

Luft-Erdwärmetauscher L-EWT

Planungsleitfaden Teil 2



Bewertungs-Kennzahlen

Version 0.9 Januar 2004

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

Der Planungsleitfaden 2 besteht aus mehreren Modulen.

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

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

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

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

Hauptautor dieses Moduls:

Dr.-Ing. Gerd Dibowski

Kontakt: gerd.dibowski@dlr.de

INHALTSVERZEICHNIS

Einleitung	3
Beschreibung der eingesetzten Simulationskategorien	4
Definition der Kennzahlen.....	5
Zweite Entscheidungsebene, leistungsspezifische Kennzahlen	10
Dritte Entscheidungsebene, kostenorientierte Kennzahlen	11
Ermittlung der Investitionskosten K_{INV}	13
Ermittlung der Kennzahl-Wertegebiete	17
Wesentliche Einflüsse auf die Betriebseigenschaften von L-EWT	24
Einfluss von Bodenart und Standort	30
Verfahren der Systembewertung	37
Optimierung	40
Optimierung eines L-EWT bei konstantem Erdreich-Nutzvolumen N_{Nutz}	43
Systemoptimierung über die spezifische Aufwandszahl e_{lewt}	54
Zusammengefasste Ergebnisse wesentlicher L-EWT-Konfigurationen	56

Einleitung

Ziel dieses Moduls ist es, Informationen und Methoden (Kennzahlen), insbesondere für große L-EWT, bereitzustellen, die eine Entscheidung für ein technisch, ökologisch wie ökonomisch effizientes System ermöglichen.

Es werden Kennzahlen eingeführt, mit denen es möglich ist, die Qualität einer Systemvariante gegenüber Vergleichssystemen in Bezug auf die thermische Effizienz und des CO₂-Minderungspotenzials zu bewerten. Mit ihnen wird in der Vorplanungsphase eine Eingrenzung auf wenige, gute L-EWT ermöglicht, wodurch der sonst notwendige, sofortige Zugriff auf ein komplexes und kostenintensives numerisches Simulationsverfahren vermieden wird.

In diesem Zusammenhang wird in Anlehnung an die neue Energieeinsparverordnung EnEV die spezifische Aufwandszahl e_{lewt} definiert. Zusätzlich wird das Netzdiagramm als Darstellungsmethode vorgestellt, mit dessen Hilfe eine individuelle Feinoptimierung vorgenommen werden kann.

Hintergrund ist die Tatsache, dass innerhalb einer festen Volumenstromgruppe Schwankungen bei Ertrag und Leistung von über 400%, bezogen auf einzelne Betriebsparameter, möglich sind und somit ein deutliches Optimierungspotenzial in der Planungsphase besteht. Innerhalb der Vergleichsgruppe V1000 schwanken z.B. die thermischen Erträge zwischen 1255 und 8911 kWh.

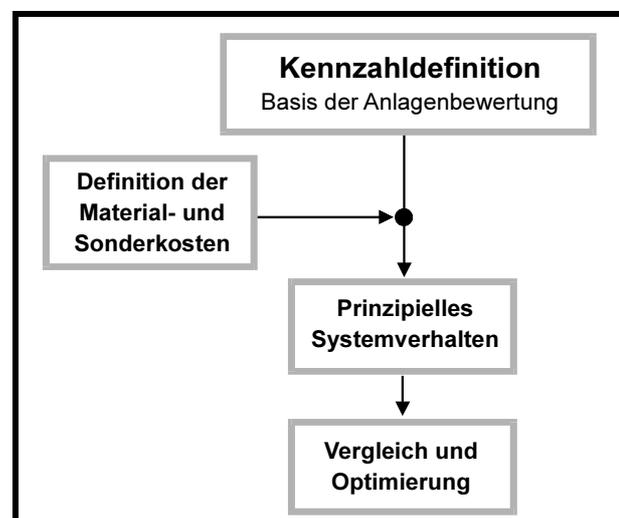
Definition der Systemkennzahlen und Bewertungsmethoden

Zu der technischen Bewertung einer Anlagenvariante gehört zusätzlich eine Abschätzung der Kostensituation. Sie liefert den Nachweis, ob sich eine Investition amortisiert, d.h., ob die Kapitalrückflusszeit in den marktüblichen Zeitbereichen liegt. Bei Investitionen in energietechnische Anlagen werden von der Industrie Amortisationszeiten von bis zu fünf Jahren akzeptiert, tolerierte Rückflusszeiten für sonstige Anlageninvestitionen liegen dagegen oft nur bei zwei Jahren. Die eigentlichen energietechnischen Kennzahlen müssen dafür mit Angaben über den notwendigen Kapitaleaufwand einer Systemvariante in Beziehung gebracht werden.

Auf Basis dieses Ansatzes werden die prinzipiellen Anlageneigenschaften von L-EWT aufgezeigt und die Systemvarianten miteinander verglichen. Abschließend wird es möglich sein, auf Basis eines abgeleiteten Optimums, die gebräuchlichen Systemvarianten in einer gemeinsamen technisch-ökonomischen Beziehung zu bewerten.

Bild 1

Ablaufstruktur der Systembewertung



Beschreibung der eingesetzten Simulationskategorien

Die nachfolgend beschriebenen Zusammenhänge basieren auf einer großen Anzahl von numerischen Simulationsdurchläufen, die sich aufgrund der hohen Variationsvielfalt der Eingabeparameter ergeben. Insgesamt wurden über vier Jahre mehr als 500 Simulationen durchgeführt, deren jeweilige Fragestellung sich mit fortschreitender Beschäftigung mit dem Thema immer weiter detaillierte.

Um die wesentlichen Grundzusammenhänge darstellen zu können, werden zuerst nicht mehr als etwa 100 Systemvarianten benötigt, die das praktisch vorkommende konstruktive Spektrum in der Breite nahezu vollständig abbilden können.

Es werden mehrere Simulationskampagnen mit unterschiedlichen Frageschwerpunkten durchgeführt. So soll gezeigt werden, wie stark die Systemeigenschaften innerhalb einer Volumenstromgruppe streuen können, und wie dies durch die definierten Kennzahlen dargestellt werden kann. Die Auswahlgrenzen der einzelnen Parameter ergeben sich aus den grundsätzlichen strömungstechnischen Zusammenhängen, bei denen der Druckverlust durch Rohrreibung sowie der innere Wärmeübergangskoeffizient α_i der Rohrströmung von besonderer Bedeutung sind. Für die Volumenstromgruppe "V1000" ($\dot{V} = 1000 \text{ m}^3/\text{h}$), deren Ergebnisse stellvertretend für die anderen Volumenstromgruppen ausführlicher dargestellt werden, kommen die folgenden Varianten in Betracht:

Tabelle 1 Vergleichssysteme bei konstantem Volumenstrom V1000

Durchmesser	m		0,3	0,3	0,5	0,5	0,5		0,1	0,1	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5
Länge	m		30	60	30	60	100		30	60	30	60	30	60	100
Anzahl	-		1	1	1	1	1		5	5	5	5	5	5	5

Die zweite Hauptgruppe umfasst die Basis aller wesentlichen Systeme bis zu einem Volumenstrom von $50.000 \text{ m}^3/\text{h}$, um den möglichen Bereich der systembeschreibenden Kennzahlen zu erfassen und systematisch darzustellen. Hierbei wurden folgende Systemvarianten ausgewählt:

G1000_03_30_1 steht für Standort (**G**: Giessen), **1000**: Nennvolumenstrom, **03**: Rohr-Innendurchmesser, **30**: Länge des Einzelrohres, **1**: Anzahl der Rohre

Tabelle 2 Konfiguration der Grundsimulationen bei variablem Volumenstrom

V1000	G1000_05_60_5	G3000_1_100_1	V10000	G10000_05_60_5
G1000_03_30_1	G1000_05_100_5	G3000_01_30_5	G10000_05_60_1	G10000_05_100_5
G1000_03_60_1	V3000	G3000_01_60_5	G10000_05_100_1	G10000_1_60_5
G1000_05_30_1	G3000_03_60_1	G3000_01_100_5	G10000_1_60_1	G10000_1_100_5
G1000_05_60_1	G3000_03_100_1	G3000_03_30_5	G10000_1_100_1	V50000
G1000_05_100_1	G3000_05_30_1	G3000_03_60_5	G10000_1_300_1	G50000_1_100_1
G1000_01_30_5	G3000_05_60_1	G3000_03_100_5	G10000_03_30_5	G50000_05_60_5
G1000_01_60_5	G3000_05_100_1	G3000_05_30_5	G10000_03_60_5	G50000_05_100_5
G1000_03_30_5	G3000_1_30_1	G3000_05_60_5	G10000_03_100_5	G50000_1_60_5
G1000_03_60_5	G3000_1_60_1	G3000_05_100_5	G10000_05_30_5	G50000_1_100_5
G1000_05_30_5				

Die dritte Gruppe zeigt die Sensitivität von Systemen in Abhängigkeit von den wesentlichen Einflussfaktoren Standort, Verlegetiefe und Bodenzusammensetzung. Die ausgewählten Volumenstromgruppen liegen zwischen 150 bis 3000 m³/h, wobei davon ausgegangen wird, dass in großen Registersystemen der Einzelvolumenstrom aus Gründen der Systemeffizienz nicht größer als 3000 m³/h werden sollte. Zuletzt werden für spezielle Einzelaspekte weitere Systemkonfigurationen herangezogen. Die detaillierten Ergebnisse der wichtigsten Einzelsimulationen sind im Anhang dargestellt und können als Planungsgrundlage verwendet werden.

Definition der Kennzahlen

Die nachfolgend aufgeführten Kennzahlen bilden die Basis für eine Anlagenbewertung und für Systemvergleiche. Für die (z.B. bei Wärmepumpen) bisher gebräuchliche saisonale Arbeitszahl β_s , die zur Beschreibung des Verhältnisses von kumuliertem Nutzen (thermischer Ertrag) zum notwendigen Aufwand (elektrischer Antrieb) dient, wird die in den neu erschienenen Normenwerken eingeführte Aufwandszahl e , hier e_{lewt} ¹, definiert.

Bei der EnEV betrachtet der Gesetzgeber die gesamte Heizungs- und Warmwasseranlage als ein System, das gemeinsam bewertet wird. Hierbei entstanden die neuen neue DIN-Normen ([DIN4108-6] und [DIN4701-10]). Die dort definierte Energie-Aufwandszahl e beschreibt das Verhältnis zwischen dem Aufwand an Primärenergie (Erdöl, Erdgas, Kohle etc.) und der erzeugten Heiz- und Warmwasserwärme.

Ist die Energie-Aufwandszahl hoch, so ist das betrachtete Heizungs-System ineffektiv, weil man einen hohen Aufwand zur Erreichung eines bestimmten Nutzens hat. Je kleiner also die Energie-Aufwandszahl e ist, desto effektiver und somit besser ist das System. Eine Energie-Aufwandszahl $e = 2$ würde bedeuten, dass man das Doppelte an Primärenergie verbraucht, wie man an Nutzwärme erhält. Bei der Berechnung von e wird die gesamte Kette von der Gewinnung der Energie, inklusive Förderung, Veredelung (z.B. Raffinerie), Transport, Energiewandlung, Wärmeverteilung, Regelung usw. berücksichtigt. Die Energie-Aufwandszahl ist also ein umfassender Qualitätsmaßstab für die Heizungsanlage. In Anlehnung an diese Definition werden Überlegungen zur optimierten Auslegung von L-EWT vorgenommen und über eine spezifische Aufwandszahl e_{lewt} beschrieben.

Aufnahme wärmetechnischer Basisdaten des L-EWT

Zu Beginn einer L-EWT-Systembewertung steht die Vorgabe des Volumenstroms \dot{V}_{LEWT} . Danach sind die thermischen Basisdaten wie maximale Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta_{\text{LEWT}}^{\text{max}}$, maximale thermische Leistung $\dot{Q}_{\text{LEWT}}^{\text{max}}$ und die notwendige Ventilatorleistung P_{vent} zu bestimmen. Hierfür kann auf Tabellenwerte im Anhang, analytische Rechenverfahren z.B. [WA] oder einfache Übersichtsprogramme zurückgegriffen werden.

$\Delta\vartheta_{\text{LEWT}}^{\text{max}}$	[K]
$\dot{Q}_{\text{LEWT}}^{\text{max}}$	[kW]
P_{vent}	[kW]

¹ lewt, da nur das Teilsystem L-EWT bewertet wird und keine gesamte Prozesskette wie in [DIN 4701] und [DIN 4108]

Der wichtige thermische saisonale Ertrag Q_{sais} ist ohne numerische Simulationsprogramm für den L-EWT nicht ohne weiteres bestimmbar. Hier liefern zwar einfache analytische Rechenverfahren wie [PHLUFT] oder [GAEA] erste Hinweise, gegenüber den weit aufwändigeren numerischen Verfahren sind sie aber oft zu ungenau.

$$\boxed{Q_{\text{sais}}} \quad [\text{kWh}]$$

Q_{sais} ist über eine definierte Laufzeit, unter Berücksichtigung einer bestimmten Anlagenregelung, zu ermitteln. Schon hier zeigt sich, dass bei komplexeren L-EWT transient numerisch gerechnet werden sollte, sofern die betrachtete Anlagenvariante nicht bereits ausführlich tabellentechnisch erfasst wurde. Die Bewertungskennzahlen dienen somit nicht als Ersatz für Simulationsprogramme, sondern zur Bewertung der Ergebnisqualität im Vergleich von Planungsvarianten bzw. zur Eingrenzung.

Weiterhin kann die Anzahl der bisher notwendigen (und kostenintensiven) numerischen Simulationen deutlich reduziert werden. Schon aus diesen Basisangaben lassen sich wesentliche Aussagen über die Anlagenqualität ableiten. Auch sind Informationen zum gesamten dynamischen Systemverhalten abschätzbar. Entscheidend für den Einsatz eines L-EWT ist letztendlich sein CO_2 -Einsparpotenzial bzw. die Anlageneffizienz. Daher ist in einer ersten Prüfung festzustellen, ob diese Effizienz für den betrachteten L-EWT überhaupt vorliegt.

Überprüfung der grundsätzlichen Systemeignung (CO_2 -Relevanz bzw. Anlageneffizienz)

Die Leistungszahl ε_e führt zu einer grundsätzlichen Aussage über die maximale Leistungsfähigkeit eines L-EWT, wenn extreme Außentemperaturbedingungen bestehen. Dieser Parameter ist in der Planungsphase für die Anlagenauslegung bezüglich der Spitzenlastabdeckung von Bedeutung.

(maximale) Leistungszahl ε_e

$$\varepsilon_e = \frac{\dot{Q}_{\text{LEWT}}^{\text{max}}}{P_{\text{vent}}^{\text{max}}} \quad (1)$$

Mit ε_e ist keine Aussage über das saisonale Ertrags- und CO_2 -Einsparverhalten möglich. Hierfür wird die Aufwandszahl e_{lewt} (Gl. 2) herangezogen. Dieser Wert setzt die kumulierten Werte von Aufwand und thermischem Ertrag innerhalb eines Betriebszeitraums (Saison) in Beziehung, wobei für den elektrischen Aufwand die gesamte Erzeugungskette bis zum Kraftwerk (Primärenergieeinsatz) berücksichtigt wird. Ein für den Wert e_{lewt} wesentliche, mitbestimmende Größe ist die Ventilatorleistung P_{vent} . Diese hängt nach Gl. 4 vom Volumenstrom, der Gesamtdruckverluste und dem Ventilatorgesamtwirkungsgrad ab.

Aufwandszahl e_{lewt}

$$e_{\text{lewt}} = \frac{f \cdot W_{\text{vent}}}{Q_{\text{LEWT}}^{\text{H,K}}} = \frac{f \cdot P_{\text{vent}}^{\text{max}} \cdot \Sigma h}{Q_{\text{LEWT}}^{\text{H,K}}} \quad (2)$$

Idealerweise sollte e_{lewt} gegen Null gehen. Der Primärenergiebezugsfaktor f , der die gesamte Stromerzeugungskette berücksichtigt, wird mit dem Standardwert $f = 3$ gesetzt, sofern keine anderen Bedingungen gelten. Die kumulierten Wärmeerträge erfolgen durch:

$$Q_{LEWT}^{H,K} = \dot{V}_L \cdot \rho_L \cdot c_{pL} \cdot \sum_{i=t_0}^{t_z} ((\vartheta_{AU} - \vartheta_{aus}^{LEWT}) \cdot \Delta t) \quad (3)$$

mit Beginn t_0 und Ende t_z des Betriebszeitraums Δt in Stundenschritten.
Für die elektrische Antriebsarbeit gilt dann:

$$W_{vent} = P_{vent} \cdot t_{H,K} = (\dot{V} \cdot \Delta p) / \eta_{vent} \quad (4)$$

Mit	Q	Gelieferte / entzogene Wärme	[kWh]	Luft-Volumenstrom	\dot{V}	[m ³ /h]
	W	Elektrische Antriebsarbeit	[kWh]	Gesamt-Druckverlust	Δp	[Pa]
	H, K	heizen, kühlen	[-]	Ventilatorwirkungsgrad	η_{vent}	[-]

In der Bestimmungsformel für P_{vent} ist der Ventilatorwirkungsgrad als anlagentechnische Eigenschaft nicht konstant. Ein größeres Problem stellt die Festlegung des Druckverlustes dar, der die Aufwandszahl e_{lewt} wesentlich beeinflusst. Dieser Gesamt-Druckverlust besteht aus den strömungstechnisch eindeutig bestimmbar Reibungsverlusten ζ_R und den variablen Einbauverlusten ζ_E (Art und Anzahl der Filter, Ansaugsituation, Umlenkungen etc.); wobei ausgerechnet die Einbauverluste den Gesamtdruckverlust im Verhältnis von z.B. 100:1 dominieren können. Eine Bestimmung von e_{lewt} nur auf Basis von ζ_R ist zwar physikalisch eindeutig möglich, aber wegen der Dominanz von ζ_E am Gesamt-Druckverlust von geringer praktischer Bedeutung. Bei brauchbaren Systemvergleichen über die Aufwandszahl e_{lewt} müssen daher die Einbau-Druckverluste mit berücksichtigt werden, wobei diese dann vorher festzulegen sind.

Die Aufwandszahl e_{lewt} bildet das mögliche CO₂-Einsparpotenzial eines energietechnischen Systems umfassender ab, als es mit endenergie-bezogenen Kennzahlen möglich ist. Sie ist somit eine Weiterentwicklung eines der bisher gebräuchlichsten Parameter zur Bewertung von wärmetechnischen Systemen, der Arbeitsszahl β_s (Gl. 5), bei der der elektrische Aufwand auf den Endenergieeinsatz bezogen wird.

$$\beta_s = \frac{Q_{LEWT}^{H,K}}{W_{VENT}} \quad (5)$$

Die Leistungszahl ε_e ist auch nach Einführung von e_{lewt} weiterhin von Bedeutung, da sie im Gegensatz zu e_{lewt} nicht von einer bestimmten, geführten Anlagenregelung abhängig ist.

Bestimmung des Druckverlustes

Zur Berechnung der maximalen Leistungs- und saisonalen Arbeitszahlen sind die Ansaug-, Verteil-, Zuführ- und Filterverluste, die sogenannten Einbauverluste zu berücksichtigen. Eine Darstellung wie in [Sedlbauer], die sich nur auf die Bewertung der Rohrreibungs-Druckverluste bezieht, ist nicht praxistauglich. Werden ausschließlich die Rohr-Reibungsverluste berücksichtigt, kommt es zu Angaben unrealistisch hoher Arbeits- bzw. kleiner Aufwandszahlen. Schon die Berücksichtigung von Ansaug- bzw. Filterverlusten von z.B. 100 Pa am Beispiel der Konfiguration G1000_03_60_5 sinkt ε von einem Wert von 1750 auf 18. Nur der zweite Wert zeigt technisch, ökonomisch wie ökologisch verwertbare Ergebnisse. Dem zufolge wird zur Bestimmung der Systemkennwerte zu den für jede Konfiguration individuell berechneten Rohrreibungsdruckverlusten ein Verlustwert durch Einbauten addiert.

Ein genauer, gemeinsamer Einbaudruckverlust für alle Vergleichsbetrachtungen kann nicht pauschal gesetzt werden, da bei großen Systemen die bautechnischen Bedingungen und damit die Einbaudruckverluste zu stark voneinander abweichen. Für die meisten bekannten Systeme kommen Werte zwischen 100 und 500 Pa in Betracht.

Die Rohrrauigkeit k [mm] hat einen starken Einfluss auf den Druckverlustbeiwert λ_p und somit auf den Druckverlust Δp_v . Die Angaben für k erfolgen in der Literatur in Form von Wertebereichen und sind daher für eine genaue Analyse von unterschiedlichen Anlagenvarianten nicht geeignet. Mit dem Colebrook-Diagramm [Dubbel] kann gezeigt werden, dass die Vorgabe von konstanten Werten für λ_p in vielen Fällen zu starken Abweichungen gegenüber individuellen Berechnungen führen würde. Eine pauschale Vorgehensweise wie in [Recknagel] ist daher nicht zu empfehlen. Folglich wird die Rohrreibungszahl speziell für jede Konfiguration über Gl. 6 neu errechnet [WA]:

$$\lambda_p = (1,82 \cdot \log_{10} Re - 1,64)^{-2} \quad (6)$$

Für die Berechnung der Register-Gesamtverluste kommt das sog. Widerstandsgesetz für Rohrströmungen $\Delta p_v = R \cdot \dot{V}^2$, mit R als Strömungswiderstand, zur Anwendung (Gl. 7). Bezüglich eines Registers, bei dem ein Volumenstroms \dot{V} in mehrere Teilvolumenströme $\dot{V}_1, \dot{V}_2, \dots, \dot{V}_i$ aufgegliedert wird, herrscht zwischen dem Verzweigungspunkt A und dem Vereinigungspunkt B jeweils der Druckabfall Δp_v . Demnach kann der Gesamtdruckabfall über die Berechnung eines Einzelrohres ermittelt werden. Der Gesamtdruckverlust ergibt sich mit Gl. 8.

$$R = \lambda_p \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \frac{1}{A^2} \quad (7)$$

$$R = \left(\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{\sqrt{R_i}} \right) \right)^{-2} \quad (8)$$

Definition der Betriebsarten in der Simulation

Bei Betrieb eines L-EWT sind mehrere Bedingungen zu beachten, um die wirtschaftliche und ökologische Effizienz unter thermisch optimierten Bedingungen erfüllen zu können. Für die Summation der saisonalen Einschaltzeiten eines L-EWT (Vorwärmen oder Kühlen) gelten die Betriebsbedingungen in Tabelle 3:

Tabelle 3 Bedingungen zur Berechnung der Arbeitszahl für die saisonale Kühlung

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

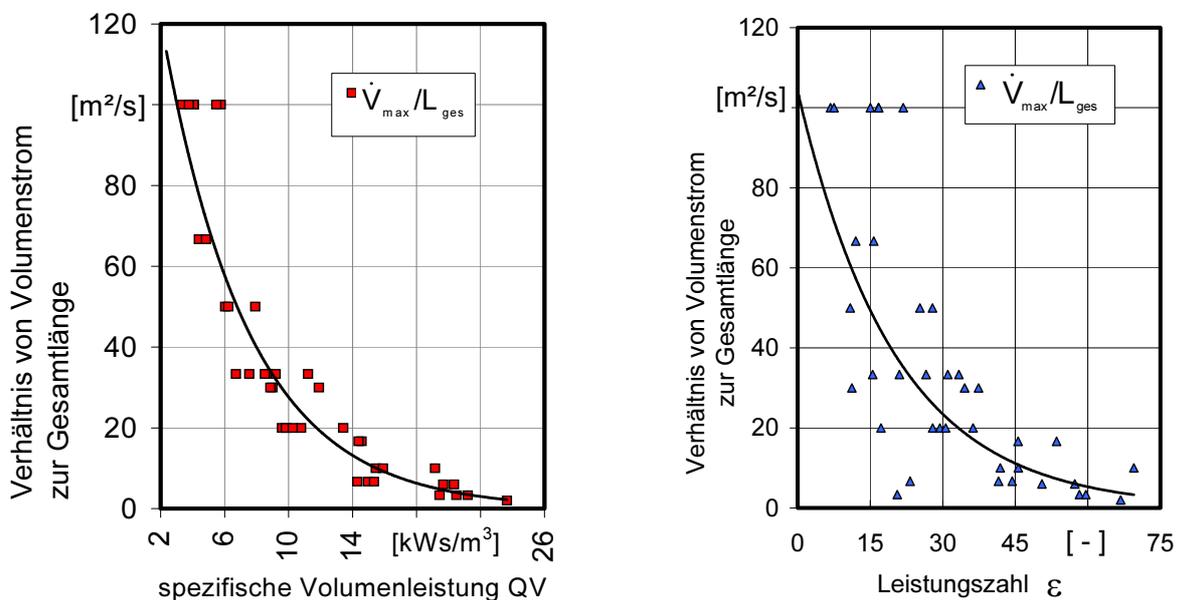
mit: ϑ_{AU} = Außenlufttemperatur; ϑ_{out} = L-EWT-Austrittstemperatur; ϑ_{out} = farfield-Temperatur²

² Bodentemperatur in vom L-EWT unbeeinflussten radialen Abstand zum L-EWT

Für den Kühlfall ist es durchaus möglich, dass sich der Grenzwert bei Bedingung A, je nach thermischer Belastung des zu kühlenden Gebäudes, auf bis zu 0°C reduzieren kann ([Hausladen]). Daher wurden in der Simulation auch die Fälle berücksichtigt, bei denen die Bedingung B ohne Bedingung A durchgehend gilt, (siehe *LEWT_PLF2_Anhang_09.pdf*: Ergebnistabellen; Index: alle).

Wertebereiche der Vorprüfungskennzahl VL

Stehen ganz am Anfang einer Planung noch nicht einmal die Basisdaten von Seite 5 zur Verfügung, kann gezeigt werden, dass bereits der Quotient aus dem Volumenstrom und der Gesamt-Rohrlänge des L-EWT (Einzelrohr ER und Register REG) zu Hinweisen auf die Brauchbarkeit einer Planungsvariante führt und über den Kennwert VL beschrieben werden kann. Gerade wenn Register zur Diskussion stehen, kann mit Hilfe von VL die Anzahl der diskutierten Varianten bereits im Vorfeld deutlich reduziert werden.



Bilder 2 und 3 Abhängigkeit der Wertebereiche von VL von der Leistungsfähigkeit eines L-EWT-Systems (QV ist umseitig erläutert)

Der Metervolumenstrom VL in m³/h ist somit definiert mit: $VL = \dot{V}/L_{\text{ges}} \quad [\text{m}^3/\text{hm}] \quad (9)$

Nachfolgend aufgeführte Beziehungen verdeutlichen, dass für gute L-EWT-Auslegungen kleine VL-Werte anzustreben sind.

Ein weiteres, leicht zu ermittelndes Hilfsmerkmal in der Vorplanung ist die Strömungsgeschwindigkeit im Rohr. Die Auswertung der Simulationen zeigt, dass die besseren Systeme unterhalb von 4 m/s zu finden sind (siehe dazu auch die Bilder 4 und 14).

Es lässt sich also vorab festhalten: **Mit dem in der Vorplanung immer feststehenden Volumenstrom \dot{V} kann nach Festlegung der Strömungsgeschwindigkeit (< 4m/s) bei Variation der Gesamtlänge L_{ges} ein Bündel von L-EWT-Auslegungen unmittelbar auf ihre grundsätzliche Eignung (kleiner e-Wert) überprüft werden, ohne dass auch nur ein weiterer Anlagenwert bekannt sein muss.**

Bild 4 zeigt beispielhaft die hohe Ereigniswahrscheinlichkeit dieses Prüfungsverfahrens. Dieses Ergebnis kann nicht analytisch gewonnen werden und ist angewiesen auf die Auswertung einer großen Zahl von Simulationsvarianten.

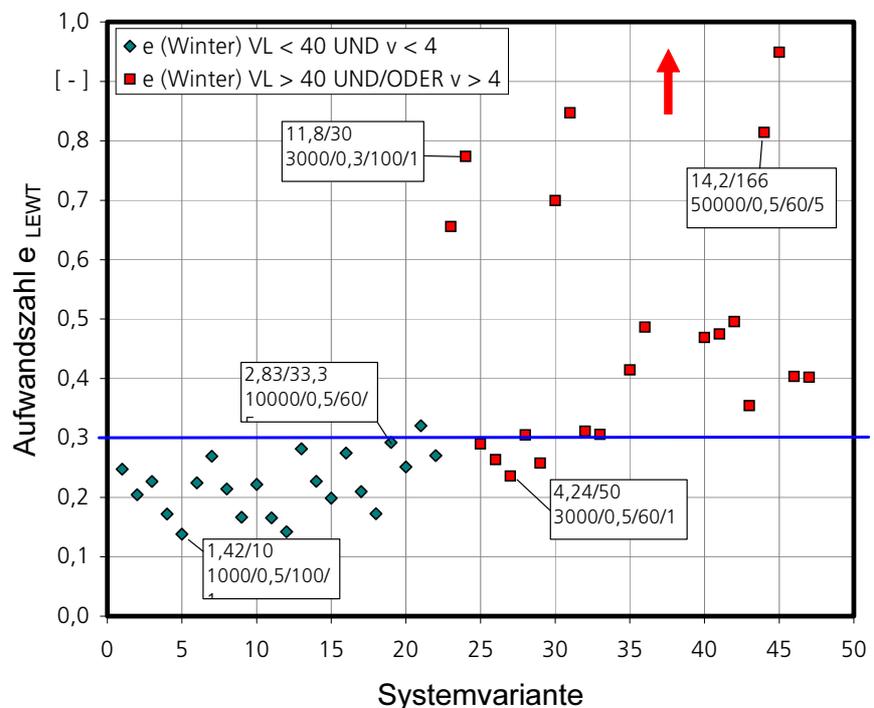
Tabelle 4
Erstindikatoren:

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

Für die unverzichtbare Bestimmung der Aufwandszahl e_{LEWT} müssen die notwendigen Einzelparameter Q und W aufwändig über die numerische Simulation bestimmt werden. Da gerade bei der Vorauswahl eines geeigneten L-EWT-Registers viele unterschiedliche Varianten in Betracht kommen (Rohranzahl, Durchmesser, Länge, Abstände, Verlegetiefe u.a.), ist hiermit sofort ein umfangreicher und zeitintensiver Simulationsaufwand verbunden. Gerade dieser Aufwand wird durch die hier definierten Kennzahlen deutlich reduziert.

Bild 4

Ermittelte Aufwandszahlen für Systemvarianten einer Volumenstromgruppe als Funktion der Strömungsgeschwindigkeit v und dem Metervolumenstrom VL



Zweite Entscheidungsebene, leistungsspezifische Kennzahlen

Unabhängig von unterschiedlichen Betriebsmodi wird eine weitere Kennzahl eingeführt, die die Grenzen des Wärme-Austauschvermögens eines L-EWT beschreibt. Dieser Wert QV bietet sich in der Vorplanungsphase bei Anlagenvergleichen mit unterschiedlichen Volumenströmen oder bei zusammengesetzten Systemen (wie z.B. bei UBA³) an, weil dieser Parameter unabhängig von der Systemgröße (\dot{V}_{LEWT}) und von Betriebsstrategien ist:

³ Umweltbundesamt, Dessau

Netto-Volumenstromleistung
in [kWs/m³]

$$QV = \frac{(\dot{Q}_{LEWT} - f \cdot P_{VENT})}{\dot{V}} \quad (10)$$

Wie noch gezeigt wird, korreliert QV qualitativ eng mit den aufwändig zu ermittelnden saisonalen Erträgen und gibt somit einen eindeutigen Hinweis auf die spätere Ertragsaussicht und CO₂-Effizienz des in der Planung befindlichen L-EWT, ohne dafür simulieren zu müssen.

Grundsätzlich ist ein Vergleich verschiedener Anlagenvarianten nur dann möglich, wenn der Luftvolumenstrom \dot{V}_{LEWT} konstant ist. Dies ist in der Praxis unkritisch, da \dot{V}_{LEWT} fast immer die erste vorgegebene, wenig beeinflussbare und alles Weitere bestimmende Randbedingung ist. Die Bedeutung von QV liegt im Vergleich zu den bekannten Leistungsquotienten darin, dass nicht nur ein Verhältnis, sondern eine konkrete Leistungsangabe pro Volumeneinheit angegeben wird, die bereits von dem notwendigen Antriebsaufwand bereinigt ist. Insofern steckt in diesem Wert auch eine Information über die ökologische Effizienz. Durch die Beziehung auf einen Normvolumenstrom wird die Unabhängigkeit von geometrischen Einzelheiten erreicht, was eine vergleichende Bewertung von verschiedenen Systemen ermöglicht, auch in dem Fall, dass man bei komplexen Systemen Einzelbewertungen von Teilgruppen des Gesamtvolumenstroms vornehmen möchte. Die Zahlenbereiche, in denen sich QV befindet, wird über die Auswertung von Simulationsergebnissen nachfolgend gezeigt.

Dritte Entscheidungsebene, kostenorientierte Kennzahlen

Die Ermittlung der Investitionskosten im Vorfeld der Projektplanung ist von entscheidender Bedeutung für die weitere Planungsdiskussion mit dem Investor. Dieser übersieht allerdings oft die Tatsache, dass höhere Investitionskosten über die Anlagenlebensdauer betrachtet, zu effizienteren L-EWT führen (können). Daher ist die Durchführung einer Wirtschaftlichkeitsrechnung (Vollkostenrechnung), bei der die Investitions- und Betriebskosten einer konventionellen Lösung denen einer Alternative gegenüber gestellt werden, dringend notwendig. Allerdings ist es bei der L-EWT-Planung großer Systeme sehr typisch, dass direkt eine größere Anzahl möglicher Varianten zur Diskussion stehen, weil eine Volumenstromaufteilung zwingend notwendig ist. Insofern wäre eine direkte Anwendung der [VDI 2067] oder anderer dynamischer Vergleichsverfahren sehr zeitaufwändig. Folglich sollte vor dieser umfangreichen und genauen Berechnung die Anzahl der in Frage kommenden Lösungen auf zwei oder drei L-EWT reduziert werden. Dies ist mit den hier diskutierten Kennzahlen möglich. Kostenabschätzungen von ausgesuchten Anlagenvarianten können auf Basis des Vergleichsprinzips mit Hilfe dieser Kennzahlen recht zügig durchgeführt werden.

Aus den bisher bestimmten anlagentechnischen Kennwerten können weitere, für die in der Vorplanungsphase notwendigen Hinweiswerte über die jeweilige Kostensituation abgeleitet werden. Eine Hilfestellung bietet hier der "Meterertrag" ME, der die aufwandsbereinigten Erträge pro Zeiteinheit auf den Materialaufwand bezieht, allerdings ohne Berücksichtigung der Anlagenlebensdauer und Zinsdynamik.

Material-spezifische Vergleichszahl ME
[kWs/(ma)] Meterertrag

$$ME = \frac{(Q_{LEWT} - f \cdot W_{VENT})}{L_{ges}} \quad (11)$$

Mit Kenntnis der dargestellten Wertebereiche von ME ist eine grundsätzliche Effizienzabschätzung im direkten L-EWT-Vergleich möglich, ohne die tatsächlichen (Einzel-)Kosten bereits kennen zu müssen. Ein hoher ME-Wert bedeutet hoher Ertrag pro investiertem Systemmeter L-EWT. Des Weiteren kann über ME eine Anlage positiv bewertet werden, die bei vergleichbaren Werten für Q_{sais} und e_{lewt} geringere Investitionskosten benötigt. Über ME wird auch deutlich, dass Anlagen mit relativ hohen Systemkosten (über L_{ges}) durchaus dann zu empfehlen sind, wenn die saisonalen Erträge entsprechend hoch sind. Gleichung 11 ist gerade deswegen von Bedeutung, weil sich die Bestimmung der tatsächlichen Kosten einer L-EWT-Variante aus verschiedenen Gründen als kompliziert erweisen kann.

Vergleicht man acht oder zehn Varianten, können sich diese von ihrer Konstruktion derart unterscheiden, dass die genaue Erfassung der Sonderbauteilkosten einen erheblichen zeitlichen Aufwand benötigt, wie noch gezeigt wird. Folgerichtig wäre es natürlich, wenn man L_{ges} in Gl. 11 durch die tatsächlichen Investitionskosten K_{INV} ersetzen würde, die ohnehin aus L_{ges} abgeleitet werden. Weiterhin macht es wenig Sinn, L_{ges} einfach durch K_{inv} in Gl. 11 zu ersetzen, da es üblich ist, die direkte Kostenrelation auf die gesamte Systemlebensdauer zu beziehen (Wirtschaftlichkeitsrechnung) und nicht nur auf eine Betriebsaison.

Die Bewertung der notwendigen Kosten für Material und Bauaufwendungen ist insofern erst einmal uneindeutig, da die Marktpreise für die Material- und Baukosten, aufgrund der Vielzahl von individuellen Randbedingungen großer L-EWT, stark streuen.

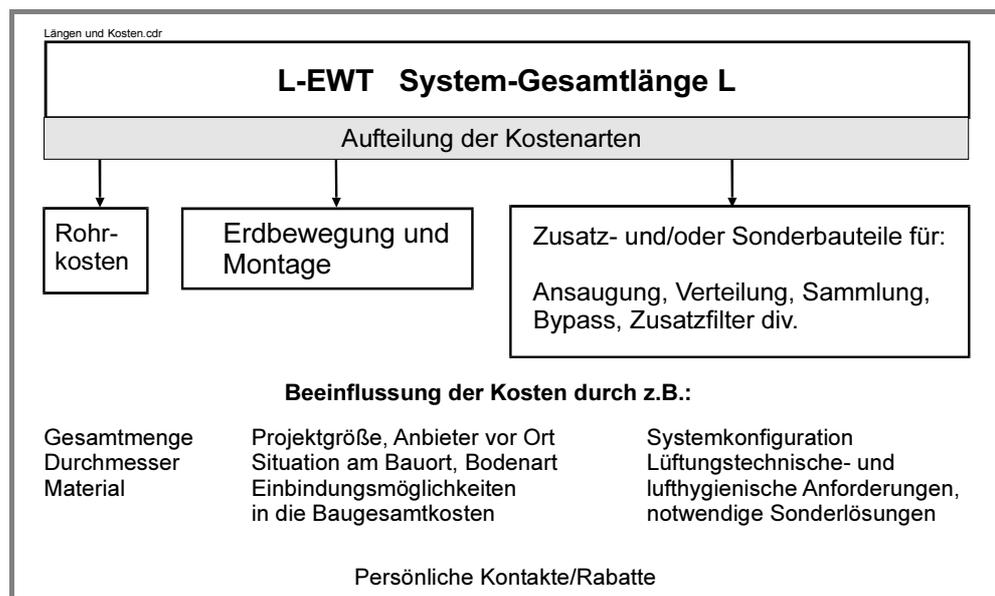


Bild 5
Beispiele von
Einflussgrößen
auf
die Anlagen-
Gesamtkosten

Aufgrund der starken Schwankungsbreite in der Kostenabschätzung von Projekten, ist es notwendig, eine Größe zu finden, aus der eine hinreichend objektive Vergleichsbasis abgeleitet werden kann. Dafür ist die Gesamtrohrlänge L_{ges} geeignet, da die Kosten im wesentlichen durch die Gesamtmenge der Rohre gebildet werden und dem damit verbundenen Erdaushub. In die Systemgröße L_{ges} geht bei den in Bild 5 aufgeführten Kostenarten der letzte wesentliche Kostenfaktor, die Anschlusskosten für Ansaugung und Verteilung in einer prozentualen Größenordnung von 50 bis 100 % der Material- und Aushubkosten ein. Dieser Wert ist ebenfalls von der Anlagenkonfiguration (Gesamtrohrlänge) direkt abhängig. Dividiert man folglich die thermischen Erträge durch die Gesamtrohrlänge L_{ges} kann die "thermische Effizienz" des Systems überschlägig bestimmt werden.

Ermittlung der Investitionskosten K_{INV}

Wie problematisch es ist, die Kosten von Sonderbauteilen, von Verteil- und Sammelkonstruktionen in der Investitionskosten-Vorabschätzung, auch noch von mehreren unterschiedlichen Konfigurationen, zu ermitteln, wurde bereits dargelegt. Dennoch kommt in der Planungsphase der Zeitpunkt recht bald, dass die Investitionskosten K_{INV} vorgelegt werden müssen. Abgesehen vom rechnerischen Aufwand, den die VDI 2067 für jede einzelne Systemvariante bedingt, besteht die Schwierigkeit, eine bestimmte, teils willkürliche, Betriebscharakteristik festlegen zu müssen, die aber einen wesentlichen Einfluss auf die Betriebskostensparnis und somit auf die Amortisationszeit des L-EWT hat.

Letztendlich sind auch alle umfangreichen, dynamischen Bewertungsverfahren für die Wirtschaftlichkeit einer Investition vergleichende Verfahren und keine Absolutbewertung einer Situation und damit mehr oder weniger ungenau. Dies rechtfertigt ebenfalls die Notwendigkeit nach schnellen, überschlägigen Bestimmungsverfahren, wie sie hier vorgestellt werden.

In der Praxis wird dennoch die Investitionsentscheidung fast ausschließlich durch die zu erwartenden Baukosten beeinflusst. Die Investitionskosten für einen L-EWT setzen sich wie

folgt zusammen:

$$K_{INV} = K_{Rohre} + K_{AV} + K_{EG} + K_{SB} \quad (12)$$

mit K_{INV} Gesamt-Investitionskosten des L-EWT. Die Summanden und Faktoren sind:

Tabelle 5 Einzelfaktoren und Summanden der Preisbildung

K_{Rohre}	Rohrkosten: Material inkl. Lieferung, Verlegung, Sand- oder Kieslagerung	$K_{Rohre} = L_{Rges} \cdot K_{Rs}$	(13)
K_{AV}	Gesamt-Aushub und Verbau	$K_{AV} = (L_M \cdot z_M^n \cdot b_M^m \cdot K_{Es}) \cdot f_M$	(14)
K_{EG}	Einricht- und Gerätekosten Einrichten, Räumen, Geräte, Gemeinkosten, Vorhaltekosten der Baustelleneinrichtung, Fremdleistungen, Sonderkosten	$K_{EG} = x_{EG} \cdot (K_{AV} + K_{Rohre})$ 25-50% ER 50 -100% REG kleinerer Wert bei großen Systemen	(15)
K_{SB}	Kostenanteile für Sonderbauteile (Ansaugung, Verteilung, Sammlung, Übergabe usw.) bezogen auf Material, Aushub und Verlegung 30-100% ER 100-150% REG kleinerer Wert bei großen Systemen	$K_{SB} = x_{SB} \cdot (K_{AV} + K_{Rohre})$	(16)

Tabelle 6 Nähere Erläuterungen zu den Einzelwerten in Tabelle 5

L_{Rges}	Gesamt-Rohrmateriallänge der Anlagenvariante			[m]
K_{Rs}	Rohr-Meterkosten	[€/m]	L_M	Länge des Aushubs [m]
z_M^n	Tiefe des Aushubs	[m]	b_M^m	Breite des Aushubs [m]
K_{Es}	Grundpreis für den Aushub eines Kubikmeters			[€/m ³]
n, m	Korrekturfaktoren nach [Cube] n ~ 1,2 und m ~ 0,9			[-]
f_M	Unterscheidungsfaktor Fläche/Graben bzw. Anzahl der Einzelgräben $F_M = 1$ für eine Aushubfläche			[-]
x	Prozentualer Kostenanteil			[%/100]

Die Ergebnisse nach diesem Verfahren haben sich im Vergleich zu den Kosten, die aus der Praxiserfahrung bekannt sind, als etwas hoch erwiesen. Da die hierüber ermittelten Kosten aber benutzt werden, um einen Vergleich innerhalb einer Entscheidungsebene durchzuführen, sind die Ergebnisse relativ zueinander in jedem Fall vertrauenswürdig.

Ermittlung der Rohrkosten K_{Rohre}

Neben örtlich gemauerten und gegossenen Erdkanälen kommen aus wirtschaftlichen Gründen für den Einsatz von L-EWT nur Rohre aus Standardmaterialien und Normgrößen in Betracht. Eine Reihe von Rohren aus der Ent- und Bewässerungstechnik oder auch Kabelschutzrohre können eingesetzt werden. Die Rohre müssen korrosionssicher, ungiftig, dicht und in entsprechenden Größen standardmäßig beziehbar sein. Metallische Rohre, glasfaserverstärkte Kunststoffrohre (GFK-Rohre) oder Beton-Keramik-Rohre, spielen bei der Nutzung von L-EWT keine Rolle, weil die spezifischen Nutzeigenschaften dieser Rohre nicht benötigt werden, sich aber im Materialpreis ausdrücken.

Tabelle 7 Materialdaten der Rohrarten

Material	Norm	Lieferdurchmesser	Anmerkungen
Kunststoffrohre			
Polyvinylchlorid PVC-Hart „KG-Rohre“	DIN19534	DN100 bis DN 1200	Preiswert bei kleinen Durchmessern
Polyethylen PE-HD	DIN 8074, 8075, 16962 DIN 19533 bis 19537	di 50 bis 1200 mm	aus Kohlenwasserstoff Polymeren; teuer
Polypropylen PP-Rohre (HT-Rohre)	DIN 19560	DN 40 bis DN 1100	Alternative zu chlorhaltigem PVC; schweißbar; nur kleine Durchmesser
PE Kabelschutzrohre	DIN 16961	für kleine Durchmesser bis 200 mm	Flexibel und kostengünstig Fabrikat
Mineralische Rohre			
Beton/Stahbetonrohre	DIN 4032, 4035, 4035 DIN 2402	DN100 bis DN1400 DN250 bis DN4000	Große Durchmesser preiswerter als Kunststoffrohre
Steinzeug	DIN 1230, 4033, DIN EN 295	di 100 bis 1400 mm	gur für belastete Abwässer; für L-EWT überqualifiziert
Faserzementrohre	DIN 19840 und DIN 19850	DN 100 bis DN 1000	Eternit zugfest! Große Durchmesser preiswerter als Kunststoffrohre

Bei kleinen Durchmessern (bis etwa 500 mm) werden KG-Rohre zu relativ günstigen Preisen hergestellt. Ab 500 mm sind Beton- und Faserzementrohre günstiger als KG-Rohre.

Es ist daher empfehlenswert, Beton z.B. für Sammelleitungen einzusetzen. Für Verlegungen im, oder in der Nähe von Grundwasser, sind wegen der Forderung nach Systemdichtheit PE-HD-Rohre einzusetzen, die mittels Heizelementstumpfschweißung nach [DVS 2207-1], dicht verbunden werden können. Darüber hinaus erfüllen auch PE-Druckrohre, die bei der Trinkwasser- und Gasinstallation eingesetzt werden, die geforderten Eigenschaften. Vorteilhaft sind die dichten Verbindungsstellen, die bei Entwässerungsrohrleitungen (z.B. durch Setzungen) nicht immer gewährleistet sind. So wurde beispielsweise für das Register des Schwerzenbacher Hofes [solarbau], das sich in stehendem Grundwasser befindet, Rohre aus HD-PE eingesetzt.

Der Einsatz von Betonrohren ist aus hygienischer Sicht fraglich (siehe Modul *LEWT_PLF2_Technischetails_09.pdf*). Sie können jedoch mit einer innen liegenden Kunststoffauskleidung aus HD-PE, die an den Verbindungsstellen fugenlos verschweißt wird, versehen werden. Durch eine solche Auskleidung verdoppeln sich nach Angabe eines Herstellers die Rohrkosten. Betonrohre finden ihren Einsatz aufgrund der verfügbaren Dimensionen in Einrohranlagen. Faser-zementrohre sind dichter und glattwandiger als Betonrohre. Sie sind ebenfalls interessant für Einrohrsysteme mit großen Rohrdurchmessern. Details über die Einbettung und Verlegung von L-EWT finden sich in [Dibowski III].

Die gesamten Investitionskosten eines L-EWT werden hauptsächlich durch Menge und Art des Rohrmaterials bestimmt. Der Bestellumfang für das Rohrmaterial und die Verlegekonfiguration eines Projektes beeinflussen alle weiteren Maßnahmen und Kostenpositionen bis zur Fertigstellung des L-EWT. Folglich können aus diesen Informationen der Aufwand für die Erdarbeiten und für die Sonderkonstruktionen (z.B. Ansaugung und Verteilung) abgeleitet werden. Tabelle 7 zeigt zusammengefasst die möglichen Materialien mit ihren spezifischen Eigenschaften.

Die Rohrkosten sind im wesentlichen abhängig vom Material, vom Durchmesser und dem Lieferumfang. Die Preisermittlung streut innerhalb der verschiedenen Anbieter stark. In Tabelle 8 sind ausgewertete Herstellerangaben aufgeführt.

Tabelle 8 Meterpreise Material bezogen auf 5m-Elemente, Lieferung frei Baustelle
Quellen: [FHAAbaubetrieb] DLR, LSG, Fränkische, eg-Plast, Steinzeug AG u.a

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

Gesamt-Aushub- und Verlegekosten K_{AV}

Zur Herstellung eines L-EWT werden die Rohre entsprechend verlegt und anschließend an die Zuluftanlage angeschlossen. Die Verlegung gliedert sich in folgende Arbeitsgänge:

1. Einrichten der Baustelle	2. Erdarbeiten	3. Rohre liefern und verlegen	4. Erdarbeiten beenden
-----------------------------	----------------	-------------------------------	------------------------

Zu Punkt 1 gehört das Bereitstellen der Maschinen und der Energieversorgung sowie die Vorbereitung der Erdfläche. Zu den Erdarbeiten (Punkte 2, 4) gehört das Ausheben eines Grabens oder einer Fläche, das Zwischenlagern des Aushubs, das Verdichten des Bodens um den Rohrmantel, das Wiederverfüllen und das Nachverdichten. Zu beachten ist, dass die spezifischen Aushubkosten abhängig von der Aushub-Gesamtgröße schwanken. Auch sind tiefere schmale Gräben im allgemeinen teurer, als flache breitere Gräben.

Eine komplette Baugrube (Register) ist günstiger, als einzelne Rohrgräben [Winkler]. Ein mittlerer Komplettpreis für Punkt 2 liegt bei 20 €/m³, mit einer Schwankungsbreite von +10/-5 €/m³. Die Kosten für Punkt 1 und Punkt 3 (Verlegen) erhöhen diesen Wert etwa um ca. 50%. Die Kosten für die Anlieferung (Punkt 3) sind i.d.R. in den Rohrmaterialkosten bereits enthalten.

Ist nur der reine Rohrpreis bekannt, werden gemäß [FHAAbaubetrieb] für die Verlegung ein Mittellohn A (ohne Aufsicht) von 13 €/h (Stand: Januar 2001) und nach [StLB] 3 bis 10 €/m pro Meter Sand- oder Kiesauflager angerechnet. Für Systemvergleiche eignen sich hier besonders die spezifischen Meter-Gesamtkosten $K_{INV,s}$ (Gl. 17).

Prozentuale Kostenanteile für Sonderbauteile K_{SB}

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

Ein Vertrauensbereich ergibt sich durch die Projektauswertungen im Rahmen von [solarbau], bei denen die jeweiligen Beträge zwischen 50 bis 120% der Montagekosten variieren. Insofern ist hier erneut zu erkennen, dass bei einem Systemvergleich die jeweiligen Konfigurationen nicht nur allein zuerst und ausschließlich auf die Kosten bezogen werden sollten, sondern auf eine rein technische Größe, aus der danach allerdings die Investitionskosten abgeleitet werden können, wie mit der Systemgesamtlänge L_{ges} .

Mit den aufgeführten Angaben sind grundlegende Vergleiche und damit Optimierungen für die gesamte Bandbreite der denkbaren Anlagenvarianten möglich. Nachfolgend werden die wesentlichen Systemaussagen mit Beispielen und Erläuterungen zusammengefasst dargestellt und die Vorgehensweise für eine Systemabschätzung beschrieben.

Werden die Investitionskosten K_{INV} in der Vorplanungsphase abgeschätzt, können zwei weitere kostenrelevante Kennzahlen daraus abgeleitet werden. Die spezifischen Investitionskosten $K_{INV,s}$ als weitere Vergleichsgröße berechnet sich dann über:

$$K_{INV,s} = K_{INV} / L_{ges} \quad (17)$$

Weiterhin lässt sich der Leistungspreis LP als weitere direkte Vergleichsgröße unabhängig von der Laufzeit bestimmen:

$$LP = \frac{K_{INV}}{(\dot{Q}_{LEWT} - f \cdot P_{VENT})} \quad (18)$$

Wie man mit allen hier aufgeführten Kennwerten arbeitet, um eine geeignete Systemvariante schnell und hinreichend genau bestimmen kann, wird nachfolgend detailliert beschreiben.

Ermittlung der Kennzahl-Wertegebiete

Nachfolgend werden die Wertebereiche gezeigt, die die einzelnen Kennzahlen annehmen können und wie die Anlagenqualität darüber bewertet wird. Da das Hauptmotiv für den Einsatz von L-EWT speziell die CO₂-Einsparung ist, sind in erster Linie hohe Leistungs- bzw. Arbeitszahlen sowie niedrige Aufwandszahlen anzustreben. Auf Basis dieser Zahlen soll erst danach versucht werden, die Gesamtkosten (nicht allein die Investitionskosten) zu reduzieren. Die Gewichtungen bei der Beurteilung von L-EWT sind somit definiert:

1. Möglichst hohe Temperaturspreizung bzw. spezifische thermische Leistung, folglich hohe saisonale Erträge allerdings bei geringen Antriebsaufwendungen, dadurch niedrige Aufwandszahlen bzw. CO₂-Emissionen
2. Relativ kurze Kapitalrückflusszeiten durch hohe Betriebskosteneinsparungen bei Anlagen mit gutem Leistungsprofil (dabei hohe Investitionskosten zulässig)

Die Wertebereiche werden auf Basis der Auswertung von numerisch simulierten L-EWT-Mustern bestimmt. Je mehr Anlagen ausgewertet werden, umso geringer ist die Wahrscheinlichkeit, dass es Anlagen mit Kennzahlen gibt, die außerhalb der Häufungsbereiche liegen (Prinzip des Benchmark-Verfahrens).

Leistungszahl ε_e

Bei allen untersuchten (numerisch simulierten) Verlegearten wird als größter Wert für die Leistungszahl ein Wert von 70 erreicht. Die Einbau- bzw. Gesamt-Druckverluste, also inklusive Einbauten, Filter und Umlenkungen, sind dabei berücksichtigt. Somit bleiben die Leistungsverhältnisse auch bei einer entsprechenden primärenergetischen Bewertung in den allermeisten Fällen positiv. Der Anteil der Varianten, die die Nähe der bekannten kritischen Marken erreichen (ca. 9 end-, /ca. 3 primärenergiebezogen) liegt in dieser Auswahl bei etwa 20% (Einzelrohr) und 18% (Register). Dies bedeutet, dass auch bei einer eher ungünstigen Auslegung mit einer schwach-positiven CO₂-Vergleichsbilanz zu rechnen ist.

Die Leistungszahlen liegen im Kühlbetrieb im Mittel immer etwas unter denen für die Luftvorwärmung und zwar bei 16% für Einzelrohre und 20% für Register. Dies hat zwei Gründe. Zum einen sind, bezogen auf die Jahresmitteltemperatur, die Amplituden im Sommer etwas kleiner als im Winter [VDI 4710]. Zweitens geben die für die numerische Simulation erhältlichen Testreferenzjahre (TRY) [Blümel] die sommerlichen Temperaturverhältnisse nicht richtig wieder, da hier für Standorte für die Bundesrepublik Extremtemperaturen, wie z.B. 33°C, nicht vorkommen. Dies hat in der Vergangenheit bereits häufiger bei der dynamischen Gebäudesimulation zu Unterschätzungen der zu erwartenden Kühllasten geführt. Zu den von [Blümel] entwickelten Testreferenzjahren, die ohnehin zu etwa 80% künstlich generiert sind, gibt es mittlerweile gute Alternativen, z.B. die Wetterdatenbank [Meteonorm] oder auch viel mehr Messdaten als noch vor zehn Jahren, wodurch für viele Standorte in der Bundesrepublik hochaufgelöste Temperaturprofile dargestellt werden können.

Bild 6 zeigt für eine Volumenstromgruppe die Spreizung der Leistungszahlen mehrerer Systemvarianten mit unterschiedlicher Qualität innerhalb einer Volumenstromgruppe.

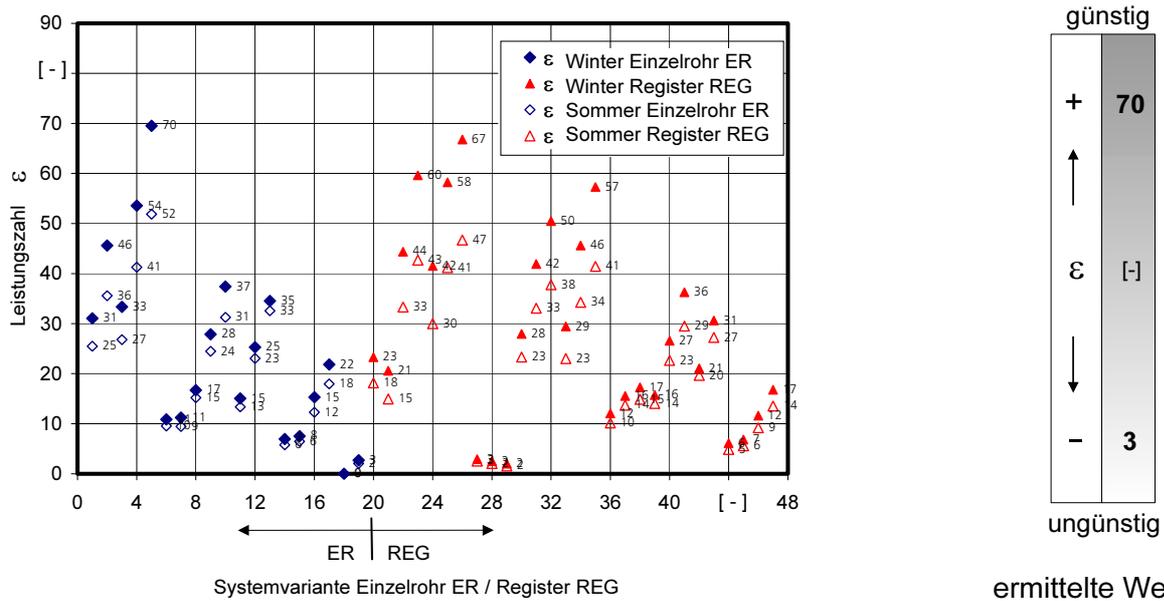


Bild 6 Leistungsbereiche der untersuchten Systemvarianten für L-EWT-Register und Einzelrohr

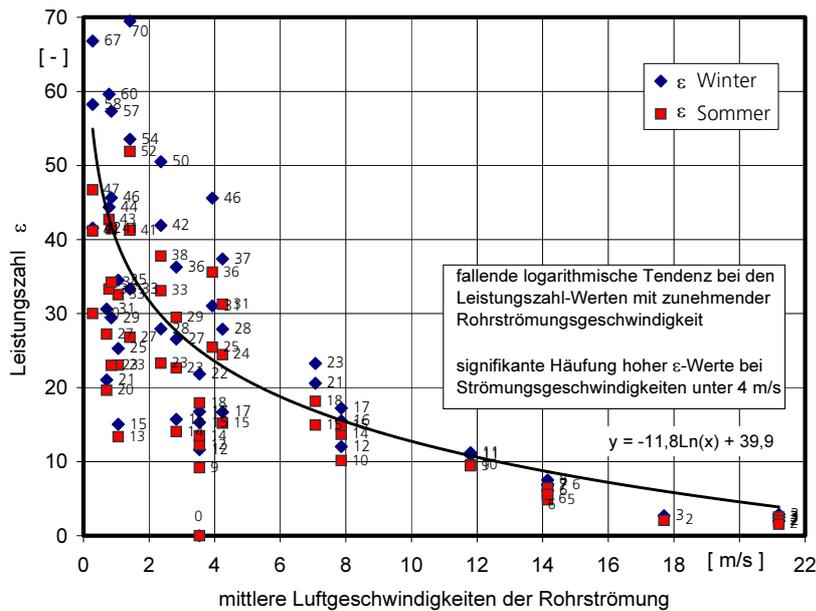


Bild 7

Abnahme der Leistungszahlwerte bei zunehmender Strömungsgeschwindigkeit

Für einfache Abschätzungen kann festgestellt werden, dass die vergleichsweise höheren Leistungszahlen unterhalb einer Strömungsgeschwindigkeit von 4 m/s zu finden sind. Mit zunehmender Geschwindigkeiten kommt es zu einer Häufung schlechter Betriebseigenschaften der jeweiligen Gruppen, was nachfolgend auch unter anderen Gesichtspunkten bestätigt werden kann. Zwar nähert sich jeder L-EWT mit zunehmender Rohrlänge der Erdreichtemperatur, jedoch wird aufgrund des nichtlinearen Temperaturverlaufs im Rohr jeder zusätzliche Längenmeter unwirtschaftlicher. Die aufgestellte Behauptung, dass die Systeme mit besseren Eigenschaften bei Geschwindigkeiten unterhalb von 4 m/s liegen, wird durch Bild 7 bestätigt.

Die Leistungszahl ϵ zeigt die Effizienz eines Systems nur für den Extremfall an. Der real überwiegend vorkommende Teillastbetrieb ist gekennzeichnet durch kumulierte Wärme-

erträge die sich aus nur kleinen Temperaturdifferenzen ergeben können, bei gleichzeitig im Vollastmodus laufenden Ventilator. Dadurch kann das Verhältnis von Ertrag zu Aufwand je nach den vorliegenden Randbedingungen deutlich schlechter ausfallen, als die Leistungszahl darstellt. Unter Umständen ist es sogar möglich, dass keine CO₂-Einsparung mehr stattfindet. Daher ist die Leistungszahl eine reine Vergleichsgröße für den Auslegungsfall.

Aufwandszahl e_{lewt}

Die Aufwandszahl e_{lewt} verfügt über eine weitere Information zur Energie- bzw. CO₂-Einsparung. Es kann allerdings festgehalten werden, dass in vielen Fällen bei einer sehr guten Leistungszahl das bewertete System auch eine gute Aufwandszahl besitzt.

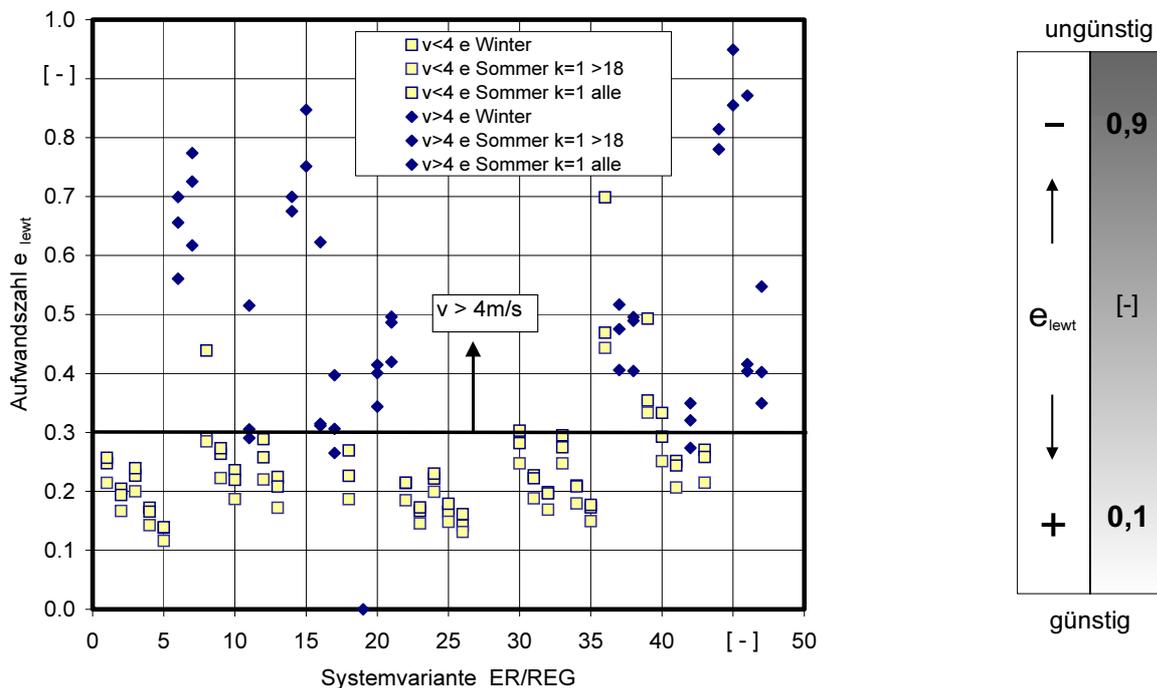


Bild 8 Aufwandszahlen e_{lewt} in Bezug auf die Strömungsgeschwindigkeiten im jeweiligen L-EWT-System

Die Aufwandszahlen zeigen eine Häufung von e_{lewt} im Bereich um den Wert 0,2. Eine Zahl, die eine „gute“ Anlage beschreibt. Besonders auffällig ist, dass die guten Anlagevarianten fast alle in Bereichen von Strömungsgeschwindigkeiten unterhalb von 4 m/s zu finden sind.

Für den Kühlfall sind diese Wertebereiche sehr günstig. Auffällig ist auch der starke Unterschied zwischen den Leistungs- und den Arbeitszahlen. Man sieht, dass die sehr hohen Werte bei den Leistungszahlen praktisch geringe Bedeutung haben können.

Bei der bisher gebräuchlichen Arbeitszahl β_s , liegen die Werte zwischen eins und acht. Diese Zahlen sind zwar im Vergleich zur Wärmepumpe besser, für den Winterfall ist aber zu sehen, dass bei einem L-EWT in jedem Fall nachgeheizt werden muss. Die höheren Aufwandszahlen im Kühlfall werden dadurch verursacht, dass man gegenüber der Gebäudekühllast einen größeren Betrag an L-EWT-Leistung benötigt, um die zur vollständigen Kühllastabfuhr benötigte Untertemperatur für den Raum zu erzeugen.

Netto-Volumenstromleistung QV

Ist durch schrittweise Veränderung eine Anlagenvariante mit einem hohen QV ermittelt worden, bringen weitere konstruktive Änderungen in der Planungsphase keine oder wenige weitere Verbesserung des thermischen Ertragsverhaltens in der jeweiligen Volumenstromklasse. Für die jeweilige Volumenstromklasse ist das System dann optimiert. Ein wesentlicher Vorteil von QV ist auch, dass er unabhängig vom Volumenstrom anwendbar ist und somit den Vergleich bei zusammengesetzten komplexen Systemen ermöglicht.

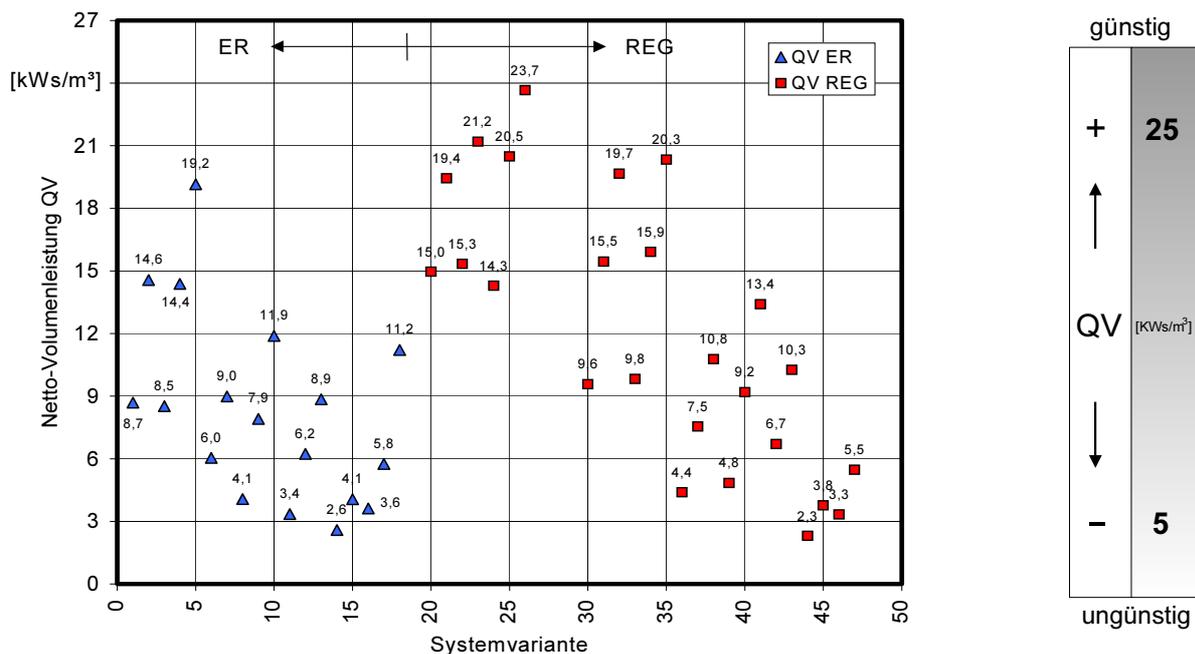


Bild 9 Wertebereiche der Netto-Volumenleistung QV

Aus den möglichen Zahlenwerten von QV (Bild 9) lässt sich erkennen, dass die effizienten Anlagen mit hohem CO₂-Einsparpotenzial ihrer jeweiligen Volumenstromgruppe im oberen Bereich dieser Skala liegen; gute Anlagen etwa oberhalb von 18 kWs/m³. Im Grunde ist QV zu dem mittleren $\Delta\vartheta_{\text{LEWT}}$ eines L-EWT über einem bestimmten Betriebszeitraum äquivalent.

Dieser Wert wird aber über die Vollbenutzungsstunden b eines definierten Zeitraums ermittelt, der vorher über eine numerische Simulation bestimmt werden muss. Dieser Wert liegt aber dem Planer i.a. nicht zur Verfügung.

Nachfolgend kann aber gezeigt werden, dass die über numerische Simulationen aufwändig errechneten Thermischen Netto-Erträge eines Systems mit den einfach ermittelbaren Maximalparametern, aus denen QV gebildet wird, korrelieren, womit eine wesentliche Erleichterung bei der Vorauswahl eines L-EWT ermöglicht wird.

Zur Bestimmung von QV wird lediglich das momentane Maximum der Temperaturspreizung benötigt. Dazu gibt es verschiedene Verfahren, die eine nahezu sofortige Bestimmung des Wertes ermöglichen [z.B. Benchmark-Verfahren, GAEA, Tabellen, etc].

Durch diese Einzelwertbestimmung kann somit für überschlägige Abschätzungen eine aufwändige numerische (Langzeit-) Simulation auf eine kurze Momentanbetrachtung reduziert werden. Das numerische Verfahren wird dann noch für die endgültige Ertragsbestimmung oder für die Darstellung bestimmter Betriebsituationen des vorausgewählten Systems benötigt.

In Bild 10 zeigt sich diese Kongruenz von aufwändig numerischem Ertrag zu einfach bestimmbareren Netto-Volumenleistung QV, wodurch eine grundsätzliche Eignungsüberprüfung einer bestimmten L-EWT-Variante bei komplexen Anlagen ermöglicht wird.

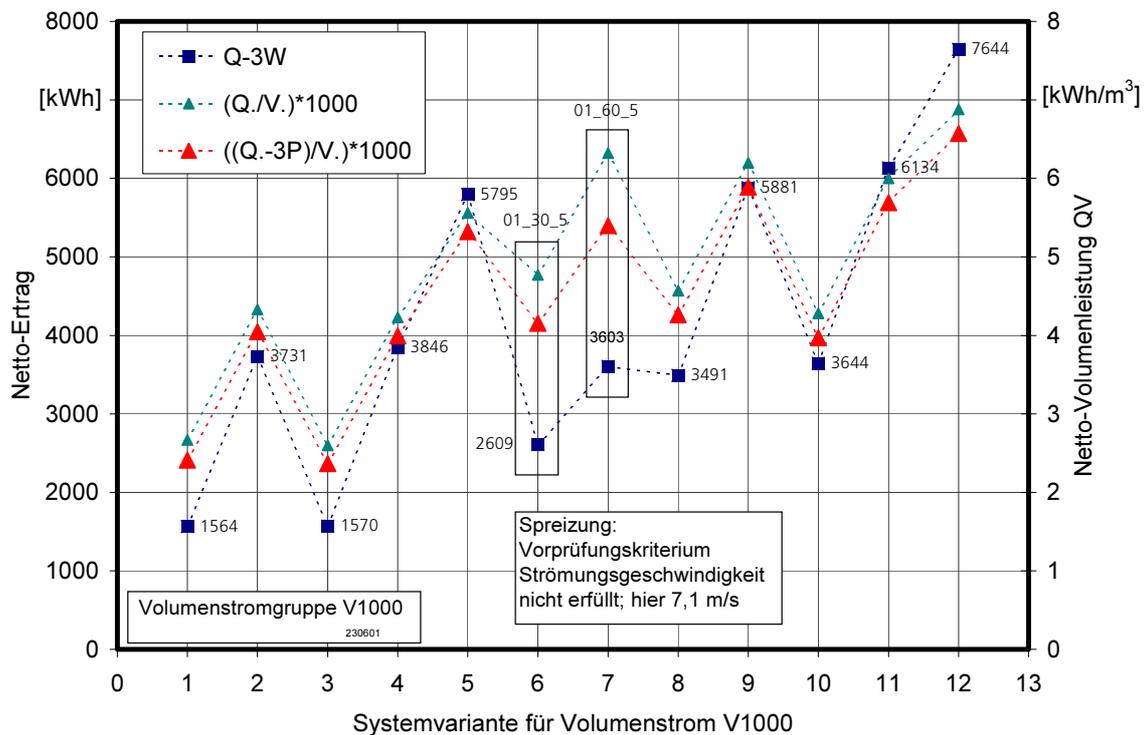


Bild 10

Kongruenz von aufwändig numerisch ermitteltem Ertrag (Q-3W) und überschlägig bestimmbareren Leistungsverhältnissen zur Eingrenzung geeigneter L-EWT-Varianten, am Beispiel der Volumenstromgruppe V1000

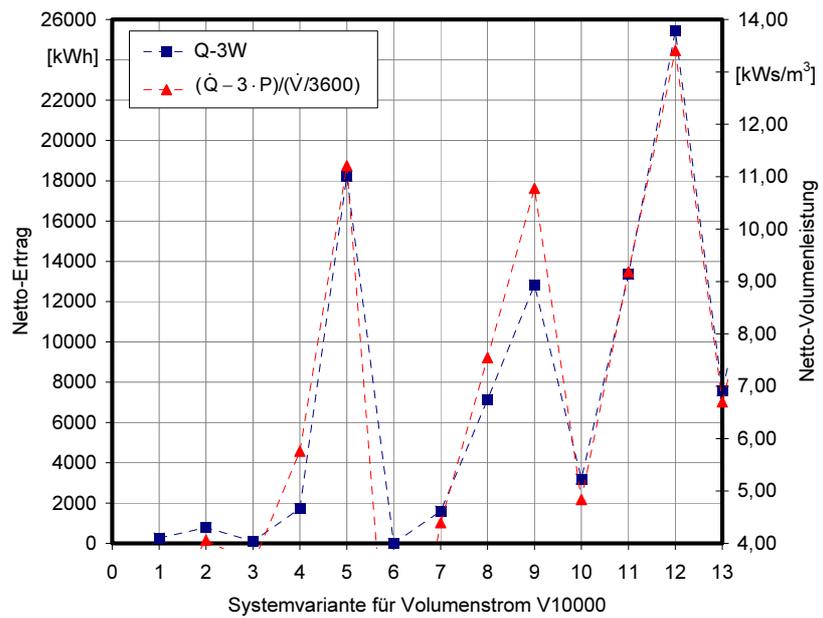
Interessanterweise zeigen ausschließlich diejenigen Varianten 01_30_5 und 01_60_5 keine Deckung, die schon vorher bei der Geschwindigkeitsprüfung ausgefiltert worden wären.

Grundvoraussetzung für die allgemeine Gültigkeit dieser Korrelation ist, dass dieser Zusammenhang auch für andere Volumenstromgruppen uneingeschränkt gilt.

Dies wird beispielhaft an den Volumenstromgruppen V3000 und V10000 überprüft.

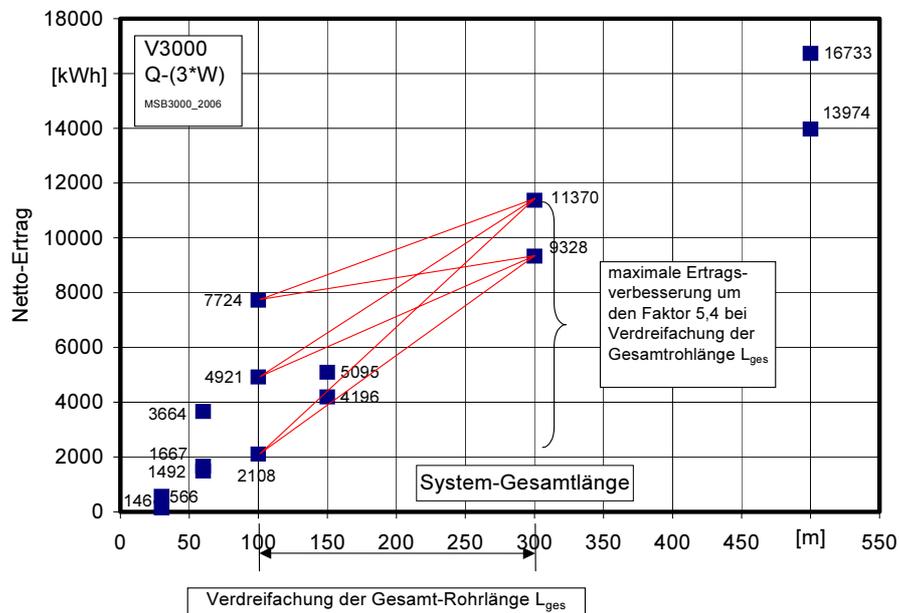
Bild 11 zeigt analoges Verhalten für die Volumenstromgruppe V10000.

Bild 11
 Kongruenz von aufwändig numerisch ermitteltem Ertrag (Q-3W) und überschlägig bestimmbareren Leistungsverhältnissen zur Eingrenzung geeigneter L-EWT-Varianten, am Beispiel der Volumenstromgruppe V10.000



Bei der Optimierung von L-EWT steigen, wie bei technischen Systemen meistens, die jährlichen Erträge und die erzielbaren Temperaturspreizungen mit dem Materialaufwand, also mit den Investitionskosten. Die thermischen Unterschiede auch innerhalb vergleichbarer Investitionen sind teilweise so deutlich, dass gezeigt werden kann, wie die Betriebskosteneinsparung bei Systemen mit vergleichsweise höheren Investitionskosten zu rechtfertigen sind (Bild 12).

Bild 12
 Überproportionale Ertragssteigerung mit zunehmender Systemgesamtlänge L_{ges}



Am Beispiel aus Bild 12 kann gezeigt werden, dass sich bei Verdreifachung der Gesamtlänge (indirekte Investitionskosten) der Ertrag um den Faktor 5,4 (Teil der Betriebskosten) vergrößert.

Meterertrag ME

Sind die thermischen Leistungszahlen bestimmt, können die in Frage kommenden Anlagenvarianten mit der Gesamtlänge des Systems in Bezug gebracht werden, um die erste Kosteninformation zu erhalten. Dies geschieht mit dem Meterertrag ME. ME stellt dar, wie teuer ein vorher bestimmter Ertrag im Vergleich mit anderen Varianten bezüglich der Investitionskosten erkaufte werden muss. Vorab muss bestimmt werden, innerhalb welcher Zahlenwerte ME liegen wird. Da die ME-Werte bei Registern aufgrund der konstruktiven Unterschiede zwischen ER und REG tendenziell niedriger als bei Einzelrohren sind, ist der Vergleich zwischen Einzelrohren und Registern eingeschränkt (Bild 13).

Die eigentliche Stärke von ME als Bewertungskennzahl liegt allerdings bei Vergleichen zwischen L-EWT mit identischem Materialeinsatz, wie an einem Beispiel noch gezeigt wird. Streng genommen ist dies eine unbedingte Vergleichsvoraussetzung. Allgemein werden mit ME im direkten Materialvergleich gute Feinoptimierungen ermöglicht. In Bild 13 werden die zu erwartenden Wertebereiche des Meterertrags ME ermittelt.

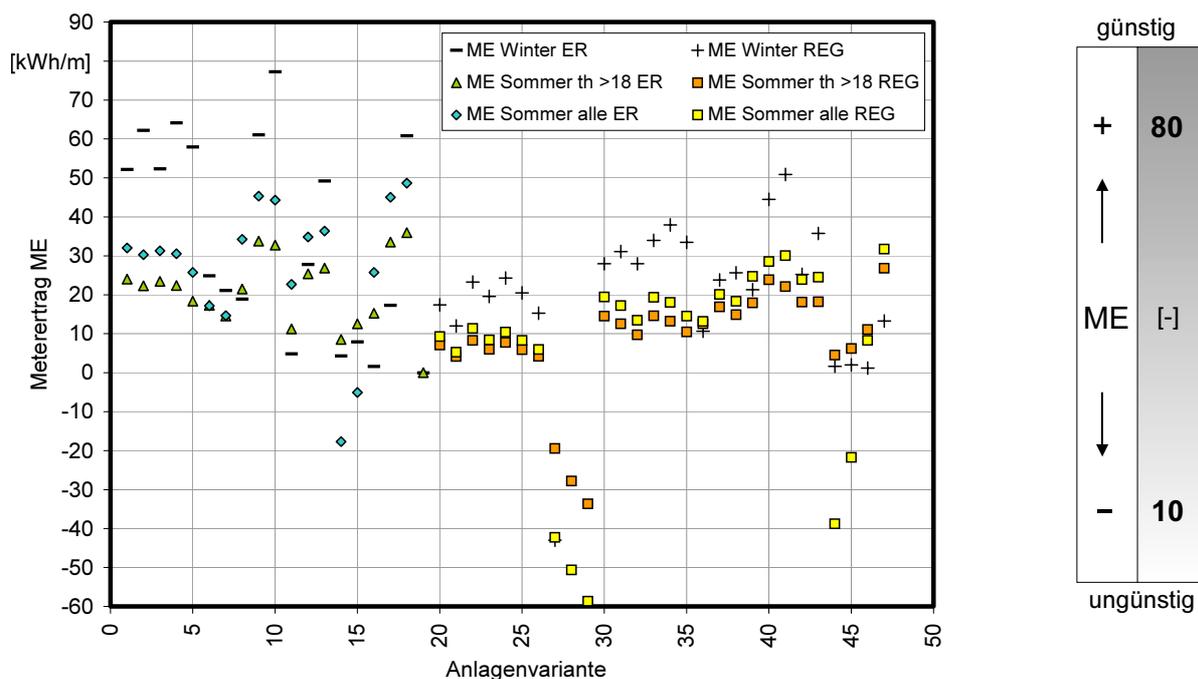


Bild 13 Wertebereiche des Meterertrags ME

Hierbei zeigt sich am Beispiel der Volumenstromgruppe V3000, dass eine gute Anlage (niedriges e_{lewt}) mit geringen Investitionskosten (hohes ME), bezogen auf die thermische Maximalleistung nur mittelwertig ist, aber diesen Nachteil durch hohe Betriebskosteneinsparungen ausgleichen kann. Das Register (hoher Materialeinsatz) zeigt dabei nicht zwangsläufig einen niedrigen ME-Wert. ME stellt somit in der Kette der Bewertungszahlen eine nachrangige Hilfsgröße dar, die zur letzten Feinabstimmung herangezogen werden kann.

Wesentliche Einflüsse auf die Betriebseigenschaften von L-EWT

Die mögliche Systemvielfalt, gerade von großen L-EWT, führt zu einem unübersichtlichen Eindruck über die grundsätzlichen konfigurationsübergreifenden Basiseigenschaften. Die Ermittlung und Kenntnis dieser Basiseigenschaften ist eine wichtige Grundvoraussetzung zum Verständnis des L-EWT-Prinzips. Die festgestellte Streuung von Meinungen über die Systemeigenschaften und dem Nutzpotenzial, macht eine systematische Betrachtung und Vermittlung dieser Basiseigenschaften notwendig. Nachfolgend sind diese Eigenschaften am Beispiel der Volumenstromgruppen V1000 und V5000 dargestellt. Dem schließt sich eine Sensitivitätsanalyse mit verschiedenen Volumenströmen, Standorten und Bodenarten an. Diese Analyse ist auch mit konkreten Betriebsergebnissen dargestellt, um einen direkten praxisnahen Bezug in der Vorplanungsphase herstellen zu können.

Einfluss des Volumenstroms

Der Volumenstrom ist die anfänglich vorgegebene Führungsgröße innerhalb der Projektplanung. Wird bei Registern der Volumenstrom aufgeteilt, erhält er die Eigenschaft einer Variablen. Die wärmetechnischen Einflüsse des Volumenstroms können mit $\dot{V} = A_R \cdot v_f$ über die Strömungsgeschwindigkeit (Bilder 7 und 17) beschrieben werden. Zu beachten ist grundsätzlich, dass zwar mit dem Volumenstrom der innere Wärmeübergangskoeffizient α_i zunimmt, allerdings auch die Druckverluste mit dem Quadrat der Geschwindigkeit, und damit die Aufwandszahl e_{lewt} .

Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit

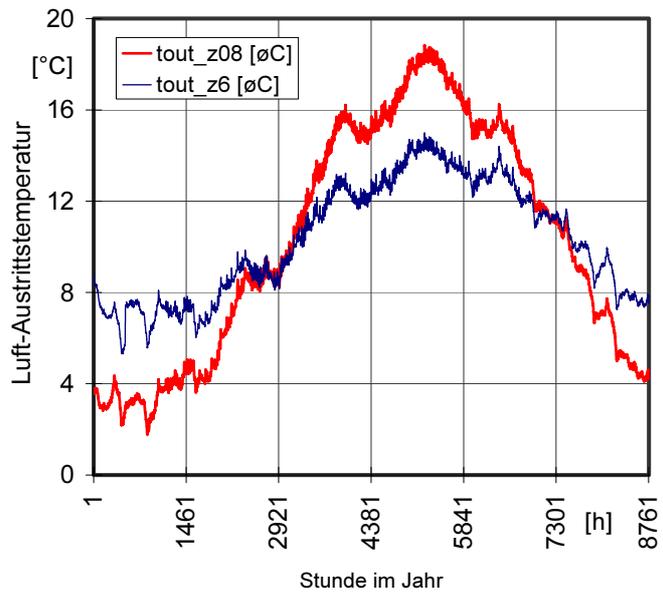
Bei der Systemauslegung stellt sich oft die Frage nach der "richtigen" Strömungsgeschwindigkeit der Luft im Rohr. Zu vermeiden sind Betriebszustände, bei denen die nutzbare Temperaturdifferenz zu geringeren Energieeinsparungen führt, als für den Antrieb des Systems benötigt wird. Bei dem quadratischen Anstieg des reibungsbedingten Druckverlustes, der zu immer größeren Ventilatorleistungen führt, ist deutlich darauf hinzuweisen, dass sich dabei nicht die thermische Leistung (Temperaturspreizung) reduziert, sondern sich der Antriebsaufwand für den L-EWT relativ zu den thermischen Gewinnen vergrößert und folglich die CO₂-Emission bei der Stromerzeugung steigen.

Ertragsabhängigkeit von der Verlegetiefe

Die Verlegetiefe ist neben dem Rohrmaterial der zweite entscheidende Kostenfaktor. Die Verlegetiefen für L-EWT sind zur Oberfläche hin begrenzt durch die definierte Frostgrenze bei $z = 0,8$ m und in der Tiefe durch wirtschaftliche Überlegungen. [Albers] hat eine optimale Verlegetiefe von z_{opt} von 5,8 m ermittelt. Da aufgrund der bisherigen Projekterfahrungen in dieser Verlegetiefe durch die sehr hohen Aushubkosten kein wirtschaftliches System mehr zu erwarten ist, ist dennoch von Interesse, wie groß die thermischen Austauschraten in dieser Verlegetiefe grundsätzlich wären. Die untere Verlegetiefe kann somit bei $z = 6$ m begrenzt werden. In Bild 14 sind die Unterschiede der Luftaustrittstemperaturen für die Grenz-Verlegetiefen $z=0,8$ und $z=6,0$ m dargestellt.

Bild 14

L-EWT-Luftaustrittstemperaturen in den Grenz-Verlegetiefen $z = 0,8$ und $6,0$ m
In der Systemgruppe V1000
am Beispiel 03_60_5



Bei Variation der Verlegetiefe ist das Maß der Veränderung in den Ertragsaussichten von Bedeutung. Bild 15 stellt die Veränderung mit zunehmender Verlegetiefe dar. Im Bild 16 sind die Ergebnisse der Abweichungen (Gewinne und Verluste) für die gesamte Volumenstromgruppe V1000 in Prozent gegenüber der Referenzverlegetiefe von 3 m dargestellt.

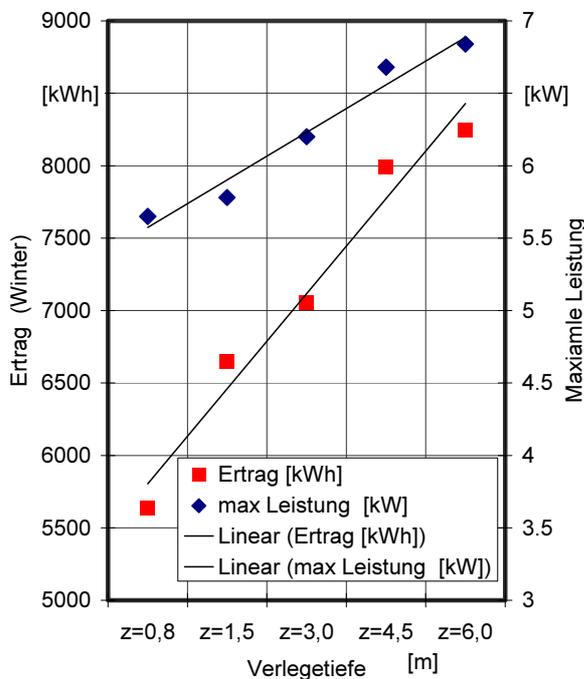


Bild 15

Prinzipielle Veränderung von Erträgen und Leistung als Funktion der Verlegetiefe am Beispiel 03_60_5

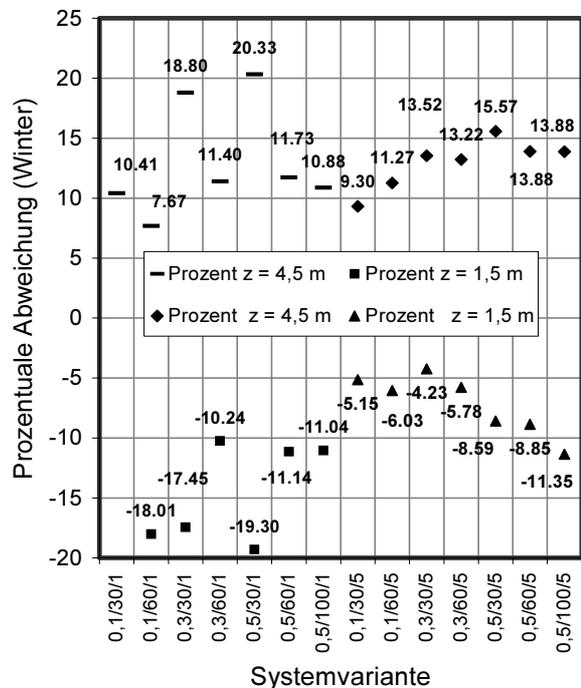


Bild 16

Abweichungen (Gewinne und Verluste) der thermischen Erträge für Einzelrohre und Register der Volumenstromgruppe V1000 in Prozent

Einfluss des Rohrmaterials

Ein Vergleich verschiedener Rohrmaterialien beschränkt sich sinnvoller Weise auf Durchmesserbereiche, bei denen sowohl (noch) Kunststoff als auch (schon) Beton unter wirtschaftlich tragbaren Bedingungen eingesetzt werden kann. Für ein V5000-Register mit fünf Rohren zu 100 m wurden mit einem jeweiligen Innendurchmesser von 500 mm PVC-hart, HD-PE sowie Beton verglichen.

Tabelle 9 Stoffdaten der Vergleichsmaterialien

		Polyvinylchlorid (PVC-hart)	Polyethylen hoher Dichte (PE- HD)	Beton
Dichte	kg/m ³	1400	963 (ISO 1183)	2200
Wärmeleitfähigkeit	W/(mK)	0,15	0,42 (DIN 52 612)	1,4
Spezifische Wärmekapazität	kJ/(kgK)	1,0	1.0	1,0

Auffällig ist, dass sich die Stoffdaten von Kunststoffen schon untereinander deutlich unterscheiden können und somit nicht pauschal gleichgesetzt werden sollten. Des Weiteren kommt die spezifische Wärmekapazität c der Kunststoffe wegen der geringen Wanddicken nur wenig bis gar nicht zur Wirkung. Es kann bei Betonrohren wegen der dickeren Wand gezeigt werden, dass sich Speichereffekte (c) gegenüber Kunststoffrohren positiv auf das Gesamtergebnis auswirken und im Vergleich zu besseren Ergebnissen führen. Zwar zeigt auch HD-PE gegenüber dem gängigen Hart-PVC gewisse Vorteile, dafür ist es allerdings deutlich teurer.

Tabelle 10 Ergebnisse im Vergleich

		PVC-hart	HD-PE	Beton
Max. Temperaturspreizung Winter/Sommer	K	13,27 / 10,7	13,77 / 11,0	14,52 / 11,49
Max. thermische Leistung Winter/Sommer	kW	22,27 / 17,96	23,12 / 18,5	24,37 / 19,28
Thermischer Ertrag Winter/Sommer*	kWh	18087 / 11575	18858 / 11937	20043 / 12544

* "alle"

Sprechen wirtschaftliche oder hygienische Gesichtspunkte nicht dagegen, würde man sich in diesem Fall für das Betonrohr entscheiden.

Einfluss der Betriebsregelung

Wenn der L-EWT starr mit der Außenluftansaugung der Wärmerückgewinnung verbunden ist, kommt es zu Situationen, bei denen die Betriebsbedingungen nicht erfüllt sind und der Ventilator unnötigerweise läuft, was die CO₂-Gesamtbilanz ungünstig beeinflusst. Es sollte grundsätzlich die Möglichkeit bestehen, die Außenluft auch direkt anzusaugen, wenn die Betriebsbedingungen für den L-EWT nicht erfüllt sind (Tabelle 3). Dies kann in der Heizperiode der Fall sein, wenn z.B. Außenluft von 13°C durch den L-EWT geleitet wird, dessen

umschließendes Erdreich nur 7°C besitzt. Nicht nur, dass dann unnötig Strom für den Ventilator *verbraucht* wird, sondern sich auch der Wärmeanteil der Nacherhitzung vergrößert. Für den Betrieb des L-EWT sind daher mehrere Bedingungen zu erfüllen, um die Wirtschaftlichkeit des Systems zu gewährleisten.

Wie in den aufgeführten Musterlösungen zu erkennen ist, unterscheiden sich die thermischen saisonalen Erträge nicht stark davon, ob das System geregelt wurde, oder nicht. Allerdings sind die Auswirkungen auf die Primärenergiebilanz negativ, wenn die Regelung nicht beachtet wird.

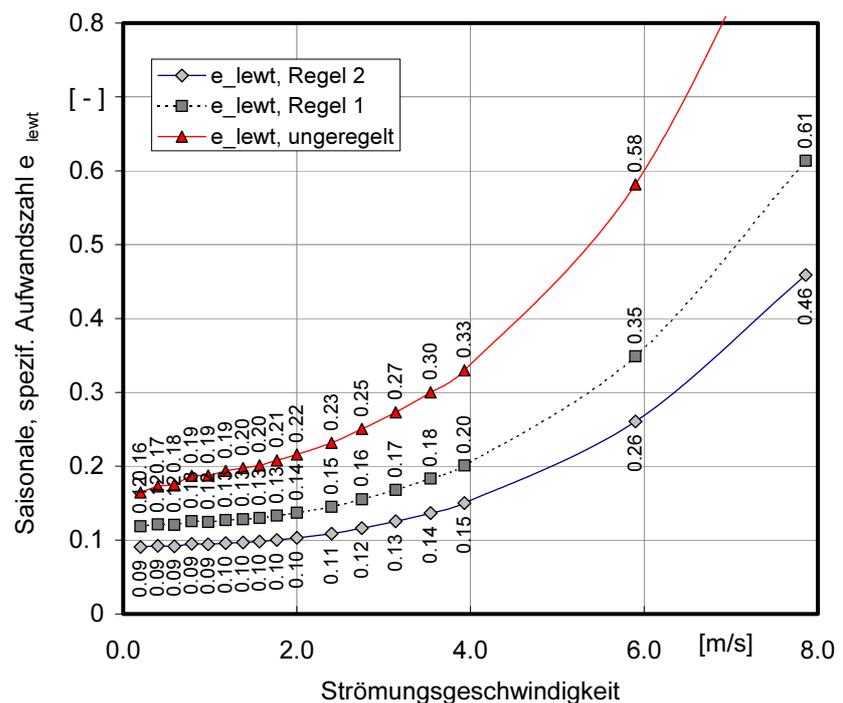
Die maximalen Temperaturdifferenzen und die thermische Maximalleistung für die Luftvorwärmung werden unabhängig von einer Regelung erzielt, da unter solchen Maximalsituationen der L-EWT immer eingeschaltet wäre. Anhand der thermischen Erträge kann der regelungsbedingte Unterschied gezeigt werden, wobei erst über die Differenz der Betriebsstunden der unnötige Energieeintrag bei nichtgeregelten Anlagen deutlich wird (Bild 17).

Die unterste Kurve verdeutlicht den Fall, dass der L-EWT unabhängig von den äußeren Randbedingungen während der Heizperiode durchläuft, was für viele Anwendungen im Wohnhausbereich der Fall ist. Gegenüber einem optimal geregelten L-EWT fallen die Ertragseinbußen und der Abfall der Leistungszahl sehr deutlich aus; die CO₂-Einsparungen sind entsprechend ebenfalls erheblich reduziert.

Bild 17

Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit und der Regelstrategie auf das Betriebsergebnis e_{lewt} am Beispiel DN300 unter Berücksichtigung von Einbaudruckverlusten von 100 Pa

Weitere Einzelergebnisse der Volumenstromgruppe V1000 sind im Anhang (LEWT_PLF2_ANHANG_09.pdf) aufgeführt



Einfluss des Materialaufwands auf die Aufwandszahl e_{lewt}

Hohe Erträge sind nur mit einem relativ hohen Materialaufwand zu erzielen. Die höheren Werte bei den spezifischen Erträgen sind allerdings nur dann ein Kennzeichen für ein effizientes System, wenn für die Erzeugung dieser Erträge ein elektrischer Antriebsaufwand benötigt wurde, der deutlich kleiner ist, als der thermische Ertrag. Im Vergleich zwischen

zwei Anlagen mit ähnlichen thermischen Erträgen, 03_30_5 und 03_60_1 sowie 05_30_5 und 05_60_1, gibt es sehr unterschiedliche längenspezifische Erträge, die prinzipiell als Qualitätskriterium genutzt werden können. Voraussetzung ist allerdings die Kenntnis des elektrischen Antriebsaufwands zur Erzeugung dieser Erträge. Um diese Qualitätsunterschiede genauer evaluieren zu können, muss die Aufwandszahl e_{lewt} herangezogen werden.

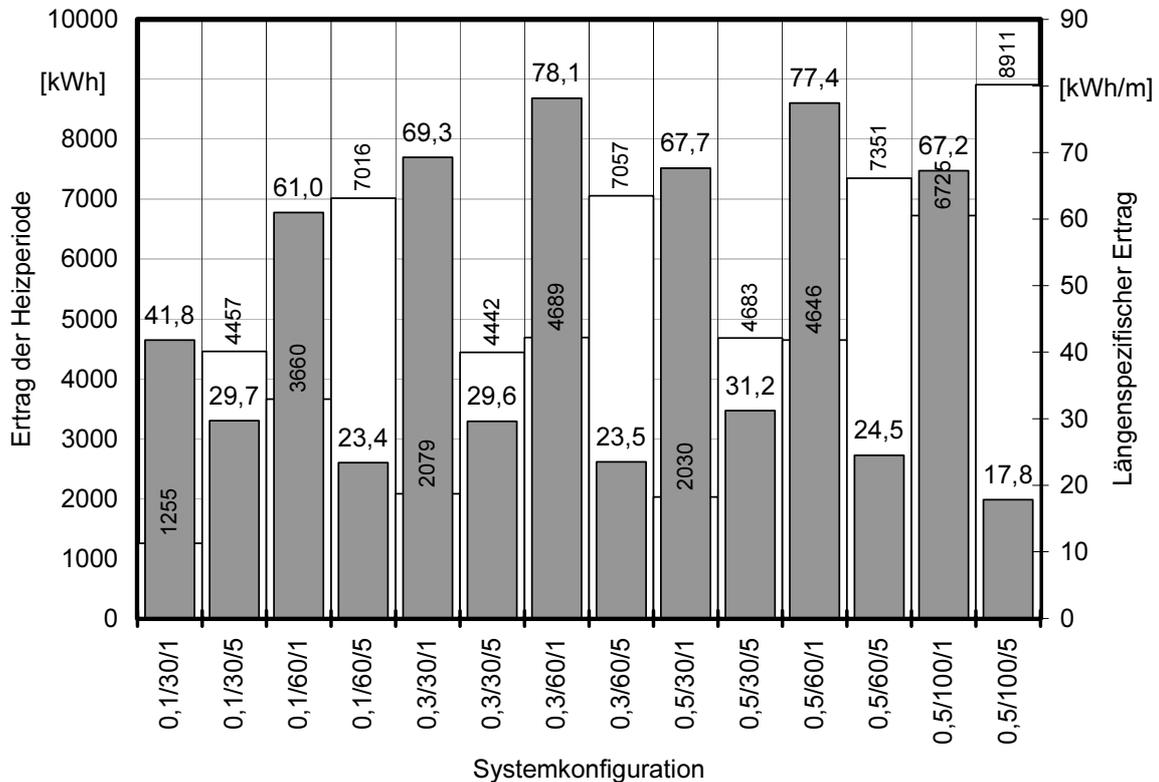


Bild 18

Thermische Erträge für die konstante Volumenstromgruppe V1000 in der Heizperiode bei unterschiedlichen Anlagenkonfigurationen im Vergleich mit den Ergebnissen ohne Berücksichtigung der definierten Schwellwertregelung und längenspezifische thermische Erträge der unterschiedlichen Anlagenkonfiguration

Eine alleinige Betrachtung der thermischen Erträge einer Auslegungsvariante ist zur Beurteilung der Effizienz eines L-EWT nicht hinreichend.

Interessant ist hier der Vergleich der Anordnung 01_30_5 gegenüber dem System 01_60_5, die eine doppelte Rohrlänge besitzt. Zwar sind bei 01_60_5 die Saisonenerträge deutlich höher (7016 kWh) als bei 01_30_5 (4457 kWh), allerdings auf Kosten einer größeren Förderarbeit, die die saisonale Leistungszahl des Systems mit doppelter Rohrlänge von 7,4 auf 6,3 absenkt.

Dieser Effekt tritt immer auf, wenn aufgrund eines zu geringen Rohrdurchmessers die Höhe der Reibungsverluste zu Förderleistungen führt, die mit der Rohrverlängerung stärker zunehmen, als die thermischen Erträge.

Systembewertung über Portfolio-Technik

Geringe Investitionskosten können zunächst günstig erscheinen, wobei allerdings die *Gefahr* eines hohen e_{lewt} -Wertes besteht. Niedrige e_{lewt} -Werte führen hingegen durch relativ geringe Betriebskosten zu einer Beschleunigung der Amortisation. Daher müssen die definierten Systemkennzahlen immer gemeinsam betrachtet und entsprechend bewertet werden. Eine übersichtliche, zusammenfassende Ergebnisdarstellung am Beispiel der Gruppe V1000 ermöglicht die Portfolio-Technik (Bild 19).

Als Beispiel für die Bewertung verschiedener Konfigurationen aus dem Portfolio wird die Variante 03_60_1 mit Variante 05_30_5 verglichen. Die thermischen Erträge sind nahezu identisch, die Aufwandszahlen weichen nur gering voneinander ab. Die spezifischen Kosten sind bei der Variante 05_30_5 aber deutlich geringer (0,09 zu 0,192), was zu einer deutlichen Verteuerung des Registermaterials um mehr als 100 % führt. Dass sich solche Vergleiche allerdings nicht pauschalisieren lassen, wird in Kapitel *Optimierung* nachfolgend diskutiert. Vor allem eine notwendige Durchmesseranpassung bei der Umwandlung von einem Einzelrohr auf ein Register führt zu einem gewissen Spielraum bei den Betriebsergebnissen.

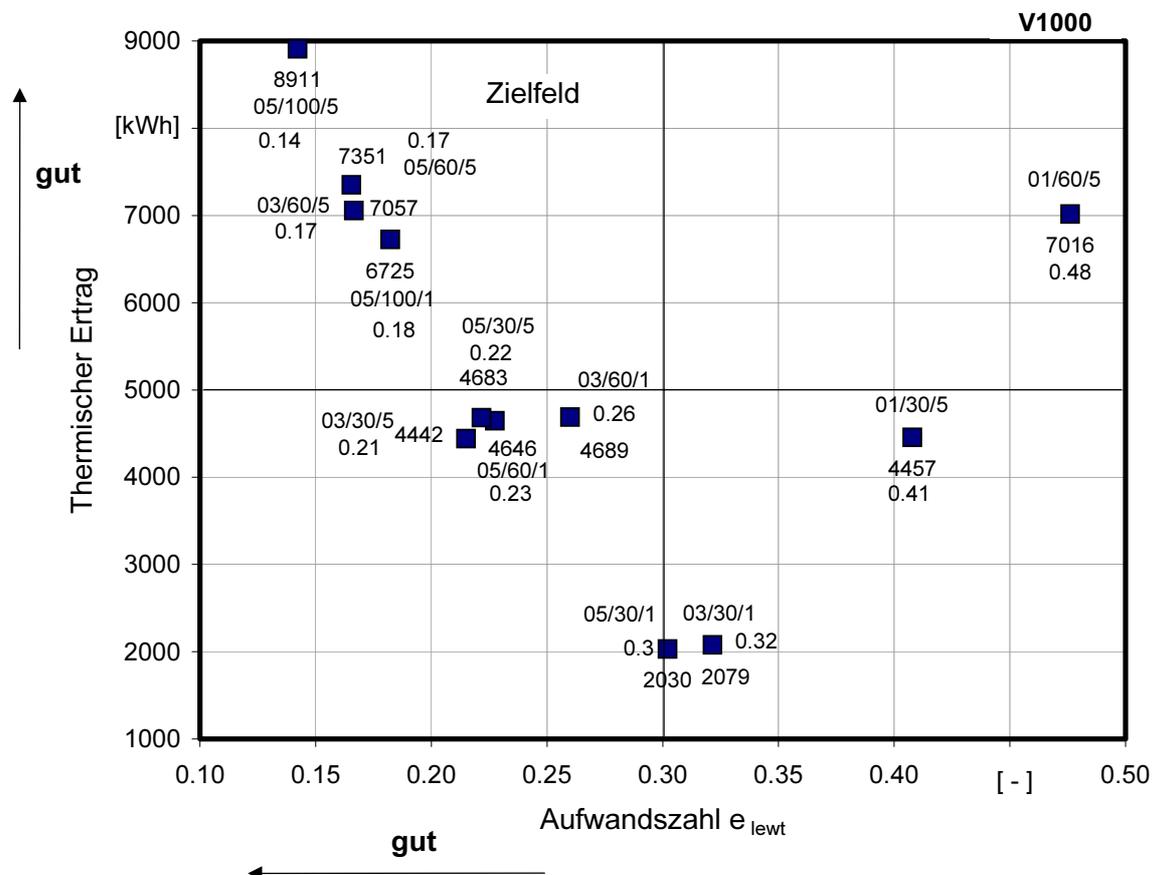


Bild 19 Beispiel eines Kennzahlportfolios der Gruppe V1000

Einfluss von Bodenart und Standort

Unabhängig von der Vielfalt der möglichen Wertekombinationen aller Bodenzusammensetzungen kann festgestellt werden, dass für ALLE Bodenarten die Temperaturleitfähigkeit nur ganz bestimmte Grenzwerte annehmen kann. Berechnet man nun einen vordefinierten L-EWT mit den beiden Grenzwerten von a_E , liegt ein richtiges Ergebnis auf jeden Fall innerhalb dieser Spanne. In einem zweiten Schritt muss der Planer dann aufgrund der ihm vorliegenden Informationsdetails entscheiden, ob er "sein" Ergebnis eher am oberen oder unteren Rand der beiden Ergebnisse vermutet. Der vorsichtige Planer liegt auf jeden Fall immer mit dem kleineren Wert von Ertrag und maximaler Temperaturspanne richtig und kann davon ausgehen, dass das tatsächliche Ergebnis wahrscheinlich etwas besser ist, was ihm eine "stille Reserve" einbringt. Aufgrund dieser Überlegungen werden Resultate von numerischen Systemberechnungen zusammengefasst dargestellt, die u.a. neben den Ergebnissen für einen Boden mit mittleren Stoffeigenschaften auch die Schwankungsbreite darstellt, die sich aus den oben ableitbaren Erläuterungen ergeben. Die Ergebnisse beinhalten bereits den Einfluss von Ermüdungseffekten bei Dauerbetrieb und die Störeinflüsse durch Interferenzen bei der Registeranordnung.

Die Temperaturleitfähigkeit a als erster Variationsparameter bei der Auslegungsberechnung

Hinzuweisen ist darauf, dass die Bodeneigenschaften feucht und schwer nicht zwangsläufig auf einen hohen Wert für a_E hindeuten. So liegt der Wert für z.B. wassergesättigten Ton bei ca. $3,6 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, also eher am unteren Grenzwert der Temperaturleitfähigkeit a_E . Aus der Literatur lassen sich für die Grenzen der Temperaturleitfähigkeit a_E für insgesamt alle Bodenarten folgende Grenzwerte annehmen:

a hoch:	$1,09 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$	a niedrig:	$0,28 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
---------	---	------------	---

Diese Werte stellen die theoretischen Grenzwerte dar, die bei absoluter Sättigung bzw. bei vollständiger Trocknung des Bodens erreicht werden können. Für realistische Fälle bewegen sich diese Werte aufeinander zu, da auch ein gesättigter Boden noch Lufteinschlüsse und ein trockener Boden noch Restfeuchte besitzt. Die daraus bestimmbaren realistischen Grenzwerte liegen nach [Honarmand] und [Dibowski III] dann bei etwa:

a hoch:	$0,93 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$	a niedrig:	$0,44 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
---------	---	------------	---

Da über ein vollständiges Jahr betrachtet weder ständig Sättigung oder Trockenheit vorliegt, sind diese Werte für praktische Berechnungen noch weiter eingrenzbar, was die Schwankungsbreite der möglichen Ergebnisse in den meisten Fällen noch etwas verkleinert, wobei allerdings zu beachten ist, dass a_E eben nicht nur vom Feuchtegehalt des Bodens abhängt (s.o.). Die nachfolgenden Ergebnisse beziehen sich somit auf die Werte in Tabelle 11.

Der meteorologische Standort als zweiter Variationsparameter bei der Auslegungsberechnung

Ein weiterer zu beachtender Einfluss auf das Betriebsergebnis ist der meteorologische Standort. Ein baugleiches System führt an zwei unterschiedlichen Standorten nicht zu gleichen Ergebnissen. Wie in [Dib_Hau] gezeigt werden konnte, sind die meteorologischen Unterschiede innerhalb aller erfassten deutschen Standorte i.a. nicht erheblich. Allerdings kann von Interesse sein, wie sich ein bestimmter L-EWT in einer schattigen Tallage am Alpenrand oder an der windigen Küste zu einem warmen Standort wie z.B. im Badischen unterscheidet. Insofern werden ebenfalls zu den Bodenart-bedingten Ergebnisbereichen gegenüber einem Standort mit mittleren meteorologischen Parametern auch zwei extreme Standorte (wärmer, kälter) berücksichtigt.

Für die Bestimmung des Betriebsverhaltens eines L-EWT ist bei Wohn- bzw. Niedrigenergie- oder Passivhäusern -im Gegensatz zu L-EWT für große Bürogebäude- die winterliche Heizperiode von entscheidender Bedeutung bei der Anlagenplanung. Daher reicht die Betrachtung der Jahresmitteltemperatur eines Standortes für die Auslegung, speziell für den Vorwärmfall, nicht aus. Einem, gegenüber den Durchschnittswerten der Wintermonate, relativ kalten Standort folgt nicht zwangsläufig auch ein relativ kalter Sommer. So folgt z.B. dem eher kalten Winter in Freiburg i.Brsg. ein vergleichsweise sehr warmer Sommer, was in etwa zu einem Jahresmittelwert der Außenlufttemperatur führt. Für die Heizperiode als ausschließlichen Betrachtungszeitraum gilt gegenüber Giessen als besonders kalter Standort Oberstdorf im Allgäu, als relativ milder Standort Köln, in der rheinischen Tiefebene.

Innerhalb dieser Werte befinden sich die meisten Standorte in Deutschland. Entsprechend bilden sich zum Teil deutliche Unterschiede der Bodentemperaturprofile aus (Bild 20).

Bild 20
Jahres-Bodentemperaturprofile für drei unterschiedliche Standorte innerhalb der Bundesrepublik Deutschland

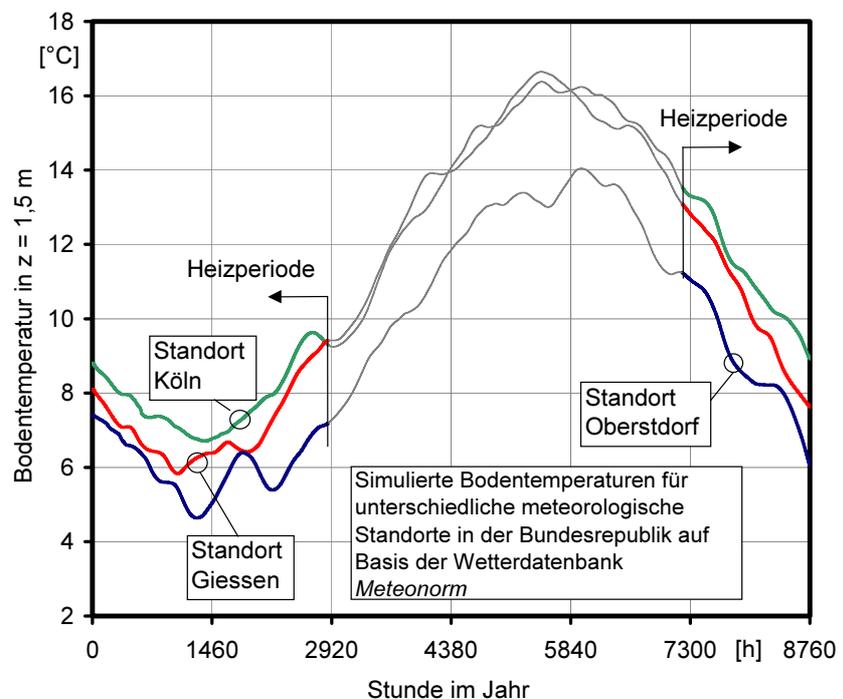


Tabelle 11 beschreibt die geographischen Basisangaben für die untersuchten Standorte.

Tabelle 11 Meteorologische Basisdaten der Referenzstandorte (Quelle: [Meteonorm])

Mittlere Monats-Außenlufttemperaturen der Referenzstandorte in °C			
Geographische Lage	Oberstdorf	Giessen	Köln
Nördliche Breite	51,29	50,35	50,47
Östliche Länge	-7,12	-8,42	-7,18
Höhe über NN	843 m	160	50
November	2,3	4,4	6,2
Dezember	-0,4	1,3	4,0
Januar	-1,7	0,5	2,3
Februar	-1,0	1,6	2,9
März	1,8	4,7	6,2

Sensitivitätsanalyse und Fehlergrenzen

Die nachstehenden Angaben beruhen auf Ergebnissen numerischer Simulationsprozeduren. Die aufgeführten Erträge gelten für eine Verlegetiefe von 1,5 m, als die übliche Verlegetiefe für Wohnhäuser. Andere Verlegetiefen oder ggf. der Einfluss des Gebäudes auf die Ergebnisse werden ebenfalls ermittelt und dargestellt. Wie bereits erwähnt, bestimmt der Auslegungs-Luftvolumenstrom die Anlagengröße. Daher werden die nachfolgend aufgeführten Ergebnisse nach den Luftvolumina unterteilt (Tabelle 12).

Tabelle 12 Gebräuchliche (Teil-)Volumenströme von L-EWT-Systemen

L-EWT-Musterergebnisse für Luftvolumenströme in m ³ /h		
150	300	600
1000	1500	3000

Erläuterungen zu den Sensitivitätsdiagrammen

Die nachfolgend dargestellten Sensitivitätsdiagramme zeigen die Abweichungen der Systemergebnisse von einem zentralen Mittelwert (Standort Giessen, Boden-Temperaturleitfähigkeit $a=0,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) bei Veränderung des Standortes und der Bodenzusammensetzung. Dies führt zu der Erkenntnis, mit welchen Ergebnisabweichungen grundsätzlich bei Änderung dieser beiden wichtigen Randbedingungen und bei fehlerhaften Planungsannahmen zu rechnen ist. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse sind in Tabellenform dargestellt. Das Betriebsverhalten eines meteorologisch mittleren Standortes mit einem Boden mit mittleren Leitungseigenschaften befindet sich im Zentrum der Tabelle, deutlich umrahmt. Die benachbarten Felder zeigen, wie sich die Ergebnisse verändern, wenn man den Standort, oder den Boden, oder beides verändert. Des weiteren lässt sich aus den Ergebnissen schließen, mit welchen Veränderungen bei Änderung der Geometrie ungefähr zu rechnen ist.

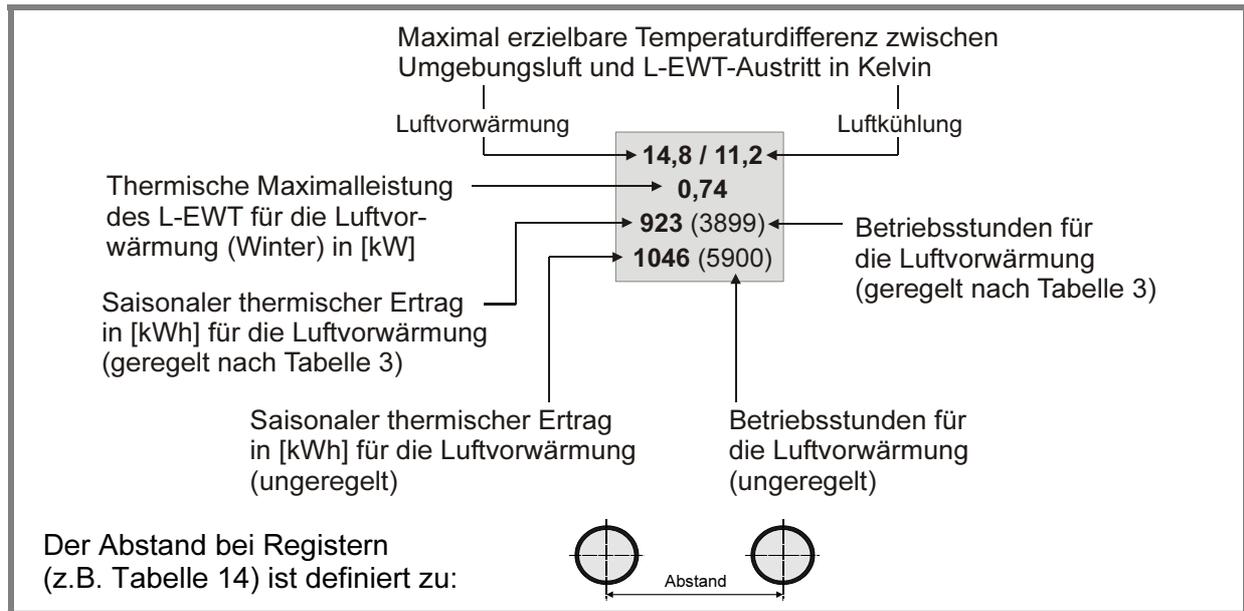


Bild 21 Erläuterungen der Ergebnispositionen in den Musterdiagrammen

Sensitivität von Systemen bis zu einem Volumenstrom von 3000 m³/h

Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass Änderungen des inhomogenen Feuchteprofils des Erdreichs nur indirekt über die Temperaturleitfähigkeit erfasst werden können. Daher sollte mit Ergebnisschwankungen gegenüber den realen Verhältnissen gerechnet werden. Auf der "sicheren Seite" rechnet man immer mit dem schwächsten Ergebnis der jeweiligen Tabelle. Die Musterstandorte der Heizperiode sind Oberstdorf, Giessen und Köln bei einer Standard-Verlegetiefe $z = 1,5$ m.

Einzelrohr		$\dot{V}_{LEWT}^{max} = 150 \text{ m}^3/\text{h}$ \varnothing DN200; Länge: 30 m; $v_{L,max} = 1,33 \text{ m/s}$			
Temperaturleitfähigkeit a des Erdreichs in $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$	0,4	14,8 / 11,2	13,7 / 10,8	13,6 / 12,3	K/K
		0,74	0,7	0,68	kW
		923 (3899)	762 (3530)	618 (3000)	kWh/h
Standard-Verlegetiefe $z = 1,5$ m	0,6	1046 (5900)	884 (5431)	748 (5083)	kWh/h
		16,1 / 11,7	15,1 / 11,5	14,6 / 13,0	K/K
		0,81	0,76	0,73	kW
	0,9	1083 (4224)	899 (3857)	723 (3282)	kWh/h
		1188 (6072)	1007 (5692)	842 (5282)	kWh/h
		16,5 / 11,9	15,8 / 12,0	14,9 / 13,2	K/K
		0,84	0,8	0,75	kW
		1154 (4266)	960 (3901)	765 (3298)	kWh/h
		1266 (6128)	1078 (5834)	894 (5395)	kWh/h
		Standort A	Standort B	Standort C	

Tabelle 13

Ergebnisabweichungen bezüglich einem Standort mit mittleren Basisparametern bei Änderung des Standorteigenschaften und der Bodenart

Standort A (Oberstdorf) liefert das beste Betriebsergebnis. Dies liegt u.a. daran, dass das Bodentemperaturprofil dem mittleren Außenlufttemperaturprofil nur stark gedämpft folgt und dieser Effekt durch die generell größeren Temperaturunterschiede zwischen Luft- und Erdreich an diesem Standort stärker ausgeprägt sind, als an den "wärmeren" Orten.

Register		$\dot{V}_{LEWT}^{max} = 600 \text{ m}^3/\text{h}$ \varnothing DN200; Länge: 30 m; $v_{L,max} = 1,33 \text{ m/s}$				
Temperaturleitfähigkeit a des Erdreichs in $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$	0,4	11,5 / 11,2	11,4 / 11	11,6 / 12,6	K/K	Tabelle 14 Ergebnisabweichungen bezüglich einem Standort mit mittleren Basisparametern bei Änderung des Standorteigenschaften und der Bodenart
		2,32	2,3	2,33	kW	
		1913 (2317)	1500 (1824)	1419 (1746)	kWh/h	
Standard-Verlegetiefe z = 1,5 m	0,6	12,7 / 12,1	12,5 / 11,8	12,6/13,3	K/K	
		2,56	2,52	2,53	kW	
		2294 (2605)	1800 (2088)	1683 (1976)	kWh/h	
4 Rohre Abstand: 0,7 m	0,9	2756 (4613)	2368 (4290)	2280 (4195)	kWh/h	
		15,5 / 11,54	14,4 / 11,6	14,3 / 12,5	K/K	
		3,12	2,9	2,87	kW	
		3769 (3895)	3066 (3491)	2592 (3055)	kWh/h	
		4211 (5921)	3556 (5681)	3085 (5220)	kWh/h	
		Standort A	Standort B	Standort C		

Ab einem Volumenstrom von etwa $600 \text{ m}^3/\text{h}$ kann über den Einsatz eines Registers an Stelle eines Einzelrohres nachgedacht werden. Weniger aus energetischer Sicht, als mehr aufgrund der Tatsache, dass Rohre mit sehr kleinen Durchmessern ($d < 150\text{mm}$) gegenüber dem entsprechenden Einzelrohr sehr kostengünstig sein können (z.B. Kabelschutzrohr, siehe Tabelle 8). Bei größeren Systemen kommt bei richtiger Auslegung auch der energie-technische Vorteil eines Registers zum Tragen.

Tabelle 15 Ergebnisvergleich eines Einzelrohres im Register

Ergebnisabschwächung des Register-Einzelrohres gegenüber einem Einzelrohr Bei einem Volumenstrom \dot{V}_{LEWT}^{max} von $150 \text{ m}^3/\text{h}$ für die Luftvorwärmung				
Registerabstand: 0,7 m 	Maximal erzielbare Temperaturdifferenz	Thermische Maximalleistung	Saisonaler thermischer Ertrag (ungeregelt)	Saisonaler thermischer Ertrag (geregelt)
	K	KW	kWh	KWh
150 m^3/h Einzelrohr	15,1	0,76	1007	899
150 m^3/h einzelnes Registerrohr	12,5	0,63	592	450
Prozent	83	83	59	51

Der Leistungsabfall (auf 83%) fällt gegenüber den Ertragsverlusten (59/51%) zwar deutlich moderater aus, es ist allerdings festzuhalten, dass der Verlegeabstand (Lichte Weite: 0,5 m), der zu diesen Verlusten führt, recht gering ist. Qualitativ gilt dieser Zusammenhang für jeden Vergleich dieser Art, wobei insbesondere bei einem weiteren Verlegeabstand sich die Registerergebnisse den Einzelrohrergebnissen annähern. (Zur Beachtung: dies ist kein Systemvergleich Einzelrohr zu Register, sondern Einzelrohr zu Register-Einzelrohr).

Mögliche Abweichungen durch fehlerhafte Einschätzung der Randbedingungen

Geht man in der jeweiligen Ergebnismatrix bei der zentralen Position (Giessen; Temperaturleitfähigkeit $a = 0,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) von einem Referenz-Mittelwterergebnis aus, ist die Schwankungsbreite der Abweichungen um diese Konfiguration in Abhängigkeit von der Bodenart und dem Standort von Bedeutung. Es kann gezeigt werden, dass der Standort innerhalb der Bundesrepublik deutlich weniger Einfluss auf ein Betriebsergebnis hat, als die Bodenzusammensetzung. Für gemäßigte Orte wie Köln oder Giessen kann kein wesentlicher Unterschied herausgearbeitet werden. Für Oberstdorf als Ort mit besonders kühlem Winter ergeben sich generell bessere Ergebnisse im Vergleich zu den Vergleichsstandorten. Dies liegt im Kern daran, dass die Dämpfung der Amplitude der Bodentemperaturwelle in bezug auf tiefere Umgebungslufttemperaturen größere ausnutzbare Temperaturdifferenzen erzeugt, als an gemäßigeren Standorten (Bild 6.22).

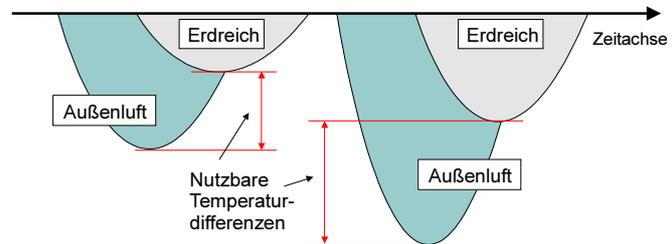


Bild 22

Nutzungspotenzial des L-EWT über Idealisierte Temperaturverläufe von Außenluft und Erdreich an unterschiedlichen meteorologischen Standorten

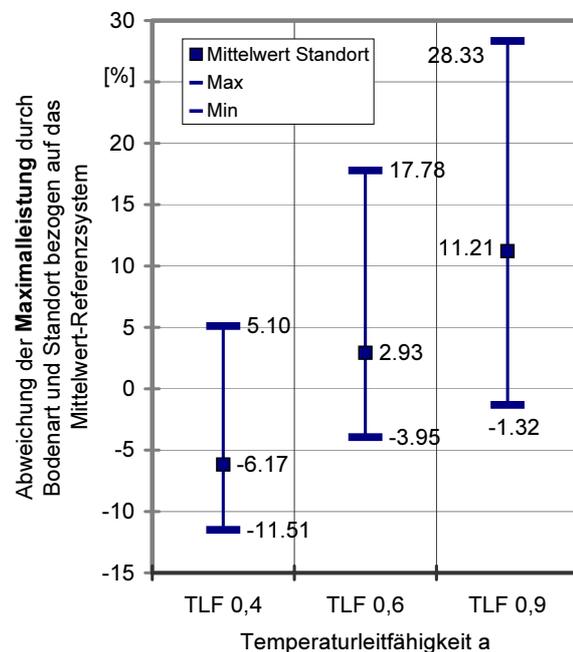
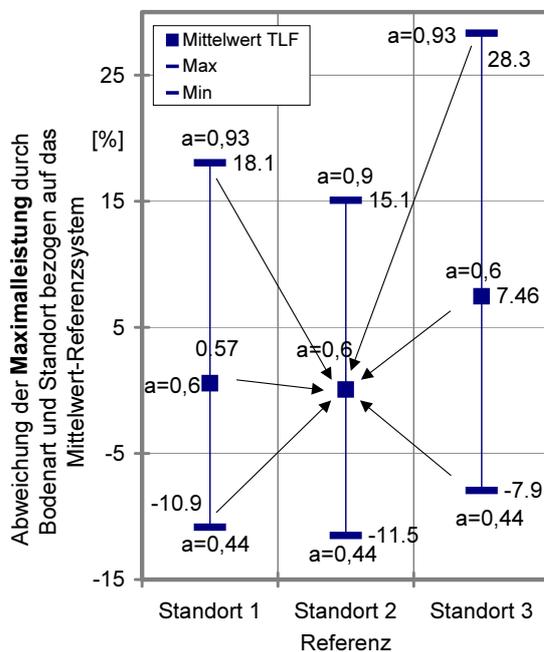


Bild 23 und 24

Mittelwert und maximale Abweichungen der maximalen Systemleistungen in Bezug auf die Referenzanlage Giessen bei mittlerer Temperaturleitfähigkeit a ($0,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) der Bodenart

Die zusammengefassten prozentualen Abweichungen der hier 99 untersuchten Systeme beziehen sich auf den Referenzstandort Giessen. Ausgehend davon sind die maximal möglichen Abweichungen aufgeführt, die sich bei Veränderung der Bodenart, des Standortes und der Regelung ergeben.

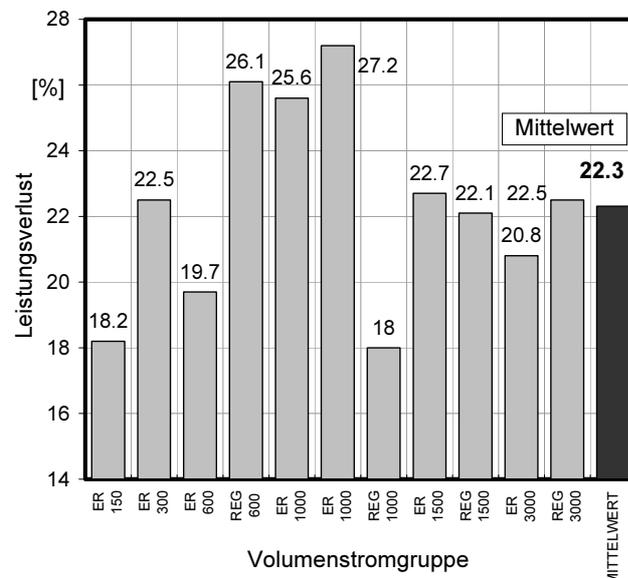
Bild 23 zeigt, dass eine hohe Temperaturleitfähigkeit gegenüber den standortbedingten Schwankungen zu deutlich besseren Ergebnissen führt. Ein "guter" Boden (a hoch) führt auch an wintergemäßigten Orten (Köln) zu besseren Resultaten, als ein "schlechter" Boden (a niedrig) in Oberstdorf. Der an sich günstigere Standort kann dieses Defizit nicht ausgleichen. Die Mittelwerte der Abweichungen gegenüber dem Referenzsystem steigen deutlich mit der Temperaturleitfähigkeit. Die größten absoluten Abweichungen fallen dennoch (mit 28,33%) nicht so extrem aus, dass bei einer vollständigen Fehleinschätzung der Bodenart in der Planungsphase die Ertragserwartung vollständig divergieren würde.

Ein durchaus unerwünschter Effekt bei hoher Temperaturleitfähigkeit des Erdbodens ist, dass die Dämpfung der Bodenwelle schwächer ausfällt und damit folglich der ausnutzbare Temperaturhub zwischen Boden und Umgebungsluft. Daher muss nachgewiesen werden, dass die positiven Effekte der zeitabhängigen guten Leitungseigenschaften des Erdreichs (hohes a) im unmittelbaren Bereich des L-EWT die bei hoher Temperaturleitfähigkeit kleiner werdenden Nutztemperaturdifferenz überkompensieren. Aufgrund der hier durchgeführten numerischen Berechnungen und der Sensitivitätsanalyse kann nachgewiesen werden, dass insgesamt die hohen Wärmeleitfähigkeiten, auch bei unterschiedlichen Betriebsarten, zu besseren Ergebnissen führen. Werden bei Abschätzungen der Bodenart und des Standortes zugleich falsche Annahmen getroffen, ergibt sich ein Fehler, der sich in der Ergebnismatrix quasi als Diagonale zwischen einem guten Standort mit gutem Boden (Oberstdorf mit einer Bodentemperaturleitfähigkeit von $a = 0,9 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) und einem Standort mit den entgegengesetzten Eigenschaften einstellt (Köln; $a = 0,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$).

Bild 25 zeigt die jeweils größten Verluste bezüglich der Systemauslegung und den tatsächlichen Betriebswerten für die dargestellten Volumenstromgruppen für den Fall, dass fälschlicherweise ein zu guter Standort/Boden angenommen wurde.

Bild 25

Leistungsverluste (in Prozent) bei fehlerhafter Annahme zu günstiger Randbedingungen bezüglich Boden und Standort für die betrachteten Muster-Volumenstromgruppen



Dieser Fall ist natürlich kritischer zu sehen, als die gegenteilige Annahme, da bei einer Auslegungsgrundlage, die von einem schlechteren Boden/Standort ausgeht, als tatsächlich vorhanden ist, die Betriebsleistung besser sein wird, als erwartet. Festzuhalten ist, dass ein "günstiger" meteorologischer Standort das Systemverhalten bei einem "schlechten" Boden nicht vollständig ausgleichen kann.

Verfahren der Systembewertung

Die Wertebereiche der Kennzahlen sowie deren qualitative Einordnung wurden aufgezeigt. Die Frage, wie der Begriff 'optimal' zu definieren ist, wurde diskutiert. Wie der Entscheidungspfad zur Bestimmung einer optimalen L-EWT-Variante aussehen kann, zeigt Bild 26.

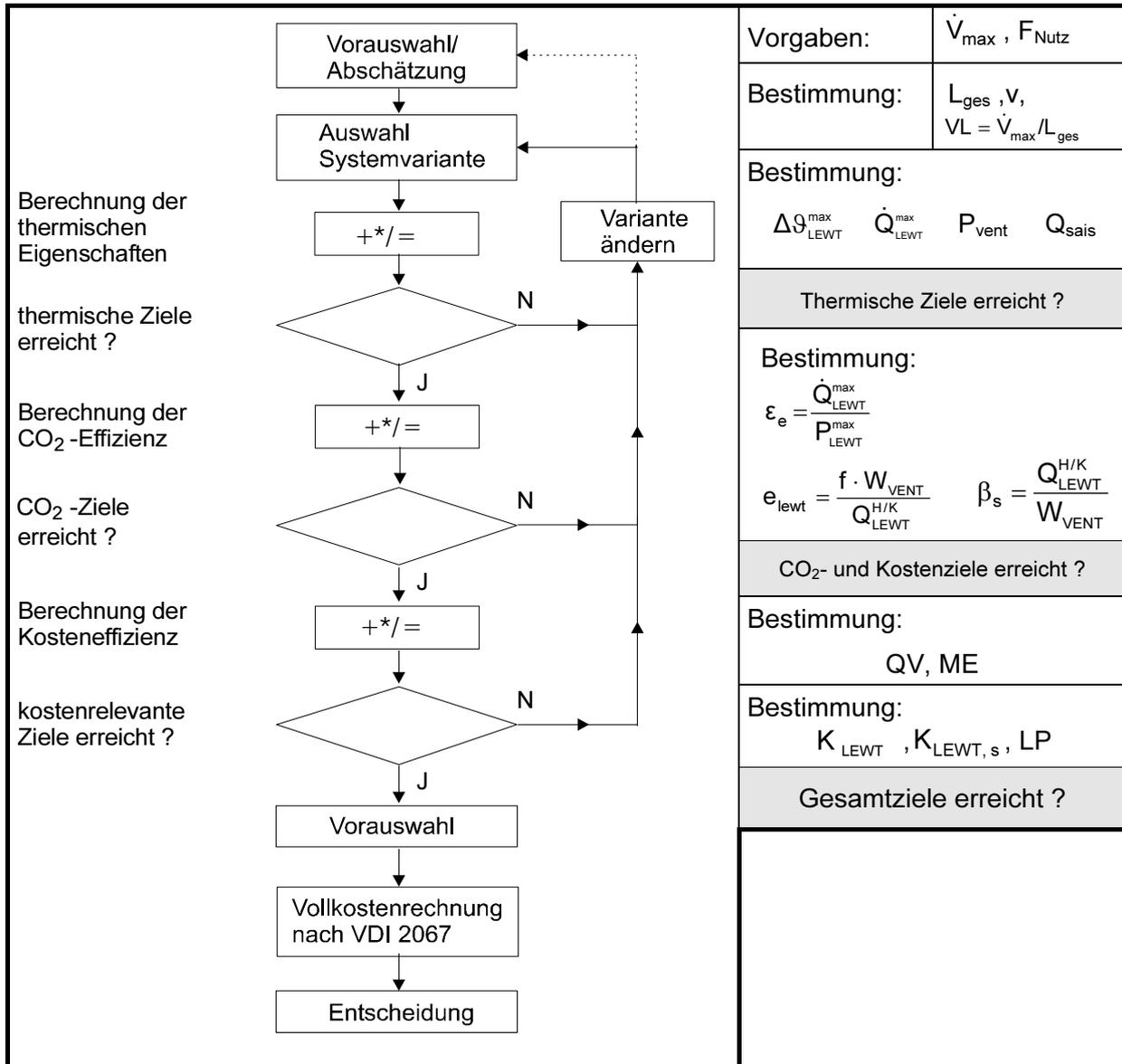


Bild 26 Ablauf der Werte-Ermittlung für einen optimalen L-EWT

Für die folgenden Systemvergleiche werden der Volumenstrom \dot{V} als gegeben vorausgesetzt. Die Grundannahme für den Vergleich geht davon aus, dass im Planungsprozess unter allen Systemvariablen für den Luftvolumenstrom \dot{V}_{LEWT} der geringst mögliche Änderungseinfluss besteht, da dieser Wert in der Praxis meistens bereits durch die Gebäudekubatur und der geforderten Luftwechselrate feststeht. Für den Leistungsvergleich zwischen Einzelrohr und Register wird daher der Wert für den Luftvolumenstrom jeweils als konstant betrachtet.

Diesbezüglich ist die L-EWT-Nutzfläche F_{nutz} ein weiterer Parameter, der für einen direkten Leistungsvergleich festgehalten wird, da sonst die unterschiedlichen Aushubkosten keine gemeinsame Bewertungsgrundlage ergeben.

Daraus lässt sich das Optimierungsziel wie folgt formulieren: wie kann ein gegebenes Erdvolumen -vergleichsweise kostengünstig- wärmetechnisch optimal genutzt werden? Wobei "kostengünstig" in Bezug auf die Vollkostenrechnung nach [VDI 2067] zu sehen ist, die hohe Betriebskosteneinsparungen gegenüber hohen Investitionskosten in Beziehung bringt und damit hohe Anfangsausgaben relativiert und rechtfertigen kann.

Ein L-EWT mit einem bestimmten maximalen Luftvolumenstrom \dot{V}_{LEWT} wird als Referenzsystem (Einrohr-L-EWT) definiert. Anhand mehrerer Veränderungen der Systemkonfigurationen, soll gezeigt werden, welche Auswirkungen sich auf die wesentlichen System-Kennzahlen ergeben bzw. wie sich das Leistungsvermögen, die Ertragsseigenschaften sowie alle weiteren wesentlichen Kennwerte verhalten, wenn alternativ ein Register definiert wird.

Über die Betragswerte der aufgeführten Kennzahlen werden bestimmte Qualitätseigenschaften des L-EWT ausgedrückt. Beispielhaft wird dies an einer einfachen Konfiguration für einen Volumenstrom von 1000 m³/h gezeigt. Die 100m-Einzelrohranlage mit einem Durchmesser von DN 300 liegt in einer Tiefe von 3 m. Das für den angegebenen Volumenstrom recht lange Rohr ist demzufolge thermisch sehr effizient und ist als Einzelrohr und wegen des geringen Durchmessers kostengünstig (K_{INV}). Die thermische Effizienz führt des weiteren zu hohen Energie- bzw. Betriebskosteneinsparungen (K_{B}) wodurch über eine Wirtschaftlichkeitsberechnung gezeigt werden kann, dass auch bei höheren Investitionskosten wegen der guten K_{B} -Werte die Anlagenvariante insgesamt als gut einzustufen ist. Über die definierten Kennzahlen kommt dies über die folgenden, simulierten Basisdaten wie folgt zum Ausdruck.

Tabelle 16

Basisergebnisse
des Referenz-
systems

Basisdaten		Vorwärmen H	Kühlen K	Kühlen ($\vartheta_{\text{AU}} > 18^\circ\text{C}$) K_{18}
$\Delta\vartheta_{\text{LEWT}}^{\text{max}}$	K	16,9	12,6	
$\dot{Q}_{\text{LEWT}}^{\text{max}}$	kW	5,7	4,2	
Q_{LEWT}	kWh/a	6771	3042	2114
$t_{\text{b,h}}$	h	3862	1731	1005

Mit Berücksichtigung der Einbau- und Reibungsverluste ergeben sich mit der notwendigen Ventilatorleistung entsprechend hohe Leistungs-, Aufwands- bzw. Arbeitszahlen (ε_e , e_{lewt} , β_s):

Tabelle 17 Gegenüberstellung von Aufwands- und Arbeitszahlen

ε e end; p primär {P=0,128 kW}			Aufwandszahlen e_{lewt} [-]		Saisonale Arbeitszahlen β_e	
	H	K u. K_{18}	$e_{\text{lewt,H}}$	0,220	$\beta_{\text{s,H}}$	4,54
ε_e [-]	43,90	32,9	$e_{\text{lewt,K}}$	0,219	$\beta_{\text{s,K}}$	4,57
ε_p [-]	14,64	10,97	$e_{\text{lewt,K18}}$	0,183	$\beta_{\text{s,K18}}$	5,46

Für den Meterertrag ME sind die Ergebnisse ebenfalls für die Fälle Heizen, Kühlen und Kühlen ab 18°C Umgebungstemperatur aufzuführen. In Bezug auf die in Tabelle 3 definierte Regelung ergeben sich folgende Werte:

ME _H	ME _K	ME _{K18}
[kWs/m/a]		
52,81	23,75	17,26

Tabelle 18

Die starken Unterschiede zwischen H und K gehen auf die voreingestellte Schwellwertregelung zur Gewährleistung sinnvoller Betriebszeiten zurück, was hier bedeutet, dass in Zeiten der Luftvorwärmung die nutzbaren Temperaturdifferenzen größer und auch die Betriebszeiten generell länger sind. Unter Einbeziehung der geschätzten Investitionskosten K_{INV} von 19.162,00 € kann für diese (effiziente) Anlage $K_{INV,S}$ bestimmt werden.

$$K_{INV,S} = 191,62 \text{ €/m}$$

Der Netto-Leistungspreis LP muss dabei erneut saisonal aufgeteilt werden

LP _H	LP _K
[€/W]	
3,64	4,98

Tabelle 19

Ein Ergebnisvergleich mit einer ungünstigen Systemvariante (G1000_01_30_5) verdeutlicht die Aussagefähigkeit der definierten Kennzahlen. Die Vergleichsanlage ist ungünstig, da für den definierten Volumenstrom ein Register generell bezüglich der Investitionskosten nicht nötig ist und durch den geringen Rohrdurchmesser Druckverluste und Strömungsgeschwindigkeit zu hoch sind, um günstige Betriebsergebnisse zu erwarten.

Tabelle 20 Vergleich zweier Anlagen über Kennzahlen

Haustechnische Ziele		CO ₂ -relevante Ziele				Kostenrelevante Z.				Vorabschätzung				
Variante 1 G1000_03_100_1_(z3)														
	Δs_{LEWT}^{max}	\dot{Q}_{LEWT}^{max}	Q_{LEWT}	$t_{b,h}$	ϵ_e	e_{lewt}	β_s	QV	ME	$K_{INV,S}$	LP	v	L/d	\dot{V}_{max} / L_{ges}
	K	kW	kWh	h	-	-	-	kWs/m ³	kWs/(ma)	€/m	€/W	m/s	-	m ³ /hm
H	16,9	5,7	6771	3862	43,9	0,22	4,54	14,3	52,8	192	3,64	3,93	333	10
K	12,6	4,2	3042	1731	32,9	0,22	4,57	12,23	23,8		4,98			
K ₁₈	12,6	4,2	2114	1005	32,9	0,18	5,46	12,23	17,3		4,98			
Variante 2 G1000_01_30_5_(z3)														
H	14,2	4,77	4457	3005	23,3	0,41	2,42	12,1	17,4	237	8,55	7,07	300	6,66
K	11,07	3,72	2438	1511	18,5	0,38	3,0	12,0	10,1		11,4			
K ₁₈	11,07	3,72	1674	907	18,5	0,33	3,0	12,0	7,4		11,4			

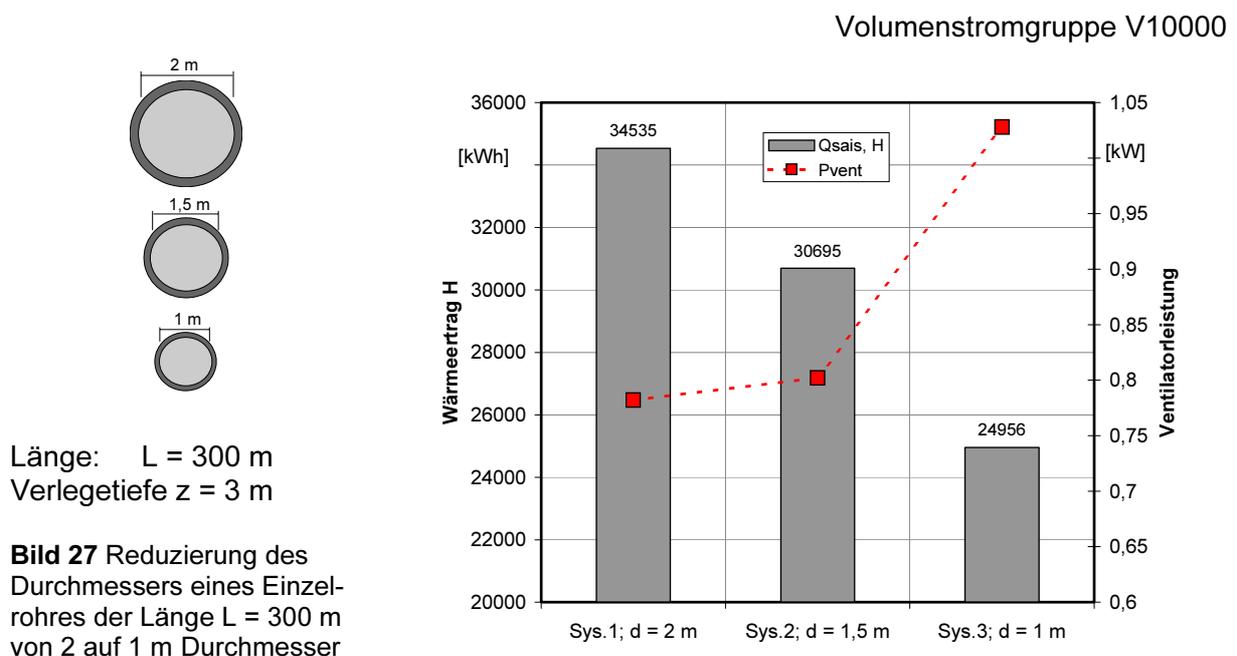
Eine moderate Verringerung der Temperaturspreizung zwischen diesen beiden Varianten (H:16,9/14,2 K) führt zu deutlichen Verlusten bei den thermischen Erträgen (-34,2%). Die Aufwandszahl e_{lewt} bei Variante 2 verdoppelt sich quasi, ebenso wie der Leistungspreis LP_H. Besonders drastisch zeigt sich der Unterschied bei den spezifischen Erträgen ME_H, die bei Variante 2 um 67% niedriger ausfallen und somit eine Verlängerung der Amortisationszeit verursachen.

Optimierung

Der Begriff des Optimums wurde in der Einleitung (*LEWT_PLF2_Einleitung_09.pdf*) und hier auf Seite 38 bereits erläutert. Auf Basis dieser Definitionen kann gezeigt werden, wie sich die Anlagenkennzahlen verändern, wenn a) der Materialeinsatz (Investitionskosten) konstant gehalten wird oder b) ein bestimmtes Erdvolumen (bei ungleichem Materialeinsatz) konstant sein soll. Da speziell im Fall der Registerauslegung bei der Aufteilung in Teilvolumenströme die Rohrdurchmesser angepasst werden müssen, wird die Klärung des Systemverhaltens bei Veränderung des Durchmessers voran gestellt.

Variation des Durchmessers

Vor der eigentlichen Optimierungsbetrachtung wird gezeigt, dass die alleinige Reduzierung des Durchmessers keine Verbesserung des thermischen Ertragsverhaltens bringt. Im Gegenteil, eine Verschlechterung der Leistungskennzahlen, hier gezeigt am Beispiel der Aufwandszahl e_{lewt} .



Zwar wird mit dem Durchmesser die Wärmeaustauschfläche vergrößert, allerdings reduziert sich (bei konstantem Volumenstrom) der Wärmeübergangskoeffizient α_i , wodurch der Wärmestrom hingegen reduziert wird. Ersichtlich wird dies aus der Grundgleichung der Wärmeübertragung: $\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot \Delta\vartheta = \alpha \cdot \pi \cdot d \cdot l \cdot \Delta\vartheta$ (19) wobei gilt: $\dot{Q} \approx \alpha \cdot d$ (20)

Aus dem Nusselt-Gesetz folgt für die turbulente Strömung für den Wärmeübergangskoeffizienten [Albers]: $\alpha_i \approx (1/d)^{0,8}$ (21)

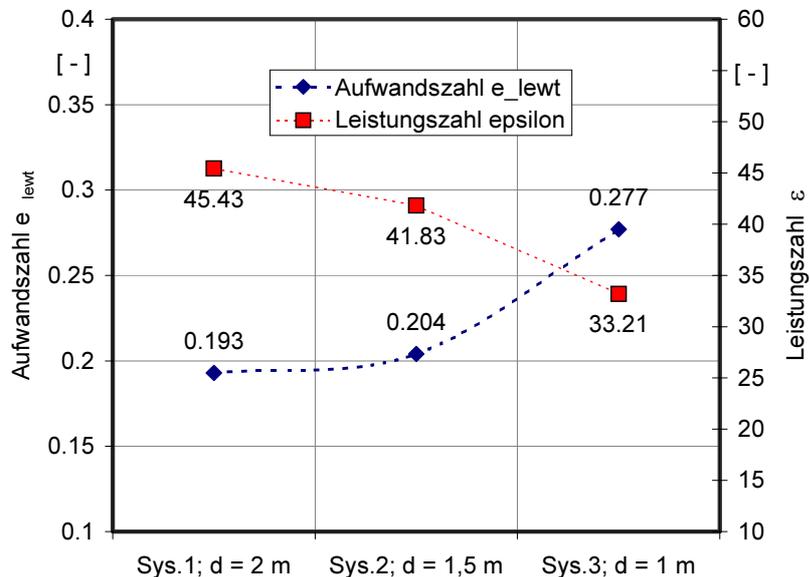
Setzt man Gl. 8.3 in Gl. 8.2 ein, so folgt: $\dot{Q} \approx \alpha^{0,2}$ (22)

Somit führt eine Vergrößerung des Rohrdurchmessers nur zu einer mäßigen Erhöhung des übertragenen Wärmestroms. Genau dieses Erkenntnis konnte in den Simulationsrechnungen bestätigt werden, wie Bild 27 zeigt.

Eine Reduzierung des Durchmessers bringt nicht nur keine Verbesserung der thermischen Erträge, sondern einen Anstieg der Druckverluste und damit der Ventilatorleistung. Dieses Verhalten wird von den Bewertungskennzahlen e_{lewt} und ε_e entsprechend ausgedrückt:

Bild 28

Steigerung der Aufwandszahlen e_{lewt} und Abschwächung der Leistungszahl ε_e bei Reduzierung des Durchmessers bei konstantem Volumenstrom (Volumenstromgruppe V10000)



Übergangverhalten zwischen Einzelrohr und Register bei konstantem Materialeinsatz

Es soll geprüft werden, ob auf Basis eines konstanten Materialeinsatzes (ähnliche Investitionskosten) eine thermische Optimierung durch diverse Veränderungen der Rohrkonfigurationen erreicht werden kann. Bei der Diskussion über Ergebnisunterschiede von Systemvarianten ist das Übergangverhalten zwischen Einzelrohr und Register von grundsätzlicher Bedeutung. Gezeigt wird die Veränderung der Ertragsparameter verschiedener L-EWT-Varianten beim Übergang zum Register bei konstantem Materialeinsatz.

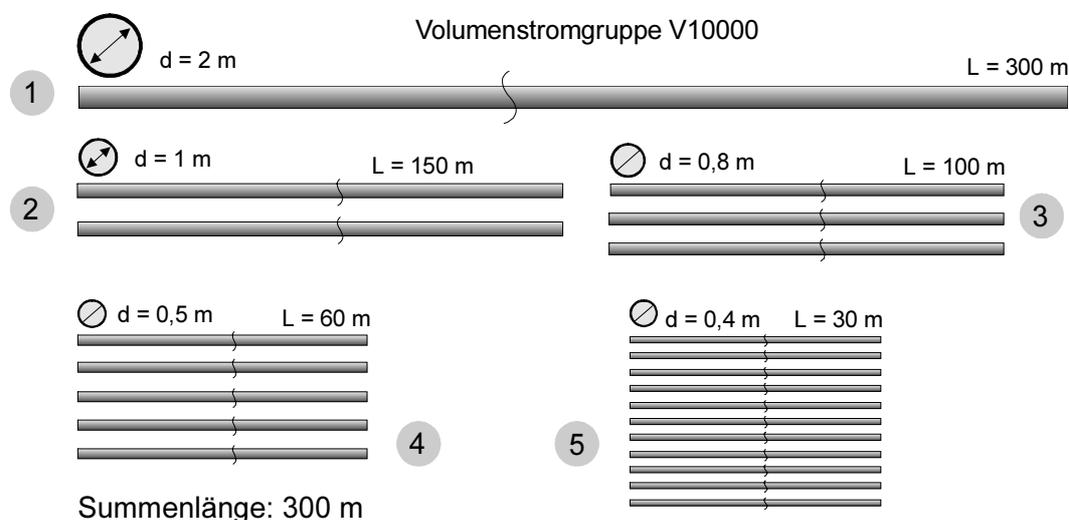
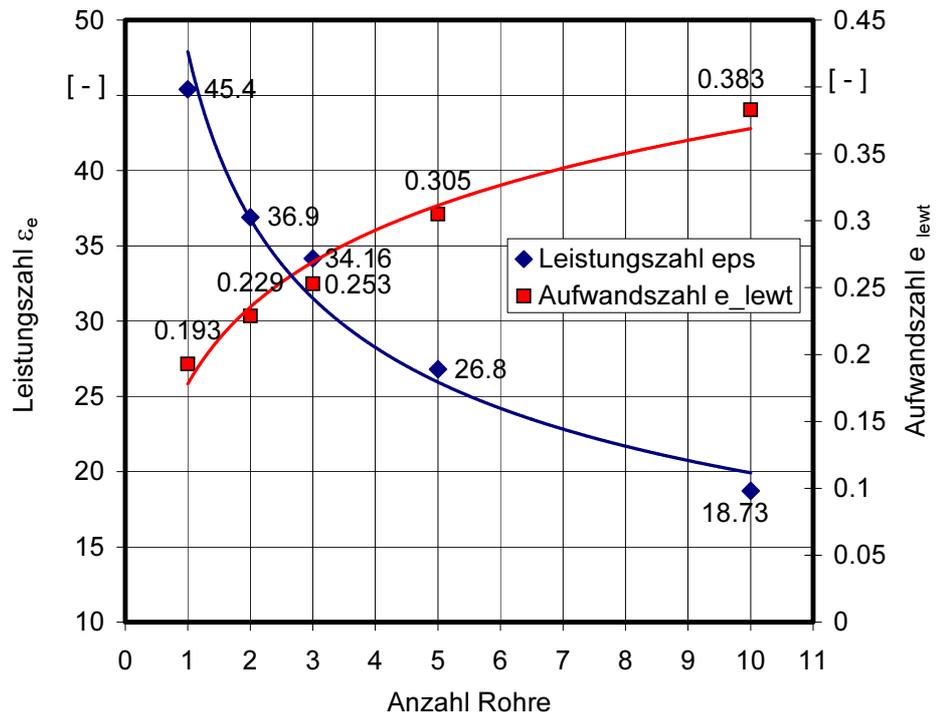


Bild 29 Beispielvarianten bei konstantem Volumenstrom unter Beibehaltung des Materialeinsatzes ($L_{\text{ges}} = \text{konstant}$)

Bild 30

Erhöhung der Aufwandszahlen e_{lewt} und Abschwächung der Leistungszahl ε_e bei zunehmender Registeraufteilung bei konstantem Volumenstrom (Volumenstromgruppe V10000)



Die Simulationsergebnisse berücksichtigen bei Registern die gegenseitige Ertragsminderung. Die Registerrohre als Einzelrohr simuliert würden zwar zu besseren Resultaten führen und einen Vorteil gegenüber dem Einzelrohr aufweisen, für die praktische Anwendung, bei denen bei einer Registerverlegung immer ein gegenseitiger ertragsmindernder Einfluss besteht, sind diese Ergebnisse allerdings irrelevant. Gegenüber der Basisversion zeigen die weiteren Varianten sogar ein schlechteres Ertragsverhalten und Kennzahlprofil.

Es zeigt sich, dass bei konstantem Materialeinsatz das Register keinen Betriebsvorteil gegenüber dem Einzelrohr besitzt.

Wenn man von einem Leistungsvergleich zwischen Einzelrohr und Register spricht, kann man i.d.R. nicht von gleichen Materialmengen ausgehen. Ein Register benötigt bei einem konstanten Volumenstrom erfahrungsgemäß einen höheren Materialeinsatz, als ein Einzelrohr. Daher sind die Ergebnisse bei Registern oft auch deutlich besser, was allerdings auf Kosten einer Vergleichsbasis geht. Aufgrund dieser Diskrepanz bei dem Materialeinsatz muss daher eine neue Vergleichsbasis definiert werden.

Da für ein L-EWT-Bauvorhaben meistens eine bestimmte Fläche zur Verfügung steht, ist das konstante Erdvolumen ein geeigneter Parameter für L-EWT-Systemvergleiche.

Nachfolgend wird geprüft, ob bei gleichem Erd-Nutzvolumen aber variablem Materialeinsatz eine Systemoptimierung eintreten kann.

Optimierung eines L-EWT bei konstantem Erdreich-Nutzvolumen N_{Nutz}

Nachfolgend wird gezeigt, dass bei konstantem Erdaushubvolumen aber variabler Materialausnutzung und -anordnung deutliche Verbesserungen erreicht werden können, die sich in den Kennzahlen darstellen lassen. Als Referenzanlage dient bei einem Volumenstrom von $\dot{V}_{\text{max}} = 10000 \text{ m}^3/\text{h}$ eine Einrohranlage mit einer Länge von 300 m bei einem Innendurchmesser von 2 m in einer Verlegetiefe von 3 m.

Referenzanlage REF01

Querschnittsfläche des Aushubs: 14 m^2
 Länge $L_{\text{Erd}} = 300 \text{ m} + (2 \cdot 4) \text{ m} = 308 \text{ m}$
 Referenz-Aushubvolumen $V_{\text{Erd}} = 4312 \text{ m}^3$

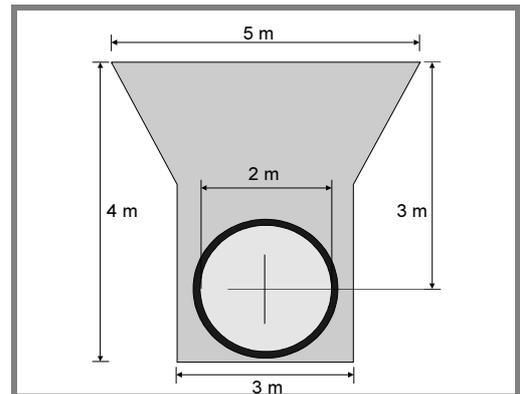


Bild 31
 Querschnitt der Referenzanlage REF01

Bezüglich der L-EWT-Variationen, die mit der Referenzanlage REF01 verglichen werden, ist die Entscheidung für einen bestimmten Rohrdurchmesser von der Strömungsgeschwindigkeit des Teilvolumenstroms und dem verbleibenden Rohrabstand bei der Registeranordnung abzuleiten. Die verwendeten Varianten sind:

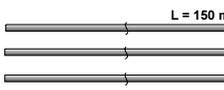
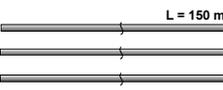
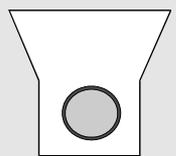
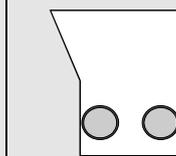
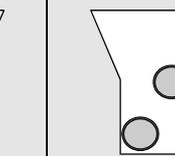
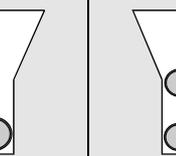
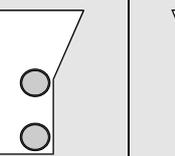
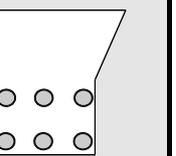
					Typ					
REF01	SGN01	SGN02	SGN03	SGN04	Name	MRR01	MRR02	MRR03	MRR04	MRR05
10000	5000	3333,33	2500	1666,66	Teilvolumenstrom [m³/h]	5000	2500	1666,66	1250	833,33
2	0,8	0,6	0,6	0,4	Durchmesser [m]	1	0,5	0,5	0,4	0,3
										
										
1		2		3		4		5		6

Bild 32 Prinzip der Rohr-Verlegearten in der Volumenstromgruppe V10000 bei konstantem Nutz-Erdvolumen

Die zusammengefassten Ergebnisse der Systemvariationen für den Vorwämbetrieb (H) sind in Tabelle 21 vollständig dargestellt. Nachfolgend werden die essentiellen Aussagen grafisch dargestellt und interpretiert.

Tabelle 21 Kennwerte der L-EWT-Variationen bei konstantem Erd-Nutzvolumen (konstante Volumenstromgruppe V10000)

\dot{V}_{\max} 10 000 m ³ /h	Betriebs- stunden	v	L _{ges}	$V_L = \frac{\dot{V}_{\max}}{L_{\text{ges}}}$	$\Delta s_{\text{LEWT}}^{\max}$	$\dot{Q}_{\text{LEWT}}^{\max}$	P _{vent}	Q _{sais}
	h	m/s	m	m ² /h	K	kW	kW	kWh
REF01	2837	0,884	300	33,33	10,6	35,53	0,781	34535
SGN01	1542	2,763	600	16,66	11,37	38,16	1,131	19228
SGN02	3118	3,28	900	11,11	14,88	49,95	1,56	47390
SGN03	2860	2,46	1200	8,33	15,4	51,67	1,39	44951
SGN04	3513	3,68	1800	5,55	17,38	58,34	1,62	60258
MRR01	2020	1,77	300	33,33	8,81	29,58	0,874	21228
MRR02	3527	3,54	600	16,66	14,73	49,45	0,93	54189
MRR03	3272	2,36	900	11,11	15,74	52,82	1,03	52120
MRR04	3495	2,763	1200	8,33	16,88	56,65	1,49	58891
MRR05	3757	3,28	1800	5,55	18,6	62,45	2,13	69549
	$\epsilon_e = \frac{\dot{Q}_{\text{LEWT}}^{\max}}{P_{\text{LEWT}}^{\max}}$	$e = \frac{f \cdot W_{\text{VENT}}}{k_B \cdot Q_{\text{LEWT}}^{\text{H/K}}}$	$\beta = \frac{Q_{\text{LEWT}}^{\text{H/K}}}{W_{\text{VENT}}}$	QV	ME	K _{LEWT}	K _{LEWT, s}	LP
	-	-	-	kWs/m ³	kWs/(ma)	€	€/m	€/INV/kW
REF01	45,43	0,193	15,6	11,94	92,96	288455	962	8,69
SGN01	33,74	0,272	5,99	12,52	23,33	141330	236	4,07
SGN02	32,02	0,308	9,74	16,3	36,44	182390	202	4,03
SGN03	37,17	0,265	11,30	17,1	27,52	243550	203	5,13
SGN04	36,0	0,283	10,6	19,25	24,0	202650	113	3,79
MRR01	33,84	0,249	12,02	9,7	53,1	131250	438	4,87
MRR02	53,17	0,182	16,52	16,8	73,91	117700	196	2,5
MRR03	51,3	0,194	15,5	17,9	46,68	155480	173	3,13
MRR04	38,02	0,265	11,31	16,8	36,06	168250	140	3,22
MRR05	29,32	0,345	8,69	20,18	25,3	182780	102	3,26

Schwankungsbreiten der Simulationsergebnisse

Der Vergleich der unterschiedlichen Systemvarianten in Tabelle 21 zeigt erhebliche Unterschiede der einzelnen Bewertungsparameter je nach Anlagenvariante. Einzelne Kennzahlen weisen dabei **Unterschiede von über 300%** auf.

Es zeigt sich, dass aus dem zur Verfügung stehenden konstanten Erdvolumen deutlich höhere thermische Erträge zu gewinnen sind, wenn statt des Einzelrohres ein Register eingesetzt wird.

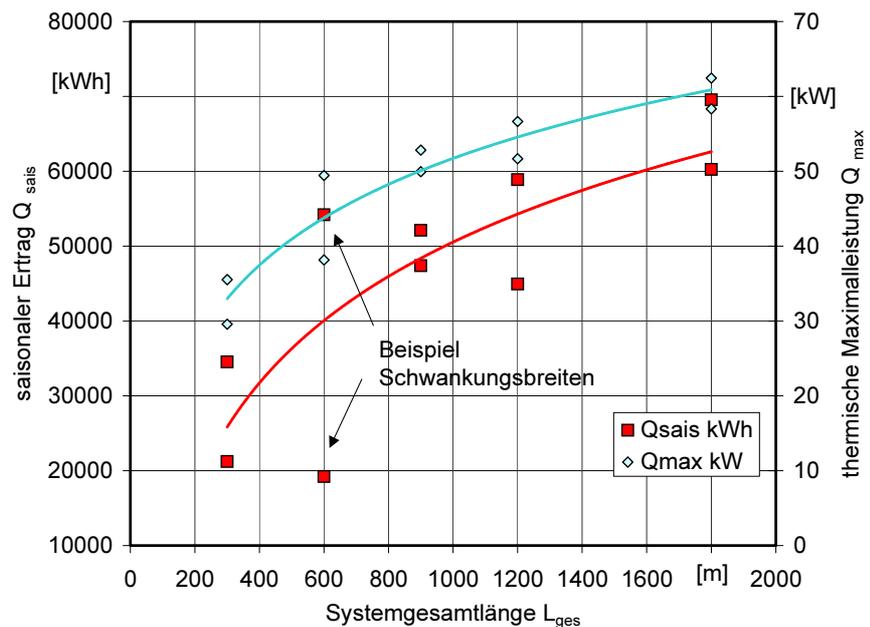
Tabelle 22 Grenzwerte der Einzelergebnisse innerhalb der untersuchten Variationsgruppe

Variante	L _{ges}	dT	Q _{max}	Q _{sais}	ε _e	e _{lewt}
	m	K	kW	kWh	-	-
MIN	300	8,81	29,58	19228	29,32	0,182
MAX	1800	18,6	62,45	69549	53,17	0,345
Prozentuale Schwankungsbreite	600	211	211	362	181	190
	beta	QV	ME	K	Ks	LP
	-	kWs/m ³	kWs/(ma)	€	€/m	€INV/kW
MIN	5,99	9,7	23,33	117700	102	2,5
MAX	16,52	20,18	92,96	243550	962	8,69
Prozentuale Schwankungsbreite	276	208	398	207	943	348

Wie zu erwarten ist, steigt der Ertrag und das Leistungsvermögen mit dem investierten Materialaufwand L_{ges}. Allerdings sind die Schwankungsbreiten bezogen auf die jeweilige Systemgesamtlänge, vor allem bei den Erträgen Q_{sais,H} beachtlich, wodurch sich ein Ansatzpunkt für Optimierungsüberlegungen ergibt (Bild 33).

Bild 33

Zunehmende Erträge Q_{sais} und steigende thermische Maximalleistungen Q_{max}^H mit der Systemgesamtlänge L_{ges}



Die zwei wichtigsten Größen zur Anlagenbewertung, der saisonale Ertrag Q_{sais} und die Aufwandszahl e_{lewt} zeigen, dass die Referenzanlage REF01 im Mittelfeld der Ergebnisse der Optimierungsvarianten liegt. In Bezug auf die benötigte Gesamtlänge L_{ges} liegt sogar ein sehr gutes Ergebnis vor, allerdings ist der vollständige Meter-Investitionspreis K_{LEWT,s} wegen des großen Durchmessers sehr hoch (962 €/m). Bei allen Kennwerten, bei denen die Ventilatorleistung ein Bestandteil ist, muss beachtet werden, dass stärkere Ergebnisschwankungen möglich sein können, da der Ventilatorwirkungsgrad sowie die Umlenk- und Einbauverluste, die bei jeder Rechnungsvariante berücksichtigt sind, vorher abgeschätzt werden müssen.

Die Optimierung sollte generell zum Ziel haben, einen höchstmöglichen saisonalen Ertrag Q_{sais} bei relativ kleiner Aufwandszahl e_{lewt} und geringen spezifischen Kostenparametern zu erreichen.

Die weiteren Kennzahlen helfen dabei, die bestmögliche Anlage zusätzlich einzugrenzen und die Entscheidung abzustützen. Sofort zu erkennen ist, dass die L-EWT MRR02 und MRR03 günstiger sind, als die Referenzanlage REF01 (Q_{sais} höher, e_{lewt} niedriger), allerdings bei größerer Systemgesamtlänge L_{ges} . Durch den hohen Meterpreis von REF01 wirkt sich die Verdoppelung der Systemlänge bei MRR002 tatsächlich nicht entsprechend aus, wobei MRR02 noch weniger Systemlänge benötigt als MMR003 und das bei etwas besseren Ergebnissen. Die QV-Werte liegen alle bei Werten zwischen 10 und 20 kW/m³, da bereits bei der Vorauswahl der Systemvarianten auf thermisch und ökonomisch realistische Randbedingungen geachtet wurde.

Es ist auch generell bei allen Einzelergebnissen zu beachten, dass der L-EWT mit der schlechtesten Arbeitszahl β_s mit 5,99 im Vergleich zu Arbeitszahlen anderer Versorgungssysteme (z.B. Wärmepumpen) immer noch sehr gut bewertet ist.

Der Nutzen der eingeführten Kennzahlen kann anhand eines direkten Vergleichs zweier Planungsvarianten beispielhaft gezeigt werden. Hierfür werden die Ergebnisse der Systeme 1 und 2 aus Bild 32 (Seite 43) gegenübergestellt.

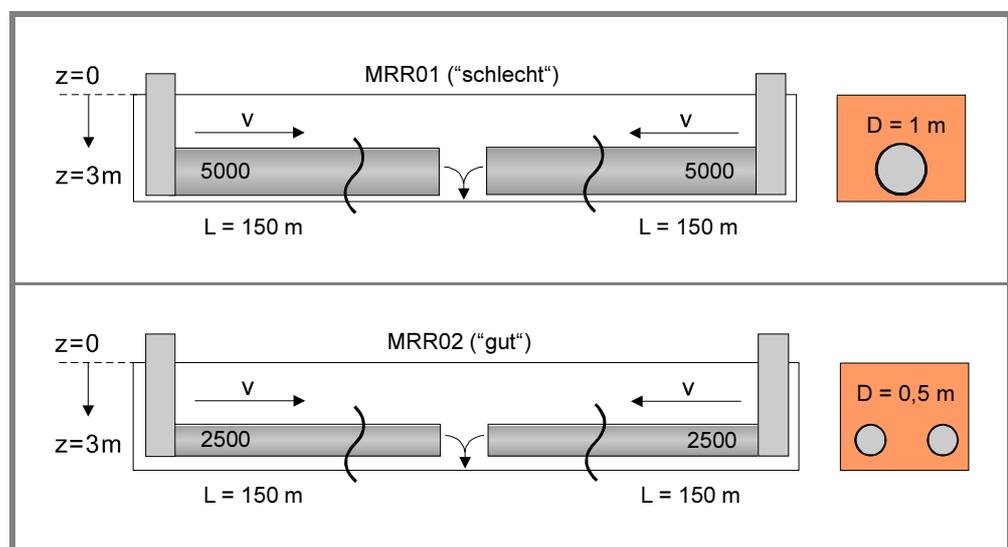


Bild 34

Systemvergleich bei konstantem Erd-Aushubvolumen aus Bild 32

Bei dem Wechsel von System 1 (ein Rohr) auf System 2 (zwei Rohre) würde man intuitiv von geringen Veränderungen der Ergebnisse ausgehen. Tatsächlich aber zeigen sich deutliche Unterschiede bei Temperaturspreizung, Leistung und Ertrag. Genau diese Unterschiede können über die eingeführten Kennzahlen verdeutlicht werden (Tabelle 23). Die Kennzahlen ermöglichen die Abkopplung von einem Vergleichsergebnis, da z.B. ein bestimmter Ertrag alleine keine Aussage dafür liefert, ob die für eine bestimmte Volumenstromgruppe betrachtete Variante als gut einzuschätzen ist. Dies ist mit den Bewertungskennzahlen hingegen möglich.

Tabelle 23 Vergleich zweier Planungsvarianten über die thermischen Basisergebnisse und über die Bewertungskennzahlen

System MRR01 („schlecht“)			System MRR02 („gut“)
8,81	$\Delta \vartheta_{LEWT}^{max}$	K	14,73
29,58	\dot{Q}_{LEWT}^{max}	kW	49,45
21228	Q_{LEWT}^{sais}	kWh	54189
33,84	ε_{LEWT}^{max}	--	53,17 - (3 - 70)+
0,249	e_{LEWT}	--	0,182 +(0,1 - 0,9) -
9,7	QV	kWs/m ³	16,8 - (5 - 25)+
53,1	ME	kWs/(ma)	73,91 - (10 - 80)+
4,87	LP	€/kW	2,5

Der Planer steht bei der Ermittlung der Systemkennzahlen vor der Entscheidung, welche besondere Gewichtung dem L-EWT zuzuordnen ist. So können z.B. geringe Investitionskosten höher eingestuft werden, als geringe CO₂-Emissionen, oder es soll eine hohe Temperaturspreizung angestrebt werden, die vielleicht nicht mit sehr niedrigen Aufwandszahlen kombinierbar ist. Für die grundsätzliche Einschätzung der Systemqualität und für die Planungsfeinabstimmung werden daher Netzdiagramme eingeführt.

Alle beteiligten Kennwerte jeweils einer Volumenstromgruppe werden auf den Wert Eins normiert. Dann können die Qualitätsunterschiede des direkten Vergleichs der L-EWT-Varianten graphisch dargestellt werden (Bilder 37 und 38). Die äußere Begrenzung stellt die jeweils besten und die innere Linie die jeweils schlechtesten Werte dar, die überhaupt innerhalb einer Volumenstromgruppe auftreten können (bei Werten mit fallender Tendenz entsprechend umgekehrt). Die Bilder 35 und 36 zeigen die Bewertungsvorlagen für die Volumenstromgruppe V10000.

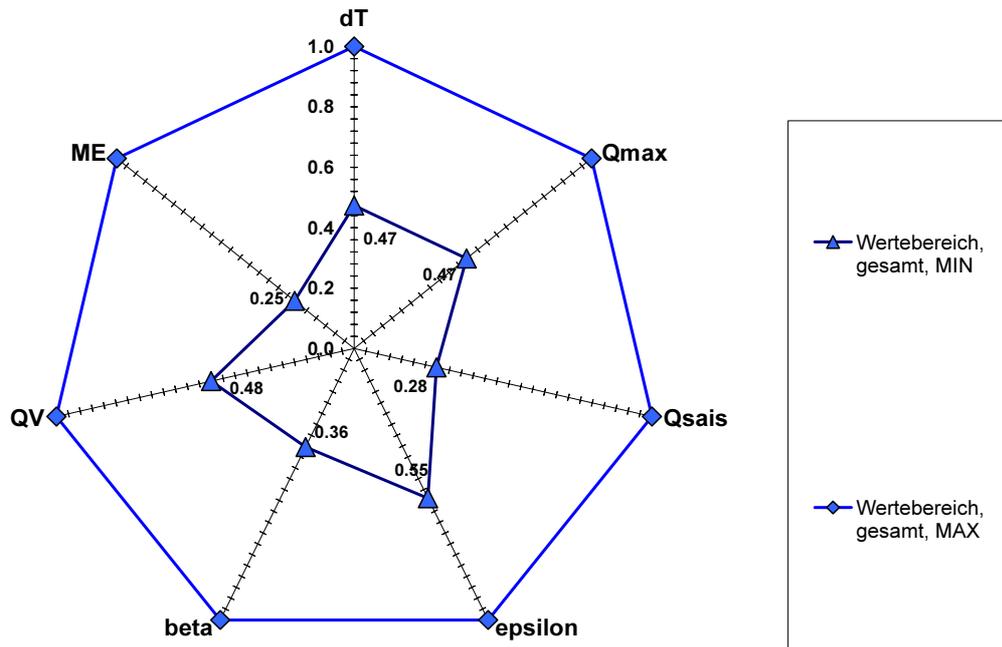


Bild 35
 Netzdiagramm als Bewertungsvorlage der Systemvarianten mit steigender Positivtendenz der Volumenstromgruppe V10000

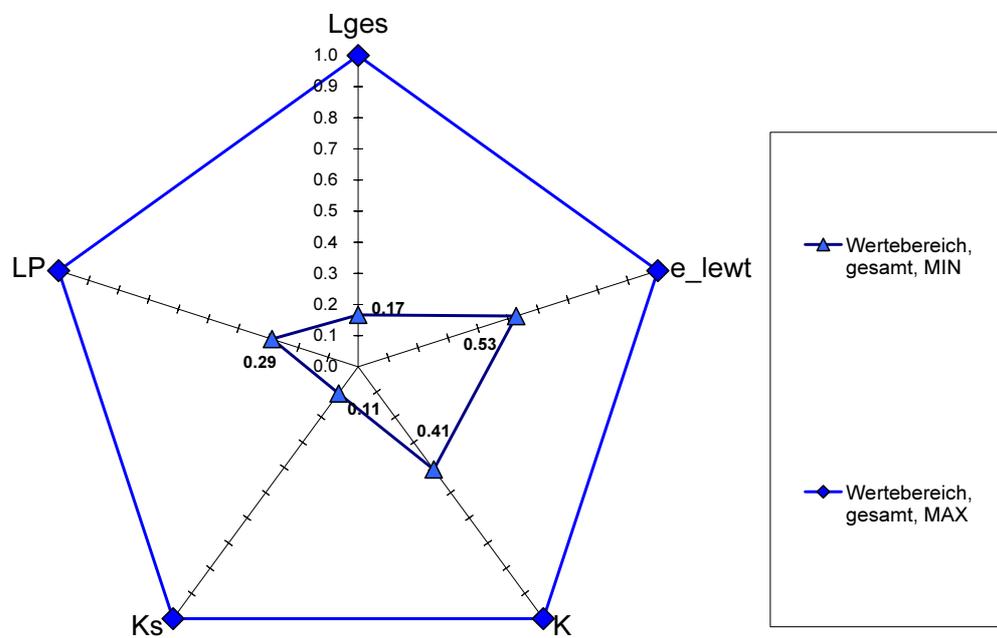


Bild 36 Netzdiagramm als Bewertungsvorlage der Systemvarianten mit fallender Positivtendenz der Volumenstromgruppe V10000

Mit den Ergebnissen aus Tabelle 23 stellen sich die Netzdiagramme wie folgt dar:

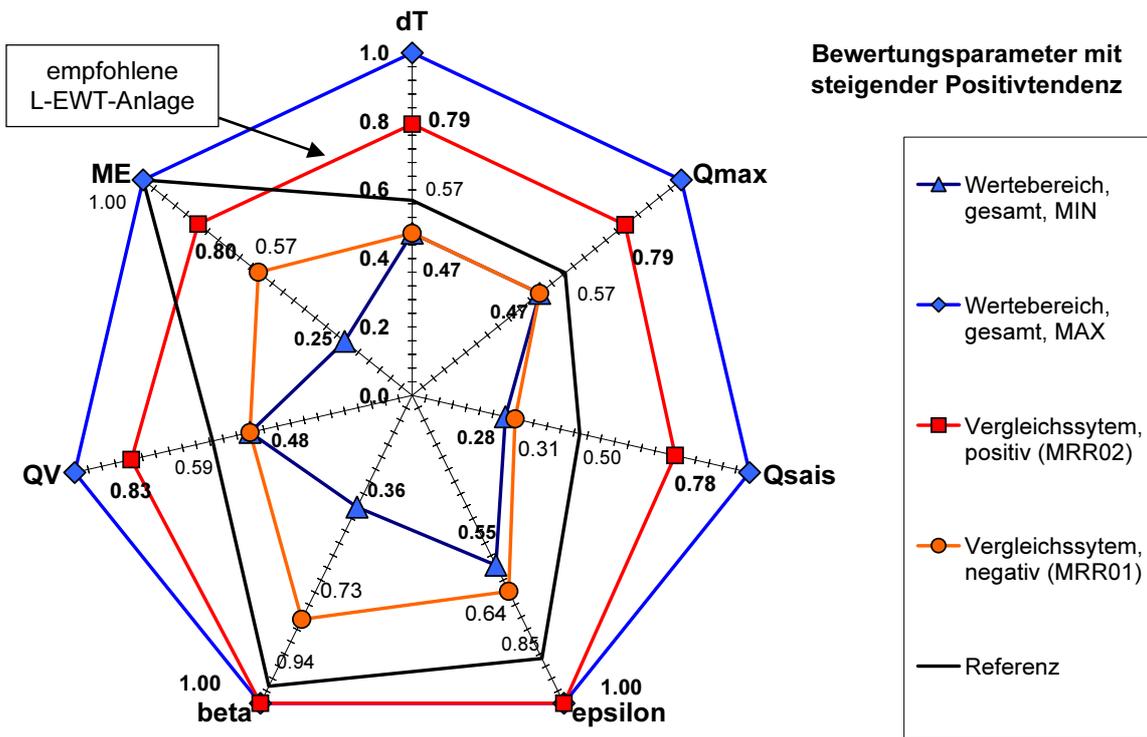


Bild 37 Normierte Einzelkennwerte mit steigender Positivtendenz im Vergleich

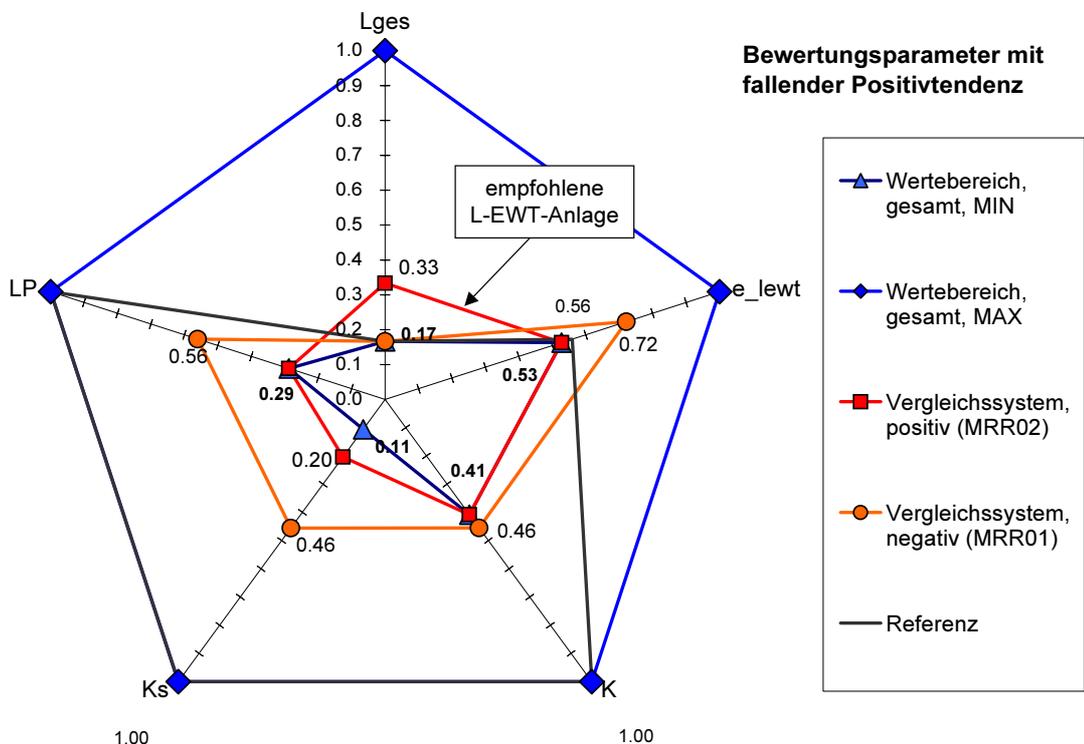


Bild 38 Normierte Einzelkennwerte mit fallender Positivtendenz im Vergleich

Es wird deutlich, warum in dieser Vergleichsgruppe der L-EWT MRR02 als bestes System zur Auswahl kommen sollte.

Die wichtigsten Werte $Q_{\text{sais, H}}$ und e_{lewt} distanzieren sich deutlich vom Referenzwert REF01. Zudem kann gezeigt werden, dass die schwachen Betriebseigenschaften des Systems MRR01 (durch den engen Rohrabstand starken gegenseitigen thermischen Beeinflussung,) durch die Kennzahlen deutlich wiedergegeben werden.

Vergleicht man alle weiteren Parameter, wird die Tendenz zugunsten des Systems MRR02 bestätigt. Sogar die kostenrelevanten Parameter ME, K, Ks und LP zeigen günstige Eigenschaften, obwohl eigentlich bei guten Systemvarianten von höheren Investitionskosten (hohes L_{ges}) auszugehen ist. Würden diese Werte nicht unbedingt positiv im direkten Vergleich abschneiden, ist durch eine niedrige Aufwandszahl e_{lewt} gewährleistet, dass im Betrieb die Energiekosteneinsparung einen besonders effektiven Einfluss auf die Kapitalrückflusszeit nimmt. Dies lässt sich nachfolgend über die Vollkostenrechnung zeigen. Zu dem Zeitpunkt an dem $Q_{\text{sais, H}}$ noch nicht konkret berechnet sein sollte, bildet der leicht zu ermittelnde Parameter QV die Ergebnistendenz bereits deutlich ab.

Die hohen Kosten bei dem System REF01 werden durch den hohen Meterpreis des Rohres verursacht (962 €/m). Wäre dieser wegen einer ggf. anderen Referenzvariante niedriger, kann dennoch durch die Darstellungsart in den Bildern 37 und 38 klar beurteilt werden, welches System sich als grundsätzlich empfehlenswert herausstellt.

Es kann gezeigt werden, dass ein relativer Vergleich von Systemvarianten bei vorgegebenem Erdnutzsvolumen zu erheblichen Ergebnisunterschieden und Ertragssteigerungen führt, wenn vom Einzelrohr auf mehrschichtige Register mit Rohren geringen Durchmessers übergegangen wird. Im Gegensatz zu der Bewertung bei konstantem Materialeinsatz sind die Unterschiede auf dieser Basis erheblich.

Die bereits aufgestellte Forderung nach einer begrenzten Strömungsgeschwindigkeit für die Gewährleistung eines effektiven L-EWT-Betriebes und die Beachtung des Vorprüfungsparameters VL kann über den hier geführten Systemvergleich nochmals bestätigt werden.

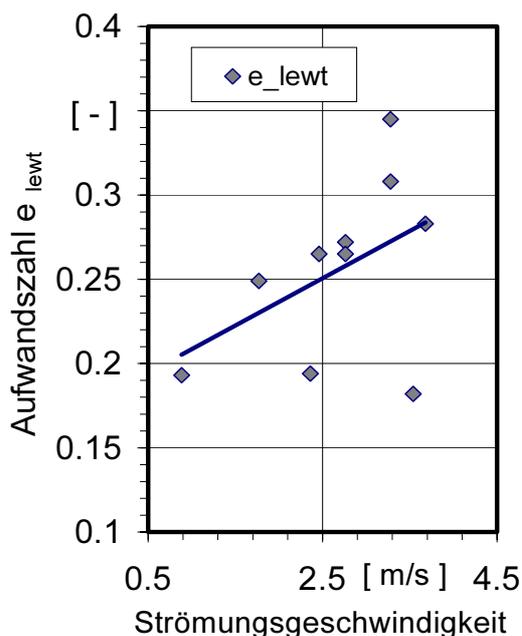


Bild 39 Aufwandszahl als Funktion der Strömungsgeschwindigkeit

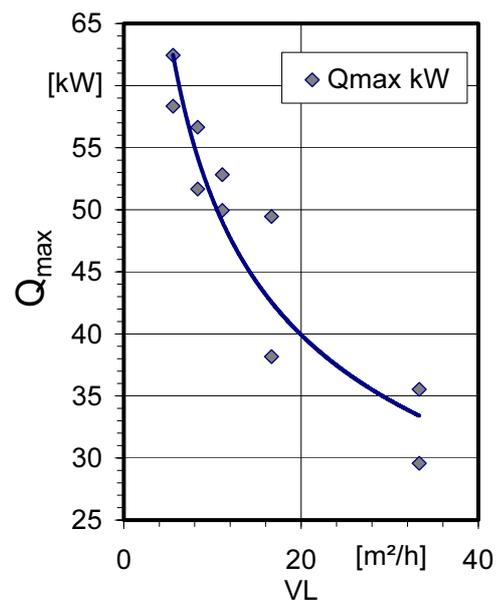


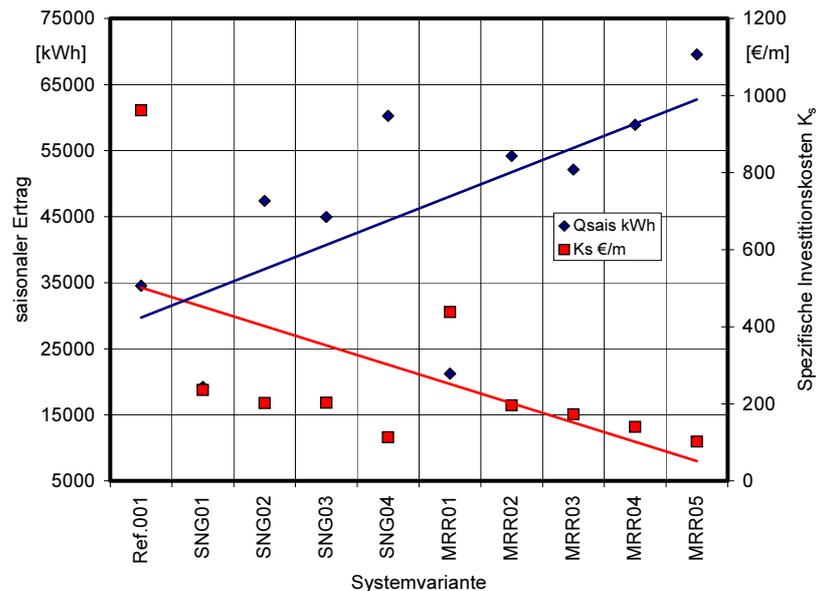
Bild 40 Vorprüfungsparameter VL bezogen auf die thermische Maximalleistung

Dynamische Wirtschaftlichkeitsberechnung und Kennzahlvergleich

Bereits aus den bisherigen Betrachtungen geht hervor, dass mit steigenden saisonalen Erträgen Q_{sais} (ohne Berücksichtigung des elektrischen Aufwands) die spezifischen Investitionskosten abnehmen (Bild 41). Um endgültig sicher zu sein, dass dies nicht auf Kosten eines unverhältnismäßig hohen jährlichen Inputs an fixen und variablen Kosten geschieht, ist eine dynamische Wirtschaftlichkeitsrechnung durchzuführen.

Bild 41

Zusammenhang zwischen spezifischen Investitionskosten und saisonalen Ertrag Q_{sais}



Wirtschaftlichkeitsberechnungen für energiesparende Maßnahmen sind dadurch gekennzeichnet, dass sie Kosten verursachen, aber direkt keine Erlöse erwirtschaften. Die Wirtschaftlichkeitsanalyse wird sich daher auf einen Vergleich der Kosten und der Einsparungen beschränken, die die Investitionsalternativen verursachen. Es soll insbesondere gezeigt werden, dass die Ergebnisse der dynamischen Wirtschaftlichkeitsberechnung mit den zuvor definierten Kennwerten korrelieren und diese somit für eine Wirtschaftlichkeits-Vorabschätzung geeignet sind. Es werden die L-EWT-Systeme REF01, MRR02 und MRR01 miteinander verglichen. Hierfür empfiehlt sich die (dynamische) Kapitalwert-Methode, bei der die abgezinste Einnahmen- und Ausgabenüberschüsse dem Kapitaleinsatz gegenüber gestellt werden. Je höher die Differenz, desto günstiger ist die Investitionsalternative.

Der Kapitalwert C_0 bestimmt den Wert, den eine Einnahmen-/Ausgabenreihe zum Zeitpunkt der Investition (zum Zeitpunkt 0) hat. Eine Investition ist dann wirtschaftlich, wenn der Kapitalwert positiv ist. Die Investition erbringt dann eine Verzinsung über den Kalkulationszinsfuß hinaus. Der Kapitalwert der Investition bezogen auf den Zeitpunkt 0 ist:

$$C_0(i) = -I_0 + B \quad (23)$$

i Kalkulationszins (hier: 8%)
 I_0 Investitionssumme zum Zeitpunkt $t = 0$

Der abgezinste Barwertfaktor B aller Einnahmen und Ausgaben ist:

$$B = \sum_{t=1}^n \frac{E_t - A_t}{q^t} \quad (24)$$

E_t Einnahmen der Periode t n n Laufzeit (hier: 40 Jahre; Rohrleitungen allgemein)
 A_t Ausgaben der Periode t q^t Kehrwert des Abzinsungsfaktors mit

$\sum_{t=1}^n \frac{1}{q^t} = \frac{q^t - 1}{q^t \cdot i}$ aus der Summenformel für geometrische Reihen

Da der Vergleich dazu dienen soll, die energetischen Eigenschaften der drei L-EWT untereinander darzustellen, wird keine konventionelle Heiz- oder Kühlanlage als zu ersetzendes System gegenübergestellt. Zum einen kann kein solches System definiert werden, das wie ein L-EWT zum Heizen und Kühlen gleichermaßen geeignet wäre und zum anderen müsste die Detailbeschreibung dieser Anlage der jeweiligen Alternative angepasst werden, was einen sinnvollen Vergleich verwehrt. Auf der Einnahmenseite sind für E_t die eingesparten Wärme- und Kältekosten, welche ohne L-EWT aufzubringen gewesen wären, aufzuführen. Zur Berechnung werden für die ersetzte Wärme folgende Kosten angesetzt:

Einheitspreis nach [Evers] für Elektroenergie K_E : 0,12 €/kWh

Einheitspreis nach [Evers] für die Heizenergie K_H : 0,06 €/kWh

(einschl. Zuschläge, z.B. Anteil Grundgebühr)

Für die Kühlperiode werden vom Carnot-Wirkungsgrad ε_{KC} eines Kühlkreislaufs (hier: 6) 30% für die indirekte Kühlung eingesetzt. Der dafür benötigte Stromverbrauch kann folglich ohne weitere Verlustfaktoren über die Leistungszahl der Kältemaschine $\varepsilon_K = \dot{Q}/P_{el}$ und den benötigten Betriebsstunden bestimmt werden.

Tabelle 24 Investitionskosten

I_o	REF01	MMR01	MMR02
Investition [€]	288455	131250	117700

Tabelle 25 Betriebsparameter und -kosten

E_t	REF01		MMR01		MMR02	
	H	K	H	K	H	K
Q_{sais} [kWh]	34535	19306	21228	16201	54189	25945
Betriebsstunden [h]	2837	1432	2020	1377	3527	1591
Kosten, konventionell [€]	2762	1475	934	1238	2385	1983
Eingesparte Jahreskosten [€/a]	4237		2172		4368	

Die Ausgaben innerhalb eines Jahres sind:

Tabelle 26 Fixe und variable Kosten

A_t [€]	REF01	MMR01	MMR02
fixe und kapitalgebundene Kosten			
Abschreibungen	7211	3281	2943
Zinsen (8% auf 1/2 Anschaffungswert)	11538	5250	4708
Wartung und Instandsetzungskosten ($I_o \cdot 0,005$ nach VDI 2067)	1443	657	589
Variable Kosten			
• verbrauchsgebundene Kosten: Stromkosten	367	326	523
• betriebsgebundene Kosten: Personal	600	600	600
Jährliche Ausgaben [€/a]	18640	10114	9363

Aus Gl. 23 und Gl. 24 folgt beispielhaft für das System MRR02:

$$C_o = -117700 + \left((4368 - 9363) \cdot \frac{1,08^{40} - 1}{1,08^{40} \cdot 0,08} \right) [\text{€}] = -177263 [\text{€}]$$

Tabelle 27 Kapitalwerte

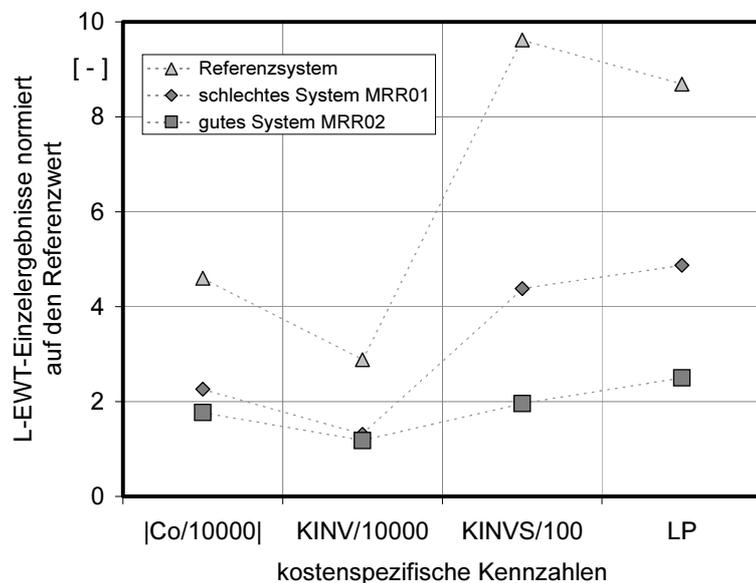
C_o [€]	REF01	MMR01	MMR02
	-460205	-225955	-177263

Aufgrund der niedrigen Energiekosten liegen die jährlichen Ausgaben über den Kosten der eingesparten Energie. Der daraus folgende negative Barwertfaktor B führt zu einem negativen Kapitalwert. Die hier gerechneten Anlagen sind damit alle unwirtschaftlich. Allerdings müsste man im Normalfall diese Ergebnisse auf die Investition einer konventionellen Lösung beziehen, die hier nicht für alle drei Fälle in gleicher Form definierbar ist. In diesem Fall kann es, je nach Höhe der Investitionskosten der konventionellen Basislösungen, durchaus zu einem wirtschaftlichen Ergebnis zugunsten eines L-EWT kommen. Dennoch kann gezeigt werden, dass das aus den Kennzahlen ermittelte beste System (MMR02) den kleinsten negativen Kapitalwert besitzt und damit relativ zu den anderen L-EWT als die am wenigsten unrentabelste gilt. Diese spezielle Anlage kann in einem Vollkostenvergleich (z.B. nach [VDI 2067]) einer auf die dort geltenden Randbedingungen dieser Variante zugeschnitten konventionellen Lösung dann eindeutig bezogen werden.

Mit Sicherheit würden die kostenrelevanten Ergebnisse zugunsten von L-EWT allgemein besser ausfallen, wenn die in den nächsten Dekaden zu erwartenden Energiepreiserhöhungen schon eingerechnet worden wären. Das Hauptargument für den Einsatz eines L-EWT liegt daher oft noch bei der sehr effektiven CO_2 -Einsparung.

Bild 42

Qualitative Verläufe von C_o , im Vergleich zu den kostenrelevanten Kennzahlen K_{inv} , $K_{inv,s}$ und LP



Die qualitativen Verläufe von C_o , im Vergleich zu den kostenrelevanten Kennzahlen K_{inv} , $K_{inv,s}$ und LP können insofern bestätigt werden, wobei deutlich darauf hinzuweisen ist, dass bei der Bestimmung der Kostensituation sehr pauschal und mit vielen Schätzungen gearbeitet wird. Um so mehr kommen den eindeutiger bestimmbareren, reinen thermischen Kennzahlen bei der Bestimmung der L-EWT-Qualität, entscheidende Bedeutung zu.

Systemoptimierung über die spezifische Aufwandszahl e_{lewt}

Ein klar definierbares Auslegungsziel für einen L-EWT ist z.B. die Gewährleistung der winterlichen Frostfreiheit der dem L-EWT nachgeschalteten Wärmerückgewinnungseinheit. Im Passivhausbereich hat sich diese prinzipielle Verschaltung bereits bewährt, bei der überwiegend aufgrund der typischen Volumenstrombereiche im Wohnhausbereich (von 150 bis 500 m³/h) Rohrdurchmesser von DN 300 zur Anwendung kommen. Dieser Durchmesser ist auch bei großen, komplexen Registersystemen sehr häufig zu finden. Beispielhaft soll anhand dieses Durchmessers gezeigt werden, wie thermische Mindestziele mit günstigen spezifischen Aufwandszahlen korrespondieren.

Optimierungsvariante Systeme mit Ziel niedriger Aufwandszahl

Als Beispiel für den Umsetzung der spezifischen Aufwandszahl e_{lewt} in den Planungsablauf werden mehrere L-EWT-Konfigurationen numerisch simuliert. Jede einzelne Anordnung wird solange iteriert, bis eine Aufwandszahl von $e_{\text{lewt}} = 0,2$ ($\pm 10\%$; für den Regelungsfall B) und $e_{\text{lewt}} = 0,3$, für den unregelmäßigen Betrieb erreicht wird. Als Nebenbedingung (thermisches Mindestziel) muss gelten, dass dabei eine Temperaturspreizung von mindestens 12 K an zwei aufeinander folgenden Tagen, in Anlehnung an das kälteste Zweitagesmittel der [DIN 4701] erreicht wird. Bild 43 / Tabelle 28 zeigen, als Funktion des jeweiligen Volumenstroms, bei welcher Rohr-Mindestlänge der Frostschutz, unter Einhaltung der definierten, günstigen Aufwandszahlen e_{lewt} , zu erreichen ist.

Ziele e_{lewt} : 0,2/0,3 ($\pm 10\%$)	Meteorologischer Mittelwertstandort: Giessen
Verlegetiefe: $z=1,5$ m	Bodenart/Temperaturleitfähigkeit $0,59 \times 10^{-6}$ m ² /s
Einbaudruckverlust $\zeta=80$ Pa	Ventilatorgesamtwirkungsgrad $\eta=0,6$

Tabelle 28

Volumenstrom	Mindest-Rohrlänge	
	Regelung B ($e=0,2$)	Unregelmäßig/C ($e=0,3$)
50	12	12
100	20	20
150	24	24
200	24	24
250	24	24
300	21	24
350	49	49
400	36	36
450	42	42
500	54	54
600	40	40
700	78	64
800	86	76
900	94	94
1000	104	140
1500	148	148
2000	192	192

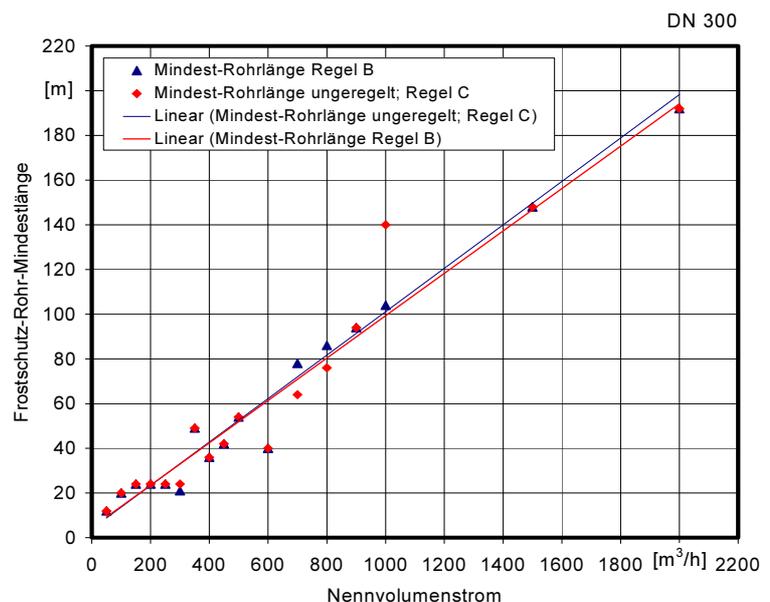
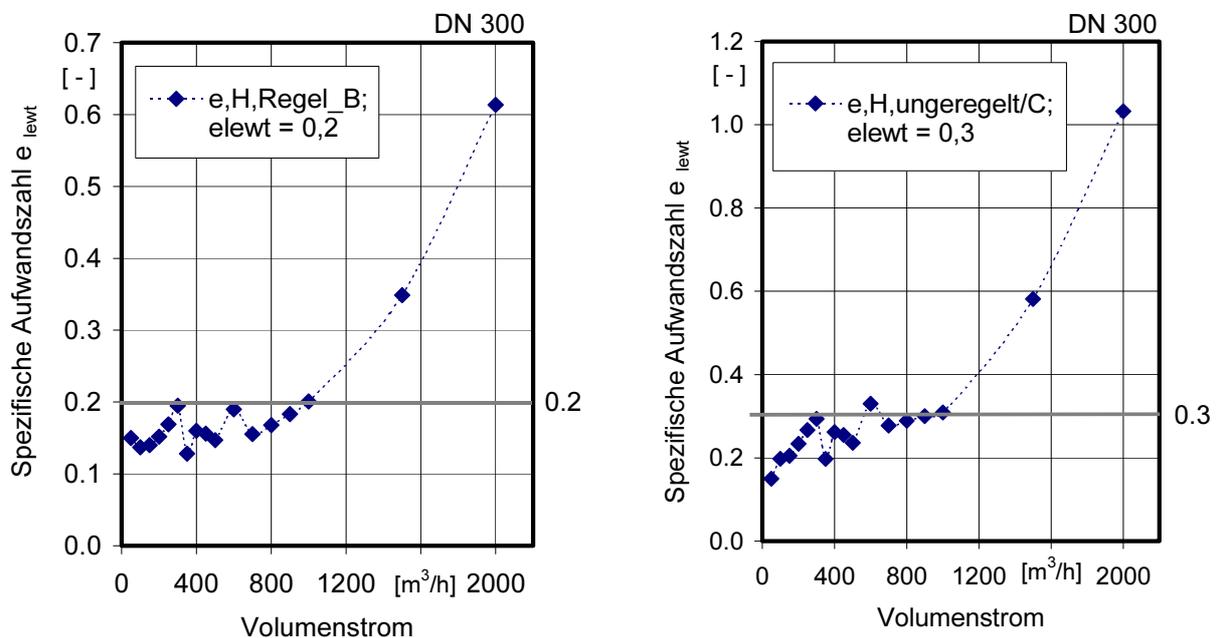


Bild 43 Frostschutz-Mindestrohrlängen unter Einhaltung definierter Aufwandszahlen

Auffallend ist, dass die Regelungsart -in diesem Fall- keinen deutlichen Einfluss auf das Betriebsergebnis hat. Dies liegt daran, dass es sich um eine frostbezogene Maximalwertbetrachtung innerhalb eines kleinen definierten Zeitfensters handelt, regelungstechnische Einflüsse aber erst bei längerfristigen, saisonalen Ergebnisvergleichen zu Unterschieden führen. Es bleibt für beide Regelungsarten bei etwa gleichen Rohrlängen.

Bei einem konstanten Durchmesser wird es mit zunehmendem Volumenstrom immer schwieriger, gute Aufwandszahlen beizubehalten. In den Bildern 44 und 45 erkennt man, dass ab etwa 800 m³/h, auch mit übertriebener Verlängerung des Rohres, der Zielwert nicht mehr erreicht werden. Die dabei festgelegten Werte gewährleisten den Frostschutz in Anlehnung an die [DIN 4701] mit einer Temperaturspreizung größer 12 K. Dies ist ein weiterer Beleg der zuvor gemachten Feststellung, dass die Strömungsgeschwindigkeit im Rohr auf etwa 4 m/s begrenzt werden sollte.



Bilder 44 und 45 Systemverhalten als Funktion des Volumenstroms bei Erhaltung einer bestimmten Aufwandszahl

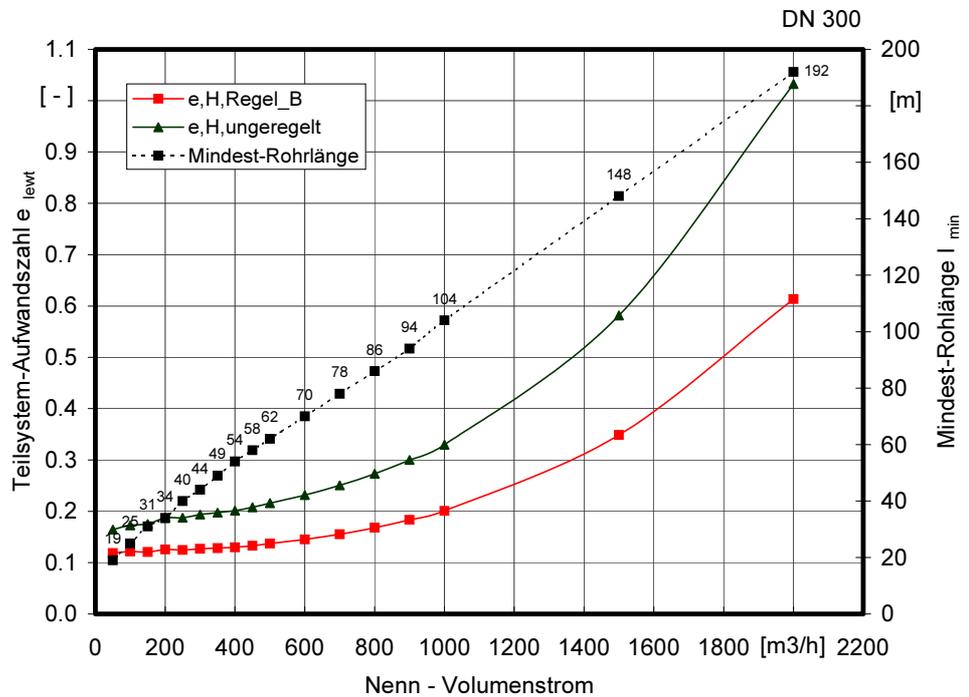
Steht bei der Planung die Betriebssicherheit absolut im Vordergrund, rechnet man eine Systemvariante so, dass die notwendige Temperaturspreizung bei extremem Außentemperaturen auch sicher erreicht wird. Wie sich dann die Aufwandszahlen verhalten, zeigt Bild 46.

Hier ist mit einer sehr sicheren Temperaturspreizung von 14 K unter den zuvor definierten Randbedingungen gerechnet worden. Es zeigt sich, dass im Bereich der empfohlenen Strömungsgeschwindigkeiten gute (niedrige) Aufwandszahlen erzielt werden. Bei weiterer Steigerung der Strömungsgeschwindigkeit bzw. des Volumenstroms steigen die Aufwandszahlen exponentiell an, die Mindest-Rohrlänge hingegen linear.

Im täglichen Betrieb können ungünstige (hohe) Aufwandszahlen nicht ohne weiteres festgestellt werden. Fatal ist dabei, dass dies nicht mit den (günstigen) thermischen Betriebs-eigenschaften des L-EWT gekoppelt ist. Ein L-EWT mit (guten) maximalen Temperaturspreizungen von mehr als 14 K kann umwelttechnisch dabei vollkommen unakzeptabel sein, weil mit hohen Aufwandszahlen die, eigentlich mit dem L-EWT angestrebten CO₂-Einsparungen, nicht erreicht werden können.

Um sich daher in der Planung nicht zu früh auf eine bestimmte Systemvariante festzulegen, ist die Umwelteffizienz eines L-EWT immer zu prüfen. Dafür bieten sich die hier vorgestellten Kennzahlen an, insbesondere die spezifische Aufwandszahl e_{lewt} .

Bild 46
 Aufwandszahlen bei Ziellängenbestimmung des Einzelrohres zur Gewährleistung des winterlichen Frostschutzes für $\Delta\vartheta$ größer 14 K



Zusammengefasste Ergebnisse wesentlicher L-EWT-Konfigurationen

Im Anhang (*LEWT_PLF2_ANHANG_09.pdf*) sind für drei grundlegende Nenn-Volumenströme, basierend auf 168 gezielt durchgeführten Simulationsrechnungen, alle wesentlichen Systemergebnisse im Detail zusammengefasst dargestellt.

Dies sind die Volumenstromgruppen V1000, V5000 und V10000. Je Konfiguration werden 6 Varianten als Funktion der Verlegetiefen 1,5, 3,0 und 4,5m und Temperaturleitfähigkeit α (Leitungsmerkmal der Bodenart) zwischen $0,44 \cdot 10^{-6}$ (sehr trocken) und $0,93 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (gesättigt) gerechnet. Mit den Ergebnissen aus den Tabellen im Anhang (Tabellen 18 bis 44) werden Direkteinschätzungen von Betriebseigenschaften dieser oder ähnlicher Planungsvarianten (wie auch mit den dargestellten Simulationsergebnissen der zuvor behandelten Fragestellungen) ermöglicht.

Tabelle 29
 Musteranlagen für die Volumenstromgruppe V1000
 (Anhang Tabelle 12 bis 27)

Zweckmäßige Innendurchmesser
 Einzelrohr: 0,3 bis 0,5 m
 Register: 0,15 bis 0,2 m

Bezeichnung der Abkürzung:
 [Durchmesser_Länge_Typ]

V1000

ER	03_30_1	REG	015_20_5
	03_60_1		015_30_5
	03_100_1		02_20_5
	05_30_1		02_30_5
	05_60_1		Register 015: 0,075/0,08/0,1
	05_100_1		Register 02: 0,1/0,105/0,12

Tabelle 30

Musteranlagen für die Volumenstromgruppe V5000
 (Anhang, Tabelle 28 bis 34)

Zweckmäßige Innendurchmesser

Einzelrohr: 0,7 bis 1,0 m;

Register: 0,3 bis 0,5 m

V5000

ER	07_100_1	REG	03_50_5
	07_200_1		03_100_5
	1_100_1		05_50_5
	1_200_1		05_100_5
	Einzelrohr 07: 0,35/0,4/0,5		Register 03: 0,15/0,155/0,16
	Einzelrohr 1: 0,5/0,55/0,6		Register 05: 0,25/0,26/0,27

Tabelle 31

Musteranlagen für die Volumenstromgruppe V10000
 (Anhang, Tabelle 35 bis 44)

Zweckmäßige Innendurchmesser

Einzelrohr: 1,0 bis 1,5 m;

Register: 0,5 bis 0,8 m

Reg: 0,5 Abstand: 1,2 m 0,8: Abstand: 1,5 m

V10000

ER	1_200_1	REG	05_50_5
	1_300_1		05_100_5
	15_200_1		05_150_5
	15_300_1		08_50_5
	Einzelrohr 15: 0,75/0,95/1,0		08_100_5
	Register 08: 0,4/0,45/0,5		08_150_5