

Luft-Erdwärmetauscher L-EWT

Planungsleitfaden Teil 2



Testanlagen im Verbundprojekt

Version 0.9 Juni 2005

Testanlagen im Verbundprojekt

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

Der Planungsleitfaden 2 besteht aus mehreren Modulen.

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

0	LEWT_PLF2_LIESMICH_09.pdf	Übersicht
1	LEWT_PLF2_EINLEITUNG_09.pdf	Einleitung
2	LEWT_PLF2_SIMULATION_09.pdf siehe auch http://www.geographie.ruhr-uni-bochum.de/agklima/ewt/index.html	Numerisches Simulationsprogramm
3	LEWT_PLF2_BENCHMARK_09.pdf	Überschlägiges Abschätzverfahren
4	LEWT_PLF2_KENNZAHLE_09.pdf	Qualitätsbewertung
5	LEWT_PLF2_DATENBLATT_09.pdf	Standardisierte Datenblätter
6	LEWT_PLF2_TECHNISCHEDETAILED_09.pdf	Planungshinweise, Mathematik und Details
7	LEWT_PLF2_PROJEKTE_09.pdf	Testanlagen/Projektberichte
8	LEWT_PLF2_ANHANG_09.pdf	Anhang, Tabellen, Einzeldetails

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

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

Hauptautoren dieses Moduls:

Dr.-Ing. Gerd Dibowski
gerd.dibowski@dlr.de

Projekt DLR

DLR

Dipl.-Ing. Karsten Gabrysch
gabrysch@sj.fh-aachen.de

Projekt SIJ

FH Aachen / Solar-Institut Jülich

Dipl.-Ing. Ralph Wortmann
r.wortmann@Wortmann-Scheerer.de

Projekt Fernuni Hagen

Fa. Wortmann & Scheerer, Bochum

INHALTSVERZEICHNIS

1	Versuchsanlage Solar-Institut Jülich.....	4
1.1	Zuordnung der Versuchsanlagen.....	4
1.2	Auditorium (L-EWT im Gewerbebau).....	5
1.3	Anlagenparameter.....	7
1.4	Regelung des Luft-/Erdwärmetauscher.....	8
1.4.1	Regelstrategie für die Betriebszeiten.....	10
1.4.2	Regelstrategie für die Heizfunktion.....	11
1.4.3	Regelstrategie für die Kühlfunktion.....	12
1.4.4	Bewertung der Regelung des L-EWT Auditorium.....	13
1.5	Vermessung des L-EWT Auditorium.....	17
1.5.1	Sensoren im EWT.....	17
1.5.2	Sensoren im Erdreich.....	18
1.5.3	Auswirkungen des L-EWT auf die Erdreichtemperaturen.....	20
1.6	Bilanzierung des L-EWT Auditorium.....	21
1.6.1	Energetische Auswertung.....	21
1.6.2	End- und Primärenergie bezogene Arbeitszahlen.....	29
1.6.3	L-EWT-Wirkungsgrad.....	29
1.6.4	Überprüfung der Auslegungsdaten.....	30
1.7	Baumängel des L-EWT „Auditorium“.....	31
1.8	Studentenwohnheime (L-EWT im Wohnungsbau).....	37
1.8.1	Regelung der Lüftungsanlagen der Studentenwohnheime mit L-EWT.....	38
1.8.2	Regelstrategie für Winterbetrieb.....	39
1.8.3	Regelung für Sommerbetrieb.....	40
1.8.4	Bilanzierung des L-EWT Studentenwohnheim.....	40
1.8.5	Energetische Auswertung.....	40
1.8.6	End- und Primärenergiebezogene Arbeitszahlen.....	45
1.8.7	Überprüfung der Auslegungsdaten.....	45
1.8.8	Baumängel des L-EWT Studentenwohnheime.....	45
1.9	Zusammenfassung.....	46
1.9.1	Literaturverzeichnis.....	47
2	Versuchsanlage DLR Köln.....	48
2.1	Aufbau der L-EWT-Versuchsanlage Köln.....	49
2.2	Messtechnisches Gesamtkonzept.....	50
2.2.1	Aufbau der Wetterstation.....	51
2.3	Konfiguration und Messaufbau der L-EWT-Versuchsanlage.....	52
2.3.1	Ergebnisse der Bodenuntersuchungen.....	52
2.3.2	Bodenmechanische Kennwerte.....	52
2.3.3	Schematischer Aufbau und Sensorpositionen des L-EWT.....	53
2.3.4	Weitere messtechnische Details.....	57
2.3.5	Beschreibung des Datenloggersystems.....	59
2.3.6	Kalibrierung der Messwertgeber.....	60
2.3.7	Kalibrierung der Albedo-Messung.....	60
2.3.8	Zweites Bodengutachten.....	61
2.3.9	Die spezielle Approximationsmethode SAM.....	62
2.3.10	Angaben zur Wetterstation.....	64
2.3.11	Plausibilitätsprüfungen der Signale.....	67
2.3.12	Ventilatordaten.....	67
2.3.13	Weitere Baubilder.....	67
2.3.14	Konstruktive Randbedingungen.....	68
2.4	Messergebnisse der L-EWT-Testanlage.....	70
2.4.1	Temperaturverläufe des Erdreichs.....	70
2.5	Schwankungsbreiten der Erdtemperaturen.....	72
2.6	Beispiele für grundsätzliches Systemverhalten.....	74
2.7	Theoretisches Leistungspotential innerhalb der Heizperiode.....	79
2.8	Anfang und Ende der Kühlphase.....	80
2.9	Vergleich Register zu Einzelrohr.....	84
2.10	Ergebnisse lufthygienischer Messungen und Aspekte der Bewertung.....	89
2.10.1	Definition der Belastungsarten.....	89
2.11	Ergebnisse der lufthygienischen Untersuchung der Versuchsanlage.....	92
2.12	Empfehlungen.....	93
2.12.1	Aussenluftansaugung.....	94
2.12.2	Rohre.....	94
2.12.3	Filter.....	94
2.13	Zusammenfassung.....	95
2.13.1	Literatur.....	96
3	Versuchsanlage Fernuniversität Hagen.....	97

Einleitung

Ein typisches Merkmal eines L-EWT ist die Notwendigkeit der Anpassung an die gegebenen bau- und lüftungstechnischen Randbedingungen eines Projektes, aus dem folgt, dass sich die bisher gebauten L-EWT im Vergleich untereinander deutlich unterscheiden.

Eine einfache Standardisierung des Planungsverfahrens bei großen L-EWT erscheint aus heutiger Sicht nicht, oder nur sehr eingeschränkt möglich. Die eigentliche Planungsleistung liegt in der Anpassung und Optimierung an die individuellen Gegebenheiten am Bauort.

Die im L-EWT-Verbundprojekt zu entwickelnden Planungswerkzeuge (Planungsleitfaden) sollten diesem Umstand Rechnung tragen.

Daher wurden **drei grundsätzlich verschiedene L-EWT** gebaut und vermessen, um die wesentlichen existierenden Unterschiede herausarbeiten zu können. Ein L-EWT kann dabei aus einem langen Einzelrohr mit großem Durchmesser (Jülich und Hagen) oder auch aus mehreren Registerrohren mit kleinem Durchmesser (Köln) bestehen, wobei sich daraus eine erhebliche Variationsvielfalt ergeben kann.

Des Weiteren wurden in Jülich zwei Häuser der Studentenwohnungen mit einer zentralen Zu- und Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung (WRG), Nachheizregister und L-EWT ausgestattet, die ursprünglich nicht zum Verbundprojekt gehörten aber deren Ergebnisse hier mit dargestellt werden.

Besonders das dritte System des L-EWT-Verbundprojektes, der Bibliotheks-Erweiterungsbau der Fernuniversität Hagen, gibt ein Beispiel für die Notwendigkeit einer individuellen Anlagenplanung aufgrund der vorgefundenen Situation.

Alle Systeme wurden über mehrere Jahre aufwändig vermessen und lieferten grundlegende Informationen zur Planung, Berechnung, Simulation und konstruktiven Umsetzung von L-EWT.

Wesentliche Ergebnisse über das thermische Verhalten von L-EWT und den bautechnischen Erfahrungen, sowie Ergebnisse der lufthygienischen Messungen von Umweltlabors sind nachfolgend (auszugsweise) dargestellt.

Hier sind das prinzipielle Leistungs- und Ertragsverhalten in Abhängigkeit von der Jahreszeit (Verhalten zu Beginn und Ende einer Heiz- oder Kühlperiode), das "Ermüdungsverhalten", die Variabilität als Funktion der Verlegetiefe und Bodenstoffwerte sowie der Betriebscharakteristik von grundsätzlichem Interesse.

Konstruktive Verbesserungshinweise, abgeleitet aus eigenen Erfahrungen mit Schadensbildern, runden diese zusammenfassende Dokumentation ab.

1 Versuchsanlage Solar-Institut Jülich

1.1 Zuordnung der Versuchsanlagen

Für die Untersuchung von L-EWT Anlagen wurden im Rahmen der Neubauten der Studentenwohnungen sowie dem Erweiterungsbau der Fachhochschule Aachen zwei L-EWT für unterschiedliche Anwendungsbereiche auf dem Solar-Campus Jülich (Bild 1.1) realisiert:

- „L-EWT im Gewerbebau“

Die Auslegung von L-EWT für Gewerbegebäude erfolgt für den Kühlfall. Die internen Lasten durch die hohe Belegungsdichte von max. 200 Personen pro Seminarraum und die Anforderung, einen konstanten Luftwechsel auch an heißen Tagen zu gewährleisten, können zu einer Überhitzung der beiden Seminarräume des Auditorium führen. Daher war die Installation eines Systems zur Gebäudekühlung unumgänglich. Alternativ zu einem konventionellen Kältegerät wurde ein L-EWT zur Kühlung der Frischluft installiert. Ein 138 m langes Betonrohr von 1m Durchmesser wurde in ca. 2 m Tiefe verlegt (Bild 1.2). Der im Ansaugschacht installierte Ventilator fördert die angesaugte Frischluft mit leichtem Überdruck durch das Erdrohr (max. Druckverlust 300 Pa bei $\dot{V}_{\max} = 12000 \text{ m}^3/\text{h}$). Nach dem Eintritt in das Gebäude wird der Luftstrom auf die zwei zentralen Lüftungsanlagen der Seminarräume verteilt. Mit Hilfe eines T-Stückes in der Rohrleitung sowie eingebauten Steuerklappen kann wahlweise die Außenluft direkt oder über den L-EWT angesaugt werden.

- „L-EWT im Wohnungsbau“

Bei diesem Anwendungsfall erfolgt die Auslegung für den Heizfall. Das bedeutet, dass im Winter durch Vorwärmung der Außenluft der Bedarf an Heizenergie und somit auch die Heizkosten gesenkt werden sollen. Dazu wurden zwei baugleiche L-EWT aus je einem 40 m langen Kunststoffrohr von 0,25 m Durchmesser, unter der Bodenplatte in 2 m Tiefe verlegt (keine Unterkellerung). Sie temperieren die Frischluft für je ein Reihenhaus der Zeile 2 der Studentenwohnheime. Die Auslegung erfolgte für einen maximalen Volumenstrom von 360 m³/h. Die Ansaugung der Frischluft erfolgt durch einen gemeinsamen Ansaugstutzen. Nach dem Durchströmen des Erdrohres wird der Luftstrom der Lüftungsanlage zugeführt. Mit Hilfe eines T-Stückes in der Rohrleitung sowie eingebauten Steuerklappen kann wahlweise die Außenluft direkt oder über den L-EWT angesaugt werden. Der notwendige Unterdruck wird durch einen Ventilator der jeweiligen zentralen Lüftungsanlage erzeugt.

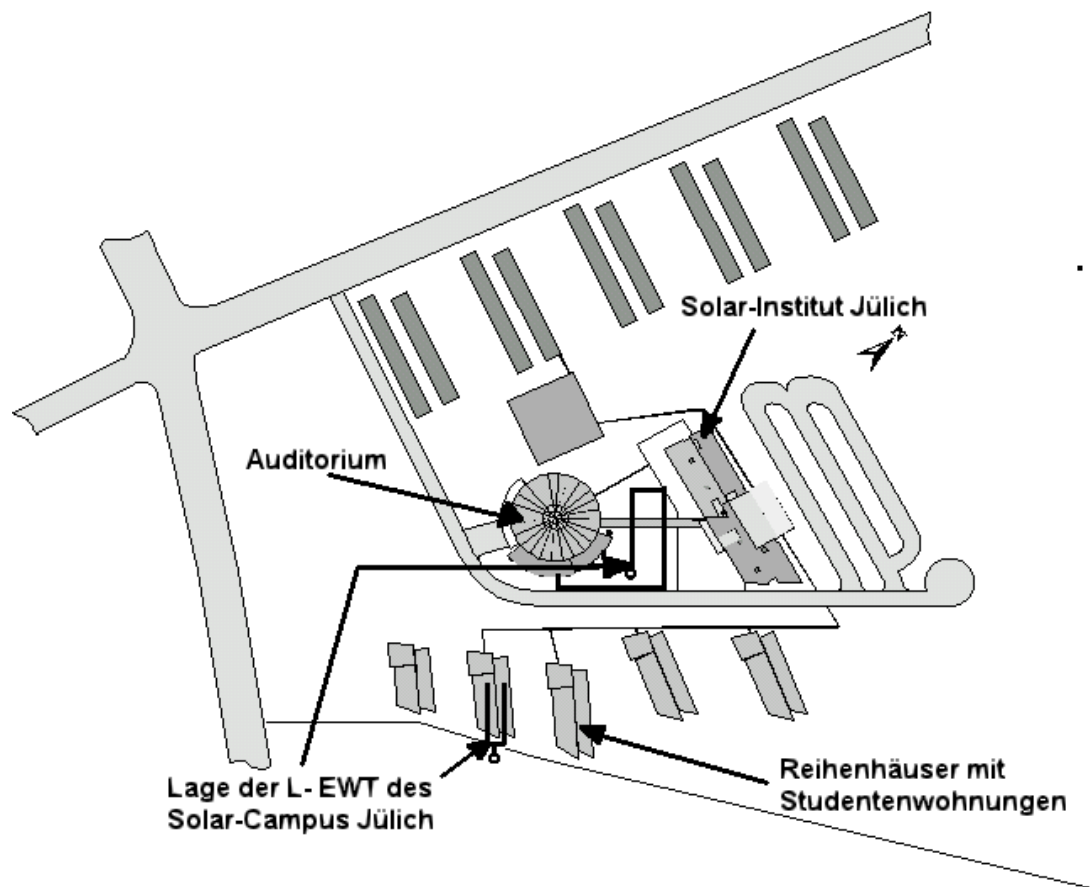


Bild 1.1 Lageskizze Solar-Campus mit L-EWT

1.2 Auditorium (L-EWT im Gewerbebau)

Die internen Lasten durch die hohe Belegungsdichte von max. 200 Personen pro Seminarraum und die Anforderung, einen konstanten Luftwechsel auch an heißen Tagen zu gewährleisten, können zu einer Überhitzung der beiden Seminarräume des Auditorium führen. Daher war die Installation eines Systems zur Gebäudekühlung unumgänglich.

Alternativ zu einem konventionellen Kältegerät wurde ein L-EWT zur Kühlung der Frischluft konzipiert. Die Außenluft sollte wahlweise direkt oder über den L-EWT angesaugt werden können (Bild 1.3). Nach dem Eintritt in das Gebäude soll der Luftstrom auf die zwei zentralen Lüftungsanlagen der Seminarräume verteilt werden können. Um die nach DIN 1946-2 vorgegebenen Extremwerte einzuhalten (bei 32°C Außenlufttemperatur darf die Raumtemperatur 26°C nicht überschreiten), erfolgte die Dimensionierung für diese Extremwerte und voller Belegung beider Hörsäle (je 200 Personen) [KRELL 1996]. Zudem war gefordert, dass der dem L-EWT nachgeschaltete Luft/Wasser-Wärmetauscher für die Wärmerückgewinnung im Winter auch bei Extremtemperaturen frostfrei gehalten wird.

Auf dem Solar-Campus sollte ein Einzelrohr-System aufgebaut werden, um im Rahmen des von der AG Solar NRW geförderten Verbundprojekts „Erdwärmetauscher“ angesichts des Rohrregister-Systems am DLR in Köln eine möglichst große Vielfalt verschiedener Systeme zu untersuchen.



Bild 1.2 Luft-Erdwärmetauscher Auditorium im Bau



Bild 1.3 Ansaugturm des Luft-Erdwärmetauschers Auditorium

1.3 Anlagenparameter

Aufgrund des Zeitplans für das Bauvorhaben musste die Auslegung und Planung für die L-EWT am Solar-Campus vor der Entwicklung und Implementierung eines numerischen, dynamischen L-EWT-Mehrknotenmodells erfolgen. Alle Berechnungen und Planungsschritte erfolgten in enger Absprache mit dem Staatlichen Bauamt Düren, das für den großen L-EWT Auditorium zuständig ist, sowie dem Ingenieurbüro INCO, Aachen, das sich für den Bau und die Planung des L-EWT der Studentenwohnungen verantwortlich zeigt.

Literaturrecherchen sowie eine Untersuchung bereits realisierter L-EWT-Anlagen zeigte, dass das bislang bei allen Projekten verwendete Modell von Albers [ALBERS 1991] die Dynamik des L-EWT nicht ausreichend beschreibt, da es nur die Berechnung des stationären Betriebs ermöglicht und die latente Kühlung unterbewertet. Da die Lüftungsanlagen sowohl im Sommer- als auch im Winter nur für wenige Stunden mit dem maximalen Frischluftvolumenstrom von 12.000 m³/h versorgt werden, wurde ein erster Versuch eines dynamischen Modells in MS-EXCEL umgesetzt, um einen instationären Kurzzeitbetrieb berechnen zu können. Zwar bietet dieses Modell auch keine als wirklich dynamisch zu bezeichnende Berechnungsweise, bildet aber einen Kurzzeitbetrieb wesentlich genauer ab als das ursprüngliche Albers-Modell.

In Tabelle 1.1 sind die berechneten Varianten dargestellt, die in die nähere Auswahl genommen wurden. Aus Kostengründen (Erdaushub, Rohrmaterial, Sammel- und Verteilerrohre u.s.w.) wurden die Anlagen mit 2 parallelen Rohren, hier durch Variante I & II bezeichnet, verworfen. Die geringfügigen Unterschiede der Temperaturdifferenzen und den thermischen Leistungen zwischen den Varianten III und IV liegen im Bereich der Rechengenauigkeit. Die Entscheidung fiel auf Variante IV, da sie bei geringfügig höheren Baukosten aufgrund des größeren Rohrdurchmessers nur 1/3 der Ventilatorleistung benötigt.

Tabelle 1.1 Mit dynamischen Ansatz berechnete Varianten

Variante	Rohre			Temperaturen		Leistung		Nutzenergie- bezogene Leistungszahl
	Durch- messer	Anzahl	Länge	Rohr- eintritt	Rohr- austritt	Ventilator Pel	therm. Q _{th}	LZ _{th} (LZ _{th} = Q _{th} / Pel)
	m		m	°C	°C	kW	kW	
I	0,8	2	132	32	17,1	0,9	59,2	66
II	0,8	2	100	32	19,1	0,68	51,3	75
III	0,8	1	132	32	19,5	3,6	49,4	14
IV	1,0	1	132	32	19,8	1,2	48,3	40

Aufgrund der im Handel erhältlichen Stücklängen für DN 1000 Rohre mit 2,5 m ergab sich eine Gesamtrohrlänge der Betonrohre inklusive der Revisionsschächte von 134 m. Für die Fortsetzung des Erdrohres in den Keller der Lüftungszentrale des Auditorium wurde während der Bauphase ein Wanddurchbruch für ein DN 800 Rohr zur nachträglichen Rohranbindung vorgesehen. Der Übergang auf den kleineren Rohrdurchmesser des Wanddurchbruches erfolgt im letzten Revisionsschacht. In ihm mündet das DN1000 Rohr.

Für die Weiterführung bis zum Gebäude verlängerte sich das Erdrohr durch die Stücklängen des DN 800 Rohr mit 4m zu einer Länge von 138 m. Die Daten der gebauten Anlage sind in Tabelle 1.2 zusammengefasst.

In ihr sind auch die mit dem nach dem statischen Modell von Albers [ALBERS 1991] und der am SIJ entwickelten dynamischen Erweiterung für den Kurzzeitbetrieb ermittelten Leistungen und Leistungszahlen eingetragen.

Tabelle 1.2 Technische Daten des L-EWT am Auditorium

L-EWT Auditorium			
Typ	Einrohr-Erdreichwärmetauscher		
Material	Faserzement (Kanalrohr)		
Verlegetiefe (Rohrmittelpunkt)	2 m (unter freiem Gelände)		
Länge	138 m		
Durchmesser	1 m		
max. Durchsatz	12.000 m³/h		
Leistung im Kühlbetrieb	instationär ¹⁾	ca. 50 kW	Leistungszahl25
	stationär ²⁾	ca. 10 kW	Leistungszahl5
Leistung im Heizbetrieb	instationär ¹⁾	ca. 55 kW	Leistungszahl27,5
	stationär ²⁾	ca. 9,5 kW	Leistungszahl5
max. Antriebsleistung	≈2 kW (über Schubventilator)		
max. Druckverlust	≈300 Pa		

¹⁾ mit erweiterten Albersmodell (dynamischer Kurzzeitbetrieb) berechnet

²⁾ rein statische Berechnung nach Albers

1.4 Regelung des Luft-/Erdwärmetauscher

Die Ansaugung der Außenluft kann wahlweise direkt oder über den L-EWT erfolgen. Die Umschaltung zwischen den beiden Ansaugmöglichkeiten für die Außenluft geschieht über zwei regelbare Steuerklappen. Zur Unterstützung des zusätzlichen Druckverlustes bei zugeschaltetem L-EWT steht ein Schubventilator im Ansaugschacht des L-EWT zur Verfügung. Die Regelung des stufenlos regelbaren Schubventilators erfolgt über je einen Drucksensor in den Zuluftsträngen der Lüftungsanlagen (siehe Bild 1.4). Liegt der Unterdruck an einer der beiden Druckmesspunkte unter 30 Pa (Druckdifferenz Zuluftstrang - Atmosphäre), wird der Schubventilator, falls der L-EWT in Betrieb ist, hochgefahren. Ist der Wert des Unterdruck kleiner 30 Pa verringert sich dessen Drehzahl wieder. Die Beheizung der Seminarräume erfolgt ausschließlich über die Lüftungsanlage. Um den Energieverlust zu minimieren und die Heizfunktion mit einem Minimum an Frischluft zu gewährleisten, besteht zwischen Abluft- und Zuluftstrang ein Bypass. Über diesen kann bis zu 60 % der warmen Abluft ohne Wärmeverlust wieder direkt dem Seminarraum zugeführt werden.

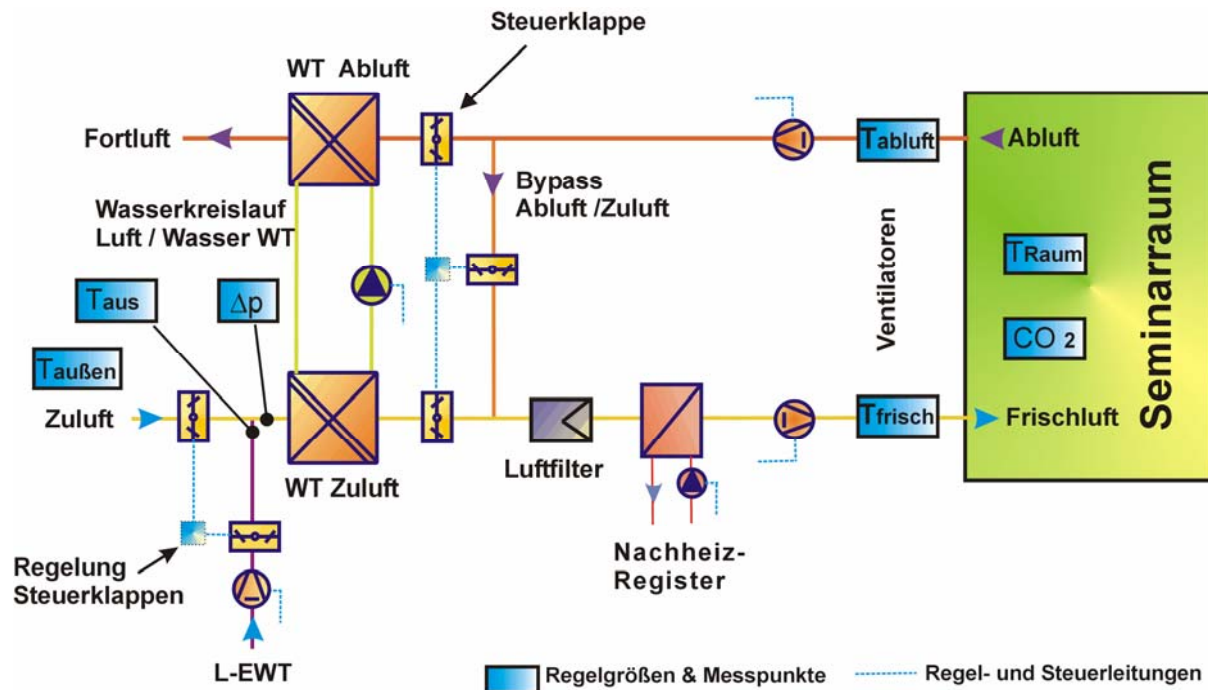


Bild 1.4 Schema der Lüftungsanlage im Auditorium

Die stufenlose Regelung des Bypassvolumenstroms erfolgt über drei Steuerklappen (Bild 1.4), als Regelgröße dient die CO₂-Konzentration in den Seminarräumen. Zur weiteren Wärmerückgewinnung (WRG) der nicht über den Bypass geleiteten Abluft wurden im Abluft- und im Zuluftstrang ein Luft-Wasser Wärmetauscher (WT) installiert und mit einem geschlossenen Wasserkreislauf verbunden. Zur Vorwärmung der Zuluft wird die Wärme von der Abluft über den WT an den Wasserkreislauf übertragen. Mit Hilfe einer geregelten Pumpe zirkuliert das erwärmte Wasser zum WT im Zuluftstrang und erwärmt, über einen weiteren WT, die einströmende Zuluft. Reichen Bypass und WRG nicht aus um den Frischluftstrom auf die erforderliche Temperatur zu bringen, kann zusätzliche Wärme über das Nachheizregister zugeführt werden. Die Nachheizung erfolgt über einen an das Nahwärmenetz des Solar-Campus angeschlossenen Luft-Wasser WT (das Nahwärmenetz des Solar-Campus beheizt das Auditorium, das Gebäude Naturwissenschaften und die Reihenhäuser der Studentenwohnungen mit Wärme).

Um die gewünschten Raumtemperaturen ($21^{\circ}\text{C} < T_{\text{Raum}} < 26^{\circ}\text{C}$) zu erreichen kann die Frischluft je nach Bedarf mit einer Temperatur im Bereich von 18°C (kühlen) und 40°C (heizen) den Seminarräumen zugeführt werden. Der Regelung stehen für die Temperierung der Seminarräume folgende Temperatursensoren (Bild 1.4) zur Verfügung:

- Erfassung der Außenluft ($T_{\text{außen}}$), an der Nordseite des Gebäudes.
- Austritt des L-EWT Erdrohres (T_{aus}).
- Ende des Zuluftstrangs (T_{frisch}), kurz vor Eintritt in den Seminarraum.
- Beginn des Abluftstrangs (T_{Abluft}), kurz nach dem Austritt aus dem Seminarraum.
- Seminarraum: Erfassung der Raumlufttemperatur (T_{Raum}).

Um die Raumluftqualität zu gewährleisten erfasst die Regelung die CO₂-Konzentration in den Seminarräumen. Der Grenzwert wurde auf eine CO₂-Konzentration <750 ppm festgelegt um den Grenzwert nach DIN 1946-2 (CO₂-Konzentration <1000 ppm) auch bei Umluftbetrieb (Bypass Abluft- Zuluftstrang) nicht zu überschreiten. Die Regelgrößen und ihre Sollwerte für die Regelung sind in Tabelle 1.3 zusammengefasst.

1.4.1 Regelstrategie für die Betriebszeiten

Die Regelung für die Lüftungsanlage wurde seit der Inbetriebnahme zweimal geändert. Die erste Änderung erfolgte Anfang Dezember 2000, die zweite im August 2001.

Diese erste Änderung wurde erforderlich, weil der L-EWT in Ermangelung eines Abschaltkriteriums außerhalb der vorgesehenen Außenlufttemperaturen betrieben wurde. Hatte die Regelung den L-EWT z.B. im Sommer eingeschaltet und sank die Außentemperatur unter das Einschaltkriterium von 18°C, lief die Anlage auch bei deutlicher Unterschreitung dieser Temperatur weiter. Analoges war auch im Winterbetrieb zu beobachten. Dieser Mangel wurde durch die Implementation eines T-Kriteriums behoben. Das T-Kriterium überprüft ob die Temperaturdifferenz zwischen der Temperatur der Außenluft und der Temperatur am Rohraustritt größer als vier Kelvin ist. Ist diese Bedingung nicht erfüllt, wird der L-EWT abgeschaltet.

In der zweiten Änderung der Regelstrategie wurden die Laufzeiten der Lüftungsanlagen reduziert, indem der bereits in den Seminarräumen vorhandene CO₂ Sensor besser in die Regelung integriert wurde. Durch die Definition neuer Ein- und Ausschaltbedingungen werden die Lüftungsanlagen jetzt nur noch betrieben, wenn die CO₂-Konzentration und die Temperatur in den Seminarräumen, während ihrer Nutzungszeiten (in der Vorlesungszeit 2000: Mo. 6:00 – 16:00; Di. & Mi. 6:30 – 16:00; Do. & Fr. 6:30 – 15:00), außerhalb der Grenzwerte liegen (vorher konstanter Betrieb der Lüftungsanlage auf Stufe 1 während der Nutzungszeit der Seminarräume). Durch zusätzliche Änderung der Einschaltprioritäten zugunsten des L-EWT wird dieser, falls die Betriebsbedingungen erfüllt sind, nun öfters in Betrieb genommen.

Im folgenden wird die aktuelle Regelstrategie nach der Änderung im August 2001 beschrieben. Die Lüftungsanlagen werden nur innerhalb vorgegebener Zeitfenster (Lüftungsbedarf nach Vorlesungsplan) betrieben. Außerhalb dieser Zeitfenster erfolgen keine Maßnahmen zur Konditionierung der Raumluft. Zu Beginn eines Zeitfensters fährt die Lüftungsanlage hoch und läuft für 30 Minuten. Sind nach dieser Periode die Regelgrößen Raumtemperatur und CO₂-Konzentration innerhalb ihrer Sollwerte (siehe Tabelle 1.3), schaltet sich die Lüftungsanlage ab. Sind die Raumkonditionen nicht erfüllt, läuft die Lüftungsanlage weiter, bis die Regelgrößen ihre Sollwerte erreicht haben. Hat sich die Lüftungsanlage durch Erreichen der Sollwerte abgeschaltet, geht sie erst wieder in Betrieb, falls mindestens eine der Regelgrößen ihren Grenzwert über- bzw. unterschreitet und entsprechend dem Zeitfensters Lüftungsbedarf besteht.

Liegt die Außenlufttemperatur beim Einschalten der Lüftungsanlage im Betriebsbereich des L-EWT wird die Außenluft über das Erdrohr angesaugt. Ist das T-Kriterium (siehe Tabelle 1.3) am Ende der 30 Minuten Periode nicht erfüllt und die Lüftungsanlage weiterhin in Betrieb, wird die Luft direkt aus der Umwelt anstatt durch das Erdrohr angesaugt.

Der L-EWT bleibt dann solange außer Betrieb, bis die Lüftungsanlage nach einem Stillstand erneut anläuft, auch wenn die Außenlufttemperatur im Betriebsbereich liegt.

Ist der L-EWT bereits in Betrieb und die Außenlufttemperatur verlässt den Betriebsbereich, wird der L-EWT solange weiter betrieben wie das T-Kriterium erfüllt ist.

Um den Einfluss kurzzeitiger Schwankungen der Außenlufttemperatur auf die Regelung zu verhindern, wurde eine Hysterese von einem Kelvin in die Regelung implementiert.

Tabelle 1.3 Regelgrößen und Sollwerte für die Regelung der Lüftungsanlage Auditorium und des L-EWT

Regelgrößen	Sollwerte	
Seminarräume		
Temperatur im Seminarraum	$21\text{ °C} < T_{\text{Raum}} < 26\text{ °C}$	
CO ₂ -Konzentration im Seminarraum	$< 750\text{ ppm}$	
Lüftungsanlagen Auditorium		
Temperatur Zuluft	$18\text{ °C} < T_{\text{Zu}} < 40\text{ °C}$	
Abweichung der Sollwerte für die Zuluft (Hysterese)	$\pm 1\text{ K}$	
L-EWT		
	Sommer	Winter
Temperatur Außenluft (Betriebsbereich)	$> 18\text{ °C}$	$< 4\text{ °C}$
Toleranz für die Außenlufttemperatur (Hysterese)	$- 1\text{ K}$	$+ 1\text{ K}$
Mindesttemperaturdifferenz zwischen Außenlufttemperatur und Temperatur am Ende des Erdrohrs (T-Kriterium)	$- 4\text{ K}$	$+ 4\text{ K}$

1.4.2 Regelstrategie für die Heizfunktion

Die Lüftungsanlage übernimmt die gesamte Beheizung der Seminarräume. Eine zusätzliche Raumheizung wurde nicht installiert. Die Beschreibung der Regelstrategie für den Heizfall erfolgt unter der Annahme, dass die Lüftungsanlage in Betrieb ist.

Die Temperierung der Seminarräume im Winter erfolgt durch eine Kombination verschiedener Maßnahmen. Aufgeführt nach ihrer Priorität sind dies (siehe Bild 1.4):

- Die Luftvorwärmung (L-EWT)
- Der Umluftbetrieb durch einen Bypass zwischen Abluft und Zuluftstrang
- Die Wärmerückgewinnung (WRG)
- Das Nachheizregister

Der L-EWT wird, unabhängig von der übrigen Regelung der Lüftungsanlage, betrieben, falls die Außenlufttemperaturen unter 4 °C (Einschaltbedingung L-EWT) liegen und das T-Kriterium (Ausschaltkriterium) erfüllt ist. Ansonsten stehen die Steuerklappen auf direkter Außenluftansaugung.

Tabelle 1.4 Übersicht der Anlagenkomponenten und ihre Prioritäten in die Regelstrategie während des Heizbetriebs der Lüftungsanlagen des Auditoriums

Anlage in Betrieb: Durch Zeitfenster vorgegebene Lüftungsbedarf; CO₂-Wert oder Raumtemperatur außerhalb der Sollwerte			
Priorität	Anlagenkomponente	Stellglied	Bedingungen
1a	L-EWT	Steuerklappen	Außenlufttemperatur < 4 °C und T-Kriterium >4 K
1b	Umluftbetrieb durch Bypass	Steuerklappen	Heizbetrieb, max. 60 % Volumenstrom solange CO ₂ -Wert im Seminarraum < 750 ppm
2	WRG	Pumpe Wasserkreislauf	$T_{\text{frisch}} < T_{\text{soll}} = f(T_{\text{außen}}, \text{Traum})$
3	Heizregister	Pumpe Warm- wasserkreislauf	WRG in Betrieb und $T_{\text{frisch}} < T_{\text{soll}}$

Um den Energieeinsatz im Winter und in der Übergangszeit möglichst gering zu halten, hat, vom L-EWT abgesehen, der Umluftbetrieb für die Wärmerückgewinnung oberste Priorität (siehe Tabelle 1.4). Solange der CO₂-Wert in den Seminarräumen unterhalb des Sollwertes (750 ppm) bleibt, wird bis zu 60 % der Abluft des Seminarraumes der Zuluft über den Bypass zugeführt. Reicht das nicht aus um den Seminarraum zu erwärmen, wird über den Luft-Wasser Wärmetauscher (WT) der Abluft, weitere Wärme entzogen, an den geschlossenen Wasserkreislauf abgegeben und über den zuluftseitigen Luft-Wasser WT der einströmenden Außenluft zugeführt. Reicht die so zurückgewonnene Wärme (Umluft & WRG) noch nicht aus, wird die Zuluft über das dem WT nachgeschaltete Nachheizregister auf die gewünschte Temperatur angehoben.

1.4.3 Regelstrategie für die Kühlfunktion

Für die Kühlung der beiden Seminarräume im Sommer wurde auf ein Kälteaggregat verzichtet. Die Kühlfunktion übernimmt ausschließlich der L-EWT.

Besteht in einem der beiden Seminarräume Kühlbedarf bzw. beträgt die Außenlufttemperatur über 18°C, wird die direkte Außenluftansaugung der Lüftungsanlage mittels der Steuerklappen auf L-EWT-Betrieb umgestellt.

Beträgt die Temperaturdifferenz zwischen der Außenluft und der aus dem Erdrohr strömenden Luft nach einem Zeitintervall von 30 Minuten mindestens -4 K , bleibt der L-EWT aktiviert bis das T-Kriterium nicht mehr erfüllt ist. Wurde das T-Kriterium am Ende der 30 Minuten nicht eingehalten, wird die Außenluft wieder direkt angesaugt.

Dieses Konzept hat im Frühjahr bei kurzen Hitzeperioden und noch kühlem Erdreich eine Schwachstelle.

Beträgt zum Beispiel die Außenlufttemperatur 20 °C und die Temperatur am Ende des Erdrohres 15 °C , ist sowohl das Einschalt- als auch das T-Kriterium erfüllt. Der Temperatursensor in der Zuluft kurz vor dem Eintritt in den Hörsaal würde dann, da die Eintrittstemperatur unter dem Mindestwert von 18 °C liegt, den Umluftbetrieb aktivieren. Falls dieser die Frischlufttemperatur nicht über den Sollwert anheben kann, würde wie im Winterbetrieb die WRG und im Extremfall sogar das Nachheizregister eingeschaltet werden, was energetisch nicht sinnvoll ist.

Dem gerade beschriebenen Szenario steht jedoch der Effekt entgegen, dass durch Aktivierung des Umluftbetriebes der Volumenstrom für die Außenluft, durch die Koppelung der Steuerklappen des Zu- und Abluftstranges mit der Steuerklappe im Bypass (siehe Bild 1.4), deutlich reduziert wird. Durch den niedrigeren Zuluftvolumenstrom sinkt zwar die Austrittstemperatur des L-EWT geringfügig, sie wird jedoch dafür mit dem warmen Volumenstrom des Bypass vermischt, was die Frischlufttemperatur erhöht. Nach Zuschaltung der WRG würde sich die Frischluft weiter erwärmen, so dass nur an sehr wenigen Betriebsstunden im Jahr die Gefahr besteht dass in der beschriebenen Konstellation Energie vom Nachheizregister angefordert wird. Eine Überprüfung ob und wie oft dieser Zustand mit der neuen, im August 2001 implementierten Regelung tatsächlich eintreten wird kann erst in der Kühlperiode 2002 festgestellt werden.

Da die Ventilatoren vor August 2001 innerhalb des Zeitfensters mindestens auf Stufe 1 betrieben wurden, kam es zu Anforderungen an das Nachheizregister während der L-EWT kühlte. Damit nicht Kühlung und Nachheizung parallel betrieben wurden, wurde im Sommer 2000 und im Sommer 2001 der Warmluftstrang des Nachheizregisters über ein Absperrventil manuell geschlossen.

1.4.4 Bewertung der Regelung des L-EWT Auditorium

Anhand der L-EWT-Betriebszeiten soll überprüft werden, ob die Regelung den L-EWT sinnvoll einsetzt. Der L-EWT kann über die Regelung nur dann betrieben werden, wenn mindestens eine der Lüftungsanlagen in Betrieb ist. Um eine Aussage über die richtige Nutzung des L-EWT in diesem Zeitraum zu bekommen (in dem mindestens eine der Lüftungsanlagen in Betrieb war) wurde die rechnerisch maximal möglichen L-EWT Betriebszeit ermittelt und mit den realen Laufzeiten verglichen. Für den L-EWT wurden als maximale Betriebszeit die Zeiten aufsummiert, in denen Betriebsbedingungen für den L-EWT (Winter: $T_{\text{außen}} < 4\text{ °C}$; Sommer: $T_{\text{außen}} > 18\text{ °C}$) erfüllt waren. Die ermittelten Werte sind für die Heizperioden 99/00 und 00/01 in Bild 1.5 und für die Kühlperioden 2000 und 2001 in Bild 1.6 aufgetragen. Die Monate, in denen die L-EWT Regelung zeitweise deaktiviert und zu Forschungszwecken mittels Handbetrieb gefahren wurde, sind mit dem Kürzel HB (=Handbetrieb) gekennzeichnet.

Vergleich der max. möglichen mit der realen Betriebszeit des L-EWT für zwei Heizperioden während der Laufzeit mind. einer Lüftungsanlage

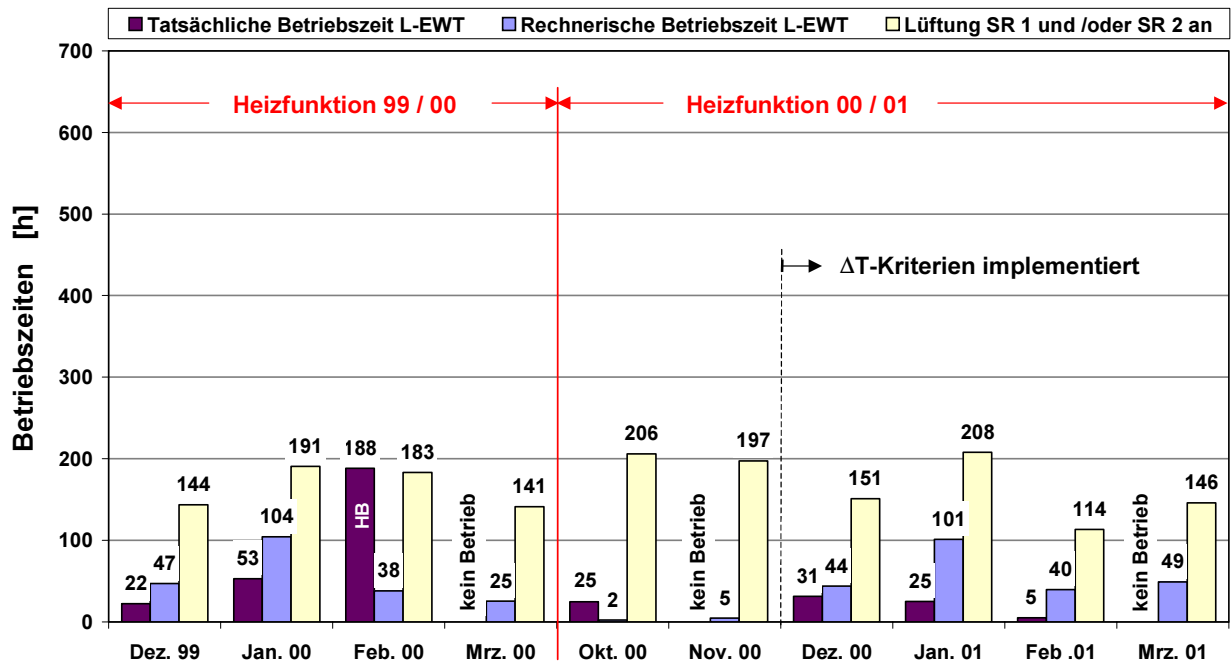


Bild 1.5 Vergleich der max. möglichen mit der realen Betriebszeit des L-EWT für die Heizperioden 99 /00 und 00 /01 (mindestens eine Lüftungsanlage in Betrieb; $T_{\text{außen}} < 4\text{ °C}$ oder $T_{\text{außen}} > 18\text{ °C}$).

Vergleich der max. möglichen mit der realen Betriebszeit des L-EWT für zwei Kühlperioden während der Laufzeit mind. einer Lüftungsanlage

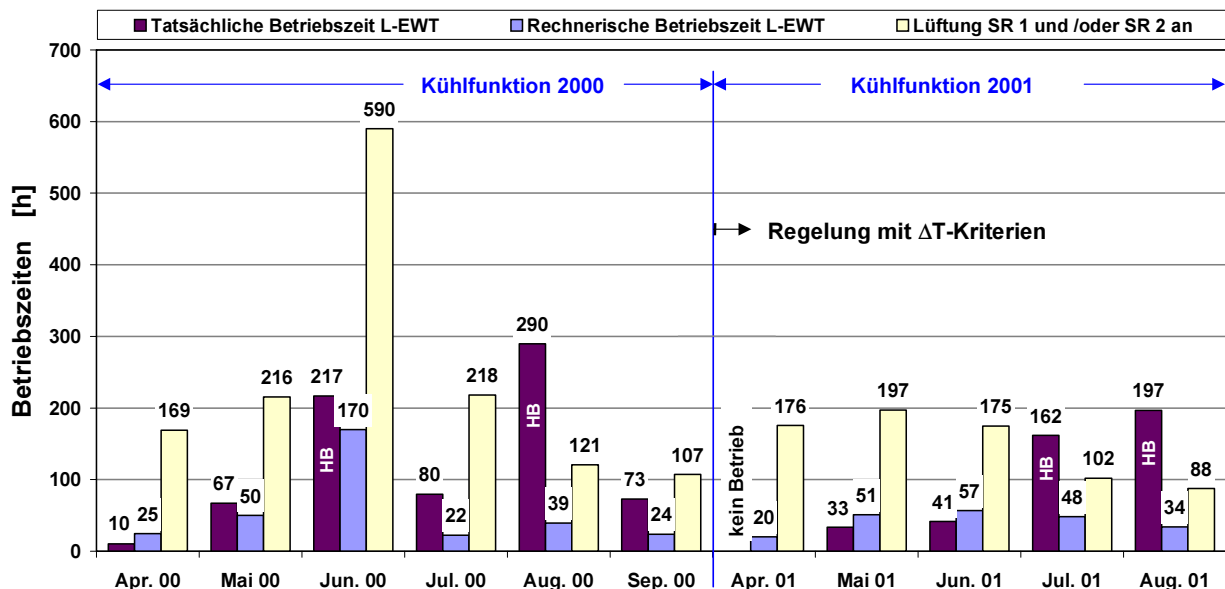


Bild 1.6 Vergleich der max. möglichen mit der realen Betriebszeit des L-EWT für die Kühlperioden 2000 und 2001 (mindestens eine Lüftungsanlage in betrieB; $T_{\text{außen}} < 4\text{ °C}$ oder $T_{\text{außen}} > 18\text{ °C}$).

Es ist zu erkennen, dass die realen Betriebszeiten in den Sommermonaten, vor der Implementierung der neuen L-EWT Regelung im Dezember 2000, länger waren als es theoretisch sinnvoll gewesen wäre. Die zu kurzen Laufzeiten des L-EWT nach Implementierung der neuen Regelstrategie sind, außer auf das T-Kriterium, das nur energetisch sinnvolle Betriebszustände zulässt, auf einen Messfehler des Außenlufttemperatursensors der Lüftungsanlage zurückzuführen. Beim Vergleich der Messwerte des Außenlufttemperatursensors der Lüftungsanlage mit den Messwerten des Temperatursensors am Wettermast sowie dem Temperatursensors am Rohranfang des L-EWT (während der L-EWT Laufzeit) ergab, dass der Außenlufttemperatursensor der Lüftungsanlage eine um ca. 3 K höhere Temperatur misst. Dies hatte zur Folge, dass der L-EWT im Winter erst bei Temperaturen unter 1 °C anstelle der in der Regelung vorgegebenen 4 °C in Betrieb ging (Bild 1.7 und Bild 1.8).

Im Sommer wurde der L-EWT durch den Messfehler des Temperatursensors bereits bei 15 °C anstatt bei der gewünschten Temperatur von 18°C eingeschaltet, durch das T-Kriterium ($T_{\text{außen}} - T_{\text{EWT, Ende}} > |4 \text{ K}|$) wurde dieser Fehler jedoch nach kurzer Laufzeit abgefangen. Die ursprüngliche Regelung (bis Dez. 2000), in der das T-Kriterium nicht vorgesehen war, ließ den L-EWT weiterlaufen, was sich in den zu langen Betriebszeiten in den Sommermonaten (siehe Bild 1.6) widerspiegelt.

Berücksichtigt man diese Abweichung des Außenluftensors, funktioniert die neue Regelung in der vorgesehenen Weise. In Bild 1.7 und Bild 1.8 sind, für die Zeiträume in denen die Außenlufttemperaturen im Winter 2001 im Betriebsbereich (< 4 °C) lagen, die Luftgeschwindigkeiten im L-EWT und in der Lüftungsanlage (=Laufzeit der Anlagen), die Temperaturen am Erdrohraustritt und der Zuluft zwischen WT und Nachheizregister sowie die Raum- und Außenlufttemperatur aufgetragen. Die vorgesehene Einschalttemperatur des L-EWT ist durch eine rote Linie, die von der Regelung durch die Abweichung des Sensors bedingte durch eine grüne Linie dargestellt. Die beiden Diagramme sind für den Seminarraum 1 erstellt worden. Ist wie z.B. am 27.01.2001 (siehe Bild 1.8) nur der L-EWT in Betrieb, wurde er von der Lüftungsanlage des Seminarraumes 2 eingeschaltet .

Der Messfehler des Außenlufttemperatursensors der Lüftungsanlage wurde mit der zweiten Verbesserung der Regelstrategie Anfang August 2001 durch einen Korrekturfaktor (Offset) behoben. Dass der L-EWT im Kühlbetrieb nun bei der gewünschten Außentemperatur eingeschaltet wird, erkennt man in Bild 1.7 deutlich.

In Bild 1.7 sind u.a. die Geschwindigkeiten (=Betriebszeiten) der Lüftungsanlage (grün) und des L-EWT (türkis) sowie der Verlauf der Außenlufttemperatur (violett) aufgetragen. Am zweiten Betriebstag schaltet sich die Lüftungsanlage um 5:00 Uhr ein, als die Außenlufttemperatur noch unterhalb der Einschaltsschwelle von 18 °C liegt. Um 7:00 Uhr erreicht sie den Einschaltwert für den L-EWT von 18 °C und dieser geht in Betrieb.

Überprüfung der Regelung für den L-EWT Auditorium - Seminarraum 1 - (10.01. -15.01.2001)

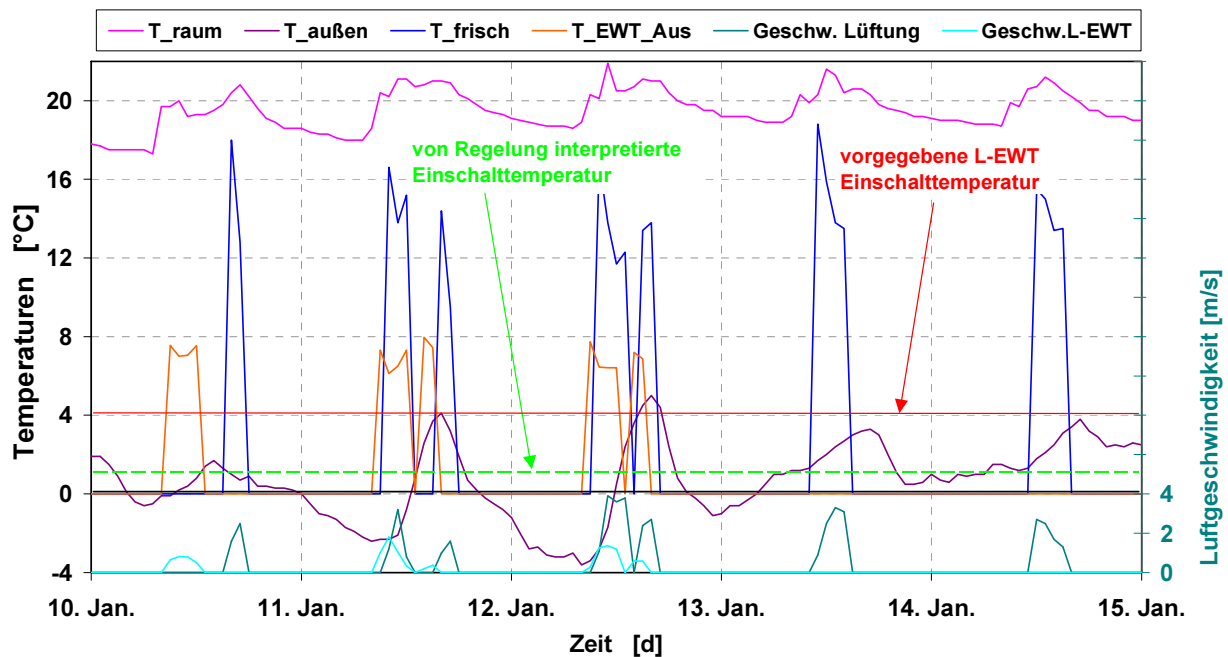


Bild 1.7 Überprüfung der Regelung des L-EWT Auditorium und der Lüftungsanlage des Seminarraumes 1 (Stundenmittelwerte)

Überprüfung der Regelung für den L-EWT Auditorium - Seminarraum 1 - (25.01. -30.01.2001)

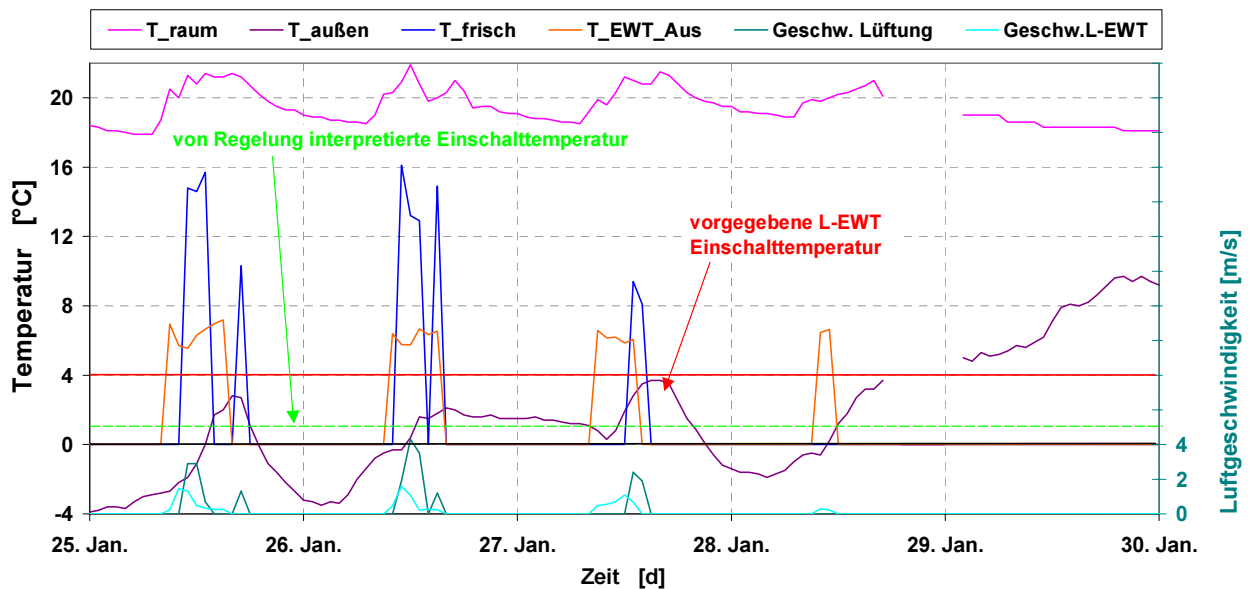


Bild 1.8 Überprüfung der Regelung des L-EWT Auditorium und der Lüftungsanlage des Seminarraumes 1 (Stundenmittelwerte)

1.5 Vermessung des L-EWT Auditorium

Der Luft-Erdwärmetauscher des Auditoriums wurde im Rahmen des L-EWT-Verbundprojektes mit einem umfangreichen Messsystem ausgestattet, um wichtige Daten über das Betriebsverhalten und die Vorgänge im Erdreich zu erhalten. Es wurden insgesamt 306 Sensoren am und im L-EWT installiert.

Für die Datenauswertung ist der Typ, die genaue Position und Kennzeichnung eines jeden Sensors wichtig. Nachfolgend wird daher der Aufbau, die verwendeten Sensoren und die genauen Positionen im Meßsystem kurz erläutert.

1.5.1 Sensoren im EWT

Für die Leistungsmessung (Input-/Output) wurden folgende Sensoren im L-EWT installiert:

Tabelle 1.5 Sensoren des L-EWT Auditorium

L-EWT- Eingang		L-EWT- Ausgang	
Messgröße	Sensortyp	Messgröße	Sensortyp
Lufttemperatur	Glas-Pt100 1/3 DIN	Lufttemperatur	Glas-Pt100 1/3 DIN
Rel. Feuchte	Kapazitiver Sensor	Rel. Feuchte	Kapazitiver Sensor
CO ₂	IR-Absorbtion		
P _{el_Schubventilator}	Energiemengenzähler		
Ström-Geschw.	Flügelradanemometer		

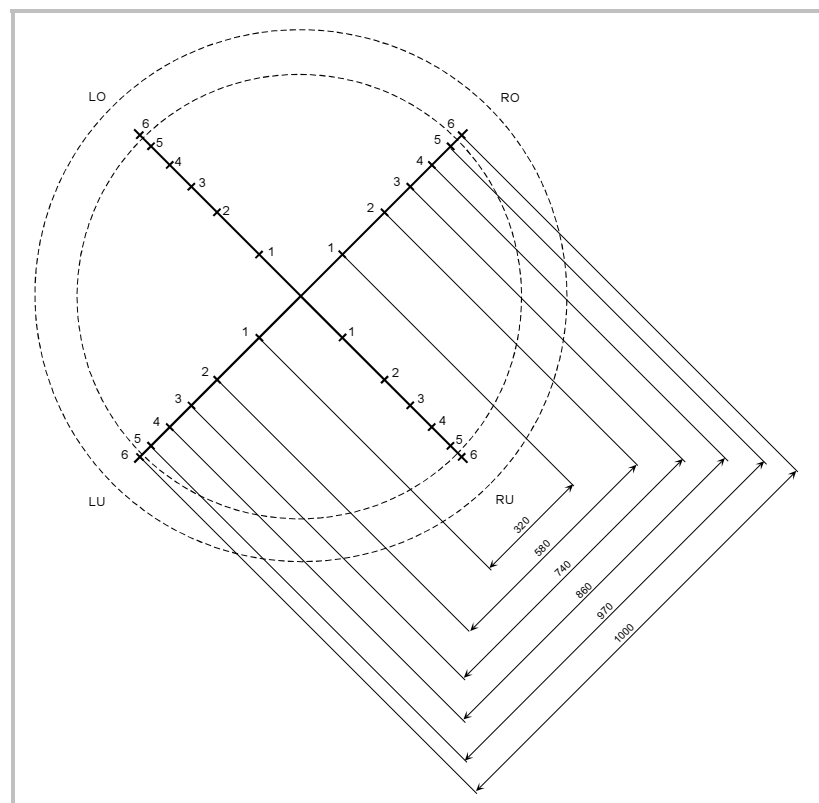


Bild 1.9
Messkreuz im L-EWT
(Ansicht in Strömungsrichtung)

Bild 1.9 zeigt den Aufbau des Kreuzes und die Bezeichnung der einzelnen Fühler. Die Ansicht des Messkreuzes ist in Strömungsrichtung. Im Übersichtsplan (Bild 1.12) ist die genaue Position nochmals ersichtlich. Es wurden ausschließlich Glas-Pt100 1/3DIN verwendet. Weiterhin wurde an der Messebene A (siehe dort und Bild 1.12) ein Messkreuz mit Temperaturfühlern in der Luftströmung eingebaut. Mit Hilfe dieses Kreuzes wird das Temperaturprofil in der Strömung und die Rohrwandoberflächentemperatur gemessen.

1.5.2 Sensoren im Erdreich

Um den Wärmetransport und das sich ausbildende Temperaturfeld im Erdreich erfassen zu können, wurden insgesamt fünf Messebenen am EWT installiert (siehe Bild 1.12). Jede Messebene besteht aus senkrecht ins Erdreich eingebrachten Kunststoffflanzen mit aufgesetzten Temperaturfühlern. Bild 1.10 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer Messebene.

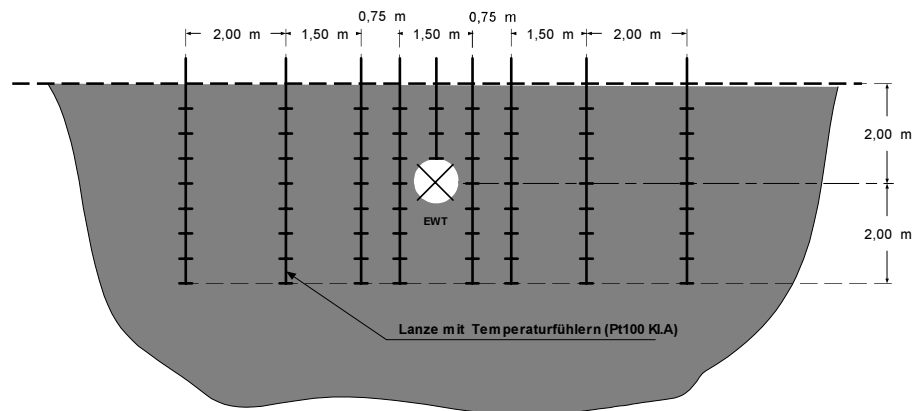


Bild 1.10
Prinzipieller Aufbau
einer Messebene



Bild 1.11
Ansicht der
Messebenen von Oben

Testanlagen im Verbundprojekt

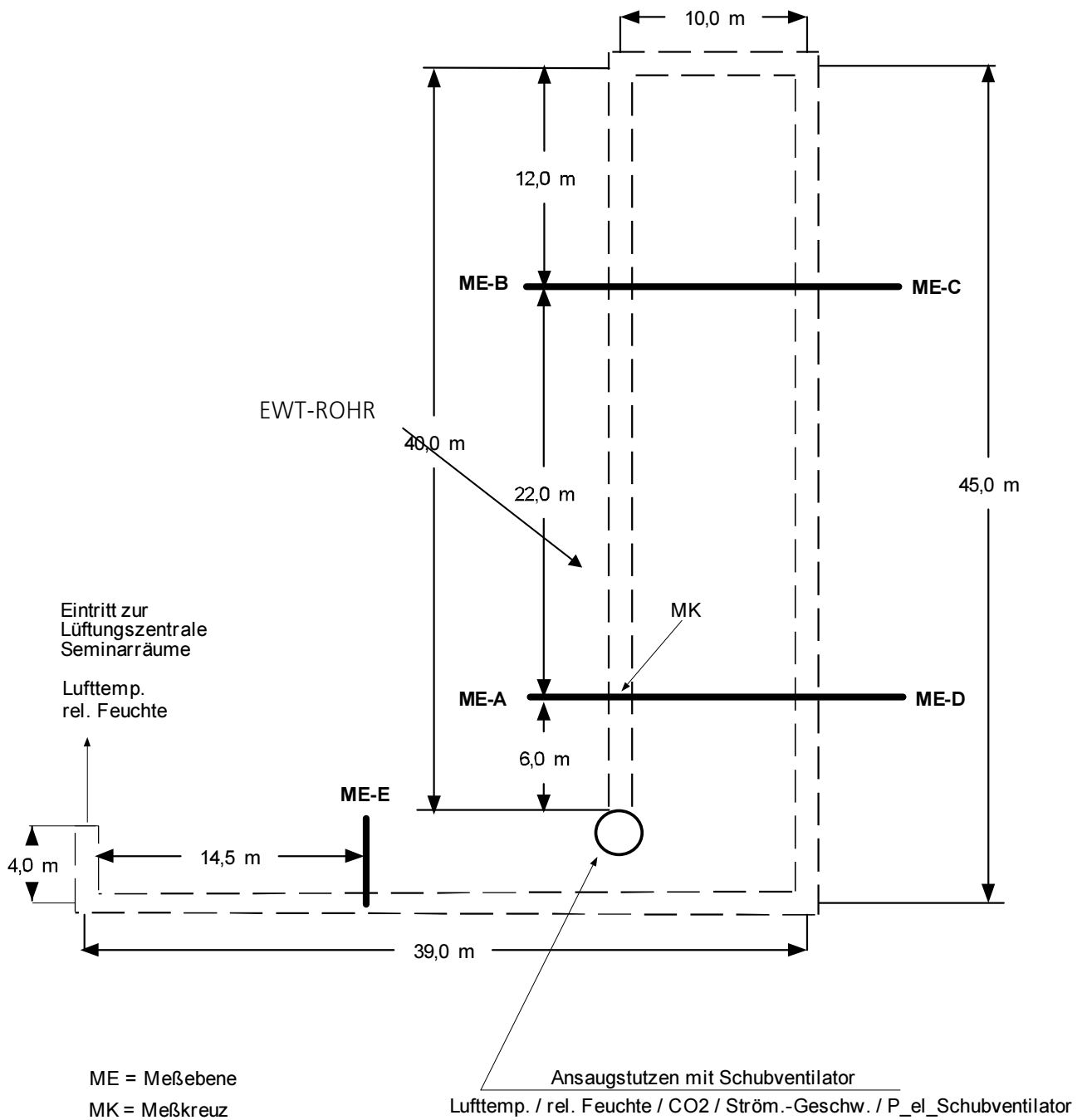


Bild 1.12 Übersichtsplan

1.5.3 Auswirkungen des L-EWT auf die Erdreichtemperaturen

In der nachfolgenden werden die Änderungen der Erdreichtemperaturen in verschiedenen Tiefen und Abständen vom Erdrohr des L-EWT Auditorium während einer 9-tägigen Betriebszeit ab dem 26. Juli 2001 dargestellt. Die Daten wurden während einer Hitzeperiode mit der Messebene A aufgezeichnet. Die Einzelbilder zeigen die Temperaturänderungen im Erdreich nach 2, 3, 6, und 9 Tagen Betriebszeit.

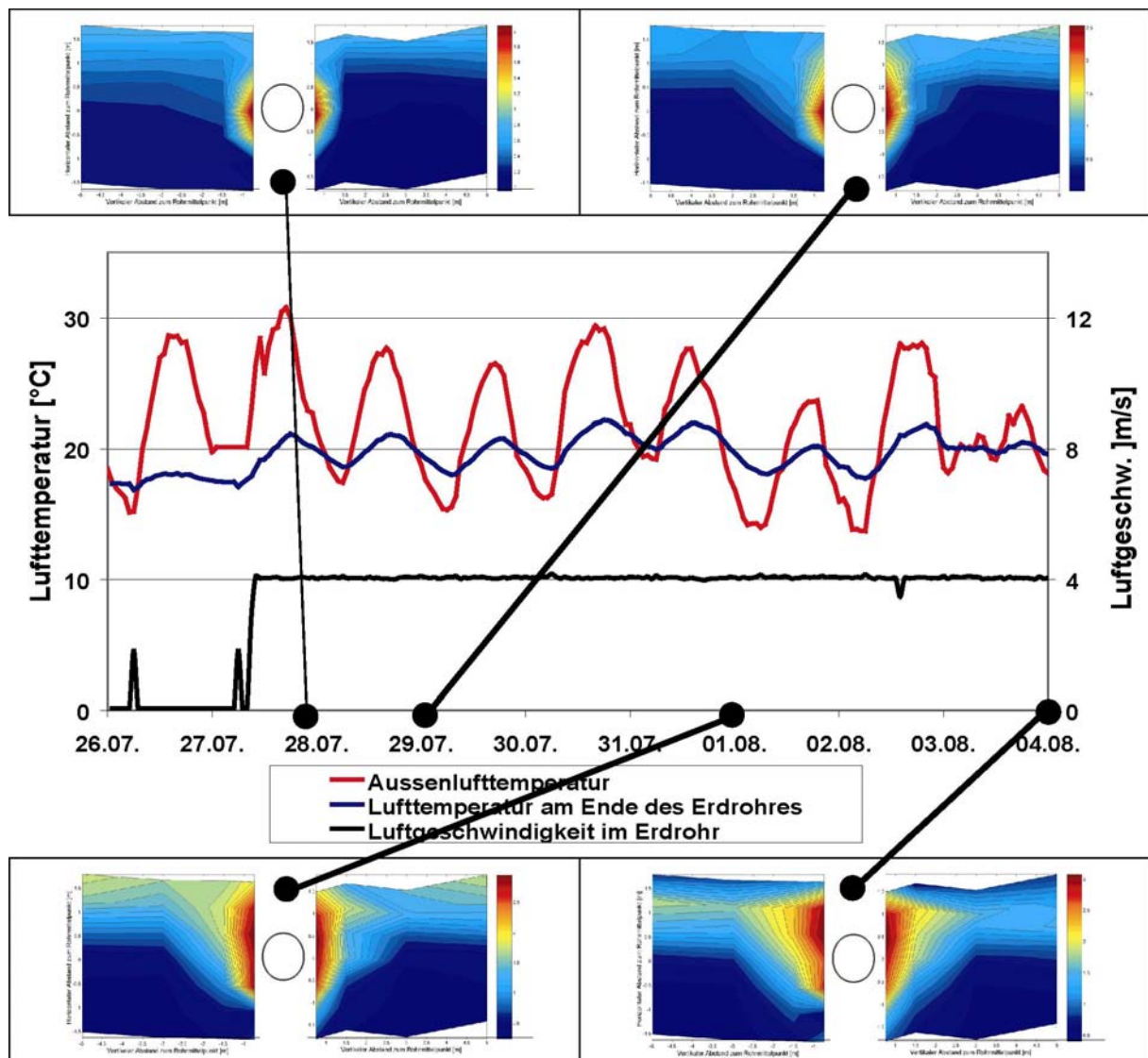


Bild 1.13 Änderung der Isothermen im Erdreich um das L-EWT-Rohr während des Betriebes über 9 Tage

Die stärksten Temperaturänderungen im Erdreich zeigen sich bis zu einem radialen Abstand von 1,5 m um das Erdrohr. Die Erdreichtemperaturen in einem horizontalen Abstand von 25 cm vom Erdrohr haben sich in den 9 Betriebstagen um 3 Kelvin geändert.

1.6 Bilanzierung des L-EWT Auditorium

Zur Bilanzierung der thermischen Energie wurden die Werte herausgefiltert, die durch mangelhafte Regelung und während Zeiten des manuellen Betriebs außerhalb des sinnvollen Einsatzbereiches lagen. War der L-EWT in Betrieb, und unterschritt im Sommer die einströmende Außenluft die Erdreichtemperaturen, übernahm der L-EWT eine nicht gewollte Heizfunktion. Analog kamen in der Winterperiode Betriebszustände vor, in denen die einströmende Außenluft wärmer war als die Erdreichtemperatur in Rohrumgebung, und die durchströmende Luft wurde dann ungewollt gekühlt. Die Auswertung für Energiebilanzen erfolgte mit den bereinigten Werten.

1.6.1 Energetische Auswertung

Für die energetische Bilanzierung des L-EWT Auditorium wurden die thermische Energiemengen aus den Messwerten wie folgt berechnet.

$$E_{th} = \int \dot{m} \cdot (h_{aus} - h_{ein}) dt \quad (\text{Gl. 1})$$

$$h_i = c_{p,L,tr} \cdot T_i + x_i (r_0 + c_{p,D} \cdot T_i) \quad (\text{Gl. 2})$$

$$\dot{m} = \dot{V} \cdot \rho(T_{ein}) \quad (\text{Gl. 3})$$

$$\dot{V} = c \cdot A_q \quad (\text{Gl. 3})$$

mit: E_{th}	[kWh]	durch den L-EWT gewonnene thermische Energiemenge
\dot{m}	[kg/h]	Massenstrom
\dot{V}	[m ³ /h]	Volumenstrom
h_i	[kJ/kg]	[kJ/kg] spezifische Enthalpie
$T_{i/o}$	[°C]	Gemessene Aus- bzw. Eintrittstemperatur der Luft
x_i	[g/kg]	gemessene absolute Feuchte (am Rohraus- bzw. Rohreintritt)
$c_{p,L,tr} = 1,007$	[kJ/KgK]	spezifische Wärmekapazität der trockenen Luft bei 1 bar
$c_{p,D} = 1,86$	[kJ/KgK]	spezifische Wärmekapazität von Wasserdampf bei 1 bar
$r_0 = 2001$	[kJ/kg]	Verdampfungsenthalpie bei 1 bar
c	[m/s]	gemessene Luftgeschwindigkeit im Erdrohr in Rohrmitte
A_q	[m ²]	innerer Querschnitt des Erdrohres
$\rho(T_{ein})$	[kg/m ³]	Temperaturabhängige Dichte

Der Geschwindigkeitssensor zur Bestimmung des Luftdurchsatzes durch das Erdrohr ist nach einer Lauflänge von sechs Metern installiert. Für die Berechnung des Massenstroms mit der entsprechenden temperaturabhängigen Dichte wurde deshalb die Eintrittstemperatur eingesetzt.

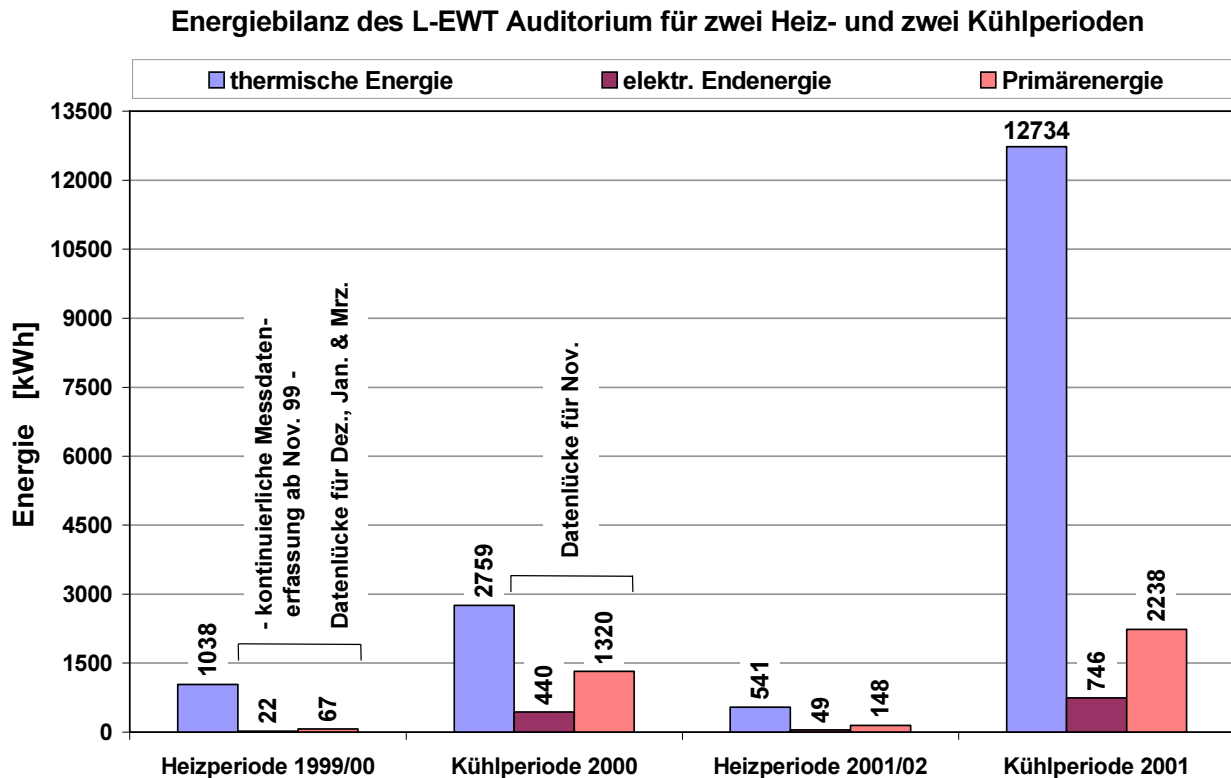


Bild 1.14 Energiebilanzen des L-EWT Auditorium für die Heizperioden 99/00 und 00/01 sowie für die Kühlperioden 2000 und 2001 (thermische Leistung aus 5 min Mittelwerten berechnet).

Für die Heizperioden 99/00 und 00/01 und für die Kühlperioden 2000 und 2001 sind in Bild 1.14 die thermischen Nutzenergien, die elektrischen Endenergien und die Primärenergien aufgetragen. Die elektrische Nutzenergie für den Ventilator wurde mittels eines Impulszählers ermittelt. Die Primärenergie ist die mit Faktor 3 multiplizierte Nutzenergie und ist die reale Energie, die einschließlich Verlusten aufgewendet werden muss, um die Nutzenergie bereitzustellen. Die thermische Nutzleistung wurde mittels 5 min Mittelwerten bestimmt. Betrachtet man die Energiebilanzen der beiden Heiz- und Kühlperioden, müssen folgende Punkte berücksichtigt werden.

- Bei der Ermittlung der elektrischen Nutzenergie, und somit für die daraus resultierende Primärenergie gab es für die Heizperiode 99/00 und für die Kühlperiode 2000 Datenlücken in der Messwerterfassung. Der benötigte reale Energieaufwand liegt somit höher, als in den Diagrammen angegeben ist. In der Auswertung für die Heizperiode 99/00 konnten die Daten erst ab Dezember 1999 mit einfließen, da die kontinuierliche Messdatenaufnahme erst im Dezember 1999 gestartet wurde. Die großen Unterschiede der thermischen Leistung zwischen den beiden Kühlperioden haben im wesentlichen drei Gründe.
 1. Aufgrund des kurzen kühlen Sommers 2000 war der L-EWT nicht so häufig in Betrieb, wie im Sommer 2001.

2. Zudem war wegen der niedrigen Außentemperaturen das Temperaturgefälle zwischen der Außenluft und der Erdtemperatur, und damit die für die Leistung maßgebliche Temperaturdifferenz zwischen Erdrohr - Ein- und Austritt (bei gleichem Volumenstrom) geringer.
3. hatte das bis November 2000 in der L-EWT Anlage stehende Wasser, aufgrund des untypischen Effektes der Verdunstung, trotz Abkühlung der Luft, einen negativen Einfluss auf die Kühlleistung. Diese wird hier auf Basis von Enthalpien berechnet, es wird also nicht nur die Temperaturabnahme, sondern auch die Zunahme an latenter Wärme berücksichtigt.

Monatliche Energiebilanz des L-EWT Auditorium für zwei Kühlperioden

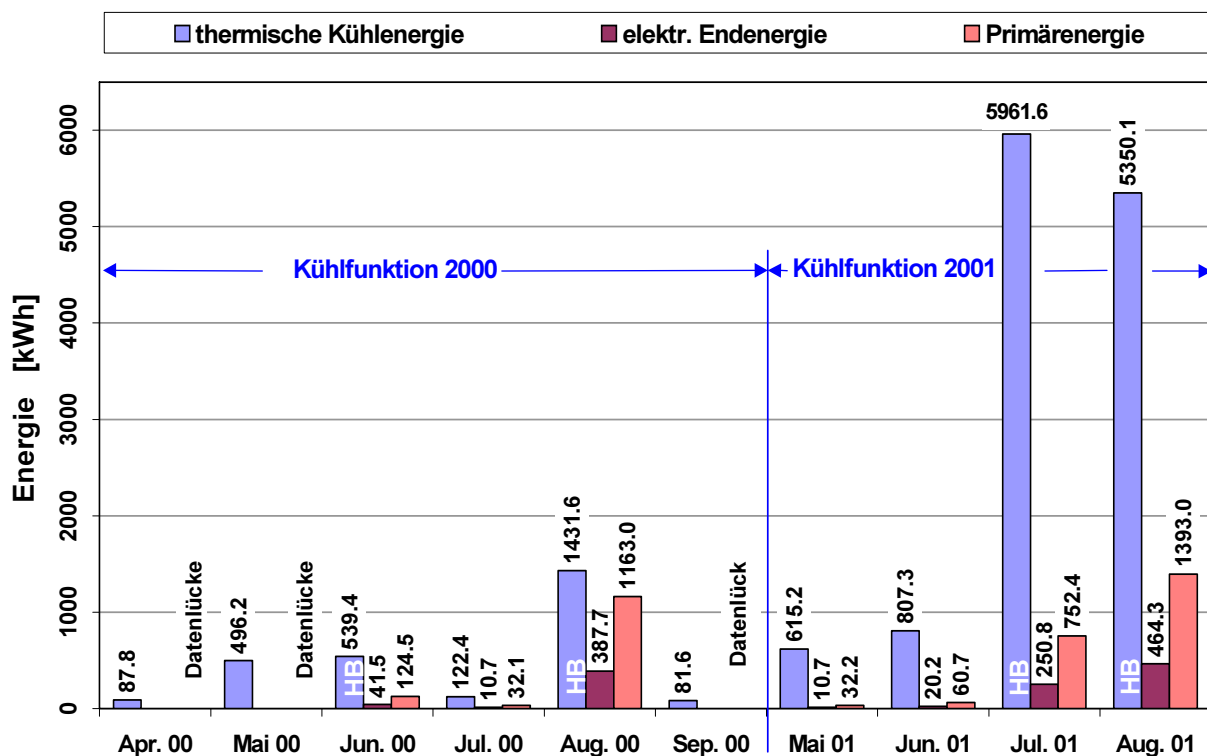


Bild 1.15 Energiebilanzen des L-EWT Auditorium für die Heizperioden 99/00 (Werte ab Nov. 99) und 00/01 und die Kühlperioden 2000 und 2001

Nähere Informationen über die energetischen Verhältnisse der einzelnen Heiz- und Kühlperioden geben die monatlichen Bilanzierungen. Die monatliche Bilanzierung für die Kühlperioden kann dem Balken-Diagramm Bild 1.15, und die monatlichen Energiebilanzen für die Heizperioden aus Bild 1.16 entnommen werden. Die Monate, in denen die Regelung zeitweise deaktiviert wurde und der L-EWT zu Forschungszwecken auf Handbetrieb gefahren, wurde sind durch die Abkürzung *HB* gekennzeichnet. Kam es zu Datenlücken, oder war der L-EWT nicht in Betrieb, sind die entsprechenden Monate mit *Datenlücke* bzw. *n. i. Betrieb* gekennzeichnet.

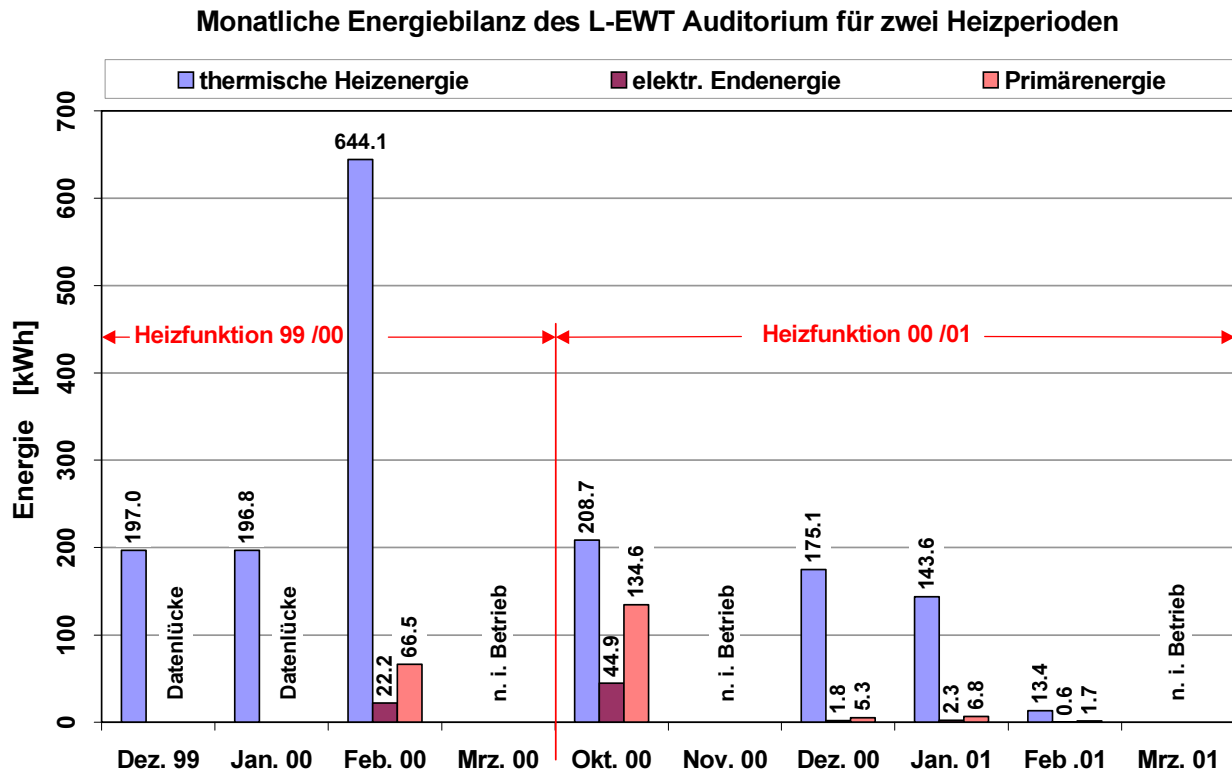


Bild 1.16 Energiebilanzen des L-EWT Auditoriums für die Heizperioden 99/00 (Werte ab Nov. 99) und 00/01 und die Kühlperioden 2000 und 2001.

Die für die thermische Energiebilanz relevanten Größen sind der Volumenstrom, die Ein- und Austrittstemperatur und die Betriebszeit. In den Diagrammen in Bild 1.18 für die zwei betrachteten Heizperioden und in Bild 1.17 für die beiden Kühlperioden spiegeln sich die über einen Monat gemittelten Ein- und Austrittstemperaturen in der Temperaturdifferenz wieder. Das Produkt aus dem mittleren monatlichen Volumenstrom und der Anzahl der monatlichen Betriebsstunden ergibt das durch den L-EWT gesaugte und erwärmte bzw. gekühlte Luftvolumen.

Die Höhe der einzelnen monatlichen Mittelwerte der Ein- und Austrittstemperaturen kann für den Heiz- bzw. Kühlfall aus den Diagrammen Bild 1.21 und Bild 1.19, die Volumenströme und die Anzahl der Betriebsstunden aus den Bild 1.22 und Bild 1.20 entnommen werden. Am folgenden Beispiel werden die Zusammenhänge dieser Größen erklärt.

Betrachtet man die Monate Mai und Juni 2001 in Bild 1.17, so wird deutlich, dass obwohl im Mai eine um 2,5 K höhere mittlere Temperaturdifferenz vorlag, die gewonnene thermische Energie geringer ist (Mai 615 kWh/Monat; Juni 807 kWh/Monat). Im Mai wurde eine mittlere Temperaturdifferenz von 5,9 K erzeugt, und damit ein Volumen von 150000 m³ um diese Temperaturdifferenz gekühlt. Im Juni lag die gemittelte Temperaturdifferenz zwar nur bei 3,4 K, kühlte aber ein wesentlich größeres Volumen von 238000 m³ um diese Differenz.

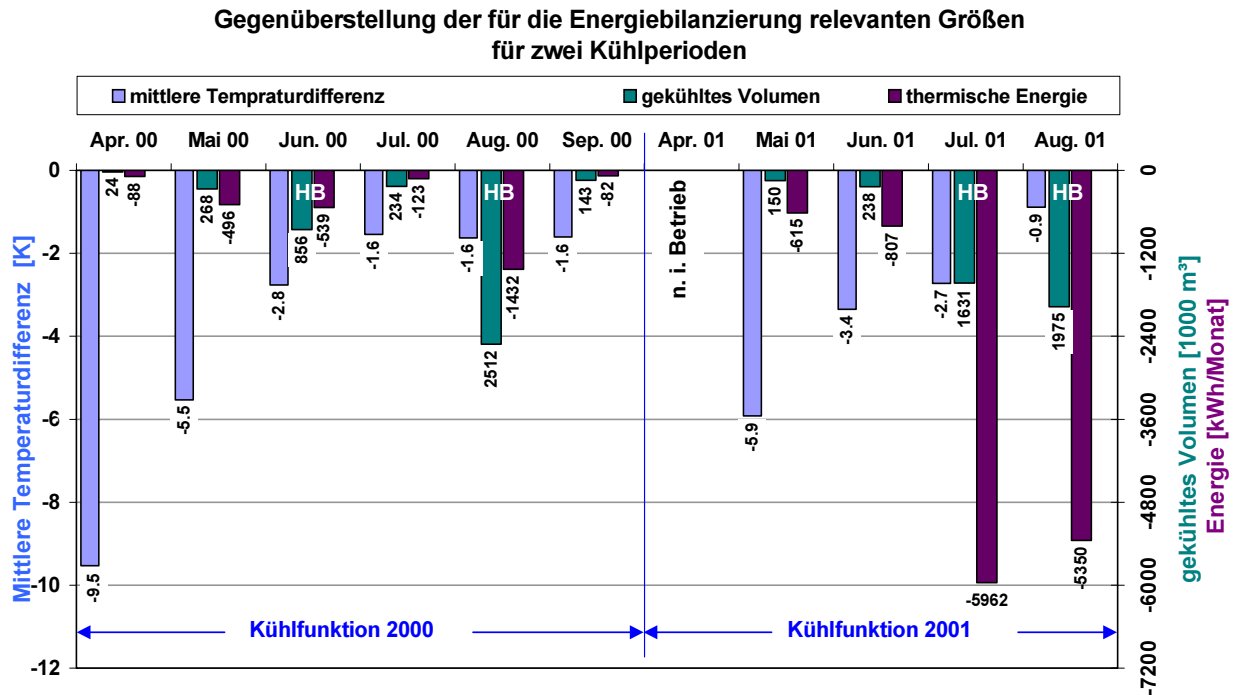


Bild 1.17 Monatliche Gegenüberstellung der für die thermische Energiebilanzierung relevanten Größen für die Heizperiode 99/00 und 00/01

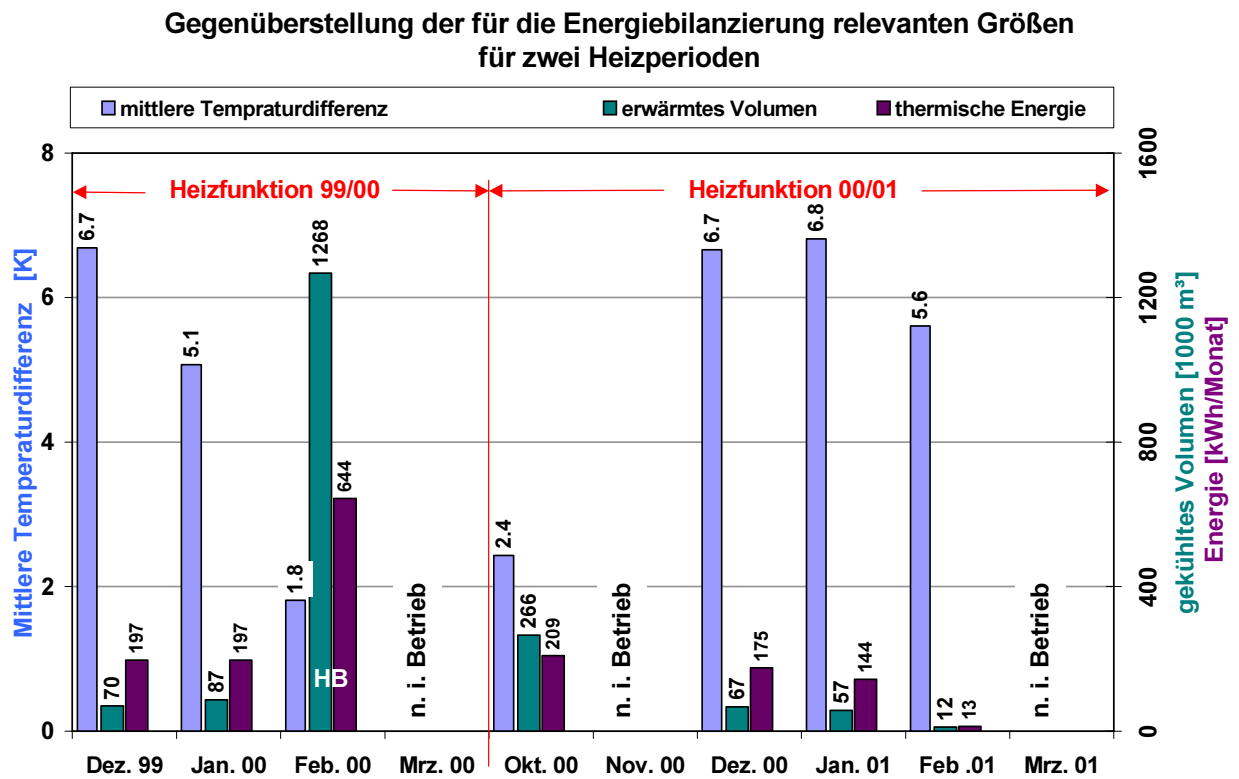


Bild 1.18 Monatliche Gegenüberstellung der für die thermische Energiebilanzierung relevanten Größen für die Heizperiode 99/00 und 00/01

Monatsmittelwerte der L-EWT Ein- und Austrittstemperaturen für zwei Kühlperioden während der Betriebszeit

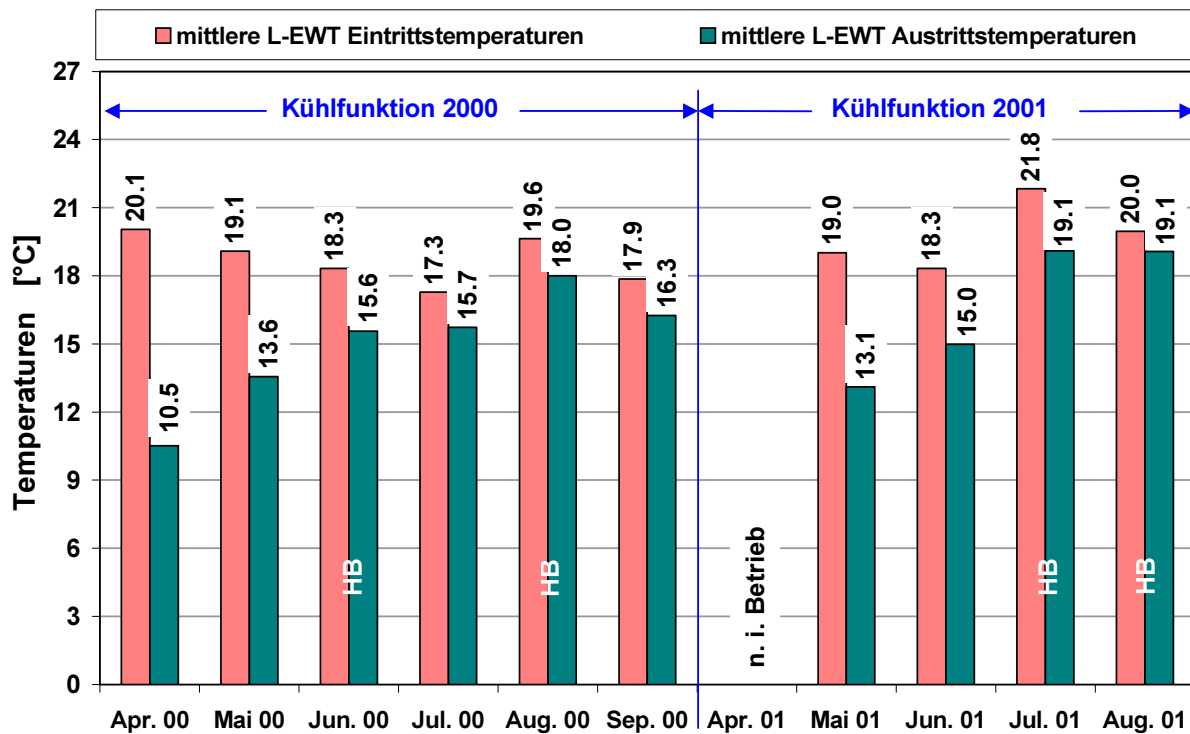


Bild 1.19 Monatsmittelwerte für die Ein- und Austrittstemperaturen des L-EWT Auditorium für die Kühlperioden 2000 und während der Betriebszeit.

Vergleicht man die Werte in Bild 1.17 für die Monate Juni 2000 und Juli 2001, erkennt man, dass bei fast identischen Temperaturdifferenzen im Juli 2001, bei etwa doppeltem Volumen gekühlter Luft, mehr als die 10-fache Energiemenge übertragen wurde, als im Juni 2000. Im Juni 2000 wurde ein großer Teil der Energie zur Verdampfung an das im L-EWT befindliche Wasser abgegeben.

Interessant ist, wie viel der Anteil der trockenen Luft und wie viel der Anteil des in ihr gebundenen Wasserdampfes zur Kühlleistung beiträgt. Betrachtet man die maximale Kühlleistung des L-EWT von 78,4 kW so ist der Anteil von 55,7 kW davon auf den Kondensationsprozess zurückzuführen. Dies entspricht einem Anteil von 71 % an der gesamten Kühlleistung.

Folgende Zahlen geben ein Gefühl für die Größenordnung des anfallenden Kondensats. Im Monat August 2001 wurde ein Volumen von 5,96 Millionen m³ Luft gekühlt. In diesem Zeitraum fielen 7040 Liter Kondensat an. Man darf sich diese Menge jedoch nicht als ein Volumen in einen Behälter vorstellen. Das Kondensat wurde in 197 Betriebsstunden der Luft entzogen; das sind durchschnittliche 35,74 Liter pro Stunde Betriebszeit. Bezieht man dieses Volumen auf die Wärmeübertragungsfläche von 433,3 m² des 138 m langen Erdrohres mit 1 m Durchmesser, so sind dies 0,082 Liter pro Quadratmeter. Dies entspricht weniger als einem Glas Sekt pro Stunde verteilt auf einen Quadratmeter Beton.

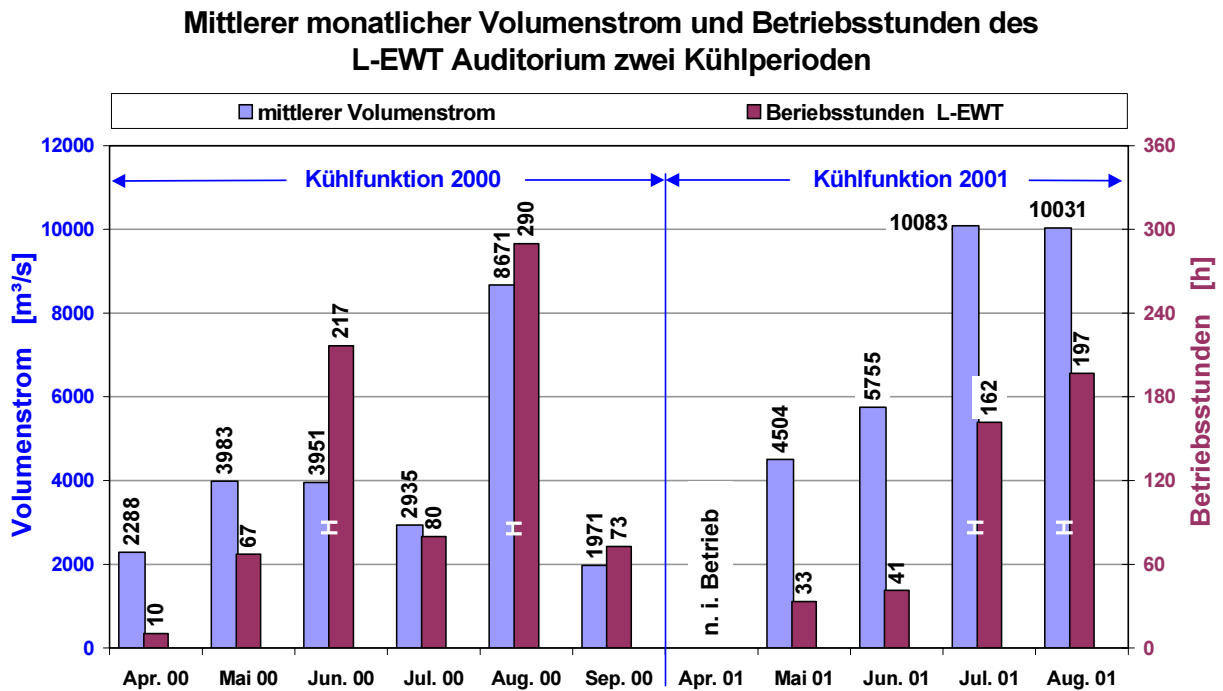


Bild 1.20 Mittlerer monatlicher Volumenstrom und Betriebszeit des L-EWT Auditorium für die Kühlperioden 2000 und 2001 während der Betriebszeit.

Die Tatsache, dass Kondensation stattfindet bedeutet jedoch nicht, dass die Luft am Ende des L-EWT gesättigt mit einer relativen Luftfeuchtigkeit von 100 % austritt. Trifft die warme einströmende Luft auf die kühle Erdrohrwand, kühlt sich die Luft in Wandnähe ab und ein Teil des in ihr gebundenen Wassers kondensiert. Durch die turbulenten Strömungsverhältnisse vermischen sich die an der Rohrwand abgekühlten Luftpartikel wieder mit dem durch das Rohr durchströmenden wärmeren Volumen. Dabei passen sich die von der Wand kommenden Luftpartikel, mit einer auf ihre lokale Temperatur bezogenen relativen Feuchte von 100% wieder an die gesamtthermodynamische Misch-Temperatur, mit ihrer dazugehörigen relativen Misch-Feuchte an. Andere Luftpartikel kühlen sich an der Wand ab, kondensieren Wasser aus, vermischen sich mit der turbulenten Strömung und treten wieder in ein thermodynamisches Gleichgewicht usw.. Folgendes Zahlenbeispiel verdeutlicht, dass nur ein Teil der Luft, die lange genug im Wärmeaustausch mit der Rohrwand stand, in den Kondensationsprozess eingebunden ist.

Nimmt man z.B. die Werte bei denen die maximale Leistung des L-EWT erreicht wurde, so hatte die einströmende Luft eine Temperatur von 26°C bei 61,4 % relativer Feuchte. Dies entspricht einer absolute Feuchte von $13,16 \text{ g}_{\text{Dampf}} / \text{kg}_{\text{Luft, tr}}$. Die Kondensattemperatur, bei der Luft mit der gebundenen Masse Wasserdampf von $13,16 \text{ g}_{\text{Dampf}} / \text{kg}_{\text{Luft, tr}}$ gerade eine relative Luftfeuchte von 100% erreicht und unterhalb der Kondensat auftreten kann, beträgt 18,1°C. Die aus dem Erdrohr ausströmenden Luft hatte eine Temperatur von 20°C und besaß eine relative Feuchte von 52,5%, was einer Masse von $7,2 \text{ g}_{\text{Dampf}} / \text{kg}_{\text{Luft, tr}}$ Wasserdampf entspricht. Die Austrittstemperatur liegt sogar über der Kondensattemperatur der Luft am Rohranfang. Daraus wird ersichtlich, dass Kondensation nur durch lokalen Wärmeaustausch an der Rohrwand stattfindet.

Monatsmittelwerte der L-EWT Ein- und Austrittstemperaturen für zwei Heizperioden während der Betriebszeit

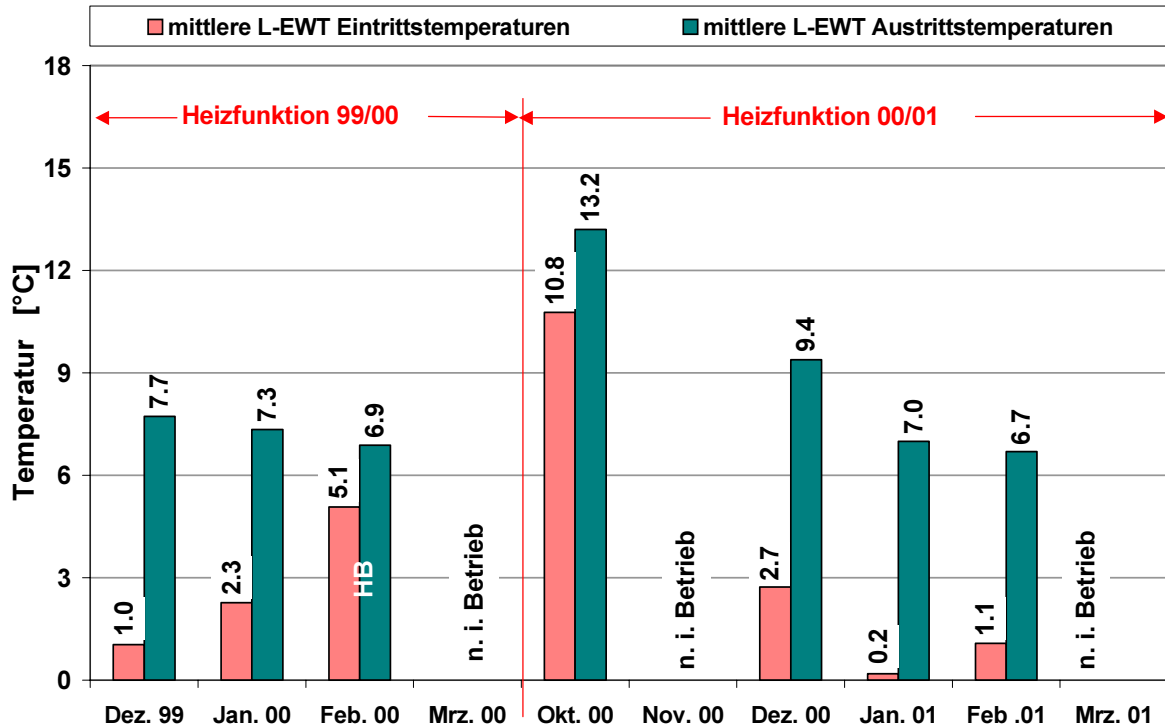


Bild 1.21 Monatsmittelwerte für die Ein- und Austrittstemperaturen des L-EWT Auditorium für die Heizperioden 99/00 (Werte erst ab Dez. 99) und 00/01 während der Betriebszeit

Mittlerer monatlicher Volumenstrom und Betriebsstunden des L-EWT Auditorium für zwei Heizperioden

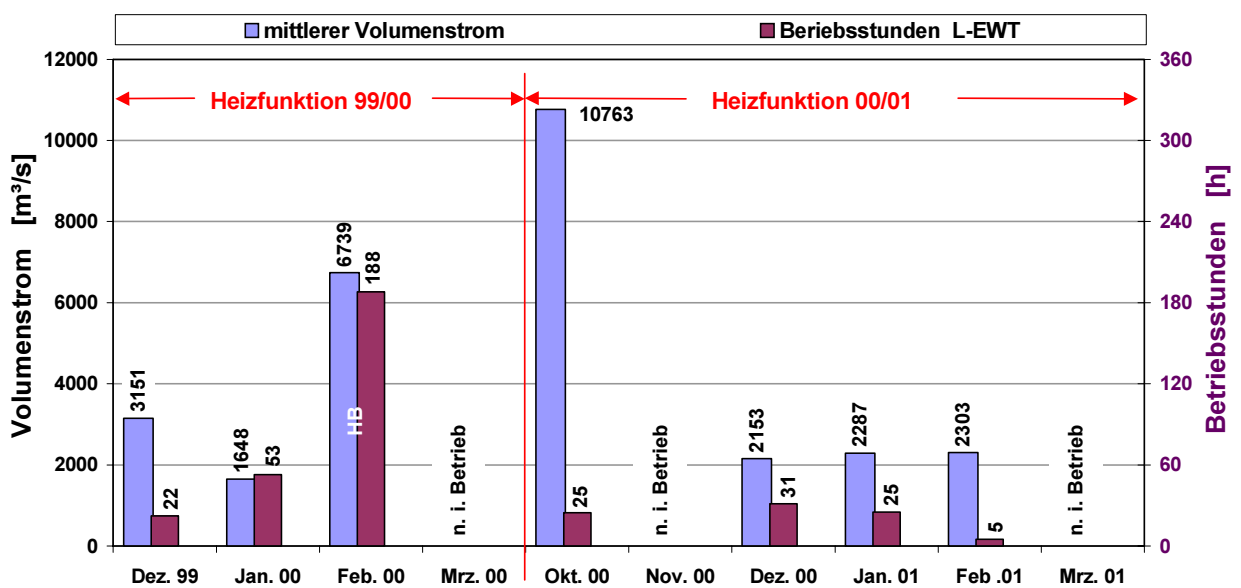


Bild 1.22 Mittlerer monatlicher Volumenstrom und Betriebszeit des L-EWT Auditorium für die Heizperioden 99/00 (Werte erst ab Dez. 99) und 00/01 während der Betriebszeit

Im Heizfall spielt weder die Kondensation noch die Verdampfung eine Rolle. Erwärmt man Luft, kann sie, da warme Luft mehr Feuchtigkeit binden kann als kühle, theoretisch Wasserdampf aufnehmen. Diese Feuchtigkeit müsste jedoch von außen zugeführt werden. Dies ist bei einem korrekt gebauten L-EWT jedoch nicht vorgesehen.

1.6.2 End- und Primärenergie bezogene Arbeitszahlen

Die sich aus der Energiebilanzierung ergebenden, auf End- und Primärenergie bezogenen mittleren Leistungszahlen für die beiden Heiz- und Kühlperioden sind in Tabelle 1.6 zusammengefasst. Als realistische Arbeitszahlen können nur die Werte für die Kühlperiode 2001 und die der Heizperiode 00/01 angesehen werden. Für die Heizperiode 99/00 konnte aufgrund der Datenlücken, für die elektrische Energie (siehe Bild 1.16), nur der Monat Februar ausgewertet werden. In diesem Monat wurde der L-EWT auch zu Forschungszwecken verwendet, d.h. dass er zeitweise im Dauerbetrieb betrieben wurde und nicht der reale Einsatz widerspiegelt wird. Dies wird auch durch die niedrigere mittlere Temperaturdifferenz (siehe Bild 1.18) und aus den, im Vergleich zu den übrigen Wintermonaten wesentlich höhere Betriebsstundenzahl (Bild 1.22) deutlich. Im Sommer 2000 sorgte das in den L-EWT eingedrungene Wasser für untypische Betriebszustände.

Tabelle 1.6 Primär- und Nutzenergiebezogene Leistungszahlen für den L-EWT Auditorium.

Arbeitszahlen	Arbeitszahl bezogen auf	
	Nutzenergie	Primärenergie
HEIZEN 1999 /00: DL	(29,0)	(9,7)
KÜHLEN 2000: K.R.BB	(3,0)	(1,0)
HEIZEN 2000 /01:	10,9	3,65
KÜHLEN 2001:	17,1	5,7

DL: WEGEN DATENLÜCKE FÜR DIE ELEKTRISCHE ENERGIE BERECHNUNG NUR FÜR EINEN MONAT MÖGLICH
 K.R.BB: STEHENDEN WASSERS IN DER L-EWT ANLAGE KEINE REALEN BETRIEBSBEDINGUNGEN → ENERGIE FÜR PHASENUMWANDLUNG WASSER-DAMPF BENÖTIGT.

1.6.3 L-EWT-Wirkungsgrad

Eine weitere Größe, die oftmals zur Beschreibung von L-EWT-Anlagen verwendet wird (siehe u.a. [REISE 2001]), ist der Wirkungsgrad η_{LEWT} , der als

$$\eta_{\text{LEWT}} = \frac{T_{\text{out}} - T_{\text{in}}}{T_{\text{Erd}} - T_{\text{in}}} \quad (\text{Gl. 1.4})$$

definiert ist, wobei T_{Erd} die ungestörte Erdreichtemperatur in der Tiefe der L-EWT-Rohrmitte ist. Aufgrund der Speicherfähigkeit des EWT streuen die Wirkungsgrade auf der Basis von Stundenmittelwerten stark. Hier wurde deshalb ein mittlerer Wirkungsgrad berechnet.

$$\bar{\eta}_{EWT} = \frac{\sum \dot{V} (T_{out} - T_{in})}{\sum \dot{V} (T_{Erd} - T_{in})} \quad (\text{Gl. 1.5})$$

wobei die Summen über Stunden mit Heiz- bzw. Kühlfunktion separat berechnet werden.

Das L-EWT-System des Auditorium erreicht im Sommer einen mittleren Wirkungsgrad von 48 %, im Winter 74 %. Der geringere Wert im Sommer ist dadurch begründet, dass in der Definition von η_{LEWT} nur die Temperaturänderung, aber nicht die Übertragung latenter Wärme berücksichtigt wird. Die Kondensation von Luftfeuchte im Sommer führt zu einer wesentlichen Enthalpie-Abnahme, aber nur zu einer mäßigen Temperaturabnahme der durch den L-EWT geführten Luft.

In [REISE 2001] werden Vergleichswerte von $\eta_{LEWT} = 72$ % für das Projekt Bürohaus Lamparter angegeben, wobei nicht zwischen Heiz- und Kühlfunktion unterschieden wurde und nur Stunden berücksichtigt wurden, in denen mindestens 5 K Temperaturdifferenz erzielt wurde.

1.6.4 Überprüfung der Auslegungsdaten

Ob die Auslegedaten mit den realen Betriebsdaten des L-EWT übereinstimmen, wurde wieder anhand von fünf Minuten Mittelwerten überprüft. Hierfür wurden die maximalen Leistungen und die maximalen Temperaturdifferenzen für den Heiz- und den Kühlfall bestimmt.

In Tabelle 1.7 sind die realen Betriebsdaten (blau), und die Auslegedaten (orange) gegenübergestellt. Betrachtet man den Kühlfall, so ist festzustellen, dass sowohl die Kühlleistung als auch die maximale Temperaturdifferenz größer sind als die für die Auslegung simulierten Werte. Die maximale Kühlleistung wurde um 56,8 % und die maximale Temperaturdifferenz um -5,1 K übertroffen. Dabei ist festzustellen, dass die maximale Temperaturdifferenz im Juni 2000 und die maximale Kühlleistung im August 2001 aufgetreten ist. Dass die tatsächliche maximale Leistung über der für die Auslegung berechneten liegt, hängt u.a. auch von dem oben beschriebenen Einfluss der Kondensation im Kühlfall ab. Dieser Einfluss wurde in den benutzten Auslegertools nicht berücksichtigt.

Die bei der Auslegung ermittelte maximale Temperaturdifferenz im Heizfall betrug 13,7 K. Die Messdaten ergaben eine maximale Temperaturdifferenz von 12,2 K. Für die Leistungsspitze im Heizfall wurde bei der Auslegungsberechnung 55 kW ermittelt, die aus den Messwerten berechnete Leistungsspitze lag bei 20,7 kW. Da die beiden Winter seit Beginn der Messdatenerfassung sehr mild ausgefallen sind, kann zur Zeit jedoch noch kein realistischer Vergleich der Heizleistungen erfolgen.

Tabelle 1.7 Vergleich der aus den Messdaten ermittelten maximalen Leistungen und der maximalen Temperaturdifferenzen zwischen Aus- und Eintrittstemperatur für den L-EWT Auditorium mit den (Messdaten / Auslegungsdaten)

Maximalwerte L-EWT Auditorium	Kühlfall	Heizfall
Maximale Leistung L-EWT [kW]	-68,6* / -50	20,7 / 55 m.W.
Maximale Temperaturdifferenz [K]	-17,3 / -12,2	12,2 / 13,7

* Leistung über 7,5 h gemittelt (14.08.2001)

m.W.: Milde Winter seit Messdatenerfassung → z. Z. noch keine realistische Aussage möglich

1.7 Baumängel des L-EWT „Auditorium“

Beim Bau des Luft-/Erdwärmetauschers für das Auditorium wurden ebenfalls erhöhte Anforderungen an die Bauausführung gestellt (hier Betonrohr als Luftkanal statt Abwasserkanal), die nur nach mehrmaligem Nachbessern erfüllt werden konnten.

Seit Herbst 1999 war bekannt, dass Wasser in das L-EWT-System eindringt. Das Bauamt wurde seitdem mehrmals auf diesen Mangel hin gewiesen und um Gegenmaßnahmen gebeten. Um eventuelle Hygieneprobleme zu vermeiden wurde vom SIJ die Erdrohranlage mehrmals leergepumpt. Bei der Abpumpaktion am 2. Februar 2000 fand von Seiten des SIJ eine Begehung des Erdrohres statt, bei der weitere Mängel zum Vorschein kamen. Die Mängel am Erdkanalsystem wurden fotografisch festgehalten (siehe Bild 1.23 bis Bild 1.32). Zusätzlich wurde eine tabellarische Übersicht der festgestellten Mängel der gesamten Lüftungsanlage des Auditoriums erstellt (siehe Tabelle 1.8) und auf die erforderlichen Gegenmaßnahmen hingewiesen.

Die Dokumentation wurde anschließend in Form eines Mängelberichtes an das staatliche Bauamt weitergeleitet, wobei noch einmal explizit darauf hingewiesen wurde, dass das im L-EWT befindliche Wasser nicht durch aus der Luft kondensierte Feuchtigkeit stammt (Winterperiode), sondern durch Undichtigkeiten eingedrungen ist. Die aufgenommenen Mängel werden im folgenden einzeln näher beschrieben.

Im Kondensatsammelschacht stand das Wasser 0,45 m hoch (siehe Bild 1.23 und Bild 1.24) und im Ventilatorschacht ca. 5 cm (siehe Bild 1.25).



Bild 1.23 Stehendes Wasser im Kondensatsammelschacht



Bild 1.24 Nach dem Abpumpen des Wassers spiegelt der feuchte Rand die Wasserstandshöhe im Kondensatsammelschacht wider

Als wesentliche Ursache für den massiven Wassereintritt im Kondensatwasserschacht wurden die undichten Fugen des Kondensatsammelschachtes selbst (siehe Bild 1.26) und des Revisionschachtes 1 (siehe Bild 1.26) ausgemacht. Im Verbindungsrohr zwischen diesen beiden Schächten waren ebenfalls eindeutige Spuren von geflossenem Wasser zu erkennen (siehe Bild 1.26) zu erkennen. Auch an den Fugen des zweiten Revisionschachtes zeigten sich Spuren vom eingedrungenen Wasser (siehe Bild 1.28). Des Weiteren wurde in vielen Fugen der Rohrsegmente stehendes Wasser festgestellt, zum Teil nur in den Fugen selbst, aber auch in Pfützen wie in Bild 1.29 und Bild 1.31 zu erkennen ist.



Bild 1.25 Stehendes Wasser im Ventilatorschacht



Bild 1.26 Fließspuren an den Fugen im Kondensatwasserschacht

Wie eindeutig aus den Fließspuren in Bild 1.29 zu erkennen ist, stammte das Wasser am Anfang des Erdrohres nicht wie ursprünglich vermutet von den Befestigungen des Messkreuzes. Für deren Befestigung wurde das Rohr nur angebohrt und nicht durchgebohrt.



Bild 1.27 Fließspuren auf dem Boden des ersten Revisionschachtes



Bild 1.28 Wassereindringspuren an den Deckelfugen des zweiten Revisionschachtes



Bild 1.29 Stehendes Wasser in den Fugen zwischen zwei Rohrsegmenten



Bild 1.30 Stehendes Wasser in einer der Schacht-abdeckungen, verursacht durch nachträgliches Auffüllen des Erdreiches



Bild 1.291 Wasser im Verbindungsrohr zwischen Revisionschacht 1 und Kondensatschacht



Bild 1.30 Spalt zwischen Luftfilter und Ansaugschacht durch falsch eingesetztes Filterelement

Testanlagen im Verbundprojekt

In Bild 1.29 ist auch zu erkennen, dass das Wasser nicht vollständig zum Kondensatsammelschacht hin abfließt, sondern dass sich Pfützen bilden. Aus hygienischen Gründen besteht jedoch die Notwendigkeit, dass keine Wasseransammlungen im Rohr auftreten, sondern ein Abfluss in das Kondensatbecken gewährleistet ist. Auf diesen Punkt hatte das SIJ bereits eindeutig in der Planungsphase im Jahr 1997 hingewiesen.

Tabelle 1.8 Auflistung der am L-EWT Auditorium festgestellten Baumängel und vorgeschlagene Gegenmaßnahmen

Mängelliste L-EWT Auditorium			
		Mängel	Gegenmaßnahmen
Ventilatorschacht	Einstiegs Luke	Der alte Deckel war zu schwer und undicht. Der neue Deckel ragt über Schacht hinaus. Es tritt weiter Wasser ein und er ist immer noch viel zu schwer.	Abdichten der Fugen Neue Konstruktion des Deckels (→ Muss von einer Person gut bedienbar sein !).
	Bodenniveau	Bodenniveau ist höher als Eintrittsluke des Ventilatorschachts	Abtragen des Erdreichs.
	Wassereintritt	Wasser im Ventilatorschacht kann zu Sporenbildung führen, die zum Abschalten des L-EWT führen kann (Hygiene).	- Solange der Schacht nicht dicht ist, ist eine regelmäßige Kontrolle und das Abpumpen des eingetretenen Wassers notwendig. - Abdichten des Schachtes.
Luftfilter, Ansaugstutzen	Filterwechsel	Für den Filterwechsel ist ein Gabelstapler erforderlich.	Neue Konstruktion. Ein Filterwechsel muss ohne größeren technischen Aufwand möglich sein.
	Spalt zwischen Filter und Ansaugrohr	Zwischen dem Filter und dem Ansaugrohr besteht ein Spalt (siehe . → Eintrag von Sporen und Verunreinigungen.	Der Filter muss umgehend richtig eingesetzt werden.
Kondensatsammelbecken	massiver Wassereintritt		Abdichten aller Undichtigkeiten des Erdrohres sowie der Fugen der Eintrittsschächte.
	Absaugsumpf	Im Sammelbecken für das Kondenswasser befindet sich kein Pumpensumpf. Dadurch ist ein Abpumpen des Wassers nur bis auf ca. 5 cm möglich (Durchmesser 2 m !!).	Anbringen eines Pumpensumpfes mit entsprechendem Gefälle des Bodens.
Erdrohr		Stehendes Wasser in den Fugen zwischen den Rohrsegmenten und "Pfützenbildung"	- Abdichten der Eintrittsstellen - Erörterung und Umsetzen von Maßnahmen, welche die "Pfützenbildung" verhindern
Schachtabdeckungen	Abflussleitung	Die Abflussleitungen zum Abfließen des Regenwassers sind nicht vorhanden (siehe Bauausschreibung).	Abflussleitung sachgerecht ausführen.
	Bodenniveau	Das Bodenprofil ist so gestaltet, dass das Wasser in die Schachtdeckel fließt.	Änderung des Bodenprofils.

Im Sommer 2000 wurden die Fugen des Ansaugschachtes abgedichtet (siehe Bild 1.33). Diese Maßnahme war jedoch nicht ausreichend um den L-EWT trocken zu legen. Anfang November 2000 sollte deshalb nachträglich der bereits in der Bauausschreibung aufgeführte Pumpensumpf im Kondensatsammelschacht eingebaut und mit einer zusätzliche permanenten Pumpe versehen werden.



Bild 1.313 Ansaugschacht vor den Abdichtungsarbeiten (links) und nach dem Abdichten mit Bitumen (rechts)

Beim Ausgraben des Kondensatsammelschachtes kam zutage, dass der gasdicht verschraubte Deckel und die auf den wasserdichten Schacht aufgesetzten Ausgleichringe nur aufgesetzt, nicht vorschriftsmäßig befestigt und die Fugen nicht abgedichtet waren (siehe Bild 1.34 links und Bild 1.35 links). Die festgestellten Baumängel führten zur Sanierung des ersten und des zweiten Revisionsschachtes. Im November 2000 fanden folgende Überholungsarbeiten statt.

- Auf den Kondensatsammelschacht (Bild 1.34 rechts) und den ersten Revisionsschacht (Bild 1.35 rechts) wurde ein höherer Schachtring aufgesetzt, damit die Schachteinstiege über dem Geländeniveau liegen und sich kein Oberflächenwasser mehr im Schachtdeckel ansammelt (siehe Bild 1.30).
- Die Einstiegsluken des ersten Revisionsschachtes und des Kondensatsammelschachtes wurden vorschriftsmäßig befestigt.
- Die Fugen der Schachtringe und der Einstiegsluke des Kondensatschachts sowie für den ersten und den zweiten Revisionsschacht wurden wasserdicht verfüllt (siehe Bild 1.32 rechts, Bild 1.35 rechts und Tabelle 1.8).
- Es wurde nachträglich ein Pumpensumpf in den Kondensatsammelschacht eingebaut. Hierfür wurde, um die notwendige Tiefe des Pumpensumpf zu erhalten, der Boden des Kondensatschachtes aufgefüllt.
- Es wurde eine Pumpe dauerhaft installiert (siehe Bild 1.37).

- Die Pumpe wurde mit einem permanenten Schlauch versehen, der mittels wasserdichter Manschette aus dem Schacht in eine Sickergrube geführt wurde (siehe Bild 1.32 rechts unten).
- Die Kante der Einstiegs Luke des Ansaugschachtes lag durch nachträglich verlegte Rasensteine unterhalb des Geländeniveaus (siehe Bild 1.38), so dass Oberflächenwasser in den Ansaugschacht gelangen konnte.
- Die Einstiegs Luke wurde erhöht und eine neue Schachtabdeckung angefertigt (Bild 1.39).



Bild 1.32 Kondensatschacht vor (links) und nach (rechts) Behebung der Baumängel



Bild 1.335 Revisionschacht 1 vor (links) und nach (rechts) der Sanierung



Bild 1.346 Abdichtmaßnahme des zweiten Revisionschachtes



Bild 1.35 Nachträglich eingebauter Kondensatsammelschacht mit fest eingebauter Kondensatpumpe



Bild 1.36 Schachtabdeckung unterhalb der Geländekante



Bild 1.39 Neue Schachtabdeckung oberhalb der Geländekante

1.8 Studentenwohnheime (L-EWT im Wohnungsbau)

Zwei Häuser der Zeile 2 der Studentenwohnungen wurden mit einer zentralen Zu- und Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung (WRG) und Nachheizregister ausgestattet. Die Lüftungsanlagen übernehmen die Vortemperierung der beiden Häuser im Winter. Die Beheizung der einzelnen Räume erfolgt durch unterschiedliche Heizkonzepte und sind von der Lüftungsanlage entkoppelt. Die an die Lüftungsanlagen angeschlossenen L-EWT sind für den Dauerbetrieb ausgelegt (unter +4°C und über +22°C Außentemperatur). Anders als bei L-EWT im Gewerbebau ist das entscheidende Kriterium eines L-EWT für Wohngebäude, den Wärmetauscher (WT) der Lüftungsanlage im Winter eisfrei zu halten.

Die beiden L-EWT wurden von dem Aachener Ingenieurbüro INCO mit dem am SIJ entwickelten MS-Excel-Tool ausgelegt. Die Auslegungsdaten können Tabelle 1.9 entnommen werden.



Bild 1.40 Gemeinsamer Ansaugstutzen der beiden L-EWT der Studentenwohnungen

Tabelle 1.9 Technische Daten der L- EWT der Studentenwohnungen Zeile 2.

L-EWT Studentenwohnheimszeile 2			
Typ	Einrohr-Erdreichwärmetauscher		
Material	KG-Rohr		
Verlegetiefe Rohrdurchmesser	2 m (unterhalb Gebäudefundament)		
Länge	40 m		
Durchmesser	DN 250		
max. Durchsatz	380 m³/h		
max. Leistung im Kühlbetrieb⁵⁾	stationär	ca. 1 kW	Leistungszahl 6
max. Leistung im Heizbetrieb	stationär	ca. 1 kW	Leistungszahl 6
max. Antriebsleistung	ca. 0,17 kW (Saugbetrieb)		
max. Druckverlust	ca. 20 Pa		

⁵⁾ Außenlufttemperatur -10°C ; Lufttemperatur am Rohrausgang $+0,1^{\circ}\text{C}$

1.8.1 Regelung der Lüftungsanlagen der Studentenwohnheime mit L-EWT

Die Ansaugung der Außenluft kann wahlweise direkt oder über den L-EWT erfolgen. Die Umschaltung zwischen den beiden Ansaugmöglichkeiten für die Außenluft geschieht über regelbare Steuerklappen und wird über den Außenlufttemperaturfühler gesteuert. Der Ventilator im Zuluftstrang ist so ausgelegt, dass auch bei erhöhtem Druckverlust durch das vorgeschaltete Erdrohr der Volumenstrom den Anforderungen (max. $360\text{m}^3/\text{h}$) entspricht.

Um den Druckverlust gering zu halten, wurden verhältnismäßig große Rohrdurchmesser (DN 250) verwendet. Für die Luftführung im Zuluftstrang stehen zwei verschiedene Wege zur Verfügung (siehe Bild 1.41). In der kalten Jahreszeit wird die kühle Außenluft durch einen mit dem Abluftstrang verbundenen Luft-Luft Wärmetauscher (WT) geführt, wobei Wärme von der warmen Abluft an die kühlere Zuluft übertragen wird. Im Sommerbetrieb wird die Zuluft über einen Bypass am WT vorbeigeführt. Das Umschalten zwischen beiden Zuluftvarianten erfolgt über geregelte Steuerklappen.

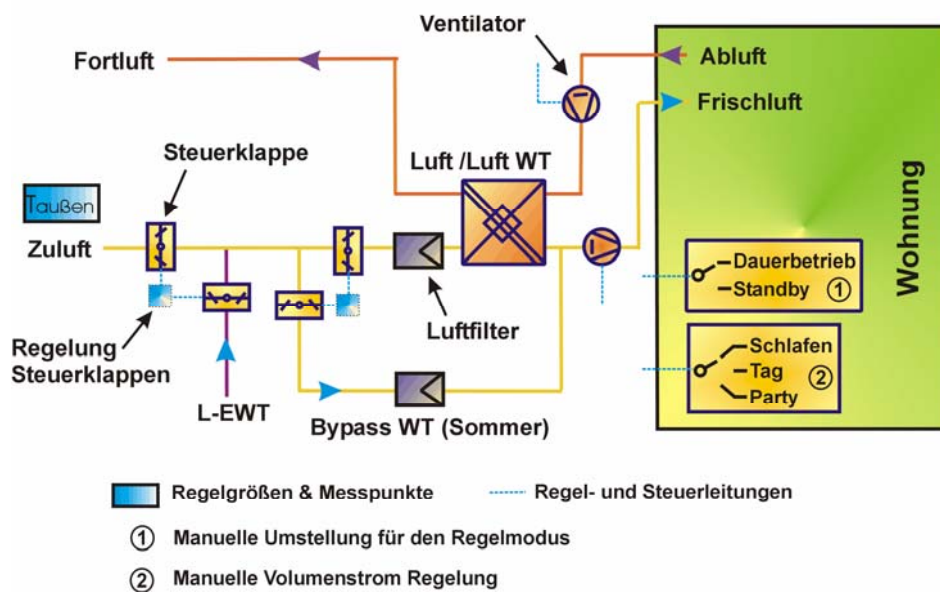


Bild 1.41 Lüftungsschema mit Regelgrößen der zentralen Zu- und Abluftanlagen

Die an die Lüftungsanlagen angeschlossenen Erdreichwärmetauscher sind für den Dauerbetrieb ausgelegt (unter +4°C und über +22°C Außentemperatur). Anders als bei L-EWT im Gewerbebau ist das entscheidende Kriterium eines L-EWT für Wohngebäude, den Wärmetauscher (WT) der Lüftungsanlage im Winter eisfrei zu halten.

Die eingebauten Lüftungsanlagen ermöglichen über den L-EWT einen Kühlbetrieb im Sommer. Ein zentrales Nachheizregister für die Erwärmung der Frischluft ist nicht installiert. Die Temperierung der Räume erfolgt über separate Heizungssysteme. Lediglich in 2 Räumen des Hauses 3 der Zeile 2 ist je ein Luftheizregister eingebaut. Die Luftheizung wird Raumweise über Thermostaten geregelt.

1.8.2 Regelstrategie für Winterbetrieb

Die Betriebszeit und die Höhe des Volumenstroms werden wie oben beschrieben vom Nutzer vorgegeben. Der Regelung steht nur ein Temperaturfühler für die Außenluft zur Verfügung. Liegt die Temperatur der Außenluft unter 22 °C, geht die Regelung auf *Winterbetrieb*. Dies bedeutet, dass die Zuluft nicht mehr über den Bypass, sondern durch den Wärmetauscher (WT) strömt (siehe Bild 1.41).

Sinkt die Außenlufttemperatur unter 4 °C, werden zusätzlich die Steuerklappen von direkter Außenluftansaugung auf L-EWT Betrieb umgestellt. Steigt die Außenluft über den Schwellenwert von 4 °C wird die Außenluft wieder direkt angesaugt. Die Temperatur am Luftaustritt des Erdrohres wurde nicht in die Anlagensteuerung integriert.

Neben der Vorwärmung der kühlen Außenluft hat der L-EWT auch die Aufgabe den Wärmetauscher eisfrei zu halten, um die Wärmerückgewinnung möglichst effizient einzusetzen. Das bedeutet, dass die Austrittstemperatur des L-EWT nicht unter 0 °C sinken darf. Die Überprüfung dieses Grenzwertes ist in der Regelstrategie nicht vorgesehen, wurde aber bei der Auslegung des L-EWT berücksichtigt.

1.8.3 Regelung für Sommerbetrieb

Steigt die Außentemperatur über 22 °C, wird die Außenluftansaugung auf L-EWT Betrieb umgestellt. Gleichzeitig wird die Zuluft durch Umstellung der Steuerklappen über den Bypass am Wärmetauscher (WT) vorbeigeschleust um ein Erwärmen der gekühlten Zuluft durch die evtl. wärmere Abluft aus dem Gebäude zu verhindern. Fällt die Außenlufttemperatur wieder unter 22 °C werden die Steuerklappen von der Regelung auf direkte Außenluftzufuhr zurückgestellt, der Bypass geschlossen und die Zuluft wieder durch den WT geleitet. Um ein kurzzeitiges Hin- und Herschalten der Steuerklappen zu vermeiden, steuert die Regelung mit einer Hysterese von einem Kelvin.

1.8.4 Bilanzierung des L-EWT Studentenwohnheim

Für die Bilanzierung der thermischen Energie wurden die Werte herausgefiltert, die außerhalb der eigentlichen L-EWT Funktion liegen. Dazu gehörte, dass zum Beginn der L-EWT Laufzeit im Sommer zeitweise die einströmende Luft durch den von der Sonne erhitzten Ansaugstutzen erwärmt wurde. Des weiteren wurden alle Zeiträume herausgefiltert, bei denen nur Kriechströme vorlagen. Die Auswertung erfolgte für den Zeitraum Oktober 2000 bis September 2001.

1.8.5 Energetische Auswertung

Die Zentrale der Lüftungsanlage befindet sich im Dachgeschoss der Reihenhäuser. Um das Ende des Erdrohres mit der Lüftungsanlage zu verbinden, führt ein Verbindungsrohr senkrecht vom Erdrohrausgang durch einen im Haus verlaufenden Schacht zum Zuluftstrang im Dachgeschoss. Am Ende dieses Verbindungsstückes im Dachgeschoss befinden sich die Sensoren für die Temperatur am L-EWT-Austritt und deren relativen Feuchte sowie der Sensor zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit.

Die Sensoren zur Erfassung der L-EWT Eintrittstemperatur und deren relativen Feuchte wurden am oberen Ende im Ansaugstutzen angebracht. Da sich der Ansaugstutzen an sonnigen Tagen sehr stark erwärmt und dadurch die Messdaten verfälscht werden, wurden die Daten dieser Sensoren nicht verwendet. Für die angesaugte Außenluft wurden deshalb die Messdaten, Temperatur und relative Feuchte, des Wettermastes verwendet.

Die energetische Bilanzierung erfolgte sowohl für die thermische Energie als auch für die elektrische Energie auf Basis von 5- Minuten -Mittelwerten. Die thermische Nutzleistung wurde hierfür mit Hilfe der Gleichungen aus 1.6.1 ermittelt. Für die Berechnung des Massenstroms mit der temperaturabhängigen Dichte wurden die Messwerte des Temperatursensors am Ende des Verbindungsrohres verwendet.

In Bild 1.372 sind für den Betrachtungszeitraum die thermische Nutzenergie, die elektrische Endenergie und die für die Erzeugung der Endenergie aufgewendete Primärenergie aufgetragen. Die elektrische Nutzenergie für den Ventilator wurde mittels Impulszähler ermittelt. Die Primärenergie ist die mit Faktor 3 multiplizierte Nutzenergie und die reale Energie, die einschließlich Verlusten aufgewendet werden muss, um die Nutzenergie bereitzustellen.

Eine monatliche Aufschlüsselung der Energiebilanzen kann für den L-EWT Haus 2 aus Bild 1.38 und für den L-EWT Haus 3 aus Bild 1.39 entnommen werden. Bei der Interpretation der Daten ist zu berücksichtigen, dass vor allem für den L-EWT von Haus 2 die Messdaten für den Ventilatorstrom lückenhaft waren. Die Zeiten für den Datenausfall sind in den Diagrammen eingetragen. In den Monaten Mai bis Juni bzw. Juli wurden die L-EWT sowohl am kühlen Morgen zur Luftvorwärmung als auch am Nachmittag für die Kühlung der Luft genutzt. In den Diagrammen Bild 1.38 und Bild 1.39 sind in den angegebenen thermischen Energien sowohl die gewonnene Heiz- als auch die gewonnene Kühleenergien enthalten. Die nach der L-EWT Funktion sortierten Werte können für den Heizbetrieb aus Bild 1.40 und für die Kühlfunktion aus Bild 1.41 entnommen werden. In den Diagrammen sind die thermischen Energien der beiden L-EWT Haus 2 und Haus 3 gegenübergestellt.

Es ist zu erkennen, dass i.d.R. sowohl im Heizfall als auch im Kühlfall mit dem L-EWT von Haus 3 deutlich mehr Energie gewonnen wurde.

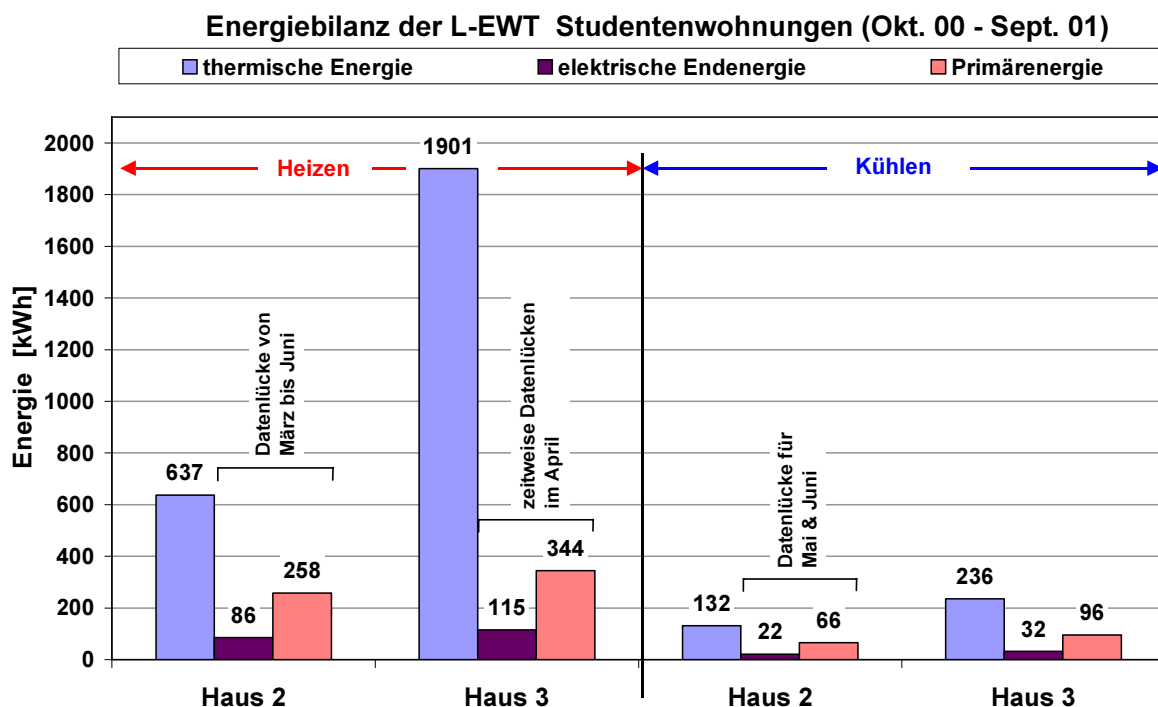


Bild 1.37 Energiebilanzen der L-EWT Studentenwohnungen Haus 2 und Haus 3 für den Zeitraum Oktober 2000 bis September 2001. Die Werte wurden aus 5- Minuten-Mittelwerten ermittelt.

Monatliche Energiebilanz des L-EWT Haus 2 (Okt. 00 - Sept. 01)

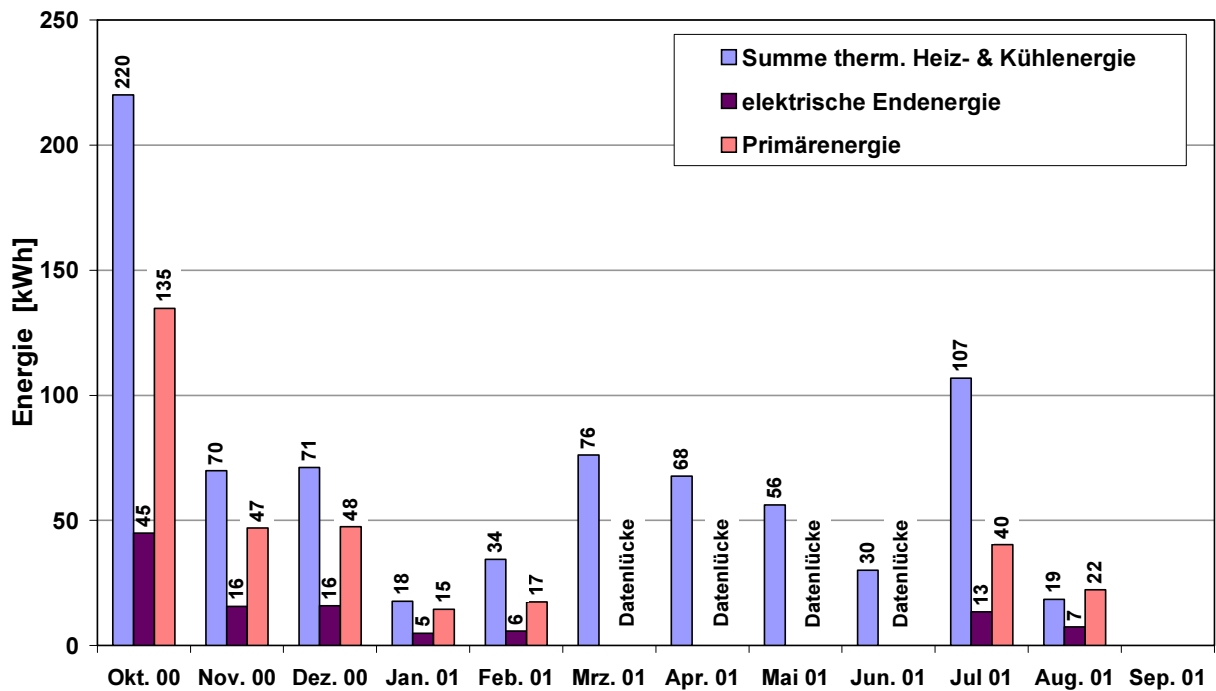


Bild 1.38 Monatliche Energiebilanzen des L-EWT Studentenwohnungen Haus 2 für den Zeitraum Oktober 2000 bis September 2001. Die Werte wurden aus 5- Minuten-Mittelwerten ermittelt

Monatliche Energiebilanz des L-EWT Haus 3 (Okt. 00 - Sept. 01)

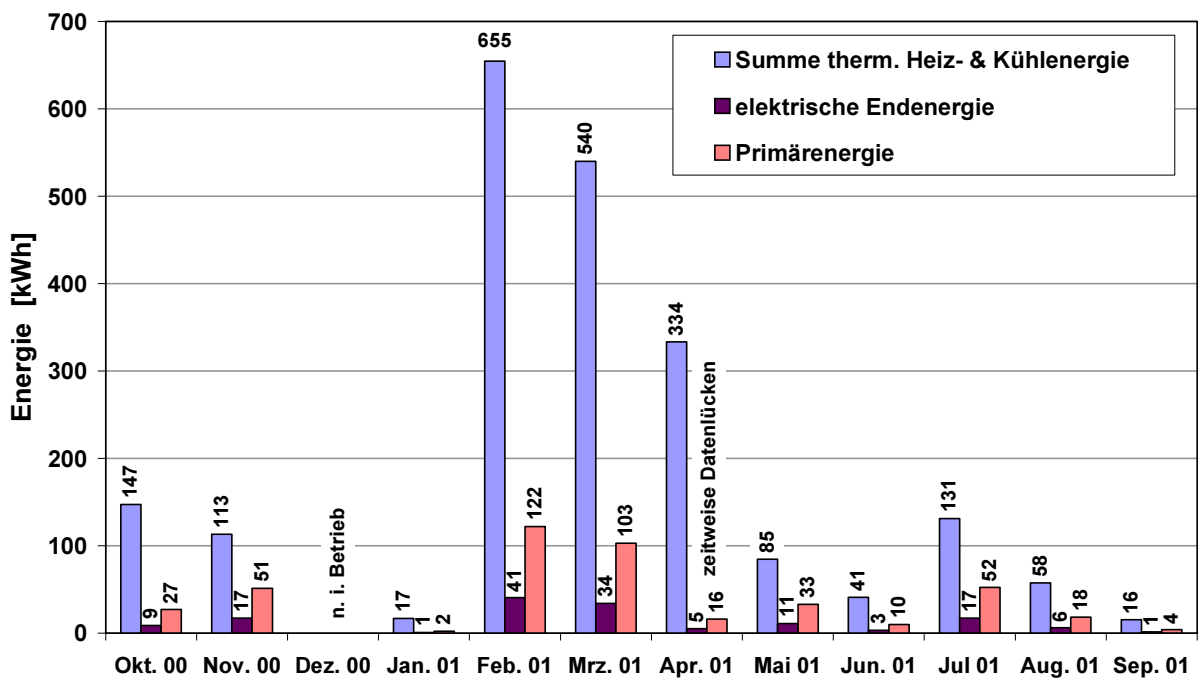


Bild 1.39 Monatliche Energiebilanzen des L-EWT Studentenwohnungen Haus 3 für den Zeitraum Oktober 2000 bis September 2001. Die Werte wurden aus 5- Minuten-Mittelwerten ermittelt

Vergleich der thermischen Heizenergie der L-EWT Studentenwohnungen Haus 2 und Haus 3 (Okt. 00 - Sept. 01)

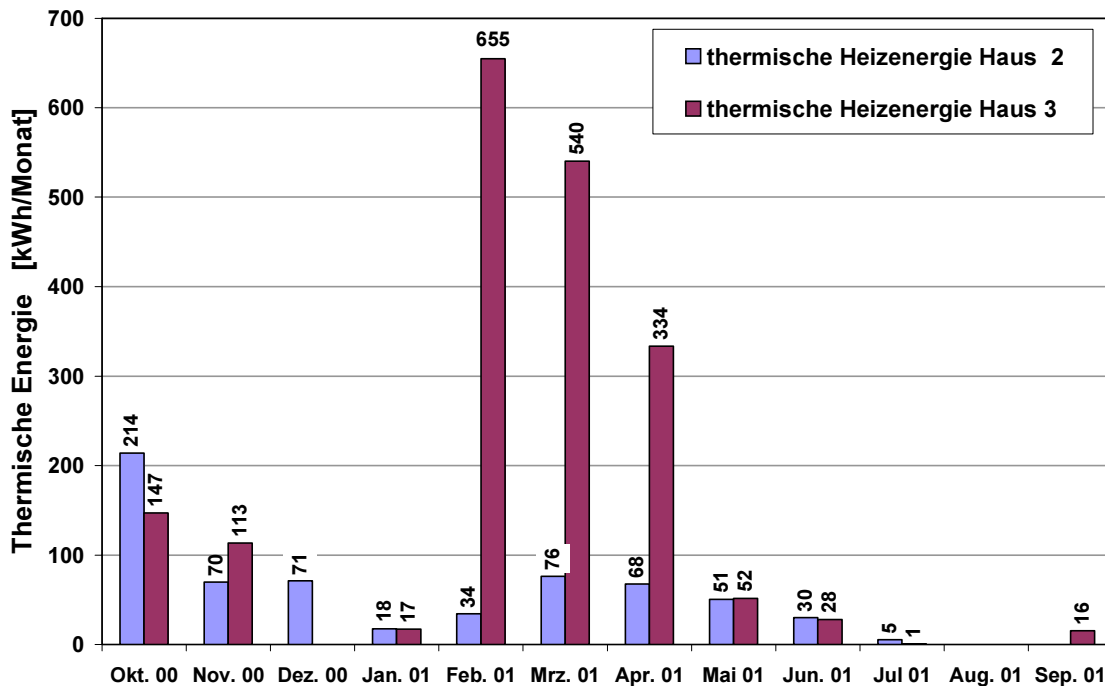


Bild 1.405 Vergleich der thermischen Heizenergie der L-EWT Studentenwohnungen Haus 2 & Haus 3 für den Zeitraum Oktober 2000 bis September 2001. Die Werte wurden aus 5- Minuten-Mittelwerten ermittelt

Vergleich der thermischen Kühlenergie der L-EWT Studentenwohnungen Haus 2 und Haus 3 (Okt. 00 - Sept. 01)

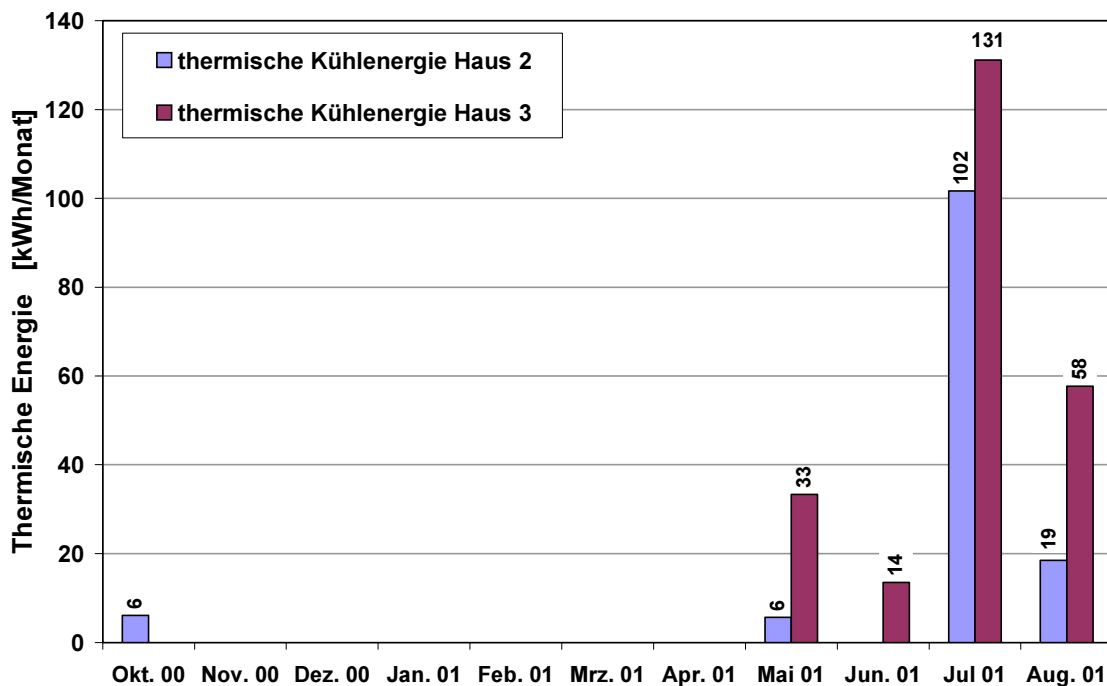


Bild 1.41 Vergleich der thermischen Kühlenergie der L-EWT Studentenwohnungen Haus 2 & Haus 3 für den Zeitraum Oktober 2000 bis September 2001. Die Werte wurden aus 5- Minuten-Mittelwerten ermittelt.

Vergleich des durch die L-EWT von Haus 2 und von Haus 3 erwärmten Volumens

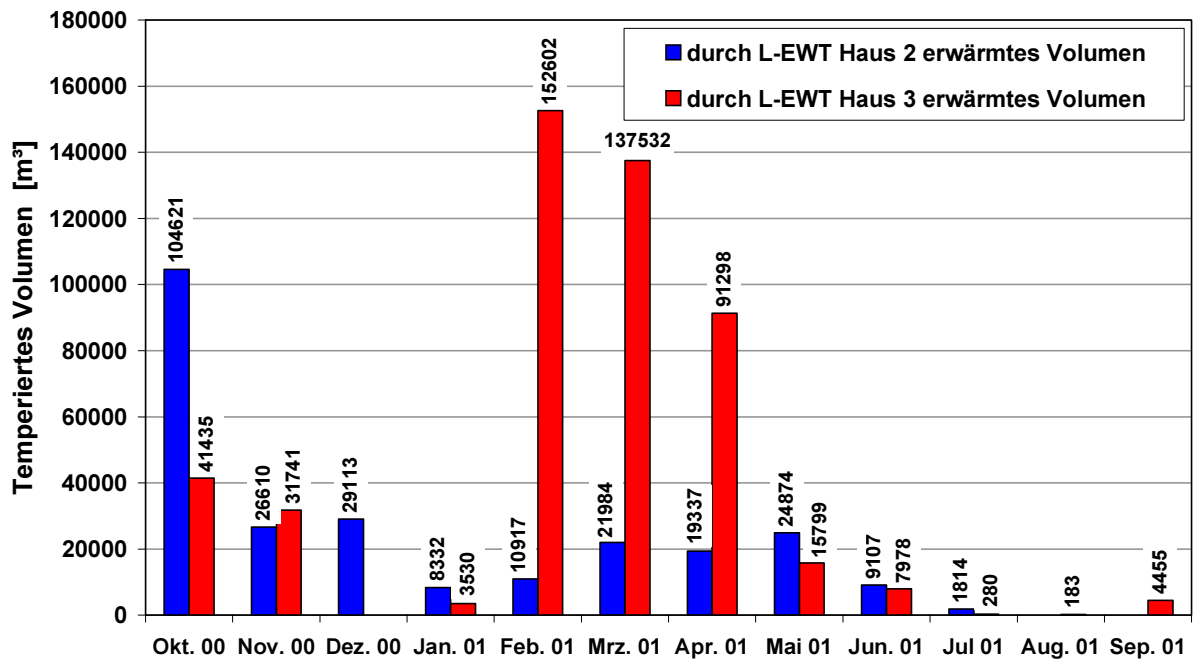


Bild 1.42 Vergleich der mit den L-EWT Studentenwohnungen Haus 2 & Haus 3 erwärmten Volumens für den Zeitraum Oktober 2000 bis September 2001. Die Werte wurden aus 5- Minuten-Mittelwerten ermittelt

Vergleich des durch die L-EWT von Haus 2 und von Haus 3 gekühlten Volumens

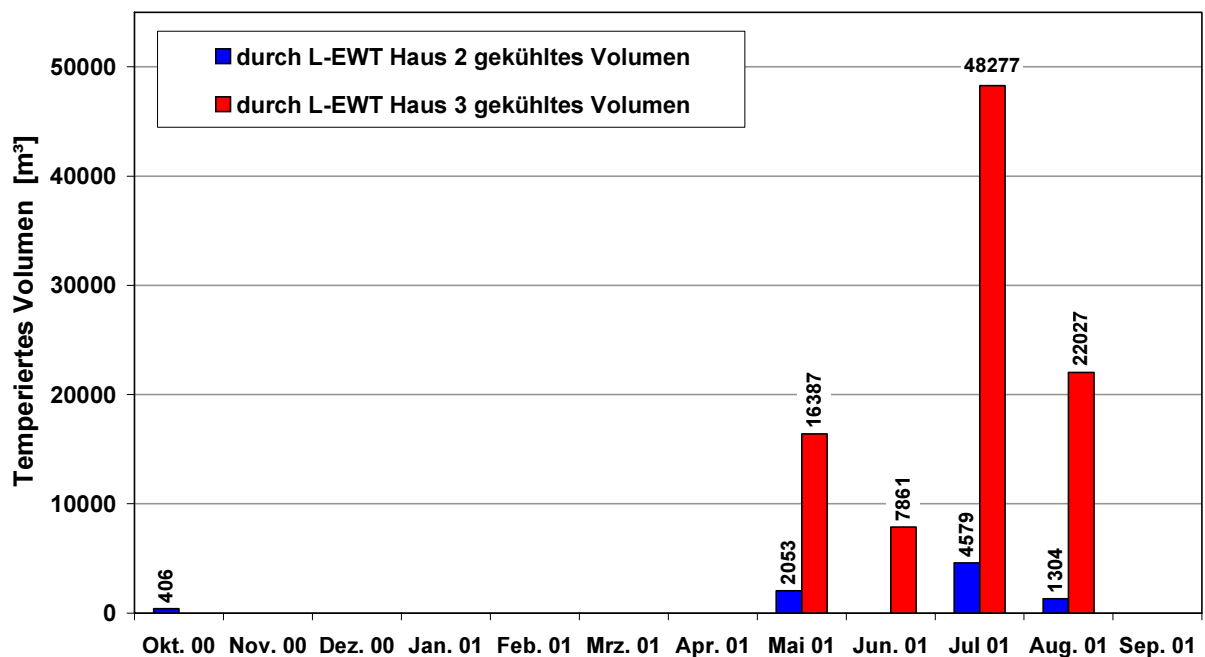


Bild 1.438 Vergleich der mit den L-EWT Studentenwohnungen Haus 2 & Haus 3 gekühltem Volumen für den Zeitraum Oktober 2000 bis September 2001. Die Werte wurden aus 5- Minuten-Mittelwerten ermittelt

1.8.6 End- und Primärenergiebezogene Arbeitszahlen

Tabelle 1.10 Primär- und Nutzenergiebezogene Arbeitszahlen für die L-EWT der Studentenwohnungen

Arbeitszahlen	Arbeitszahlen bezogen auf			
	Endenergie		Primärenergie	
	Haus 2	Haus 3	Haus 2	Haus 3
Heizen	4,8	14,3	1,6	4,8
Kühlen	5,8	7,4	1,9	2,5

1.8.7 Überprüfung der Auslegungsdaten

Tabelle 1.11 Vergleich der aus den Messdaten ermittelten maximalen Leistungen und der maximalen Temperaturdifferenzen zwischen Aus- und Eintrittstemperatur für die L-EWT der Studentenwohnungen mit den (Messdaten / Auslegungsdaten)

Maximalwerte L-EWT Studentenwohnungen	Kühlfall		Heizfall	
	Haus 2	Haus 3	Haus 2	Haus 3
Maximale Leistung L-EWT [kW]	-1,63 / -1	-1,56 / -1	1,39 / 1 m.W.	2,01 / 1
Maximale Temperaturdifferenz [K]	-17,3 /		12,2 /	

m.W.: Milde Winter seit Messdatenerfassung → z. Z. noch keine realistische Aussage möglich

1.8.8 Baumängel des L-EWT Studentenwohnheime

Die Erdrohre des L-EWT wurden, trotz wiederholter Hinweisen diese sauber zu halten, während der Bauzeit verschmutzt. Ein Durchspülen der Erdrohre im Herbst 1999 brachte nicht den gewünschten Erfolg. Eine Bürstenreinigung der Rohre wurde zwar von der für die Verschmutzung verantwortlichen Firma im Frühjahr 2000 zugesagt, jedoch trotz mehrerer Mahnungen nicht durchgeführt. Da es sich um festgesetzten Verunreinigungen handelte, gab das Studentenwerk den L-EWT, ohne weitere Reinigung, im November 2001 für den Betrieb frei.

Für die L-EWT der Studentenwohnungen befindet sich der Kondensatsammelschacht unterhalb des gemeinsamen Ansaugschachtes. Der Abfluss des Kondensatwassers erfolgte in ein Drainagerohr. In dieses Drainagerohr mündeten auch die Abläufe der Regenrinnen der fünf Reihenhäuser der Studentenwohnungen. Da das Regenwasser aufgrund des lehmhaltigen Bodens nicht richtig ablaufen konnte, drückte sich das im Drainagerohr aufgestaute Regenwasser über den Kondensatablauf in den Kondensatschacht des L-EWT. Um dies zu verhindern, wurde im Herbst 1999 der Kondensatabfluss abgedichtet. Um das Kondensat trotzdem abführen zu können, war der nachträgliche Einbau einer permanenten Pumpe geplant. Da dies bauliche Veränderungen am Schacht erfordert, sollte diese Maßnahme, um die Baufirma nicht aus der Gewährleistungspflicht zu nehmen, erst nach der ordnungs-gemäßen Reinigung der Erdrohre durchgeführt werden. Die Kondensatpumpe wurde bis zum heutigen Datum noch nicht installiert.

1.9 Zusammenfassung

Die Auslegung der drei Luft- /Erdwärmetauscher (L-EWT) erfolgte mit zwei Ansätzen. Dem statischen Ansatz nach Albers und, um eine kurzzeitige Dynamik (24 h) berechnen zu können, mit einem am SIJ entwickelten erweiterten dynamischen Ansatz. Die Berechnung nach beiden Varianten wurde in einem Tabellenblatt in MS-Excel durchgeführt. Im Laufe der Arbeiten wurde deutlich, dass die komplexen dynamischen Vorgänge des Erdreichs mit statischen Modellen nur unzureichend abzubilden sind. Auf die Erstellung einer Auslegungssoftware nach dem Ansatz von Albers wurde verzichtet und die Entwicklung eines dynamischen, numerischen Modells bevorzugt.

Seit Inbetriebnahme des L-EWT des Auditorium im Herbst 1999 drang Wasser in die L-EWT Anlage ein. Erst nach langem Drängen wurden die Baumängel des L-EWT Systems im November 2000 durch Abdichten der Revisionsschächte behoben. Das im L-EWT stehende Wasser führte zu untypischen Betriebszuständen, wie Verdampfungsvorgängen im Kühlfall und hatte deutliche Leistungseinbußen zur Folge. Realistische energetische Aussagen sind daher erst für die Zeit nach der Trockenlegung des L-EWT Systems möglich.

Die Bilanzierung des L-EWT des Auditorium ergab eine Nutzenergie /Primärenergie bezogene Arbeitszahl für den Kühlfall von 17,1 /5,7 und für die Heizperiode von 10,9 /3,65. Die maximale Kühlleistung des L-EWT Auditorium betrug 78,4 kW, die maximale Heizleistung 20,7 kW. Damit lag die Kühlleistung um 56,8% über der für die Auslegung ermittelten maximalen Kühlleistung von 50 kW. Die berechnete maximale Heizleistung von 55 kW konnte in den zwei vermessenen Heizperioden nicht erreicht werden, weil die Außentemperaturen nicht auf die entsprechend niedrigen Temperaturen sanken. Eine realistische Aussage über die maximale Heizleistung der gebauten Anlage ist aufgrund der milden Winter in den vergangenen zwei Messperioden noch nicht möglich. Die maximale Temperaturspreizung in der Kühlperiode betrug -17,3 K, die in der Heizperiode 12,2 K. Die angegebenen Spitzenleistungen unterscheiden sich stärker als die Temperaturdifferenzen. Ursache hierfür ist der, bezüglich des Auslegungsvolumenstroms, geringere Volumenstrom während der Betriebszeit des L-EWT.

Die Regelstrategien der Lüftungsanlagen und des L-EWT Auditorium wurden anhand der Messdaten überprüft und optimiert. Die Behaglichkeitskriterien in den beiden Seminarräumen konnten zwar bis auf wenige Stunden im Jahr eingehalten werden, unter energetischen Gesichtspunkten bestand jedoch sowohl bei der Regelstrategie des L-EWT als auch bei der Regelung der Lüftungsanlagen Optimierungsbedarf. Die wichtigste Änderung in der Regelung für den L-EWT Auditorium im November 2000 war das Hinzufügen eines Abschaltkriteriums, um nur energetisch sinnvolle Betriebszeiten zu gewährleisten. Anfang November 2001 wurden zur Verkürzung der Betriebszeiten der Lüftungsanlagen die bereits in den Seminarräumen installierten Temperatur- und CO₂-Sensoren besser in die Regelung integriert und die vom Sensor der Lüftungsanlage zu hoch gemessene Außenlufttemperatur durch ein Offset von ca. 3K korrigiert.

1.9.1 Literaturverzeichnis

- [ALBERS 1991] Albers, K. J.: Untersuchung zur Auslegung von Erdwärmetauschern für die Konditionierung der Zuluft für Wohngebäude; Dissertation; Universität Dortmund; 1991
- [KRELL 1996] Krellmann, H. u. Belz, S.: Auslegung und Untersuchung eines Erdreichregisters für die Lüftungsanlage des Neubaus „Solar-Institut Jülich“; Diplomarbeit; Solar-Institut Jülich, Fh_Aachen;1996
- [REISE 2001] Reise, Blümel, Fink: Handbuch zur Planung und Ausführung von luftdurchströmten Erdreichwärmetauschern für Heiz- und Kühlanwendungen, Erstellt im Rahmen eines EU-Projektes, 2001/2002
- [DIN 1946-2] VDI DIN 1946 Teil 2, Raumluftechnik, Gesundheitstechnische Anforderungen

2 Versuchsanlage DLR Köln

2.1 Aufbau der L-EWT-Versuchsanlage Köln

Die Einrichtung Solare Energietechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. in Köln-Wahn, wurde 1991 von der Landesregierung Nordrhein-Westfalens damit beauftragt, eine spezielle optische Versuchsanlage zu planen, zu bauen und für Wissenschaftler der Bereiche „Solare Chemie und Solare Materialforschung“ zu betreiben. Diese komplexe Anlage wurde am 21. Juni 1994¹ in Betrieb genommen. Neben der Versuchsanlage gehört das Laborgebäude, in dem sich Laboratorien, Versuchs- und Arbeitsräume befinden, zu den weiteren wesentlichen Bestandteilen des Gesamtsystems.

Bild 2.1

Außentestfeld mit dem Niedrigenergielabor im Vordergrund



Das Gebäude mit einer Nutzfläche von 240 m² wurde im Niedrigenergiestandard konzipiert, um die Möglichkeiten und Grenzen zur Reduzierung des Energiebedarfs an Betriebsbauten zu untersuchen.

Der Grund dafür ist, dass sich die Stoff- und Energieströme deutlich von denen, wie sie im Wohnbereich vorkommen, unterscheiden können und andere Ansatzpunkte zur Reduzierung der Energieumsätze an Gebäuden erfordern. Neben den bekannten passiven Maßnahmen, bildet der Luft-Erdwärmetauscher (L-EWT) das zentrale aktive Element zur Raumlufttemperierung. Von besonderem Interesse ist hierbei die Wirkung des L-EWT auf die sommerliche Raumkühlung wegen der hohen Zahl innerer Quellen (Personen, Computer, betriebstechnische Anlagen, thermische Prozesse). Das Gebäude und der L-EWT wurden fünf Jahre im Auftrag des Forschungsministeriums NRW, im Rahmen des Projektes „**Energetische Diagnose von Gebäuden**“ [Schulze-Kegel], zusammen in einem Netzwerk von 13 weiteren Gebäuden in Nordrhein-Westfalen, intensiv vermessen. Die Ergebnisse dieses Ursprungsprojektes können unter www.uni-siegen.de nachgelesen werden.

¹ zur Sommersonnenwende

2.2 Messtechnisches Gesamtkonzept

Die Messwertaufnahme begann im Frühjahr 1995 und wurde als Bestandteil der zweiten Phase (1996-1998) des Projektes *Bau und messtechnische Untersuchung eines Laborgebäudes als Niedrigenergiehaus* [Dibowski I] des Schwerpunktes Niedrigenergie- und Solararchitektur, der AG Solar NRW (mit dem Förderkennzeichen 25300691) fortgesetzt. Ein zusätzlicher Nutzen ist die messtechnische Ankopplung der Lüftungstechnik des Niedrigenergiegebäudes durch das o.a. Ursprungsprojekt, wodurch die Wirkung des L-EWT unter realen Bedingungen bewerten werden kann. Einen Überblick über die messtechnische Gesamtkonfiguration zeigt Bild 2.2:

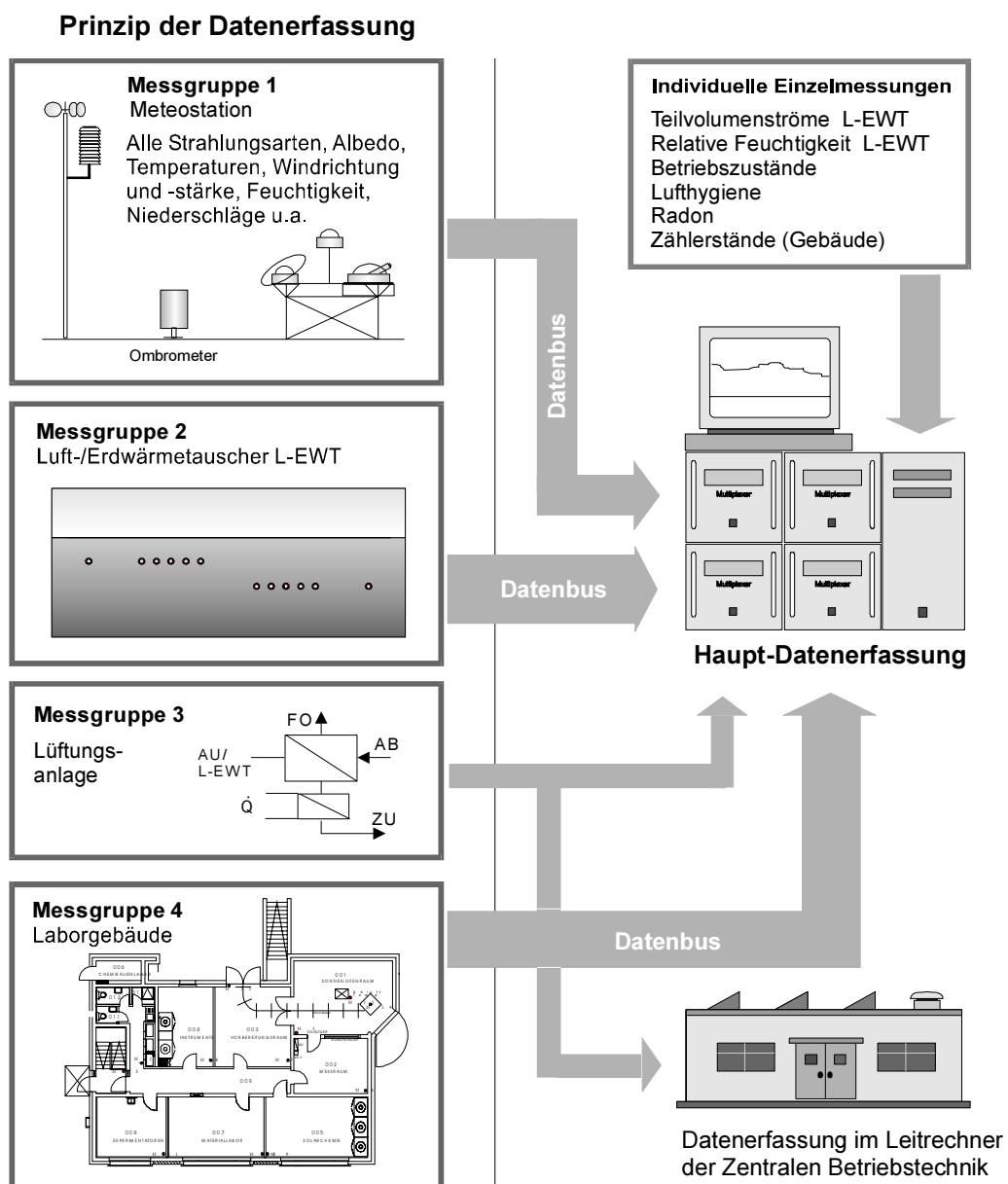


Bild 2.2 Grundstruktur der Datenerfassung des Gesamtprojektes *Energetische Diagnose von Gebäuden*

Zur Ermittlung des grundsätzlichen Systemverhaltens von L-EWT und zur Entwicklung von technischen und ökonomischen Optimierungsempfehlungen wurden umfangreiche Messdatenbestände herangezogen. Insbesondere sind dabei die aufgeführten Fragestellungen von Interesse.

Tabelle 2.1 Messtechnische Ziele für die Bewertung des prinzipiellen Systemverhaltens von L-EWT

	Kontinuierliche Messung der ungestörten Bodentemperaturen als Funktion der äußeren meteorologischen (gemessenen) Bedingungen
	Messtechnische Bestimmung der mechanischen und thermischen Bodenstoffwerte
	Leistungs- und Ertragsbestimmung (sensibel und latent), Gesamtsystem und Einzelrohre
	Einfluss der unterschiedlichen Verlegetiefen auf das Betriebsverhalten
	Systemvergleich Einzelrohr zu Register in unterschiedlichen Verlegetiefen
	Ermüdungs- und Regenerationsverhalten des Erdreichs
	Bestimmung der Tauwasser- und Latentwärmemengen
	Lufthygienische Messungen
	Betriebsbeobachtung unter realen Nutzungsbedingungen bzw. Lastprofilen
	Bestimmung des Einflusses des L-EWT auf die Rückwärmezahl θ einer nachgeschalteten Wärmerückgewinnungseinheit (WRG)
	Effektive Raumtemperaturänderung durch den L-EWT-Betrieb
	Effektive Raumfeuchteveränderung durch den L-EWT-Betrieb im Sommer
	Ermittlung eines konsistenten Datenbestandes zur Validierung eines zu entwickelnden Simulationsprogramms

Die exakte Vermessung eines L-EWT setzt die Kenntnis der entscheidenden Randbedingungen voraus, die zu bestimmten Betriebsergebnissen führen. Dies sind, als wesentliche Grundlage in diesem Fall, die meteorologischen Verhältnisse am Messort. Die in dieser Arbeit wesentlichen Sensoren der Wetterstation werden nachfolgend kurz beschrieben.

2.2.1 Aufbau der Wetterstation

Innerhalb dieser Arbeit werden die meteorologischen Daten folgender Sensoren der Wetterstation herangezogen (Details in <http://opus.uni-kassel.de/opus/volltexte/2003/67>):

Tabelle 2.2 Eingesetzte Sensoren der Wetterstation für die L-EWT-Vermessung

Physikalische Messgröße	Messinstrument	Physikalische Messgröße	Messinstrument
Umgebungstemperatur	Thermogeber	Solare Flächenreflektion (Albedo)	Pyranometer
Relative Feuchte, außen	Haar-Hygrometer		
Solare Direktstrahlung	Pyrheliometer	Windrichtung	Windfahne
Globalstrahlung (horizontal)	Pyranometer	Windgeschwindigkeit	Anemometer
Solare Diffusstrahlung (horiz.)	Pyranometer	Niederschlagsmenge	Ombrometer

Die Daten der Wetterstation werden seit Frühsommer 1995 auf einem separaten Datenlogger alle fünf Minuten aufgezeichnet, auf Plausibilität geprüft und voraufbereitet.

2.3 Konfiguration und Messaufbau der L-EWT-Versuchsanlage

Zu Beginn der Planung in 1993 war ein L-EWT als Lüftungstechnische Komponente in Fachkreisen nahezu unbekannt. Es gab zu diesem Zeitpunkt nur wenig Literaturstellen mit Hinweisen zur Auslegung, wie z.B. in [Otto, Hauser] für das LEO in Köln, [Albers], [Sedlbauer] und [Labs I], keine betriebstechnischen Erfahrungen und auch keine Messwerte. Für den L-EWT sollte daher eine Anlagenkonfiguration und ein Messkonzept gefunden werden, aus dem der größtmögliche Nutzen zur Ermittlung des grundsätzlichen Betriebsverhaltens von L-EWT abzuleiten war.

Der L-EWT wurde in der Zeit von Anfang Januar bis Ende März 1995 installiert. Die Fläche, in dem sich der L-EWT befindet, liegt nördlich des zu kühlenden Gebäudes. Es handelt sich um eine ca. 900 m² große freie Fläche, die im Jahresmittel nahezu unbeschattet von der Sonne bestrahlt wird. Das Geländeoberflächenniveau liegt zwischen 65 - 70 über NN.

Die nicht versiegelte Oberfläche besteht aus Erdreich und Gräsern, so dass der Einfluss von Niederschlägen und deren Auswirkung auf die Erdfeuchte nicht zu vernachlässigen ist. Zur Ermittlung der Baugrundverhältnisse wurde im Bereich des Bauvorhabens ein Schurf nach DIN 4021 mit einer Tiefe von 3m abgeteuft. Gemäß der Geologischen Karte M 1:100.000, Blatt C 5106 Köln stehen im anthropogenen unbeeinflussten Untersuchungsgebiet pleistozäne Sande und Kiese der unteren Mittelterrasse des Rheins an. Die hydrogeologischen Verhältnisse im engeren und weiteren Untersuchungsgebiet werden im oberen Grundwasserstockwerk vom Rhein als Vorfluter geprägt. Das Grundwasser fließt in den sehr gut durchlässigen Lockersedimenten der Mittelterrasse in westlicher Richtung zum Rhein als Vorfluter ab. Die Sande und Kiese der pleistozänen Mittelterrasse sind mit k_f -Werten (Durchlässigkeitsbeiwerten) von 3 bis $8 \cdot 10^{-3}$ m/s sehr gut durchlässig

2.3.1 Ergebnisse der Bodenuntersuchungen

Zur Ermittlung der Baugrundverhältnisse wurde im Bereich des Bauvorhabens ein Schurf nach DIN 4021 mit einer Tiefe von 3m abgeteuft. Die Schurfuntersuchungen in Form eines Säulenprofils nach DIN 4023 wurde humoser Oberboden (Mutterboden) angetroffen. Seine Mächtigkeit liegt bei 0,6 m. Der Oberboden ist schluffig, sandig, ab einer Tiefe von 0,3 m mit Wurzeln durchzogen. Der Mutterboden ist trocken bis erdfeucht. Im Liegenden des Mutterbodens folgen die kiesigen, z.T. steinigen Sande der unteren Mittelterrasse des Rheins. Die Terrassensedimente sind mitteldicht bis dicht gelagert. Die Sande sind erdfeucht.

2.3.2 Bodenmechanische Kennwerte

Für die im Untergrund zu erwartenden kiesigen, z.T. steinigen Sande der unteren Rheinmittelterrasse können die hier zusammengestellten Bodenkennwerte angenommen werden:

Tabelle 2.3 Bodenkennwerte der Versuchsanordnung

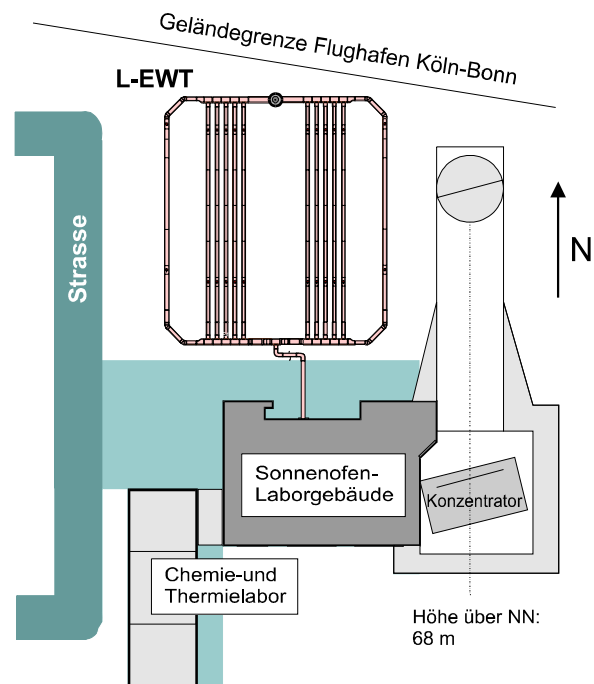
Wichte des feuchten Bodens	$\gamma = 21 \text{ KN/m}^3$	Bodenklassen
Wichte des Bodens unter Auftrieb	$\gamma' = 12 \text{ KN/m}^3$	Baugrubenaushub nach DIN 18300:
Innerer Reibungswinkel	$\varphi' = 37,5^\circ$	<u>Mutterboden, humos</u>
Kohäsion	$c = 0 \text{ KN/m}^2$	Klasse 1 - Oberboden
Steifemodul	$E_s = 80 - 100 \text{ MN/m}^3$	<u>Kiessand</u> Klasse 3 - leicht lösbare Bodenarten

Bild 2.3

Lage des L-EWT im Testgelände
in Bezug zu den Gebäuden

Die natürliche Neigung des Geländes ermöglicht die Einhaltung eines konstanten Abstandes zwischen den Rohren und der Erdoberfläche, da die Rohre mit einem leichten Gefälle in Richtung des Ansaugstutzens zur Ableitung eventuell auftretender Tauwasserströme verlegt sind.

Zur Luftansaugung wurde ein Ansaugstutzen mit einem Innendurchmesser von 700 mm aus verzinktem Stahlblech verwendet, der in einen Betonschacht von DN 1200 mündet. Die Ansaugung und auch der Revisions- und der Sickerschacht befinden sich über der tiefsten Stelle (am nördlichsten Punkt) des L-EWT.



An bestimmten Stellen werden PVC-Rohre (Durchmesser 10 cm) vertikal an die jeweiligen Kanalrohre angebracht und an die Erdoberfläche geführt. Sie dienen zur Einbringung von Flügelradanemometern zur Bestimmung der Volumenströme. Die entsprechenden Stellen wurden mit Markierungssteinen und kleinen Betonteilen stabilisiert.

Eine zweite Gruppe von Abzweigen zur Oberfläche dient zur Einregulierung gleicher Volumenströme mittels Rohrblenden.

2.3.3 Schematischer Aufbau und Sensorpositionen des L-EWT

Die Konfiguration des L-EWT wird durch zwei wesentliche messtechnische Ziele bestimmt. Bild 2.4 zeigt die sich daraus abzuleitende messtechnische Konfiguration:

Luft-Erdwärmetauscher (L-EWT), Verlegeschema und Sensoren

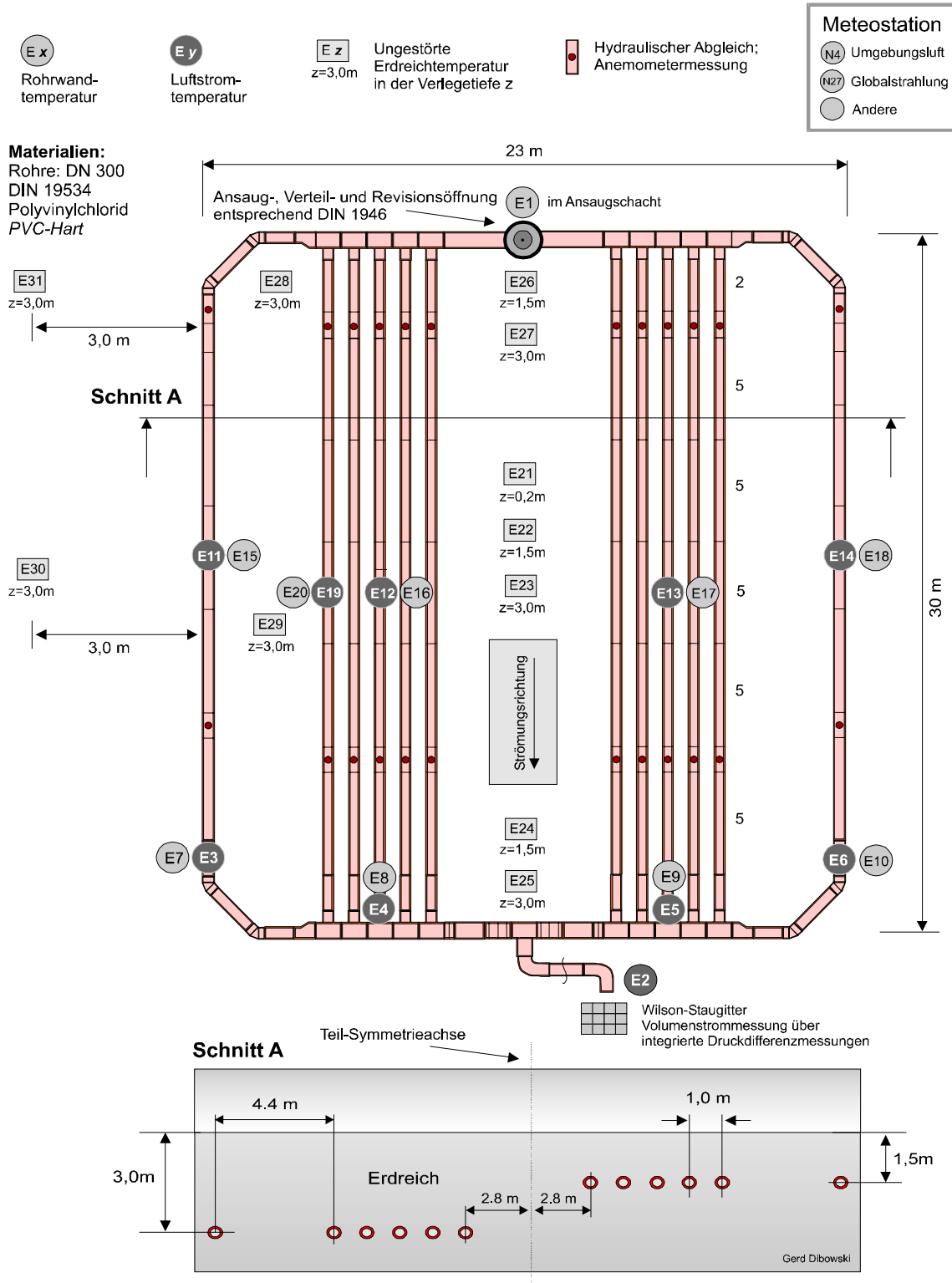


Bild 2.4 Basiskonfiguration der L-EWT-Testanlage und Angabe der Sensorpositionen

Für den Vergleich der Wärmeerträge bei unterschiedlichen Verlegetiefen müssen Teilstränge ungestört voneinander und von anderen Einflussfaktoren, wie in Bild 2.4 zu erkennen, verlegt sein.

Weitere Strecken dienen zur Prüfung des gegenseitigen Einflusses eng zueinander verlegter Rohre. Zudem kann das energetische Verhalten der engverlegten Rohre mit der "ungestörten" aber baugleichen Einzelstrecke verglichen werden. Die unterschiedlichen Abstände zwischen den Rohren ermöglichen die Aufnahme des Temperaturprofils im Erdreich zur Bestimmung des Regenerationsverhaltens und dem Temperatur-Folgeverhalten. Die beiden messtechnischen Hauptziele sind folglich:

- A** dem Leistungs- und Ertragsvergleich zwischen einem Einzelrohr und einem baugleichen Rohr in einer thermischen Konkurrenzsituation innerhalb eines Registers
- B** dem Leistungs- und Ertragsvergleich der Betriebssituationen aus A in verschiedenen Verlegetiefen unter Berücksichtigung verschiedener Regelarten

Verwendet werden PVC-Rohre nach [DIN 19534]. Der Rohrdurchmesser der Einzelstränge beträgt 300 mm, der der Sammelleitungen 500 mm. Die Stränge 1 bis 6 (westlich) werden in einer Tiefe von 3,0 m und die Stränge 7 bis 12 in einer Tiefe von 1,5 m verlegt. Dabei werden jeweils fünf Rohre in einem Register mit einem Einzelabstand von 700 mm (lichte Weite) und jeweils ein Rohr (1 und 12) als Einzelrohr verlegt.

Bild 2.5
Systemseite mit der
Verlegetiefe 3m

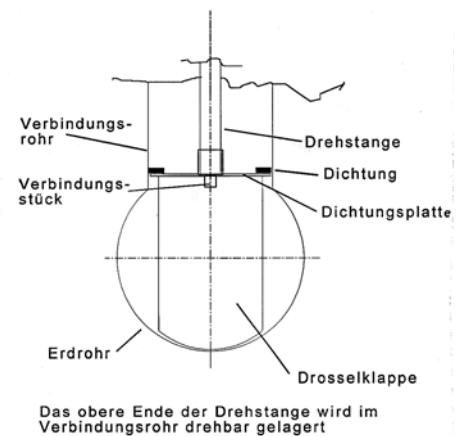
Zu erkennen sind des
weiteren die Zuführungsrohre
für die einzelnen Luftvolu-
menstrommessungen sowie
die Niveauverbindung zur
Verlegetiefe von 1,5 m



Da die Gesamtlänge der einzelnen Stränge vom Ansaugschacht bis zum Keller zwischen 30 und 36 m differiert (die Rohre 1 und 12 sind länger als die Registerrohre), wurden die Temperaturmessensoren jeweils nach 14 m (bezeichnet als 50 %) und nach 28 m (100%) angebracht, um die Rohre untereinander vergleichen zu können. Bei jedem der zwölf Rohre werden zwei vertikale Rohre (DN 100 und DN 200) an die Erdoberfläche geführt, um mit einem Flügelradanemometer die Strömungsgeschwindigkeit in jedem einzelnen Rohr messen zu können (Bild 5). Zum Ausgleich verschiedener Strömungswiderstände sind Stellklappen im Strömungsquerschnitt eingebracht (Bild 6). Diese Revisionsrohre sind nach ca. 2 m (DN 100) und 23 m (DN 200) auf den geraden Rohrstrecken angebracht. Die entsprechenden Stellen wurden mit Markierungssteinen und kleinen Betonteilen stabilisiert.

**Bild 2.6**

Verbindungsrohre als Aufnehmer für die Abgleich-Stellklappen (hydraulischer Abgleich)



Das Ende der einzelnen Messstrecken befindet sich jeweils vor der Zusammenführung in den Hauptkanal, maximal 2 m von diesem entfernt. Ebenfalls im Bereich des Hauptkanals befindet sich die Absenkung auf 3 m Tiefe.

Bild 2.7

Systemseite mit der Verlegetiefe 1,5 m

Vor dem Gebäude wird in einer Grube die Zusammenführung der einzelnen Stränge vorgenommen. Die Luftansaugung wird vom Hauptventilator der Lüftungsanlage mit übernommen. Es ist kein zusätzlicher Ventilator notwendig.

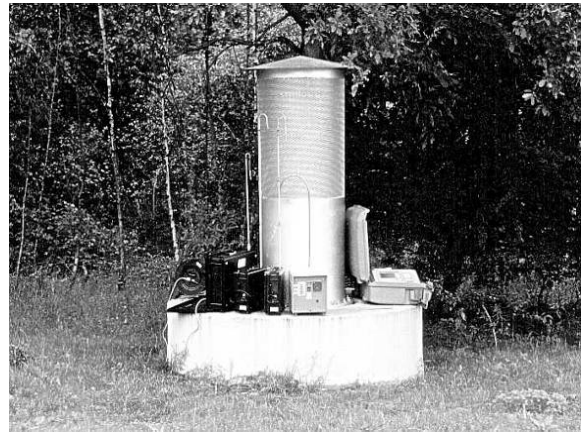


Der Ansaugventilator der Wärmerückgewinnungsanlage (WRG) ist druckabhängig frequenzgesteuert und passt die erforderliche Antriebsleistung nach Zuschalten des L-EWT entsprechend an.

Die Rohre sind auf einem verdichteten Kiesbett gelagert, um ein Absacken und Tauwasser-einlagerungen zu verhindern. Alle Rohre wurden in Sand eingebettet, der verdichtet wurde, um den Wärmeübergang zu verbessern. Um zu vermeiden, dass sich stehende Tauwasserspiegel bilden, die länger nicht abgebaut werden können, besitzt das System an jeder Stelle eine leichte Neigung von etwa 2° bis 3° zum Ansaugschacht hin, wodurch das Tauwasser abfließen und in einem Kiesbett in der Kaminsohle versickern kann.

**Bild 2.8**

Verdichten mit Feinkies zur Verbesserung des rohrnahen Wärmeübergangs

**Bild 2.9**

Eigenfertigung des Ansaugkamins (zu sehen ist die Instrumentierung der Referenzmessung einer lufthygienischen Messkampagne)

2.3.4 Weitere messtechnische Details

Aufgrund der meteorologischen lokalen Randbedingungen stellt sich ein spezielles Erdreichtemperaturprofil ein, das die Betriebseigenschaften des L-EWT bestimmt. Daher sind kontinuierliche Messungen der Erdreichtemperatur an unterschiedlichen Positionen und Verlegetiefen von grundlegender Bedeutung (Bild 2.4). Besonders zu beachten sind ausreichende Abstände zum L-EWT, um einen Einfluss auf diese Referenzsensoren auszuschließen. Die thermischen Ertrags-eigenschaften des L-EWT werden durch Messung der Temperatur im (ebenfalls gemessenen) Luftvolumenstrom an mehreren Stellen im Rohr bestimmt, wobei im Sommerbetrieb zusätzlich die Luftfeuchtedifferenzen mit mobilen Datenloggern der Fa. Testo (siehe auch: <http://opus.uni-kassel.de/opus/volltexte/2003/67>) erfasst werden.

Bild 2.10

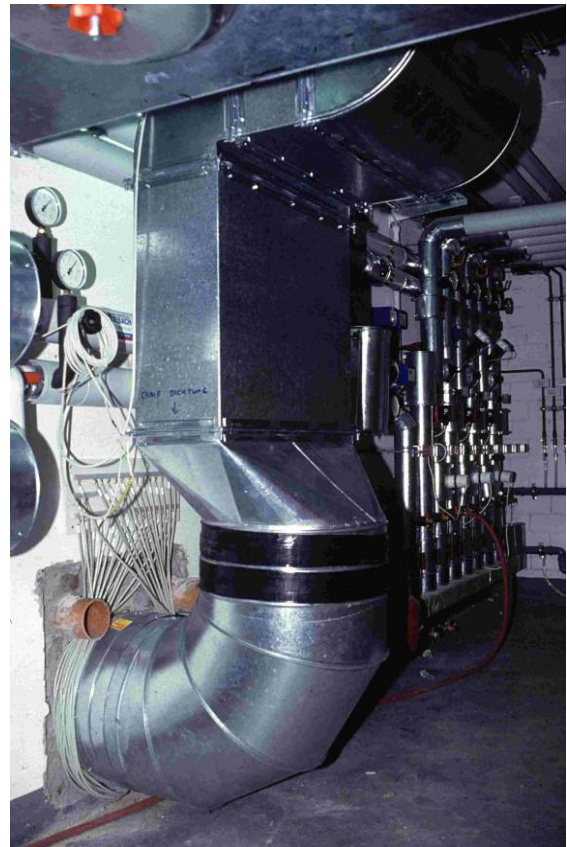
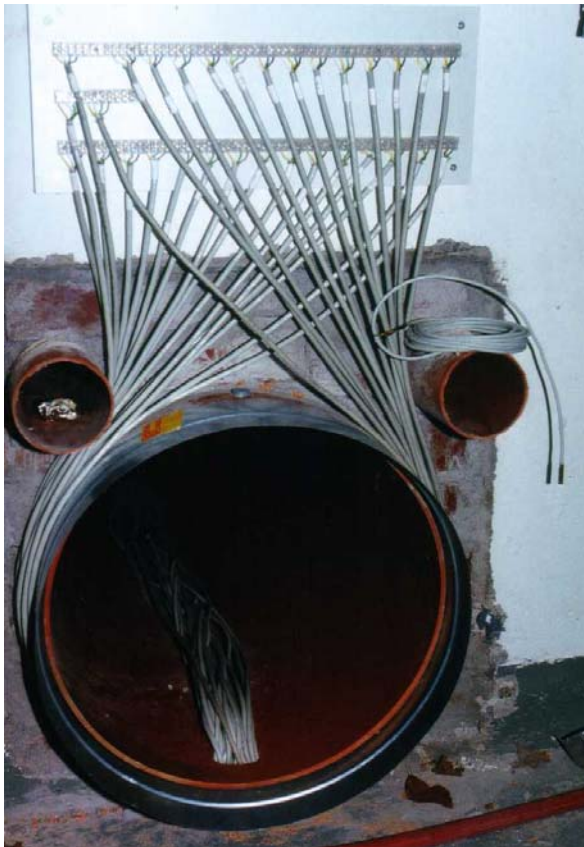
Montagedarstellung der Messsensoren für Luftstrom- und Wandkontakttemperatur am L-EWT-Rohr

Zur Entwicklung eines Simulationsprogramms ist die Kenntnis der Rohrwandtemperatur von besonderer Bedeutung, die daher ebenfalls vermessen wird.



Bei der Art der Messdatenaufnahme wird zwischen kontinuierlichen und diskontinuierlichen Datenaufzeichnungen unterschieden.

Kontinuierlich	Erdreichtemperaturen, Luftstromtemperaturen, Rohrkontakttemperaturen, Volumenströme, Stromaufnahme Ventilator
Diskontinuierlich	Einzeltemperaturen, Teilvolumenströme, Luftstromfeuchtigkeiten, Lufthygiene



Bei den Temperatursensoren werden ausschließlich Widerstandsthermometer Pt100 der Klasse A (gem. DIN IEC 751 1/3 DIN; 0,1°C), grundsätzlich als Vierleitertechnik-Variante eingesetzt, um mögliche Messfehler über die Kabelwiderstände auszuschließen.

Neben den Temperaturmessungen über diese zuverlässige Vierleiter-Pt100-Technik, wird der Gesamtvolumenstrom kontinuierlich mit einem integrierenden Verfahren über sog. Wilson-Staugitter der *Fa. Airflow* durchgeführt.

Bild 2.11 Zusammenführung und Übergabepattform aller Temperatursensoren im Sammelkanal zur Weiterleitung an die Datenerfassung

Dieses recht teure Verfahren gehört zu den genauesten Messmethoden. Es liefert auch noch bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten von etwa 1,5 m/s verwertbare Signale. Eine einfachere Blendenmessung kann wegen dem Übergang auf einen rechtwinkligen Kanalquerschnitt und der fehlenden Beruhigungsstrecke nicht eingesetzt werden.

Aufgrund der Anordnung des Wilson-Staugitters über den gesamten Kanalquerschnitt erhält man einen Mittelwert der Strömung nach dem Messprinzip der Staudruckmessung. Die Messung erfolgt direkt am Eintritt in die WRG, damit auch bei Nichtbetrieb des L-EWT der Volumenstrom für das Gebäude erfasst werden kann. An dieser Stelle ist der Kanalquerschnitt rechteckig, wodurch bei Punktmessungen über Hitzdrahtanemometer schwer erfassbare Strömungswirbeleffekte nicht messbar sind. Daher kann nur über ein Netz von integrierenden Drucksensoren über dem Kanalquerschnitt der Volumenstrom über ein Wilson-Staugitter korrekt erfasst werden. Diskontinuierlich gemessen wird nach speziellen Erfordernissen bei geänderten Messzyklen oder Sonderprüfungen mit mobilen Messsensoren. Hierzu gehören die Messung der Luftfeuchte im L-EWT zur Feststellung der Tauwasserbildung, die Kontrolle der Teilvolumenströme und die Kampagnen zur Überprüfung der Lufthygiene. Zur Bestimmung der Teilvolumenströme bzw. der Strömungsgeschwindigkeiten in den einzelnen Rohren wird im Rahmen des hydraulischen Abgleichs ein integrierendes Flügelradanemometer der *Fa. Testo* verwendet, um in jedem Rohr so genau wie möglich den jeweils gleichen Volumenstrom einzustellen. Zur Ermittlung der Luftfeuchteänderungen und der Kontrolle auf Tauwasserbildung im Rohr wird mit zwei mobilen Hygrometer-Temperatur-Datenloggern gearbeitet, die bis zu 55.000 Einzelmessungen erfassen können, und so eine aufwändige Verkabelung von Einzelsensoren umgehen helfen.

Eine weitere, wichtige messtechnische Aufgabe ist die Überprüfung des lufthygienischen Zustands der L-EWT-Luft. Hier werden aus technischen und finanziellen Gründen einzelne Messkampagnen an ein Hygiene-Fachinstitut vergeben. Gemessen werden flüchtige organische Verunreinigungen (MVOC), Phtalate (Weichmacher im PVC), biologische Verunreinigungen (Gesamtkeimzahl, selektive Untersuchung auf Legionella, Schimmelpilzsporen inkl. Differenzierung), partikelförmige Luftverunreinigungen (Schwebstaubanalyse, Partikelanzahl und Größenverteilung, Nachweis lungengängiger mineralischer und organischer Fasern und Partikeln).

2.3.5 Beschreibung des Datenloggersystems

Das Messdatenerfassungs- und Kontrollsystem besteht aus einem Datenlogger (MAC 19, der Fa. Schuehle Messtechnik) mit einem freiprogrammierbaren Mikroprozessor, einem Programmspeicher, einem Datenspeicher, 14 Bit-A/D-Wandlern, zwölf analogen Differenzeingängen, zwei 8 Bit-Zählern und acht digitalen Ein- und Ausgängen.

Aufgrund der Sensorart und -anzahl werden zusätzlich Zählermodule (MAC-Count) und analoge Multiplexer (MAC-MUX), teilweise mit Konstantstromquelle, eingesetzt (2 x MUX-N und 3 x MUX-S). Durch den modularen Aufbau (19"-Einschubsystem), kann das Datenloggersystem der jeweiligen Messaufgabe angepasst werden. Die Signalverstärkung, Kalibrierung und für die weitere Verarbeitung vorbereitende Rohdatenanpassung werden automatisiert durchgeführt. Sogenannte *Watchdogs* überwachen die Plausibilität der ankommenden Signale durch zuvor definierte Plausibilitätsgrenzen.

Die Daten werden von dem zentralen Datenerfassungsrechner kontinuierlich alle zehn Sekunden gemessen. Es erfolgt eine Mittelung über 15 Minuten und die Bildung der Varianz.

Der Start der Datenaufzeichnung begann am 01.04.1995. Der vollständige Messbetrieb besteht seit dem 18.10.1995.

Aufgrund der großen Anzahl kontinuierlicher Sensormessungen bei relativ kleinen Zeitschritten, sowie mehrerer längerer Sondermesskampagnen sind, durch die sehr lange Messzeit, erhebliche Datenmengen aufgelaufen, deren Weiter- und Endbearbeitung enorme zeitliche Ressourcen gebunden haben. Als Ergebnis dieses Aufwands kann auf den bislang größten Datenbestand zum Thema Luft-Erdwärmetauscher zurückgegriffen werden.

2.3.6 Kalibrierung der Messwertgeber

Die Messwertgeber für die Temperaturmessungen wurden kalibriert beschafft. Sie wurden nochmals vor dem Einbau, zusammen mit der vorgesehenen Datenerfassung, überprüft, verglichen und im Eiswasserbad nachkalibriert. Die gesamte Messanlage ist in das DLR-eigene Qualitätssicherheitssystem aufgenommen worden und wird somit regelmäßig überprüft, um eine längerfristige, personenunabhängige Genauigkeit zu gewährleisten.

In diesem Kontrollsystem werden unplausible Betriebszustände angezeigt, wodurch eine umgehende Neueinstellung oder Reparatur erfolgen kann. Das unbemerkte Bestehen von Betriebsstörungen über längere Zeit ist somit ausgeschlossen.

2.3.7 Kalibrierung der Albedo-Messung

Die Albedo-Messung setzt sich zusammen aus dem Globalstrahlungszyranometer CM11 und einem weiteren CM11, das die Bodenreflektion misst. Aus diesen Signalen wird durch Differenzbildung die Albedo bestimmt.

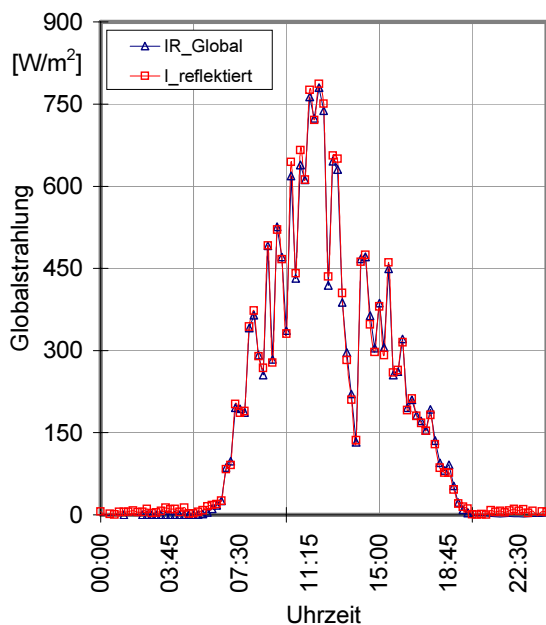


Bild 2.12 Kalibrierung der Albedo-Messung bestehend aus Globalstrahlungszyranometer CM11 der Fa. Kipp & Zonen und Referenzzyranometer CM11. Erste Kalibrierung am 13.2.96

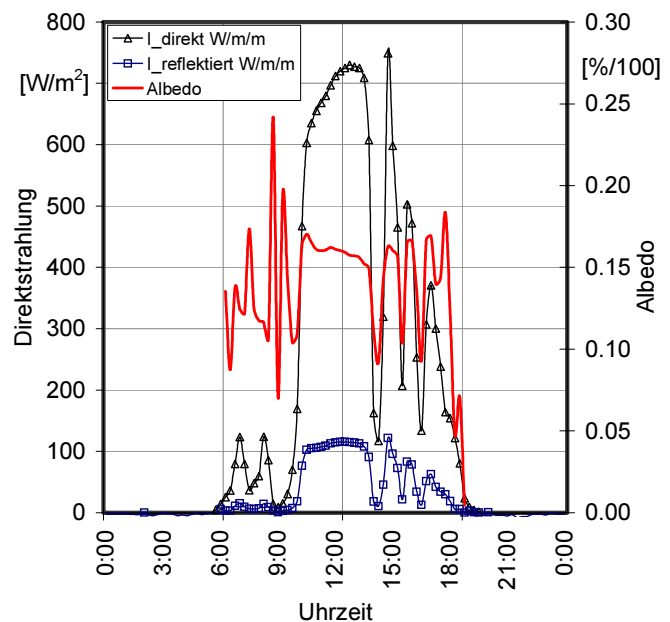


Bild 2.13 Albedo der Bodenoberfläche an einem Sommertag mit hoher, schwankender Einstrahlung (24.08.1997)

Die bisherigen Ausfallzeiten liegen bei etwa 2% und wurden durch betriebstechnisches Wartungspersonal im Laborgebäude verursacht (unangekündigtes Abschalten der Stromversorgung) oder auch durch einen Blitzschlag (am 3.6.2000).

Zur Bestimmung der genauen bodenphysikalischen Eigenschaften des Erdreichs **nach Einbau** des L-EWT wurde die Fa. TEKA, Berlin beauftragt, durch eine sogenannte Linienquellenuntersuchung und durch Entnahme von mehreren Bodenproben, die wichtigsten Parameter nachträglich zu bestimmen.

2.3.8 Zweites Bodengutachten

Für eine ausreichend genaue Validation des Simulationsprogramms muss die Wärmeleitfähigkeit als Funktion des Feuchtegehaltes nach Inbetriebnahme des L-EWT bestimmt werden. Bisherige Verfahren werden in [Sanner I] ausführlich beschrieben. Für das hier entwickelte Programm wird das Prinzip der zylindrischen Linienquelle angewandt [Kristiansen]. Das von der Fa. TeKa (Berlin) zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit weiterentwickelte Verfahren beruht auf diesem Prinzip. Dabei ist der Wärmefluss durch die Oberfläche gemäß dem Newtonschen Abkühlungsgesetz proportional zur Differenz der Temperatur der Oberfläche und Umgebung. Ein Lösungsweg der Wärmeleitungsgleichung für eine Zylinderquelle ist bei mehreren Autoren (*Blackwell, 1954; Carslaw & Jaeger, 1959; Kristiansen, 1982*) ausführlich dargestellt.

Nach *Kristiansen* (1982) führt die Lösung der Wärmeleitungsgleichung für eine Linienquelle im Vollraum auf die Gleichung:

$$T(r, t) = \frac{q}{4\pi\lambda} E_1\left(\frac{r^2}{4at}\right) \quad (\text{Gl. 2.1})$$

mit

$T(r, t)$:	Temperatur der Quelle [K]	r :	radialer Abstand von der Quelle [m]
q :	konstante Heizleistung pro Längeneinheit [Wm^{-1}]	t :	Zeit [s]
λ :	Wärmeleitfähigkeit des Vollraums [$\text{Wm}^{-1} \text{K}^{-1}$]	E_1 :	Integraleponentialfunktion
a :	Temperaturleitfähigkeit [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]		

Für das Temperaturverhalten der Quelle ($r \rightarrow 0$) erhält man:

$$T_Q(t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \ln(t) + \text{konst.} \quad (\text{Gl. 2.2})$$

Mit Gleichung 2.2 wird der Temperaturverlauf in Abhängigkeit von der Zeit bestimmt. Man trägt hierzu die Temperatur der Quelle über den Logarithmus der Heizdauer auf. Die Steigung der sich für große Heizzeiten ergebenden Gerade ist umgekehrt proportional zur Wärmeleitfähigkeit des Vollraums. Im Prinzip genügen daher zwei Temperaturmessungen zu zwei Zeitpunkten im linearen Bereich der Aufheizkurve zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit. Zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit ergibt sich:

$$\lambda_a(t) = \frac{q}{4\pi} \cdot \frac{\ln(t_2) - \ln(t_1)}{T_Q(t_2) - T_Q(t_1)} \quad (\text{Gl. 2.3})$$

Diese Gleichung kann zur Standardauswertung sowohl für eine Bohrlochsonde als auch für Laborsonden herangezogen werden. In der Praxis muss die Messzeit so lang gewählt werden, dass ein Auswertintervall ausreichender Länge und ausreichender Linearität zur Verfügung steht.

2.3.9 Die spezielle Approximationsmethode SAM

In der Realität besitzt die Wärmeleitfähigkeits-Sonde gegenüber den Voraussetzungen der Theorie jedoch eine endliche Länge sowie einen endlichen Durchmesser. Die endliche Länge der Sonde macht sich in Randeffekten bei größeren Zeiten bemerkbar, während der Durchmesser der Sonde die Anfangszeit des linearen Bereichs der Aufheizkurve beeinflusst. [Erbas] (1985) und [Honarmand] (1994) haben durch quantitative Berechnungen minimale Längen und maximale Durchmesser für die Sonden ermittelt. Neben der Geometrie der Quelle schränkt auch eine mögliche Kontaktschicht (z. B. Wasserfilm, Bohrlochverrohrung, bei Labormessungen auch Kontaktmittel) das auswertbare Zeitintervall ein. Die Kontaktschicht macht sich dadurch bemerkbar, daß die Anfangszeit des linearen Bereiches, der zur Auswertung zur Verfügung steht, zu höheren Zeiten verschoben wird. Für die Auswertung muss also der am wenigsten durch die genannten Effekte beeinflusste Bereich ermittelt werden. Da Randeffekte und die Einflüsse des Kontaktes jedoch nicht ohne weiteres in der Aufheizkurve erkennbar sind, ist die Wahl des auszuwertenden Zeitintervalls problematisch. Es muss eine Näherung verwendet werden, die den endlichen Sondendurchmesser und den Kontaktwiderstand berücksichtigt. Aufgrund der Tatsache, dass die Sondenlänge in der Praxis nicht ideal (unendlich) ist, wird mit der von *Blackwell* (1954) entwickelten Approximation gearbeitet bei der eine Reihe von Koeffizienten zur Anpassung der Geometrie bestimmt werden müssen. Diese Koeffizienten A_i werden mit der Methode der kleinsten Quadrate aus der Aufheizkurve bestimmt. Die scheinbare Wärmeleitfähigkeit λ_a ergibt sich mit:

$$\lambda_a(t) = \frac{q}{4\pi} \cdot \left[A_2 + \frac{A_3(1 - \ln(t)) - A_4}{t} \right]^{-1} \quad (\text{Gl. 2.4})$$

Der Einsatz dieser Auswertemethode bietet den Vorteil, dass die Approximationsgleichung 2.4 bereits für geringere Zeiten als die Standardnäherung gültig ist. Dadurch können die Messzeiten (insbesondere bei in-situ-Messungen) deutlich verkürzt werden, da der lineare Bereich der logarithmisch aufgetragenen Auswertekurve nicht vollständig abgewartet werden muss.

Es wurden zur Untersuchung an der L-EWT-Testanlage in Köln Proben aus zwei Messtiefen (1,5 m und 3,0 m) entnommen. Je Messtiefe standen drei Stechzylinderproben zur Verfügung. Jeweils zwei waren zur Messung bestimmt und mit zwei Reihen von Löchern in der Stechzylinderwandung versehen, um den Trockenprozess zu erleichtern und ein Aufquellen der Probe durch entweichenden Wasserdampf zu vermeiden. Die dritte Probe diente als Reserve. Die Wärmeleitfähigkeit an einer Messposition wurde jeweils aus einer Serienmessung mit 5 Einzelmessungen bestimmt. Die Qualität der Einzelmessungen wurde bewertet, gestörte Messungen aussortiert, und der Mittelwert der Messreihe berechnet. Für jede Trockenstufe wurde aus den Ergebnissen aller Messpositionen, deren Ergebnisse von ausreichender Qualität waren, die mittlere Wärmeleitfähigkeit berechnet.

Zur Absicherung der Ergebnisse wurde bei Probe 2 die Anzahl der Trockenstufen erhöht. Die angegebene Messgenauigkeit ergibt sich aus der maximalen Streubreite der Messungen einer Trockenstufe. Sie enthält damit die Einflüsse der Inhomogenität des Materials sowie der Probenentnahme und -präparation. Die Messgenauigkeit der reinen Wärmeleitfähigkeitsmessung beträgt $\pm 3\%$.

Tabelle 2.4 Wärmeleitfähigkeitsmessung Technische Daten

Modell:	Wärmeleitfähigkeitsmessgerät TK04
Messprinzip:	Methode des instationären Wärmestroms (Nadelsondenmethode)
Messbereich:	0.1 – 12 Wm ⁻¹ K ⁻¹ (VLQ) 0.3 – 12 Wm ⁻¹ K ⁻¹ (HLQ)
Genauigkeit:	besser als $\pm 5\%$ (Standard) besser als $\pm 2\%$ (hochgenaue Messungen mit Messwertkontrolle)
Reproduzierbarkeit:	Besser als $\pm 1.5\%$
Konstanz des Heizstroms:	besser als 0.01%
Messdauer:	80 sec
Messwiederholung:	1 – 99 automatisch
Mindestprobengröße:	Ø ca. 30mm, L 75mm (VLQ) Ø ca. 70mm, H 20mm (HLQ)
Aufwärmzeit:	30 Minuten für hochgenaue Messungen
Betriebstemperatur:	0 – 45°C
Probentemperatur:	0 – 70°C
Stromversorgung:	220/240 V ~ (50 Hz); 100/120 V ~ (60 Hz)
Leistungsaufnahme:	~ 40W
Abmessungen:	471 x 147 x 412mm (B x H x T)
Gewicht:	13 kg (Messgerät)
Interface:	RS232 serielle Schnittstelle



Bild 2.14 Entnahme der Bodenproben mittels Stechzylinder mit Leiner



Bild 2.15 Messkonfiguration zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit

Nachfolgend sind die wesentlichen technischen Daten der Versuchsdanlage zusammengefasst dargestellt.

2.3.10 Angaben zur Wetterstation

Tabelle 2.5 Technische Eigenschaften der projektrelevanten Messsensoren der Meteostation

Kanalname	Messinstrument	Physikalische Messgröße	Eichkonstante bzw. Kennlinie des Sensors	Wertebereich Phys. Einheit
ID2-000X	Pyrheliometer	Direktstrahlung	$8,7 \cdot 10^{-6} \text{ V/W/m}^2$	0-1000 W/m ²
IG1	Pyranometer	Globalstrahlung (horizontal)	$4,49 \cdot 10^{-6} \text{ V/W/m}^2$	0-1124 W/m ²
TAMB1	Thermogeber	Umgebungstemperatur	Pt-100	-50° - 100°C
FEUREL1	Haar-Hygrometer	Relative Feuchte, außen	Poti. 200 Ω	0 - 100 %
WINDRI1	Windfahne	Windrichtung	Poti. 400 Ω	0 - 360°
WINDGE1	Anemometer	Windgeschwindigkeit	Stromg. 0 - 4,7 mA	0 - 35 m/s
IDIF1	Pyranometer	Diffusstrahlung (horizontal)	$4,37 \cdot 10^{-6} \text{ V/W/m}^2$	0-572 W/m ²
NIED1	Ombrometer	Niederschlagsmenge	8,24 ml/Impuls	„0“ oder „1“
Windsu	Windfahne	Zähler für Windrichtung Süd	Keine	„0“ oder „1“
Windno	Windfahne	Zähler für Windrichtung Nord	Keine	„0“ oder „1“
Windos	Windfahne	Zähler für Windrichtung Ost	keine	„0“ oder „1“
Windwe	Windfahne	Zähler für Windrichtung West	keine	„0“ oder „1“

Tabelle 2.6 Herstellerangaben der Meteostation-Einzelsensoren

Bezeichnung	Messgröße	Technische Angaben	Hersteller
Pyranometer	Globalstrahlung Oberflächenreflektion (Albedo)	CM 11 Empfindlichkeit ($\pm 0,5\%$) bei 20°C und 500 W/m ² , $4,37 \times 10^{-6} \text{ V/W/m}^2$ Anmerkungen: Signal verstärkt; Genauigkeit validiert, auch als Referenzsystem für Kalibrierung des Albedometers, auch mit verstellbaren Schattenring nach Vorschriften der W.M.O.	Fa. Kipp & Zonen, Delft, NL
Hygrometer	relative Luftfeuchtigkeit, Umgebung	Haar-Hygrometer S (Hygrofix), Zeitkonstante 28 s, $\pm 2\%$ rel. Feuchte	Fa. Thies Klima, Göttingen
Windrichtungsgeber	Windrichtung	Ausg. Poti 0 - 400 Ohm = 0 - 360 Grad	Fa. Thies Klima, Göttingen
Messwertgeber für Windgeschwindigkeit	Windgeschwindigkeit	Mit Widerstandsferngeber (F1000) und Heizung	Lambrech Klimatologische Messtechnik, Göttingen
Ombrometer	Niederschlag	Mit elektrischer Impulsfernübertragung, mit beheiztem Trichter und Ablaufrohr	Lambrech Klimatologische Messtechnik, Göttingen

Testanlagen im Verbundprojekt**Tabelle 2.7** L-EWT-Sensortabelle, Liste aller stationär montierten und kontinuierlichen messenden Sensoren der L-EWT-Datenerfassung (ohne Sensoren der Meteostation und der mobilen Datentechnik)

Lfd. Nr.	Sensorart	Beschreibung	Anmerkungen
N4	Vierleiter Pt100	Umgebungstemperatur	
N25	Staugitter	Volumenstrom Außenluftkanal	
N26	Staugitter	Volumenstrom Fortluftkanal	
N27	Pyranometer	Globalstrahlung, horizontal	
N28	Pyranometer	Globalstrahlung, reflektiert, „Albedo“	zusammen mit N4
Luft-Erdwärmetauscher			
E1	Vierleiter Pt100	Lufttemperatur Ansaugschacht	fast identisch N4
E2	Vierleiter Pt100	Lufttemperatur Ausgang Sammelrohr	WRG Eingang
E3	Vierleiter Pt100	Luftstromtemperatur Rohr 1	bei 100% Strecke
E4	Vierleiter Pt100	Luftstromtemperatur Rohr 4	bei 100% Strecke
E5	Vierleiter Pt100	Luftstromtemperatur Rohr 9	bei 100% Strecke
E6	Vierleiter Pt100	Luftstromtemperatur Rohr 12	bei 100% Strecke
E7	Vierleiter Pt100	Wandtemperatur Rohr 1	bei 100% Strecke
E8	Vierleiter Pt100	Wandtemperatur Rohr 4	bei 100% Strecke
E9	Vierleiter Pt100	Wandtemperatur Rohr 9	bei 100% Strecke
E10	Vierleiter Pt100	Wandtemperatur Rohr 12	bei 100% Strecke
E11	Vierleiter Pt100	Luftstromtemperatur Rohr 1	bei 50% Strecke
E12	Vierleiter Pt100	Luftstromtemperatur Rohr 4	bei 50% Strecke
E13	Vierleiter Pt100	Luftstromtemperatur Rohr 9	bei 50% Strecke
E14	Vierleiter Pt100	Luftstromtemperatur Rohr 12	bei 50% Strecke
E15	Vierleiter Pt100	Wandtemperatur Rohr 1	bei 50% Strecke
E16	Vierleiter Pt100	Wandtemperatur Rohr 4	bei 50% Strecke
E17	Vierleiter Pt100	Wandtemperatur Rohr 9	bei 50% Strecke
E18	Vierleiter Pt100	Wandtemperatur Rohr 12	bei 50% Strecke
E19	Vierleiter Pt100	Luftstromtemperatur Rohr 2	bei 50% Strecke
E20	Vierleiter Pt100	Wandtemperatur Rohr 2	bei 50% Strecke
E21	Vierleiter Pt100	Erdreichtemperatur -0,2 m im Zentrum	bei 50% Strecke
E22	Vierleiter Pt100	Erdreichtemperatur -1,5 m im Zentrum	bei 50% Strecke
E23	Vierleiter Pt100	Erdreichtemperatur -3,0 m im Zentrum	bei 50% Strecke
E24	Vierleiter Pt100	Erdreichtemperatur -1,5 m im Zentrum	bei 100% Strecke
E25	Vierleiter Pt100	Erdreichtemperatur -3,0 m im Zentrum	bei 100% Strecke
E26	Vierleiter Pt100	Erdreichtemperatur -1,5 m im Zentrum	am Ansaugschacht
E27	Vierleiter Pt100	Erdreichtemperatur -3,0 m im Zentrum	am Ansaugschacht
E28	Vierleiter Pt100	Erdreichtemperatur -3,0 m zwischen den Rohren 1 und 2	Höhe Ansaugschacht
E29	Vierleiter Pt100	Erdreichtemperatur -3,0 m zwischen den Rohren 1 und 2	bei 50% Strecke
E30	Vierleiter Pt100	Erdreichtemperatur -3,0 m 1m westlich von Rohr 1	bei 50% Strecke
E31	Vierleiter Pt100	Erdreichtemperatur -3,0 m 3m westlich von Rohr 1	bei 50% Strecke

Testanlagen im Verbundprojekt

Tabelle 2.8 Herstellerangaben der L-EWT-Einzelsensoren

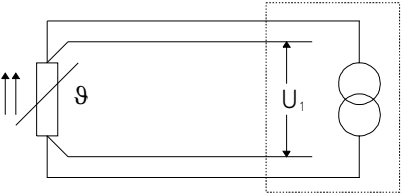
Bezeichnung	Messgröße	Technische Angaben	Hersteller
Widerstands- thermometern Pt100, Klasse A Vierleitertechnik	Temperaturen der Luftströmung und des ungestörtes Erdreich	Oberflächen-Widerstandsthermometer W-SOK (O) gem. DIN IEC 751, 1/3 DIN (0,1°C), Toleranzklasse. A gem. DIN 43 760	Fa. Heraeus Sensor Kleinostheim
	Flächentemperaturen, R ohraußenwand	Oberflächen-Widerstandsthermometer Typ M-4B/1-OK nach DIN IEC 751, 1/3 DIN (0,1°C), Toleranzklasse A gem. DIN 43 760	Fa. Ephy Mess, Wiesbaden
		Gemeinsame Daten der verwendeten Vierleitertechnik: Leitungen für Speisestrom und Messleitungen sind zur Eliminierung der Leitungswiderstand- und Drifteinflüsse (bei langen Leitungslängen) getrennt; zulässige Grenzabweichungen der Toleranzklasse A nach DIN IEC 751: $\vartheta = \pm(0,15 + 0,002 \cdot \vartheta)$; mögliche Auflösung bei exakter Handhabung: 0,01 °C bis 0,001 °C Unkritischer Fehler durch das Übergangverhalten der Sprungantwort	
Wilson-Staugitter mit Druckmess- umformer Typ PTSL XX K P: Pressure T: Transducer (Messumformer) S: square root (radzierend) L: Lineare Signalumsetzung	Integrierende konti- nuierliche Volumen- strommessungen, L-EWT-Hauptvolu- menstrom; Außen- und Abluft	PTSL 25-K (Fortluft), Flowgrid 300 x 800 PTSL 31-K (Außenluft), Flowgrid 250 x 800 Differenzdruck Linearbereich, 0 bis 25 Pa (PTSL 25-K) 0 bis 31 Pa (PTSL 31 K) Radzierend (Stufe 6); Zeitkonstante 1s Analogausgang 0 - 10V / 4 - 20 mA, (RL > 2 kΩ) Automatischer Nullabgleich Anm.: außer dem Drucksignal selbst werden auch die Dichte und Temperatur des strömen-den Mediums, der statische Druck im System und u.U. auch der barometrische Druck berücksichtigt	Fa. Airflow, Rheinbach

Tabelle 2.9 Mobile Datenmesstechnik

Bezeichnung	Messgröße	Technische Angaben	Hersteller
Integrierendes Hand-Flügelrad- anemometer	(Teil-) Volumen-ströme, gesondert bzw. Strömungs- geschwindigkeiten	Hitzdraht (Strömung) 0.0 bis 10 m/s; +/- 0.01 m/s NTC (Temperatur) 0.0 bis 50.0°C +/- 0.1 m/s	Fa. Testo, Lenzkirch
Mobiles Hygrometer mit Datenlogger	relative Luftfeuchte und Temperatur, Eingangs- und Ausgangsmessung	Datenlogger 171-2 interne °C % R.F., Messbereich -20 - +70°C; 0 - 100% rF Speicherkapazität 55.000 Messwerte	Fa. Testo, Lenzkirch

Tabelle 2.10 Stationäre Datenerfassung Meteostation

Bezeichnung	Messgröße	Technische Angaben	Hersteller
Datenerfassung		MSR-Manager-Basisgerät MSRM; Relais-Multi- plexerkarte 16 Kanäle Anschlußmodul AEB16VP Datenlogger HIAT3 19'' -Gehäuse	HITEC Zang Elektronische Systeme Herzogenrath

Tabelle 2.11 Stationäre Datenerfassung L-EWT

Bezeichnung	Messgröße	Technische Angaben	Hersteller
MAC19	Datenerfassung	NESA Datenerfassung setzt sich aus Modulen unterschiedlicher Funktionalität zusammen. Das MAC19 Modul ist Kernstück des Systems. Es verfügt über 12 Analog- und 2 Zählereingänge Genauigkeit: 0,3 uV22 Bit Auflösung Selbstkalibrierend	Schuehle Messtechnik, Ravensburg

2.3.11 Plausibilitätsprüfungen der Signale

- Sichtprüfung aller Kanäle, ob die Messwerte in den oben genannten Wertebereich liegen
- Überprüfung ob alle Strahlungswerte bei Nacht „Null“ sind (zulässiger Offset ist $\pm 1\%$ vom maximal erlaubten Messwert)
- Während der Tagesstunden und Direktstrahlung $ID_2 = 0$ muß gelten:
- $IG_1 = IDIF_1 \cdot \text{Korrekturfaktor für Schattenring (ohne Anwendung des Korrekturfaktors max. 14\% Abweichung)}$
- Zulässige Abweichung der Windrichtungszählkanäle: $\pm 5\%$

2.3.12 Ventilatordaten

Ventilatoren der Fa. Gebhardt (Typ: RZR 11-280) mit einem Antriebsmotor von VEM (Typ: 100 L4, 2,2 KW, 5,55 A, 380 V, $\cos \varphi = 0,78$) verwendet.

Druckverlust der gesamten Lüftungsanlage (ca. 1300 Pa für einen Strang) bei einem Volumenstrom von max. 3600 m³/h. erforderliche Wellenleistung von ca. 1,5 KW. Addiert werden 15 - 20 % für den Verlust durch den Riementrieb und ein Sicherheitsfaktor (ca. 25 %), so dass die Auslegungsleistung des Antriebmotors 2,2 KW beträgt.

2.3.13 Weitere Baubilder

**Bild 2.16** flache Verlegetiefe in 1,5 m



Bild 2.17 Zusammenbau des Sammelkanals und Verdichten des rohrnahen Bereichs mit Feinkies



Bild 2.18 Aufwändige Installation der Messtechnik



Bild 2.19 Vor und nach dem Schließen der Baugrube

2.3.14 Konstruktive Randbedingungen

Die Rohre wurden mit einer Neigung versehen, um die im Sommerbetrieb möglicherweise gebildete Tauwassermenge abzuleiten. Die Rohre lagern auf einem verdichteten Kiesbett, um ein Absacken zu verhindern (Tauwassereinlagerung) und um durch speziell am Rohr vorgesehene Auslaßöffnungen Tauwasser schnell ableiten zu können. Desweiteren wurde das Erdreich um das Rohr ebenfalls verdichtet, um den Wärmeübergang zu verbessern.

Der Luft-Ansaugstutzen befindet sich drei Meter über der Erde. An der entsprechenden Stelle befindet sich auch der Revisionschacht als gleichzeitig tiefste Stelle des jeweiligen Rohrstrangs. Die Auswahl dieses Ortes ist besonders günstig, da durch die natürliche Neigung des Geländes ein konstanter Abstand zwischen Rohr und Erdoberfläche trotz Neigung gewährleistet ist. Der frequenzgesteuerte Ansaugventilator der Wärmerückgewinnungsanlage wird für die Erwärmeluftansaugung genutzt.

Vor dem Gebäude wurde in einer Grube die Zusammenführung der einzelnen Stränge vorgenommen. Das Ende der jeweiligen Meßstrecke befindet sich jeweils vor der Zusammenführung, noch außerhalb des Sammelschachtes; maximal 2 m vom Sammler entfernt. Ebenfalls im Sammelschacht befindet sich die Absenkung auf 3 m Tiefe.

Bei stehenden Kondenswasserspiegeln, 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 theoretisch 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.

2.4 Messergebnisse der L-EWT-Testanlage

2.4.1 Temperaturverläufe des Erdreichs

Treibende Kraft eines L-EWT ist das ihn umschließende Temperatur-Bodenprofil. Die Kenntnis des grundsätzlichen Verhaltens ist von entscheidender Bedeutung für den richtigen Einsatz eines L-EWT. Durch die Messungen konnten exakte Erdreichtemperaturverläufe aufgezeichnet werden, aus denen sich erkennen lässt, dass starke Schwankungen in oberflächennahen Bereichen herrschen (Bild 2.20).

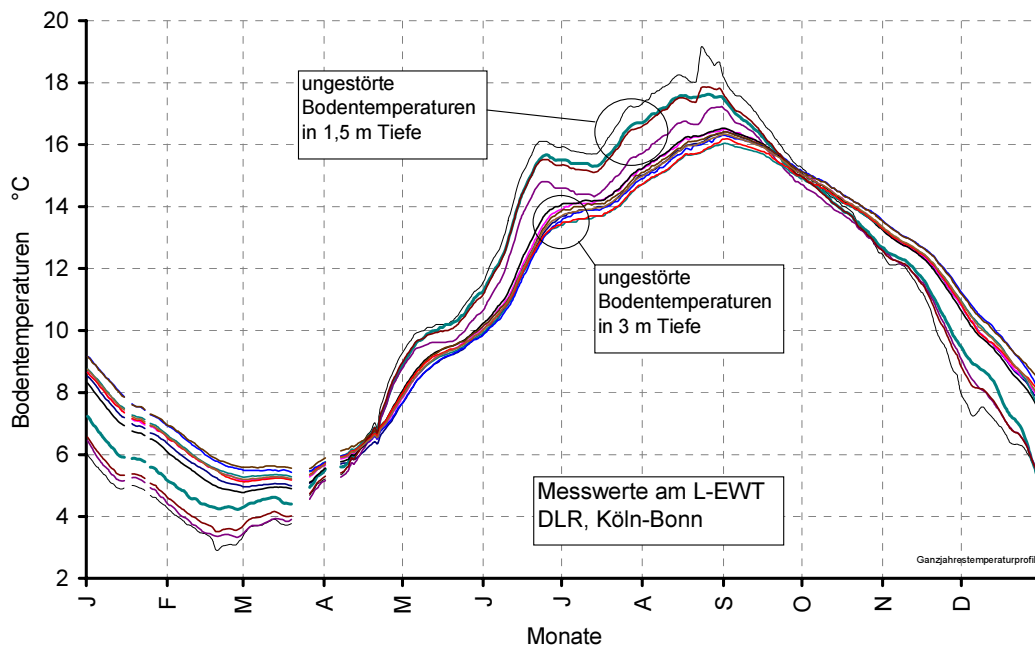


Bild 2.20 Ungestörte Bodentemperaturen über einem Zeitraum von einem Jahr in 1,5 und 3 m Tiefe am Standort Köln-Porz (Flughafen Köln-Bonn)

Dabei sind zwei interessante Beobachtung zu machen. Die Profile in 3 m Tiefe sind aufgrund der Entfernung zur Oberfläche bereits ausgeprägt homogen und gebündelt. Wohingegen die Verläufe in 1,5 m etwas unruhiger sind, was daran liegt, dass in dieser Tiefe kurzfristige Wetterereignisse durch Einstrahlung oder Niederschlag, bzw. Sickerwasser sichtbaren Einfluss auf den Temperaturverlauf im Erdreich nehmen können. Des weiteren fällt auf, dass sich beide Gruppen zwei mal im Jahr kreuzen, was dazu führen kann, dass die Verlegetiefe in 1,5 m kurzzeitig besser ist, als die in 3 m, z.B. wenn es zu ersten Kühlanforderungen Anfang Mai kommt oder zum Wärmebedarf im September und Oktober.

Das dargestellte Boden-Temperaturprofil der Sensoren in 1,5 und 3m Tiefe folgt phasenverschoben und amplitudengedämpft dem Profil der Außenluft über die Zeit eines Jahres. Das gezeigte Bodentemperaturprofil kann prinzipiell mit gewissen Abweichungen, für jeden Standort in Deutschland vermutet werden.

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 Nutzpotalential. Der Einfluss der Feuchtigkeit, besonders auf die Wärmeleitfähigkeit verschiedener Böden, ist sehr ausgeprägt und muss bei der Anlagenplanung berücksichtigt werden. 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.

In den Jahren 1997-1999 war der L-EWT durchschnittlich zu 95% verfügbar. Dadurch konnte eine geschlossene Dauerbetriebsbeobachtung stattfinden, von der einige der definierten Messziele abhängig sind.

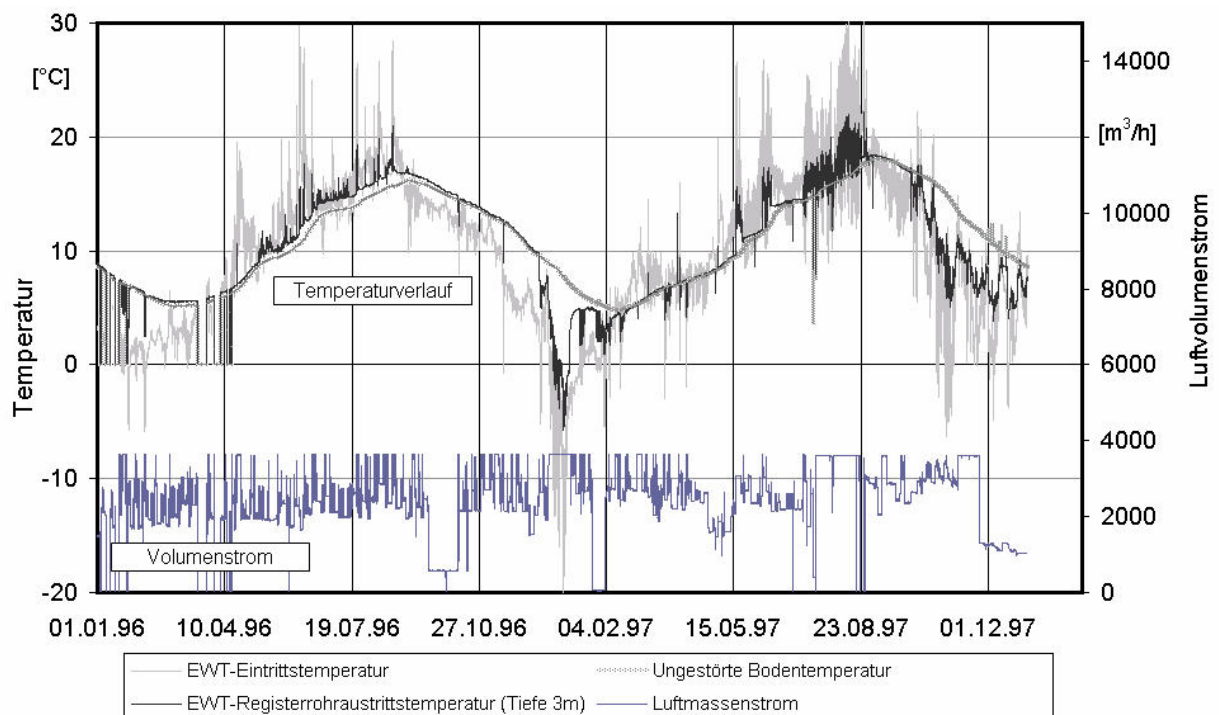


Bild 2.21 Verlauf der Ein- und Austrittstemperaturen des L-EWT-Registers und dem zugehörigen Luftvolumenstrom, 1996/97

In Bild 2.21 ist deutlich die Dämpfung der Schwankungen der Außenlufttemperatur erkennbar. Die Leistung des Gesamtsystems zeigt gute Ergebnisse. Im Winter konnte während der gesamten Heizperiode 1996/97 für den sinnvollen L-EWT-Betrieb ein durchschnittlicher Temperaturhub der Frischluft von 6 K erreicht werden. Insgesamt wurden im Jahr 1997 etwa 8600 kWh Wärme und 3000 kWh Kälte zur Gebäudeklimatisierung beigetragen. Im Jahr 1996 wurden 6480 kWh Wärme und 4770 kWh Kälte durch den L-EWT bereitgestellt, wobei in diesem Jahr der Teillastbetrieb dominierte.

Im Sommer wurde auch bei Frischlufttemperaturen von über 30°C, die Zulufttemperatur von 22°C nicht überschritten. Dadurch konnte die Kühlung des Sonnenofengebäudes bis zeitweise auf den Sonnenofenraum, der besonders hohe thermische Lasten aufweist, ausschließlich durch den L-EWT realisiert werden.

2.5 Schwankungsbreiten der Erdtemperaturen

Bei zusätzlicher Betrachtung der Temperaturen, die direkt an den Rohren gemessen werden und bei Nichtbetrieb des L-EWT die Erdreichtemperatur darstellen, erhöht sich die Bandbreite aller Temperaturen auf bis zu 3 K im Winter und bis zu 4,5 K im Sommer (hier ist der Einfluss des L-EWT-Betriebes enthalten). Diese Temperaturverläufe sind in Bild 22 dargestellt. Bei **3,0 m** Tiefe betragen die Schwankungsbreiten knapp 1 K Mit Berücksichtigung der Wandtemperaturen erhöht sich der Unterschied auf etwa 2 K.

Die Wandtemperaturen der Rohre sind im Winter geringer und im Sommer höher als die Erdreichtemperaturen. Dieses ist durch die natürliche Luftzirkulation und damit auch geringe Annäherung an die Außentemperatur in den Rohren auch bei Nichtbetrieb des Ventilators zu erklären.

Es lassen sich aus den Kurvenverläufen **Umkehrpunkte** erkennen, in denen die niedrigeren Temperaturen im Winter zu den höheren im Sommerfall werden. Besonders ausgeprägt ist dieses bei den Wandtemperaturen der Rohre, wie im oberen Absatz bereits erläutert.

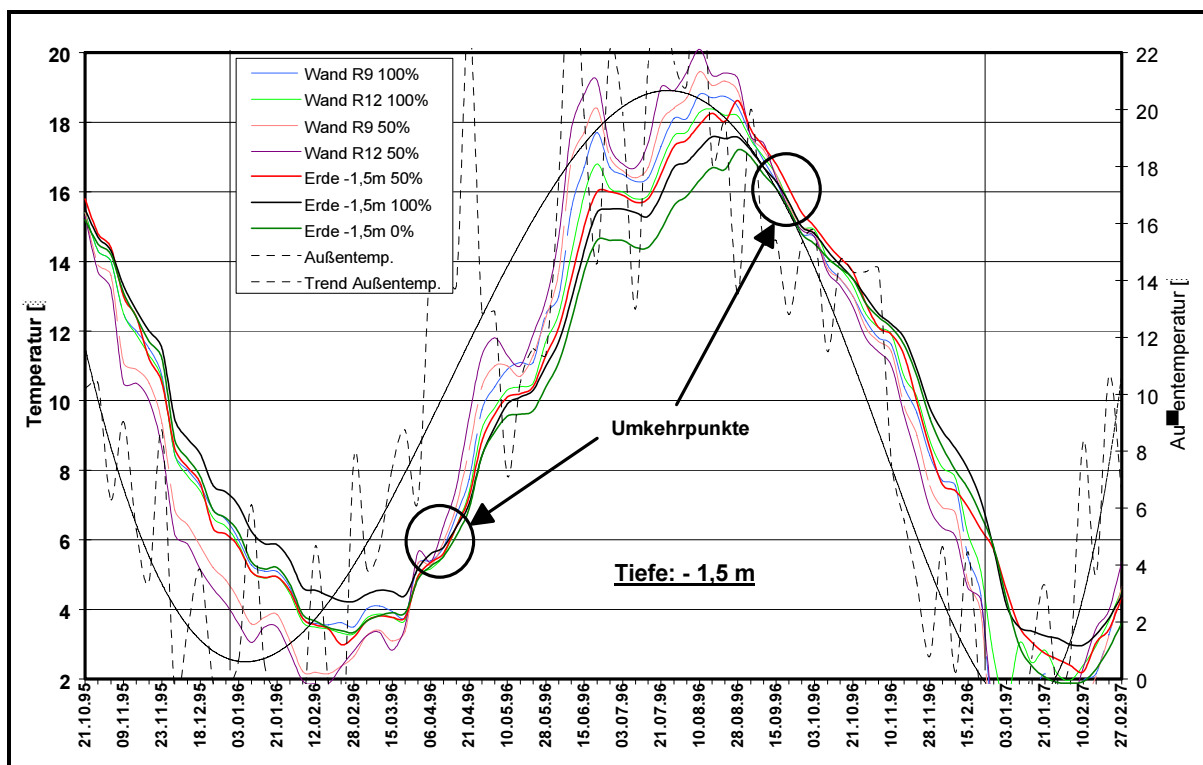


Bild 2.22 Erdreich-,Wandtemperaturen und Umkehrpunkte in einer Tiefe von 1,5 m

Zurückzuführen sind diese Änderungen im Boden auf unterschiedliche Temperatur-leitfähigkeiten a_E , die z.B. durch Erdfeuchtedifferenzen (siehe nächsten Absatz) hervorgerufen werden. Zu erkennen sind diese Punkte in den Bildern 2.22 und 2.23. Die dünneren Kurven stellen die Wandtemperaturen und die dickeren die reinen Erdreichtemperaturen dar.

Weiterhin ist in den beiden Abbildungen der Jahresaußentemperaturverlauf gestrichelt eingezeichnet. Hieraus lassen sich die Zeiträume der Temperatur-Verschiebung, d.h. die Temperatur-Pufferung des Erdreiches, erkennen.

Die Zeitverschiebungen in den beiden Tiefen sind in Tabelle 2.12 dargestellt. Bei diesen Angaben sind **nicht** die kurzfristigen Annäherungen an die Außentemperatur durch den Betrieb des L-EWT berücksichtigt, sondern in den Kurven sind die durch den L-EWT nicht beeinflussten Bodentemperaturen aufgezeichnet.

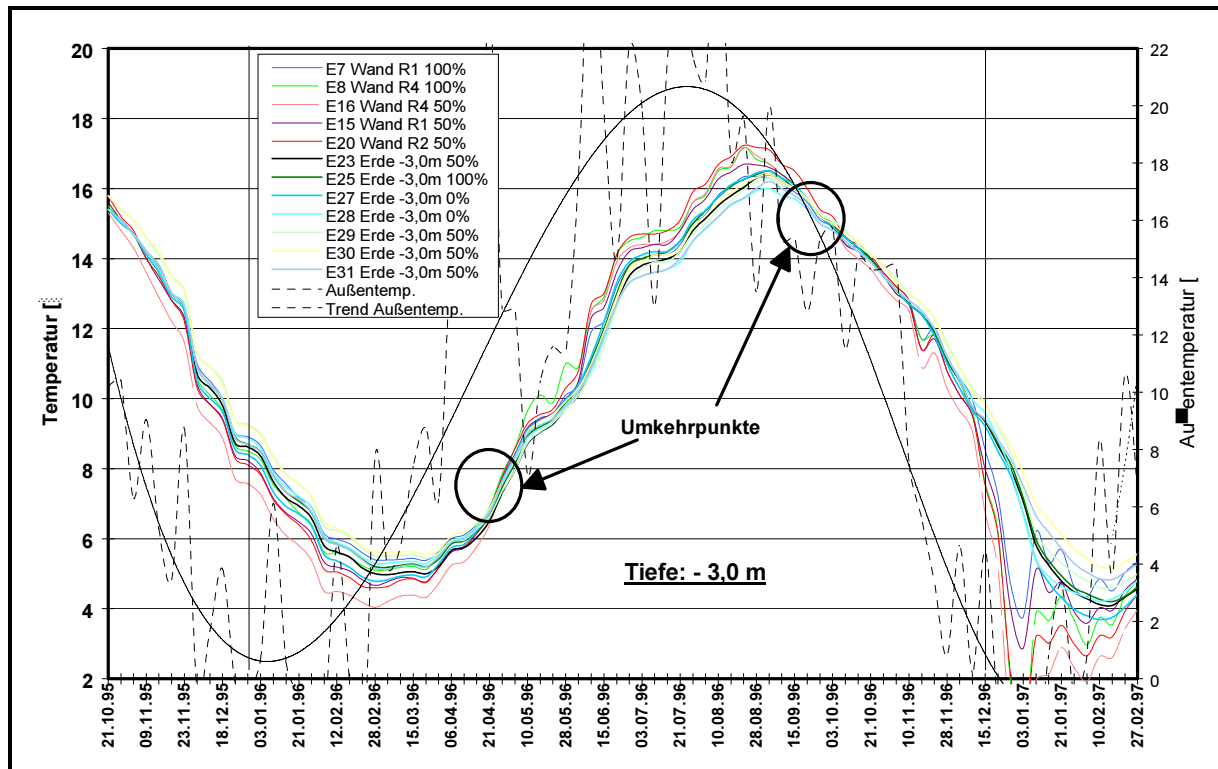


Bild 2.23 Erdreich-,Wandtemperaturen und Umkehrpunkte in einer Tiefe von 3,0 m

Einen entscheidenden Einfluss auf die Temperatur-Verschiebung in den beiden betrachteten Tiefen hat nur der Jahresaußentemperaturverlauf, da schon in einer Tiefe von einem Meter die maximale Tagestemperaturschwankung nur noch 1 % des Wertes an der Oberfläche beträgt. Die Temperatur-Schwingungen im Erdreich sind im Vergleich zum Außentemperaturverlauf gedämpft und phasenverschoben, wobei die Periodendauer, d.h. die Frequenz der Schwingung, konstant bleibt.

Tabelle 2.12 Phasenverschiebung der Temperatur zwischen mittlerer Außenluft und Verlegetiefe

Verlegetiefe	Phasenverschiebung
- 1,5 m	ca. 1 Monat
- 3,0 m	ca. 1,5 Monate

In der Bild 2.24 ist der auf dem Gelände der DLR gemessene Jahresaußentemperaturverlauf (blaue Kurve) im Vergleich zu Werten aus der DIN 4710 und auf dem Flughafen Köln-Wahn gemessenen Werten aufgetragen. Das durchschnittliche Temperaturniveau des Sommers 1996 war deutlich geringer als das langjährige Mittel in Essen (rote und schwarze gestrichelte Kurven).

Auch im Winter 1996/97 wurden tiefere Temperaturen gemessen, so dass die blaue Kurve über das Jahr auf einem niedrigeren Niveau lag. Die grüne Kurve stellt die gemessenen und über einen Monat gemittelten Temperaturen des nahgelegenen Flughafens Köln-Wahn dar. Anzumerken ist, daß die Temperaturen des Flughafenbereiches niedriger sind als auf dem Gelände der DLR, das nicht so große Freiflächen wie der Flughafen aufweist.

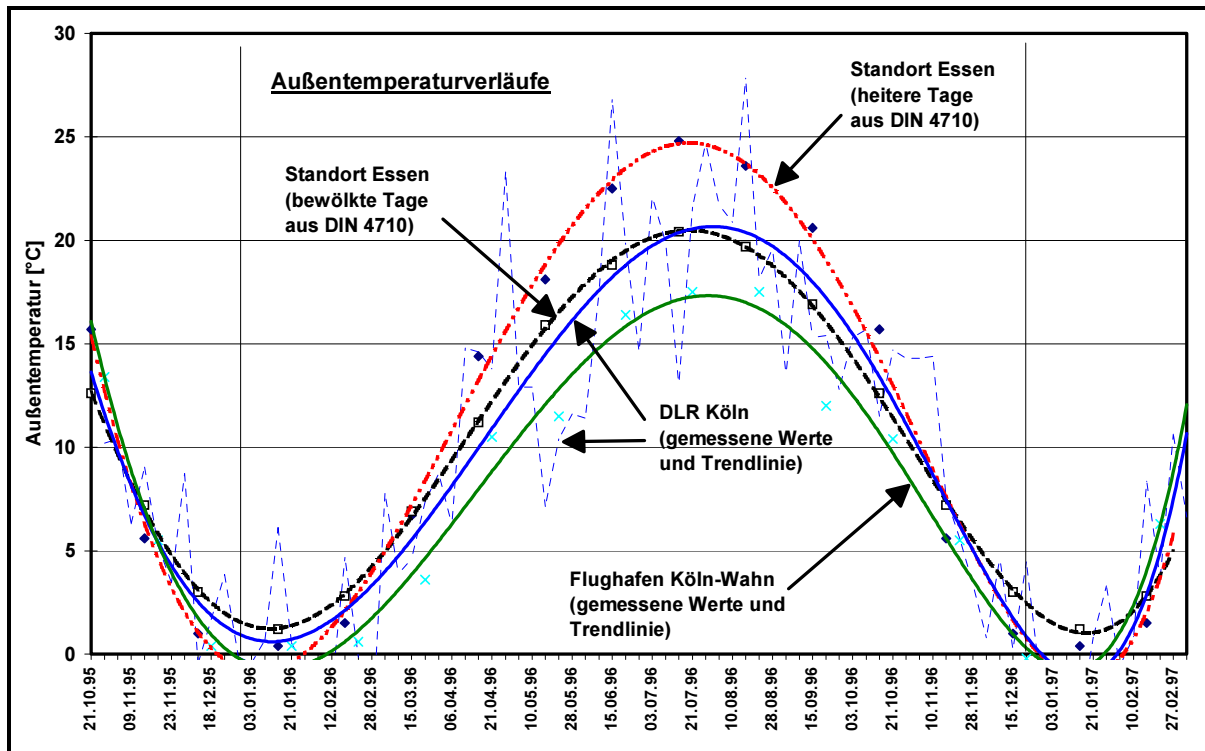


Bild 2.24 Vergleich der gemessenen Außentemperatur mit Wetterdaten aus der DIN 4710 und gemessenen Werten des Flughafens Köln-Wahn

2.6 Beispiele für grundsätzliches Systemverhalten

Die Auswertung der Messungen über mehrere Jahre vermitteln die grundsätzlichen Zusammenhänge eines L-EWT-Betriebes. So ist bei der Systemauslegung für die sommerliche Kühlung besonders interessant, wie stark die täglichen Tag-Nacht-Temperaturextrema von dem Mittelwert des Tages abweichen können. Dies ist eine wichtige Erkenntnis, wenn Simulationsprogramme zum Einsatz kommen sollen, die nur mit dem mittleren Ganzjahresverlauf arbeiten.

Die zweite Dezember- und erste Januarhälfte (96/97) zeichneten sich durch eine lange Dauerfrostperiode mit Temperaturspitzen bis minus 22 °C aus. So konnte nicht nur das Leistungs- und Ertragsverhalten unter Extrembelastungen beobachtet werden, sondern auch das mögliche Ermüdungsverhalten des Registers, mit dem bei länger andauernden Extrem-Wetterlagen zu rechnen ist. Die Bilder 2.25 und 2.26 zeigen diese vierwöchige Kältephase und das darauf reagierende Registerprofil.

Testanlagen im Verbundprojekt

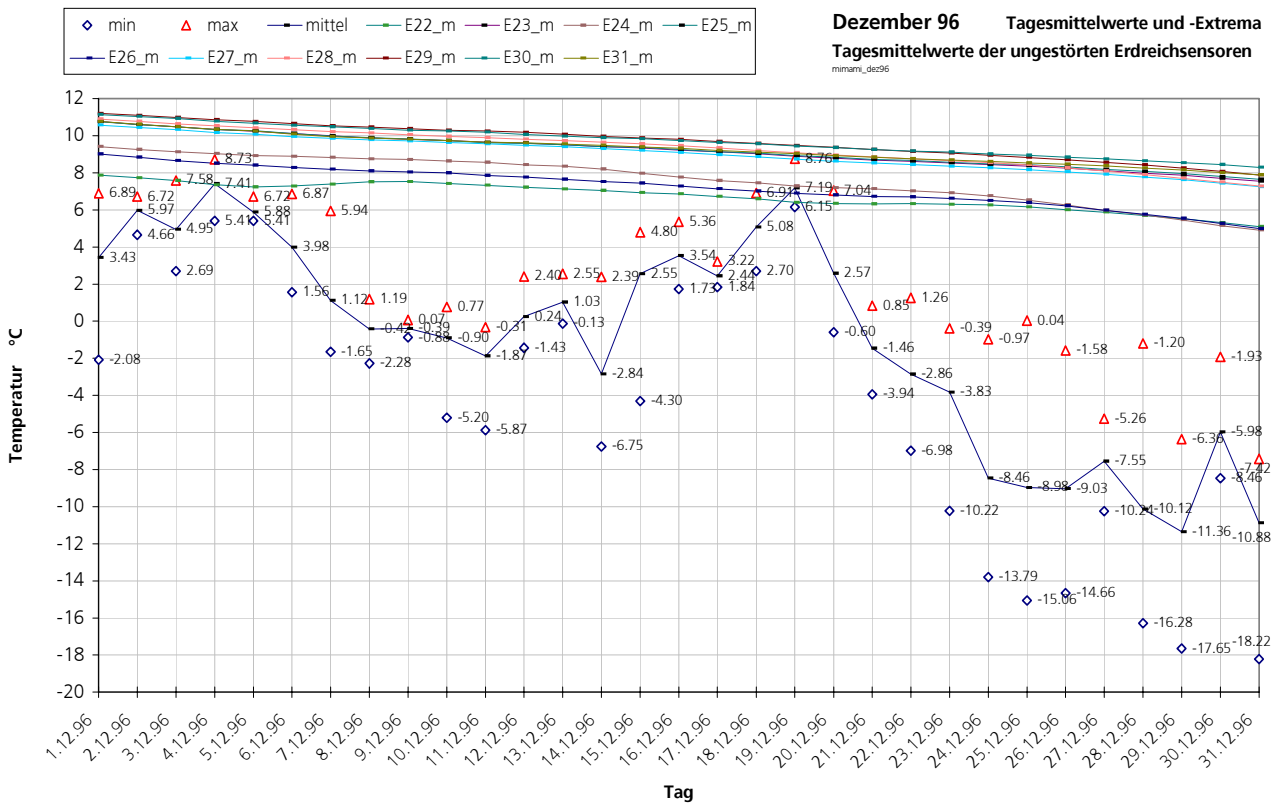


Bild 2.25 Dezember 1996 mit Dauerfrost über Silvester/Neujahr

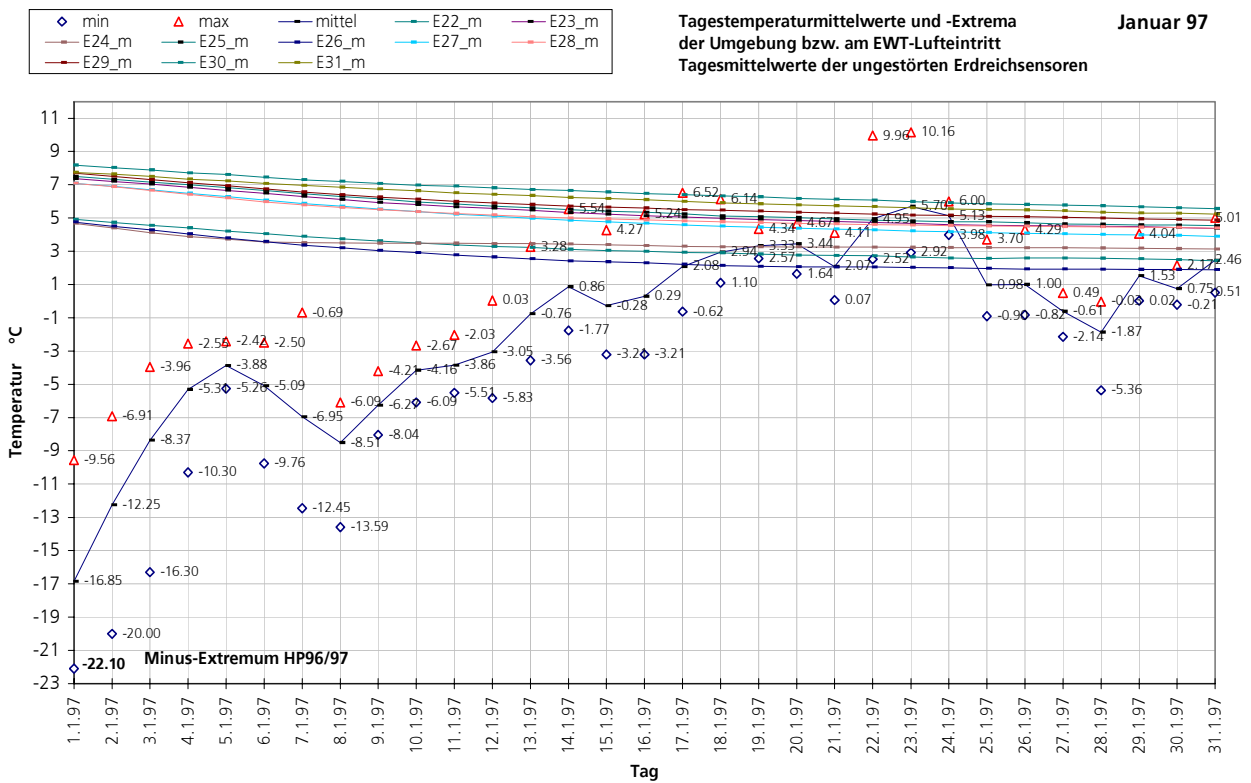


Bild 2.26 Januar 1997 im Dauerfrost

Die Bilder 2.27 und 2.28 zeigen Messergebnisse am L-EWT des DLR für eine sommerliche Phase im Mai und Juli. Trotz der zum Zeitpunkt Juli schon relativ hohe Bodentemperaturen (auf dem Verlegeniveau der Rohre) ist ein deutlicher Kühleffekt festzustellen. Unauffällig verlief ein eigentlich erwarteter *Ermüdungseffekt* des Systems, mit dem innerhalb der heißen Woche gerechnet wurde.

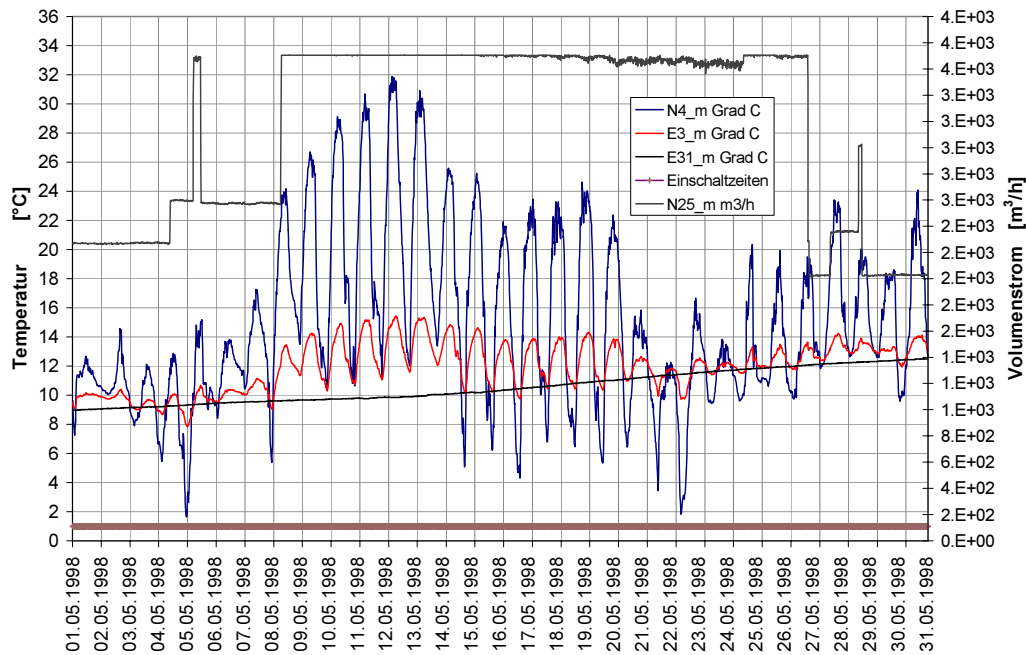


Bild 2.27 Besonders ausgeprägter Kühleffekt zu Beginn der warmen Jahreszeit durch noch relativ niedrige Bodentemperaturen

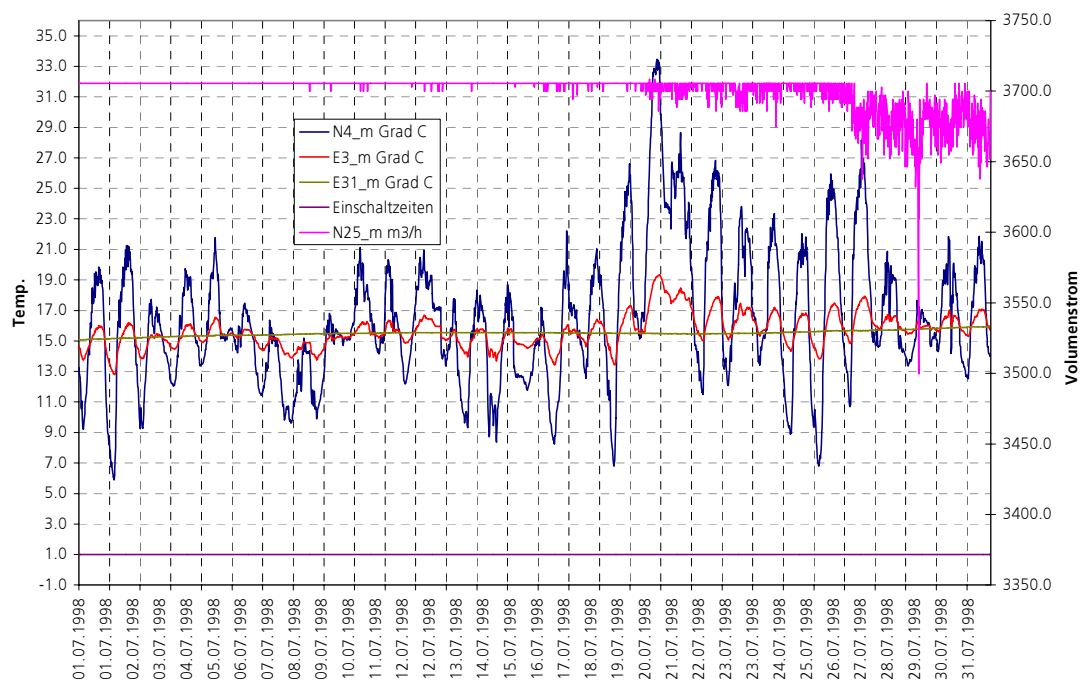


Bild 2.28 Betriebsverhalten im Juli (Kühlbedarf) im Mai mit z.B. Temperaturabsenkungen von 32 auf 15,2 °C

Von besonderer Bedeutung für den L-EWT-Betrieb im Winter ist seine Eigenschaft zur Vorwärmung der Zuluft. Sehr wichtig ist es, wenn auch bei extremer Kälte die Luft über die Null-Grad-Grenze erwärmt werden kann, um Frostschutzfunktionen für die nachgeschaltete Anlagentechnik erfüllen zu können.

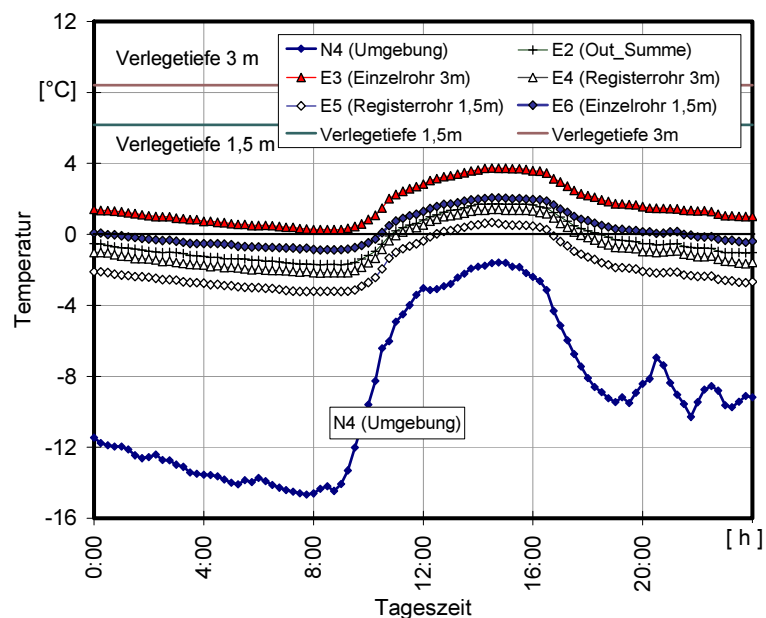
Am Beispiel des Systems in Köln kann die Effizienz der Luftvorwärmung unter verschiedenen Verlegebedingungen in Bezug auf die Null-Grad Marke am 26.12.1996 dargestellt werden. Die Ertragsabweichungen kommen durch unterschiedliche Verlegetiefen und durch die Verlegeart Einzelrohr oder Register zustande (Bild 2.29).

Von besonderer Bedeutung für den L-EWT-Betrieb im Winter ist die Eigenschaft zur Vorwärmung der Zuluft, insbesondere das Anheben der Zuluft in den Bereich der Null-Grad-Marke auch bei extremer Kälte, damit die Frostschutzfunktionen für die nachgeschaltete Anlagentechnik erfüllt werden kann.

Bild 2.29 zeigt die Frostschutzzeigenschaften (Luftaustrittstemperaturen der unterschiedlichen Vergleichsrohre in Bezug auf die Null-Grad Marke am 26.12.1996

Bild 2.29

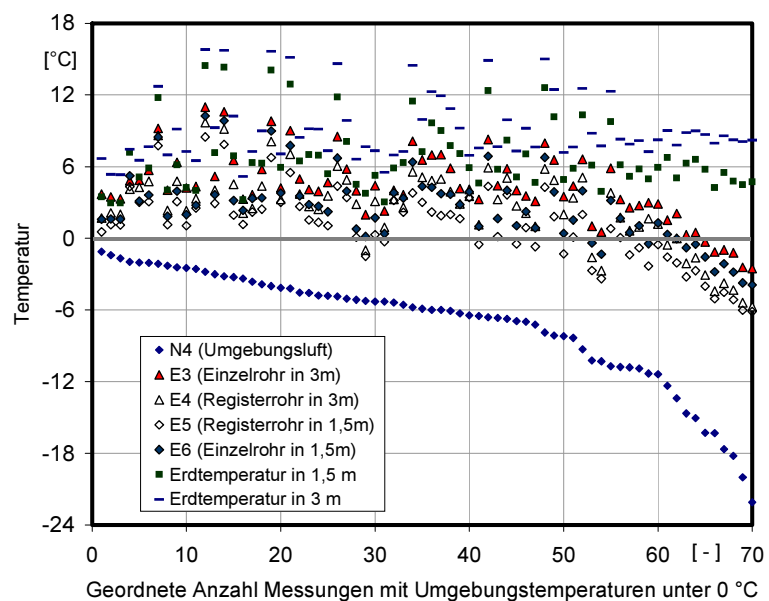
L-EWT im Winterbetrieb
Austrittstemperaturen der
verschiedenen L-EWT-Rohre
über einen Tag



In Bild 2.30 wurden 70 Temperaturwerte am jeweiligen L-EWT-Austritt unterhalb der Null-Grad-Marke der Umgebungsluft geordnet aufgetragen.

Bild 2.30

Geordnete L-EWT-
Austrittstemperaturen
bei Umgebungstemper-
aturen unter Null
Grad Celsius



Die Ertragsabweichungen in Bild 2.29 kommen durch unterschiedliche Verlegetiefen und durch die Verlegeart Einzelrohr oder Register zustande.

Die Differenzen im Luftvorwärmvermögen zwischen Verlegehorizonten und Rohranordnungen ist in Form einer geordneten Dauerlinie in Bild 2.31 dargestellt.

Zu erkennen sind die geordneten Umgebungstemperaturen unter Null Grad und die dazugehörigen L-EWT-Austrittstemperaturen. Erst bei extremen Außenwerten gelingt es dem L-EWT unter den gegebenen geometrischen Vorgaben nicht mehr, die Austrittswerte über der Null-Grad-Celsius-Marke zu halten.

Im Bereich 0/-10°C liegen fast alle Austrittstemperaturen über Null Grad, unabhängig vom Erdreich-Temperaturniveau. Dies sind 74,3% aller Messungen im Betrachtungszeitraum. Die Extremtemperaturen im Bereich -10 bis -20°C treten auffälliger Weise immer in der späten Phase des Winters, also bei den niedrigsten Erdtemperaturen auf. Dies erschwert die Einhaltung der Frostschutzfunktion und muss bei der Anlagenplanung beachtet werden.

Im Sommer wurde auch bei Frischlufttemperaturen von über 30°C, die Zulufttemperatur von 22°C nicht überschritten. Dadurch konnte die Kühlung des Sonnenofengebäudes bis zeitweise auf den Sonnenofenraum, der besonders hohe thermische Lasten aufweist, ausschließlich durch den L-EWT realisiert werden.

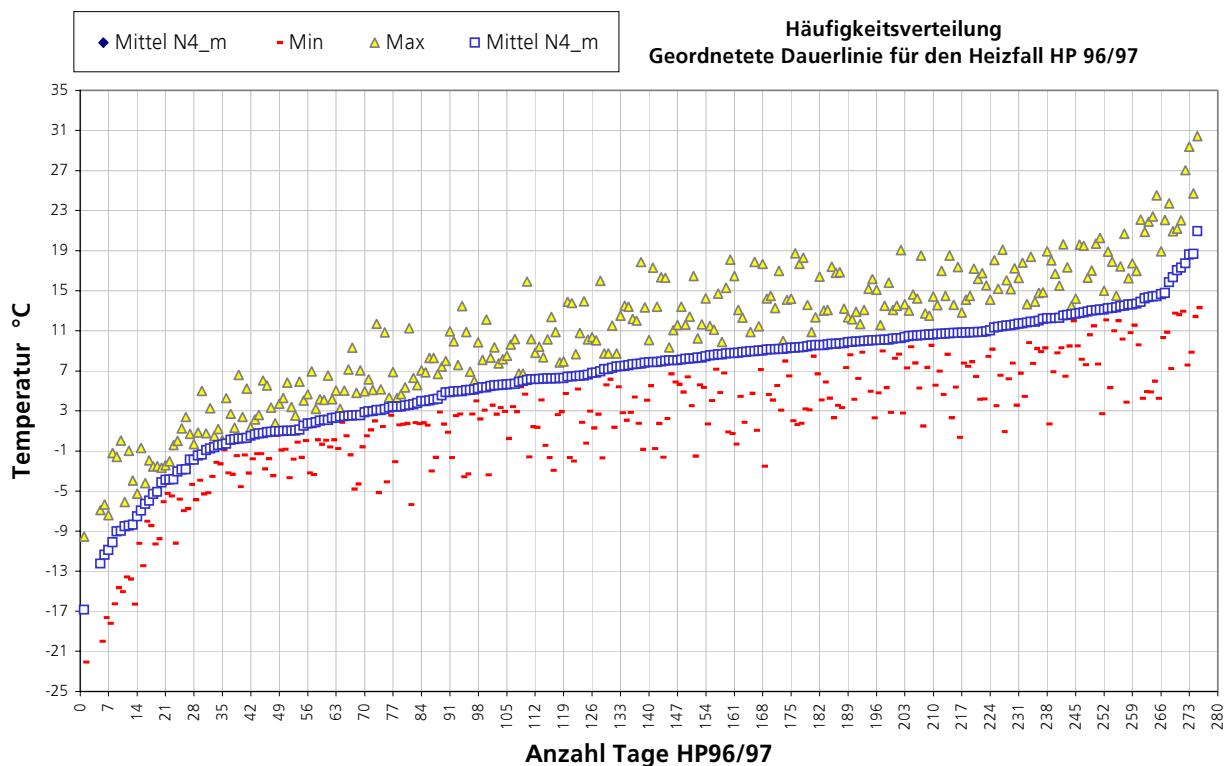


Bild 2.31 geordnete Dauerlinie der Tagesergebnisse von 276 Messtagen

2.7 Theoretisches Leistungspotential innerhalb der Heizperiode

Das theoretische Leistungspotenzial eines L-EWT wurde für die Heizperiode 96/97 am Beispiel 1.9.96 bis 31.5.97 genauer analysiert. Dies kann allerdings nur an Daten erfolgen, die innerhalb der Messkampagne aufgenommen wurden, da eine langjährige Datenaufnahme, welche Schwankungen der typischen Unterschiede der jährlichen Wettersituation ausgleichen würden, aus Kostengründen nicht möglich war. Tabelle 2.13 stellt dar, inwiefern sich Temperaturdifferenzen zwischen Umgebungsluft und ungestörter Erdreichtemperatur nutzen lassen.

Tabelle 2.13 Auswertung der Messdaten über eine Heizperiode

Monat der Heizperiode	Bereinigte Temperaturdifferenzen zwischen Tagestemperaturen und ungestörtem Erdreich in Bezug auf das Ertragspotential $\vartheta_{\text{Erd}} - \vartheta_{\text{Außenluft}} > 0$		Theoretische Durchschnittsleistung für Volumenstrom 300 m ³ /h auf Basis realer Messungen		Theoretischer monatlicher Arbeitsertrag für Volumenstrom 300 m ³ /h auf Basis realer Messungen		Anmerkungen
			1,5 m	3 m	1,5 m	3 m	
	E22 - N4 für > 0 1,5 m	E30 - N4 für > 0 3m	°C		kW		
					kWh		
September	5,237	4,564	0,5237	0,4564	377,064	328,608	Erdreich warm: Ertrag hoch
Oktober	4,120	4,511	0,4120	0,4511	306,528	335,618	
November	5,659	7,324	0,5659	0,7324	407,448	527,328	
Dezember	7,708	10,663	0,7708	1,0663	573,475	793,327	sehr kalt: Ertrag hoch
Januar	5,084	7,894	0,5084	0,7894	378,250	587,314	
Februar	0,458	1,264	0,0458	0,1264	30,778	84,941	Erdreich kalt: Ertrag niedrig sehr warmer Februar
März	0,989	1,121	0,0989	0,1121	73,582	83,402	
April	2,223	2,244	0,2223	0,2244	160,056	161,568	Erdreich wird wärmer: Ertrag mittel
Mai	1,490	0,872	0,1490	0,0872	110,856	64,877	

Leistungspotential.doc

Die Auswertung erfolgte hierbei über Kompletprofile aus Monatsfiles, und nicht aus Mittelwerten, da Gesamttagesmittelwerte das tatsächliche Nutzpottential verfälschen. In Bild 2.32 sind bereits Einsparpotentiale für Tagesmittelwerte zu sehen, auch wenn keine Regelung eingreift. Mit Regelung ("sinnvolle Betriebstage") verbessert sich das Ertragsprofil deutlich.

Zu beachten ist, dass die tiefen Temperaturen in Bereichen eintreten, wo das Erdreichniveau noch relativ hoch ist. Bei Betrachtung der Tagesminima (statt basierend auf Tagesmittelwerten) ergeben sich die besten Ergebnisse (Orange: hohes Sparpotential bei Minimalwertbetrachtung).

Gemessene und aufsummierte Tagesmittelwerte über die Heizperiode HP 96/97 Temperatur-Anhebungspotentialdes EWT gegenübermittlerer Außenlufttemperatur

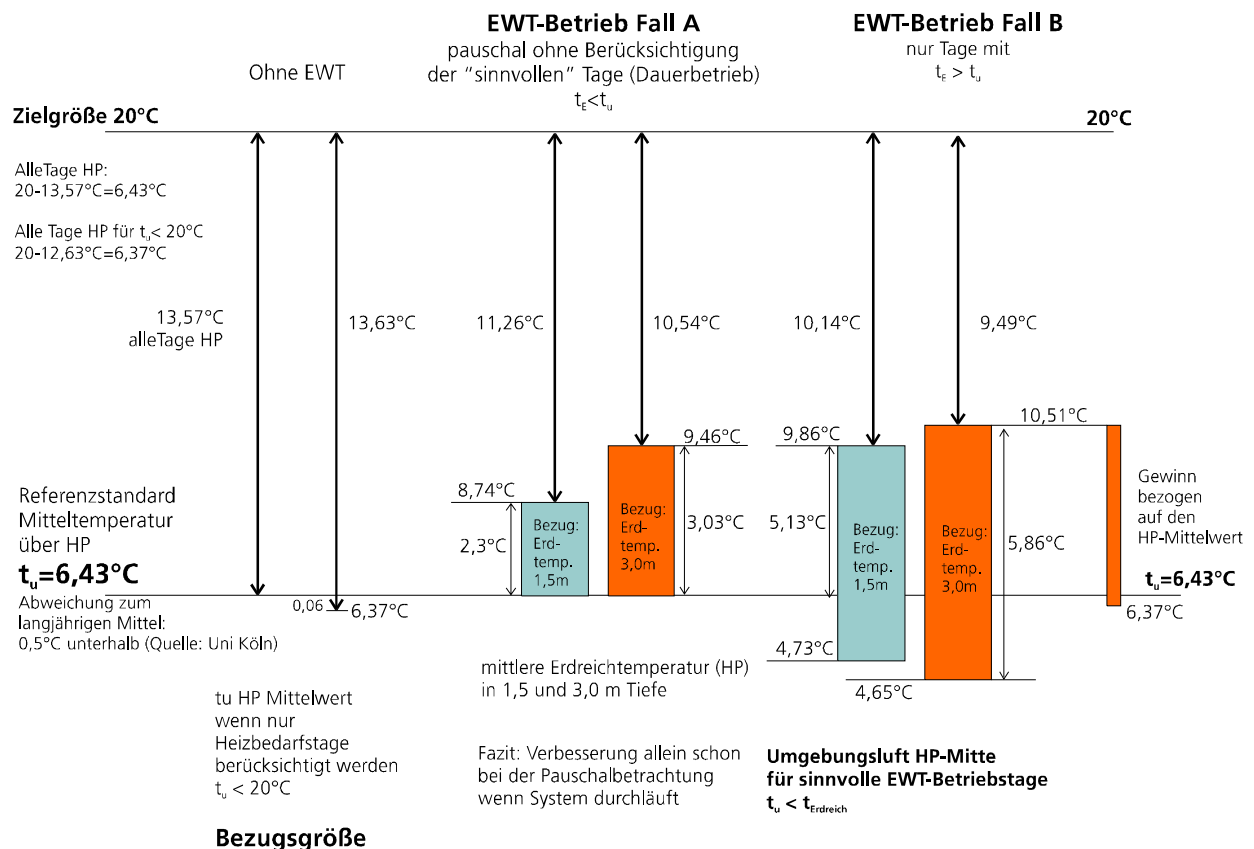


Bild 2.32 Ausgleich und Objektivierung durch mehrere Heizperioden

2.8 Anfang und Ende der Kühlphase

Für die Kühlfunktion im Sommer ist eine L-EWT-typische Abschwächung des Leistungspotenzials über die Zeit von Bedeutung. In den Bildern 2.33 und 2.34 ist für vergleichbare Umgebungsverhältnisse die Reduzierung der Kühlleistung zwischen Anfang (Mai) und Ende der warmen Wetterphase (August) zu erkennen. Dies liegt nicht an Ermüdungseffekten durch den anhaltenden Betrieb des L-EWT, sondern nur an der allmählichen Erhöhung des Erdtemperaturniveaus, das phasenverschoben dem Außenluftprofil folgt.

Diese Erkenntnis besagt für die Anlagenauslegung, dass der Auslegungszeitpunkt auf Basis der bekannten Systemdaten im mittleren Augustbereich (worst case) erfolgen sollte, insbesondere dann, wenn außer dem L-EWT kein ergänzendes Kühlgerät vorgesehen ist. Hier sind die Außentemperaturen noch sehr hoch und die Bodentemperaturen nähern sich bereits ihrem Jahresmaximum.

Wie ausgeprägt die Ertragsunterschiede zwischen Beginn und Ende der Kühlzeit dadurch sein können, ist evident.

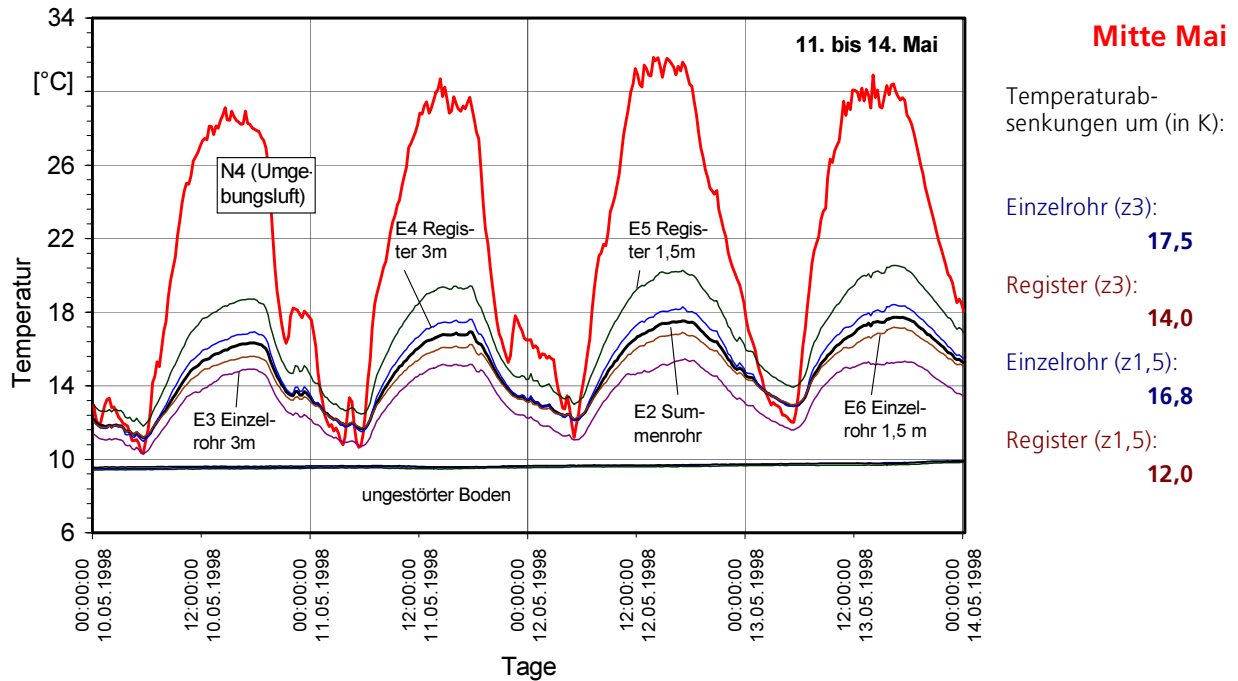


Bild 2.33

Luftaustrittstemperaturen des L-EWT; Beginn der Sommerkühlung an mehreren heißen Tagen im Mai

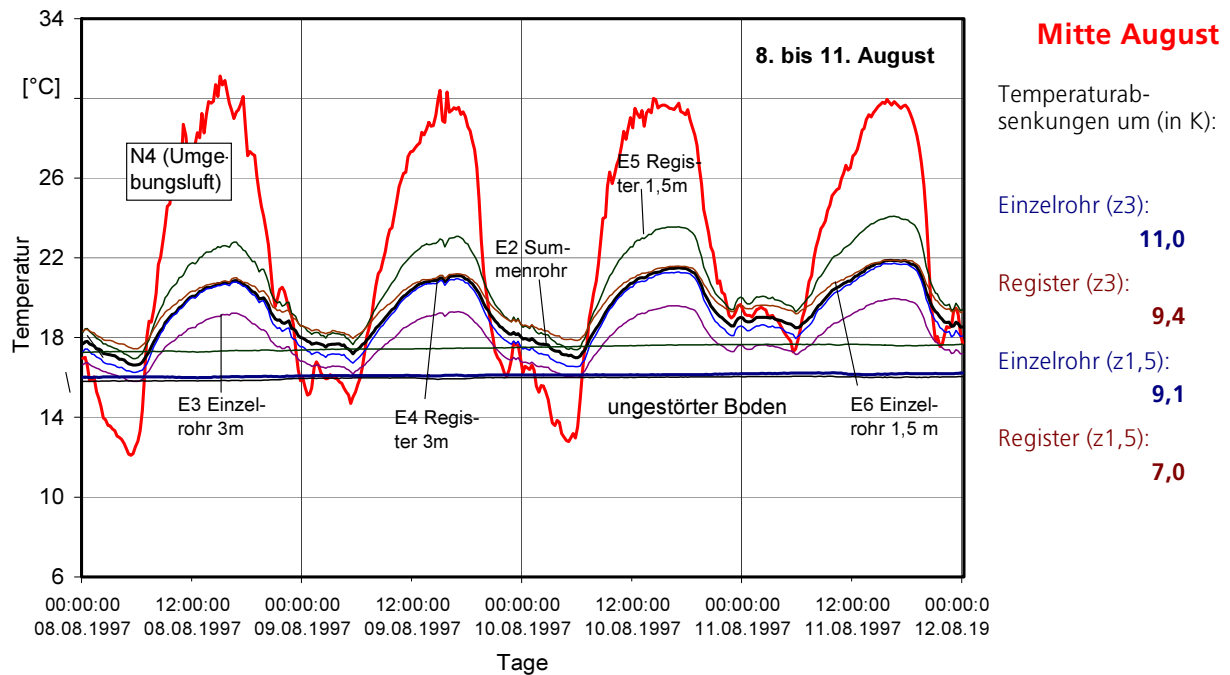


Bild 2.34

Luftaustrittstemperaturen des L-EWT Ende der Sommerkühlung; Systemverhalten am oberen Grenzwert der Bodentemperatur

Zu Beginn der relevanten Zeit im Mai ist aufgrund der noch relativ niedrigen Bodentemperaturen das Kühlungsverhalten um so effektiver, dass der L-EWT im Mischbetrieb geschaltet werden sollte. Der August zeigt dazu im Vergleich eine deutliche Leistungsverminderung.

Für die Anlagenauslegung als Kühlsystem muss von den ungünstigsten Bedingungen ausgegangen werden, die sich für den Betrieb im Sommer einstellen. Dies ist ein Zeitraum, der im mittleren August-Bereich liegt, weil dann die Außentemperaturen noch sehr hoch sind, sich die Bodentemperaturen aber bereits ihrem Jahresmaximum nähern. Wie ausgeprägt die Ertragsunterschiede zwischen Beginn und Ende der Kühlzeit dadurch sein können, kann anhand von Messergebnissen des L-EWT in Köln gezeigt werden. Im Mai ist aufgrund der noch relativ niedrigen Bodentemperaturen das Kühlungsverhalten derartig effektiv, dass der L-EWT im Mischbetrieb "gefahren" werden muss. Über den Sommer sieht man eine deutliche Leistungsabschwächung (Bild 2.34).

Dieser Zeitpunkt sollte daher als "worst-case" für die Anlagenauslegung herangezogen werden; Insbesondere dann, wenn außer dem L-EWT kein ergänzendes Kühlgerät vorgesehen ist.

Analog hierzu verhält es sich in der Heizperiode, wobei sich je nach Bodenart im Zeitbereich Februar das Temperaturminimum im Boden einstellt. Hier sollte bei der Auslegung darauf geachtet werden, dass die Luftaustrittstemperatur unter den ungünstigsten Bedingungen die Null-Grad-Marke erreicht, um Frostschutzaufgaben für die nachgeschaltete Anlagentechnik noch übernehmen zu können. Tabelle 2.14 zeigt in einem Vergleich von Messwerten zwischen November und Februar, ebenfalls an der Kölner Anlage, dass sich über die Heizperiode das Ertragsverhalten in etwa halbieren kann.

Tabelle 2.14 Leistungsunterschiede je nach Verlegart am Beginn und Ende der Heizperiode

	November 98	Februar 99
mittlere Umgebungstemperatur über EWT-Betrieb	0,6 °C	1,07 °C
mittlere ungestörte Bodentemperaturen		
3,0 m	12,1 °C	4,99 °C
1,5 m	10,1 °C	6,91 °C
Gesamterträge	5270 kWh	2274 kWh
Einzelerträge		
E3 (3,0 m)	590	292
E4 (3,0 m)	475	211
E5 (1,5 m)	331	124
E6 (1,5 m)	403	153

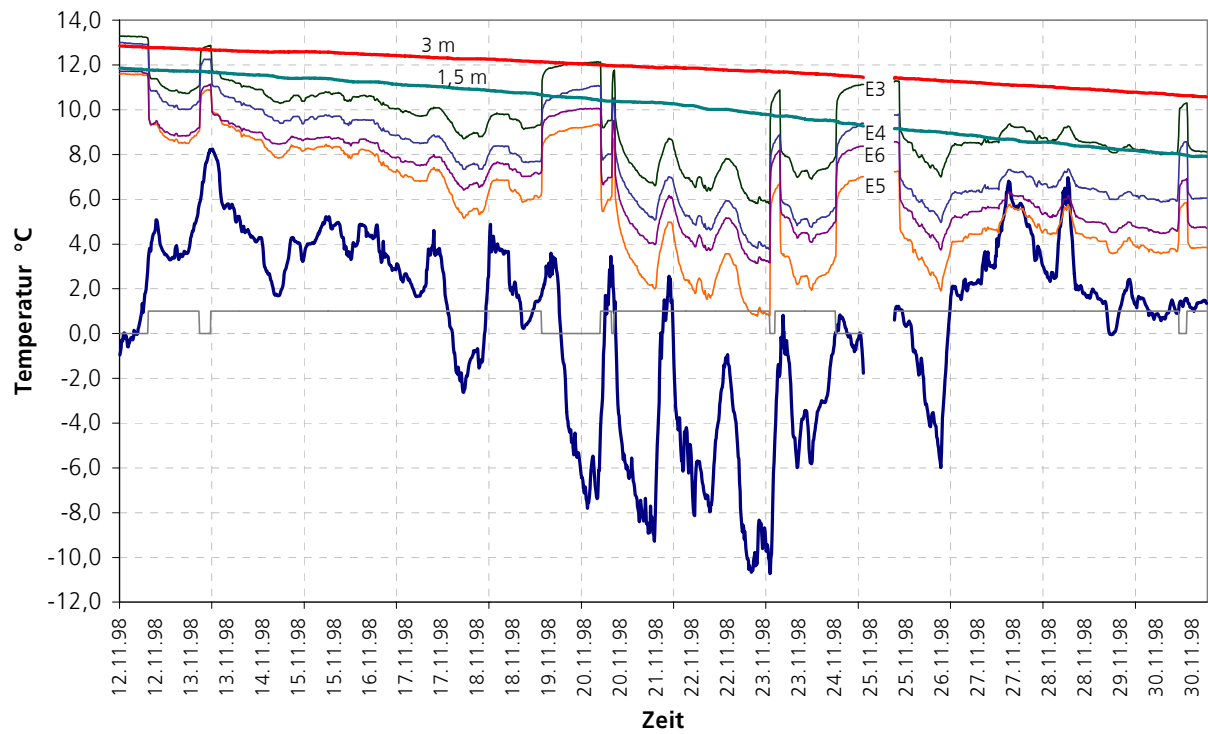


Bild 2.35 Betriebsverhalten zu Beginn der Heizperiode im November 98

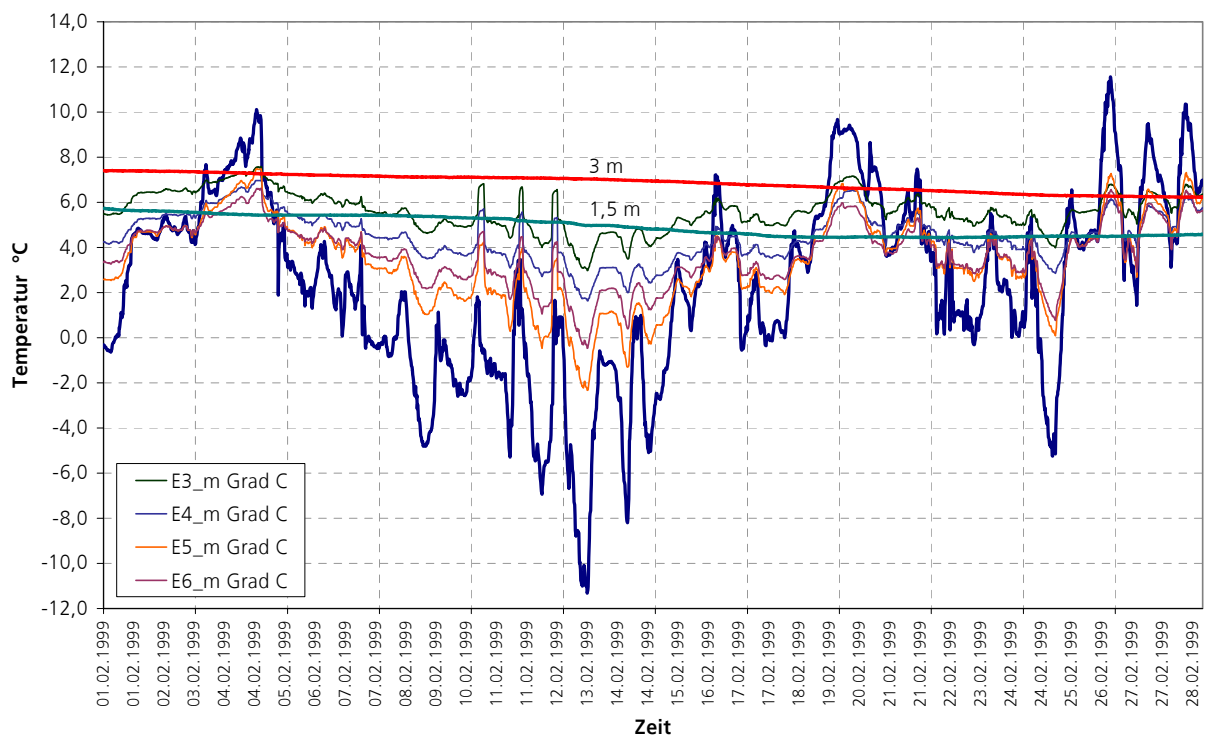


Bild 2.36 Betriebsverhalten in der fortgeschrittenen Heizperiode im Februar 99

Die entsprechenden Ertragswerte sind im Vergleich in Tabelle 2.15 dargestellt.

Tabelle 2.15 Leistungsunterschiede zu unterschiedlichen Zeitpunkten innerhalb der Heizperiode

November 98	Erträge kWh	bezogen auf E3 %	$\theta = \frac{\vartheta_{\text{Umgebung}} - \vartheta_{\text{EWT-OUT}}}{\vartheta_{\text{Umgebung}} - \vartheta_{\text{Erde ungestört}}}$	Summe der Einzelergebnisse
E2	5270		0,581	5023 kWh
E3 (3,0)	590		0,713	1 x 590 (à 300m ³ /h)
E4 (3,0)	475	80,5	0,574	5 x 475
E5 (1,5)	331	56,1	0,4842	5 x 331
E6 (1,5)	403	68,3	0,589	1 x 403
Februar 98	Erträge kWh	bezogen auf E3 %	$\theta = \frac{\vartheta_{\text{Umgebung}} - \vartheta_{\text{EWT-OUT}}}{\vartheta_{\text{Umgebung}} - \vartheta_{\text{Erde ungestört}}}$	Summe der Einzelergebnisse
E2	2274		0,577	2120 kWh
E3 (3,0)	292		0,743	1 x 292 (à 300m ³ /h)
E4 (3,0)	211	72,2	0,537	5 x 211
E5 (1,5)	124	42,5	0,469	5 x 124
E6 (1,5)	153	52,4	0,579	1 x 153

2.9 Vergleich Register zu Einzelrohr

Bei großen Volumenströmen ab etwa 10000 m³/h ist man aus strömungstechnischen und konstruktiven Gründen gezwungen, ein Register einzusetzen. Durch die freie Auswahl von Anzahl, Länge, Durchmesser, Abstand und Verlegetiefe ergeben sich viele mögliche Registerkombinationen. Das DLR-System kann hierbei als typische Konfiguration bezeichnet werden, die häufig so oder in ähnlicher Ausführung zur Anwendung kommt. Durch die Vergleichsmessung zwischen Einzelrohr und baugleichem Registerrohr in zwei typischen Verlegetiefen, sind grundsätzliche Zusammenhänge darstellbar. Wichtig ist insbesondere das Ertragsverhalten zu Beginn und zum Ende einer Heiz- oder Kühlphase, weil sich über diese Zeitbereiche das Systemverhalten deutlich ändert. Nachfolgend werden für die typischen Betriebsituationen Messungen aus den Jahren 97 und 98 in Beziehung gebracht und bewertet. Folgende Rohre mit Volumenströmen von 300 m³/h werden miteinander verglichen:

E3 Einzelrohr in 3 m Tiefe	E4 Registerrohr in 3 m Tiefe
E5 Registerrohr in 1,5 m Tiefe	E6 Einzelrohr in 1,5 m Tiefe

Als markante Bewertungskriterien gelten die Tage mit extremen Umgebungstemperaturen zu Beginn und zum Ende des Betriebszeitraums. Da aber weit häufiger die Umgebungstemperaturen in mittleren Bereichen liegen, diese aber entscheidend zum Jahres-Ertragsverhalten beitragen, sind diese auch zu bewerten. Beispielhaft wurden folgende Tage aus dem Messdatenbestand herausgezogen:

Umgebungsluft	frühe Phase wärmen/kühlen	späte Phase wärmen/kühlen
sehr warm	sommer_extrem_früh_12.05.98	sommer_extrem_spät_11.08.98
warm	sommer_moderat_früh_8.05.98	sommer_moderat_spät_14.08.98
kalt	winter_moderat_früh_17.11.98	winter_moderat_spät_22.03.97
sehr kalt	winter_extrem_früh_22.11.98	winter_extrem_spät_12.02.98

Bild 2.37

Umgebungs-
luft
sehr warm
frühe und
späte Phase
des
Kühlzeit-
raums

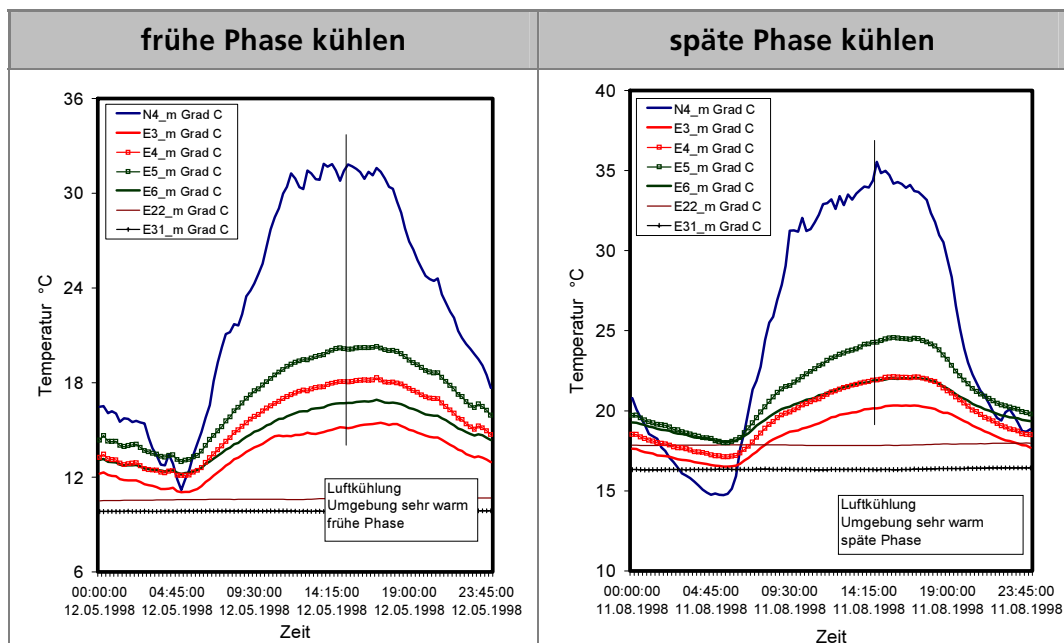
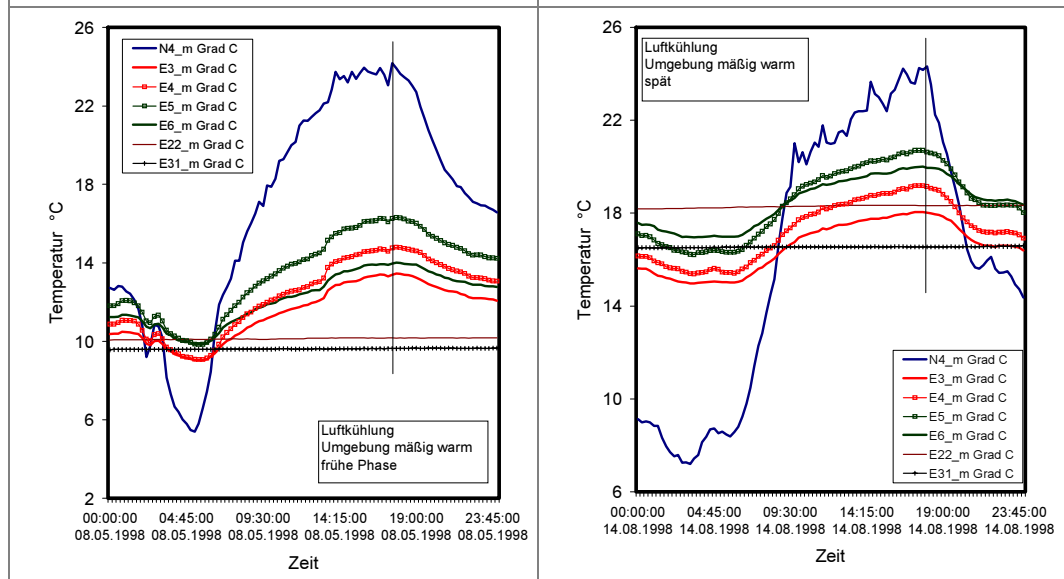


Bild 2.38

Umgebungs-
luft
warm
Ausnahme:
Einzelrohr
1,5 (E6) hier
etwas
besser als
Register 3,0
(E4)



In der späten Phase herauszuheben ist das identische Verhalten von Register in 3 m Tiefe (E4) mit dem Einzelrohr in 1,5 m (E6). Damit kann gezeigt werden, dass die Verluste, die ein einzelnes Registerrohr im Verbund erfährt, durch eine größere Verlegetiefe kompensiert werden kann.

Bild 2.39

Umgebungs-
luft
kalt

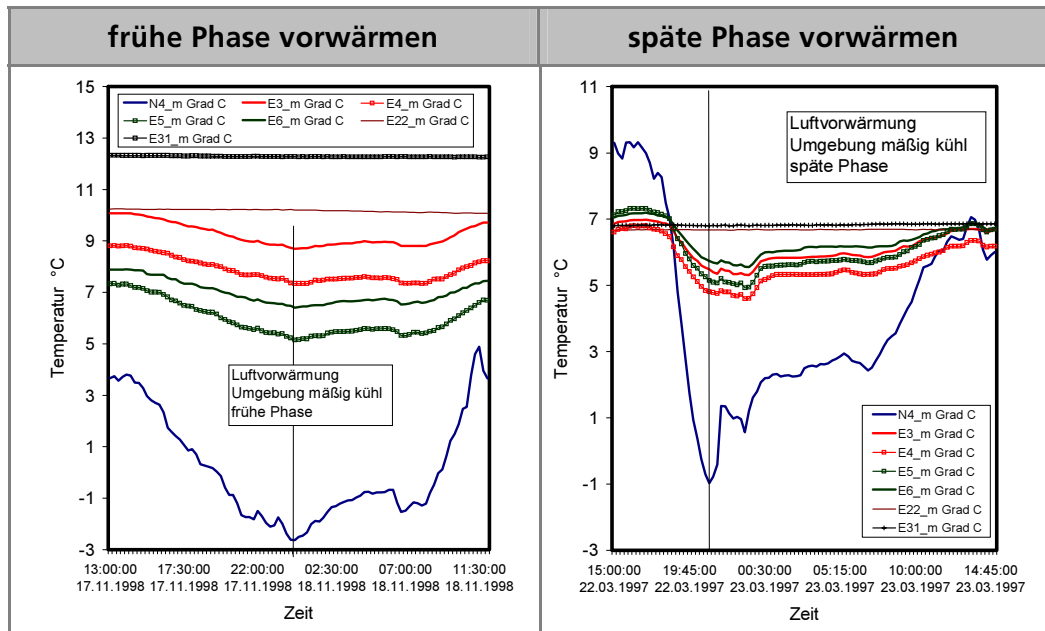
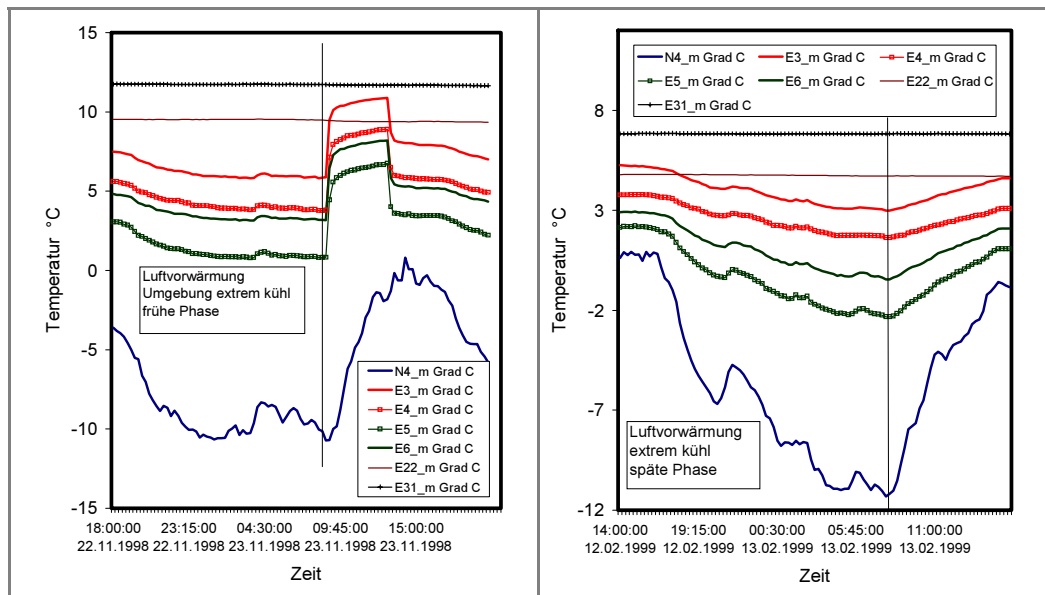


Bild 2.40

Umgebungs-
luft
sehr
kalt



Die Einzelergebnisse der aufgeführten Beispiele, insbesondere die maximal erreichbaren Temperaturspreizungen und prozentualen Unterschiede sind in Tabelle 2.16 und den Bildern 2.41 und 2.42 zusammengefasst dargestellt.

Testanlagen im Verbundprojekt**Tabelle 2.16** Maximale Temperaturspreizungen unter Extrembelastung/Prozentuale Abweichungen

Umgebungsluft	frühe Phase wärmen/kühlen		späte Phase wärmen/kühlen	
	Spreizung max.	Proz. Diff. zu E3	Spreizung max.	Proz. Diff. zu E3
	$T_{1,5} = 10,6 \text{ °C}; T_{3,0} = 9,85 \text{ °C}$		$T_{1,5} = 16,3 \text{ °C}; T_{3,0} = 17,8 \text{ °C}$	
sehr warm	U-E3 = 16,7 K U-E4 = 13,8 K U-E5 = 11,7 K U-E6 = 15,1 K	U-E3 = 100 % U-E4/U-E3 = 82,6% U-E5/U-E3 = 70,0 % U-E6/U-E3 = 90,4 %	U-E3 = 15,3 K U-E4 = 13,4 K U-E5 = 11,0 K U-E6 = 13,5 K	U-E3 = 100 % U-E4/U-E3 = 87,6 % U-E5/U-E3 = 74,5 % U-E6/U-E3 = 88,3%
	$T_{1,5} = 10,2 \text{ °C}; T_{3,0} = 9,63 \text{ °C}$		$T_{1,5} = 18,3 \text{ °C}; T_{3,0} = 16,6 \text{ °C}$	
warm	U-E3 = 10,7 K U-E4 = 9,4 K U-E5 = 7,9 K U-E6 = 10,2 K	U-E3 = 100 % U-E4/U-E3 = 87,9 % U-E5/U-E3 = 73,8 % U-E6/U-E3 = 95,3%	U-E3 = 6,1 K U-E4 = 5 K U-E5 = 3,5 K U-E6 = 4,2 K	U-E3 = 100 % U-E4/U-E3 = 82 % U-E5/U-E3 = 57,4 % U-E6/U-E3 = 68,9 %
	$T_{1,5} = 10,2 \text{ °C}; T_{3,0} = 12,3 \text{ °C}$		$T_{1,5} = 6,68 \text{ °C}; T_{3,0} = 6,82 \text{ °C}$	
kalt	U-E3 = 11,3 K U-E4 = 9,97 K U-E5 = 7,78 K U-E6 = 9,04 K	U-E3 = 100 % U-E4/U-E3 = 88,8 % U-E5/U-E3 = 68,7 % U-E6/U-E3 = 79,8 %	U-E3 = 5,49 K U-E4 = 4,81 K U-E5 = 5,15 K U-E6 = 5,74 K	U-E3 = 100% U-E4/U-E3 = 89,5% U-E5/U-E3 = 94,7 % U-E6/U-E3 = 104 %
	$T_{1,5} = 9,46 \text{ °C}; T_{3,0} = 11,7 \text{ °C}$		$T_{1,5} = 4,73 \text{ °C}; T_{3,0} = 6,85 \text{ °C}$	
sehr kalt	U-E3 = 16,52 K U-E4 = 14,47 K U-E5 = 11,6 K U-E6 = 13,88 K	U-E3 = 100 % U-E4/U-E3 = 87,6 % U-E5/U-E3 = 70,2 % U-E6/U-E3 = 84 %	U-E3 = 14,29 K U-E4 = 12,94 K U-E5 = 8,97 K U-E6 = 10,95 K	U-E3 = 100% U-E4/U-E3 = 90,6 % U-E5/U-E3 = 62,8 % U-E6/U-E3 = 76,6 %

Testanlagen im Verbundprojekt

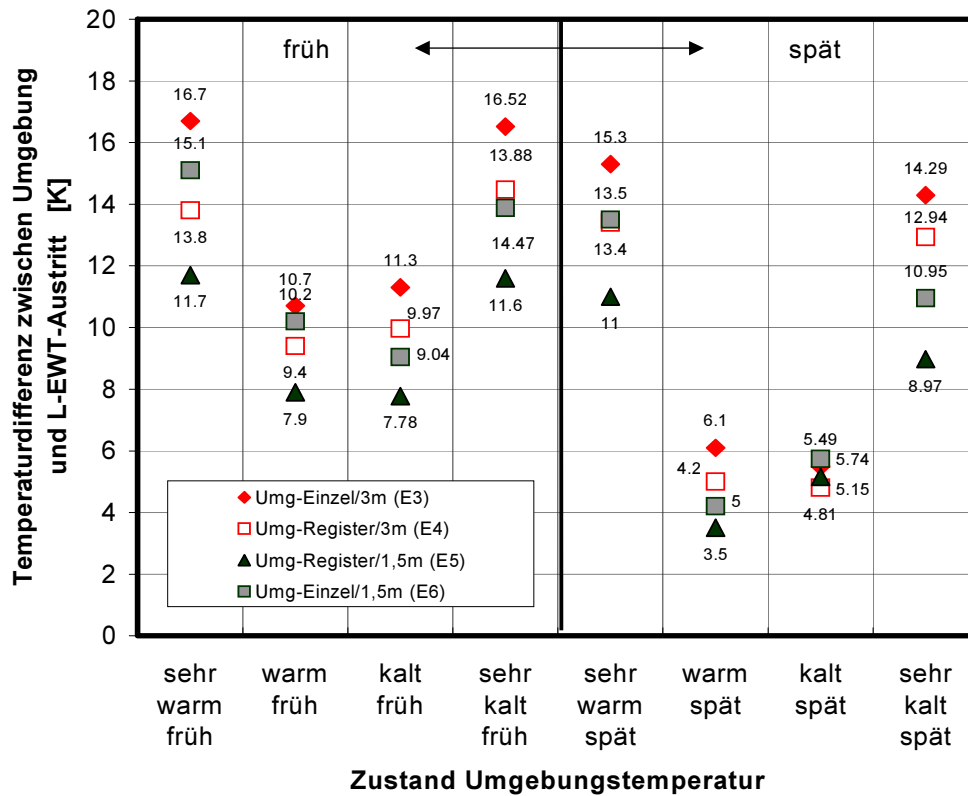


Bild 2.41 Maximale Temperaturspreizungen der DLR-Anlage zu signifikanten Betriebszeiten

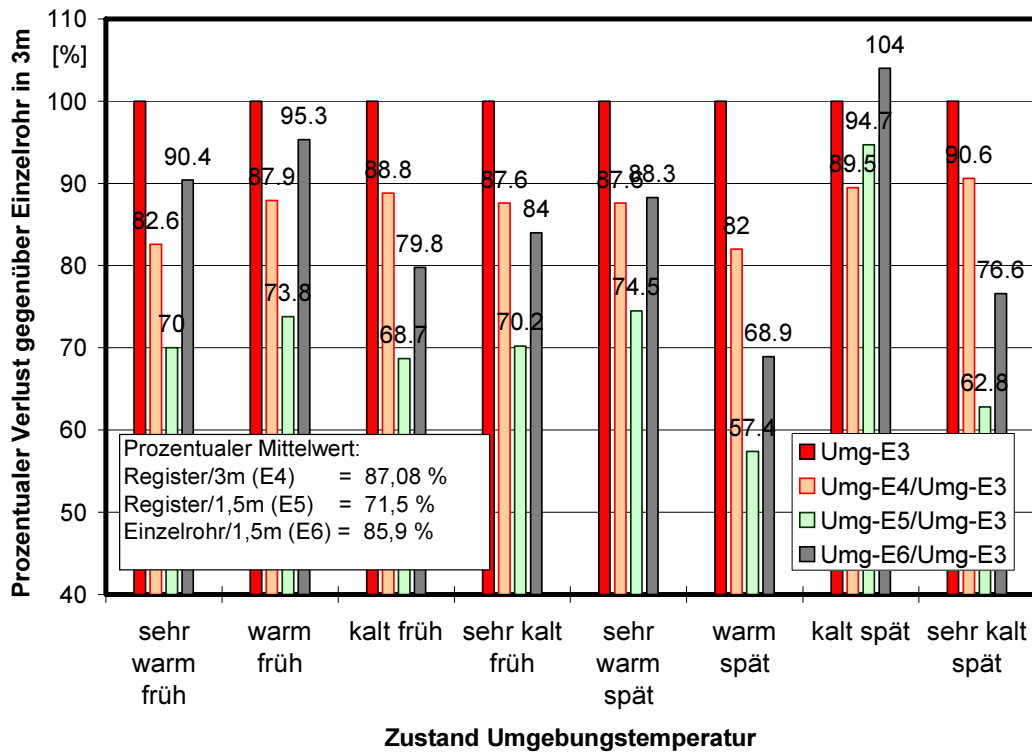


Bild 2.42 Prozentuale Abweichungen bezogen auf das per Definition ideale Einzelrohr in 3 m Tiefe

2.10 Ergebnisse lufthygienischer Messungen und Aspekte der Bewertung

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 Rohrrinnenwänden Tauwasser bilden kann, welches die Grundlage zum Wachstum von Keimen darstellt. Aus der Vergangenheit sind Infektionen bekannt, die auf eine mikrobielle Kontamination von Lüftungsanlagen zurückzuführen sind. Hier sei als Beispiel aus [Schneiders] 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 enthaltenden Keime entstammen dem Boden, von Wasser, von Pflanzen und Tieren. Die Keime gelangen in die Luft, indem sie durch Luftbewegungen aufgewirbelt oder von Menschen und Tieren an die Luft abgegeben werden [Evers]. Als luftgetragene Schadstoffe müssen dabei folgende Stoffe identifiziert werden:

Tabelle 2.17
Untersuchungsparameter bei der lufthygienischen Bewertung von L-EWT

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

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

2.10.1 Definition der Belastungsarten

2.10.1.1 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 Aeroplanktons. Dies ist die Gesamtheit all jener Partikel biologischen Ursprungs, die sich in der Luft befinden.

Als 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/m³ [Senkpiel]). Grenzwerte aus der Literatur für die Auslösung allergischer Symptome bei sensibilisierten Personen sind:

Tabelle 2.18 Grenzwerte für Personen

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

2.10.1.2 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/m³-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/m³. Verbindliche Richt- oder Grenzwerte für MVOC zur Beurteilung der Luftqualität in Innenräumen liegen bislang nicht vor.

2.10.1.3 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 Innerraumluft Koloniezahlen von 100 bis 500 KBE/m³ an. Innenräume mit mehr als 500 KBE/m³ werden als beeinträchtigt angesehen.

2.10.1.4 Partikelförmige Verunreinigungen

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

2.10.1.5 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.

2.10.1.6 Radon

Ein aus dem Boden stammender Stoff, der ein Gesundheitsrisiko (Lungenkarzinom) darstellt, ist Radon. Radon (^{222}Rn) ist ein Edelgas, das beim radioaktiven Zerfall von Uran (^{230}U) im Erdboden als α -Strahler freigesetzt wird. Die Verteilung des Radons im Boden ist auf dem Gebiet der Bundesrepublik auf Grund Untersuchungen im Auftrag des Bundesministeriums recht gut bekannt [BfS]. Hohe Radon-Belastungen sind demnach im wesentlichen auf Teile von Eifel, Schwarzwald, Bayrischem 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 Bq/m^3 nicht überschreiten. Als Anhaltswert für die Radondichtheit von Rohren lässt sich der Diffusionskoeffizient D und die Diffusionslänge R für ^{222}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 2.19 finden sich Angaben über die Diffusionskoeffizienten und Diffusionslängen von Radon in verschiedenen Materialien.

Tabelle 2.19 Spezielle Diffusionskoeffizienten und Diffusionslängen von ^{222}Rn (nach [Keller])

Material	Diffusions-koeff. D $10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	Diffusionslänge R 10^3 m	Beispiel	
			Wandstärke 10^3 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.

2.11 Ergebnisse der lufthygienischen Untersuchung der Versuchsanlage

Der Versuchs-L-EWT wurde in zwei Phasen 1996 und 1998 u.a. in Bezug auf MOVOC, mikrobielle Verunreinigungen der Luft untersucht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2.20 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. Auch die Untersuchungen der MVOC (Tabelle 2.21) 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.

Tabelle 2.20 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 ²			Impaktorstufe 1 ³			Zuluft nach L-EWT	Außenluft	Konzentrationsänderung
	Zuluft nach L-EWT	Außenluft	Konzentrationsänderung ⁴	Zuluft nach L-EWT	Außenluft	Konzentrationsänderung			
	KBE/m ³	KBE/m ³	%	KBE/m ³	KBE/m ³	%	KBE/m ³	KBE/m ³	%
<i>Alternaria alternata</i>	k.A.	k.A.	k.A. ⁵	k.A.	k.A.	k.A.	n.n.	86	k.A.
<i>Aspergillus niger</i>	n.n.	7	-100%	n.n.	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%

² Abscheidung atemwegsgängiger Partikeln (Durchmesser < 8 µm)

³ Abscheidung nicht atemwegsgängiger Partikeln (Durchmesser: > 8 µm)

⁴ Prozentuale Zu(+) bzw. Abnahme(-) der Pilzkonzentration in der Zuluft

⁵ k.A. = keine Angaben

⁶ n.n. = nicht nachweisbar, Nachweisgrenze: 10 KBE/m³

Bei der Untersuchung 1996 wurde eine Reduktion der Bakterienkonzentration in der Zuluft (77 KBE/m³) von 42% im Vergleich zur Außenluft [133 KBE/m³] festgestellt. Bei der zweiten Messung 1998 wurde äquivalent eine Reduktion der Bakterienkonzentration von 86% in der Zuluft (48 KBE/m³) gegenüber der Außenluft (344 KBE/m³) festgestellt.

Tabelle 2.21 Messungen der Konzentration von MVOC am Versuchs-L-EWT

Substanz	Untersuchung 1996			Untersuchung 1998		
	Zuluft nach L-EWT	Außenluft	Konzentrationsänderung ⁷	Zuluft nach L-EWT	Außenluft	Konzentrationsänderung
	[µg/m ³]*	[µg/m ³]*		[µg/m ³]*	[µg/m ³]*	
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 1996 zeigten, dass keine erhöhte Konzentration von Diisobutylphthalat und Di-n-Butylphthalat vorlag.

Die Ergebnisse einer Reihe weiterer Messungen an mehreren Anlagen wurden von verschiedenen Autoren durchgeführt.

Die Ergebnisse sind zusammengefasst im Modul [LEWT_PLF2_ANHANG_09.pdf](#) dargestellt.

2.12 Empfehlungen

Die Wartung ist gemäß den Normen und Richtlinien aus [VDI 3801], [VDI 3803], [VDMA 24186], [VDI 6022] oder [AMEV] vorzunehmen.

Zur Prävention von lufthygienischen Belastungen sind nachfolgend einige konstruktive Aspekte zusammengefasst dargestellt.

⁷ Prozentuale Zu(+) bzw. Abnahme(-) von MVOC in der Zuluft gegenüber der Außenluft

2.12.1 Aussenluftansaugung

Quellen großer Mengen von Luftkeimen (z.B. Kompost) oder die Konzentration von Abgasen (PKW/LKW-Rangierbereich) sollten in der Nähe der Ansaugung möglichst vermieden werden. Ein Filter sollte am Lufteintritt unbedingt vorgesehen werden. Eine erhöhte Ansaugöffnung ist immer vorzuziehen, um das Ansaugen von Mikroorganismen und Staub aus Bodennähe zu vermeiden. Allgemein gelten die Anforderungen der [VDI 6022] und [DIN 1946-2].

2.12.2 Rohre

Bezüglich der hygienischen Bedingungen in den Rohren der Erdregister kommt es zu dem Ergebnis, dass glatte, geschlossenporige Oberflächen (z.B. Kunststoff oder Metall) besser sind als offenporige oder poröse Oberflächen (z.B. Beton) [DIN EN 1610], [DIN 16928]. 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. Das System sollte wasserdicht ausgeführt sein um das Eindringen von Grund- und Sickerwasser und die damit verbundene Verschmutzungsgefahr zu vermeiden. Auf gerippte Rohre sollte aus hygienischen Gründen verzichtet werden, da sich ein Ansammeln von kleinen Wassermengen in den Rippen nicht verhindern lässt und ein Quelle für mögliches Pilzwachstum darstellt. In Gebieten in denen mit einer erhöhten Radon-Belastung im Boden zu rechnen ist, sollten Kunststoffrohre gegenüber Betonrohren vorgezogen werden, da sie eine höhere Radondichtheit besitzen.

Die Registerrohre des L-EWT sind als Luftleitungen zu betrachten. Gemäß [VDI 6022] sind Luftleitungen beim Transport und bei der Lagerung auf der Baustelle vor Verschmutzung zu schützen bzw. zu reinigen. Die Lagerung sollte in staubfreier, sauberer trockener Umgebung erfolgen. Es ist empfehlenswert, dass die Innenflächen der Rohre vor dem Einbau staubfrei gewischt werden; sie müssen aber zu mindestens auf groben Schmutz untersucht werden. Steigflächen sind abzudecken um zu verhindern, dass Schmutz in die Luftleitungen fallen kann. Wird der L-EWT als Teil der Lüftungsanlage betrachtet und kein weiterer Filter nach dem L-EWT installiert, sind die Anforderungen gemäß [VDI 6022] für Luftleitungen einzuhalten.

Bei der Luftkühlung ist ein Auftreten von Tauwasser in den Registerrohren möglich. Um die Ableitung des Tauwassers aus dem L-EWT-System zu gewährleisten, ist bei der Verlegung des Gesamtsystems die Einhaltung eines leichten Gefälles (mind. 2%) notwendig. Der Untergrund sollte sorgfältig verdichtet werden um eine Absenkung der Rohre zu vermeiden. An den tiefsten Stellen des Systems ist die Installation von Tauwasserabscheidern vorzusehen.

2.12.3 Filter

Die gewählte Filterqualität hat einen deutlichen Einfluss auf die Pilzsporenkonzentration in der Zuluft. Feinfilter können eine Pilzkonzentrationsabnahme von 80-100%, Grobfilter von 40-80% erreichen. Die Filter vor dem L-EWT sollten mindestens Pilzsporen (2-5µm) von Aspergillus und Penicilum, die in Registerrohren wachsen können, zurückhalten. Die in Lüftungsanlagen üblichen Filter sind dafür ausreichend, wobei die hygienischen Anforderungen an Filter gemäß [VDI 6022] beachtet werden müssen.

2.13 Zusammenfassung

Der Einsatzbereich eines Luft-Erdwärmetauschers (L-EWT) liegt zwischen Volumenströmen von 100 m³/h und mehreren 100.000 m³/h. Aus dieser Bandbreite und den instationären Randbedingungen entstehen erhebliche Schwierigkeiten, allgemeingültige Aussagen über das zu erwartende thermische Systemverhalten zu treffen. Bei Anlagen mit größeren Luftmengen ist aus strömungs- bzw. wärmetechnischen Gründen zudem die Aufteilung auf mehrere Rohre erforderlich. Die dabei entstehende Vielfalt an Systemkombinationen durch Variation von Anzahl, Durchmesser, Länge, Verlegeabstand und -tiefe führt zu einer weiteren Verunsicherung in Bezug auf die richtige Entscheidung. Planungsziel ist die Optimierung des thermischen Ertrags unter Einsatz eines geringst möglichen elektrischen Antriebsaufwands, damit eine günstige CO₂-Emissionsbilanz, gegenüber konventionellen Systemen, entsteht.

Ziel des L-EWT-Verbundprojektes war es, Informationen und Methoden, insbesondere für große L-EWT, bereitzustellen, die eine Entscheidung für ein technisch, ökologisch wie ökonomisch effizientes System ermöglichen.

Das Ministerium für Schule, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen (MSWF) förderte über die Arbeitsgemeinschaft Solar NRW das **Verbundprojekt L-EWT** in dessen Rahmen u.a. drei große L-EWT konzipiert, gebaut und vermessen worden sind.

Reale Messwerte waren und sind notwendig, um sich einen grundsätzlichen Eindruck von Funktionszusammenhängen von L-EWT machen zu können. Des Weiteren sind diese Daten notwendig, um numerische Simulationsprogramme für die Systemauslegung großer Anlagen z.B. für Bürogebäude, die das komplexe, instationäre Systemverhalten beschreiben sollen, validieren zu können. Neben der Validation von Simulationsprogrammen wurde das grundsätzliche Verständnis über die Funktion von L-EWT verbessert.

So konnte entgegen der bisherigen Meinung gezeigt werden, dass Temperaturhübe von bis zu 20 K möglich sind. Auch konnte man feststellen, dass das "Ermüdungsverhalten" eines L-EWT bei längeren Hitze- oder Kältephasen geringer ist, als vorher theoretisch vermutet. Viele wesentliche praktische Erkenntnisse beim Bau eines L-EWT konnten gewonnen werden.

Mehrere Messungen über den lufthygienischen Zustand wurden von Umweltlabors durchgeführt und führten zu (bisher) positiven Ergebnissen über den Zustand der L-EWT Luft (bei regulärer Wartung).

Ausgangsbasis war der Versuchs-L-EWT in Köln, der 1994 gebaut wurde und mehrere Jahre intensiv vermessen wurde. Die besonderen Eigenschaften dieser Versuchsanlage liegen darin, dass die Unterschiede zwischen Einzelrohr und Register im direkten Vergleich messtechnisch erfasst werden können sowie die Änderungen der thermischen Erträge als Funktion der Verlegetiefe.

Es folgten die Einrohrsysteme für mittelgroße Volumenströme am Solar-Institut in Jülich und der Fernuniversität Hagen.

An allen drei Systemen konnten wichtige Informationen über das grundsätzliche Systemverhalten gewonnen und Methoden zur optimierten Auslegung von L-EWT abgeleitet werden. Umfangreiche grundsätzliche Messungen zur lufthygienischen Situation wurden vorgenommen und vermitteln einen Eindruck von der hygienischen Unbedenklichkeit eines L-EWT.

Die wichtigsten Ergebnisse sind **auszugsweise** in diesem Bericht dargestellt. Eine Gesamtauswertung aller vorliegenden Rohdaten wurde zwar vorgenommen, es würde aber den Rahmen des Projektes gesprengt, diese in einer für die Öffentlichkeit verständlichen Form aufzubereiten.

Letztlich sind auch diese Informationen als Hilfe zur Entwicklung der Planungshilfsmittel eingeflossen und liegen dem Nutzer des Planungsleitfadens indirekt vor.

2.13.1 Literatur

Umfangreiche Literaturhinweise sind im Modul

[LEWT_PLF2_ANHANG_09.pdf](#)

zu finden

3 Versuchsanlage Fernuniversität Hagen

**Der Projektbericht ist als PDF über die Webseite
des Ingenieurbüros Wortmann & Scheerer erhältlich**



<http://www.wortmann-scheerer.de>

oder über den Postweg:

**Vierhausstraße 53
44807 Bochum
0234 - 33833-0**