuge sollte aber auch auf die große Chance des L-EWT hingewiesen werden, die darin liegt, bei geringsten Betriebskosten seine Aufgabe zu erfüllen.

Die Entscheidung, ob ein L-EWT eingeplant werden soll, ist in einem möglichst frühen Planungsstadium zu treffen, weil viele Planungsschritte sich gegenseitig beeinflussen, aber vor allem weil der Bau eines L-EWT irgendwo auf dem Grundstück erfolgen muss und damit die Vorplanung des Architekten tangiert.

Der Luftvolumenstrom der RLT-Anlage eines Gebäudes ist i.d.R. eine entscheidende Bestimmungsgröße für die Auslegung des L-EWT. Des Weiteren ist grundsätzlich zu klären, ob der L-EWT hauptsächlich für den Sommerbetrieb zur Kühlung oder im Winter zur Vorwärmung der Außenluft dienen soll. Da bei den meisten größeren Gebäuden des Gewerbe- und Verwaltungsbaus der Kühlfall die Auslegung bestimmen wird, ist dies der Schwerpunkt dieses Leitfadens Teils 2.

Eine weitere bestimmende Größe für die Auslegung des L-EWT ist die benötigte Kühlleistung eines Gebäudes und gleichsam die benötigte Lufttemperatur. Dem TGA-Planer dürfte klar sein, dass die bloße Leistung eines L-EWT wenig nützlich ist, wenn das Austrittstemperaturniveau nicht tief genug liegt. Entscheidend ist hier die Erdreichtemperatur während des Kühlfalls, der Luftvolumenstrom im L-EWT, indirekt also dessen Geometrie und die Länge des L-EWT.

Die Investitionskosten eines L-EWT können bei guter Planung und günstigen Umständen durchaus mit denen einer konventionellen Kälteanlage konkurrieren. Meist wird der L-EWT aber teurer sein als eine konventionelle Anlage. Bei den Betriebskosten jedoch ist ein gut geplanter L-EWT unschlagbar günstig, während bei der konventionellen Anlage i.d.R. die Stromkosten erheblich sind und auch die Nutzungsdauer der Anlage deutlich geringer ausfällt als beim L-EWT. Die zu erwartenden Preissteigerungen für Strom sind daher meist ein wichtiges Kriterium für einen Vergleich der Wirtschaftlichkeit.

Derartige Konzeptvergleiche auf der Gebäudeversorgungsseite bringen häufig knappe Ergebnisse, sind aber unerlässlich für die Entscheidungsfindung. Die effektivste Methode ist immer die, das Gebäude mit seiner Nutzungsstruktur in die Konzeptphase einzubeziehen, also die Gebäudenutzungsseite und die Versorgungsseite zu koppeln. Hierbei entstehen immer Synergieeffekte.

Bei fast allen Gebäuden, in denen Behaglichkeit und Betriebskosten eine Rolle spielen, haben sich in den letzten Jahren thermische Computersimulationen als adäquates Entwurfs- und Auslegungsinstrument für Klimatisierungsaufgaben durchgesetzt. Wird die Bedarfsseite des Gebäudes mit Hilfe von Simulationen ermittelt, erleichtert dies die Auslegung eines L-EWT, aber auch einer konventionellen Anlage, deutlich, da der Betrag der Heiz- und Kühllasten sowie deren zeitlicher Verlauf über das Jahr recht zuverlässig ermittelt werden kann. Fast immer geben die Simulationen auch Hinweise auf ein baulich bedingtes Optimierungspotential, so dass die Lastermittlung ein geringeres Niveau der benötigten maximalen Kühlleistung ausweist als vorher ohne Simulationen abgeschätzt. Dies spart letztlich Investitionskosten und erhöht die Planungssicherheit.

Ob mit oder ohne Simulationsrechnungen ermittelt ist der Betrag der Heiz- und Kühllasten eine der wichtigsten Auslegungsgrößen des L-EWT, und da ein L-EWT je nach Nutzung Ermüdungserscheinungen aufweisen kann, ist die Kenntnis der zeitlichen Lastverteilung wünschenswert.

Da im L-EWT im Sommer ähnlich wie bei jeder konventionellen Luftkühlung eine Entfeuchtung der Zuluft durch Taupunktunterschreitung stattfindet, ist der Ableitung des Kondensats die nötige Aufmerksamkeit zu widmen, um die Vorschriften der Lufthygiene einzuhalten. Zwar ist es regelungstechnisch möglich, den L-EWT so zu betreiben, dass keine Taupunktunterschreitung auftritt, wodurch aber ein hohes Kühlpotential ungenutzt bliebe. Letztlich wird die Wirtschaftlichkeit eines L-EWT dadurch negativ beeinflusst.

Obwohl bei größeren L-EWT meist die Kühlaufgabe im Vordergrund steht, ist eine Luftvorwärmung an kalten Wintertagen ein willkommener positiver Nebeneffekt; anders als bei kleinen L-EWT im Wohnungsbau, wo die Luftvorwärmung auf über 0°C i.d.R. das Haupteinsatzgebiet ist, weil so die Vereisung hocheffizienter Wärmerückgewinnungsanlagen vermieden wird. Bei großen L-EWT, die für den Kühlfall ausgelegt werden, wird die Luftvorwärmung auf über 0°C meist nicht gelingen, weil er dann unwirtschaftlich groß würde.

Über das ganze Jahr betrachtet, ergibt sich demnach für den L-EWT ein gebäudeseitig bedingtes Betriebsfenster, das von der jahreszeitlich schwankenden Erdreichtemperatur abhängt. Letztere wird zudem von der Nutzung des L-EWT beeinflusst. Es entsteht somit eine nicht ganz unkomplizierte Regelungsaufgabe, in die der folgende Grundsatz für den Winterbetrieb integriert werden sollte, weil der rationelle Umgang mit Primärenergie ja ein wichtiges Merkmal des L-EWT darstellt:

**Die Luftführung über den L-EWT ist nur sinnvoll, wenn die primär eingesparte Energie zur Luftvorwärmung die primär aufgewendete Energie für den Lufttransport übersteigt.**

Neben den umfangreichen gebäudeseitigen Einflussfaktoren sind in die Planung eines L-EWT Standortdaten und die Daten des Untergrunds des Gebäudes einzubeziehen. Des Weiteren müssen die generellen Bodenparameter überschlägig bestimmt werden. Hilfreich ist daher ein listenartiges Vorgehen wie z.B. nach Tabelle 1:

**Tabelle 1** Beispielhafte Liste von Einflussfaktoren auf die Planung des L-EWT

<b>Gebäudedaten</b>
Welcher Nutzungstyp des Gebäudes liegt vor?
Wie groß ist der Heizwärmebedarf (kW)?
Wie groß ist die Kühllast (kW)?
Lastverteilung über das Jahr?
Volllaststunden?
Klima- und Energiekonzept?
Sind für das Gebäude an diesem Standort außergewöhnliche Klimaverhältnisse zu erwarten?
<b>Standortdaten</b>
Wie groß ist die verfügbare Grundstücksfläche?
Wie ist die Nutzung des Grundstücks und der Nachbarschaft?
Gibt es von Hindernisse für bestimmte Systeme? (Wasserschutzgebiet, Bergbau-Bergsenkungsgebiete)
Wie ist die Zugänglichkeit des Grundstücks für Maschinen?
Welche Infrastruktur existiert?
<b>Untergrunddaten</b>
Welche Informationen zum Untergrundaufbau liegen vor? (Geologische Karten, Bodenkarten, Bohrungen in der Nachbarschaft)
Was ist über die Grundwasserverhältnisse bekannt? (Wasserwirtschaft, Brunnen in der Nachbarschaft)
Gibt es Bestandspläne für Rohre und Leitungen im Untergrund?

Für eine erste Grundeinschätzung einer L-EWT-Planung ist es hilfreich, die positiven Einflussfaktoren nach [PAUL] zumindest qualitativ zu kennen (Tabelle 2).

**Tabelle 2** Einflussfaktoren auf die Luftaustrittstemperatur nach PAUL

positive Einflussfaktoren Erdreich/Klima auf die Wärmeübertragung an den L-EWT	
1	gute Erdverdichtung
2	hohe Erdfeuchte
3	Oberflächenwasser - Versickerung über dem L-EWT
4	hoher Grundwasserspiegel
5	hoher solarer Wärmeeintrag (Herbst) in Erdreich (für Winterbetrieb)
6	kurze Zeitdauer der Kälte-(Hitze)periode
Einflussfaktoren Rohrdimensionierung	
7	geringe Luftgeschwindigkeit
8	große Rohrlänge
9	kleine Durchmesser und mehrere parallele Rohre
10	großer Rohrabstand
11	hohe Verlegetiefe max. 4 m

Eine Verlegung der L-EWT-Rohre in einer grundwasserführenden Schicht oder im Grundwasserschwankungsbereich ist möglich. Hierbei ist auf eine wasserdichte und auftriebs-sichere 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.

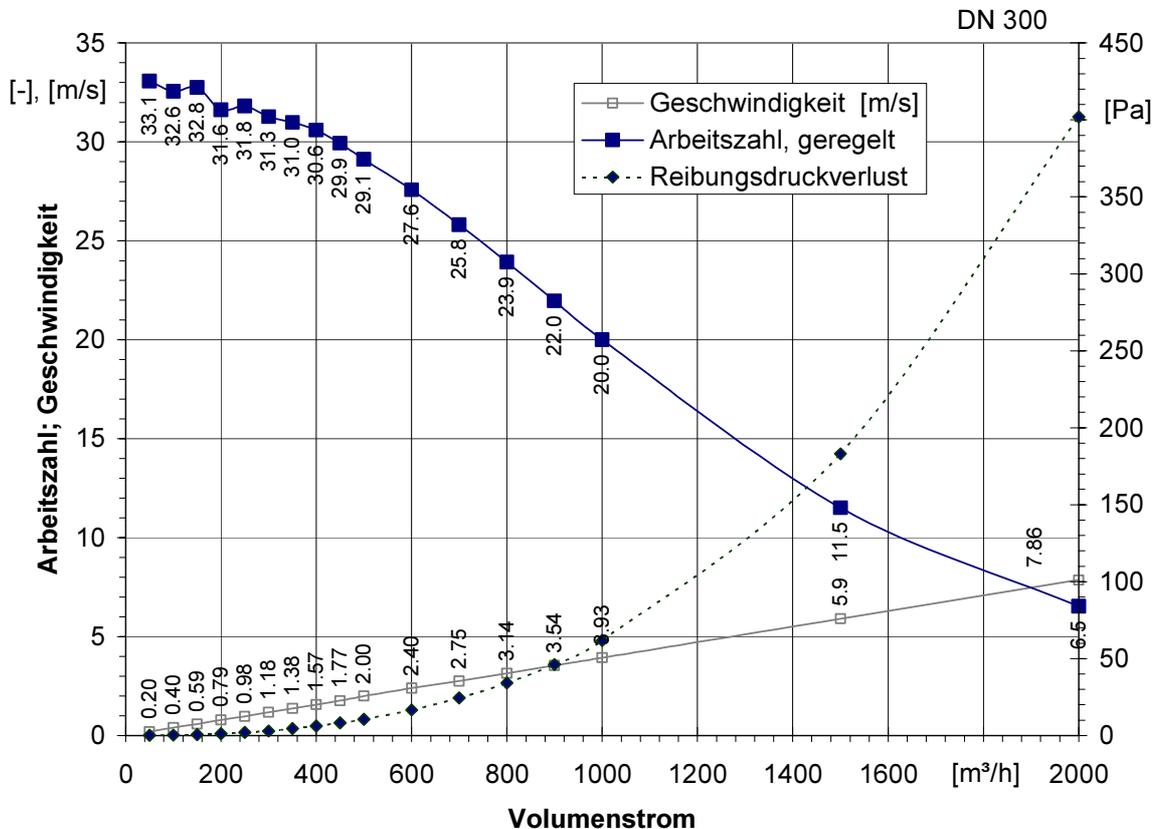
Bei der Berechnung der Leistung eines L-EWT, der im Grundwasser liegt, ist es wichtig zu wissen, welche Fließgeschwindigkeit das Grundwasser hat. Das saisonale Ermüdungsverhalten des L-EWT tendiert im fließenden Grundwasser gegen null. Die Auslegung des L-EWT wird sich daher stark von den üblichen L-EWT in gewöhnlichen, mehr oder weniger feuchten Böden, unterscheiden.

## 1.1 Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit auf das Betriebsergebnis

Unabhängig von den örtlichen Gegebenheiten gilt für jede EWT-Rohrströmung:

Die Luft muss turbulent sein. Eine turbulente Strömung verbessert den Wärmeübergang zur Rohrwand um das z.B. fünffache ( $\alpha_i$ ) gegenüber der laminaren Strömung.

Die vom Ventilator aufzubringende spezifische Leistung sinkt mit größeren Rohrdurchmessern und die Leistungszahl steigt (Bild 1).



**Bild 1** Zusammenhang zwischen Arbeitszahl ( $\beta=Q_{th}/W$ ), Druckverlust (zzgl. 100 Pa Einbauverluste) und Strömungsgeschwindigkeit am Beispiel des Rohrdurchmessers DN 300

Bei der Systemauslegung stellt sich immer die Frage nach der "richtigen" Strömungsgeschwindigkeit der Luft im Rohr. Der Einfluss der Kombination von Volumenstrom und Durchmesser auf die Arbeitszahl kann am Beispiel der Gruppe DN 300 (Bild 1) gezeigt werden. Bei zunehmendem Volumenstrom steigt bei konstantem Durchmesser die Strömungsgeschwindigkeit linear an. Dabei fällt die Arbeitszahl allmählich ab. Dies liegt hauptsächlich an dem quadratischen Anstieg des reibungsbedingten Druckverlustes, der zu immer größeren Ventilatorleistungen führt. Die Auswertung von Simulationen zeigt, dass die besseren (energieeffizienteren) Systeme bei mittleren Strömungsgeschwindigkeit im Rohr unterhalb von 4 m/s zu finden sind.

Allerdings dürfte auch klar sein, dass langsamere Strömungsgeschwindigkeiten bei gegebenem Volumenstrom zu größeren, teureren Rohren führen. Bild 1 zeigt, bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 4 m/s wird bei der angenommenen Regelstrategie eine Arbeitszahl von 20 oder mehr erreicht, also mit 1 kWh Aufwand an Strom können mehr als 20 kWh Wärme bzw. Kälte Arbeit erreicht werden.

Es ist ein systembedingter Vorteil von L-EWT, dass derart hohe Arbeitszahlen überhaupt erreichbar sind. Dem Planer bleibt demnach ein großer Spielraum hinsichtlich der Wahl der Strömungsgeschwindigkeit und Rohrgeometrie, wie viel Energieeffizienz er der Ökonomie zuspricht.

In diesem Zusammenhang zu beachten ist immer auch die Regelstrategie, die so gewählt werden sollte, dass der L-EWT möglichst effizient genutzt wird. Dadurch werden ebenfalls deutliche CO<sub>2</sub>-Einsparungen ermöglicht. Zu vermeiden sind Betriebszustände, bei denen die nutzbare Temperaturdifferenz zu geringeren Energieeinsparungen führt, als für den Antrieb des Systems benötigt wird. Bei relativ hohen Strömungsgeschwindigkeiten (>4 m/s) wird die Regelstrategie daher immer wichtiger.

Hierbei ist deutlich hervorzuheben, dass sich dabei nicht die thermische Leistung (Temperaturspreizung) reduziert, sondern der Antriebsaufwand für den L-EWT relativ zu den thermischen Gewinnen vergrößert wird und folglich die CO<sub>2</sub>-Emission bei der kraftwerksseitigen Stromerzeugung steigen. Auch ist darauf zu achten, dass in dem Volumenstrombereich zwischen 5.000 und 10000 m<sup>3</sup>/h die kritische Größe für Einrohrsysteme beginnt. Ab derartigen Volumenströmen sollte begonnen werden, Register-L-EWT zu prüfen.

## 1.2 Systemvorauswahl mit $v$ und VL

Ziel jeder L-EWT-Planung ist sicherlich, eine energieeffiziente Anlage wirtschaftlich zu erstellen.

Üblicherweise sind ganz am Anfang der Planung die wichtigsten System-Basiskenngrößen wie Temperaturspreizung, Leistung oder Ertrag einer Konfiguration nicht bekannt. Zur Erreichung des Ziels ist aber z.B. die Bestimmung der Aufwandszahl  $e_{\text{lewt}}$  (s.u.) unverzichtbar, die aber nur über aufwändige numerische Simulation bestimmt werden kann. Da gerade bei der Vorauswahl eines geeigneten L-EWT-Registers viele unterschiedliche Varianten in Betracht kommen (Rohranzahl, Durchmesser, Länge, Abstände, Verlegetiefe u.a.), ist hiermit sofort ein umfangreicher und zeitintensiver Simulationsaufwand verbunden.

Die nachfolgend beschriebene einfache Methode soll helfen, hier eine Vorauswahl möglicher Systemkonfigurationen zu finden, die allesamt dem Ziel nahe kommen. Zunächst ist es aber erforderlich, die Aufwandszahl zu definieren:

### **Definition Aufwandszahl $e_{\text{lewt}}$**

*Für die (z.B. bei Wärmepumpen) bisher gebräuchliche saisonale Arbeitszahl  $\beta_s$ , die zur Beschreibung des Verhältnisses von kumuliertem Nutzen (thermischer Ertrag) zum notwendigen Aufwand (elektrischer Antrieb) dient, wird die in den neu erschienenen Normenwerken<sup>1</sup> eingeführte Aufwandszahl  $e$ , hier  $e_{\text{lewt}}$ <sup>2</sup>, definiert.*

<sup>1</sup> [DIN4108-6] und [DIN4701-10]

<sup>2</sup> Index „lewt“, da nur das Teilsystem L-EWT bewertet wird und keine gesamte Prozesskette wie in [DIN 4701]

Bei der EnEV<sup>3</sup> betrachtet der Gesetzgeber die gesamte Heizungs- und Warmwasseranlage als ein System, das gemeinsam bewertet wird. Die dort definierte Energie-Aufwandzahl  $e$  beschreibt das Verhältnis zwischen dem Aufwand an Primärenergie (Erdöl, Erdgas, Kohle etc.) und der erzeugten Wärme für die Beheizung und Warmwasserbereitung.

Ist die Energie-Aufwandzahl hoch, so ist das betrachtete Heizungs-System ineffektiv, weil man einen hohen Aufwand zur Erreichung eines bestimmten Nutzens hat. Je kleiner also die Energie-Aufwandzahl  $e$  ist, desto effektiver und somit besser ist das Gesamtsystem. Eine Energie-Aufwandzahl  $e = 2$  würde bedeuten, dass man die doppelte Menge 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, Energiewandlung, Wärmeverteilung, Regelung usw. berücksichtigt. Die Energie-Aufwandzahl ist also ein umfassender Qualitätsmaßstab für das System Gebäude. In Anlehnung an diese Definition werden hier Überlegungen zur optimierten Auslegung von L-EWT vorgenommen und über eine spezifische Aufwandzahl  $e_{\text{lewt}}$  beschrieben.

Für die Systemvorauswahl wird lediglich die Festlegung des Luftvolumenstroms  $\dot{V}$  benötigt. Wie bereits vorher beschrieben, darf der Druckverlust im L-EWT-System nicht zu hoch werden, daher wird die Strömungsgeschwindigkeit auf kleiner 4m/s festgelegt.

Desweiteren wird der Metervolumenstrom  $VL$  eingeführt. Der Metervolumenstrom in  $\text{m}^2/\text{h}$  ist der Quotient aus **Gesamt**volumenstrom und der addierten Rohrg**esamtl**änge.

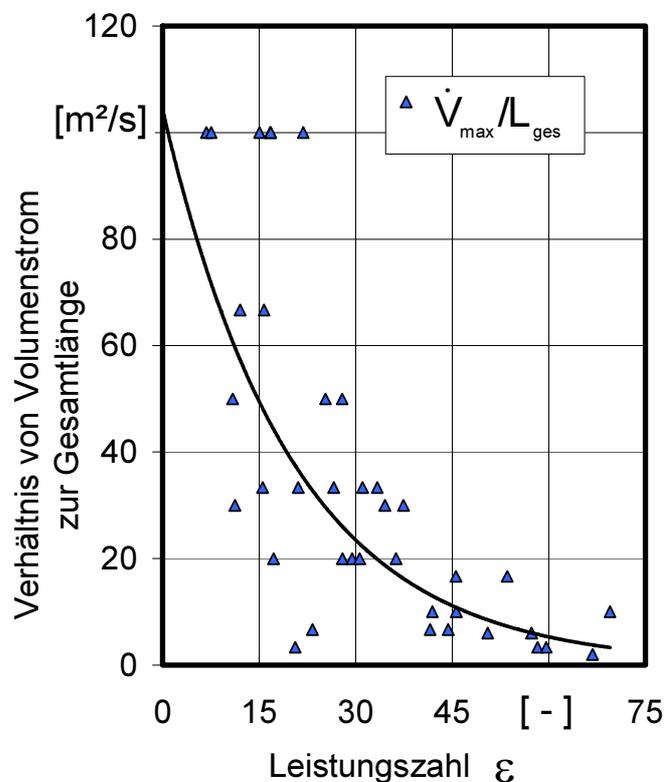
Bild 2 zeigt, dass für gute L-EWT-Auslegungen, also hohe Leistungszahlen, kleine VL-Werte anzustreben sind.

**Bild 2**

Abhängigkeit der Wertebereiche von VL von der Leistungsfähigkeit eines L-EWT

Der Metervolumenstrom  $VL$  in  $\text{m}^2/\text{h}$  ist der Quotient aus **Gesamt**volumenstrom und addierte Rohrg**esamtl**änge somit:

$$VL = \dot{V} / L_{\text{ges}}$$



<sup>3</sup> EnEV Energieeinsparverordnung gültig seit 02/2002

Auf Basis der Auswertung einer großen Zahl von Simulationsvarianten verschiedener L-EWT-Konfigurationen konnten folgende Bedingungen abgeleitet werden:

**Tabelle 3** Bedingungen für die Vorauswahl effizienter L-EWT

Bedingung 1	Bedingung 2
Geschwindigkeitsprüfung [m/s]	Metervolumenstrom [m <sup>3</sup> /(hm)]
$1 \leq v_L \leq 4$	$\dot{V}_{LEWT}^{max} / L_{ges} \leq 40$

Bei Variation der Gesamtlänge  $L_{ges}$  kann nun mit den Bedingung aus **Tabelle 3** ein Bündel von L-EWT-Auslegungen unmittelbar auf ihre grundsätzliche Eignung überprüft werden, ohne dass auch nur ein weiterer Anlagenwert bekannt sein muss. Gerade wenn Register zur Diskussion stehen, kann mit Hilfe von VL und v die Anzahl der diskutierten Varianten bereits im Vorfeld deutlich reduziert werden.

**Beispiel:**

*Ein System soll mit dem Volumenstrom von 50.000 m<sup>3</sup>/h betrieben werden. Der Planer weiß nach den voran gegangenen Erläuterungen, dass er eine Aufteilung des Volumenstroms auf mehrere Register vornehmen muss.*

*Er wählt 20 Rohre mit einem Einzeldurchmesser von  $d=0,5$  m und erreicht somit eine Strömungsgeschwindigkeit pro Einzelrohr von 3,54 m/s bei einem Teilvolumenstrom von jeweils 2500 m<sup>3</sup>/h. Tabelle 3 bestätigt ihm, dass er mit dem gewählten Rohrdurchmesser im Empfehlungsbereich der Durchmesser liegt. Bedingung 1 ist somit erfüllt.*

*Er wählt des weiteren eine Einzelrohrlänge von 50 m. Dies führt zu einer Systemgesamtlänge  $L_{ges}$  von 1000m. Bedingung 2 wäre mit einem Wert von 50 allerdings nicht erfüllt. Erst wenn er die Einzelrohre auf jeweils 65 m verlängert, wäre mit 38,46 der Mindestgrenzwert der Bedingung 2 erreicht. Beide Konfigurationen später numerisch simuliert, würden dieses Ergebnis eindeutig bestätigen.*

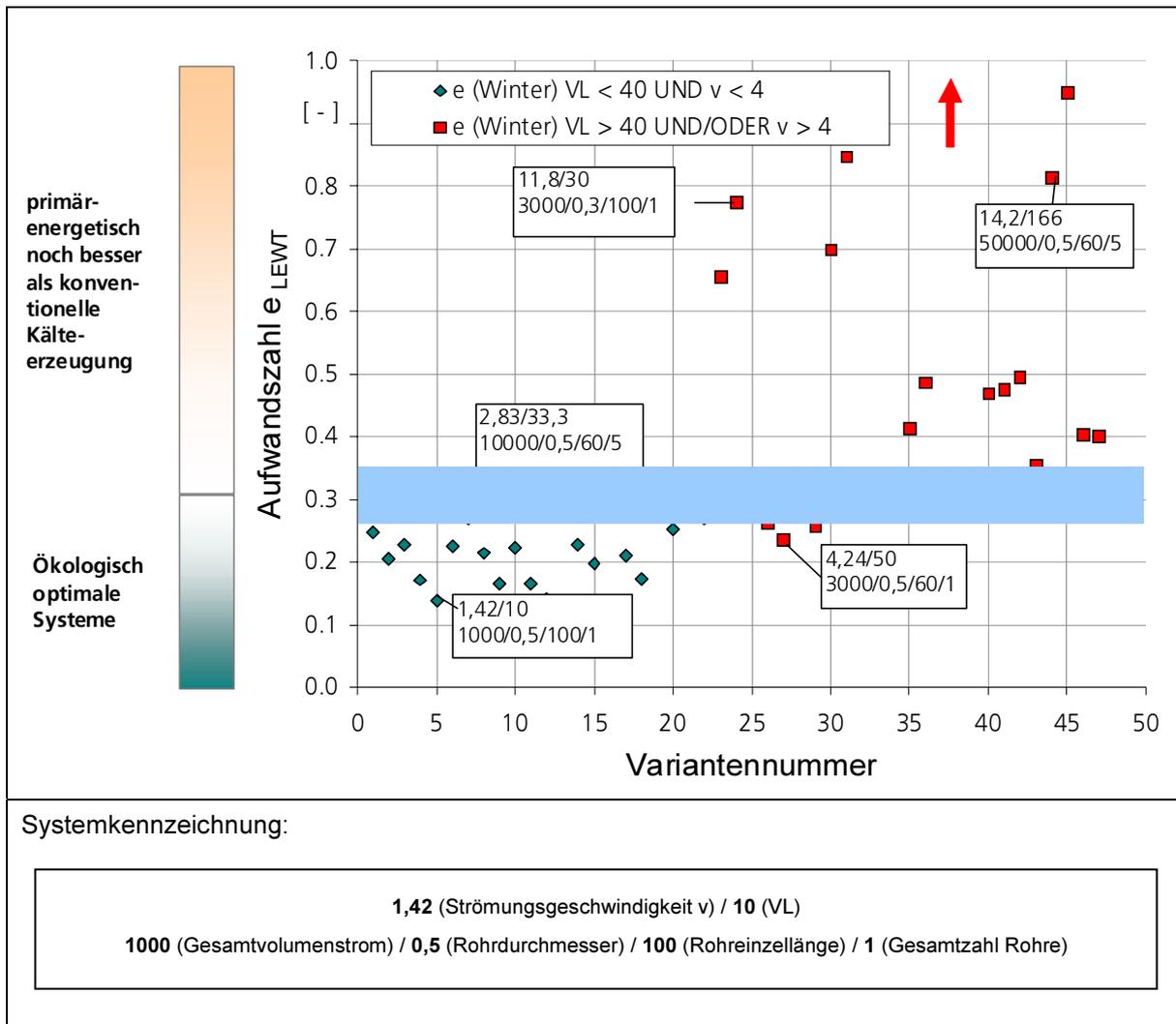
Bild 3 zeigt beispielhaft die Anwendung der Bedingung aus **Tabelle 3** auf knapp 50 verschiedene L-EWT-Systeme. Für jedes System wurde die Aufwandszahl bestimmt und in die Grafik in Abhängigkeit der willkürlichen Variantenummer eingetragen. Die L-EWT-Systeme mit der Raute (grün) halten die Bedingung aus **Tabelle 3** ein, die Systeme mit Quadrat (rot) gekennzeichnet erfüllen zumindest eine Bedingung nicht.

Es ist deutlich zu erkennen, dass alle Systeme, die die Bedingung erfüllen, unterhalb einer Aufwandszahl von ca. 0,3 liegen.

## Technische Planung

Allerdings gibt es auch einige Varianten, im Bereich der Nr. 25 – 33, die die Bedingung nicht erfüllen, aber dennoch gleich gute Aufwandszahlen aufweisen. Die hohe Ereigniswahrscheinlichkeit des beschriebenen Verfahrens zur Vorauswahl ist jedoch erkennbar.

Übrigens zeigt die Bild 3 auch, dass alle dargestellten L-EWT Varianten unterhalb einer Aufwandszahl von 1 liegen und damit deutlich weniger Primärenergie benötigen als jede konventionelle Kälteerzeugung.



**Bild 3** Ermittelte Aufwandszahlen für Systemvarianten einer Volumenstromgruppe als Funktion der Strömungsgeschwindigkeit  $v$  und dem Metervolumenstrom  $VL$

Es soll nochmals deutlich darauf hingewiesen werden, dass das Vorauswahlverfahren Simulationen nicht grundsätzlich ersetzt, sondern lediglich und immerhin die Variantenanzahl reduziert. Vor allem zeigt das Vorauswahlverfahren dem Planer z.B. nicht die Luftaustrittstemperaturen, die er zur weiteren Planung der Anlagentechnik benötigt.

### 1.3 Wirkungsgrad-Verbesserung im Wärmerückgewinnungsgerät (WRG) durch L-EWT

[Paul] hat für die Vorwärmung der Luft mittels L-EWT festgestellt, dass bei einer Außenlufttemperatur von  $\vartheta_{AU}$  von z.B.  $-15^{\circ}\text{C}$  für eine typische Konfiguration eines L-EWT für ein Wohnhaus, die Austrittstemperatur eines L-EWT z.B. bei  $+2^{\circ}\text{C}$  (bei 30m Länge) liegen kann ( $+3^{\circ}\text{C}$  bei 40m Länge). Hierbei kann festgestellt werden, dass der Gesamtwirkungsgrad der Wärmerückgewinnung verbessert wird (Tabelle 4).

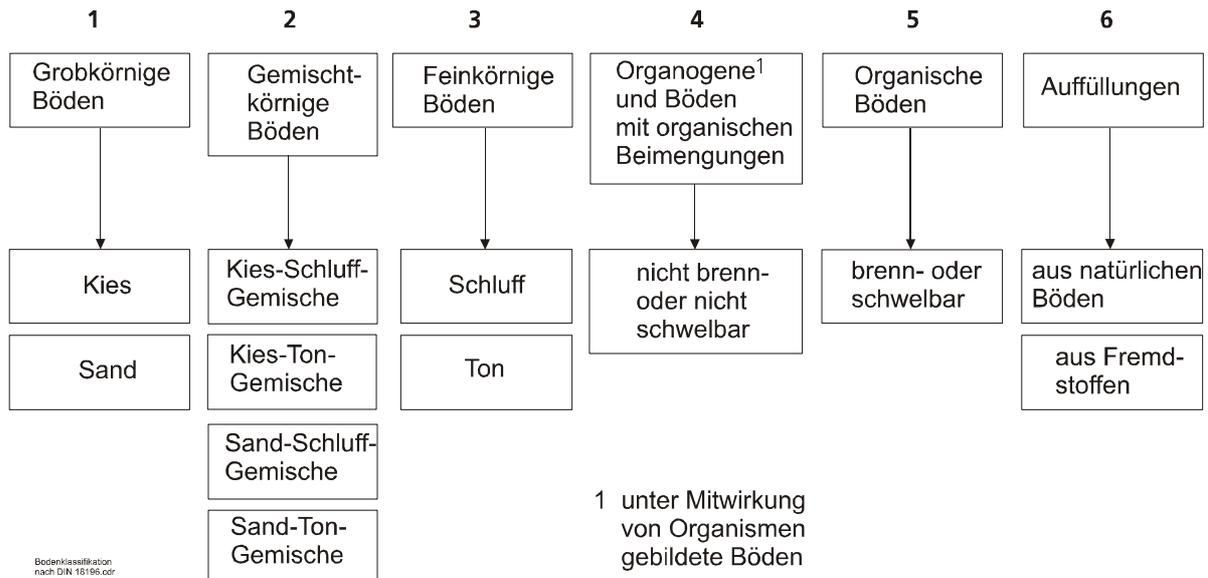
**Tabelle 4** Wirkungsgradeinflüsse nach [PAUL]

	Temperaturwirkungsgrad $\Phi$		Zulufttemperatur $\vartheta_{ZU}$	
	ohne EWT	mit EWT	ohne EWT	mit EWT
a) bei 30m EWT-Länge				
- WRG mit Kreuzstrom-Platten-WT	<b>65%</b>	<b>82%</b>	<b>7,7°C</b>	<b>13,7°C</b>
- WRG mit Gegenstrom-Platten-WT	<b>75%</b>	<b>87%</b>	<b>11,2°C</b>	<b>15,5°C</b>
- WRG mit Gegenstrom-Kanal-WT (Patent PAUL)	<b>90%</b>	<b>95%</b>	<b>16,5°C</b>	<b>18,2°C</b>
b) bei 40m EWT-Länge				
- WRG mit Kreuzstrom-Platten-WT	<b>65%</b>	<b>82,9%</b>	<b>7,7°C</b>	<b>14,°C</b>
- WRG mit Gegenstrom-Platten-WT	<b>75%</b>	<b>87,7%</b>	<b>11,2°C</b>	<b>15,7°C</b>
- WRG mit Gegenstrom-Kanal-WT (Patent PAUL)	<b>90%</b>	<b>95,1%</b>	<b>16,5°C</b>	<b>18,3°C</b>

Ein L-EWT in Verbindung mit einem Lüftungsgerät ist prinzipiell nur die Reihenschaltung zweier Wärmetauscher, bei der im ersten Abschnitt eine Wärmeübertragung aus dem Erdreich und im zweiten Abschnitt eine Wärmeübertragung aus der Abluft realisiert wird. Bei Geräten mit einer hohen Wärmerückgewinnung, z. B. 90 %, wirkt sich die Mehrleistung aus dem Erdreich mit 3 % kaum aus. Bei Geräten mit 70 % Wärmerückgewinnung ergibt sich immerhin eine Mehrleistung von 10 %.

## 1.4 Bestimmung der Bodeneigenschaften

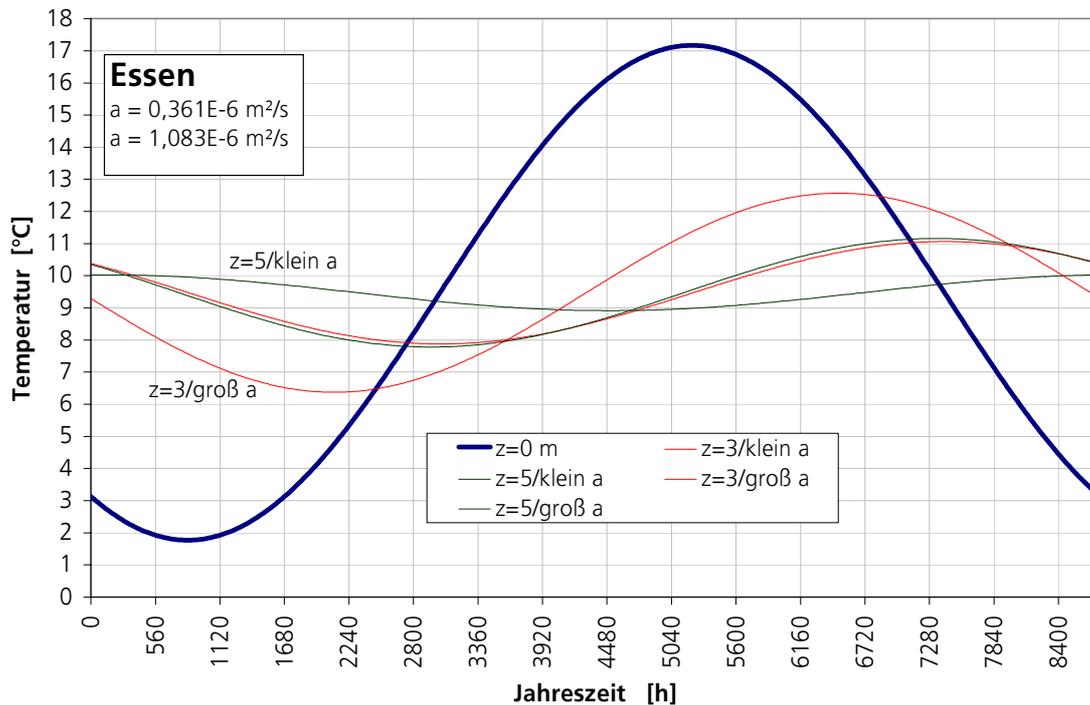
Zu bestimmen sind die thermischen, hydraulischen und mechanischen Eigenschaften des Untergrundes. Die Bodenklassen sind nach DIN 18196 zur Planung der Verlegearbeiten nach Bild 4 eingeteilt:



**Bild 4** Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke, DIN 18 196 Erd- und Grundbau

Details zur Bodenbestimmung sind im Kapitel Mathematische Details im Anhang zu finden. Eine weitere Hilfe stellen Messungen der thermischen Eigenschaften des Bodens mit Meßsonden dar, die durch spezialisierte Fachfirmen durchgeführt werden können. Sind die meteorologischen Randbedingungen am Standort bekannt, lassen sich die Bodentemperaturprofile berechnen.

Diese sind im wesentlichen von der Verlegetiefe und der Temperaturleitfähigkeit  $a$  abhängig. Zu empfehlende Verlegetiefen liegen zwischen 3 und 5 Metern. Die Werte der Temperaturleitfähigkeiten liegen je nach Bodenart zwischen  $0,4$  und  $1,1 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}^2$  (schwer/feucht, leicht/trocken). Für den oberen und unteren Grenzwert für  $a$  ergeben sich für verschiedene Verlegetiefen folgende Bodenprofile z. B. für den Standort Essen.



oberer Grenzwert $a = 1,0833E-6 \text{ m}^2/\text{s}$ $\rho=2000 \text{ kg/m}^3$ , $\lambda=2,9$ , $c_{\text{Erd}}=1340 \text{ J/kg/K}$	unterer Grenzwert $a: 0,3611E-6 \text{ m}^2/\text{s}$ $\rho=1540 \text{ kg/m}^3$ , $\lambda=0,5$ , $c_{\text{Erd}}=900 \text{ J/kg/K}$
--	---

**Bild 5** Vergleich der Bodentemperaturprofile zwischen den Grenzwerten der Temperaturleitfähigkeit  $a$  bezogen auf DIN 4710

Die thermischen Kennwerte des Bodens sind die Dichte, die Wärmeleitfähigkeit, und die spezifische Wärmekapazität. Sie bestimmen die Größe der Amplitude des Bodentemperaturprofils und somit das theoretische Nutzpotential. Der Einfluss der Feuchtigkeit, besonders auf die Wärmeleitfähigkeit verschiedener Böden, ist sehr ausgeprägt und muss bei der Anlagenplanung berücksichtigt werden [4].

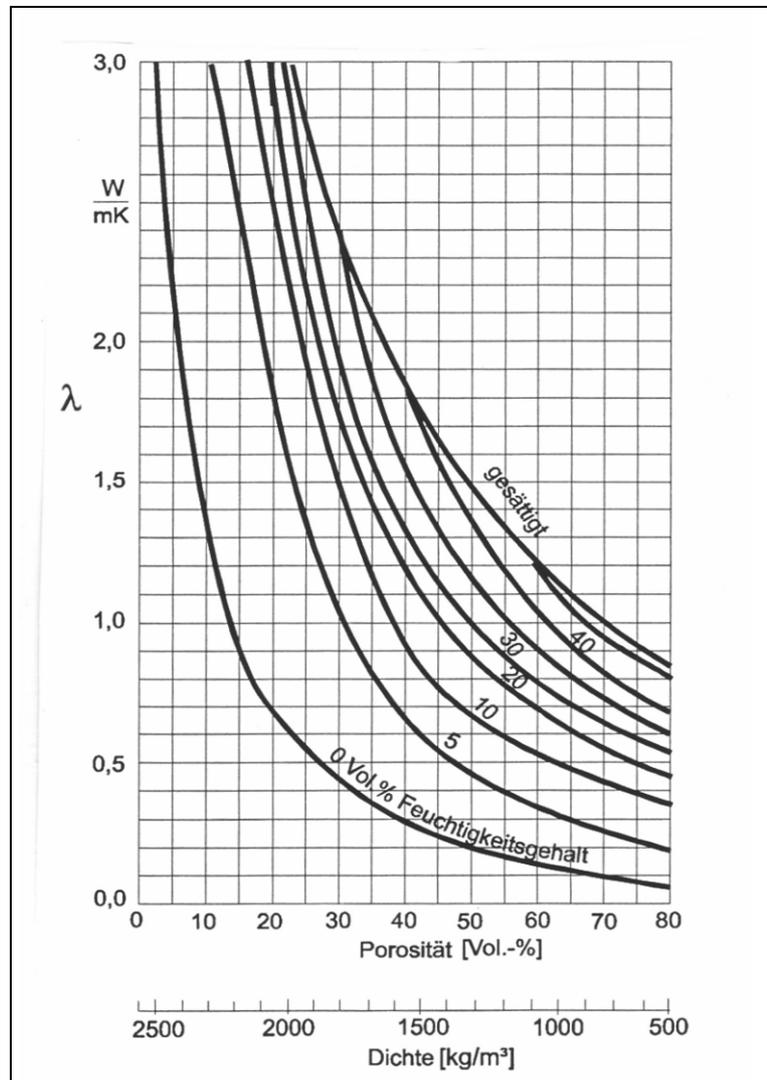
**Tabelle 5** Wertebereiche der wichtigsten thermischen Bodenparameter

	von - bis	
Wärmeleitfähigkeit $\lambda$	<b>0,3 - 2,9</b>	W/(mK)
Dichte $\rho$	<b>1100 - 2000</b>	kg/m <sup>3</sup>
Wärmekapazität $c$	<b>840 - 1600</b>	J/(kgK)
Temperaturleitfähigkeit $a$	<b>0,5 - 1,4 *10<sup>6</sup></b>	m <sup>2</sup> /s

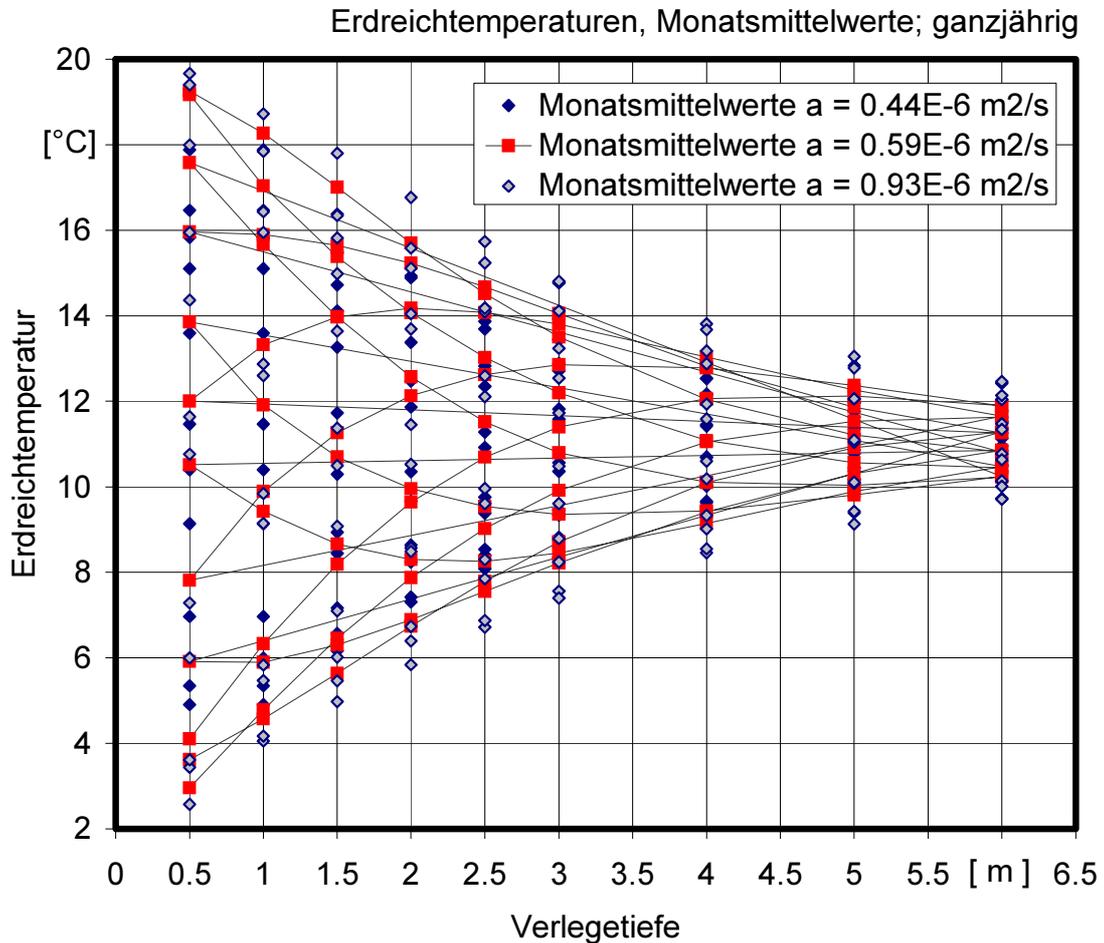
Neben der Schwierigkeit, die o.a. thermischen Bodenkennwerte zu ermitteln "stört" die, meist schwer zu bestimmende, Bodenfeuchtigkeit zusätzlich eine zuverlässige Berechnung des Ertragsverhaltens von L-EWT [5].

### Bild 6

Wärmeleitfähigkeit von Erdreich bei 20°C (Paul) VDI Wärmeatlas



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 7 bis 9 dargestellt.



**Bild 7** 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 7 bis 9 sind somit von grundsätzlicher Bedeutung für die erste Planungsstufe zur Auslegung von L-EWT.**

Es können für jeden Monat die auf Basis der realistisch vorkommenden thermischen Parameter ALLER Bodenarten, die grundsätzlich vorkommen können, die Temperaturbereiche für die Vorplanungsphase -für die relevanten Verlegetiefen- abgelesen werden.

Zeitbereich Heizperiode

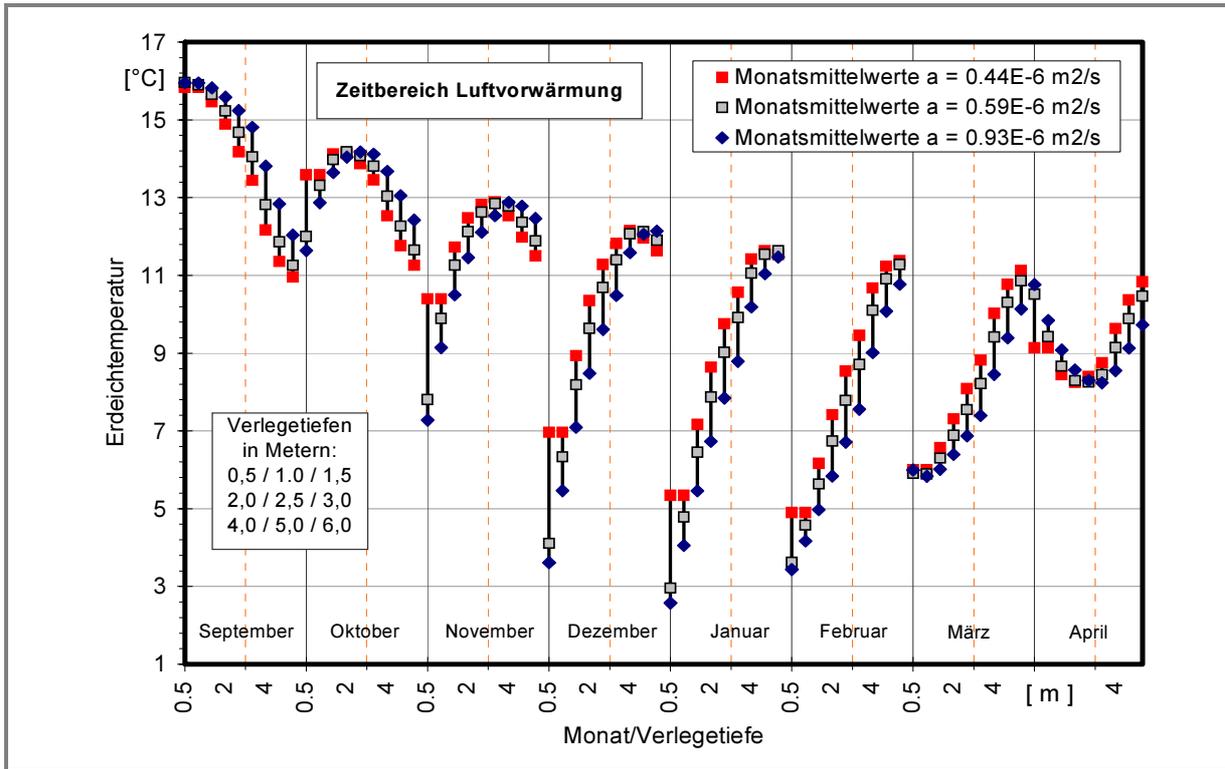


Bild 8

Zeitbereich Kühlperiode

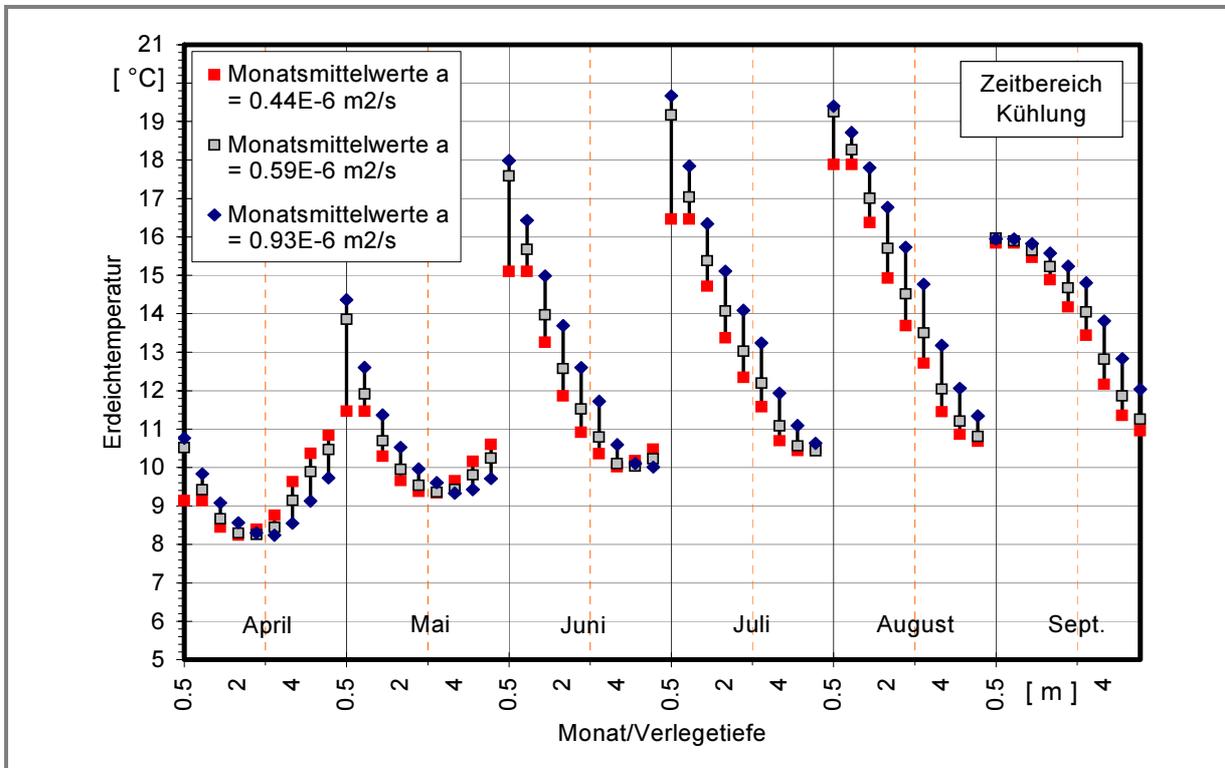


Bild 9 Basisauslegungsdiagramme in der Vorplanungsphase: Mögliche ungestörte Erdreichtemperaturbereiche in Abhängigkeit von Bodenart und Verlegetiefe für einen mittleren meteorologischen Standort in Deutschland

### 1.4.1 Widersprüchliche Aussagen in der Literatur über Bödenfeuchte

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 in 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 sind<sup>4</sup>. Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ , aber auch die Dichte  $\rho$  und die spezifische Wärmekapazität  $c$  hängen deutlich vom Feuchte-sättigungsgehalt 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 und Materialforscher** unterschiedliche Antworten.

Die Anwendung der zusammengestellten Informationen ermöglichen die Abschätzung der thermischen Parameter des vorhandenen Bodens am Bauort. So können aus dem bei größeren Bauprojekten vorhandenen Bodengutachten die thermisch-hydrogeologischen Verhältnisse über die geophysikalischen Angaben eingegrenzt werden. Aus der Angabe der Wichte kann die Dichte direkt ermittelt werden. Die Hauptbestandteile des Bodens werden demnach bekannt sein, die Feuchtigkeitsverhältnisse können über den Durchlässigkeitsbeiwert ( $k_f$ -Wert) abgeschätzt werden. Nach Zuordnung des Bauortes zu einer Klimaregion, (z.B. aus [24]) kann über die beschriebene periodische Beziehung [6, 13] auf die Temperaturprofile im Erdreich geschlossen werden.

Eine weitere Hilfe bietet hierbei das Erstellen einer sog. Bodenansprache und das Führen eines Schichtenverzeichnisses nach DIN 4022 [25]. Zu beachten ist, dass sich die Bodenverhältnisse nach Wiederauffüllen der Baugrube etwas anders darstellen, als sie zuvor bestimmt worden sind. Die Verfüllung kann zudem, in Abstimmung mit der Baufirma, mit Anteilen aus bestimmten Böden, die auf Baudepots gelagert sind, vermischt werden, so dass thermische Wunscheigenschaften erzielt werden können. Zwingend notwendig ist, dass die wesentlichen Bodenparameter vor Beginn der EWT-Auslegungsplanung bekannt sind. Somit kann nicht gewartet werden, bis der Bodenaushub zugänglich ist. Schließlich muss die Anlagenkonfiguration bekannt sein, bevor mit dem Aushub begonnen wird.

Weitere Informationen sind bei den Geologischen Landesämtern [26] oder der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft [23] zu erhalten. Je nach Bauort, insbesondere über das Ruhrgebiet, sind Stadtbodenkarten vorhanden. Diese können dabei helfen, die in urbanen Zentren vorhandene "chaotische Schichtung" [27] zu interpretieren.

<sup>4</sup> Dr.H.H.Becher Techn. Univ. München Lehrstuhl für Bodenkunde, 85350 Freising, Schriftliche Mitteilung 4.2.1999

## 2 L-EWT Ausführung

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 Wartung vorhanden sein. Sofern es die Gegebenheiten auf dem Grundstück zulassen, sind bei der Planung lange gerade Rohre mit möglichst wenig Formstücken zu verwenden. Dies ist strömungstechnisch und auch ökonomisch vorteilhaft.

Es ist bekannt, dass erdverlegte Abwasserrohre oftmals nicht vollständig wasserdicht verlegt sind bzw. im Laufe der Zeit durch Setzungen etc. undicht werden. Dies hat beim L-EWT zur Folge, dass Regen- oder Grundwasser eindringen und zur Verschmutzung im Rohr führt. Es ist also auf eine dauerhaft wasserdichte Ausführung aller Anschlüsse zu achten.

Die Verlegung des Erdwärmetauschers ist auf verschiedene Arten möglich:

- **Frei in den Außenanlagen**
- **Bei Gebäuden mit Unterkellerung: in der Baugrube**
- **Unter der Bodenplatte**

Kombinationen dieser drei Möglichkeiten sind natürlich möglich.

Um einen zusätzlichen Graben und damit verbundene Mehrkosten für die erdverlegten Rohre zu vermeiden, wird der Erdwärmetauscher häufig auf dem Grund der Baugrube in ca. 1 bis 3 m Tiefe um das Gebäude verlegt.

Zu beachten ist dabei, dass eine gebäudenaher Verlegung (Bodenplatte oder Baugrube) zu einem Wärmestrom zwischen Gebäudeuntergeschoss (Tiefgarage, Keller, Nutzräume) und L-EWT führt. Der Wärmestrom ist abhängig vom Dämmstandard des Untergeschosses. Je nach Nutzung des Untergeschosses kann es hier positive und negative Effekte geben, die der Planer im Team ansprechen sollte.

### **Beispiel:**

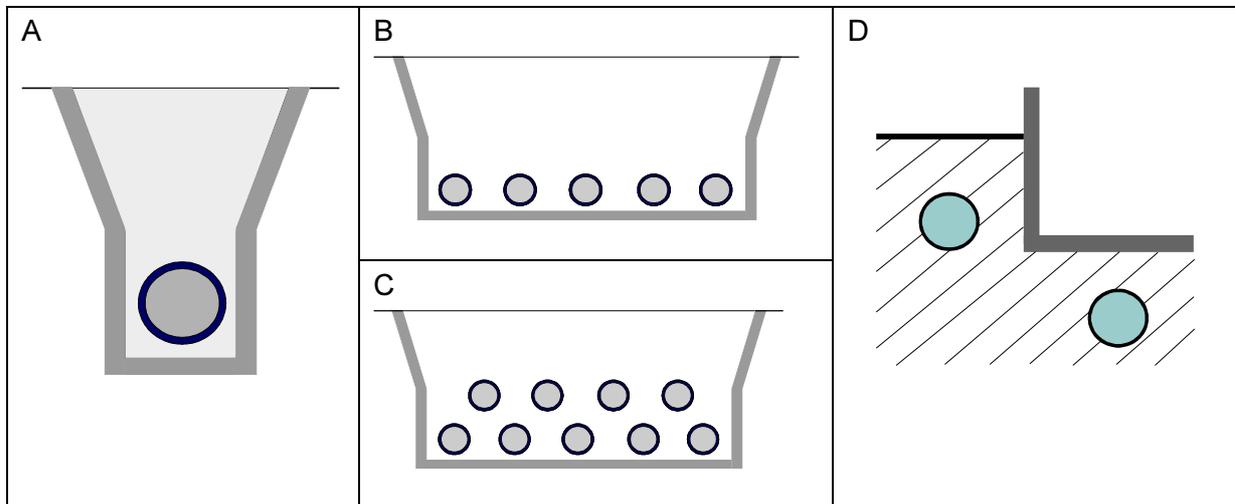
*Ein im Winter betriebener L-EWT, naher einer nicht ausreichend gedämmten Wand zu einem beheizten Untergeschoss, wird wärmere Luftaustrittstemperaturen fördern als ein frei verlegter L-EWT. Dies ist dann aber keine Energieeinsparung oder ein besonders effizienter L-EWT.*

*Ein L-EWT, naher einer Tiefgaragenwand, wird im Winter und Sommer eine geringere Leistung haben als ein frei verlegter L-EWT.*

Die Beispiele sollen zeigen, dass eine L-EWT-Planung einer erhöhten Teamarbeit bedarf.

Die Rohrregister-EWT können ähnlich den Grundleitungen unter der Bodenplatte des Gebäudes angelegt werden. Da hier allerdings nicht zwangsläufig eine Durchfeuchtung des Erdreichs durch Regen stattfindet, werden L-EWT besser unterhalb von vorhandenen Freiflächen z.B. einem Parkplatz angeordnet. Hier ist darauf zu achten, dass der Parkplatz nicht schwarz asphaltiert ausgeführt wird, da ansonsten erhebliche zusätzliche Wärmeenergie im Erdreich gespeichert wird und der Kühlertrag sinkt.

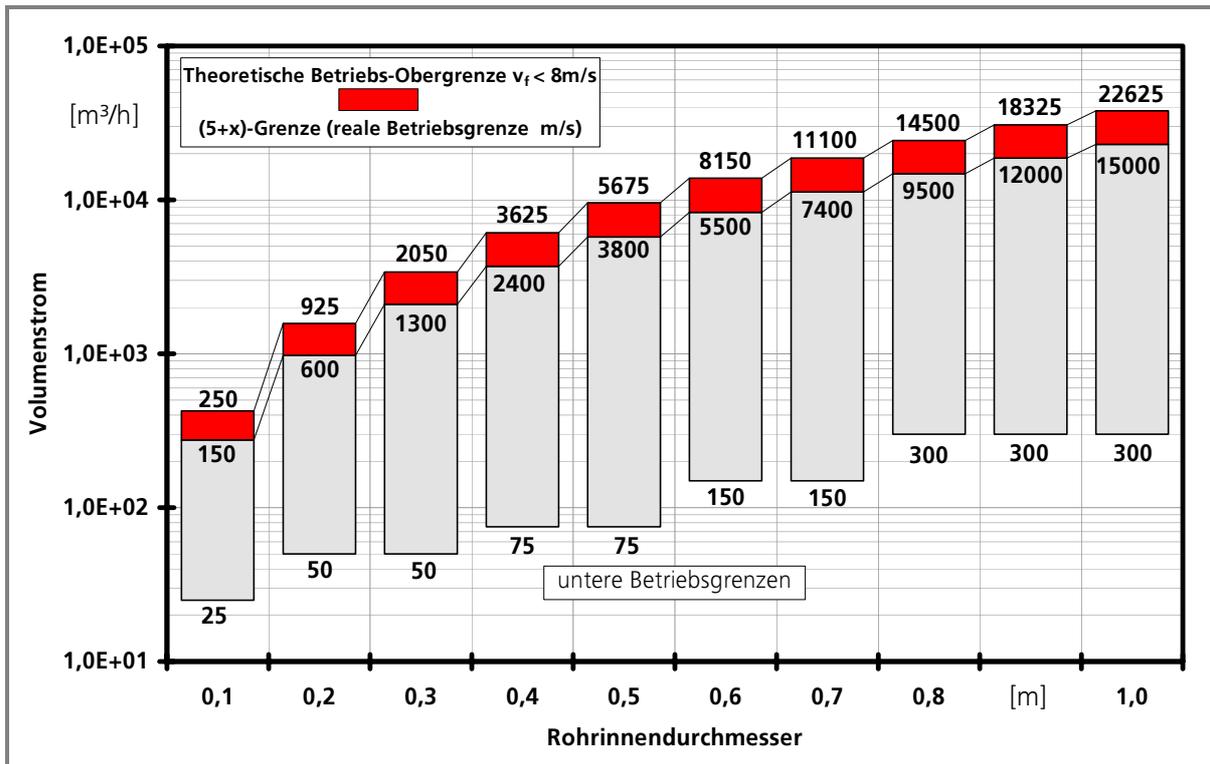
Die Rohre können auf verschiedene Weise verlegt werden (Bild 10), wobei der Abstand der Rohre zueinander von der gegenseitigen Einflussbreite bestimmt wird. Diese kann nur mit dynamischen Simulationsprogrammen hinreichend genau ermittelt werden.



**Bild 10** Möglichkeiten der Rohrverlegung

Ist es aus konstruktiven Gegebenheiten (z.B. Platzmangel) nicht vermeidbar, den notwendigen Abstand der L-EWT-Rohre einzuhalten, kann es erforderlich werden, einen Wärmestrom zwischen den L-EWT-Rohren mittels Dämmplatten zu verhindern. Dies gilt aber nur für den in Bild 11 dargestellten Fall. Über die Rohrlänge der Dämmung sinkt dabei zwar der Ertrag des L-EWT, da jedem Rohr ein Halbraum aus Erdreich fehlt, aber der wärmetechnische Kurzschluss wäre wesentlich schlechter. Insbesondere bei einer unvermeidlichen Parallelführung am Luftein- und -austritt des EWT, wo die Temperaturdifferenz am größten ist, sollte die Dämmung zwischen den Rohren möglichst 1m unterhalb der Rohrsohle und auch 1m oberhalb des Rohres geführt werden. Für andere Fälle, bei denen Rohr ggf. zu nah beieinander liegen (z.B. Bild 10, Fall B und C), aber die Luft in der gleichen Richtung geführt wird, ist selbstverständlich keine Dämmung zwischen den Rohren einzubringen.





**Bild 13** Betriebsbereiche der Volumenströme als Funktion des Rohrdurchmessers

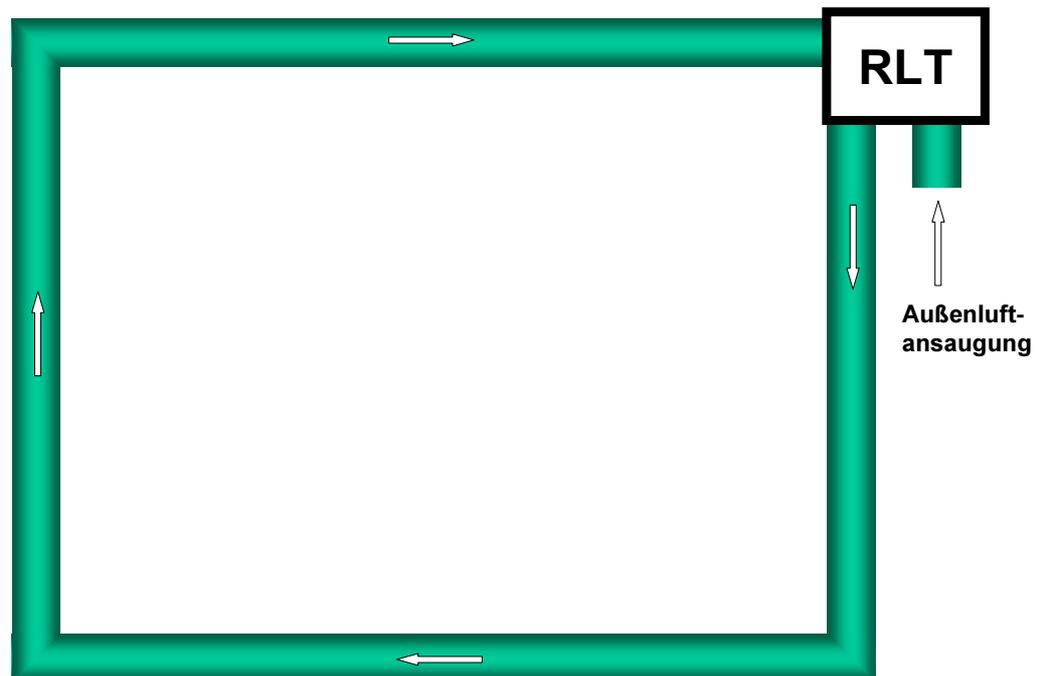
Da jeder L-EWT einer raumluftechnischen Anlage vorgeschaltet ist, mündet der Luftaustrittskanal stets in der Lüftungszentrale. Weil ein L-EWT meist nicht ganzjährig betrieben wird, da er z.B. in den Übergangszeiten keinen Nutzen bietet, ist stets eine direkte Luftansaugung für die Lüftungszentrale erforderlich. Die Ansaugbauwerke sind, zumindest bei größeren Anlagen, relativ kostspielig, weshalb sie meist nur einmal vorhanden sind. In den Zeiten der L-EWT-Nutzung wird also das selbe Ansaugbauwerk auch für den L-EWT genutzt.

### 2.1.1 Einzelrohr-L-EWT

Einzelrohr-EWT besitzen relativ große Durchmesser und werden üblicherweise aus Betonrohren (Abwasserrohre / Kanalrohr) errichtet. Durch die großen Dimensionen bieten diese Rohrleitungen die relativ einfache Möglichkeit einer hygienischen Kontrolle und Reinigung durch Begehen bzw. Bekriechen. Der Werkstoff Beton bietet den Vorteil, dass er sehr gute wärmetechnische Eigenschaften besitzt wie in Kapitel 2.3 beschrieben, allerdings ist er wegen seiner porösen Oberfläche hygienisch nicht unbedenklich, da sich in den Poren, anders als auf glatten Rohroberflächen (Kapitel 5), Keime besser festsetzen können.

**Bild 14**

Typischer  
Einrohr-  
L-EWT

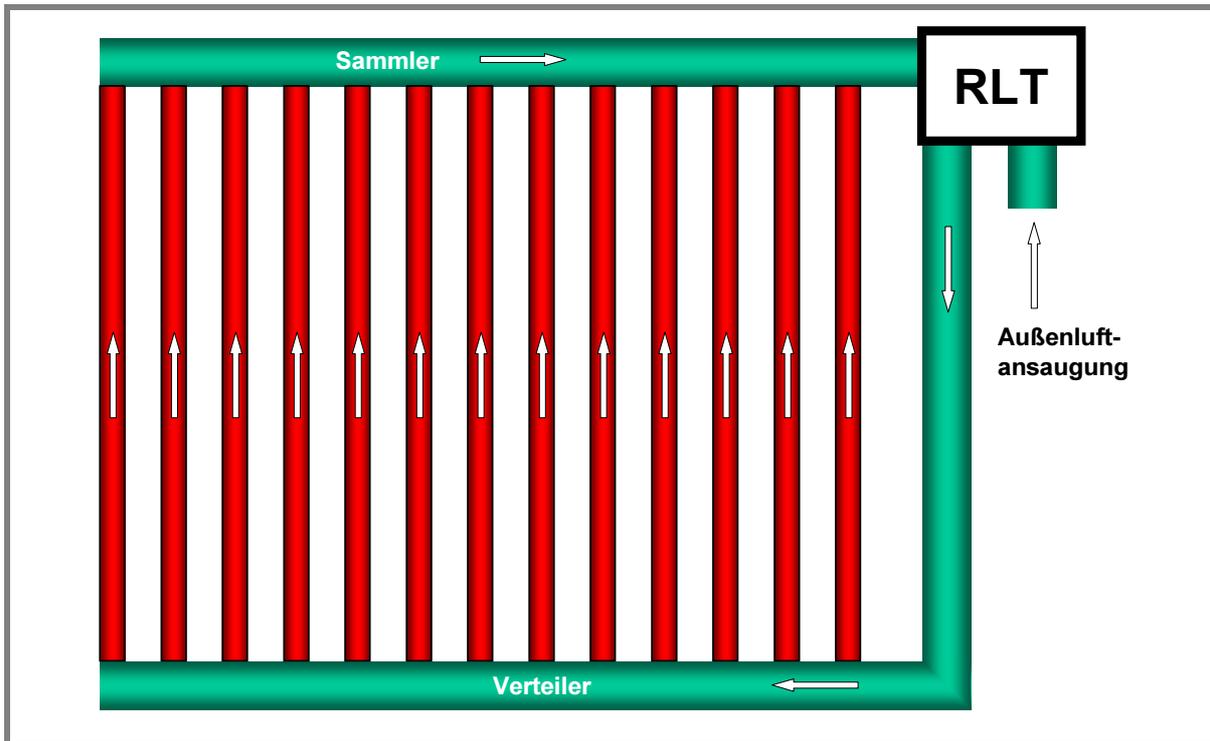


### 2.1.2 Rohrregister-L-EWT

Rohrregister-L-EWT bestehen aus mehreren parallel verlegten Einzelrohren. Für die konstruktive Lösung eines Register-L-EWT bietet sich der Bau zweier Hauptkammern zum Verteilen und Sammeln der Luft an. Diese sollten begehbar sein, um eine gute Kontrolle und Reinigung zu gewährleisten. Von den begehbaren Verteilern und Sammlern sind dann die möglichst gerade verlegten dünneren Registerleitungen gut zugänglich.

Bei einer häufig rechteckigen Grundfläche stellt sich die Frage der Anordnung des Registers auf dieser Fläche. Der L-EWT endet immer in der Lüftungszentrale, von wo die Verteilung der konditionierten Luft ins Gebäude erfolgt. Bild 15 zeigt einen typischen Rohrregister L-EWT, wobei die dargestellte Planung hydraulisch schwierig ist.

Je nach Durchmesser und Durchmesser Verhältnis der Rohre kann es zu nicht unerheblichen Druckdifferenzen zwischen den einzelnen Registerrohren kommen, wodurch diese nicht mit den gleichen Teilvolumenströmen versorgt würden. Die gleichmäßige Durchströmung der Rohre ist aber bei einem Register L-EWT zwingend erforderlich, weil sonst die Übertragungsleistung des L-EWT sinkt. Die Rohre mit den höheren Volumenströmen kühlen oder erwärmen das Erdreich schneller als die geringer durchströmten Rohre.

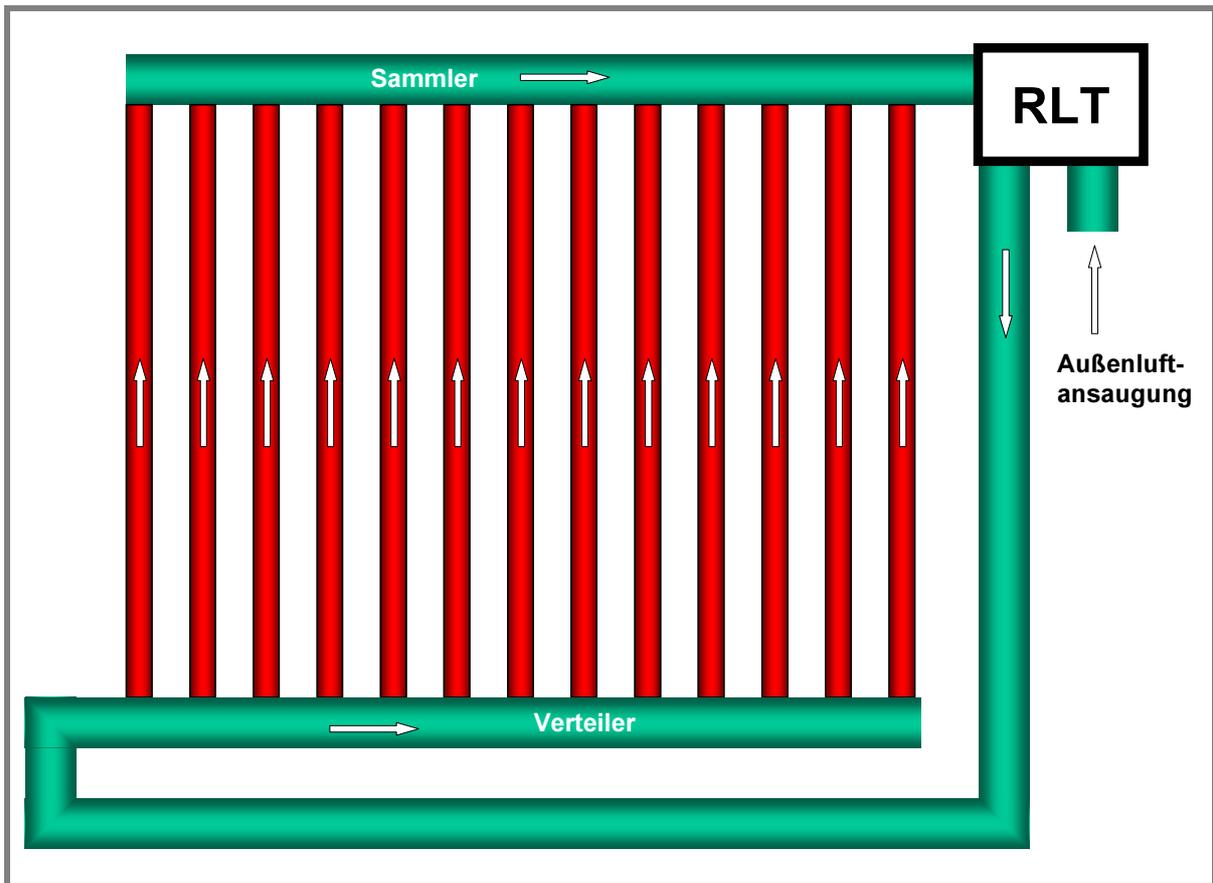


**Bild 15** Typischer Rohrregister-L-EWT (hydraulisch schwierig!!)  
Registerrohre, Sammler und Verteiler

Einbauten wie Volumenstromregler können nur bei sehr großen L-EWT eingesetzt werden, da sonst Probleme bei der Reinigung des Registers auftreten würden, zudem führen diese zu Druckverlusten, die an anderer Stelle teuer vermieden wurden. Eine sinnvolle Möglichkeit ist eine angepasste Registerrohr-Dimensionierung mittels detaillierter Rohrnetzrechnung. Hierbei ist darauf zu achten, dass auch die kleinste gewählte Dimension gut zu reinigen ist. Bei der Reinigung sind dann entsprechend der unterschiedlichen Rohrdurchmesser die passenden Reinigungskörper zu verwenden. Praktischerweise ist diese Variante ebenfalls nur bei relativ großen, begehbaren Sammlern und Verteilern sinnvoll.

Bei dem zu favorisierenden System für mittlere (Anlagen mit Sammlern/Verteilern < 1m) L-EWT-Registeranlagen werden die Registerrohre in der Art verlegt, dass jede Teilstreckenlänge Verteilereintritt – Registerrohr - Sammleraustritt immer gleichlang ist (Verlegung nach Tichelmann), wodurch in jedem Registerrohr der gleiche Druck und damit der gleiche Volumenstrom entsteht. Bild 16 zeigt das L-EWT Design nach Tichelmann.

Außerdem ist bei diesem Rohr darauf zu achten, dass der Anschluss an den Sammler über einen Bogen direkt am Ende des Sammlers erfolgt, da durch die sonst auftretenden Verwirbelungen der Druckverlust in diesem Strang zu hoch würden. Die Abschlussplatte des Sammlers ist mit einer Öffnung in der Größe des Registerrohres zu versehen.

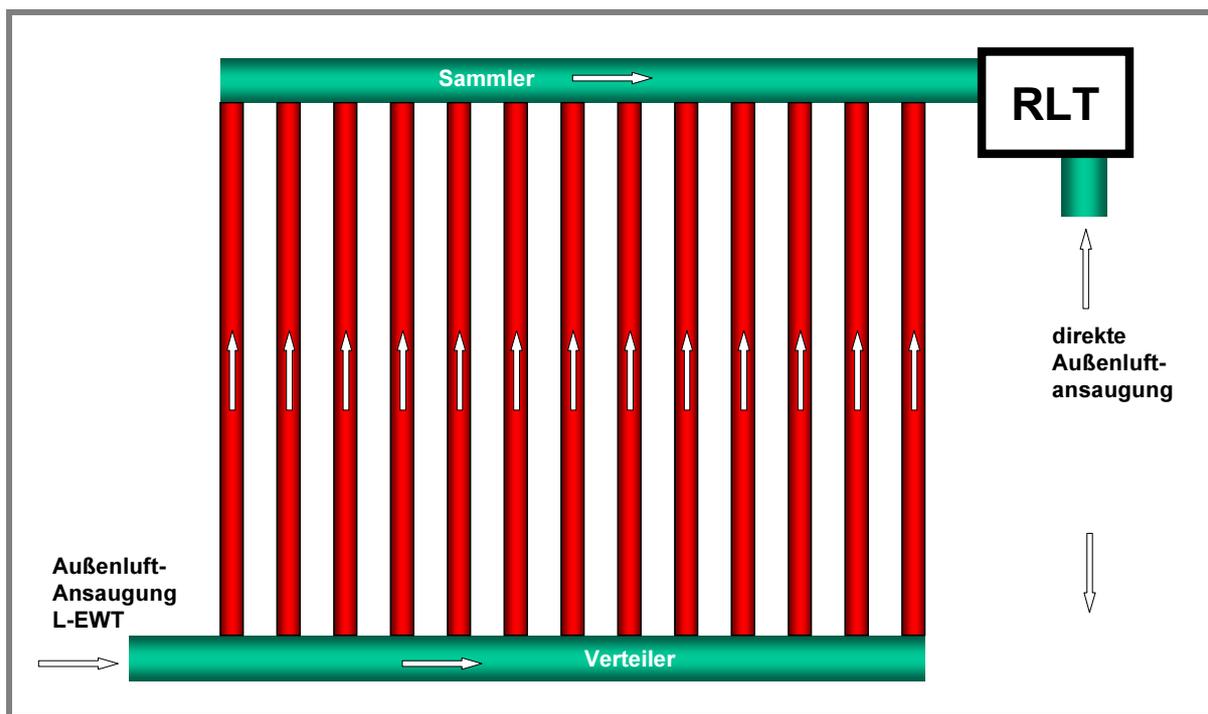


**Bild 16** Typischer Rohrregister L-EWT (hydraulisch ausgeglichen über „Tichelmannschleife“ in der Zuluft) Registerrohre, Sammler und Verteiler

Es wird deutlich, dass das Prinzip aus Bild 16 bedingt durch die „Tichelmannschleife“ einen erhöhten Aufwand an Material und Erdaushub für das Verteilrohr verursacht, wobei es gleichwertig auch möglich wäre die „Tichelmannschleife“ im Sammler umzusetzen.

In jedem Fall stellt die „Tichelmannschleife“ einen Teil-L-EWT als Einrohrsystem dar, der hinsichtlich der Aufgabe des L-EWT in die Leistungsberechnung einzubeziehen ist. Je nach Größe der Gesamtanlage kann es hier durchaus Umsetzungsprobleme mit dem Einrohr-Teilstück geben. Die Probleme beziehen sich hauptsächlich auf die Dimension des Teilstücks und die damit verbundenen Kosten. Bei sehr großen Anlagen kann es daher günstiger sein, die hohen Kosten eines zweiten Ansaugbauwerks zu tragen, aber so das Einrohr-Teilstück der Tichelmann-Anordnung aus Bild 16 einzusparen. In Bild 20 ist ein derartiger Register-L-EWT dargestellt.

Üblicherweise wird der Ventilator des L-EWT dann separat in das zugehörige Ansaugbauwerk integriert, damit der EWT im Überdruck betrieben werden kann.



**Bild 17** Typischer Rohrregister L-EWT (hydraulisch ausgeglichen über „Tichelmann“ mit 2 Ansaugbauwerken) Registerrohre, Sammler und Verteiler

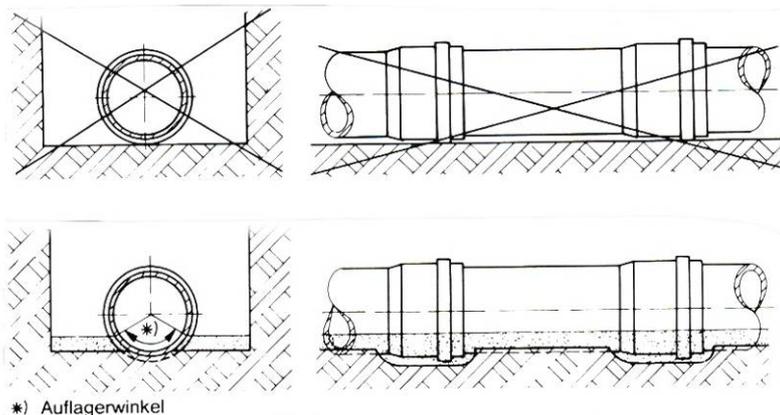
## 2.2 Bauausführung

Bei der Verlegung eines L-EWT sollte das Erdreich für einen guten Wärmeübergang eng am Rohr anliegen. Bei kritischen Böden, wie z. B. Lehm, kann hier auch mit Sand nachgeholfen werden. Ferner muss das sich unter dem Rohr befindliche Material verfestigt sein, um ein Absinken und Beschädigen des Rohres zu verhindern.

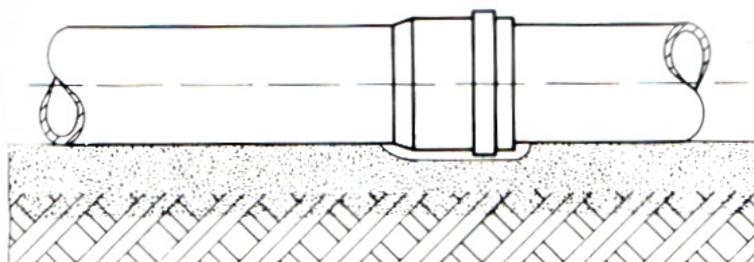
Die Ausbildung des Rohraufagers (Bild 18) ist eine Teilarbeit des Einbettens der Rohrleitung. Die Art der Auflagerung ist von wesentlichem Einfluss auf die Tragfähigkeit der Rohrleitung. Die Rohre sind daher so zu verlegen, dass weder Linien- noch Punktlagerung auftritt. Für die Muffen sind ausreichend große Vertiefungen herzustellen. Das Rohrauflager muss frostfrei sein.

Eine Verlegung von Rohren auf ebener Grabensohle ist üblich. Der vorgesehene Auflagerwinkel kann durch nachträgliches Verdichten im Bereich unter den Kämpfern (Zwickelverdichtung) hergestellt werden. Hierzu eignen sich Sand, Feinkies und stark sandige Kiese mit Größtkorn 20 mm. Sandige Kiese sind nur dann geeignet, wenn eine gute Verdichtung erreichbar ist. (Zum Beispiel mit Sandanteil  $\geq 15\%$  und mit einem Ungleichförmigkeitsgrad  $U \geq 10$ ). Schwach sandige Kiese sind nicht geeignet. Wird die Leitung in anstehendem, bindigen Boden auf ebener Grabensohle verlegt, empfiehlt es sich, das Rohrauflager entsprechend der Form der Rohraußenwand auszubilden. Der in der statischen Berechnung eingesetzte Auflagerwinkel ist zu berücksichtigen.

Beim Übergang zwischen Bodenarten unterschiedlicher Setzungseigenschaften sind Sicherungsmaßnahmen vorzusehen, z.B. Steinvorlage mit Feinkiesschüttung. Wegen der Notwendigkeit, das im Sommer anfallende Kondensat sowie das durch ungewollte Undichtigkeiten eintretende Wasser sicher abführen zu müssen, ist der L-EWT mit Gefälle über die gesamte Länge mit gleichmäßiger Neigung zu verlegen.



**Bild 18**  
Ausbildung der  
Rohraufleger



Bei Arbeiten in Gräben und Gruben müssen allseitig unbelastete Schutzstreifen von 60 cm Breite vorgesehen sein (Ausnahme: Gräben bis 80 cm Tiefe - nur einseitig).

In Abhängigkeit von der Standfestigkeit des Bodens sind bei Tiefen von mehr als 1,25 m die Gruben-/Gräbenwände abzuböschen bzw. Verbauungen vorzunehmen.

Erbaumaschinen und Fahrzeuge haben in Abhängigkeit zur Bodenbeschaffenheit einen entsprechenden Sicherheitsabstand zum Graben-/Grubenrand einzuhalten

Eine häufige Praxis, die Rohre in ein Feinkiesbett zu lagern, ist nicht sinnvoll, da sich bei Austrocknung des Sandes die Wärmeleitung deutlich verschlechtern kann. [Hiller] empfiehlt als Füllmaterial Lösslehm oder aber Feinstsand mit Korngrößendurchmessern von 63 bis 125  $\mu\text{m}$ ; dieser gilt als dauerfeucht. Der Untergrund, auf dem die Rohre verlegt werden, muss verdichtet werden, damit sich das Rohrsystem nicht mit der Zeit lokal absenken kann, was zu Ansammlungen von Kondenswasser in den Rohren führen würde. Andererseits darf nicht so stark verdichtet werden, dass eine Wassersperre entsteht. Gegebenenfalls staut sich dort das Wasser, das durch Lateral- und Vertikalströmungen transportiert wird.

Die Verlegung des L-EWT, besonders aber der gesamte Auffüllvorgang, sollte unbedingt beaufsichtigt werden, dadurch können negative Folgeerscheinungen und unsaubere Arbeit vermieden werden. Aus Gewährleistungsgründen sollten diese Arbeiten deutlich in der Bauausschreibung hervorgehoben und genau beschrieben werden.

Bei stehenden Kondenswasserspiegeln im L-EWT-Rohr, die länger nicht abgebaut werden, können sich, vor allem im Sommer, pathogene biologische Substanzen entwickeln. Partielle Absenkungen mit Wiederanstieg im Rohrverlauf sind an keiner Stelle im Rohrverbund zulässig. Von jeder Position im Rohr muss es möglich sein, dass Tauwasser in Richtung Ansaugschacht ablaufen kann und im Ansaugschacht versickern kann.

Zur Orientierung dient das natürliche Gefälle im Gelände oder/und eine Bezugsgefällevorgabe von etwa 2° bis 3° oder mehr.

## **2.3 Rohrmaterialauswahl**

Als Material für Luft-Erdwärmetauscher L-EWT kommen Werkstoffe in Betracht, die eine ausreichende Beständigkeit gegenüber Bodeneinflüssen aufweisen sowie eine ausreichende Dichtheit (Flanschdichtheit) des Rohres garantieren. Des Weiteren muss das Material ungiftig und korrosionssicher sein. Als Teil der RLT-Anlage sollten die für L-EWT verwendeten Materialien darüber hinaus auf der Innenseite glatte Oberflächen haben, nicht staubansaugend und nicht hygroskopisch sein. Wellrohre sind ungeeignet, da auftretendes Kondensat konstruktionsbedingt nicht vollständig abfließen kann (VDI 4640-4).

Aus wirtschaftlichen Gründen kommen nur Rohre aus standardmäßigen Materialien und in Normgrößen in Betracht. Eine Reihe von Rohrtypen aus der Ent- und Bewässerungstechnik können Anwendung finden, obwohl durch die zahlreichen Verbindungsstellen hygienische Schwachpunkte existieren können.

Weitere wichtige Eigenschaften sind:

- **eine gute Wärmeleitfähigkeit**
- **ausreichende statische Stabilität**
- **ausreichende mechanische Stabilität**
- **Dampfdiffusionsdichtigkeit**
- **glatte Innenoberflächen (geringe Druckverluste, gute Selbstreinigung)**
- **Verfügbarkeit von ausreichend großen Dimensionen**
- **Reduzierung der Verbindungen durch entsprechende Rohrlängen**
- **Keine Hohlräume in der Rohrwandung (z.B. bestimmte Wellrohre)**



**Bild 19** Beispiele der Rohrarten für L-EWT  
 KG-Rohr, Gussrohr, Gussrohr (oben) Betonrohr, Steinzeug, Kabelschutzrohr

Die Rohre und ggf. notwendige Formstücke sollten in den entsprechenden Größen standardmäßig beziehbar sein. Metallische Rohre, glasfaserverstärkte Kunststoffrohre (GFK-Rohre) oder Beton-Keramik-Rohre, spielen bei der Nutzung von L-EWT keine Rolle, weil die spezifischen Nutzeigenschaften dieser Rohre i.d.R. nicht benötigt werden, sich aber im erhöhten Materialpreis ausdrücken.

Bei kleinen Durchmessern (bis etwa 500 mm) können KG-Rohre zu relativ günstigen Preisen geliefert werden. Ab 500 mm sind Beton- und Faserzementrohre günstiger als KG-Rohre. Es ist daher empfehlenswert, Beton z.B. für Sammelleitungen einzusetzen. Für Verlegungen im, oder in der Nähe von Grundwasser, sind wegen der Forderung nach Dichtigkeit des Systems PE-HD-Rohre einzusetzen, die mittels Heizelementstumpfschweißung nach [DVS 2207-1], dicht verbunden werden können. Darüber hinaus erfüllen auch PE-Druckrohre, die bei der Trinkwasser- und Gasinstallation eingesetzt werden, die geforderten Eigenschaften. Vorteilhaft sind die dicht verschweißten Verbindungsstellen, die bei Entwässerungsrohrleitungen (z.B. durch Setzungen) nicht immer gewährleistet sind.

So wurde beispielsweise für das Register des Schwerzenbacher Hofes [solarbau], das sich in stehendem Grundwasser befindet, Rohre aus HD-PE eingesetzt. Ein weiterer Vorteil, den HD-PE-Rohre bieten, ist die helle Innenauskleidung der Rohre, die eine Kamerainspektion begünstigt. Der Nachteil ist der höhere Preis.

**Tabelle 6** Materialien und Eigenschaften für L-EWT-Rohre

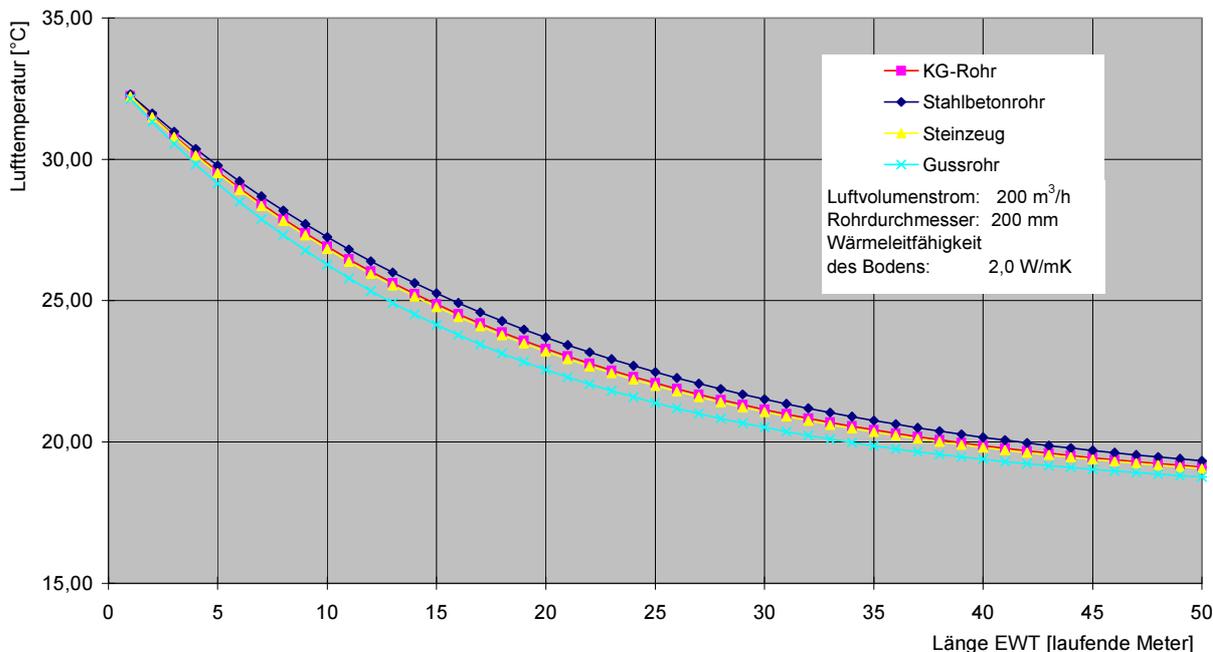
Material	Norm	Lieferdurchmesser	Anmerkungen
<b>Kunststoffrohre</b>			
Polyvinylchlorid PVC-Hart „KG-Rohre“	DIN19534	DN100 bis DN 1200	Preiswert bei kleinen Durchmessern
Polyethylen PE-HD	DIN 8074, 8075, 16962 DIN 19533 bis 19537	di 50 bis 1200 mm	hohe statische Belastbarkeit, Beständigkeit gegen aggressive Böden, keine Ablagerungen und Verkrustungen; teuer
Polypropylen PP-Rohre (HT-Rohre)	DIN 19560	DN 40 bis DN 1100	Alternative zu chlorhaltigem PVC; schweißbar; nur kleine Durchmesser
PE Kabelschutzrohre	DIN 16961	für kleine Durchmesser bis 200 mm	Flexibel und kostengünstig
<b>Mineralische Rohre</b>			
Beton/Stahbetonrohre	DIN 4032, 4035, 4035 DIN 2402	DN100 bis DN1400 DN250 bis DN4000	Große Durchmesser preiswerter als Kunststoffrohre, kleiner thermischer Widerstand, thermische Dämpfung wegen hoher Masse
Steinzeug	DIN 1230, 4033, DIN EN 295	di 100 bis 1400 mm	nur für belastete Abwässer; für L-EWT überqualifiziert
Faserzementrohre	DIN 19840 und DIN 19850	DN 100 bis DN 1000	Eternit zugfest Große Durchmesser preiswerter als Kunststoffrohre

KG-Rohr sollte an den Stoßstellen mit Dichtband versehen werden, da Schrumpfmuffen von außen nach innen nicht dicht sind und damit auch Wasser aus dem Erdreich eindringen kann.

Der Einsatz von Betonrohren ist aus hygienischer Sicht nicht ganz unbedenklich (siehe Kapitel 9). Sie könnten jedoch mit einer innenliegenden Kunststoffauskleidung aus HD-PE, die an den Verbindungsstellen fugenlos verschweißt wird, versehen werden. Durch eine solche Auskleidung verdoppeln sich allerdings nach Angabe eines Herstellers die Rohrkosten. Betonrohre finden ihren Einsatz aufgrund der verfügbaren Dimensionen in Einrohranlagen. Faserzementrohre sind dichter und glattwandiger als Betonrohre. Sie sind ebenfalls interessant für Einrohrsysteme mit großen Rohrdurchmessern.

Die konstruktiven Merkmale der unterschiedlichen Rohre haben zur Folge, dass die energetischen Kennwerte sich ähneln: Das Kunststoffrohr mit der niedrigen Wärmeleitfähigkeit besitzt nur eine geringe Wandstärke, wohingegen das Betonrohr mit der erheblich höheren Wärmeleitfähigkeit eine deutlich größere Wandstärke aufweist.

Eine Ausnahme bildet das Gussrohr. Es ist durch eine hohe Wärmeleitfähigkeit und geringe Wandstärke gekennzeichnet, so dass sich ein wesentlich geringerer Wärmeleitwiderstand ergibt als für die anderen Rohrmaterialien. Dies hat allerdings aufgrund der begrenzten Wärmeleitfähigkeit des Bodens keine große Bedeutung. Der Unterschied der verschiedenen Rohre untereinander hinsichtlich des Wärmestromes zwischen Luftstrom und Erdreich ist also als gering zu bewerten, wie in Bild 20 zu sehen ist.



**Bild 20** Theoretischer Temperaturverlauf im L-EWT für verschiedene Rohrmaterialien, ohne Wärmespeicher- oder saisonale Effekte

Entscheidend für den Wärmedurchgang zwischen Luftströmung und Erdreich sind die Wärmeübergangsbedingungen zwischen Rohrrinnenwandung und Luftströmung. Das Rohrmaterial selbst ist durch seinen relativ kleinen Widerstand von untergeordneter Bedeutung. Das schwächste Glied beim Wärmetransportprozess bestimmt maßgeblich den Wärmedurchgang - dies ist die Wärmeübergangszahl  $\alpha$  (auf der Luftseite).

Neben dem günstigen Wärmewiderstand von Betonrohren und der guten Temperaturleitfähigkeit, die sogar noch etwas besser als bei feuchtem Sand ist, besitzen Betonrohre, bedingt durch die großen Wandstärken, relativ viel Speichermasse, so dass die Tagestemperschwankungen, die durch die Außenluft verursacht werden, im Betonrohr gespeichert und quasi neutralisiert werden. Das umgebende Erdreich muss daher diese Schwankungen nur stark gedämpft kompensieren.

Allerdings haben Betonrohre neben dem o.g. Nachteil der hygienischen Probleme aufgrund der Oberflächenrauigkeit auch häufiger Probleme mit der Dichtigkeit der Muffen. So konnte bei Projekten wie in Jülich, Cölbe oder Hagen das Eindringen von Wasser beobachtet werden.

**Tabelle 7** Technische Daten Materialien für Luft-Erdwärmauscher

Nennweite	Außen- durchmesser	Innen- durchmesser	Wandstärke	Lambda	Wärmeleit- widerstand R	Gewicht
	[mm]	[mm]	[mm]	W/mK	[m <sup>2</sup> K/W]	[kg/lfdm]
<b>Kunststoffrohr ("KG-Rohr")</b>						
Wärmeleitfähigkeit: 0,15 W/mK						
Rohrrauigkeit: 0,007 mm						
100	110	103,6	3,2	0,15	0,0213	1,5
125	125	118,6	3,2	0,15	0,0213	1,7
150	160	152,0	4	0,15	0,0267	2,7
200	200	191,0	4,5	0,15	0,0300	3,9
250	250	237,8	6,1	0,15	0,0407	6,5
300	315	299,6	7,7	0,15	0,0513	10,4
400	400	380,4	9,8	0,15	0,0653	16,8
500	500	475,6	12,2	0,15	0,0813	26,2
<b>Steinzeugrohr</b>						
Wärmeleitfähigkeit: 1,2 W/mK						
Rohrrauigkeit: 0,02 mm						
100	131	100,0	15,5	1,2	0,013	15,0
125	159	126,0	16,5	1,2	0,014	19,0
150	186	151,0	17,5	1,2	0,015	24,0
200	242	200,0	21	1,2	0,018	37,0
250	296	250,0	23	1,2	0,019	43,0
300	351	300,0	25,5	1,2	0,021	72,0
400	484	410,0	37	1,2	0,031	136,0
500	581	496,0	42,5	1,2	0,035	174,0
<b>Stahlbetonrohr</b>						
Wärmeleitfähigkeit: 2,1 W/mK						
Rohrrauigkeit: 2 mm						
300	450	375	75	2,1	0,007	242
400	550	475	75	2,1	0,007	300
500	656	581	75	2,1	0,008	365
600	760	680	80	2,1	0,0085	446
700	880	790	90	2,1	0,009	592
800	1000	900	100	2,1	0,01	752
900	1120	1010	110	2,1	0,015	935
1000	1240	1120	120	2,1	0,018	1145
1200	1480	1340	140	2,1	0,02	1600
1400	1720	1560	160	2,1	0,023	2129
<b>Gussrohr</b>						
Wärmeleitfähigkeit: 50 W/mK						
Rohrrauigkeit: 0,25 mm						
150	160	152,0	4	50	0,00008	98,0
200	210	200,0	4,5	50	0,0001	161,0
250	274	263,0	5,5	50	0,00011	232,0
300	326	314,0	6	50	0,00012	301,6
400	429	416,4	6,3	50	0,00013	418,3
500	532	518,0	7	50	0,00014	577,3

## 2.4 Kondensation

Wird an der Rohrwand die Taupunkttemperatur der geförderten Luft unterschritten, kommt es zu einer Entfeuchtung der Zuluft. Allerdings ist eine kontrollierte Luftentfeuchtung im Sommerbetrieb mit einem L-EWT nicht möglich. Eigentlich ist in der Lüftungstechnik eine Kondensation in den Lüftungsleitungen, zu denen der L-EWT gehört, aus hygienischen Gründen in jedem Fall zu vermeiden.

Prinzipbedingt ist dies allerdings nicht immer möglich und aus hygienischer Sicht für die spezielle Bauform L-EWT als Teil der Lüftungsleitung auch weitestgehend unbedenklich (vgl. Kapitel 5).

Kondensation aus der Luft findet immer dann statt, wenn die Rohroberflächentemperatur unterhalb der Taupunkttemperatur der Luft liegt. Bei diesem Übergang von der dampfförmigen in die flüssige Phase wird zwischen einer Film- und einer Tropfenkondensation unterschieden.

Filmkondensation bedeutet, dass die gesamte Kühlfläche mit einem Flüssigkeitsfilm überzogen ist, die einen zusätzlichen Wärmeleitwiderstand zur Folge hat.

Bei der Tropfenkondensation rollen die Flüssigkeitstropfen ab, wodurch der zusätzliche Wärmeleitwiderstand geringer ist. In vielen praktischen Fällen treten diese beiden Formen gemischt auf. Allerdings ist die Berechnung der Kondensatmenge sehr unsicher. Die Berechnungswege für die überschlägige Bestimmung der Kondensation sind im Kapitel Mathematische Details beschrieben.

Diese Berechnung müssten aufwendig segmentweise durchgeführt werden, indem die Temperaturdifferenz auf die Eingangstemperatur des nächsten Rohrsegmentes addiert wird, so könnte dieser Einfluss berücksichtigt werden. Dazu muss jedoch zu den Außenlufttemperaturen die Luftfeuchte in Stundenschritten eingegeben werden.

Die Berechnung wurde für ein KG-Rohr DN 500 mit einer Strömungsgeschwindigkeit von 3,75 m/s durchgeführt. Dies entspricht einem Luftvolumenstrom von 2400 m<sup>3</sup>/h. Nach einer Rohrlänge von 200m hat sich der Luftzustand von 30,2°C / 44 % r. F. ( $x=12\text{g/kg}$ ) auf 19,8°C / 82 % r. F. geändert. Da jedoch die Taupunkttemperatur an der Rohroberfläche über die gesamte Rohrlänge nie unterschritten wurde, fand keine Entfeuchtung statt.

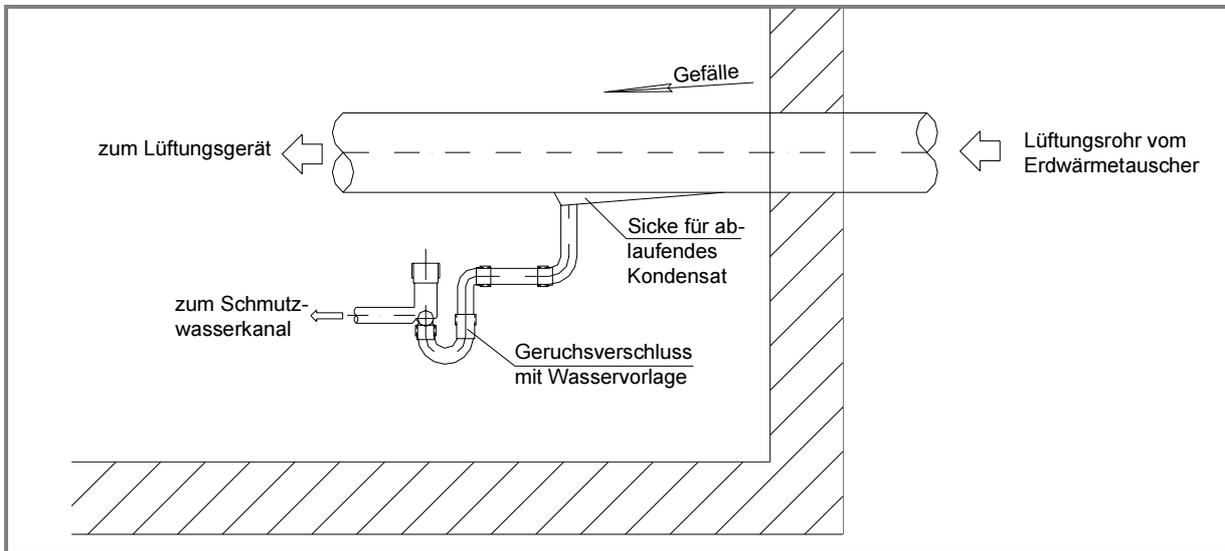
In der Praxis werden, nach bisherigem Kenntnisstand, meist nur sehr geringe Kondensatmengen beobachtet. Häufiger tritt der Fall ein, dass es Undichtigkeiten im Kanalsystem gibt. Beides macht es in jedem Fall erforderlich, die Abführung des Wassers mit entsprechenden Sicherheiten ordentlich zu planen.

## **2.5 Kondensatableitung**

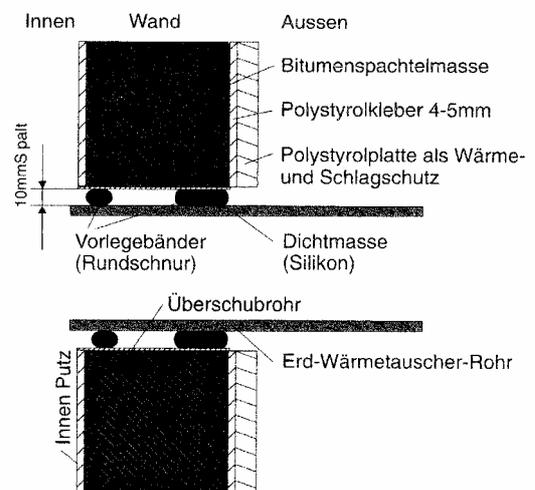
Der L-EWT muss mit Gefälle verlegt werden, um das Abfließen des Kondensats zu gewährleisten. Die Höhe des Gefälles sollte sich dabei an den einschlägigen Normen orientieren. Da ein L-EWT aber Teil einer Lüftungsanlage ist, passen die geltenden Normen für die Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden oder für erdverlegte Schmutzwasserleitungen nicht zum System. Üblicherweise sollte demnach ein Gefälle ab 1% mindestens eingehalten werden. Die Ableitung des Kondensats hängt dabei von den örtlichen Gegebenheiten ab.

Bei unterkellerten Gebäuden bietet es sich an, das Gefälle zum Keller hin zu orientieren. Nach Eintritt des Lüftungsrohres in den Keller folgt ein Wechsel des Materials auf Blechkanal oder Wickelfalzrohr. Dieser Teil des Luftkanals wird mit einer Sicke versehen, wobei auf korrosionsbeständiges Material zu achten ist. An die Sicke wird ein Röhren-Geruchsverschluss angeschlossen.

Es ist wichtig, dass hier ein Artikel aus der Lüftungstechnik verwendet wird, um bei Austrocknung des Siphons ein Ansaugen von Nebenluft aus dem Schmutzwasser-Kanal zu verhindern. Das Siphon hat zu diesem Zweck auf der Kanalseite eine leichte, luftgefüllte Kugel, die bei Unterdruck den Ablauf luftdicht verschließt (vgl. Bild 21).



**Bild 21** Erdwärmetauscher mit Kondensatablauf im Keller



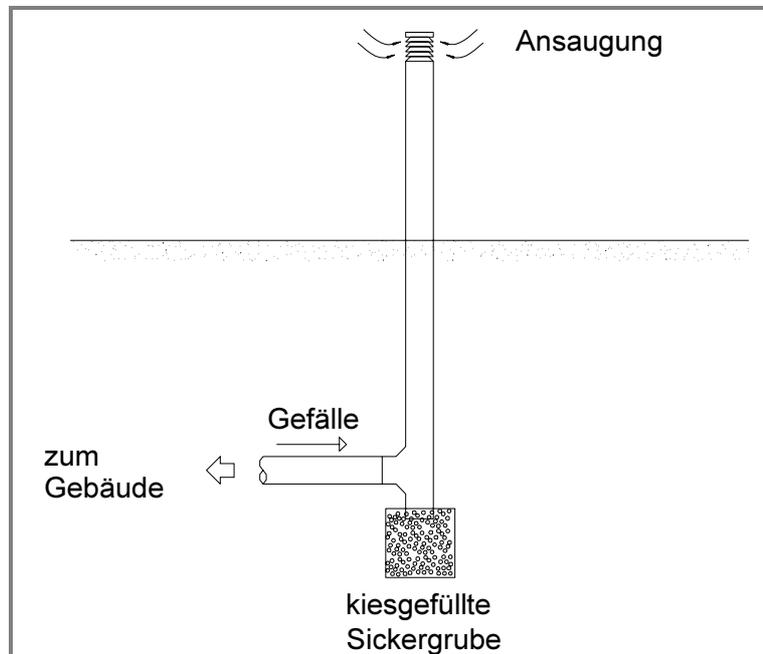
**Bild 22** Rohreinführung Erdwärmetauscher in Kellerwand (nicht drückendes Wasser)

Besitzt das Gebäude keinen Keller, kann von dieser Methode kein Gebrauch gemacht werden. In diesem Fall empfiehlt sich eine Sickergrube, die unterhalb der tiefsten Stelle des L-EWT angeordnet ist und mit einer Kiesschüttung o.ä. gefüllt ist. Das anfallende Kondensat wird über einen Abzweig in die Kiesschüttung geleitet (vgl. Bild 23). Der Ablauf wird mit einem Gitter gegen Insekten geschützt.

Es ist bei dieser Form der Kondensatableitung wichtig zu prüfen, dass das Grundwasser zu jeder Zeit unterhalb der Kiesschüttung steht, um das Eindringen von Grundwasser in den L-EWT zu vermeiden.

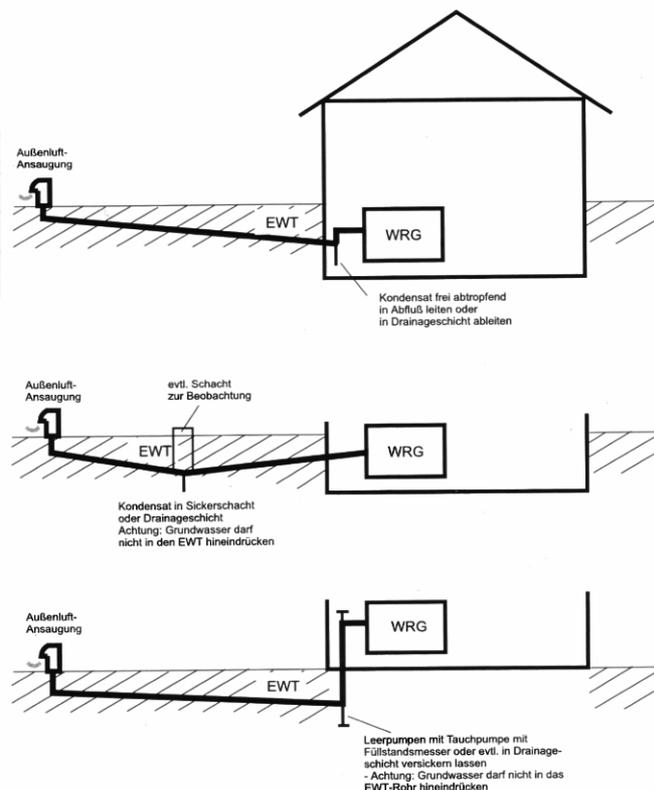
**Bild 23****Kondensat-Sickergrube**

Besitzt das Gebäude keinen Keller und ist aufgrund von zu hoch stehendem Grundwasser auch die Sickergrube nicht umsetzbar, muss mit einem Schacht und einer Kondensatpumpe gearbeitet werden, die das Kondensat an die Oberfläche transportiert.

**Bild 24****Kondensatableitung (rechts)**

Sammler mit Drainage und Eingang zum Gebäude (unten)

Nach PAUL



## 3 Integration in die Haustechnik

### 3.1 Prinzipielle Überlegungen

Bei Verwaltungsgebäuden ist seit mehr als 10 Jahren ein Trend weg von der zentralen Klima- und Lüftungstechnik hin zu individuellen nutzerbestimmbaren Techniken, während es im Wohnungsbau spätestens seit Einführung der Energieeinsparverordnung im Februar 2002 einen Trend zur Lüftungsanlage gibt.

Die schlechten Erfahrungen der Vergangenheit mit Lüftungsdinosaurieren, die aus Kostengründen schlecht gewartet wurden und dem Nutzer ein Einheitsklima vorgaben in dem er sich wohlfühlen hatte, sind letztlich verantwortlich für den Trend. Fatalerweise führt dies dann häufig dazu, dass das Büro mit Fensterlüftung und Heizkörper auch als Argument gegen eine moderne Lüftungstechnik mit Wärmerückgewinnung verwendet wird. Eine wichtige Möglichkeit, Heiz- und Kühlenergie einzusparen, wird bei derartigen Planungen dann zukünftig nicht mehr oder nur erschwert (also unwirtschaftlich) nachrüstbar sein.

In dieser Situation wurden Planer und Bauherren bzw. Vermieter von Büroflächen durch das sog. „Bielefelder Urteil“ (LG Bielefeld AZ: 3 O 411/01 v. 16.04.2003) aufgeschreckt. Das Bielefelder Landgericht verurteilte im April 2003 den Vermieter eines Bürogebäudes dazu, in den Büroflächen die Forderungen der ASR<sup>5</sup> einzuhalten. Dadurch war der Vermieter gezwungen, auf seine Kosten eine Klimaanlage nachzurüsten. Die Forderungen der ASR verbunden mit der DIN 1946 sehen seit Jahrzehnten vor, dass die Lufttemperatur einen Wert von 26°C nicht überschreiten soll. Das Urteil erregt deshalb so viel Aufsehen, weil es aus eigener Erfahrung bekannt ist, dass wohl der Großteil der bundesdeutschen Büros diese Anforderung regelmäßig im Sommer überschreitet. Schon wird der Ruf laut, in Zukunft müsse wohl jedes Bürogebäude mit einer Klimaanlage ausgestattet werden. Ganz so wird es nicht kommen, aber dennoch ist die Zeit reif, auf einer breiteren Ebene umzudenken und denen zu folgen, die zukunftsweisende Gebäude erstellen. Gebäude, bei denen die Behaglichkeit der Nutzer ganzjährig gegeben ist. Gebäude, in denen die Nutzer das Klima individuell beeinflussen können. Es gibt genügend Beispiele für Gebäudekonzepte, die diese Anforderungen erfüllen und trotzdem oder gerade deshalb wirtschaftlich sind, ohne ökologische Aspekte zu vernachlässigen.



Bürogebäude DB-Netz, Hamm



Bürogebäude ECOTEC, Bremen

<sup>5</sup> Arbeitsstättenrichtlinie



Institutsgebäude Fraunhofer ISE, Freiburg



Bürogebäude Wagner &amp; Co, Cölbe



Bürogebäude Energon, Ulm



Produktionshalle Hübner, Kassel-Waldau

**Bild 25 (1 bis 6)** Beispiele für energieoptimierte Gebäude. Quelle: solarbau.de

Im Hinblick auf das „Bielefelder Urteil“ können wir feststellen, dass die Vorgabe bei 32°C Außentemperatur eine Raumlufttemperatur von 26° nicht zu überschreiten nur schwerlich ohne irgend eine Form von Kühlung einzuhalten sein wird. Es stellt sich hier nur die Frage, wie die Kühlung erreicht wird. Der wichtigste Schritt ist dabei zunächst die ganzheitliche Planung. Diese wird bei modernen Gebäuden meist mit Computersimulationen begleitet, durch die ein systematisches Konzept bezogen auf die zu erwartenden Raumtemperaturen erarbeitet wird.

Durch einen integralen Planungsansatz, bei dem fachübergreifende Teams Lösungen suchen, ist das Ergebnis nach mehreren Optimierungstufen immer ein Konzept zur Vermeidung von Überhitzungen im Sommer. Den Projektbeteiligten ist bewusst, dass die Bereitstellung von Kühlenergie teuer ist und bereits bauseits alles getan werden muss, um hier mit möglichst geringen Investitionskosten auch die Kosten des Betriebs zu minimieren. Der Trend geht daher zu Systemen wie z.B. der Betonkernaktivierung, die die Grundlasten abführt und Kühldecken oder -segeln, die individuelle Einstellmöglichkeiten offerieren. Auch Systeme wie die freie nächtliche Kühlung, durch die die Speichermasse der Raumumschließungsflächen nachts wieder aktiviert werden, sind verstärkt zu finden.

Derartige „sanftere Systeme“ haben gegenüber Vollklimaanlagen gemeinsam, dass die Klimatisierungsaufgabe vom notwendigen hygienischen Luftwechsel getrennt wird, denn der ist lediglich in der Lage, relativ kleine Energiemengen bereit zu stellen.

Ein Vorteil solcher Systeme ist z.B., dass die Luftverteilnetze relativ klein werden können, was bauseits Kosten spart, indem in den Büros häufig auf abgehängte Decken verzichtet werden kann und vor allem die Geschosshöhe geringer wird, was wiederum Kosten spart.

Bei Büronutzungen tragen die inneren Lasten einen erheblichen Beitrag zur Beheizung, wenn das Gebäude sehr gut gedämmt und zudem mit einer effizienten Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung ausgestattet ist. Auf eine konventionelle Heizung kann dann fast verzichtet werden. Bei Büronutzungen im Neubau existiert ohnehin eher kein Heiz- sondern ein Kühlproblem. Die Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung bringt im Sommer den Vorteil, die warme Außenluft vorgekühlt in das Gebäude zu führen. Durch eine effiziente Lüftungsanlage in Kombination mit einem erhöhten Wärmeschutz werden also die Heizung und eine ggf. erforderliche Kälteanlage sehr klein, was direkt Investitionskosten spart. Des Weiteren werden erhebliche Mengen an Heiz- und Kühlenergie eingespart. Zudem steigt der Komfort und das Wohlbefinden der Mitarbeiter und steigert deren Leistungsfähigkeit.

### **3.2 Der L-EWT im Gesamtsystem Chance und Grenzen**

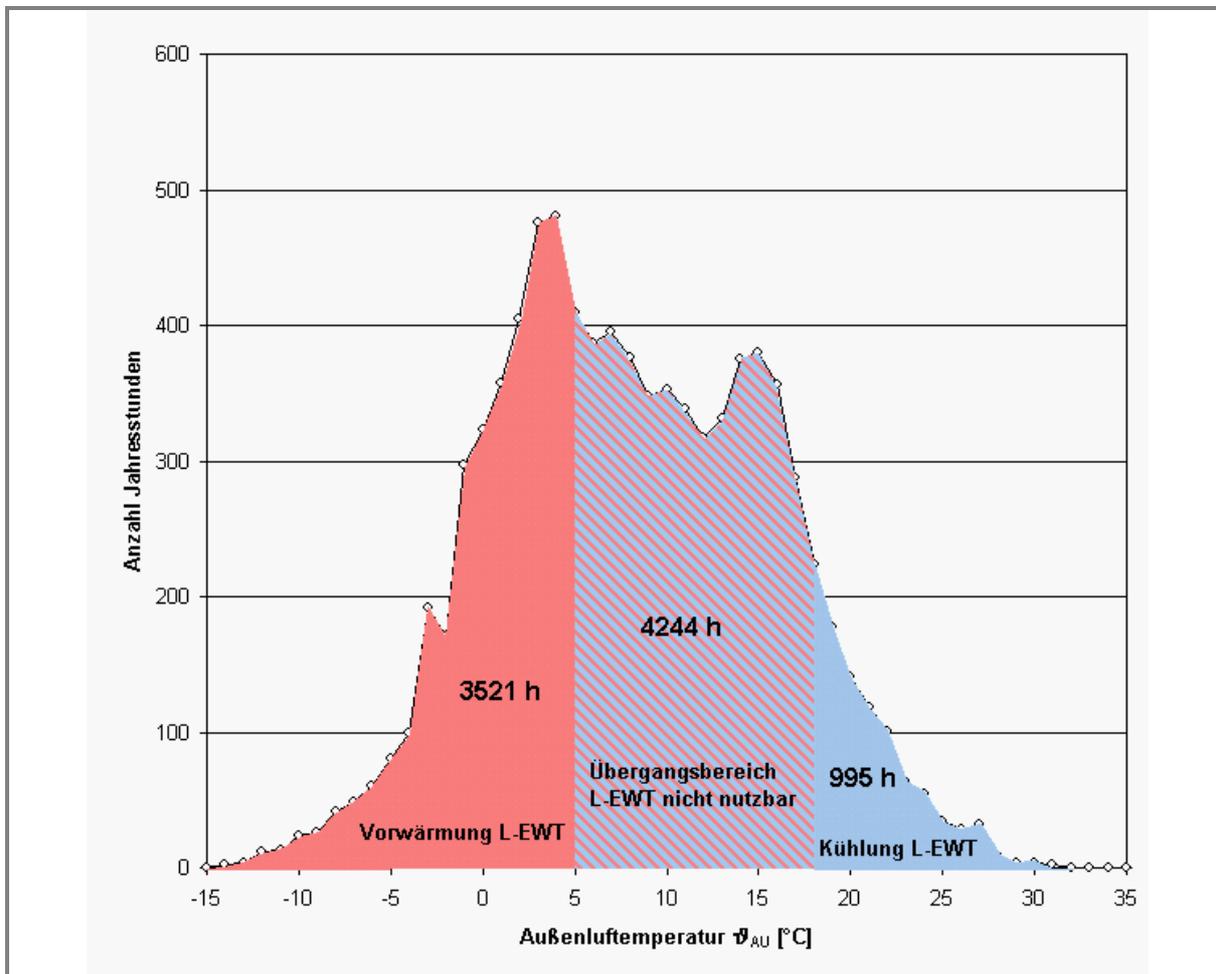
In derartige Konzepte kann sich ein L-EWT sehr gut einfügen. Ein L-EWT ist naturgemäß auf das Vorhandensein einer Lüftungsanlage angewiesen. Dabei wirkt es sich auf die Gestehungskosten des L-EWT günstig aus, dass moderne Gewerbebauten heute meist nur mit Lüftungsanlagen ausgestattet werden, die lediglich den hygienisch notwendigen Luftwechsel liefern. Gebäude, die ausschließlich oder zum überwiegenden Teil über eine Lüftungsanlage klimatisiert werden, benötigen hohe Luftmengen, die dann entsprechend konditioniert werden müssen. Ein L-EWT wäre mit derart großen Volumenströmen meist kaum wirtschaftlich zu betreiben, da er sehr groß und daher schlicht zu teuer würde.

Es ist also eine fundamentale Frage, für welche Anwendungsfälle sich ein L-EWT bevorzugt einsetzen lässt oder wann er an seine Grenzen stößt und besser anderen Systemen den Vorzug lässt. Grundsätzlich geht es schließlich darum, behagliche Gebäude kostengünstig zu planen und daher zwingend mit energieeffizienten Konzepten auszustatten.

Ein L-EWT ist hervorragend geeignet, dauerhaft Luft vorzuwärmen oder zu kühlen. Je nach Planungsaufgabe und Systemanforderung ersetzt er damit ein Vorheizregister und spart Energie. Zudem kühlt er die Luft, je wärmer sie ist, desto effektiver, und reduziert die Spitzenlast.

Ein Nachteil ist allerdings die bereits oben angesprochene Tatsache, dass mit geringen Luftmengen auch nur geringe Heiz- und Kühlleistungen erbracht werden können. Die Luftmengen nun, wie früher, zu erhöhen, um einen L-EWT einzusetzen, wäre sicherlich der falsche Weg. Den L-EWT nicht einzusetzen, weil er nur relativ kleine Leistungsdichten hat, die aber bei bestimmten Anforderungen durchaus reichen können, wäre mindestens genauso falsch.

Zunächst ist es einmal wichtig, den genauen Einsatzbereich des L-EWT zu beschreiben und daher u.a. festzustellen wie oft er im Laufe eines Jahres prinzipiell einsatzfähig ist.

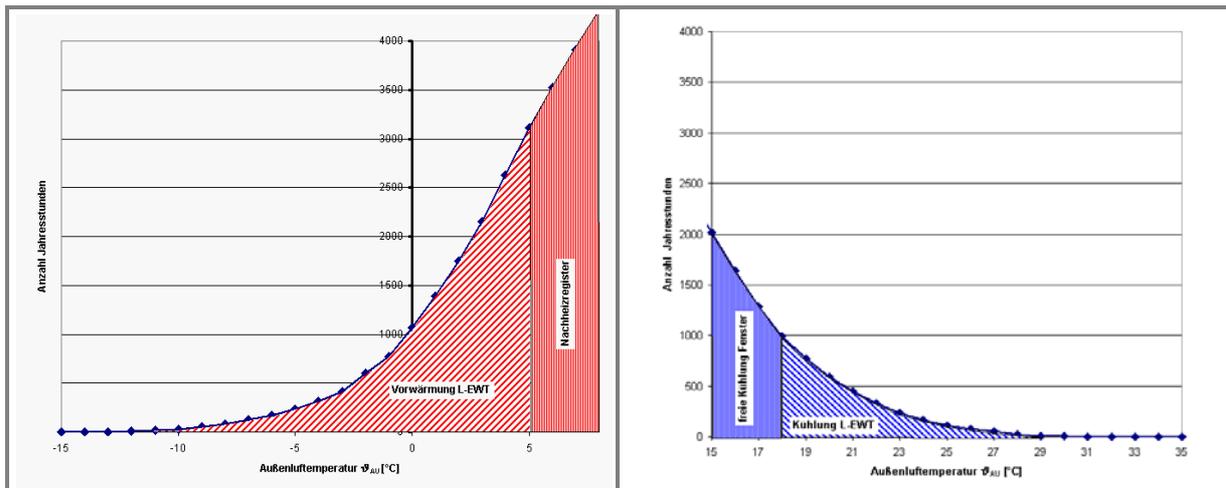


**Bild 26** Anzahl der Stunden, einer bestimmten Temperatur (1°C-Band) (Basis TRY 02<sup>6</sup>),

Die Bild 26 zeigt daher am Beispiel der Wetterdaten des TRY 02, die Häufigkeitsverteilung bestimmter Außenlufttemperaturen. Die drei farbig markierten Bereiche sind aus den Erläuterungen des Kapitel 3.3 abgeleitet. Demnach gibt es an etwa 3.500 Stunden eine theoretische Möglichkeit der Luftvorwärmung und an etwa 1.000 Stunden der Luftkühlung. Während der Hälfte des Jahres ist der L-EWT demnach nicht nutzbar.

Bild 27 und Bild 28 zeigen am Beispiel der Wetterdaten des TRY 02 noch einmal die kumulierte Anzahl der Stunden, die eine bestimmte Temperatur über- bzw. unterschreiten. Mit dieser Darstellung ist genau ablesbar, an wie vielen Betriebsstunden der L-EWT theoretisch eingesetzt werden kann. Beide Abbildungen markieren unterschiedliche Bereiche, die für eine Anwendung im Verwaltungsbau ausgelegt sind. Bei Industrieanwendungen wäre auch eine andere Anzahl an Betriebsstunden vorstellbar.

<sup>6</sup> TRY 02, Test-Reference-Year 02, Wetterdaten des Nordwestdeutschen Tieflands



**Bild 27** Vorerwärmung: Anzahl der Stunden (kumuliert), die eine bestimmte Temperatur unterschreiten (Basis TRY 02)

**Bild 28** Kühlung: Anzahl der Stunden (kumuliert), die eine bestimmte Temperatur überschreiten (Basis TRY 02)

#### Bild 27:

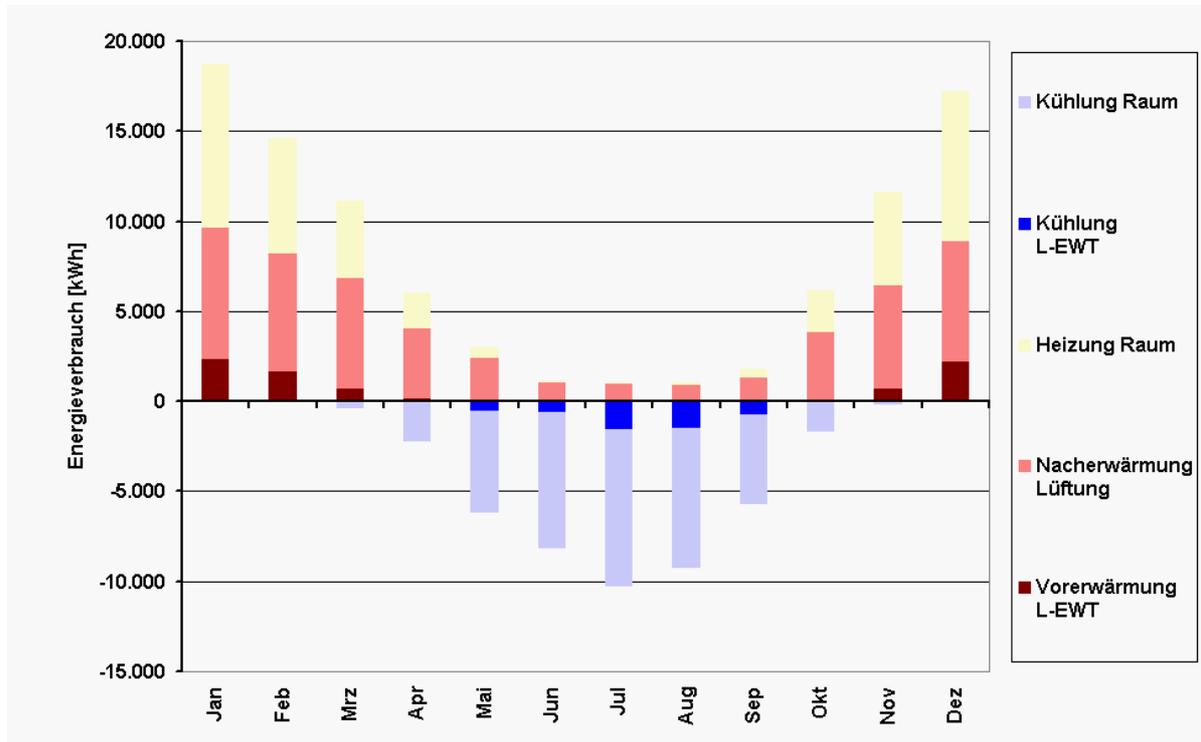
Für die Vorerwärmung gibt es, abhängig vom tatsächlichen Wetter, wesentlich häufiger Gelegenheit als für die Kühlung. Die Anzahl der möglichen Betriebsstunden kann allerdings noch weiter variieren. Je nachdem, welche Temperatur das Erdreich lokal aufweist, ist auf eine ausreichende Temperaturdifferenz zwischen Luftaustrittstemperatur nach Durchlaufen des L-EWT und dem Erdreich zu achten. Hinzu kommt noch die Temperaturdifferenz des Wärmeaustauschprozesses. Dieser Zusammenhang für einen ökologischen und ökonomischen Betrieb des L-EWT ist im Kapitel 3.3 erläutert.

#### Bild 28:

Mehr als 18°C Außenlufttemperatur gibt es demnach an etwa 1.000 Stunden im Jahr, was natürlich vom Standort abhängt. Während dieser Zeit ist der L-EWT zu Kühlzwecken nutzbar. Bei niedrigeren Außentemperaturen wird die Zuluft direkt angesaugt, durchläuft i.d.R. die Wärmerückgewinnung und wird ggf. nacherwärmt. Sollte bereits hier eine Kühllast vorliegen, kann individuell über die Fenster gekühlt werden oder es gibt ohnehin eine zusätzliche Kühlung, z.B. Betonkernaktivierung oder Kühldecken.

Es kommt also darauf an, diese prinzipielle Eigenschaft des L-EWT in das Gebäudeenergiekonzept einzubinden oder anders ausgedrückt: Es sollten nur Gebäude mit L-EWT ausgestattet werden, die von ihrer Lastcharakteristik für ein L-EWT-System geeignet sind.

Das folgende Beispiel (Bild 29) zeigt die Simulationsergebnisse der jährlichen Verteilung des Energieverbrauchs für ein optimiertes Bürogebäude in Niedrigenergiebauweise. Dieses Gebäude soll nach Kundenwunsch ganzjährig optimale Temperaturen aufweisen, dass heißt immer zwischen 20°C und 26°C Raumtemperatur betrieben werden. Nach Analyse der voraussichtlichen Nutzung belaufen sich die inneren Lasten der Büros mit ca. 25 W/m<sup>2</sup> im mittleren Bereich und eine erhebliche Anzahl häufig frequentierter Besprechungsräume mit 50 W/m<sup>2</sup> im erhöhten Bereich.



**Bild 29** Beispiel eines optimierten Bürogebäudes in Niedrigenergiebauweise. Jährliche Verteilung des Energieverbrauchs bei Einsatz eines L-EWT.

Bild 29 zeigt, dass die Vorerwärmung und die Kühlung mittels L-EWT nur einen geringen Beitrag am Gesamtenergieverbrauch leisten können. Für die Kühlung sind dies etwa 13% an der Gesamtkühlleistung. Die Vorerwärmung des L-EWT macht etwa 9% an der Heizenergie aus. Da die absolute Energie für Heizung etwa doppelt so groß wie die Kühlenergie ist, würde der L-EWT hier für die Heizung einen absolut größeren Anteil leisten als für die Kühlung. Vor diesem Hintergrund ist also die häufig zu findende Aussage, dass bei den meisten Gewerbebauten der L-EWT hauptsächlich als regenerativer Kälteanbieter geplant wird und dann eine Heizenergieeinsparung im Winter lediglich als positiver Nebeneffekt hinzukommt, zu relativieren, obwohl natürlich der Kälteeinsatz, wegen der damit verbundenen höheren Kosten weiterhin Priorität haben wird.

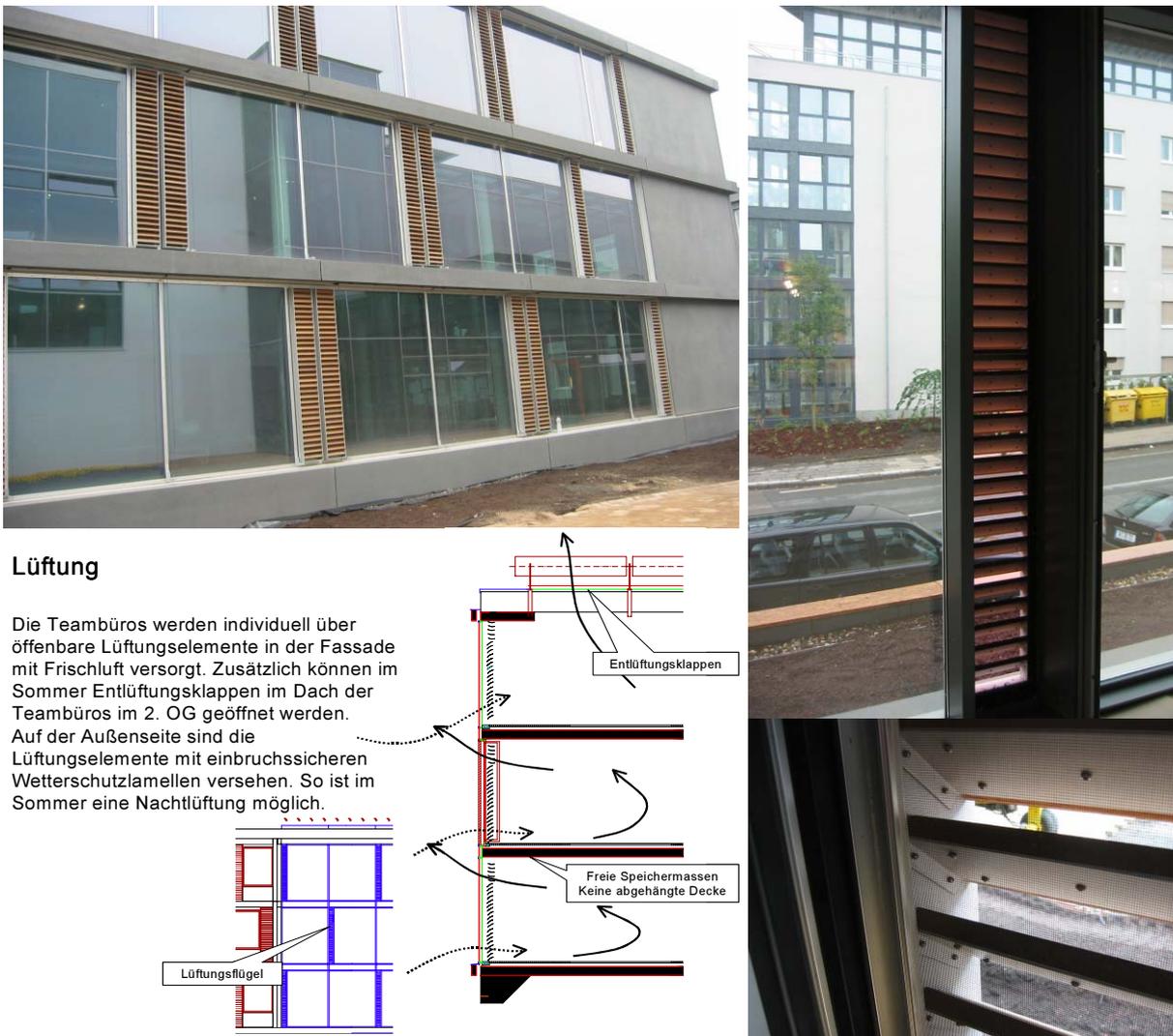
Grundsätzlich soll dieses Beispiel aber zeigen, der Einsatz des L-EWT hier nicht vorteilhaft wäre.

*Daher wird das Gebäude im Beispiel auch mit einer Erdsondenanlage gebaut, die 100% der Kühlenergie abführen kann. Dies geschieht zum kleineren Teil, ähnlich dem L-EWT, mittels Luftkühlung und zum größten Teil über Kühlsegel, die über die Erdsondenanlage gespeist werden.*

Warum aber liefert der L-EWT hier kein überzeugendes Ergebnis?

Weil der L-EWT nur die Luft vorkonditionieren kann. Wenn aber die Lasten größer werden, ist Luft physikalisch bedingt meist weniger gut geeignet und es muss eines zweites Kühlsystem parallel installiert werden. Ein L-EWT ist daher besonders für Gebäude mit kleinen bis mittleren Kühllasten günstig. Ähnlich dem Passivhauskonzept, das darin besteht, ein Gebäude so gut zu dämmen, dass die hygienische Zuluftmenge zur Beheizung ausreicht, sollte ein L-EWT hauptsächlich in Gebäuden verwendet werden, in denen ebenfalls die hygienische Zuluftmenge zur Kühlung ausreicht. Allerdings kann es bei der Kühlung dann doch etwas mehr sein als bei der Analogie zur Beheizung eines Passivhauses. Hierzu ein weiteres Beispiel, das ausgehend von der häufigsten Bauart von Bürogebäuden eine logische Entwicklungskette darstellt:

viele moderne Bürogebäude kommen inzwischen ganz ohne mechanische Kühlung und Lüftung aus, indem durch nächtliche freie Lüftung, meist über spezielle Fensterelemente, eine nächtliche Aktivierung der vorhandenen Speichermassen tagsüber gekühlt wird.



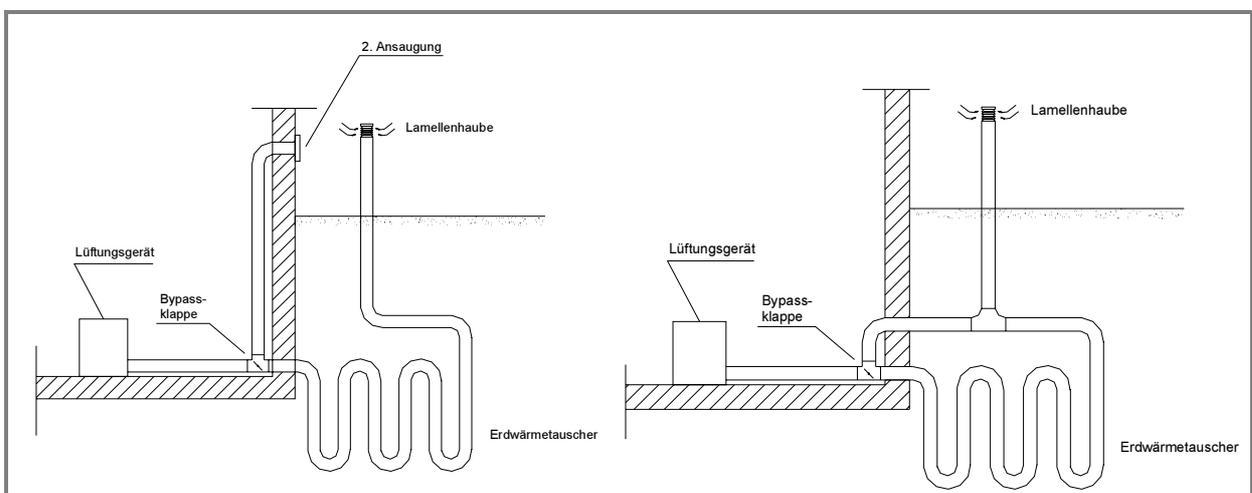
**Bild 30** Einsatz von Lüftungselementen für eine nächtliche freie Kühlung.  
ComIn, IT-Center, Essen

Dies funktioniert (meist) während des Großteils des Jahres sehr gut. Lediglich an wenigen Tagen des Jahres werden Temperaturen von 26°C überschritten, ohne mechanische Kühlung und Lüftung! Vor dem Hintergrund des „Bielefelder Urteils“ bewegt sich der Planer hier aber sicherlich auf einem schmalen Grat. Außerdem tritt bei genauerer Betrachtung ein erheblicher Behaglichkeitsunterschied zwischen mechanisch und nur mit Fenstern belüfteten Gebäuden auf. Eine Fensterlüftung ist unter bestimmten Auflagen der Arbeitsstättenrichtlinie zwar ganzjährig erlaubt, aber bei Außentemperaturen unter 15°C wohl kaum behaglich und dennoch häufigste Praxis. Der Temperaturbereich zwischen –12°C und 15°C entspricht etwa  $\frac{3}{4}$  des Jahres (TRY02). Allein aus diesem Grund wäre es daher schon sinnvoll eine Lüftungsanlage zu installieren. Sobald eine Lüftungsanlage vorhanden ist, gilt die DIN 1946, die es dann nicht mehr erlauben würde, Luft unterhalb von 18°C in den Raum zu führen. Mit der aus Behaglichkeitsgründen sinnvollen Lüftungsanlage ist es dann nur noch ein kleiner Schritt zur Installation einer Wärmerückgewinnung, aus ökonomischen und ökologischen Gründen. Gleichzeitig kann dann wegen der Lüftungsanlage nun auch die unbehagliche Fensterlüftung an sehr warmen Tagen des Jahres vermeiden werden, ohne auf frische Luft zu verzichten. Der L-EWT kühlt diese Luft auf ein behagliches Niveau.

Die beiden Beispiele zeigen, dass es zunächst wichtig ist, das Gebäude mit seiner Nutzungscharakteristik zu analysieren und das geforderte Behaglichkeitsniveau zu definieren. Während der L-EWT für Gebäude mit höheren inneren Lasten weniger geeignet ist, liefert er für Gebäude mit mittleren oder geringen inneren Lasten hervorragende Ergebnisse.

### 3.3 Regelung

Die Möglichkeit der Regelung des L-EWT besteht über den Einsatz einer Bypassklappe. Bei Verwendung des Bypasses (hier als Umgehung des L-EWT aufzufassen) wird die Außenluft nicht über den L-EWT, sondern auf kürzerem Wege direkt dem Lüftungsgerät zugeführt. Dies ist entweder über eine 2. Außenluft-Ansaugung oder einen Abzweig im L-EWT möglich.



**Bild 31** Möglichkeiten der Verschaltung des L-EWT mit Bypassklappe

Der Bypass (hier: Direktansaugung) kommt in Übergangszeiten zum Einsatz, wenn die Außentemperatur im Bereich der Raumtemperatur oder bis zu gewissen Grenzen (siehe unten) darunter liegt bzw. die Einschaltkriterien nicht erfüllt sind. Eine Abkühlung der Außenluft über den L-EWT würde dann u.U. eine Nachheizung der Zuluft erforderlich machen; dies wird über den Bypass verhindert.

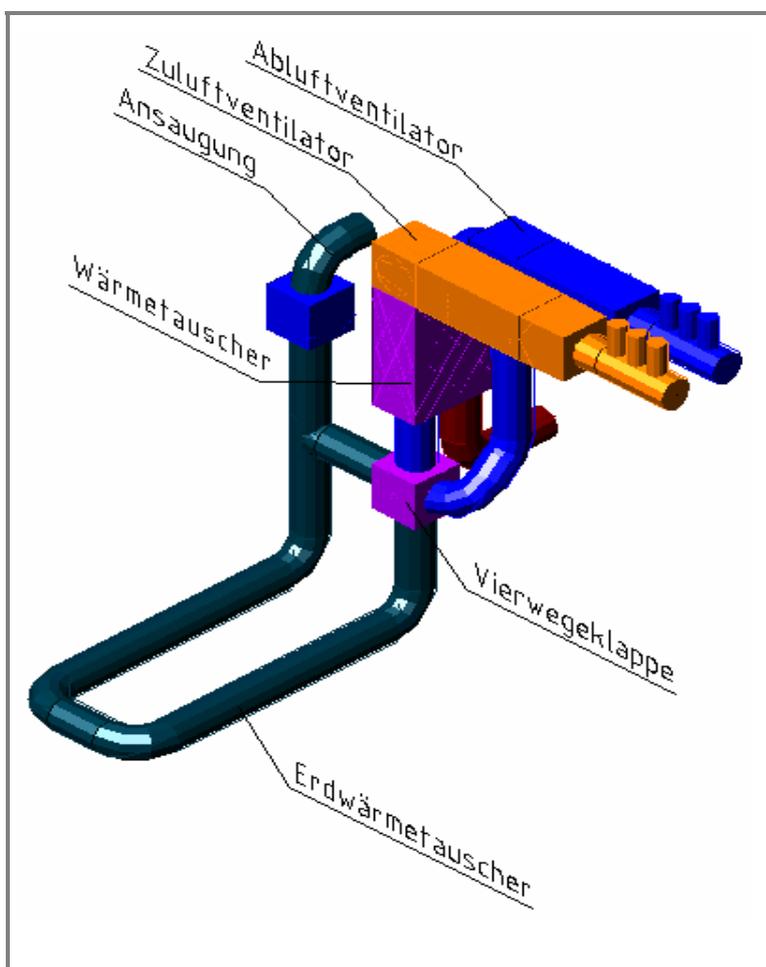
Bei größeren Anlagen werden die üblichen modular aufgebauten Lüftungssysteme mit individuell geplanter MSR-Technik verwendet.

Bei kleineren und mittleren Anlagen (ab ca. 1000m<sup>3</sup>/h bis 8000m<sup>3</sup>/h) werden von Geräteherstellern kompakte vorgefertigte Module angeboten, die für den Einsatz eines L-EWT in Kombination mit einer hocheffizienten Wärmerückgewinnung ausgelegt sind und bereits über die entsprechende Regelungstechnik verfügen.

### Bild 32

Modulare Lüftungstechnik mit L-EWT, hocheffizienter WRG und Vierwegeklappe  
(Quelle: Fa. Lüfta)

Zusätzlich zur Umgehung des L-EWT kann hier die Funktion des Bypasses zur Umgehung der Wärmerückgewinnung (WRG) von einer einzigen Klappe übernommen werden. Die Umgehung der Wärmerückgewinnung im Sommerbetrieb ist sinnvoll, um zu vermeiden, dass die im L-EWT abgekühlte Luft in der Wärmerückgewinnung von der warmen Raumluft wieder unerwünscht erwärmt wird.



Die Klappe wird als Vierwegeklappe ausgeführt und kann wie folgt gesteuert werden:

- Winterbetrieb: Ansaugung über L-EWT und Wärmerückgewinnung
- Übergangszeit: Umgehung von L-EWT und WRG oder Umgehung von L-EWT, aber Ansaugung über WRG
- Sommerbetrieb: Ansaugung über L-EWT, aber Umgehung der WRG

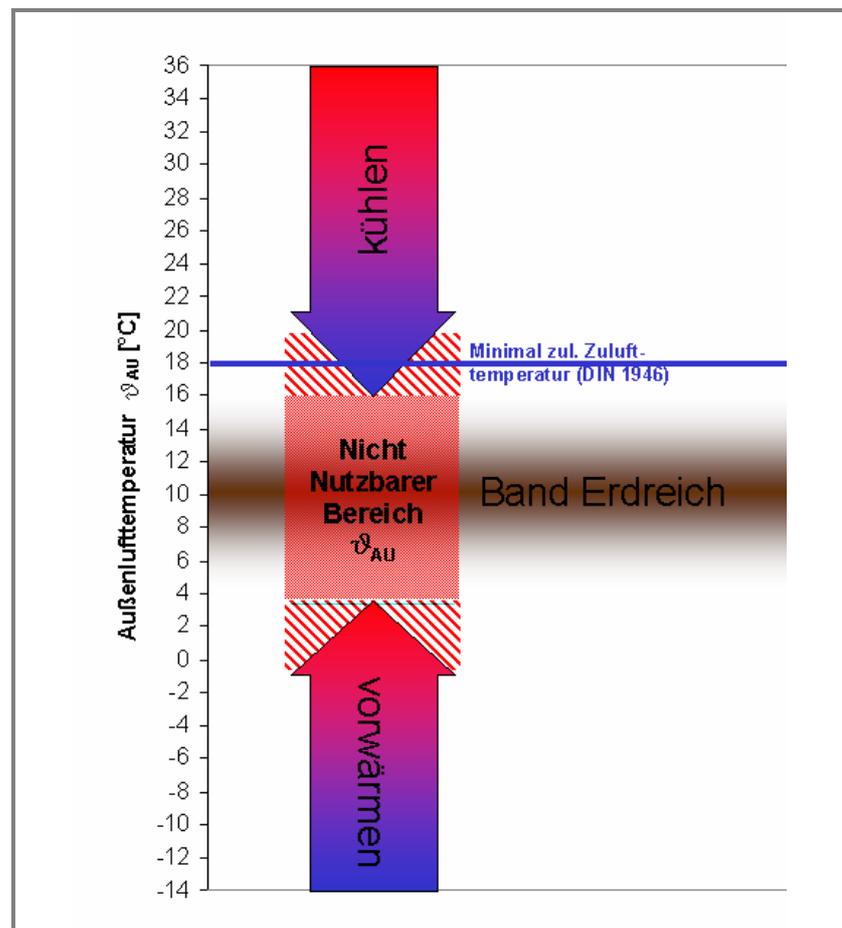
Vordergründig betrachtet ist die Regelung eines L-EWT sehr einfach. Im Sommer wird er die Außenluft um einen bestimmten Betrag kühlen und im Winter vorwärmen. In beiden Fällen liegt der maximale Auslegungspunkt vor und es wird meist keine Frage sein, dass 100% des Auslegungsvolumenstroms über den L-EWT geführt werden.

In den Übergangszeiten des Jahres oder bei Teillastanforderungen tritt ein prinzipielles Problem auf. Bei der Regelung von L-EWT ist die Austrittstemperatur der Luft  $\vartheta_{out}$ , die eigentlich relevante Regelgröße, erst dann bestimmbar, wenn sie den L-EWT durchströmt hat. Durch die variable Leistungscharakteristik des L-EWT ist es nicht ohne weiteres möglich zu entscheiden, wann der L-EWT genutzt werden sollte, wenn ja in welchem Maße oder ob es günstiger ist, Außenluft direkt, unter Umgehung des L-EWT, zu fördern. Nach Stillstandszeiten hat sich das Erdreich mehr oder weniger stark regeneriert. Welche genaue Temperaturdifferenz ( $\vartheta_{out} - \vartheta_{AU}$ ) die nun veränderte Leistung des L-EWT bewirkt, ergibt sich eben erst nach der Nutzung des L-EWT.

Neben diesem Problem kann allerdings zunächst festgelegt werden, in welchen Bereichen der L-EWT prinzipiell betrieben werden soll. Das folgende Bild 33 zeigt die Nutzungsbereiche eines L-EWT. Die Erdreichtemperatur ist saisonal, in Abhängigkeit von Nutzung und Standort verschieden. In den meisten Fällen, liegt sie aber deutlich innerhalb des ohnehin nicht nutzbaren Bereichs.

**Bild 33**

Nutzbare und nicht nutzbare Temperaturbänder der Außenlufttemperatur. Zielbänder schraffiert.



Im Kühlfall existiert eine Behaglichkeitsgrenze. Gemäß DIN 1946 sollte die Zulufttemperatur in Aufenthaltsräumen nicht mehr als 8K unterhalb der Raumtemperatur liegen, um Zugescheinungen zu vermeiden. Da die übliche Raumtemperatur, die nicht überschritten werden sollte, bei 26°C liegt, sollte demzufolge die Zulufttemperatur nicht unter 18°C sinken. Wegen der unvermeidlichen Erwärmung der Zuluft in der RLT-Zentrale und den Luftkanälen im Gebäude mag die Austrittstemperatur aus dem L-EWT auch bis auf 16°C (Vorsicht Kondensationsgefahr im Lüftungsnetz!) sinken können, darunter ist die Luft für normale Bürobereiche nicht nutzbar. Allerdings werden in der Praxis derart niedrige Austrittstemperaturen im Auslegungsfall (Hochsommer) ohnehin nicht erreicht.

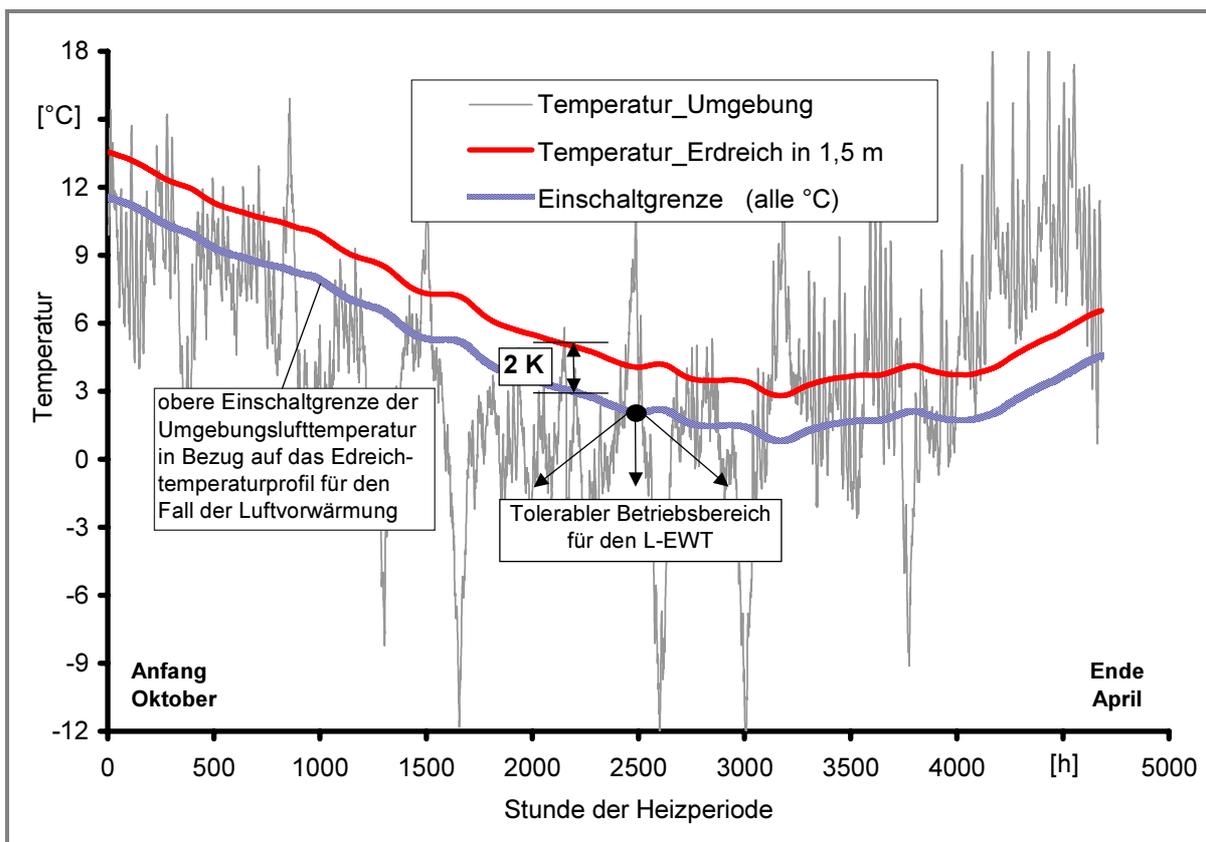
Für die **Regelung im Kühlfall** bedeutet dies:

1. Die untere Temperaturgrenze bis zu der der L-EWT betrieben werden sollte, liegt bei 18°C Außenlufttemperatur (Nebenerwärmung kann ausgeglichen werden)
2. Liegt die Außenlufttemperatur bereits bei 18°C oder liegt sie darunter, wird Außenluft direkt angesaugt. Im letzteren Fall muss diese sogar nacherwämmt werden.
3. Liegt die Außenlufttemperatur über 18°C beginnt der Teillastbetrieb des L-EWT. Bei welcher Außenlufttemperatur der Gesamtvolumenstrom durch den L-EWT geführt wird, ist abhängig von den momentanen Werten für: Kühlbedarf und Erdtemperatur.

Im Heizfall liegt die Solltemperatur der Aufenthaltsräume meist zwischen 20-22°C. Zum Erreichen dieses Ziels kann der L-EWT mittels Vorwärmung der Außenlufttemperatur nur bzw. immerhin beitragen. Hier muss folgender Gesichtspunkt als Grundlage für den Betrieb dienen: Der Ertrag an Heizenergie (Nutzen) muss größer sein, als der primärenergiebezogene Energieeinsatz des Ventilators (Aufwand). Dabei kann die Faustformel, nach der zur Produktion von 1 kW Strom mindestens die dreifache Menge an Primärenergie benötigt wird herangezogen werden.

Für die **Regelung im Heizfall** bedeutet dies:

1. Die obere Temperaturgrenze der Außenlufttemperatur bis zu der der L-EWT betrieben werden sollte, liegt unterhalb der Temperatur des ungestörten Erdreichs und noch weiter unterhalb der Austrittstemperatur der Luft
2. Je nach Betrag an Ventilatorarbeit sollte eine Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zwischen Austrittstemperatur der Luft und der Außenlufttemperatur abgeschätzt werden. Häufig sind dies etwa 2K.
3. Bei Temperaturen unterhalb der Außenlufttemperatur der Luft abzüglich der oben gefundenen Temperaturdifferenz ist der L-EWT in Betrieb. Wird der Grenzwert erreicht, wird die Außenluft direkt angesaugt.



**Bild 34** Betriebsbereich des L-EWT für die Luftvorwärmung als Funktion der Erdreich- und Außenlufttemperatur

Unabhängig von der Funktion Kühlen oder Heizen ist folgendes zu beachten:

Bei einem Neustart der Anlage (nach einem längeren Stillstand, Stunden, Tage) ist zu beachten, dass die anfängliche Austrittstemperatur erheblich von der eigentlichen Betriebstemperatur abweichen kann. Deshalb ist eine Mindestlaufzeit des L-EWT von ca. 20 min erforderlich, bis sich die für einen kontinuierlichen Betrieb erforderliche Regelgröße eingestellt hat.

In diesem Zusammenhang ist auch zu beachten, dass der Platzierung der Temperaturfühler noch mehr Beachtung als üblich gewidmet werden sollte. Der Fühler für die Luftaustrittstemperatur z.B. wird sinnvoller Weise ganz am Ende des L-EWT platziert. Dies ist i.d.R. sehr nahe bei der Lüftungszentrale. Eine Lüftungszentrale hat meist ganzjährig warme Innenraumtemperaturen obwohl die Lüftungsleitungen gedämmt werden. Ist nun ein längerer Stillstand des L-EWT während des Betriebs sinnvoll, kann es leicht geschehen, dass die ersten Meter Luftvolumen des L-EWT von der Lüftungszentrale aus erwärmt werden. Je nach Regelkonzept kann dies verschiedene Effekte haben, von dauerhaftem Takten bis dauerhaft Aus.

Weiterhin ist beim Betrieb von L-EWT zu beachten, dass die Feuchte der Luft aus dem L-EWT nicht geregelt werden kann.

### 3.4 Ventilator

Der Ventilator wird nach den Regeln der Technik ausgelegt. Einige Besonderheiten sind hier aber erwähnenswert:

1. Bereits bei Anlagen über 1.000 m<sup>3</sup>/h ist i.d.R. ein zusätzlicher Ventilator für den L-EWT sinnvoll. Bedingt durch die Druckverluste im L-EWT und den zusätzlich vorgeschalteten Filter besteht die Gefahr, dass der Zuluftventilator der Lüftungsanlage in einem unwirtschaftlichen Betriebspunkt arbeitet. Häufiger aber sind regelungstechnische Anforderungen (variabler Bypass, Volumenstromregelung im L-EWT) mit einem zusätzlichen Ventilator einfacher umsetzbar. Die Druckverlustberechnung sollte hier unter Berücksichtigung der verschiedenen Betriebsszenarien (mit und ohne L-EWT, Teillast) durchgeführt werden, um so die Entscheidungsgrundlage liefern. Mit einbezogen werden muss auch noch einmal, welche Aufgabe der L-EWT eigentlich ganzjährig zu erfüllen hat und welcher Regelaufwand damit verbunden ist.
2. Ziel sollte es sein, möglichst ohne Volumenstromregelung, Frequenzumformer und Zusatzventilator auszukommen, was allerdings meist nicht gelingt. Die Minimierung des Stromverbrauchs ist hier besonders wichtig, da sonst die gebäudeseitig, energetisch sinnvollen Betriebsstunden des L-EWT sinken und die Wirtschaftlichkeit reduzieren. Man muss sich bewusst machen, dass der Ventilator der einzige Stromverbraucher der Heiz- und Kühlanlage beim L-EWT-System ist.
3. Aus hygienischer Sicht kann es vorteilhaft sein kann, den L-EWT im Überdruck zu betreiben. Falls der L-EWT Undichtigkeiten aufweisen sollte, wie häufig bei Betonrohren festgestellt, werden dann keine evtl. vorhandenen Schadgase, z.B. Radon, aus dem Erdreich angesaugt. Die Forderung Überdruckbetrieb bedingt dann automatisch einen Schubventilator für den L-EWT. Dieser sollte so dimensioniert werden, dass er seinen Druck am L-EWT Ausgang abgebaut hat.
4. Ein nicht unwichtiges Planungsdetail betrifft die Lage des Ventilatorantriebs im Lüftungssystem. Der Ventilator erzeugt Wärme durch seine Antriebsarbeit. Hinzu kommt die Abwärme des Motorantriebs, wobei die Dissipation des Ventilators gegenüber der Motorabwärme eine untergeordnete Rolle spielt. Bei den meisten Ventilatoreinheiten befindet sich der Antriebsmotor im Strömungskanal, so dass die Luft gleichzeitig den Motor kühlt. Die Wärmeabgabe des Motors unterstützt den Heizbetrieb, während sie im Kühlbetrieb kontraproduktiv arbeitet. Die Motorabwärme führt zu Temperaturerhöhungen von bis zu 2K. Dieser übliche Vorgang betrifft ein L-EWT-System ebenso wie ein Konventionelles. Der Planer muss dies selbstverständlich bei der Auslegung des Kühlers berücksichtigen und entsprechend mehr Kühlleistung einplanen. Der Systemunterschied wirkt sich allerdings beim L-EWT-System besonders nachteilig aus, wenn die Planungsanforderung darin besteht, einen L-EWT als alleinige Anlage im Kühlfall zu betreiben. Der L-EWT müsste somit eine entsprechend bis zu 2K tiefere Austrittstemperatur liefern. Was beim konventionellen Kühler kaum ein Problem darstellt, führt beim L-EWT zu einer erheblichen Vergrößerung der Rohrlänge und damit zu überproportional hohen Baukosten.

Einfacher ist es daher, den Ventilatormotor ausserhalb des Luftstroms anzuordnen und besser auf die Nutzung der Motorabwärme im Winterbetrieb zu verzichten. Wie man hier abwägt, kommt ganz auf den konkreten Fall an. Ein außerhalb des Luftsystems liegender Motor wird mit einem Riemen angetrieben, weshalb der Ventilator zwischen der 1. und 2. Filterstufe anzuordnen ist. [VDI 6022 4.3.6]

### 3.5 Ansaugsysteme und Filter

Die Ansaugung der Außenluft erfolgt nach den anerkannten Regeln der Technik, da Ansaugsysteme für Luft-Erdreichwärmetauscher identisch mit den üblichen Ansaugsystemen im Lüftungsbau sind, nur dass in der Ansaugung bereits zwingend eine Filterstufe integriert werden muss.

Je nach L-EWT-Design (vgl. 2.1) gibt es für den L-EWT entweder ein separates Ansaugbauwerk oder der L-EWT wird über die RLT-Anlage betrieben. Die Ansaughaube sollte einen möglichst einfachen Filterwechsel ermöglichen. Wie bei allen Komponenten des L-EWT ist auf einen geringen Druckverlust der Ansaugung zu achten.



**Bild 35** Beispiele Lamellenhaube und Ansaugröhre des L-EWT des Studentenwohnheims der FH-Aachen (rechts)

In jedem Fall ist hier neben den einschlägigen Vorschriften wie DIN 1946 besonders auf die Anforderungen in der VDI-Richtlinie 6022, Hygienische Anforderungen an Raumluftechnische Anlagen, zu achten. Ein L-EWT findet dort bisher keine ausdrückliche Erwähnung, weshalb der Planer nur im Sinne der VDI-Richtlinie planen kann.

Die Filter der RLT-Anlage werden nach den Regeln der Technik ausgelegt, weshalb in der Regel 2 Filterstufen vorzusehen sind. In der ersten Filterstufe mindestens die Filterklasse F5, möglichst jedoch F7, und in der zweiten Stufe mindestens F7, möglichst jedoch F9 [VDI 6022 4.3.3].

Laut VDI 6022 sollte das Luftleitungsnetz vor Verunreinigungen geschützt werden, wozu auch der L-EWT zählt. Daher muss in der Ansaugung vor dem L-EWT eine zusätzliche Filterstufe G3 oder G4, besser jedoch ein Feinstaubfilter F5 bis F7 eingesetzt werden.

Die Wahl der Luftvorfiltergüte erhält selbstverständlich bei einem L-EWT, mit unter Umständen anfallendem Kondenswasser, eine besondere Bedeutung. Wenn durch ggf. anfallende Feuchtigkeit im Kanal das Wachstum von Schimmel und Pilzen begünstigt wird, sollten wenigstens so wenige Sporen wie möglich in den Kanal gelangen, um so keine Probleme zu bekommen. Dies spricht eher für die Verwendung hochwertiger Feinstaubfilter, auch wenn dadurch der Druckverlust steigt.

Was in der Praxis aber durchaus schon öfter vorkommt, ist die Tatsache, dass hochwertige Filter der Klasse F 6 oder F 7 an der Außenluftansaugung bei Temperaturen unter 0°C und hoher Luftfeuchte, also Nebel, zugefroren sind und damit ein Funktionsausfall verbunden war. Feuchtepartikel hatten sich in diesen Fällen im Filtermaterial abgesetzt und waren bei weiterer Abkühlung gefroren. Sehr hochwertige Filter haben also nicht nur druckverlust-technische Nachteile.

Grundsätzlich ist ein regelmäßiger Filterwechsel notwendig. Auf eine konkrete Angabe der Wechselintervalle soll hier bewusst verzichtet werden, vielmehr ist eine häufige Inspektion durch optische Kontrolle, beginnend kurz nach der Inbetriebnahme, ratsam. Auf diese Weise können dann mit der Erfahrung für das konkrete Objekt die Inspektionsintervalle angepasst werden.

Messungen [12Gerlach] zeigen, dass nach der Standzeit von einem Jahr die Endotoxinkonzentration hinter Filtern deutlich zunahm. Dieser Effekt trat dadurch ein, dass der Filter voll beladen war und durch den Luftstrom Teile der Verunreinigung aus dem Filter gerissen wurden.

Weitere Messungen an L-EWT haben ergeben, dass Filter teils bereits halbjährlich gewechselt werden sollten, da sie bezüglich der Konzentration von Pilzsporen bedenklich wurden [16Gerlach].

Bezüglich der Filterstufen ist anzumerken, dass hier auch andere Kombinationen von Filterklassen als oben genannt, gewählt werden können. Zu empfehlen ist z. B. ein Grobstaubfilter in der Vorfilterstufe, der die groben Schmutzpartikel von dem L-EWT fernhält. Die beiden weiteren Stufen im Zentralgerät sollten Feinstaubfilter sein, wie sie normalerweise, auch ohne L-EWT, in Zentralgeräte eingebaut werden. Hierdurch scheint ein guter Kompromiss zwischen Hygiene, Druckverlust und Filtervereisung gefunden zu sein. Dass bei diesem Vorschlag keine hygienischen Probleme auftreten, belegen auch mikrobielle Untersuchungen, die an 12 schweizerischen Gebäuden, die mit L-EWT ausgestattet sind, durchgeführt wurden [17].

Der Planer muss also entscheiden, für welchen Vorteil er welchen Nachteil in Kauf nimmt. Auf jeden Fall ist die ausreichend häufige Inspektion und wenn notwendig die Reinigung des L-EWT-System unbedingt erforderlich.

### 3.6 Wartung und Revision

Gemäß VDI-Richtlinie 6022 ist die regelmäßige Kontrolle von RLT-Anlagen Pflicht, wozu eben auch die Rohre eines L-EWT gehören. Ein entscheidender Aspekt für die Kontrolle und die Reinigung ist es, den L-EWT so zu planen, dass beides möglichst einfach und damit kostengünstig erfolgen kann.

Bezüglich der hygienischen Bedingungen in den Rohren eines Erdregisters kommt man schnell zu dem prinzipiellen Ergebnis, dass glatte, geschlossenporige Oberflächen (z.B. Kunststoff oder Metall) besser sind als offenporige oder poröse Oberflächen (z.B. Beton). Bei Anfall von Tauwasser können glatte Oberflächen schneller wieder abtrocknen, sie können leichter gereinigt werden und bieten Pilzsporen und Bakterien weniger Oberfläche, auf der sie sich potentiell sammeln und vermehren können. Grundsätzlich bedeutet dies, dass L-EWT aus Betonrohren des öfteren inspiziert und meist mit etwas höherem Aufwand gereinigt werden müssen.

Generell muss der L-EWT mit Revisionsöffnungen zur Kontrolle und Reinigung versehen werden. Bei Rohren mit DN 200 - 300 müssen die Öffnungen mindestens eine Größe von 300 mm Länge und 100 mm Breite besitzen [18]. Bei größeren Dimensionen sollte man die Öffnungen begehbar gestalten, so dass eine einfach gestaltete Inspektion möglich ist und keine aufwendigen Gerätschaften notwendig sind. Diese Öffnungen müssen eine Mindestgröße von 600 mm Länge und 500 mm Breite haben [18]. Bild 36 zeigt eine solche begehbare Revisionsöffnung am Ende des Grabens.

**Bild 36**

Teilstück des L-EWT SIJ mit Revisionsöffnung



Sind aus wirtschaftlichen und energetischen Gründen kleine Dimensionen zu verwenden, ist die genaue Kontrolle des Rohrinernen mit erhöhtem technischen Aufwand möglich. Zur Zeit werden von DN 150 bis DN 300 Kanalkameras und ab der Dimension DN 300 Roboter eingesetzt.

Bei großen Rohrdimensionen können durch die Begehbarkeit auch leichter Reparaturen durchgeführt werden. Treten durch äußere Einflüsse Risse an der Rohrwand auf, können diese oftmals von innen repariert werden, in dem man die Ritzen mit den entsprechenden Materialien (z.B. Zweikomponenten-Kunstharze [20]) ausfüllt. Hierdurch können in den meisten Fällen teure Erdarbeiten vermieden werden. Allerdings darf man hier die höheren Investitionskosten bei großen Rohrdimensionen nicht übersehen. Die Reinhaltung der Röhren mit kleinen Durchmessern kann durch mehrerer Systeme bewerkstelligt werden.

Das Einfachste ist die Reinigung per Hand mit Bürsten. Die Reinigungsbürsten werden mit langen flexiblen Halterungen, damit man auch durch die Bögen kommt, durch die Röhren geführt [21,22]. Dieses System kann für alle Varianten der Kondensatabführung verwendet werden. Das System ist von der Einsetzbarkeit bezüglich der Rohrdimensionen nicht beschränkt.

Ab einer Rohrdimension von DN 300 können Reinigungsroboter eingesetzt werden. Diese haben aufgesetzte Bürsten, die rotieren. Die Reichweite der Roboter beträgt bis zu 50 m. Es werden zwei Öffnungen, jeweils eine am Anfang und am Ende benötigt. Durch eine Öffnung wird der Roboter eingesetzt und gesteuert, durch die andere wird der Schmutz abgeführt [21,22]. Für kleinere Dimensionen verwenden die angeführten Reinigungsfirmen Bürsten, die sich durch ihre eigene Rotation fortbewegen. Für beide Reinigungssysteme stellen Bögen kein Problem dar. Es müssen allerdings bei dem System mit den rotierenden Bürsten Revisionsöffnungen mit einem maximalen Abstand von 25 m vorgesehen werden, damit zum einen die Bürste eingesetzt und zum anderen das verunreinigte Spülwasser abgeführt werden kann. Diese Art der Reinigung wird am häufigsten eingesetzt, da sie auch grobe und sehr widerstandsfähige Verunreinigungen an der Rohrwand entfernen kann. Kleine Kondensatmengen stellen dabei kein Problem dar. Hierbei muss anstelle der Bürste ein Schwamm aufgesetzt werden, da die Bürsten das Kondensat zum größten Teil nur verschmieren und nicht entfernen, der Schwamm aber diese kleinen Wassermengen aufsaugen kann und entfernt. Das System kann allerdings nur angewendet werden, wenn keine Sickergruben oder Sickergruben, die abgedeckt werden können, vorhanden sind. Dieses ist bei den kleinen Rohrdimensionen nicht üblich.

Die Verlegung von Kollektoren unter einem Fundament stellt häufig ein Problem für die Handreinigung dar, da oftmals aufgrund der konstruktiven Rahmenbedingungen des Gebäudes die Revisionsklappen nicht in den benötigten Abständen eingebaut werden können. Bei geringen Verschmutzungen wendet man Pressluft an. Der in die Röhre einzuführende Schlauch besitzt eine Düse, welche die Druckluft gezielt und gleichmäßig über die Rohrwand verteilt. Der Schmutz wird wie mit einem Spachtel von der Wand abgelöst.

Ein weiteres Verfahren, welches bei der Rohrreinigung zur Anwendung kommen kann, ist die Durchspülung mit Wasser. Nachteilig wirkt sich dabei aus, dass sich verschiedene Komponenten der Lüftungsanlage nicht mit größeren Mengen des Mediums Wasser vertragen. Das Hauptproblem stellt die nach der Durchspülung durchzuführende Trocknung dar. Um nach der Reinigung ein trockenes Rohr zu erhalten, ist ein erhöhter technischer Aufwand von Nöten, wie z.B. die Durchspülung des Systems mit Pressluft, wodurch die Feuchtigkeit aufgrund der hohen Luftgeschwindigkeiten verdampft oder mitgerissen wird.

Allerdings könnten Restbestände an Flüssigkeit in Nahtstellen zurückbleiben und somit direkt wieder für einen guten Nährboden im Kollektor sorgen. Probleme beim Durchspülen treten ebenfalls bei der Abführung des Wassers auf.

Das beste System für kleine Rohrdimensionen ist das Durchschießen der Röhren mit Reinigungskörpern aus Kunststoff, wobei diese je nach Art der Verunreinigung härter oder weicher sind. Zur Durchführung der Reinigung ist allerdings die Leitung vor dem Zentralgerät abzusperren. Hier muss eine Revisionsklappe angebracht sein, durch die der Reinigungskörper wieder entfernt werden kann. Der Reinigungskörper ist rund und von den Ausmaßen so groß, dass er umlaufend an der Rohrwand anliegt. Seine Oberfläche ist porös, so dass er Schmutzpartikel aufnehmen kann [21]. Dies ist die Grundbedingung, damit er den Großteil der auf der Wand sitzenden Verunreinigungen mitreißt. Der Reinigungskörper wird nun möglichst am Anfang des Rohrsystems eingesetzt und durch das Rohrsystem bis zur Absperrung vor dem Zentralgerät hindurchgeblasen. Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis der Reinigungskörper beim Austritt aus dem Rohr sauber ist.

Abschließend ist bei der Reinigung der L-EWT mit kleinen Durchmessern festzustellen, dass das Handreinigungsverfahren und das Verfahren mit dem Hindurchschießen der Reinigungskörper favorisiert werden sollte. Bei dem ersten System sind höhere Kosten bei der Anbringung von mehreren Revisionsklappen zu berücksichtigen. Außerdem ist die Reinigung von der Handhabung her schwieriger, da hier alles manuell durch eine relativ kleine Öffnung vollzogen werden muss.

Auf der anderen Seite steht das Verfahren mit dem bei der Reinigung technisch höheren Aufwand und den demzufolge höheren Kosten. Aber hier ist die Handhabung einfacher und es wird ein höherer Reinigungsgrad erreicht, da nicht wie bei der Handreinigung mehrere Ansatzpunkte bestehen und aufgrund dessen die Entfernung von altem Kondenswasser nicht vollständig gewährleistet werden kann. Falls ein Reinigungskörper stecken bleiben sollte, kann das System zur Not auch mit Wasser freigespült werden und es müssen keine Erdarbeiten vorgenommen werden.

Bei Verwendung von größeren Dimensionen, die begehbar sind, sollten dementsprechend Mannlöcher vorgesehen werden.

Hier kann die Reinigung durch Personal ohne besondere Vorkehrungen durchgeführt werden. Die Hygienekontrolle, dies gilt allerdings für alle L-EWT Systeme, ist nach VDI 6022 regelmäßig von den Betreibern und in einem Abstand von 2 Jahren durch geschultes Personal durchzuführen.

Zuletzt sei eine Besonderheit bei der Reinigung eines Registersystems ohne begehbare Sammler und Verteiler erwähnt. Wenn hier mit dem Reinigungssystem Druckluft/Reinigungskörper gearbeitet werden soll, ist ein erheblich höherer technischer Aufwand zu berücksichtigen, da mehrere Einzelstrecken separat abgesperrt werden müssen, da der Reinigungskörper sonst keinen definierten Weg durchläuft.

## 4 Wirtschaftliche Aspekte

Ein L-EWT ist von seinen Eigenschaften, wie die meisten regenerativen Systeme, dadurch geprägt, dass die der Umwelt entnehmbare Energiemenge mit relativ geringer Energiedichte, aber dafür stetig fließt. Dadurch kommen über die Lebensdauer des Systems erhebliche Energiemengen zusammen, die, bis auf die Ventilatorarbeit, kostenlos zur Verfügung stehen. Bei fast allen gebauten L-EWT sind die Investitionskosten zunächst höher als die eines konventionellen Systems, allerdings sind die Betriebskosten geringer. Gut geplante L-EWT weisen Arbeitszahlen von 20 und mehr auf. Wie bei allen regenerativen Systemen ist die Wirtschaftlichkeitsberechnung daher eng an den Energiepreis und vor allem an die zu erwartenden Energiepreissteigerungen geknüpft. Es ist daher erforderlich, Prognosen über einen längeren Zeitraum anzustellen und die Bauherren über die Auswirkungen der Annahmen zu informieren. Ein Bauherr, der einen *return of investment* (ROI) in zwei Jahren erwartet, wird i.d.R. mit einem L-EWT nicht zufrieden werden.

Die wirtschaftlichen Betrachtungen werden in Anlehnung an die VDI 2067 durchgeführt. Laut dieser Richtlinie setzen sich die Gesamt-Betriebskosten zusammen aus:

- **Kapitalgebundene Kosten**
- **Verbrauchsgebundene Kosten (Energiekosten pro Jahr)**
- **Betriebsgebundene Kosten (Wartungs- und Reparaturkosten)**
- **Sonstige Kosten (wie VDI 2067)**

Wie bei jeder Vergleichsrechnung stellt sich auch zu Beginn der Wirtschaftlichkeitsberechnung die Frage nach der Bilanzgrenze, innerhalb derer zwei oder mehr Systeme verglichen werden sollen.

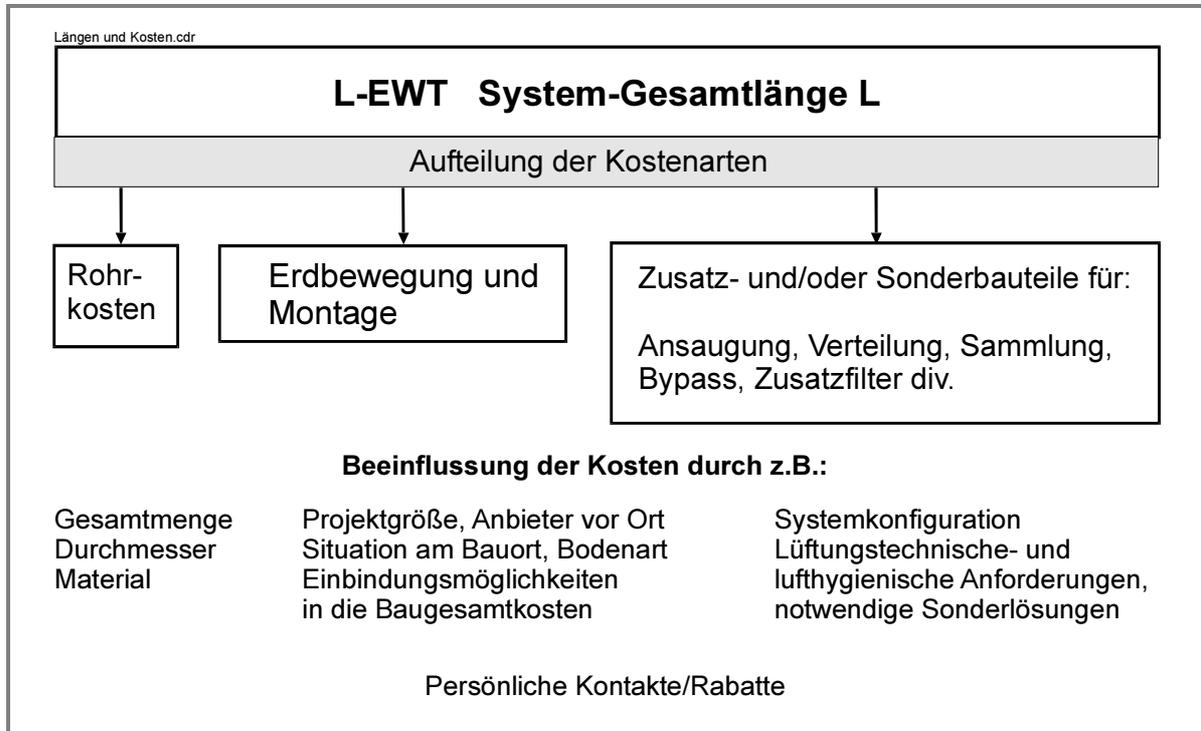
Die Schwierigkeit liegt dabei meist nicht bei den harten Fakten, sondern den weicheren Faktoren, wie z.B. der Bewertung der Behaglichkeit. Bei einem Gebäude mit L-EWT als einer Variante ist zwangsläufig, unabhängig vom L-EWT, eine mechanische Lüftung vorzusehen, die entsprechende Vorteile für die Luftqualität mit sich bringt. Es würde daher wenig Sinn machen, die Kosten der Lüftungsanlage in die Bilanzgrenze des L-EWT-Systems einzubeziehen und ein Vergleichssystem ohne Lüftungsanlage zu rechnen.

### 4.1 Kapitalgebundene Kosten – Investition

Die Kapitalkosten bestimmen sich aus den Investitionskosten und der rechnerischen Nutzungsdauer der Bauteile gemäß VDI 2067.

Die anfallenden Investitionskosten werden hauptsächlich durch die Aushub- und Materialkosten sowie die Kosten für Sammel- und Verteilungsleitungen und Sonderbauten des L-EWT bestimmt (Bild 37).

Die Anforderungen an eine Lüftungsanlage werden durch den L-EWT nur geringfügig erhöht. Zusätzliche Kosten entstehen durch eine Ansaugvorrichtung, Umlenkungen, Revisionschächte und Filter.



**Bild 37** Beispiele von Einflussgrößen auf die Gesamtinvestitionskosten

Für eine verlässliche Wirtschaftlichkeitsberechnung kommt man, vor allem bei größeren Anlagen, nicht umhin, Angebote ausführender Firmen einzuholen.

Für die Bestimmung der Nutzungsdauer bietet sich die Konzentration auf die kapitalintensiveren Anlagenkomponenten an. Die Nutzungsdauer von L-EWT lässt sich aus der VDI 2067 nicht direkt ableiten. Sie kann in Analogie zu anderen Anlagen (Tabelle 8) in der VDI 2067 mit 40 bis 50 Jahren angesetzt werden. Für die Lüftungsanlage wird eine Nutzungsdauer gemäß VDI 2067 angesetzt, dies sind i.d.R. 20 Jahre.

**Tabelle 8** Nutzungsdauern verschiedener Anlagen gemäß VDI 2067

	Nutzungsdauer [Jahre]
Bauliche Anlagen	<b>50</b>
Rohrleitungen für Gas (nach VDI 2067 Blatt 1)	<b>40</b>
Verrohrung der Wärmequelle im Erdreich (nach VDI2067 Blatt 1)	<b>40</b>
Abwasseranlagen in Grund- und Erdbau (Feurich)	<b>80-160</b>

Die lange, durch seine Robustheit bedingte Nutzungsdauer ist ein entscheidendes Merkmal des L-EWT Prinzips. Der Vergleich der Wirtschaftlichkeit mit anderen Systemen wird dadurch erheblich beeinflusst.

#### **4.1.1 Baukosten**

Bei den Kosten des L-EWT muss ein großer Teil für den Erdaushub veranschlagt werden, es sei denn man kann eine Baugrube für die Verlegung nutzen, die bei größeren Anlagen i.d.R. nicht ausreicht bzw. erweitert werden muss.

Die Baustelleneinrichtung beinhaltet alle Vorbereitungen für einen reibungslosen Arbeitsaufwand. u.a. zählen dazu:

- **Bereitstellen der Maschinen**
- **Bereitstellen der Energieversorgung**
- **Vorbereitung der Erdfläche**

Ein Teil der Arbeiten ist unabhängig von der Baustellengröße, während ein anderer Anteil von der Größe der Baustelle abhängt. Daher enthalten die Kosten einen fixen und einen variablen Anteil. In der Regel fällt der Bau eines L-EWT mit der Gebäudekonstruktion zusammen. In diesem Fall reduzieren sich die Kosten für die Einrichtung der Baustelle auf die zusätzlichen Maßnahmen, die konkret für den L-EWT geschaffen werden müssen. Tiefere schmale Gräben sind im allgemeinen relativ teurer als flache breitere Gräben, weshalb es häufig günstiger ist, im Fall eines Rohregisters, nicht einzelne Rohrgräben, sondern eine komplette Baugrube auszuheben.

Die durchzuführenden Erdarbeiten bestehen dann aus folgenden Einzelschritten:

- **Boden lösen und laden**
- **Transport und Lagerung**
- **Sandbett (nach Verlegung der Rohre)**
- **Verfüllen, Einbau und Verdichten**
- **Entsorgung des verdrängten Bodens**

Die Kosten der Erdarbeiten werden üblicherweise pro Kubikmeter Erdreich berechnet, wobei diese spezifischen Kosten von der Bodenart abhängen. Liegt hier ein Bodengutachten vor, sind die Kosten mit größerer Sicherheit abzuschätzen. Abhängig von der Verlegetiefe und der Bodenart sind die notwendigen Grubensicherungsmaßnahmen.

Kostenrelevant ist natürlich auch, ob der Erdaushub in der Nähe (ca. 50m) gelagert werden kann oder erst anderswo eine Zwischenlagerung erfolgen muss.

Des Weiteren ist kostenrelevant, ob der verdrängte Erdaushub nach Einbau der Rohre auf dem Grundstück verbleiben kann oder entsorgt werden muss.

Für eine überschlägige Kostenberechnung kann man pro Kubikmeter Erdreich etwa 35,- €/m<sup>3</sup> (netto, +5 €/–10 €) kalkulieren, wobei es sich um eine mittlere Bodenklasse ohne Bau-schuttanteile handelt, die Lagerung auf dem Grundstück erfolgen kann und keine Entsorgungskosten berücksichtigt sind.

#### 4.1.2 Rohre und Sonderbauteile

Neben dem Erdaushub werden die weiteren Investitionskosten eines L-EWT hauptsächlich durch Menge und Art des Rohrmaterials bestimmt. Der Bestellumfang für das Rohrmaterial und die Verlegekonfiguration eines Projektes beeinflussen alle weiteren Maßnahmen und Kostenpositionen bis zur Fertigstellung des L-EWT.

Da die thermischen Materialeigenschaften, wie in Kapitel 2.3 erläutert, keine erhebliche Rolle spielen, ist die Wahl des Materials für Erdwärmetauscher in erster Linie eine Frage der Kosten. Das Gussrohr kommt daher trotz der guten Materialeigenschaften aufgrund sehr hoher Kosten in der Regel nicht für den Einsatz als Erdwärmetauscher in Frage. Steinzeug ist günstiger als Gussrohr, aber dennoch erheblich teurer als KG-Rohr. Bei kleinen Durchmessern (bis etwa 500 mm) werden KG-Rohre zu relativ günstigen Preisen hergestellt. Ab 500 mm sind Beton- und Faserzementrohre günstiger als KG-Rohre. Es ist daher empfehlenswert, Beton z.B. für Sammelleitungen einzusetzen. Für Verlegungen im, oder in der Nähe von Grundwasser, sind wegen der Forderung nach Dichtigkeit des Systems PE-HD-Rohre einzusetzen. Die Rohrkosten sind im wesentlichen abhängig vom Material, vom Durchmesser und dem Lieferumfang. Die Preisermittlung streut innerhalb der verschiedenen Anbieter stark. In Tabelle 9 sind ausgewertete Herstellerangaben aufgeführt.

**Tabelle 9** Meterpreise Material bezogen auf 5m-Elemente, Lieferung frei Baustelle.

Quellen: [FHAaBaubetrieb] DLR, LSG, Fränkische, eg-Plast, Steinzeug AG u.a

Preise in € / m (netto) ± 30%	PVC-Hart	PE-HD	PP	PE-Kabel- schutzrohre	Beton z.B. KFW-M	Steinzeug	Faser- zement FZ
Durchmesser DN bzw. d <sub>i</sub>							
75	3	5	5	3	-	-	-
100	4	6	7	3,6	-	11	-
125	6	8	12	4,9	-	13	-
150	9	10	19	7,5	-	15	-
200	14	12	-	-	-	18	-
250	17	15	-	-	-	21	-
300	20	30	-	-	26	25	28
350	31	35	-	-	-	27	-
400	41	150	-	-	31	32	35
500	52	240	-	-	47	46	52
800	-	600	-	-	70	-	82
1000	-	-	-	-	124	-	156
1400	-	-	-	-	263	-	-
2000	-	-	-	-	536	-	-

Die Kosten für die Anlieferung der Rohre sind i.d.R. in den Rohrmaterialkosten bereits enthalten. Die Verlegekosten sind stark vom Rohrmaterial und der Rohdimension abhängig.

Größere Rohrdurchmesser sind über-proportional teurer als kleine. Allerdings benötigt man für das Auslegungsziel, z.B. Frostfreiheit im Wärmerückgewinnungsgerät, bei größeren Rohrdurchmessern auch weniger Rohrlänge. Dennoch wird schnell klar, dass kleinere Rohrdurchmesser wesentlich geringere Investitionskosten bedeuten, denn neben dem preiswerteren Rohrmaterial ist auch der Erdaushub geringer.

Der Kostendruck birgt daher die Gefahr, die Rohrdurchmesser zu klein zu dimensionieren. Bei kleinen Rohrdurchmessern steigt, bei gegebenem Volumenstrom, der Druckverlust im L-EWT überproportional an. Dies wiederum führt zu einer erhöhten Ventilatorarbeit und damit zu einem hohen Stromverbrauch, was den ursächlichen Sinn des L-EWT in Frage stellen könnte.

Die Ermittlung der Kosten für Luftansaugung, -verteilung, -sammlung und -übergabe ist deswegen schwierig, da diese Kostenanteile sehr stark von der jeweiligen Baukonstruktion abhängen, die es erfordert, teils individuelle Sonderlösungen ausführen zu müssen.

## **4.2 Verbrauchsgebundene Kosten**

Als verbrauchsgebundene Kosten nach VDI 2067 gelten allgemein die Energiekosten für Wärme, Kälte und elektrische Antriebsenergie. Die Wärme, die der Luft vom Untergrund zugeführt bzw. entzogen wird, verursacht rechnerisch keine Kosten. Die Luft wird von einem Ventilator durch das L-EWT-Rohr oder Rohrregister bewegt. Als verbrauchsgebundene Kosten fallen die elektrischen Energiekosten für den Betrieb des Ventilators an.

Da ein L-EWT meist auch der Vorwärmung der Luft im Winter dient, liefert er einen Ertrag, der sonst vom Wärmeerzeuger erbracht werden müsste. Dieser Ertrag ist entsprechend zu berücksichtigen.

Die Nutzungsstundenzahl hängt vor allem von den Klimadaten und dem Regelkonzept eines L-EWT ab. Sie kann aus den Klimadaten und den Berechnungen des Gebäudekonzepts ermittelt werden. Die benötigte Ventilatorleistung  $P_{\text{vent}}$  ergibt sich aus den Druckverlusten in den Rohrleitungen sowie im Filter des Ansaugstutzen und am Einlass zur Lüftungsanlage im Gebäude.

Für den Energieverbrauch bzw. die -gutschrift ist es sinnvoll, eine Energiepreissteigerung anzusetzen. Häufig ist hier ein Wert von 3% jährlich zu finden. Da es sich dabei allerdings um eine brisante Zukunftsprognose handelt, wird dringend empfohlen, den Kunden über die Konsequenz der Preisprogression zu informieren. Es empfiehlt sich daher eine Sensitivitätsanalyse dieses Parameters.

## **4.3 Betriebsgebundene Kosten**

Die betriebsgebundenen Kosten setzen sich in erster Linie aus den Reparatur- und Wartungskosten zusammen. Wartungskosten fallen für das EWT-Rohrleitungssystem und die Lüftungsanlage an.

Die Wartungskosten für die Lüftungsanlage werden nach VDI 2067 Blatt 1 berechnet. Die Wartungskosten für das EWT-System hängen stark von den Betriebszeiten und der Bauart des Systems ab (s. Kapitel 3.6) und sind daher momentan noch nicht pauschal bezifferbar. Klar ist nur, dass ein L-EWT mit schlechter Zugänglichkeit für die notwendigen Wartungsintervalle schnell unwirtschaftlich wird.

Reparaturkosten werden üblicherweise in einen direkten prozentualen Zusammenhang mit den Investitionskosten gebracht. Für einen L-EWT spielen sie sicherlich eine untergeordnete Rolle, da er bauartbedingt als äußerst robust einzustufen ist.

Weitere Wartungskosten fallen insbesondere für Filter im Luftansaugstutzen an. Auch hier empfiehlt es sich bereits bei der Konstruktion Filterpreise einzuholen, da Sonderkonstruktionen u.U. ein mehrfaches des Preises von Standardgrößen kosten.

## 5 Lufthygiene

In Räumen mit Personenaufenthalt ist eine ständige Lüfterneuerung erforderlich, um eine Anreicherung der Innenraumluft mit Geruchs- und Schadstoffen zu verhindern und Wärme und Feuchtigkeit abzuführen. Die Lüfterneuerung kann durch freie Lüftungssysteme (z.B. das Öffnen von Fenstern) oder durch lufttechnische Anlagen erfolgen. Bei älteren Gebäuden ist die Lüfterneuerung oftmals durch Gebäudeundichtigkeiten gewährleistet.

Die verwendeten Materialien einer raumlufttechnischen Anlage (RLT-Anlage) müssen den gesundheitstechnischen Anforderungen genügen. Um den hygienischen und auch funktionellen Zustand einer RLT-Anlage zu erhalten, ist eine regelmäßige Wartung unerlässlich. Die Wartung ist gemäß den Normen und Richtlinien wie VDI 3801, VDI 3803, VDMA 24186, AMEV Wartung etc. vorzunehmen. Eine unzureichende Wartung der RLT-Anlagen kann sich nachteilig auf die Raumluftqualität auswirken.

In verschiedenen Fällen sind aus der Vergangenheit Infektionen bekannt, die auf eine mikrobielle Kontamination von Lüftungsanlagen zurückzuführen sind. Hier sei als Beispiel aus [9] die Klinik im englischen Stafford genannt, in der 1985 infolge der Verbreitung von Legionellen durch eine kontaminierte RLT-Anlage 163 Personen erkrankten und von denen 39 Menschen verstarben.

Dabei gehört die Luft nicht zu den natürlichen Lebensräumen der Mikroorganismen, weil in ihr die notwendigen Stoffe für Wachstum und Vermehrung fehlen. Die in ihr enthaltenen Keime entstanden vorwiegend von der Erde, vom Wasser und von Pflanzen und tierischen Lebewesen. Die Keime gelangen in die Luft, indem sie durch Luftbewegungen aufgewirbelt oder von Menschen und Tieren an die Luft abgegeben werden.

Mikroorganismen kommen in der Luft vor:

- als isolierte Partikel ohne Begleitsubstanzen (vor allem Pilzsporen)
- an festen Teilchen haftend (z.B. Staub + Erdpartikel, Hautschuppen, Pflanzenteile, Haare)
- in Tröpfchen

Die in der Außenluft vorkommenden Mikroorganismen stammen hauptsächlich vom Boden und von Pflanzen, die mit Bakterien und Pilzen besiedelt sind. Aber auch technische Einrichtungen wie Kläranlagen, Kühltürme, etc. können zur Belastung der Außenluft mit Mikroorganismen beitragen.

Dabei schwankt die Zusammensetzung der Keimflora erheblich in Abhängigkeit von der Jahreszeit, den Witterungsverhältnissen, der geographischen Lage und der Vegetation. Der Gehalt an lebenden Mikroorganismen ist abhängig von der Dauer des Schwebezustandes und damit auch von der Größe der Keime und ihrer Bindung an Partikeln oder Tröpfchen.

Die Mikroorganismen in der Innenraumluft unterscheidet man nach der Herkunft zwischen "primären" und "sekundären" Luftkeimen. Zur Gruppe der primären Luftkeime gehören die ursprünglich im Freien vorkommenden Arten. Die wichtigste Quelle für die sekundäre Luftkeimflora bildet der Mensch durch die Abgabe von Hautschuppen und durch Ausdünstungen, Niesen, Husten und Sprechen.

In [9] wird die Aussage von Rüden und Moriske (1991) angegeben, dass normalerweise in der Raumluft von Gebäuden mit freier Lüftung Keimkonzentrationen von 100 - 1000 KBE/m<sup>3</sup> nachgewiesen werden. Ebenfalls zitiert sind die Orientierungswerte nach Botzenhart (1979):

\*) Kolonien-Bildende-Einheiten, kurz "KBE" genannt oder mit dem Begriff Keimzahl gleichzusetzen

- bis 100 KBE/ml in wenig benutzten Räumen oder bei kontinuierlicher Keimreduktion durch lufttechnische Maßnahmen
- bis 1.000 KBE/ml häufig beobachtet in Wohn- und Arbeitsräumen
- bis 10.000 KBE/m<sup>3</sup> in Räumen mit hoher Arbeitsaktivität, in Tierställen und bei Luftverunreinigung durch technische Vorgänge.

Die Pilzsporenkonzentration im Innenraum ist u.a. abhängig von

- der saisonbedingten Schimmelpilzflora (höchste Belastung im Sommer und Herbst)
- bauphysikalische und konstruktive Bauwerksmängel (z.B. Kondensation durch Wärmebrücken)
- Wohnverhalten und Raumnutzung (z.B. unzureichende Beheizung, falsches Lüften)

Für das Zustandekommen von luftübertragenden Infektionen ist in [9] die Voraussetzungen nach Schaffer (1964) genannt:

- Der Keim muss die Möglichkeit haben, in die Luft verstreut zu werden.
- Er muss die Fähigkeit haben, in der Luft zu überleben, bis er auf einen geeigneten Nährboden gelangt.
- Es muss ein geeigneter Empfänger vorhanden sein, bei dem sich der Keim vermehrt.
- Damit der Empfänger erkrankt, muss die Anzahl der Keime ausreichend groß sein.

Bei dem Betrieb von Luft-Erdwärmetauschern muss die lufthygienische Unbedenklichkeit gewährleistet sein. Zu den bei allen Lüftungstechnischen Systemen bekannten Belastungsarten der Luft kommt bei L-EWT hinzu, dass sich im Frühjahr und Sommer durch Taupunktunterschreitungen an den Rohrwänden Tauwasser bilden kann, welches die Grundlage zum Wachstum von Keimen darstellt.

Als luftgetragene Schadstoffe müssen dabei folgende Stoffe identifiziert werden (Tabelle 10):

**Tabelle 10** Untersuchungsparameter bei der luft-hygienischen Bewertung von L-EWT

<b>Organische mikrobielle Organismen und ihre Stoffwechselprodukte</b>
Schimmelpilze
Mikrobiell flüchtige organische Verbindungen (MVOC)
Bakterien
<b>Anorganische Schadstoffe aus Rohrmaterial und Boden</b>
Partikelförmige Verunreinigungen (z.B. Schwebstaub)
Chemische Schadstoffe (z.B. Phtalate bei PVC-Rohren)
Radon (radioaktiver $\alpha$ -Strahler)

Da es bisher keine einheitliche Datenübersicht über hygienische Belastungen durch L-EWT gibt, werden eigene Messungen an dem Versuchs-L-EWT durchgeführt.

## 5.1 Definition der Belastungsarten

### 5.1.1 Schimmelpilze

Als heterotrophe Organismen können Schimmelpilze nicht wie andere Pflanzen das Licht zur Erzeugung von Energie nutzen, sondern ernähren sich von organischem Material. Nährboden für Schimmelpilzkulturen liefern organische Stoffe, die fast überall vorkommen, in der Erde, im Holz, in Staubkörnern, sogar in Kunststoffen. Die Zahl der vorkommenden Pilzarten wird auf über 250.000 geschätzt. Die Vermehrung der Schimmelpilze erfolgt durch Sporulation, das heißt, der Pilz gibt eine Unmenge von Sporen an die Luft ab. Gemeinsam mit anderen biologischen Partikeln wie Milben, Hautschuppen, Pollen und Bakterien sind Pilzsporen einer der Hauptbestandteile des sogenannten Aero planktons. Dies ist die Gesamtheit all jener Partikel biologischen Ursprungs, die sich in der Luft befinden.

Als besonders bedeutsame Arten sind Aspergillus, Cladosporium, Penicillium und Alternaria bekannt. Schimmelpilzbelastung liegt vor, wenn die Sporenkonzentration im Vergleich zur Außenluft signifikant erhöht ist ( $> 100$  Koloniebildende Einheiten KBE/m<sup>3</sup> [Senkpiel]). Schwellenwerte aus der Literatur für die Auslösung allergischer Symptome bei sensibilisierten Personen sind:

**Tabelle 11** Koloniebildende Einheiten KBE/m<sup>3</sup> nach [Senkpiel]

Cladosporium sp.: 1000 KBE/m <sup>3</sup> (Gravesen, 1978)	Alternaria sp.: 100 KBE/m <sup>3</sup> (Gravesen, 1978)
Gesamte Schimmelpilzflora:	250 KBE/m <sup>3</sup> (Holmberg, 1987, Senkpiel 1992) 500 KBE/m <sup>3</sup> (Reynolds, 1990; Reponen, 1992)

### **5.1.2 MVOC**

Eine neuere Nachweismethode für Schimmelpilzbefall geht über die organischen Stoffwechselprodukte, den sog. MVOC-Verbindungen (Microbially Volatile Organic Compounds). Von diesen sind viele für Schimmelpilze spezifisch. Durch die quantitative Bestimmung einiger bestimmter MVOC kann davon ausgegangen werden, dass mit hoher Wahrscheinlichkeit ein Schimmelpilzbefall vorliegt. Die als Indikatoren eines Schimmelpilzwachstums genannten Stoffe sind, selbst im Nanogramm/m<sup>3</sup>-Bereich, sehr geruchsintensiv. Sie sind oft organoleptisch gut wahrzunehmen. Der Effekt ist darauf zurückzuführen, dass die Mehrzahl der MVOC-Doppelbindungen, konjugierte Carbonylverbindungen und/oder OH-Gruppen aufweist, von denen bekannt ist, dass sie olfaktometrisch wirken. Da Schimmelpilze und ihre Stoffwechselprodukte ubiquitär verbreitet sind, sollten Referenzmessungen zur Bewertung von Messergebnissen herangezogen werden. Die Gesamthintergrundkonzentration der MVOC-Komponenten in der Außenluft ist je nach Ort und Jahreszeit verschieden. Der Gehalt liegt allgemein unter 0,1 µg/m<sup>3</sup>. Verbindliche Richt- oder Grenzwerte für MVOC zur Beurteilung der Luftqualität in Innenräumen liegen bislang nicht vor.

### **5.1.3 Bakterien**

Bakterien sind einzellige Lebewesen. Sie enthalten keinen festen Zellkern. Die DNA liegt frei in der Zelle. Im Gegensatz dazu liegt in der pflanzlichen, tierischen und menschlichen Zelle die DNA in einem Zellkern. Bakterien sind meistens zwischen 0,2 µm und 2,0 µm groß. Manche Bakterienarten können ihre Gestalt wechseln. In der Gestalt von Sporen können sie sehr resistente Dauerformen bilden, die auch widrigsten Umweltbedingungen über Jahrzehnte trotzen. Die äußere Erscheinung der Bakterien lässt sich auf gewisse einfache Grundformen zurückführen. Das Berufsgenossenschaftliche Institut für Arbeitssicherheit (BIA) gibt als mikrobielle Grundbelastung (Pilze und Bakterien) der Außen- und Innenraumluft Koloniezahlen von 100 bis 500 KBE/m<sup>3</sup> an. Innenräume mit mehr als 500 KBE/m<sup>3</sup> werden als beeinträchtigt angesehen.

### **5.1.4 Partikelförmige Verunreinigungen**

Darunter sind alle Schwebstäube zu verstehen, deren Partikelanzahl- und Größenverteilung sowie die Existenz lungengängiger mineralischer und organischer Fasern und Partikeln.

### **5.1.5 Chemische Schadstoffe**

Für L-EWT werden teilweise Rohrmaterialien (z.B. PVC-Rohre) verwendet, die allgemein nicht in der Raumlufttechnik üblich sind. Es ist bekannt, dass für PVC-Werkstoffe die mögliche Ausdünstung von Phtalaten (Weichmacher) Probleme verursachen kann. Untersuchungen an PVC-Rohren für L-EWT-Register haben jedoch gezeigt, dass mit keinem Anstieg der Konzentration von Phtalaten gegenüber der Hintergrundkonzentration in der Außenluft gerechnet werden muss [ECO]. Neben Ausdünstungen aus der Rohrwand ist das Risiko von Ausdünstungen aus dem Boden zu untersuchen.

### 5.1.6 Radon

Ein aus dem Boden stammender Stoff, der ein Gesundheitsrisiko (Lungenkarzinom) darstellt, ist Radon. Radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) ist ein Edelgas, das beim radioaktiven Zerfall von Uran ( $^{230}\text{U}$ ) im Erdboden als  $\alpha$ -Strahler freigesetzt wird. Die Verteilung des Radons im Boden ist auf dem Gebiet der Bundesrepublik auf Grund von Untersuchungen im Auftrag des Bundesministeriums recht gut bekannt [BfS]. Hohe Radon-Belastungen sind demnach im wesentlichen auf Teile von Eifel, Schwarzwald, Bayerischem Wald, Fichtelgebirge, Harz, Thüringer Wald und Erzgebirge beschränkt. Messungen an der Versuchsanlage in Köln mit Unterstützung des BfS ergaben keine erhöhten Konzentrationen in der Raumluft.

Kunststoffe weisen gegenüber Beton eine höhere Radondichtheit auf. Zu den Faktoren, die ein Eindringen von Radon begünstigen können, zählen vorhandene Druckdifferenzen zwischen der Luft im Boden und der Luft im L-EWT sowie undichte Stellen in den Rohren. Die maximale Radonkonzentration sollte nach Empfehlungen der Europäischen Kommission Werte von  $400 \text{ Bq/m}^3$  nicht überschreiten. Als Anhaltswert für die Radondichtheit von Rohren lässt sich der Diffusionskoeffizient  $D$  und die Diffusionslänge  $R$  für  $^{222}\text{Rn}$  in bestimmten Materialien heranziehen. Rohre sind als Radondicht anzusehen, wenn die Dicke der Rohrwand  $D$  größer oder gleich der dreifachen Diffusionslänge  $R$  ist ( $d \geq 3 \cdot R$ ). In Tabelle 12 finden sich Angaben über die Diffusionskoeffizienten und Diffusionslängen von Radon in verschiedenen Materialien.

**Tabelle 12** Spezielle Diffusionskoeffizienten und Diffusionslängen von  $^{222}\text{Rn}$  (nach [Keller])

Material	Diffusionskoeff. $D$ $10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	Diffusionslänge $R$ $10^{-3} \text{ m}$	Beispiel	
			Wandstärke $10^{-3} \text{ m}$	Radondicht
Normalbeton	0.007	60	100	Nein
Polymerbeton	0.005	50	100	Nein
PCC Syst. Trockenbeton	0.0001	7	40	Ja
PE HD	$<10^{-6}$	$<0.7$	5	Ja
PA	$<10^{-6}$	$<0.7$	5	Ja

Nicht allein die Auswahl der Materialien bestimmt, ob ein System radondicht ist oder nicht. Entscheidend sind auch die Verbindungen zwischen den Rohren. Muffen mit gut sitzenden Dichtungen sind in der Regel bei fachgerechter Verlegung ausreichend. Zur erhöhten Sicherheit können die Muffen zusätzlich mit Silikonmasse abgedichtet werden. Auch die Verschweißung von Kunststoffrohren (PE-HD) bildet radondichte Verbindungen, sofern die Naht durchgängig fachgerecht ausgeführt wurde.

Weitgehende Sicherheit bietet es auch, den L-EWT im Überdruck zu betreiben.

## 5.2 Anforderungen der VDI-Richtlinie 6022

Mit dem Erscheinen der VDI 6022 [39] steht erstmals eine umfassende Richtlinie zur Verfügung, in der die häufigsten Fragestellungen zur hygienischen Planung, Installation, dem Betrieb und der Instandhaltung in raumlufttechnischen Anlagen behandelt werden. Nachfolgend werden wichtige Anforderungen dieser Richtlinie genannt, die auch bei der Planung von L-EWT beachtet werden müssen:

- Relative Raumlufffeuchten oberhalb von 65 % sind zwar nicht unmittelbar gesundheitsbelastend, erschweren jedoch die Thermoregulation des Menschen und begünstigen das Wachstum von allergenproduzierenden Hausstaubmilben und Schimmelpilzen. Sie sollten daher längerfristig vermieden werden.
- Der Gehalt der Zuluft an Stäuben, Bakterien, Pilzen und biologischen Inhaltsstoffen darf derjenigen der Außenluft vor Ort in keiner Kategorie überschreiten.
- Luftführende Oberflächen sind konstruktiv und fertigungstechnisch so zu gestalten, dass Schmutzablagerungen nicht begünstigt werden.
- Im eingebauten Zustand müssen alle luftführenden Komponenten mit vertretbarem technischen Aufwand zu inspizieren, zu reinigen und ggf. zu desinfizieren sein.
- Die Komponenten der raumlufttechnischen Anlagen sind so zu regeln, dass die relative Luftfeuchtigkeit in der Anlage, insbesondere an Luftfiltern, den Wert von 90 % nicht überschreitet.
- Um zu verhindern, dass feuchte Stellen hinter Befeuchtern oder Kühlern bei geplantem Stillstand der Anlage auftreten, ist nach dem Abschalten das Luftleitungssystem trocken zu fahren.
- Die Außenluftöffnung soll mindestens 3 m über Erdniveau liegen, um die Ansaugung der in Bodennähe mit Mikroorganismen und Staub angereicherten Außenluft zu verhindern.
- Die Luftleitungen zwischen Außenluftdurchlass und RLT-Gerät sollen so kurz wie möglich sein. Eine Reinigungsmöglichkeit und der Ablauf für eventuell eingedrungenes Wasser müssen vorhanden sein, ebenso eine Revisionsöffnung.
- Es ist zu empfehlen, zwei Filterstufen einzusetzen. In der 1. Filterstufe sollte mindestens die Filterklasse F5, möglichst jedoch F7, und in der 2. Filterstufe mindestens die Filterklasse F7, möglichst jedoch F9, angewandt werden. Bei nur einstufiger Filterung ist mindestens die Filterklasse F7 einzusetzen.
- Wärmetauscher sind so zu fertigen, dass sie möglichst einfach zu reinigen und gegebenenfalls zu desinfizieren sind.
- Zum Ablauf des Wasserfilms beim Naßkühler (durch die Schwerkraft) ist der Kühler mit einer Auffangwanne mit mindestens 1% Gefälle zu versehen.
- Das Mitreißen von Wassertröpfchen durch den Luftstrom ist zu verhindern, gegebenenfalls sind Tropfenabscheider vorzusehen, deren Anströmgeschwindigkeit auf max. 3,5 m/s zu begrenzen ist.

Pilze vermehren sich ab einer relativen Feuchte von 70% [40], Bakterien benötigen dazu mind. 90 % relative Luftfeuchte.

Bei einer Raumlufttemperatur von 26°C kann die geforderte relative Luftfeuchte von 65 % nur durch innere Lasten überschritten werden, weil nach [41] absolute Außenluftfeuchten größer 14g Wasser je kg trockene Luft selten auftreten.

In [2] ist zusätzlich die absolute Feuchtegrenze  $x=11,5\text{g/kg}$  angegeben. Die Einhaltung dieses Wertes ist nur mit einem L-EWT schwer zu erzielen.

Oberflächen müssen zur Vermeidung von Ablagerungen glatt ausgeführt werden. Hier stellt sich die Frage, ob Betonkanäle ohne Innenbeschichtung für diesen Einsatz geeignet sind. Hinzu kommt, dass Betonkanäle nach [42] und [43] eine geringe Undichtigkeit aufweisen dürfen, wodurch Erdfeuchte eindringen könnte. Auch bei knapp dimensionierten L-EWT kommt es an schwülen Sommertagen zur Kondensatbildung. Dabei können relative Luftfeuchten bis zu 100 % entstehen. Da Luftfeuchten größer 90 % zu vermeiden sind, müsste in diesem Fall die Zulufttemperatur angehoben werden. Dies könnte zwar durch eine Wärmerückgewinnung, einen Nacherhitzer oder durch Außenluftbeimischung erfolgen, wäre aber für den gewünschten Kühlzweck kontraproduktiv.

Die Temperaturerhöhung durch einen nachgeschalteten Ventilator reicht in der Regel nicht aus. Bei Stillstand einer Lüftungsanlage wird zur Vermeidung von feuchten Stellen ein Trockenfahren gefordert. Während der Übergangszeiten kann ein Erdwärmetauscher aus energetischen Gründen für längere Zeit ausgeschaltet werden. In diesem Fall wird die Aufrechterhaltung einer Mindestdurchströmung empfohlen.

Es gibt demnach einige Punkte, die bei einem L-EWT nicht vollständig mit der VDI 6022 konform sind, bzw. nicht garantiert eingehalten werden können. Es bleibt daher dem Planer überlassen, in diesen Punkten abzuwägen. Er sollte die kritischen Punkte aber in jedem Fall mit dem Bauherren besprechen. Die VDI 4640<sup>7</sup> geht auf die ggf. hygienisch kritischen Punkte ein und sieht hier kein Gefährdungspotential wenn evtl. entstehendes Kondensat abgeführt wird, ohne das stehende Wasserflächen im Rohr verbleiben und eine regelmäßige Inspektion und Reinigung vorgenommen wird.

### **5.3 Untersuchungsmethoden der lufthygienischen Messungen**

Die Messstrategie und die Berücksichtigung von Randbedingungen während der Probenahmen erfolgen unter Beachtung der VDI-Richtlinie [VDI 4300], Blatt 1 (Dezember 1995). Zuzüglich zu den selbst durchgeführten Messungen zur Bestimmung der Auswirkungen von L-EWT auf die Zuluftqualität wurden von anderen Autoren weitere Untersuchungen durchgeführt. Zum einen waren das vergleichenden Untersuchungen [Flückiger] [Schneiders], zum anderen lagen einzelne Berichte über die hygienischen Bedingungen an L-EWT-Systemen vor. Die ausgewerteten Untersuchungen sind in Tabelle 13 zusammengefasst.

---

<sup>7</sup> Thermische Nutzung des Untergrundes, Direkte Nutzung

**Tabelle 12** Eingesetzte Untersuchungsmethoden zur Bestimmung des lufthygienischen Profils an der L-EWT-Versuchsanlage

Erfassungsbereich	Untersuchungsmethode										
<p><b>Schimmelpilzsporen</b></p>	<p>Die Pilzsporen werden auf spezifischen Nährböden (Czapek- und Malzextraktagar) sedimentiert und nach einer Inkubationszeit mikrobiologisch analysiert. Nach 14-tägiger Bebrütung bei 22 °C wurden die Pilzkolonien auf den Nährböden bestimmt und quantifiziert. Schimmelpilze können sich ausbreiten, wenn die rel. Luftfeuchte bei Temperaturen zwischen 0 und 50°C für länger als drei Stunden pro Tag einen Wert von 65% überschreitet und Staubablagerungen als Nährboden vorhanden ist [Pottler]</p>										
<p><b>MVOC</b></p>	<p>Vor Ort wurden die flüchtigen org. Verbindungen an ein Trägermaterial (Aktivkohle) adsorbiert und im Labor unter definierten Bedingungen desorbiert. Es erfolgte eine gaschromatographische Trennung und massen-spektrometrische Charakterisierung der adsorbierten Substanzen.</p>										
<p><b>Bakterielle Keime</b></p>	<p>Die bakteriellen Keime wurden auf spezifischen Nährböden (PCA-agar) sedimentiert und nach einer Inkubationszeit mikrobiologisch analysiert.</p> <p>Nach 5-tägiger Bebrütung bei 35 °C wurden die Keimkolonien auf den Nährböden quantifiziert. <u>Referenzwerte</u> aus der Literatur sind<sup>+</sup>:</p> <table data-bbox="582 1332 1348 1534"> <tr> <td>sehr gering</td> <td>&lt; 50 KBE/m<sup>3</sup></td> </tr> <tr> <td>gering</td> <td>50 - 100 KBE/m<sup>3</sup></td> </tr> <tr> <td>mittel</td> <td>100 - 500 KBE/m<sup>3</sup></td> </tr> <tr> <td>hoch</td> <td>500 - 2000 KBE/m<sup>3</sup></td> </tr> <tr> <td>sehr hoch</td> <td>&gt; 2000 KBE/m<sup>3</sup></td> </tr> </table> <p><sup>+</sup>European Collaborative Action: Indoor air quality &amp; its impact on man. Report No. 12: Biological Particles in Indoor Environment</p>	sehr gering	< 50 KBE/m <sup>3</sup>	gering	50 - 100 KBE/m <sup>3</sup>	mittel	100 - 500 KBE/m <sup>3</sup>	hoch	500 - 2000 KBE/m <sup>3</sup>	sehr hoch	> 2000 KBE/m <sup>3</sup>
sehr gering	< 50 KBE/m <sup>3</sup>										
gering	50 - 100 KBE/m <sup>3</sup>										
mittel	100 - 500 KBE/m <sup>3</sup>										
hoch	500 - 2000 KBE/m <sup>3</sup>										
sehr hoch	> 2000 KBE/m <sup>3</sup>										
<p><b>Legionellen</b></p>	<p>Die bakteriellen Keime wurden auf legionellaspezifischen Nährböden (BCYE-agar) sedimentiert und nach einer Inkubationszeit mikrobiologisch analysiert. Nach 5-tägiger Bebrütung bei 35 °C wurden die Keimkolonien auf den Nährböden legionellaselektiv untersucht.</p>										

<b>Phthalate (Weichmacher)</b>	Elution des Probenahmeröhrchens mit Diethylether, Analyse mit Kapillar-gaschromatographie und Massenspektrometer; quantitative Bestimmung der Zielsubstanzen mit internem Standard und Vergleichsgemisch.
<b>Partikel und Faserförmige, anorganische und organische Partikel</b>	Rasterelektronenmikroskopie mit energiedispersiver Röntgenmikroanalyse (REM/EDXA) nach VDI-Richtlinie 3492, Blatt 2 (Juni 1994) zum Nachweis von anorganischen Fasern mit der Länge $L: 5 \mu\text{m} \leq L \leq 100\mu\text{m}$ und dem Durchmesser $D: 0,2 \mu\text{m} \leq D < 3 \mu\text{m}$ sowie $L/D \geq 3/1$ . Zur Berechnung der Raumluftkonzentration an Asbestfasern wird gemäß VDI-Richtlinie nur die Faserlängenklasse 2 herangezogen. Die ausgewertete Filterfläche beträgt jeweils $1\text{mm}^2$ .
<b>Schwebstaubgehalt</b>	Die Probenahme und Auswertung erfolgte nach VDI-Richtlinie 2463 (Blatt 8; Messen von Partikeln - Messen von Massenkonzentration (Immission), Basisverfahren für den Vergleich von nichtfraktionierenden Verfahren). Nach diesem Verfahren werden die in der Luft dispergierten Partikel auf einem Filter gesammelt und danach gravimetrisch bestimmt. Der eingesetzte Quarzfaserfiltertyp garantiert einen Abscheidegrad $> 99,5 \%$ nach DIN 24 184.
<b>Partikelgrößen-Verteilung</b>	Die Erfassung der absoluten Partikelzahlen und die Klassifizierung der Partikelgrößen erfolgte mit einem Laser-Schwebstaubmonitor der Fa. Malvern nach dem Laserstreulichtverfahren

Diese Ergebnisse implizieren, dass aus lufthygienischer Sicht der Betrieb von L-EWT bei gewissenhafter Planung unproblematisch ist. Die allgemeinen, bei Lüftungsanlagen angewandten Regeln nach dem Stand der Technik sind beim Bau, Betrieb und Unterhalt von L-EWT zu berücksichtigen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die L-EWT-Austrittsluft in fast allen Fällen eine deutlich Reduktion der Pilzsporenkonzentration der Außenluft zeigte. Lediglich Penicillium und Aspergillus zeigten nach den L-EWT-Rohren vor den Filtern einiger Einfamilienhäuser höhere Konzentrationen als in der Außenluft [Flückinger].

Eine Untersuchung am L-EWT des SIJ in Jülich zeigt nach der Inbetriebnahme im September 1999 eine um ca. den Faktor 2 erhöhte Konzentration von Pilzsporen und MVOC am L-EWT-Austritt gegenüber der Außenluft. Anhand der aufgenommenen Daten kann zwar nicht von einer gesundheitlich relevanten Schimmelpilzbelastung ausgegangen werden, eine Verschmutzung mit biologischen Materialien bzw. eine Verkeimung des Rohres kann jedoch nicht ausgeschlossen werden.

## 5.4 Messergebnisse an Luft-Erdwärmetauschern

### 5.4.1 Ergebnisse der lufthygienischen Untersuchung der Versuchsanlage Köln

Der Versuchs-L-EWT des DLR in Köln wurde in zwei Phasen 1996 und 1998 auf Verunreinigungen der Luft untersucht. Die Ergebnisse in Bezug auf Schimmelpilze sind in Tabelle 13 dargestellt. Insgesamt wurden die Schimmelpilzkeime in der Gebäudezuluft um etwa 85% gegenüber der Außenluft reduziert. Nur für *Botrytis cinera* und *Penicillium brevicompactum* wurde bei der ersten Messung Juli 1996 eine Erhöhung der Keimkonzentration in der Zuluft festgestellt. Diese Keimzunahme wurde in der Messung von 1998 nicht bestätigt.

**Tabelle 13** Schimmelpilzkonzentration der Außenluft und der Gebäudezuluft am Versuchs-L-EWT (Messungen von ECO Luftqualität und Raumklima, Köln: 1996/1998)

Pilzart	Untersuchung 1996						Untersuchung 1998		
	Impaktorstufe 2 <sup>8</sup>			Impaktorstufe 1 <sup>9</sup>			Zuluft nach L-EWT	Außenluft	Konzentrationsänderung
	Zuluft nach L-EWT	Außenluft	Konzentrationsänderung <sup>10</sup>	Zuluft nach L-EWT	Außenluft	Konzentrationsänderung			
	KBE/m <sup>3</sup>	KBE/m <sup>3</sup>	%	KBE/m <sup>3</sup>	KBE/m <sup>3</sup>	%	KBE/m <sup>3</sup>	KBE/m <sup>3</sup>	%
<i>Alternaria alternata</i>	k.A.	k.A.	k.A. <sup>11</sup>	k.A.	k.A.	k.A.	n.n.	86	k.A.
<i>Aspergillus niger</i>	n.n.	7	-100%	n.n. <sup>12</sup>	n.n.	k.A.	7	7	0%
<i>Botrytis cinera</i>	33	27	22%	47	47	0%	7	93	-92%
<i>Cladosporium herbarum</i>	2510	7840	-68%	280	2430	-88%	40	700	-94%
<i>Cladosporium herbarum</i>	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	40	80	-50%
<i>Cladosporium sp.</i>	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	7	k.A.	k.A.
<i>Paecilomyces variotii</i>	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	33	60	-45%
<i>Penicillium brevicompactum</i>	67	47	43%	13	n.n.	-	20	167	-88%
Andere Schimmelpilze	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	7	26	-73%
Hefe	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	168	1219	-86%
Summe	2610	7921	-67%	340	2477	-86%	168	1219	-86%

<sup>8</sup> Abscheidung atemwegsgängiger Partikel (Durchmesser < 8 µm)

<sup>9</sup> Abscheidung nicht atemwegsgängiger Partikel (Durchmesser: > 8 µm)

<sup>10</sup> Prozentuale Zu(+) bzw. Abnahme(-) der Pilzkonzentration in der Zuluft

<sup>11</sup> k.A. = keine Angaben

<sup>12</sup> n.n. = nicht nachweisbar, Nachweisgrenze: 10 KBE/m<sup>3</sup>

Auch die Untersuchungen der MVOC (Tabelle 14) zeigten 1996 einen leichten Anstieg, der auf das Vorhandensein von Schimmelpilzwachstum hinweisen könnte. Bei den Messungen 1998 wurde ein solches Wachstum allerdings nicht bestätigt. Die MVOC-Konzentration der Zuluft war hier im Vergleich zur Außenluft geringer.

Bei der Untersuchung 1996 wurde eine Reduktion der Bakterienkonzentration in der Zuluft (77 KBE/m<sup>3</sup>) von 42% im Vergleich zur Außenluft [133 KBE/m<sup>3</sup>] festgestellt. Bei der zweiten Messung 1998 wurde äquivalent eine Reduktion der Bakterienkonzentration von 86% in der Zuluft (48 KBE/m<sup>3</sup>) gegenüber der Außenluft (344 KBE/m<sup>3</sup>) festgestellt.

**Tabelle 14** Messungen der Konzentration von MVOC am Versuchs-L-EWT

Substanz	Untersuchung 1996			Untersuchung 1998		
	Zuluft nach L-EWT	Außenluft	Konzentrationsänderung <sup>13</sup>	Zuluft nach L-EWT	Außenluft	Konzentrationsänderung
	[µg/m <sup>3</sup> ]*	[µg/m <sup>3</sup> ]*		[µg/m <sup>3</sup> ]*	[µg/m <sup>3</sup> ]*	
1-Octen-3-ol	0.014	0.0099	41.4%	0.011	0.015	-26.7%
Schimmelgeruchstoffe:						
3-Methylfuran	0.0059	0.006	-1.7%	0.014	0.013	7.7%
Sonstige Alkohole:						
3-Methyl-1-butanol	n.n.	n.n.		n.n.	n.n.	
2-Pentanol	0.0063	0.013	-51.5%	0.026	0.028	-7.1%
Sonstige Ketone:						
2-Heptanon	0.0075	0.0066	13.6%	0.019	0.021	-9.5%
2-Hexanon	0.0086	0.0061	41.0%	0.033	0.031	6.5%
3-Octanon	0.0055	0.0046	19.6%	0.0069	0.0071	-2.8%
Übrige VOC:						
Dimethyldisulfid	n.n.	n.n.		n.n.	n.n.	
Summe MVOC						
	0.048	0.046	4.3%	0.11	0.12	-8.3%

Untersuchungen über chemische Schadstoffe aus der Rohrwand und anderen Bauteilen wurden für Phonole und VOCs durchgeführt. Die Messungen am Versuchs-L-EWT Köln zeigten 1996, dass keine erhöhte Konzentration von Disobutylphthalat und Di-n-Butylphthalat vorlag. Die Ergebnisse einer Reihe weiterer Messungen an mehreren Anlagen wurden von verschiedenen Autoren durchgeführt.

<sup>13</sup> Prozentuale Zu(+) bzw. Abnahme(-) von MVOC in der Zuluft gegenüber der Außenluft

## 5.4.2 Untersuchungen von Frau Dr. med. Thora Schneiders

Ziel der Arbeit von Frau Dr. med. Thora Schneiders [9] war festzustellen, ob durch den Einsatz von L-EWT in mechanischen Wohnungslüftungsanlagen eine hygienische Beeinflussung der Luft im Gebäudeinnern erfolgt und ob damit unter Umständen gesundheitliche Beeinträchtigungen bei den Bewohnern hervorgerufen werden können.

Zur Beantwortung dieser Frage hat sie an den nachfolgenden Anlagen die Keimkonzentrationen in der Außenluft, Zuluft, Raumluft und Abluft bestimmt und eine Differenzierung der Keime in der Zuluft vorgenommen:

**Wohnhaus 1** (fünfköpfige Familie mit Haustieren):

Mechanisches Lüftungssystem mit vorgeschaltetem Erdwärmetauscher aus korrosionsschutztem Wickelfalzrohr

**Wohnhaus 11** (vierköpfige Familie):

Mechanisches Lüftungssystem mit vorgeschaltetem Erdwärmetauscher aus PVC-Rohr

Beide Wohnungslüftungsanlagen verfügen über Filtermatten und einen Plattenwärmetauscher, der im Sommer durch ein Doppelkanalstück ersetzt wird. Eine Aussage über die Güte der verwendeten Filtermatten wird in [9] nicht gemacht.

Neben diesen Anlagen wurde das Messprogramm um zwei weitere Wohnhäuser ergänzt, um Vergleichsdaten zu konventionell belüfteten und beheizten Gebäuden zu erhalten. Dabei beschränkte sich der Untersuchungsumfang auf einige in der Umwelt weit verbreitete Mikroorganismen, die sich in der Luft und dem zeitweise feuchten Milieu der Erdleitungen vermehren könnten. Die Messungen fanden in drei Untersuchungsabschnitten statt.

Die Keimzahlen in der Außenluft variierten stark in Abhängigkeit von den meteorologischen Bedingungen:

	Untersuchungsabschnitt	Bakterienzahlen	Schimmelpilze
<b>Tabelle 15</b> Keimzahlen in der untersuchten Außenluft		KBE/m <sup>3</sup>	KBE/m <sup>3</sup>
	1.	130 -240	4000-5000
	11.	59 - 165	150 - 600
	111.	93 - 690	459 - 1957
1.) Juli 1991 bei sonnigem Wetter, Außenluft ca. 24°C / 75-80% r.F. 11.) April 1992, im Anschluss an einer 10tägigen Frostperiode, Außenluft ca. 13°C / 70% r.F. 111.) September 1992, wechselhaft regnerisches Wetter, Außenluft ca. 14°C / 85% r.F.			

Mit Ausnahme der Außenluftmessungen am Haus 11 im April 1992, wo in Bodennähe dreimal höhere Pilzkonzentrationen als in 3 m Höhe bestimmt wurden, ist kein Einfluss der Messhöhe auf die Keimkonzentration festgestellt worden.

Nach Passage des Erdwärmetauschers wurden in der Zuluft der Wohnhäuser 1 und 11 in allen drei Untersuchungsabschnitten Keimzahlen festgestellt, die im Vergleich zur Außenluft um mehr als 90 % stark reduziert sind. Die mittleren Bakterienzahlen betragen zwischen 2 und 24 KBE/m<sup>3</sup> und die mittlere Anzahl der Pilze lag zwischen 4 und 133 KBE/ m<sup>3</sup>. Ein Einfluss des Rohrmaterials des Erdwärmetauschers (Wickelfalz- oder PVC-Rohr) war nicht zu erkennen.

Die Keimkonzentration in der Zuluft eines Wohnhauses mit Lüftungsanlage ohne L-EWT ebenfalls bei nur 2 KBE/m<sup>3</sup>. In einem Wohnhaus mit konventioneller Fensterlüftung konnte bei direkt geöffnetem Fenster als Zuluft nur ein Gemisch aus Außen- und Raumluft erfasst werden. Die ermittelten Bakterienzahlen betragen hier 507 KBE/ m<sup>3</sup> und die Anzahl der Hefe- und Schimmelpilze 306 KBE/ m<sup>3</sup>. Bei allen Messungen ist ein starker Anstieg der Keimzahlen in der Raumluft im Vergleich zur Zuluft zu verzeichnen. Die Anzahl der KBE/m<sup>3</sup> in der Raumluft schwankte dabei erheblich in Abhängigkeit von der Raumnutzung.

Insgesamt wurde festgestellt, dass die in der Zuluft bestimmten Bakterien dem Spektrum der Keime entsprachen, die in der Außenluft vorkamen. Eine selektive Anreicherung von Mikroorganismen durch die Passage des L-EWT konnte nicht festgestellt werden.

Auch bei Bakterien zeigten Messungen in fast allen untersuchten L-EWT-Systemen, eine Abnahme der Konzentration [Flückinger]. Generell besteht ein Unterschied zwischen Großanlagen und L-EWT für Einfamilienhäuser.

Die Reduktion der Keimzahlen im Erdregister fällt für Einfamilienhäuser deutlich geringer aus als für große Anlagen. Es konnten keine eindeutigen Unterschiede der Bakterien- und Pilzreduktion bei Beton und Kunststoffrohren festgestellt werden.

Untersuchungen über chemische Schadstoffe aus der Rohrwand und anderen Bauteilen wurden für Phonole und VOCs durchgeführt. Das L-EWT-Versuchsregister verwendet Rohrmaterial aus PVC. Die Messungen 1996 zeigten, dass keine erhöhte Konzentration von Diisobutylphthalat und Di-n-Butylphthalat vorlag. Am L-EWT in Jülich wurden Messungen von VOC durchgeführt. Auch hier konnten keine VOC oberhalb der Nachweisgrenze festgestellt werden.

Für Belastungen der Luft aus L-EWT durch Radon liegen bisher nur wenige Erkenntnisse vor. Eine Messung wurde für die Raumluft des Gebäudes der Fa. Wagner-Solar durchgeführt, das über einen L-EWT belüftet wird. Die Raumluft zeige sehr niedrige Radongehalte von 6-11 Bq/m<sup>3</sup>. Eine Anreicherung von Radon durch die Betonrohre konnte dadurch ausgeschlossen werden. Bei der Bewertung dieses Ergebnis ist zu beachten, dass auch für das Grundstück keine erhöhten Radonwerte im Boden vorlagen (siehe auch [BfS]).

Tabelle 16 Ergebnisse aus den hygienischen Untersuchungen verschiedener L-EWT-Anlagen

	System	Messungen	Mikrobielle Schadstoffe		Chemische Schadstoffe	Staub
			Bakterien	Pilze		
Nach Flückinger <sup>1</sup> (Institut für Hygiene und Arbeitsphysiologie, ETH Zürich)	12 L-EWT-Anlagen (davon 4 für Familien- und Mehrfamilienhäuser, 6 für Gebäude mit diverser Nutzung) 8 Anlagen, Kunststoffrohre, 3 Anlagen, Zementrohre	Frühling, Sommer, Winter, Herbst 1996  (Die L-EWT-Anlagen waren zur Zeit der Messung ca. 2-7 Jahre in Betrieb)	Zusammenfassende Untersuchungen Kein Unterschied der Qualität der Austrittsluft zwischen Beton und Kunststoffrohren festgestellt. Reduktion der Keimzahlen in kleineren Systemen (Einfamilienhäusern) fiel geringer aus als in größeren Anlagen. Die nach dem L-EWT eingebaute Filter führten in allen Anlagen zu einer Abnahme der Bakterien und Pilzsporenkonzentration geg. Der Hintergrundkonzentration. Filterqualität beeinflusste stark die Konzentration der Pilzsporen in der Zuluft im Gegensatz zur Bakterienkonzentration In fast allen Fällen Reduktion der Bakterien in den L-EWT-Rohren		k.A.	k.A.
Nach Schneiders <sup>1</sup> (Medizinische Fakultät, RWTH Aachen)	2 Einfamilienhäuser mit L-EWT (PVC bzw. glattes Winkelrohr) in ländlicher Umgebung	1991 und 1992 (Wiederholungsmessung)	Reduktion der Keimzahlen um mehr als 90 % gegenüber der Außenluft	k.A.	k.A.	k.A.
Einzelne L-EWT-Anlagen						
L-EWT auf dem Gelände der Fa. Wagner Solar	Rohrregister-L-EWT, Beton	September 1999 (nach einem Jahr Betriebszeit)	k.A.	Innenraumgehalt an Pilzsporen deutlich niedriger als in der Außenluft	Sehr niedrige Radiongehalte in der Raumluft (Anreicherung durch die Betonrohre dadurch auszuschließen)	k.A.
L-EWT auf dem Gelände des DLR <sup>1</sup>	Rohrregister-L-EWT, 12 KG-Rohre (PVC), max. 3600 m <sup>3</sup> /h	Messung Juli 1996 und 1998	Reduktion der Bakterien in der Zuluft gegenüber der Außenluft, keine Legionellen nachweisbar	Reduktion von Pilzsporen in der Zuluft gegenüber der Außenluft, keine Zunahme der MVOCs gegenüber der Außenluft	1996: keine Zunahme von Phtthalaten (Weichmachern) in der Zuluft gegenüber der Außenluft	Reduktion des Staubeintrag in der Zuluft gegenüber der Außenluft
L-EWT auf dem Gelände des S.U. Jülich	Einzelrohr, Beton	September 1999 (Inbetriebnahme)	Kolonienzahl nach Passage des L-EWT gering niedriger als am Eintritt	Schimmelspizsporen und MVOC <sup>2</sup> haben höhere Werte (um ca. Faktor 2) nach Passage des L-EWT	Sowohl am Anfang als auch am Ende der L-EWT Strecke kein Nachweis von VOC <sup>3</sup> (Bestimmungsgrenze 1 µg/m <sup>3</sup> )	Kein signifikanter Staubeintrag in die Raumluft bei Nutzung des L-EWT
L-EWT des Passivhaus Kranichstein <sup>4</sup>	4 Häuser mit Register L-EWT, 4 Rohre, max 180 m <sup>3</sup> /h	Januar 1993 bis April 1994	Bakterien liegen im Normalbereich und stellen keinerlei gesundheitliche Gefährdung dar	Die Gebäudezuluft enthält keine oder nur sehr geringe Schimmelspizsporenkonzentrationen, im April/Mai höchste Pilzkonzentrationen am Ende des L-EWT, dagegen im Juni höchste Konzentrationen in der Außenluft ⇒ eine Schimmelzuzugsquelle bedingt durch Taupunktüberschreitungen ist nicht auszuschließen	k.A.	k.A.

<sup>1</sup> Schneiders, Thora: Zur hygienischen Luftqualität in Wohngebäuden bei der Konditionierung der Zuluft mittels Erdwärmetauscher. Dissertation, Medizinische Fakultät der RWTH Aachen, 1994

<sup>2</sup> MVOC - Mikrobiell produzierte organische Verbindungen

<sup>3</sup> VOC - Flüchtige organische Verbindungen (u.a. Aromatische Kohlenwasserstoffe, Alkane, Terpenen, Ester, Ketone, Alkohole, Aldehyde)

<sup>4</sup> Feist, Wolfgang(Hrsg.): Passivhausbericht Nr.10: Luftqualität im Passivhaus. Abschlussbericht an das Hessische Ministerium für Umwelt, Energie und Bundesangelegenheiten (HMUB), Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 1994

## **5.5 Umweltaspekte**

Derzeit wird in Deutschland etwa 40% des Energiebedarfs für die Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser im Gebäudebereich benötigt. Luft-Erdreichwärmetauscher (L-EWT) kommen in diesem Zusammenhang als vielversprechende Versorgungssysteme wegen ihres niedrigen Energiebedarfes und hoher Arbeitszahlen in Betracht. Für Bürogebäude ist insbesondere die Gebäudekühlung durch L-EWT von Bedeutung, die häufig in konventionellen Anlagen elektrisch betrieben wird. L-EWT können auf Grund ihres einfachen Systemaufbaus und des Arbeitsmittels Luft als ökologisch weitgehend unbedenklich betrachtet werden.

Der Untergrund kann als saisonaler Speicher betrachtet werden, in dem mit steigender Tiefe die Erwärmung bzw. Abkühlung des Erdreichs gegenüber der Oberfläche zunehmend zeitlich phasenverschoben und gedämpft ist. Die Temperaturdifferenz zwischen Untergrund und Außenluft wird in den L-EWT-Systemen genutzt. Als Antriebsleistung ist lediglich ein Ventilator notwendig, dessen Leistung im Vergleich zu einem Ventilator einer raumluftechnischen Anlage ohne L-EWT nur in soweit erhöht werden muss, um den Druckverlust in den L-EWT-Rohren auszugleichen. Dabei werden Jahresarbeitszahlen bis zu 30 erreicht. Bei der Kombination eines EWT mit einer Kälteanlage kann er einem positiven Einfluss auf die Arbeitszahl der Kälteanlage haben.

Die genaue Höhe der eingesparten CO<sub>2</sub>-Emissionen richtet sich nach den klimatischen Bedingungen, da der Ventilator der Raumlufanlage bei Betrieb des L-EWT in der Regel immer bei optimaler Leistung eingesetzt wird, unabhängig von der erreichten Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Austritt des L-EWT.

### **5.5.1 Thermische Auswirkungen auf den Untergrund**

Im Vergleich zu Wärmepumpen und Erdreichsonden sind die thermischen Auswirkungen von L-EWT auf das Erdreich gering. Erdwärmetauscher werden in der Regel in Tiefen zwischen 1,5m und 5m verlegt. Messungen haben gezeigt, dass Absenkungen bzw. – Erhöhungen der Bodentemperatur durch den EWT Betrieb zeitlich und lokal begrenzt sind.

Das gilt nur, wenn der L-EWT in einem alternierenden Sommer- / Winterbetrieb genutzt wird. Einer winterlichen Abkühlung des Erdreiches folgt dann eine sommerliche Erwärmung.

Eine Verschlechterung der Regenerationsfähigkeit des Bodens konnte nicht beobachtet werden. Nach Aussetzen des Betriebs des EWT baut sich das natürliche Temperaturfeld des Bodens wieder auf, da ein deutlicher Einfluss der Sonneneinstrahlung, der Lufttemperatur und des Sickerwassers bei diesen oberflächennahen Bodenbereichen besteht.

Da EWT in geringen Tiefen verlegt werden, ist gegebenenfalls zu prüfen, ob die lokalen Abkühl- oder Aufheizvorgänge Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum haben.

Ab 2m Verlegetiefe kann man auch im Winter davon ausgehen, dass der EWT keinen Einfluss auf die Bodenfrostbildung im oberen Wurzelbereich bis 1m Tiefe hat. Bei EWT, die im Grundwasser verlegt sind, kommt es nur zu einer geringen thermischen Aufheizung bzw. Abkühlung des Grundwassers. In diesem Fall sollte für größere Projekte mit den Wasserbehörden abgestimmt werden, ob die Aufheizung- bzw. Abkühlung des Grundwassers akzeptabel ist.

Der Einfluss auf den Untergrund durch Entnahme von Energie durch L-EWT ist als gering zu bewerten. Messungen an wasserführenden Erdwärmekollektoren zeigen, dass die Abkühlung des Erdreiches nur vorübergehend ist und im Sommer die gleichen Temperaturen wie in unbeeinflusstem Untergrund erreicht werden /1/.

### **5.5.2 Rückbau**

Entspricht das verwendete Rohrmaterial bestimmten Umweltanforderungen, kann es verschlossen dauerhaft im Untergrund verbleiben. Diese Anforderungen sind, dass das Rohrmaterial ungiftig und korrosionssicher sein sollte. Rohre für Erdwärmekollektoren, die diese Anforderungen erfüllen, sind neben Betonrohren vor allem Rohre aus reinen Kohlenwasserstoff-Polymeren wie Polyethylen (PE), Polypropylen (PP) oder Polybutylen (PB) in ausreichender Dichte (z.B. nach DIN 8074/8 und DIN 8075).

Nicht mehr benutzte Erdwärmetauscher müssen nicht entfernt werden, sondern können, wie dies nach /3/ für Entwässerungsanlagen gilt, im Erdreich verbleiben.

Bei endgültiger Stilllegung eines L-EWT ist dieser fachgerecht rückzubauen. Handelt es sich bei dem L-EWT-System um Rohre aus Materialien der Entwässerungstechnik, können sie nach erfolgter Reinigung dauerhaft verschlossen im Untergrund verbleiben.

Beim Rückbau ist die Nachfolgenutzung zu berücksichtigen. Um spätere Geländesetzungen auszuschließen, sind die L-EWT i.d.R., insbesondere bei großkalibrigen Anlagen, vollständig, dicht und permanent zu verpressen; dabei ist nur grundwasserunschädliches Material zu verwenden.

Bei im Grundwasser bzw. Grundwasserschwankungsbereich verlegten L-EWT ist der Rückbau der zuständigen Genehmigungsbehörde anzuzeigen. In Sonderfällen, z.B. bei unerwünscht hohem Grundwasseraufstau infolge Verlegung im Grundwasserbereich, kann u.U. die Entfernung des L-EWT erforderlich werden.

### **5.5.3 Primärenergiebedarf und CO<sub>2</sub>-Emissionen**

Unabhängig von der Wirtschaftlichkeit des Einsatzes regenerativer Energien stellt sich die Frage nach dem Einsparungspotential konventionell erzeugter Energie und der Vermeidung der damit verbundenen ökologischen Belastungen.

Hier ist es sinnvoll, der Wirtschaftlichkeitsberechnung eine Berechnung der CO<sub>2</sub>-Emissionen und eine Primärenergiebetrachtung anzuhängen.

Die genaue Höhe der eingesparten CO<sub>2</sub>-Emissionen und Primärenergie richtet sich nach den klimatischen Bedingungen und der Gebäudecharakteristik sowie der Auslegung des L-EWT.

Für die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe und den gesamtdeutschen CO<sub>2</sub>-Faktor für den Strommix zum Antrieb elektrischer Systeme können unter Berücksichtigung der vorgelagerten Prozessketten gegenwärtig folgende Werte angesetzt werden:

**Tabelle 17** Spezifische CO<sub>2</sub>-Faktoren für verschiedene Endenergieträger

Endenergieträger	Spezifischer CO <sub>2</sub> Faktor [kg/kWh]	Quelle
Strom	0,669	Forschungsstelle f. Energiewirtschaft 96
Erdgas	0,219	Gemis 4.01
Heizöl	0,314	Gemis 4.01
Methanol	0,359	Gemis 4.01
Wasserstoff	0,249	Gemis 4.01
„Bio Diesel“	0,111	Gemis 4.01
Holzpellets, Holzhack-schnitzel	0,014	DGfH

Bei der Berechnung der CO<sub>2</sub>-Emissionen ist der thermische Wirkungsgrad bzw. die Arbeitszahl des Wärme-(Kälte-)erzeugers zu berücksichtigen ( $Q = \text{CO}_2 \text{ Faktor} / \eta_{\text{thermisch}}$  oder COP). Die folgende Tabelle gibt hier einen Überblick über verschiedene Systeme.

Bei der Verwendung ist Vorsicht geboten, da man sich über die Systeme auf der Antriebsseite klar sein muss.

Eine Absorptionskältemaschine mit COP von 1,2 benötigt eben auch Antriebswärme auf einem Temperaturniveau von 140-160°C. Wenn es sich hier nicht um Abwärme handelt, ist die zur Erzeugung der Antriebsenergie benötigte CO<sub>2</sub>-Emission ebenfalls zu berücksichtigen. Interessant ist, dass ein L-EWT meist Arbeitszahlen über 20 liefert.

**Tabelle 18** Mittlere Wirkungsgrade / Arbeitszahlen von Wärmebereitstellungssystemen

System zur Wärmebereitstellung	$\eta_{\text{thermisch}}$ , COP	Quelle
Gas-Heizkessel	0,92	[W&S]
Elektrische Heizung	0,98	
Öl-Heizkessel	0,93	
Gas-Brennwertkessel	1,04	
Gas-Wärmepumpe	1,80	
Gas-BHKW	0,73	
Elektro-Wärmepumpe, Wasser/Wasser	4,0	
Elektro-Wärmepumpe, Sole/Wasser	3,8	BINE themeninfo I/04
Elektro-Wärmepumpe, Luft/Wasser	2,5	
Absorptionskältemaschine, Lithiumbromid/Wasser	0,6 – 1,2	
Adsorptionskältemaschine, Silikagel/Wasser	0,4 – 0,7	
Kompressionskältemaschine	2,4 – 2,8	

Für die Berechnung des Primärenergievergleichs liefert Tabelle 18 einige Anhaltswerte.

**Tabelle 19** Primärenergiefaktoren verschiedener Endenergieträger

Endenergieträger	$\frac{\text{kWh}_{\text{Primär}}}{\text{kWh}_{\text{End}}}$	Quelle
Strom	<b>3</b>	DIN V 4701-10: 2003-08
Erdgas	<b>1,1</b>	
Heizöl	<b>1,1</b>	
Holzpellets, Holzhack- schnittel	<b>0,2</b>	

Die Literaturhinweise befinden sich im Anhang  
unter

**LEWT\_PLF2\_ANHANG\_09.pdf**