

RLT-Anlagen

Wärmerückgewinnung als Schlüsselkomponente der Lebenszykluskosten

Berechnung und Einfluss der Rahmenparameter

Christoph Kaup, Brücken

Lebenszykluskosten werden über die gesamte Laufzeit von raumluftechnischen Anlagen berechnet und haben sich zu einem häufig genutzten Auswahlkriterium für die Investitionsentscheidung entwickelt.

Grundsätzlich basieren Lebenszykluskosten (Lifecyclecosts – LCC) auf der gleichen Grundlage, welche auch für Wirtschaftlichkeitsberechnungen zur Beurteilung von Wärmerückgewinnungssystemen genutzt wird. Sie setzen sich im Wesentlichen aus den Kosten für thermische Energien

Autor



Dr.-Ing. Christoph Kaup, Jahrgang 1963. Geschäftsführender Gesellschafter von HOWATHERM Klimatechnik GmbH. Vorstandsmitglied und Obmann für Technik des Herstellerverbandes Raumluftechnische Geräte e. V. Mitglied in verschiedenen Normungsgremien wie zum Beispiel EN 13779, EN 13053 und EN 1886 sowie verschiedenen Richtlinienausschüssen wie VDI 6022, VDI 3803 und VDI 2071. Lehrbeauftragter am Umwelt-Campus Birkenfeld, Fachhochschule Trier, für Energieeffizienz und Wärmerückgewinnung.

/x	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
37									0,1	0,1	0,2	0,1				
36											0,4	0,3	0,3			
35								0,1	0,1	0,1	0,3	0,3	0,2	0,1	0,1	
34				0,1					0,4	0,3	0,4	0,3	0,3	0,2	0,3	0,1
33					0,1	0,2			0,2	0,2	0,3	0,8	0,3	0,6	0,3	0,1
32						0,1	0,1		0,3	0,8	0,6	1,0	0,9	0,7	0,7	0,2
31						0,1	0,5	1,1	1,2	1,5	1,9	1,1	1,1	0,4	0,3	
30				0,1	0,4	0,3	1,7	1,8	2,9	2,9	2,1	1,7	1,3	0,6	0,2	
29			0,1	0,1	0,7	0,9	2,0	2,9	3,7	2,8	3,8	2,2	1,6	0,7	0,1	
28			0,1	0,1	0,5	1,6	2,8	3,6	4,2	4,0	4,1	2,7	1,7	1,1	0,0	
27			0,1	0,3	0,9	2,8	4,8	4,3	6,3	7,2	5,8	4,0	2,5	1,0	0,2	
26			0,1	0,6	1,2	4,1	6,2	6,4	8,2	7,8	7,1	6,2	2,9	1,0	0,3	
25			0,1	0,8	2,3	5,7	8,1	9,9	10,6	11,9	9,1	5,6	3,9	1,3	0,5	
24			0,1	1,0	2,6	7,5	10,4	14,4	13,3	13,3	11,1	6,8	3,6	1,9	0,8	
23			0,1	0,3	1,8	3,3	10,1	15,8	16,2	16,3	16,8	13,6	8,0	4,3	1,6	0,5
22			0,2	0,9	1,5	6,3	12,2	17,4	21,8	22,1	18,8	14,0	9,7	5,5	2,4	0,3
21	0,1	0,4	1,4	3,7	8,5	16,1	24,1	22,9	23,5	21,9	17,1	11,1	6,8	1,7	0,6	
20	0,1	0,4	1,4	5,1	12,8	22,6	25,0	28,7	28,5	24,5	20,3	14,0	7,5	1,4	0,7	
19		0,3	2,6	6,1	14,1	25,0	32,1	35,2	34,9	31,0	26,5	18,4	6,2	0,1	0,6	
18		0,4	2,7	9,8	15,7	29,1	38,5	43,2	45,0	43,7	39,1	20,7	1,2	0,0	0,1	
17	0,1	0,7	3,1	11,1	19,5	32,9	43,3	50,3	53,5	54,3	43,6	6,2			0,2	
16	0,1	0,6	4,1	12,2	22,1	32,7	51,4	59,9	75,4	79,2	20,3					
15	0,1	0,8	7,0	14,1	26,4	40,6	61,8	79,4	93,8	57,1	0,7					
14	0,1	1,2	7,3	17,3	31,0	46,8	78,5	99,3	105,0	10,1						
13	0,1	1,2	9,1	18,2	38,1	64,1	101,5	122,9	34,9							
12	0,1	1,3	9,2	20,1	45,1	81,4	126,3	93,8	1,5							
11	0,1	3,1	11,3	24,3	58,2	105,1	142,3	21,3								
10	0,2	2,9	12,9	34,8	77,8	133,2	100,9	0,3								
9	0,2	3,6	16,1	48,6	106,1	149,9	28,5									
8	0,4	5,0	21,5	71,1	152,3	123,9	0,5									
7	0,2	6,2	28,0	98,0	193,4	42,4										
6	0,5	8,4	34,8	148,7	166,0	1,8										
5	0,7	8,5	52,1	199,1	104,4											
4	0,9	11,2	84,3	242,8	22,1											
3	1,4	19,4	129,8	202,2	0,2											
2	1,4	25,2	196,2	133,0												
1	2,5	42,6	255,8	31,4												
0	0,1	1,7	66,7	220,3	0,3											
-0		2,2	73,8	110,8												
-1		3,9	109,5	53,4												
-2		6,0	112,5	11,6												
-3		10,5	83,7	0,1												
-4		13,4	56,3													
-5		19,3	31,8													
-6		28,5	11,4													
-7	0,1	28,5	2,0													
-8	0,1	23,7	0,1													
-9	0,2	18,8														
-10	0,2	15,3														
-11	0,3	9,7														
-12	0,3	6,2														
-13	1,3	4,3														
-14	2,1	1,2														
-15	1,2	0,2														
-16	0,9															
-17	0,5															

Tabelle 1
24 h-Temperatur- und Feuchteverteilung in Stunden DIN 4710 für Frankfurt

zur Luftkonditionierung und für den Elektroenergiebedarf zur Luftförderung zusammen. Hinzu kommen Investitionskosten, Filterwechselkosten, Wartungs- und Instandhaltungskosten, Kapitaldienst, Wasserverbrauchskosten und sonstige Kosten. Während die zuletzt genannten Kostenarten relativ einfach zu berechnen und nur von wenigen Rahmenbedingungen abhängig sind, bedarf es zur Ermittlung

der Kosten für den thermischen Energiebedarf der Anlagen einer wesentlich genaueren und umfangreicheren Berechnung, da der thermische Energiebedarf zur Luftkonditionierung von mehreren Faktoren abhängig ist und deshalb stark beeinflusst werden kann. Zur effizienten Reduktion des benötigten thermischen Primärenergiebedarfs werden seit Jahren in raumluftechnischen Geräten und Anlagen Wärmerückgewinnungssysteme eingesetzt. Diese Effizienzmaßnahme gehört spätestens seit Inkrafttreten der Energieeinsparverordnung (EnEV) 2009 zum definitiven Stand der Technik und bildet die Schlüsselkomponente zur Reduktion der Lebenszykluskosten. Durch die stärkere Nutzung der WRG mit immer höheren Wirkungsgraden wächst auch die Beeinflussung der thermischen Leistungen durch die zu wählenden Rahmenbedingungen.

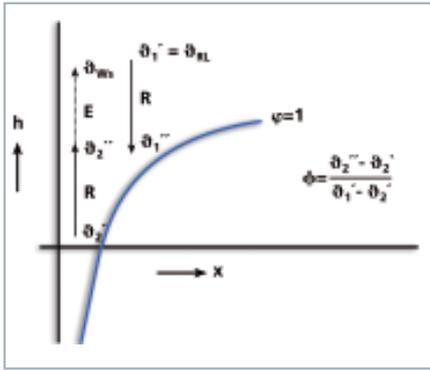


Bild 1

Darstellung der Wärmerückgewinnung im hx-Diagramm (Winterbetrieb)

Neben dem Energiebedarf für Heizung und Kühlung ist der Elektroenergiebedarf der zweite große Energieverbraucher in raumlufttechnischen Anlagen und Geräten, der die Lebenszykluskosten entscheidend mitbestimmt.

Berechnung der thermischen Energien

Die Berechnung von Energiebedarfskosten zum Heizen und Kühlen auf der Basis von Jahrestemperatur- und Jahresfeuchteverlaufswerten kann die Grundlage besser für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit und der Kosten von RLT-Anlagen liefern. Auf Basis der in DIN 4710 [1] vorliegenden Daten zur meteorologischen Temperatur- und Feuchteverteilung wird der Jahresenergieaufwand für den betreffenden Aufstellungsort der WRG berechnet.

In **Tabelle 1** sind beispielhaft die Stundenhäufigkeiten der Außenluftzustände für Frankfurt am Main für 24 Stunden dargestellt. Entsprechende Tabellen sind auch für den reinen Tagesbetrieb (6.00 bis 18.00 Uhr) und für viele Orte des Bundesgebietes hinterlegt.

Aus ihnen können die Häufigkeitswerte des Auftretens der Luftzustände in Stunden, abhängig von der Temperatur in °C und der absoluten Feuchtwerte in g/kg, entnommen werden. In einem Jahressgang-Berechnungsverfahren müssen für jeden Außenluftzustand die Zustände der Anlage auf Basis der geforderten Sollwerte berechnet werden.

Im Winterfall (siehe **Bild 1**) sind damit die Leistungen für den Gesamtbedarf und für die Wärmerückgewinnung (WRG) zu berechnen:

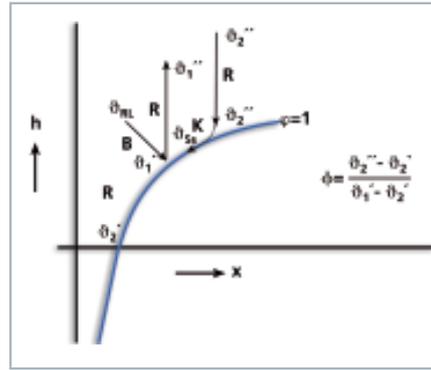


Bild 2

Darstellung der Wärmerückgewinnung im hx-Diagramm (Sommerbetrieb)

$$\dot{Q}_{\text{Bedarf}} = \dot{m}_2 \cdot c_{pL} \cdot (\vartheta_{WS} - \vartheta_2')$$

und:

$$\dot{Q}_{\text{WRG}} = \dot{m}_2 \cdot c_{pL} \cdot (\vartheta_2'' - \vartheta_2')$$

mit:

ϑ_{WS} Sollwert der Zuluft im Winterbetrieb [°C]

\dot{Q}_{Bedarf} gesamte benötigte Wärmeleistung [kW]

\dot{Q}_{WRG} WRG-Leistung [kW]

Die einzelnen thermischen Leistungen zu jedem Betriebszustand werden dann mit der Häufigkeit ihres Auftretens multipliziert:

$$W_{\text{Bedarf}(x,y)} = \dot{Q}_{\text{Bedarf}(x,y)} \cdot t_{(x,y)}$$

und:

$$W_{\text{WRG}(x,y)} = \dot{Q}_{\text{WRG}(x,y)} \cdot t_{(x,y)}$$

wobei:

$t_{(x,y)}$ Zeit der Häufigkeit aus Tabelle 1

mit:

x Temperatur von -19 bis 37 [°C]

y absolute Feuchte von 0 bis 19 [g/kg]

Die gesamten thermischen Wärmearbeiten des Jahres ergeben sich aus der Summe der Einzelwerte:

$$W_{\text{Bedarf ges.}} = \sum W_{\text{Bedarf}(x,y)}$$

und:

$$W_{\text{WRG ges.}} = \sum W_{\text{WRG}(x,y)}$$

Das gleiche Verfahren wird auch im Sommer analog angewandt (**Bild 2**) mit:

$$\dot{Q}_{\text{Bedarf}} = \dot{m}_2 \cdot (h_{SS} - h_2')$$

und:

$$\dot{Q}_{\text{WRG}} = \dot{m}_2 \cdot (h_2'' - h_2')$$

mit:

h_{SS} Sollwert (Enthalpie) der Zuluft im Sommer [kJ/kg/K]

Unter vereinfachten Bedingungen ist auch die Berechnung ohne den Einfluss der Feuchte möglich. Hier können dann nur die Werte der Temperaturverteilung herangezogen werden, die ebenfalls in DIN 4710 hinterlegt sind. Dabei verringert sich aber die Genauigkeit der Berechnung, da Feuchteänderungen in der Anlage nicht berücksichtigt werden. Können Feuchteänderungen vernachlässigt werden, kann die Berechnung mit ausreichender Genauigkeit mit den Temperaturwerten allein erfolgen.

Bewertung des elektrischen Energiebedarfs

Die Druckverluste der Anlage und die zu fördernden Volumenströme bestimmen maßgeblich den elektrischen Energiebedarf, der zum Betrieb einer Anlage zwingend notwendig ist und der im Wesentlichen durch die elektrischen Antriebe (Ventilatoren und weitere Verbraucher, z. B. Pumpen) bestimmt wird.

Die erforderlichen elektrischen Leistungen errechnen sich aus:

$$P_{el} = \dot{V} \cdot \Delta p \cdot 1/\eta_s$$

mit:

P_{el} aufgenommene elektrische Leistung [kW]

\dot{V} Volumenstrom bei Normdichte [m³/s]

Δp Differenzdruck der Anlage [Pa]

η_s Systemwirkungsgrad des Antriebs [./.]

Es ist sehr sinnvoll, die Anlage nicht konstant, sondern geregelt, also bedarfsgerecht zu betreiben. Denn mit sinkender Drehzahl reduzieren sich die Leistungsaufnahme der Antriebe mit der dritten Potenz und die Druckverluste in der Anlage quadratisch.

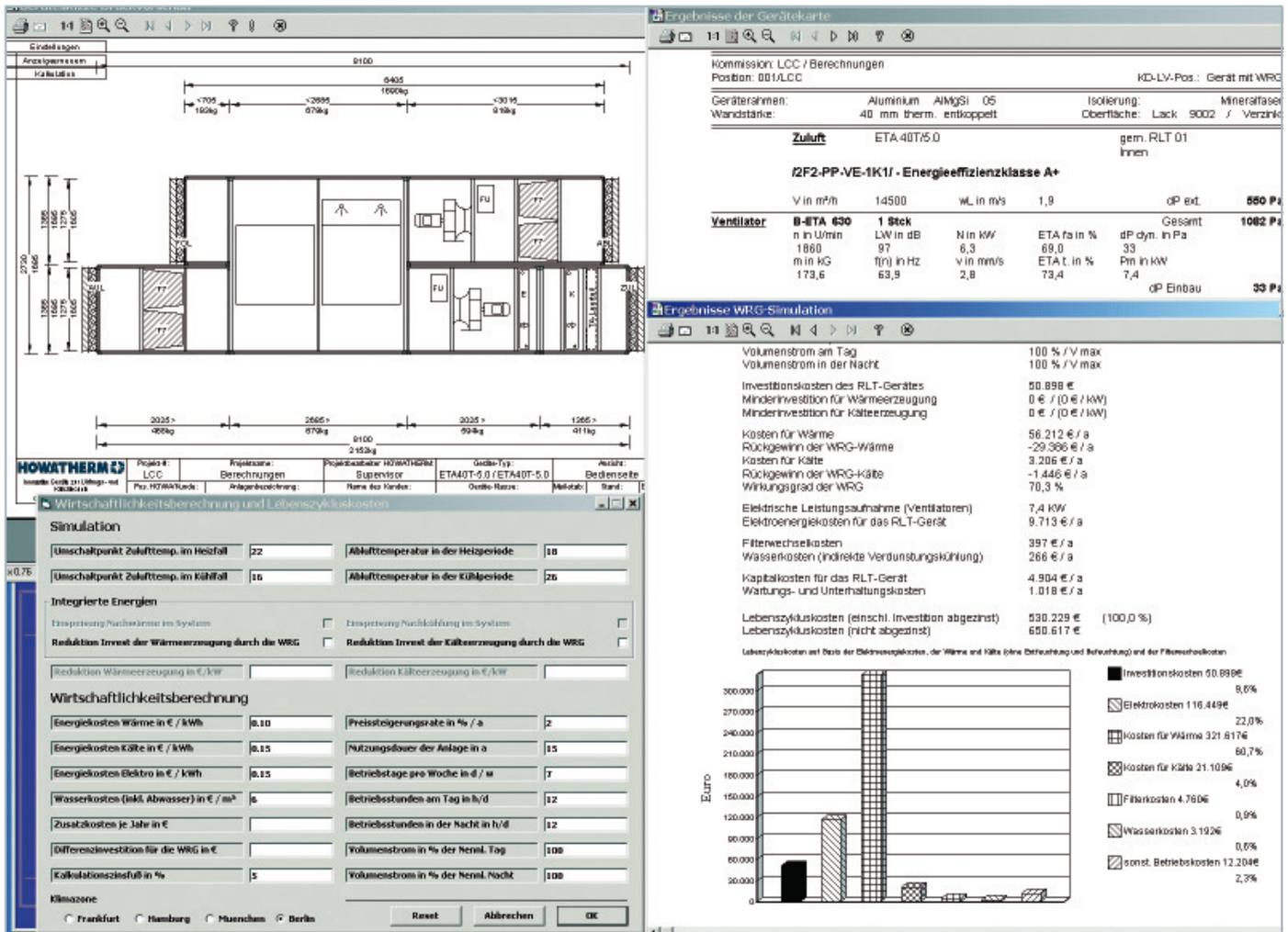


Bild 3
Berechnungsprogramm
von RLT-Geräten

Der zweite Faktor ist der zu überwindende Differenzdruck in der Anlage, der intern durch die installierten Komponenten und extern durch das angeschlossene Kanalnetz bestimmt wird.

Die Berechnung der Leistungen erfolgt dann mit den jeweiligen Volumenströmen und den dazugehörigen Differenzdrücken zu jedem auftretenden Betriebsmodus.

Der Systemwirkungsgrad (η_S) des Ventilatorantriebssystems wird durch vier Einzelwirkungsgrade bestimmt:

$$\eta_S = \eta_V \cdot \eta_M \cdot \eta_A \cdot \eta_R$$

wobei:

η_V Wirkungsgrad des Ventilators

η_M Motorwirkungsgrad

η_A Antriebswirkungsgrad

η_R Wirkungsgrad der Drehzahlregelung

Die energetischen Aufwendungen für elektrische Hilfsenergien müssen nun über die Leistungen im jeweiligen Betriebspunkt ermittelt werden:

$$W_{el(x,y)} = P_{el(x,y)} \cdot t_{(x,y)}$$

Die gesamten elektrischen Arbeiten des Jahres ergeben sich ebenfalls aus der Summe der Einzelwerte:

$$W_{el\ ges.} = \sum W_{el(x,y)}$$

Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen als Grundlage der Lebenszykluskosten

Neben den energetischen Betrachtungen müssen die Energieströme auch primärenergetisch und monetär bewertet werden, da letztendlich die Amortisation der WRG, also ab wann die WRG „bezahlt“ ist, und der Kapitalwert der Ersparnisse, also wieviel mit der WRG unter Berücksichtigung von Zinseffekten in der Nutzungsphase „verdient“ werden kann, sowie die Gesamtsituation der Anlage den Ausschlag für die Investition in die WRG und in die gesamte Anlage geben.

Hierbei werden neben den Erträgen der WRG auch die Aufwendungen für die gesamte Nutzungszeit (n) der Anlage auf den jeweils aktuellen Zeitpunkt abgezinst. Dazu wird das betriebswirtschaftliche Kapitalwert-Verfahren angewandt.

Der Barwertfaktor mit Bezug zum Nutzungszeitraum gibt den Wert künftiger Erträge und Aufwendungen, abgezinst auf den aktuellen Zeitpunkt, an und errechnet sich aus [2] :

$$b = [(1 + i)^n - 1] / i / (1 + i)^n$$

Mit der Berücksichtigung der Preissteigerung ermittelt sich der Barwertfaktor aus:

$$b = [1 - ((1 + j) / (1 + i))^n] / (1 - j)$$

AL	RL	ETA	WRG	ZL	ΔT	Q WRG	Q zus.	Status
°C	°C	%	°C	°C	°C	kW	kW	
-12,0	20,0	59,4	7,0	7,0	19,0	94,9	0,0	VS
-11,0	20,0	61,3	8,0	8,0	19,0	94,9	0,0	VS
-10,0	20,0	63,3	9,0	9,0	19,0	94,9	0,0	VS
-9,0	20,0	65,5	10,0	10,0	19,0	94,9	0,0	VS
-8,0	20,0	67,9	11,0	11,0	19,0	94,9	0,0	VS
-7,0	20,0	70,3	12,0	12,0	19,0	94,9	0,0	VS
-6,0	20,0	70,3	12,3	12,3	18,3	91,3	0,0	VS
-5,0	20,0	70,3	12,6	12,6	17,6	87,6	0,0	VS
-4,0	20,0	70,3	12,9	12,9	16,9	84,3	0,0	VS
-3,0	20,0	70,3	13,2	13,2	16,2	80,8	0,0	VS
-2,0	20,0	70,3	13,5	13,5	15,5	77,3	0,0	VS
-1,0	20,0	70,3	13,8	13,8	14,8	73,8	0,0	VS
0,0	20,0	70,3	14,1	14,1	14,1	70,2	0,0	VS
1,0	20,0	70,3	14,4	14,4	13,4	66,7	0,0	VS
2,0	20,0	70,3	14,7	14,7	12,7	63,2	0,0	VS
3,0	20,0	70,3	15,0	15,0	12,0	59,7	0,0	VS
4,0	20,0	70,3	15,2	15,2	11,2	56,2	0,0	VS
5,0	20,0	70,3	15,5	15,5	10,5	52,7	0,0	VS
6,0	20,0	70,3	15,8	15,8	9,8	49,2	0,0	VS
7,0	20,0	70,3	16,1	16,1	9,1	45,7	0,0	VS
8,0	20,0	70,3	16,4	16,4	8,4	42,1	0,0	VS
9,0	20,0	70,3	16,7	16,7	7,7	38,6	0,0	VS
10,0	20,0	70,3	17,0	17,0	7,0	35,1	0,0	VS
11,0	20,0	70,3	17,3	17,3	6,3	31,6	0,0	VS
12,0	20,0	70,3	17,6	17,6	5,6	28,1	0,0	VS
13,0	20,0	70,3	17,9	17,9	4,9	24,6	0,0	VS
14,0	20,0	70,3	18,2	18,2	4,2	21,1	0,0	VS
15,0	20,0	70,3	18,5	18,5	3,5	17,6	0,0	VS
16,0	20,0	70,3	18,8	18,8	2,8	14,0	0,0	VS
17,0	20,0	70,3	19,1	19,1	2,1	10,5	0,0	VS
18,0	20,0	70,3	19,4	19,4	1,4	7,0	0,0	VS
19,0	20,0	70,3	19,7	19,7	0,7	3,5	0,0	VS
20,0	20,0	0,0	20,0	20,0	0,0	0,0	0,0	AL, S
21,0	19,0	70,3	19,6	19,6	-1,4	-7,0	0,0	Def. S 1
22,0	19,0	70,3	19,9	19,9	-2,1	-10,5	0,0	Def. S 1
23,0	19,0	70,3	20,2	20,2	-2,8	-14,0	0,0	Def. S 1
24,0	19,0	70,3	20,5	20,5	-3,5	-17,6	0,0	Def. S 1
25,0	19,0	70,3	20,8	20,8	-4,2	-21,1	0,0	Def. S 1
26,0	19,0	70,3	21,1	21,1	-4,9	-24,6	0,0	Def. S 1
27,0	19,0	70,3	21,4	21,4	-5,6	-28,1	0,0	Def. S 1
28,0	19,0	70,3	21,7	21,7	-6,3	-31,6	0,0	Def. S 1
29,0	19,0	70,3	22,0	22,0	-7,0	-35,1	0,0	Def. S 1
30,0	19,0	70,3	22,3	22,3	-7,7	-38,6	0,0	Def. S 1
31,0	19,0	70,3	22,6	22,6	-8,4	-42,1	0,0	Def. S 1
32,0	19,0	70,3	22,9	22,9	-9,1	-45,7	0,0	Def. S 1

VS = Vereisungsschutz / NE = Nachheizen / MK = Nachkühlen / Def. = Defekter / S = Stufe(n)
 LA = Leistungsanpassung / AL = Aussenlufttemp. / RL = Raumlufttemp. (nach Def.) / ZL = Zulufttemp.
 Simulation unter konstanten Bedingungen nur trocken!

Tabelle 2
Funktion der WRG

AL	Q WRG	Stunden Tag	Stunden Nacht	Wärme Gesamt	Kälte Gesamt	Wärme WRG	Kälte WRG	Wasser	
°C	kW	h/°C	h/°C	kWh	kWh	kWh	kWh	m³/h	
< -11,0	94,9	11	4	1.637		1.057			
-11,0	94,9	11	5	1.850		1.104			
-10,0	94,9	14	5	2.181		1.336			
-9,0	94,9	21	5	2.955		1.871			
-8,0	94,9	27	5	3.797		2.487			
-7,0	94,8	32	11	4.454		3.018			
-6,0	91,3	45	10	5.732		3.679			
-5,0	87,8	57	14	7.062		4.773			
-4,0	84,3	66	19	8.106		5.471			
-3,0	80,8	85	21	9.881		6.659			
-2,0	77,3	112	29	12.508		8.415			
-1,0	73,8	103	48	11.950		8.025			
0,0	70,2	129	135	17.638		11.822			
1,0	66,7	128	58	13.419		8.960			
2,0	63,2	123	51	12.050		8.028			
3,0	59,7	129	50	11.362		7.559			
4,0	56,2	128	52	11.166		7.405			
5,0	52,7	129	51	10.547		6.986			
6,0	49,2	117	50	9.153		6.012			
7,0	45,7	115	52	8.448		5.523			
8,0	42,1	118	53	8.042		5.217			
9,0	38,6	117	59	7.511		4.840			
10,0	35,1	134	62	7.758		4.881			
11,0	31,6	130	60	6.863		4.388			
12,0	28,1	141	61	6.034		4.143			
13,0	24,6	151	57	6.157		3.788			
14,0	21,1	160	53	5.608		3.379			
15,0	17,6	153	45	4.526		2.655			
16,0	14,0	146	36	3.467		1.963			
17,0	10,5	126	25	2.378		1.248			
18,0	7,0	126	18	1.736		810			
19,0	3,5	114	12	1.029		360			
20,0	0,0	103	8						
21,0	-7,0	87	5		771		540	7	
22,0	-10,5	79	4		1.038		726	6	
23,0	-14,0	66	2		1.178		825	5	
24,0	-17,6	58	2		1.267		892	4	
25,0	-21,1	48	1		1.245		876	4	
26,0	-24,6	32	1		990		675	2	
27,0	-28,1	22			764		537	2	
28,0	-31,6	15			562		395	1	
29,0	-35,1	11			454		340	1	
30,0	-38,6	7			323		227	1	
31,0	-42,1	3			178		124		
> 31,0	-45,7	2			95		67		
Gesamt	DIN 4710	3.760		1.252	231.679	8.962	191.255	6.288	33
Jahr									

Tabelle 3
Energien der WRG

wobei:

- i Zinssatz [%]
- j Preissteigerungsrate [%]
- n Nutzungsdauer [a]

Die jährliche Einsparung (E) der WRG bemisst sich aus der Differenz zwischen dem Nutzen und den Aufwendungen:

$$E = \text{Nutzen} - \text{Aufwand}$$

$$E = E_{WRG} - E_{el} - E_U - E_K$$

wobei:

- E_{WRG} energetischer Nutzen der WRG im Sommer und Winter [Euro]
- E_{el} elektrische Aufwendungen (Hilfsenergie) [Euro]
- E_U Unterhaltungskosten der WRG (z. B. Wartung, Wasser etc.) [Euro]
- E_K Kapitalkosten der WRG [Euro]

Der Kapitalwert der Ersparnisse (K) der WRG kalkuliert sich dann aus:

$$K = E \cdot b \cdot I$$

wobei:

- E jährliche Einsparung [Euro]
- b Barwertfaktor innerhalb der Nutzungsphase
- I Kapitaleinsatz durch die Investition [Euro]

Der Kapitalwert für die Investition muss unter der Berücksichtigung aller Rahmenbedingungen ermittelt werden.

Hierbei sind neben der Investition für das WRG-System auch die eingesparten Investitionen zu berücksichtigen, die sich z. B. durch eine kleinere Heizungsanlage oder Kälteerzeugung ergeben. Insofern ist es wichtig, den Einsatz der WRG im gesamten Kontext der Planung zu sehen.

Der positive Kapitalwert gibt an, welchen Ertrag die WRG innerhalb ihrer Nutzungszeit, abgezinst auf den aktuellen Zeitpunkt, erwirtschaftet hat. Ist der Kapitalwert negativ, handelt es sich um einen Verlust.

Auch alle anderen Kosten der Anlage müssen für eine sinnvolle Betrachtung

auf den aktuellen Zeitpunkt abgezinst werden, um den zeitlichen Anfall der Kosten berücksichtigen zu können.

Berechnungsprogramm und Fallbeispiel

Im Folgenden wird eine Software zur Wirtschaftlichkeitsberechnung der WRG und zur Berechnung von Lebenszykluskosten nach den beschriebenen Verfahren dargestellt. **Bild 3** zeigt die Ein- und Ausgabemasken des Berechnungsprogramms. Anhand weniger charakteristischer Daten können die Wirtschaftlichkeitsberechnung und die Berechnung der Lebenszykluskosten erfolgen.

Neben den Anlagedaten (Investition, Betriebsmodi), den Zuluftsollwerten im Heiz- und Kühlbetrieb und den spezifischen Energiekosten werden das Lastprofil der Anlage und deren Standort definiert. Hierbei wird zwischen dem Tag- und dem Nachtbetrieb unterschieden. Aus diesem Lastprofil errechnen sich die Laufzeiten der Anlage.

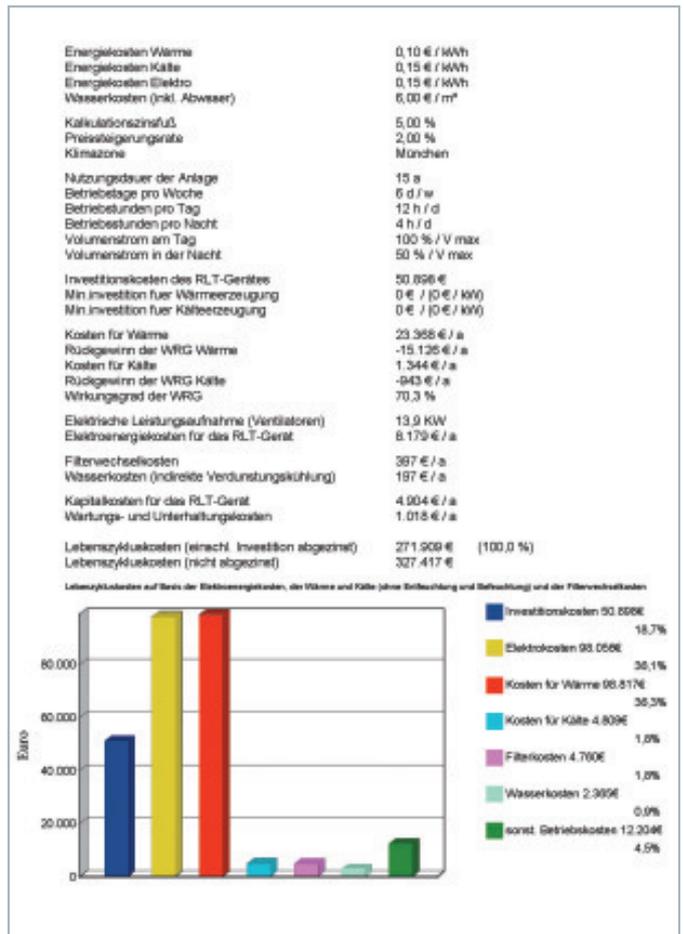
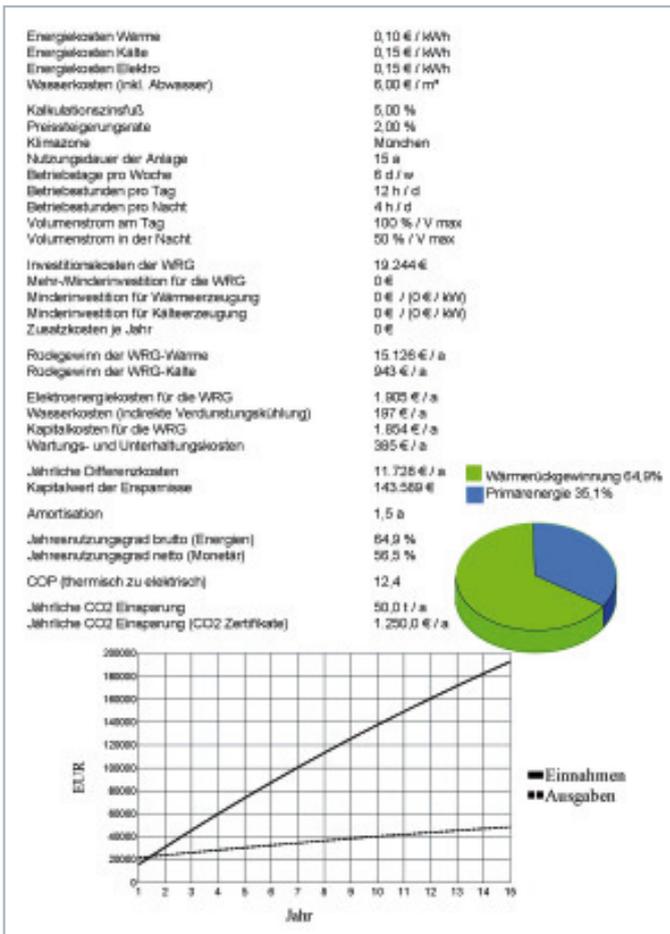


Tabelle 4

Zusammenfassung der Ergebnisse der WRG

Auch die Minderung der Wärme- und Kälteerzeugung kann definiert werden.

Auf der ersten Ergebnisseite (Tabelle 2) wird die Funktion der Anlage in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur dargestellt, die sich aus dem Tempera-

turübertragungsgrad und den Sollwerten ergibt. Der Einfluss der Leistungsregelung, bzw. der Leistungsanpassung (LA) oder aber des Vereisungsschutzes (VS) und Befeuchtung (Bef.) werden hierbei berücksichtigt. Tabelle 2 enthält ne-

Tabelle 5

Zusammenfassung der Lebenszykluskosten ohne Berücksichtigung der Mindestinvestitionen

ben den charakteristischen Temperaturen alle weiteren erforderlichen Informationen über den Betriebszustand der Anlage.

In Tabelle 3 werden tabellarisch die einzelnen thermischen Arbeiten darge-

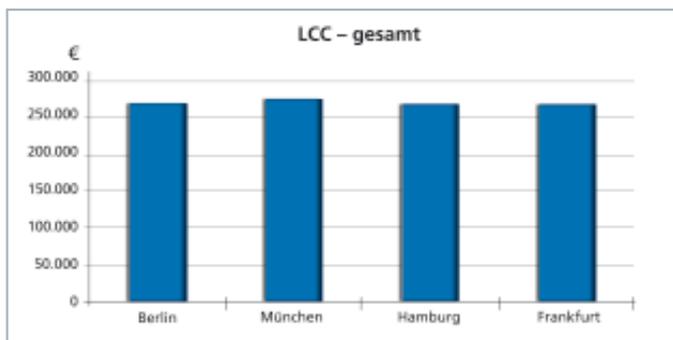


Bild 4

Gesamte Lebenszykluskosten des RLT-Gerätes

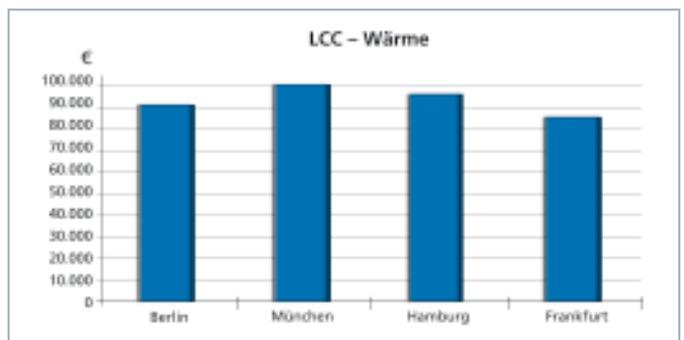


Bild 5

Lebenszykluskosten Wärmebereitstellungskosten

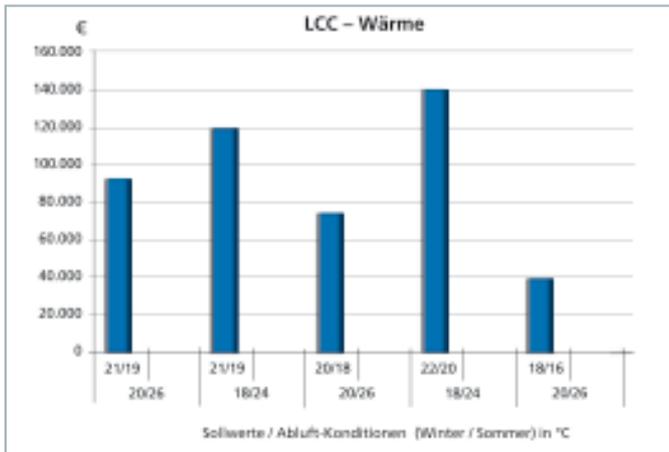


Bild 6

Kosten zur Wärmeerzeugung in Abhängigkeit der Sollwerte und Abluftkonditionen

Berechnungsvariante	Abluftkondition Winter/Sommer	Zuluftkondition Winter/Sommer
1	20 / 26 °C höhere Last	21 / 19 °C höherer Wärmebedarf
2	18 / 24 °C geringere Last	21 / 19 °C höherer Wärmebedarf
3	20 / 26 °C höhere Last	20 / 18 °C geringerer Wärmebedarf
4	18 / 24 °C geringere Last	22 / 20 °C hoher Wärmebedarf
5	20 / 26 °C höhere Last	18 / 16 °C hoher Kühlbedarf

Tabelle 6

Thermische Rahmenbedingungen der Berechnungen

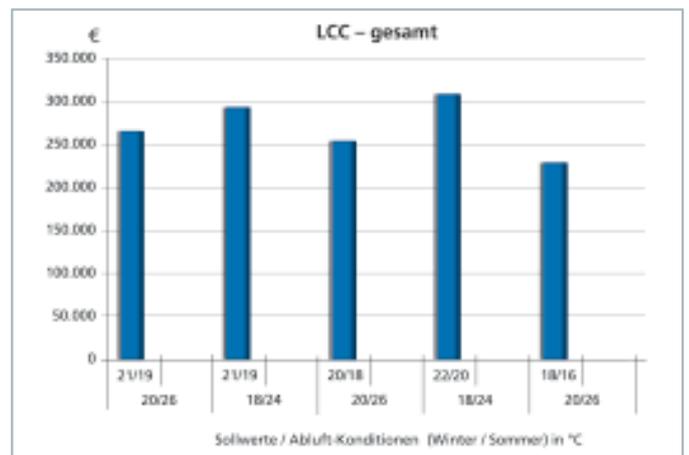
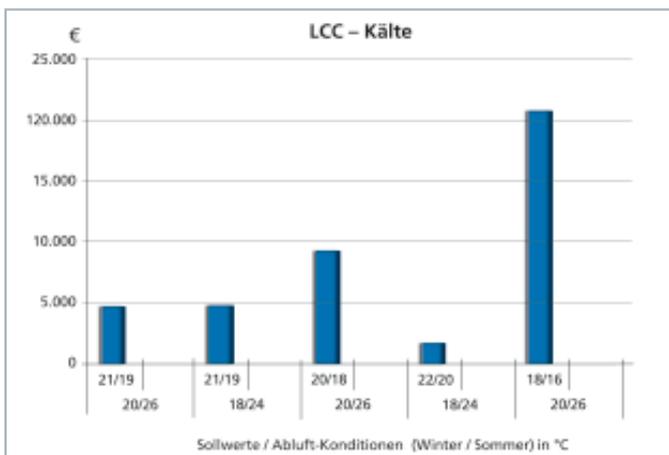


Bild 7

Kosten der Kälteerzeugung in Abhängigkeit der Sollwerte und Abluftkonditionen

Bild 8

Gesamte Lebenszykluskosten in Abhängigkeit der Sollwerte und Abluftkonditionen bei einem RLT-Gerät mit Label A+

stellt, die sich aus der Multiplikation der Leistungen mit ihrer Häufigkeit ergeben. Dabei wird sowohl der Gesamtbedarf als auch der Deckungsanteil der WRG berechnet.

Des Weiteren wird der Wasserverbrauch der indirekten Verdunstungskühlung ermittelt, da er ebenfalls in den Betriebskosten berücksichtigt werden muss.

In **Tabelle 4** sind die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen übersichtlich zusammengestellt.

Neben den Rahmenbedingungen wird der Kapitalwert der Ersparnisse kalkuliert, in diesem Fall nach 15 Jahren Nutzungsdauer, und die Amortisation als Schnittpunkt der beiden Linien (abgezinsten Einnahmen und Ausgaben) dargestellt.

Die Amortisation beträgt in diesem Fall nur 1,5 Jahre. Die Einnahmen nach 15 Jahren liegen bei rund 190 Tausend Euro. Diesen Einnahmen stehen Ausgaben von ca. 47 Tausend Euro entgegen. Der Kapitalwert der Ersparnisse liegt damit bei etwa 144 Tausend Euro. Dies entspricht der 7,5-fachen Summe der Investition für die WRG.

Ebenfalls sind die Kennzahlen wie beispielsweise die Jahresarbeitszahl auf Basis des Jahresenergievergleichs aufgeführt.

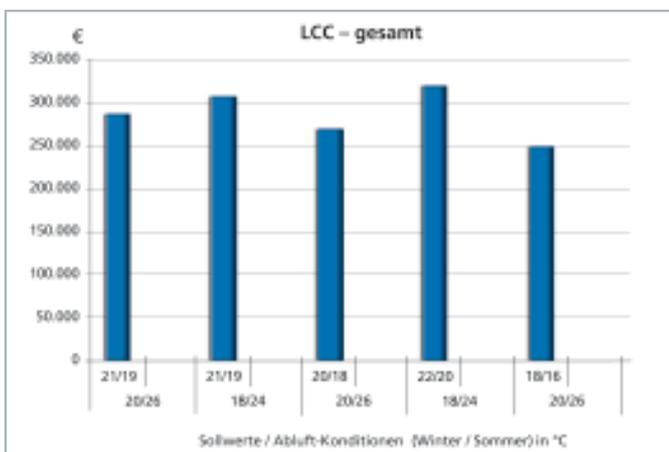


Bild 9

Gesamte Lebenszykluskosten in Abhängigkeit der Sollwerte und Abluftkonditionen mit einem RLT-Gerät mit Label B

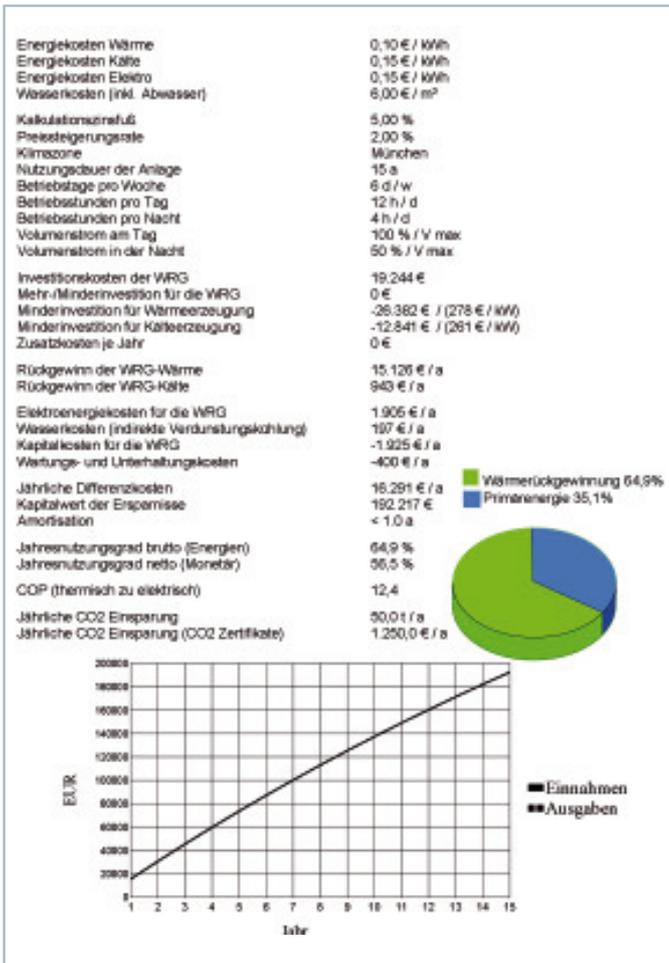


Tabelle 7

Ergebnisse der WRG unter Berücksichtigung der Minderinvestitionen

Auf der letzten Seite werden die Lebenszykluskosten dargestellt (Tabelle 5), die ebenfalls auf den aktuellen Zeitpunkt abgezinst wurden und in diesem Beispiel 226 Tausend Euro betragen. Trotz der sehr effizienten WRG mit ca. 70 % Rückwärmzahl wird aus den Lebenszykluskosten ersichtlich, dass die Kosten zur Wärmebereitstellung immer noch am höchsten ausfallen.

Ergebnisse der Berechnungen

An einer Anlage wurden verschiedene Szenarien berechnet, um die Lebenszykluskosten unter verschiedenen Rahmenbedingungen zu bestimmen. Hierzu wurde folgendes durchschnittliches und repräsentatives RLT-Gerät definiert:

Volumenstrom Zu- und Abluft mit 14 500 m³/h und einem externen Differenzdruck von 550 Pa (Zuluft) und 500 Pa (Abluft).

Das Gerät wurde mit einer Wärmerückgewinnung mit einem trockenen Übertragungsgrad von 70,3 % und indirekter Verdunstungskühlung berechnet. Die Gesamtinvestition des RLT-Gerätes mit dem Effizienzlabel A+ nach RLT 01 [3] betrug im Beispiel 50 898 Euro.

Die Laufzeit betrug 7 Tage pro Woche. Am Tag wurde die Laufzeit mit 12 Stunden und 100 % Last (bezogen auf den Volumenstrom), in der Nacht mit 12 Stunden und 50 % Last festgelegt.

Die Laufzeit des Gerätes wurde mit 15 Jahren definiert. Sämtliche Kosten wurden mit einem Zinssatz von 5 % und einer Preissteigerungsrate von 2 % kalkuliert.

Die spezifischen Kosten für Wärme betragen 0,10 Euro, für Kälte- und Elektroenergie 0,15 Euro. Die meteorologischen Daten wurden gemäß DIN 4710 hinterlegt und für die Standorte Berlin,

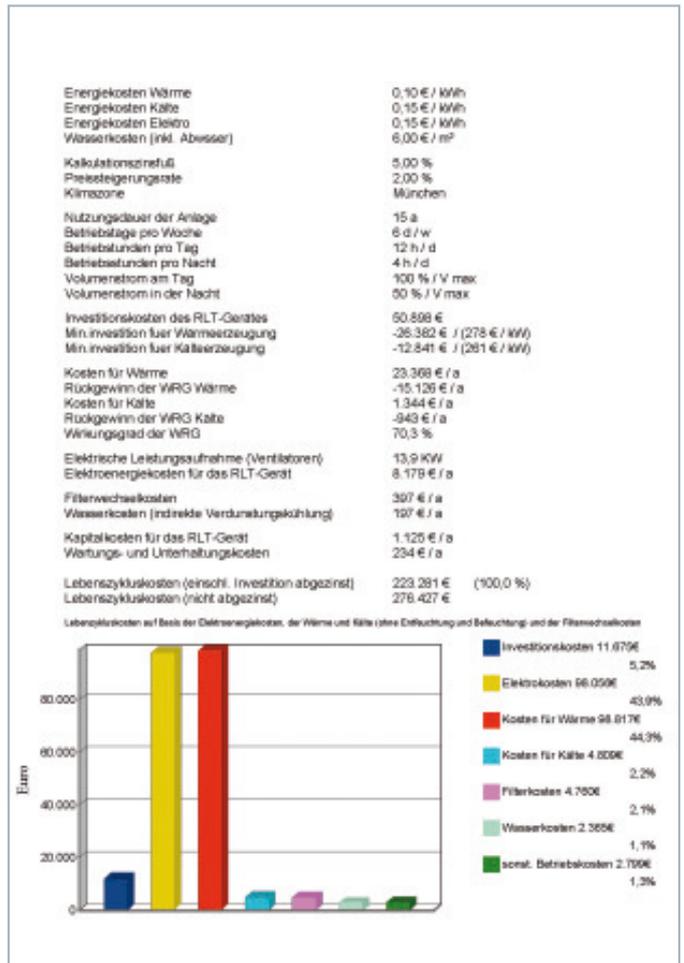


Tabelle 8

Lebenszykluskosten unter Berücksichtigung der Minderinvestitionen

München, Hamburg und Frankfurt (Stadt) berechnet.

Einfluss des Standortes

In einem ersten Schritt der Berechnungen wurden die Lebenszykluskosten für vier verschiedene Standorte in der Bundesrepublik berechnet (Bild 4).

Als Ergebnis konnte festgestellt werden, dass zumindest in Deutschland der Standort der Anlage einen sehr geringen Einfluss auf die Lebenszykluskosten hat. Die Unterschiede lagen im Mittel bei ±1,9 %.

Betrachtet man die Kosten der Wärmeerzeugung isoliert, lagen die Ergebnisse im Mittel bei ±7,1 in Abhängigkeit des Standortes (Bild 5).

Die Elektroenergiekosten der Antriebe lagen in diesem Beispiel unabhängig vom Standort konstant bei 98 817 Euro.

Einfluss der thermischen Rahmenbedingungen

In einem zweiten Schritt der Berechnungen wurden die Lebenszykluskosten für fünf verschiedene Lastfälle berechnet. Dabei wurden sowohl die Abluftkonditionen im Winter- wie im Sommerbetrieb der Anlage als auch die Zuluft-sollwerte verändert.

Die fünf Lastfälle definieren sich sowohl durch die abgeführte Wärmelast (bestimmt durch die Ablufttemperatur) als auch durch die zugeführte Wärmeenergie (bestimmt durch die Zulufttemperatur) wie in **Tabelle 6** dargestellt. Der Einfluss dieser beiden Größen war beträchtlich (siehe **Bild 6**).

Man erkennt, dass die Lebenszykluskosten zur Wärmeerzeugung zwischen 38 524 Euro und 140 277 Euro, also um den Faktor 3,5 in Abhängigkeit der thermischen Rahmenbedingungen schwanken.

Dabei wurden die Sollwerte „nur“ in einem Bereich von 18 bis 22 °C (Winter) und 16 bis 20 °C (Sommer) verändert. Auch die Abluftkonditionen lagen mit 18 bis 20 °C (Winter) und 24 bis 26 °C (Sommer) in einem schmalen Beurteilungsbereich.

In Bezug auf die Kälteerzeugungskosten ergab sich ein noch differenzierteres Bild (**Bild 7**). Hier schwanken die Energiekosten etwa um den Faktor 10.

Die gegenseitigen Einflüsse von Wärme- und Kältebedarf relativieren sich bei der Betrachtung der Gesamtlebenszykluskosten (**Bild 8**). Allerdings streuen die Kosten in einem Bereich von 228 742 Euro bis 310 510 Euro und damit etwa um den Faktor 1,36.

Vergleich mit Alternativen

Berechnet man nun das RLT-Gerät mit einer alternativen WRG ohne Verdunstungskühlung und mit einem Übertragungsgrad von 52,4 % entsprechend der Effizienzklasse B nach RLT 01, ergeben sich Lebenszykluskosten gemäß **Bild 9**.

Man erkennt an diesem Beispiel, dass nur bei vergleichbaren Rahmenbedingungen die Ergebnisse tatsächlich miteinander verglichen werden können, da auch bei diesem Beispiel die Kosten in einer vergleichbaren Größenordnung,

aber letztlich aufgrund des niedrigeren Übertragungsgrades mit einem etwas geringeren Betrag, hier um den Faktor 1,30, differieren können.

Einfluss der Bilanzgrenze

Die Berechnung kann auch unter der Berücksichtigung der Minderinvestitionen der Wärme- (im Beispiel 26 382 Euro) und Kälteerzeugung (im Beispiel 12 841 Euro) [4] kalkuliert werden. Aufgrund dieser Minderinvestitionen auf der Primärenergieerzeugungsseite liegen die Gesamtinvestitionen im Beispiel trotz der Investition für die WRG auf einem niedrigeren Niveau, das sich auch ohne WRG ergeben hätte (**Tabelle 7**).

In diesem Fall spart die Wärmerückgewinnung nicht nur Betriebskosten, sondern auch Investitionskosten ein, da der Investitionssumme für die WRG von 19 244 Euro Minderinvestitionen von 39 223 Euro gegenüberstehen.

Die Lebenszykluskosten sinken durch diese eingesparte Investition auf der Wärme- und Kälteerzeugerseite und durch den sinkenden Kapitaldienst von 271 909 Euro auf 223 281 Euro und damit um 48 628 Euro, in diesem konkreten Beispiel um 17,9 % (**Tabelle 5** und **8**).

Fazit

Die Berechnungsbeispiele zeigen sehr deutlich den großen Einfluss der thermischen Rahmenbedingungen auf die Lebenszykluskosten und die Wirtschaftlichkeitskriterien von WRG-Systemen, wobei die örtlichen Aufstellungsbedingungen einen relativ geringen Einfluss haben.

Der Einfluss der thermischen Rahmenbedingungen wird umso größer, je effizienter die eingesetzte Wärmerückgewinnung ist. Mit steigendem Wirkungsgrad der WRG sinkt der benötigte Primärenergiebedarf deutlich. Dieser Bedarf wird zusätzlich wesentlich durch die geforderten Sollwerte bestimmt. Dieser Einfluss steigt mit der Effizienz der WRG. Gleichzeitig hängt der Nutzen der WRG nicht nur von der Effizienz (Rückwärmzahl) ab, sondern auch von den Abluftkonditionen. Je geringer die Raumlasten sind, desto geringer sind die Ablufttemperaturen und desto geringer

wird der Beitrag der WRG, der zur Deckung des Wärmebedarfs herangezogen werden muss.

Die Berechnung von Lebenszykluskosten ist eine sehr gute Methode, die Gesamtwirtschaftlichkeit unterschiedlicher Anlagenvarianten miteinander zu vergleichen, was aber, wie anhand des Beispiels zu sehen ist, nur unter gleichen Rahmenbedingungen möglich ist. Man erkennt sehr klar, dass durch die Wahl der Rahmenparameter das Ergebnis der Berechnungen wesentlich beeinflusst wird.

Des Weiteren wird deutlich, dass durch die Wahl der Bilanzgrenze das Ergebnis der Lebenszykluskostenberechnung ebenfalls signifikant verändert werden kann, da durch Minderinvestitionen, welche sich insbesondere durch die Nutzung der WRG ergeben, die Kosten erheblich gesenkt werden können. Dies kann sogar dazu führen, dass die Minderinvestitionen die Kosten für die WRG nicht nur decken, sondern dass der eingesparte Betrag größer ist als die Kosten für die WRG.

Dies setzt natürlich voraus, dass die Entscheidung über notwendige Investitionen – und damit über die Minderinvestitionen – rechtzeitig in der Planungsphase getroffen wird, solange deren Realisierung überhaupt noch möglich ist.

Literatur

- [1] DIN 4710: Statistiken meteorologischer Daten zur Berechnung des Energiebedarfs von heiz- und raumluftechnischen Anlagen in Deutschland: 2003–01.
- [2] Mensch, G.: Investitionsrechnung in der Planung und Beurteilung von Investitionen. Oldenbourg Wissenschaftsverlag: 2002.
- [3] RLT 01: Allgemeine Anforderungen an Raumluftechnische Geräte, Ausgabe Januar 2009.
- [4] Recknagel, Sprenger, Schramek, Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik, Ausgabe 2009/2010.