

## Analyse

# Bewertung der Nachhaltigkeit von RLT-Geräten auf Basis der CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Herstellung und deren Betrieb

Raumluftechnische Geräte (RLT-Geräte) benötigen zum Betrieb Energieträger, die heute noch nicht CO<sub>2</sub>-neutral sind. Zur Beförderung der Luftmengen sowie zur Lufterwärmung und zur Kühlung des Luftstroms werden elektrische und thermische Energie benötigt. Zusätzlich werden bereits bei der Herstellung der Komponenten CO<sub>2</sub>-Emissionen freigesetzt.

TEXT: Christoph Kaup

**Z**ur Berücksichtigung von CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Wärmebereitstellung wurde ein mittlerer Wert in Höhe von 270 g CO<sub>2</sub> eq/kWh gewählt. Dieser Wert setzt sich aus 315 g CO<sub>2</sub> eq/kWh für Öl (25 Prozent Anteil), 202 g CO<sub>2</sub> eq/kWh für Gas (44,3 Prozent Anteil) und 341 g CO<sub>2</sub> eq/kWh für Fernwärme (10,2 Prozent Anteil) und rund 30 g CO<sub>2</sub> eq/kWh für Pellets (18 Prozent Anteil) sowie 370 g CO<sub>2</sub> eq/kWh für Strom (1,6 Prozent) und 429 g CO<sub>2</sub> eq/kWh für Kohle (0,9 Prozent)<sup>1)</sup> zusammen. Daraus resultiert ein Mittelwert von 220 g CO<sub>2</sub> eq/kWh<sup>2)</sup>. Unter Berücksichtigung von Verteilverlusten von 35 Prozent ergibt sich ein Wert von rund 300 g CO<sub>2</sub> eq/kWh. Aufgrund der zunehmenden Nutzung regenerativer Energie wird der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck des Wärmemix' in Zukunft sinken. Im Folgenden wurde daher der Wert unter Abzug von zehn Prozent mit 270 g CO<sub>2</sub> eq/kWh angesetzt.

Für Strom in Deutschland wird der Strommix von derzeit 366 g CO<sub>2</sub> eq/kWh<sup>3)</sup>, gerundet 370 g CO<sub>2</sub> eq/kWh

angesetzt. In den letzten beiden Jahren haben sich insbesondere die CO<sub>2</sub>-Äquivalente für Strom durch die vermehrte Nutzung fossiler Energiequellen leider wieder erhöht.

Bei der Herstellung der RLT-Geräte entstehen CO<sub>2</sub>-Emissionen, die ebenfalls zu berücksichtigen sind. Die Emissionen können entweder auf monetären Werten oder auf Basis von Materialstücklisten, bezogen auf das Materialgewicht, explizit bestimmt werden.

Die grauen CO<sub>2</sub>-Emissionen, die bei der Herstellung und beim Betrieb von Wärmerückgewinnungssystemen (WRG-Systeme) und RLT-Geräten entstehen, werden in mehreren Veröffentlichungen dokumentiert. Dabei wird der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck mit 450 g CO<sub>2</sub> eq/€ (Construction) bis 690 g CO<sub>2</sub> eq/€ (Machinery and equipment, Manuf. Prod. metals) bewertet<sup>4)</sup>. In Carbon footprint decomposition in MRIO models (Multi-Region Input-Output models<sup>5)</sup>) wird für „metal industry“ ein Wert von 470 g CO<sub>2</sub> eq/€ angegeben.

Als Mittelwert für die weiteren Betrachtungen könnte 500 g CO<sub>2</sub> eq/€ ge-

wählt werden. Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen können mit „Real estate activities“ mit 230 g CO<sub>2</sub> eq/€ und „Other service activities“ mit 220 g CO<sub>2</sub> eq/€ angegeben werden<sup>6)</sup>. Im Folgenden werden Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen mit 220 g CO<sub>2</sub> eq/€ berechnet.

Für die Wertschöpfung aller Waren und Dienstleistungen wird in Deutschland ein Emissionswert von 237 g CO<sub>2</sub> eq/€ (2021) angenommen<sup>7)</sup>. Alternativ können über Stücklisten die CO<sub>2</sub>-Emissionen von sämtlichen Bauteilen dezidiert bewertet und der gesamte Fußabdruck der Materialien aufgezeigt werden.

Die verschiedenen Kalkulationen eines Herstellers ergaben Werte basierend auf den verwendeten Materialien und Komponenten von rund 4 bis 5,2 kg CO<sub>2</sub> eq/kg Gerätegewicht.

Nur etwa zwei bis drei Prozent der Emissionen werden durch den Energieeinsatz des Herstellers selbst verursacht, die restlichen Emissionen durch den Bezug der genutzten Materialien und Komponenten. Der Energieeinsatz des Herstellers basiert auf Elektroenergie,

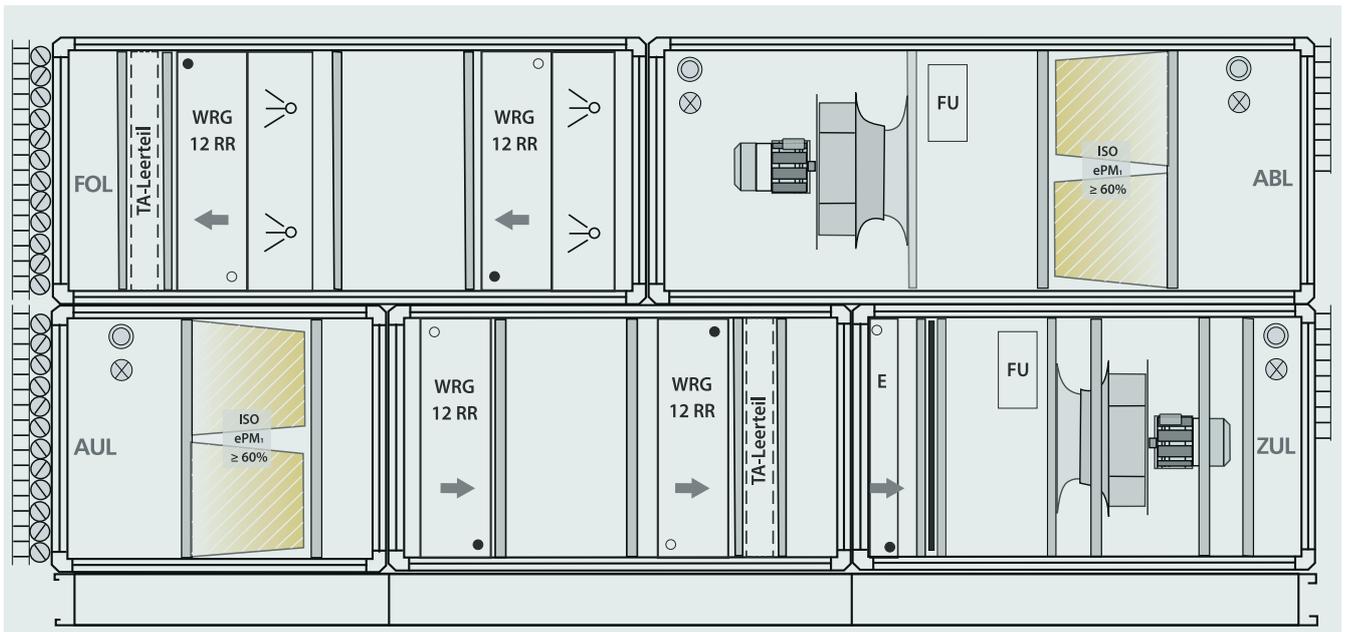


Bild 1: RLT-Gerät mit 12000 m<sup>3</sup>/h Zu- und Abluftvolumenstrom und Kreislaufverbundsystem mit indirekter Verdunstungskühlung. Grafik: Howatherm GmbH

Wärme, Kraftstoffen und Flüssiggas. Der Großteil der CO<sub>2</sub>-Emissionen wird also durch die Materialien „eingekauft“.

Zur Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks ist es deshalb besonders wichtig, im Einkauf möglichst CO<sub>2</sub>-reduzierte Materialien zu beschaffen. So kann beispielsweise durch die Verwendung von recyceltem Aluminium der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck um rund 8,4 kg CO<sub>2</sub> eq/kg Aluminium-Materialgewicht reduziert werden, da die Nutzung von Reinaluminium rund 13,5 kg CO<sub>2</sub> eq/kg Materialgewicht verursacht. Aluminiumprofile haben ein globales Erwärmungspotenzial von etwa 2 kg CO<sub>2</sub> eq/kg, da mehrfach recyceltes Material verwendet wird, das dann noch ein verbleibendes Recyclingpotenzial von 0,3 kg CO<sub>2</sub> eq/kg aufweist<sup>8)</sup>.

Der Herstellungsprozess des Gerätegehäuses verursacht je nach verwendeten

Materialien und Komponenten etwa 50 bis 73 Prozent der Emissionen. Auf Wärmeübertrager und WRG entfallen rund sieben bis 40 Prozent. Und auf Antriebssysteme (Ventilatoren mit Motoren und Frequenzumrichter) etwa sechs bis 14 Prozent, je nach Geräteaufbau.

Um die CO<sub>2</sub>-Reduktion hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit vergleichen zu können, ist die monetäre Bewertung der CO<sub>2</sub>-Emissionen ebenfalls notwendig. In Deutschland wurde 2021 ein CO<sub>2</sub>-Preis von 30 €/t<sup>9)</sup> erhoben. Aktuell liegt der CO<sub>2</sub>-Preis bei 45 €/t.

Als Beispiel wird der Fußabdruck eines RLT-Gerätes mit 12000 m<sup>3</sup>/h Zu- und Abluftvolumenstrom betrachtet. Das Gerät ist mit einer Wärmerückgewinnung als Kreislaufverbundsystem mit einem Temperaturübertragungsgrad von 75 Prozent ausgestattet (Bild 1). Neben der Wärme-

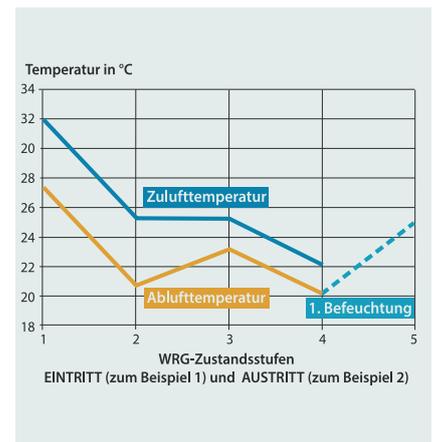


Bild 2: Temperaturverlauf einer zweistufigen Verdunstungskühlung im Beispiel.

Grafik: Howatherm GmbH

## F U B N O T E N

- 1) <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/250403/umfrage/raumwaermebereitstellung-nach-energetraeger-in-deutschen-haushalten/>
- 2) <https://www.kea-bw.de/service/emissions-faktoren/>
- 3) <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energieversorgung/strom-waermeversorgung-in-zahlen#Strommix>
- 4) Mattila, Tuomas; Leskinen, Pekka; Mäenpää, Imo; Seppälä, Jyri: An environmentally extended input-output analysis to support sustainable use of forest resources, Table 3, The Open Forest Science Journal, 2011, 4, pp.: 15–23.
- 5) Wieland, Hanspeter; Giljum, Stefan: Carbon footprint decomposition in MRIO models:

identifying EU-supply chain hot-spots and their structural changes over time, Table 1, Universität Wien, Working Paper Series Nr. 13, 2/2016.

- 6) ebenda
- 7) <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-der-europaeischen-union#emissionen-in-relation-zum-bruttoinlandsprodukt-bip>
- 8) [https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/data/setdetail/process.xhtml?uuid=0cb92770-9007-48c6-bc03-466af8894419&version=00.02.000&stock=OBD\\_2023\\_1&lang=de](https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/data/setdetail/process.xhtml?uuid=0cb92770-9007-48c6-bc03-466af8894419&version=00.02.000&stock=OBD_2023_1&lang=de)
- 9) <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/weniger-co2-emissionen-1790134>

rückgewinnung wurden lediglich noch Filter und Ventilatorsysteme berücksichtigt. Das Gerät wiegt insgesamt rund 4,7 Tonnen.

Die Verdunstungskühlung kühlt von 32 °C auf 22,1 °C ohne mechanische Kältemaschine bei einer Ablufttemperatur von 26 °C mit 60 Prozent relativer Feuchte (Bild 2).

Tabelle 1 zeigt die Nutzung im Jahresverlauf für den mittleren Standort Potsdam. Bei Temperaturen von –13,5 bis 30,5 °C kann die WRG thermische Leistungen von 82,7 KW im Heizfall ▶

AL [°C]	RL [°C]	ETA [%]	WRG [°C]	ZL [°C]	dT [°C]	Q <sub>WRG</sub> [kW]	Q <sub>zus.</sub> [kW]	Q <sub>ext.</sub> [kW]	Status
-13,5	20,0	59,7	6,5	20,5	20,0	82,7	57,9	0,0	V
-12,5	20,0	61,5	7,5	20,5	20,0	82,7	53,7	0,0	V
-11,5	20,0	63,5	8,5	20,5	20,0	82,7	49,6	0,0	V
-10,5	20,0	65,6	9,5	20,5	20,0	82,7	45,5	0,0	V
-9,5	20,0	67,8	10,5	20,5	20,0	82,7	41,3	0,0	V
-8,5	20,0	70,2	11,5	20,5	20,0	82,7	37,2	0,0	V
-7,5	20,0	72,7	12,5	20,5	20,0	82,7	33,1	0,0	V
-6,5	20,0	75,0	13,4	20,5	19,9	82,2	29,5	0,0	
-5,5	20,0	75,0	13,6	20,5	19,1	79,1	28,4	0,0	
-4,5	20,0	75,0	13,9	20,5	18,4	76,0	27,4	0,0	
-3,5	20,0	75,0	14,1	20,5	17,6	72,9	26,4	0,0	
-2,5	20,0	75,0	14,4	20,5	16,9	69,8	25,3	0,0	
-1,5	20,0	75,0	14,6	20,5	16,1	66,7	24,3	0,0	
-0,5	20,0	75,0	14,9	20,5	15,4	63,6	23,3	0,0	
0,5	20,0	75,0	15,1	20,5	14,6	60,5	22,2	0,0	
1,5	20,0	75,0	15,4	20,5	13,9	57,4	21,2	0,0	
2,5	20,0	75,0	15,6	20,5	13,1	54,3	20,2	0,0	
3,5	20,0	75,0	15,9	20,5	12,4	51,2	19,1	0,0	
4,5	20,0	75,0	16,1	20,5	11,6	48,1	18,1	0,0	
5,5	20,0	75,0	16,4	20,5	10,9	45,0	17,1	0,0	
6,5	20,0	75,0	16,6	20,5	10,1	41,9	16,0	0,0	
7,5	20,0	75,0	16,9	20,5	9,4	38,8	15,0	0,0	
8,5	20,0	75,0	17,1	20,5	8,6	35,7	14,0	0,0	
9,5	20,0	75,0	17,4	20,5	7,9	32,6	12,9	0,0	
10,5	20,0	75,0	17,6	20,5	7,1	29,5	11,9	0,0	
11,5	20,0	75,0	17,9	20,5	6,4	26,4	10,9	0,0	
12,5	20,0	75,0	18,1	20,5	5,6	23,3	9,8	0,0	
13,5	20,0	75,0	18,4	20,5	4,9	20,2	8,8	0,0	
14,5	20,0	75,0	18,6	20,5	4,1	17,1	7,8	0,0	
15,5	20,0	75,0	18,9	20,5	3,4	14,0	6,7	0,0	
16,5	20,0	75,0	19,1	20,5	2,6	10,9	5,7	0,0	
17,5	20,0	75,0	19,4	20,5	1,9	7,8	4,7	0,0	
18,5	20,0	75,0	19,6	20,5	1,1	4,7	3,6	0,0	
19,5	20,0	75,0	19,9	20,5	0,4	1,6	2,6	0,0	
20,5	19,7	62,5	20,0	20,0	-0,5	-2,1	0,0	0,0	L S2
21,5	19,7	75,0	20,2	20,0	-1,3	-5,6	-0,6	0,0	S2
22,5	19,7	75,0	20,4	20,0	-2,1	-8,7	-1,7	0,0	S2
23,5	19,7	75,0	20,7	20,0	-2,9	-11,8	-2,7	0,0	S2
24,5	19,7	75,0	20,9	20,0	-3,6	-14,9	-3,7	0,0	S2
25,5	19,7	75,0	21,2	20,0	-4,4	-18,0	-4,8	0,0	S2
26,5	19,7	75,0	21,4	20,0	-5,1	-21,1	-5,8	0,0	S2
27,5	19,7	75,0	21,7	20,0	-5,9	-24,2	-6,8	0,0	S2
28,5	19,7	75,0	21,9	20,0	-6,6	-27,3	-7,9	0,0	S2
29,5	19,7	75,0	22,2	20,0	-7,4	-30,4	-8,9	0,0	S2
30,5	19,7	75,0	22,4	20,0	-8,1	-33,5	-9,9	0,0	S2

Legende: V = Eisschutz / E = Nachheizen / K = Nachkühlen / S = Bef.-Stufe(n) / F = Freie Kälte / B = Brauchwasser / L = Leistungsanpassung / AL = Außenlufttemperatur / RL = Raumlufttemperatur (nach Bef.) / ZL = Zulufttemperatur Simulation unter konstanten Bedingungen nur trocken

Tabelle 1: Luftzustände und Leistungen mit mittlerem Wetterdatensatz Potsdam.

AL	Q <sub>WRG</sub>	Stunden Tag	Stunden Nacht	Wärme gesamt	Kälte gesamt	Wärme WRG	Kälte WRG	Freie Kälte	Brauchwasser	Wasser
[°C]	[kW]	[h/°C]	[h/°C]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[m³]
≤12,5	82,7	14	22	3515		2371				
-12,5	82,7	9	2	1364		855				
-11,5	82,7	5	5	992		689				
-10,5	82,7	7	7	1346		965				
-9,5	82,7	13	21	2914		2233				
-8,5	82,7	15	35	3897		3170				
-7,5	82,7	22	52	5558		4686				
-6,5	82,2	19	40	4352		3754				
-5,5	79,1	31	41	5538		4614				
-4,5	76,0	35	50	6204		5193				
-3,5	72,9	64	95	11061		9283				
-2,5	69,8	95	88	13219		10726				
-1,5	66,7	100	148	15834		13251				
-0,5	63,6	123	183	18619		15582				
0,5	60,5	175	155	20882		16839				
1,5	57,4	111	118	13362		10887				
2,5	54,3	153	110	15475		12290				
3,5	51,2	122	133	13252		10786				
4,5	48,1	131	141	13319		10823				
5,5	45,0	128	173	13299		10950				
6,5	41,9	125	100	10133		8031				
7,5	38,8	98	174	9935		8303				
8,5	35,7	146	196	12102		9877				
9,5	32,6	137	204	10875		8900				
10,5	29,5	132	203	9644		7886				
11,5	26,4	155	230	10044		8140				
12,5	23,3	150	211	8457		6773				
13,5	20,2	184	207	8309		6504				
14,5	17,1	168	197	6609		5119				
15,5	14,0	163	204	5486		4186				
16,5	10,9	127	155	3374		2511				
17,5	7,8	157	154	2902		2025				
18,5	4,7	131	132	1635		1029				
19,5	1,6	136	116	795		341				
20,5	-2,1	116	78		326		353			16
21,5	-5,6	123	49		915		872			16
22,5	-8,7	117	37		1396		1233			14
23,5	-11,8	128	31		2081		1754			15
24,5	-14,9	115	26		2381		1972			14
25,5	-18,0	87	18		2179		1782			10
26,5	-21,1	66	15		1977		1604			8
27,5	-24,2	45	12		1581		1283			5
28,5	-27,3	51	4		1860		1465			6
29,5	-30,4	43	6		1808		1429			5
> 29,5	-33,5	108	2		4731		3663			12
	<b>Meteonorm Potsdam (DWD)</b>	<b>4380</b>	<b>4380</b>	<b>284287</b>	<b>21228</b>	<b>229557</b>	<b>17402</b>			<b>121</b>
						<b>7483 h</b>	<b>1277 h</b>			

Tabelle 2: Leistungen, Summenhäufigkeiten und Arbeiten mit Wasserverbräuchen.

Wirtschaftlichkeitsberechnung der WRG			
Energiekosten Wärme	0,100 €/ kWh	Jährliche Differenzkosten	17 326 €/ a
Energiekosten Kälte	0,150 €/ kWh	Kapitalwert der Ersparnisse	269 918 €
Energiekosten Elektro	0,150 €/ kWh	Kalkulationszinsfuß	43,2 %
Wasserkosten (inklusive Abwasser)	6,00 €/ m <sup>3</sup>		
Kalkulationszinsfuß	5,00 %	Amortisation	2,6 a
Preissteigerungsrate	2,00 %		
Klimazone / Standort	Potsdam_DWD	Jahresnutzungsgrad (bezogen auf Energien)	81,5 %
Nutzungsdauer der Anlage	20 a		
Betriebstage pro Woche	7 d / w	Jahresarbeitszahl nach EN 13053	7,7
Betriebsstunden pro Tag	12 h / d	Leistungszahl nach EN 13053	9,5
Betriebsstunden pro Nacht	12 h / d		
Volumenstrom am Tag	100 % / V max	Effektiver Jahreswirkungsgrad EN 13053	67,1 %
Volumenstrom in der Nacht	50 % / V max		
Investitionskosten der WRG	76 372 €		
Mehr-/Minderinvestition für die WRG	0 € nur WRG		
Minder-Investition für Wärmeerzeugung	-9 924 € / (120 € / kW)		
Minder-Investition für Kälteerzeugung	-12 852 € / (360 € / kW)		
Zusatzkosten je Jahr	0 €		
Rückgewinn der WRG-Wärme	22 956 €/ a		
Rückgewinn der WRG-Kälte	2 896 €/ a		
Jährliche CO <sub>2</sub> -Einsparung	2 415 €/ a / (45 €/ to.)		
Elektroenergiekosten für die WRG	4 844 €/ a		
Wasserkosten (indirekte Verdunstungskühlung)	724 €/ a		
Kapitalkosten für die WRG	4 301 €/ a		
Wartungs- und Unterhaltungskosten	1 072 €/ a		

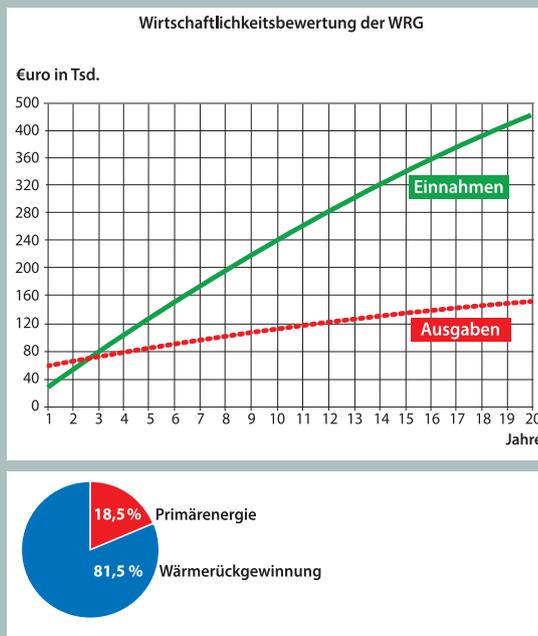


Tabelle 3: Wirtschaftlichkeitsbewertung der WRG für einen Betrieb mit 8660 h/a.

bis - 33,5 KW zum Kühlen zur Verfügung stellen. Im Sommer ab 20,5 °C wird zur Kühlung eine zweistufige Verdunstungskühlung genutzt (Tabelle 1).

Im Vollzeitbetrieb (24 h an sieben Tagen) ergibt sich im Beispiel für die Luft erwärmung ein Bedarf von 284 287 kWh/Jahr. Davon werden 229 557 kWh durch die WRG gedeckt (Tabelle 2).

Der Heizbetrieb wird in 7 483 h/Jahr benötigt. In 1 277 h/a muss gekühlt werden. Der Kühlbedarf (sensible Kühlung ohne Entfeuchtung) von 21 228 kWh/a wird mit 17 402 kWh/a durch die WRG mit Verdunstungskühlung abgedeckt.

Mit der WRG wird das Gerät nach 2,6 Jahren amortisiert, wobei die Investitionskosten des RLT-Gerätes von 76 737 Euro durch die Reduzierung der Wärmeerzeugung mit -9 924 Euro und durch die Verkleinerung der Kälteanlage mit -12 852 Euro deutlich gemindert werden (Tabelle 3). Die WRG kostet im Beispiel 49 410 Euro. Der Kapitalwert der Ersparnisse beträgt unter Berücksichtigung der gesamten Investitionskosten des RLT-Gerätes 269 918 Euro.

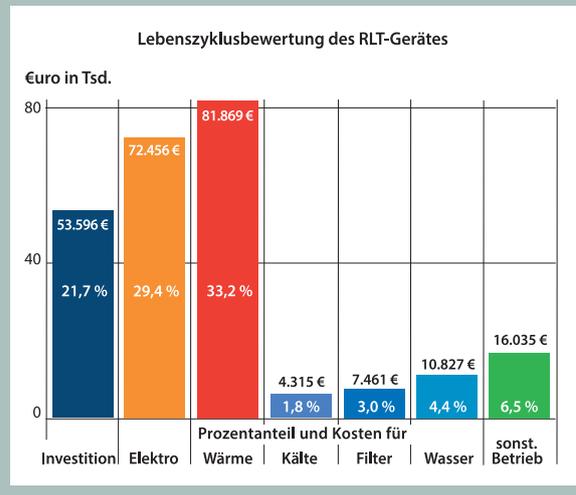
Tabelle 4 zeigt die Berechnung der Lebenszykluskosten. Die Kosten für die Investition, Elektroenergie sowie für Wärme

liegen in etwa auf einem Niveau von rund 26 bis 33 Prozent der Gesamtkosten.

Tabelle 5 bildet die mehrdimensionale monetäre Optimierung der WRG ab. Durch die Reduktion der Luftgeschwindigkeit im RLT-Gerät von 1,6 m/s mit 75 Prozent Übertragungsgrad auf 1,1 m/s mit rund 73 Prozent Übertragungsgrad könnte der Ertrag der WRG von 269 918 Euro auf 319 903 Euro erhöht werden.

Dieses Beispiel zeigt, dass die WRG optimiert werden kann. Eine zu kleine WRG mindert den Ertrag ebenso wie eine zu große WRG.

Lebenszyklusbewertung des RLT-Gerätes			
Energiekosten Wärme	0,100 €/kWh	Elektrische Leistungsaufnahme (Ventilatoren)	6,3 kW
Energiekosten Kälte	0,150 €/kWh	Elektroenergiekosten für das RLT-Gerät	4844 €/a
Energiekosten Elektro	0,150 €/kWh	Filterwechselkosten	499 €/a
Wasserkosten (inklusive Abwasser)	6,00 €/m <sup>3</sup>	Wasserkosten (indirekte Verdunstungskühlung)	724 €/a
Kalkulationszinsfuß	5,00 %	Kapitalkosten für das RLT-Gerät	4301 €/a
Preissteigerungsrate	2,00 %	Wartungs- und Unterhaltungskosten	1072 €/a
Klimazone / Standort	Potsdam_DWD		
Nutzungsdauer der Anlage	20 a	Lebenszykluskosten (inclusive Investition abgezinst) <sup>1)</sup>	246559 € (100 %)
Betriebstage pro Woche	7 d / w		
Betriebsstunden pro Tag	12 h / d	Lebenszykluskosten (nicht abgezinst) <sup>1)</sup>	311590 €
Betriebsstunden pro Nacht	12 h / d		
Volumenstrom am Tag	100 %/V max		
Volumenstrom in der Nacht	50 %/V max		
Investitionskosten des RLT-Gerätes	76372 €		
Minder-Investition für Wärmeerzeugung	-9924 €/(120 €/kW)		
Minder-Investition für Kälterzeugung	-12852 €/(360 €/kW)		
Kosten für Wärme	28429 €/a		
Rückgewinn der WRG-Wärme	-22956 €/a		
Kosten für Kälte	3184 €/a		
Rückgewinn der WRG-Kälte	-2896 €/a		
Rückwärmszahl der WRG (trocken)	75 %		



1) Lebenszykluskosten auf Basis der Elektroenergie-, der Wärme- und Kälte- (ohne Entfeuchtung und Befeuchtung) und der Filterwechselkosten

**Tabelle 4:** Lebenszyklusbewertung des RLT-Gerätes für einen Betrieb mit 8660 h/a.

Wird das RLT-Gerät mit der WRG unter ökologischen Gesichtspunkten optimiert, ergibt sich ein deutlich abweichendes Optimum gegenüber der monetären Optimierung. In diesem Fall würde der optimale Temperaturübertragungsgrad bei rund 86 Prozent liegen (**Tabelle 6**). Die Auslegungsgeschwindigkeit müsste dann bei rund 0,7 m/s liegen. Im ökologischen Optimum könnten statt 59,2 t CO<sub>2</sub> 64,6 t CO<sub>2</sub>-Emissionen eingespart werden. Allerdings würden im ökologischen Optimum monetäre Erträge signifikant reduziert werden.

Meist wird jedoch der monetären Optimierung gefolgt, da die CO<sub>2</sub>-Minderungskosten über den CO<sub>2</sub>-Preis in der monetären Optimierung berücksichtigt werden können. **Tabelle 7** verdeutlicht abschließend den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck des

RLT-Gerätes im gesamten Lebenszyklus. Bei der Herstellung werden 25 394 kg CO<sub>2</sub> eq Emissionen nach DIN EN 15804 erzeugt. Durch das Recycling können am Ende des Lebenszyklus 10 651 kg CO<sub>2</sub> eq zurückgewonnen werden.

Im Vollzeitbetrieb werden während der Lebensdauer von zwanzig Jahren CO<sub>2</sub>-Emissionen von 238 960 kg CO<sub>2</sub> eq für die Elektroenergie und 1 535 140 kg CO<sub>2</sub> eq für die Wärmeenergie anfallen. Durch die WRG kann ein CO<sub>2</sub>-Ausstoß von 1 239 600 kg CO<sub>2</sub> eq eingespart werden, der nicht primärenergetisch für die Wärmeerzeugung erzeugt werden muss. Die CO<sub>2</sub>-Emission bei der Erzeugung von Kälte beträgt 52 360 kg CO<sub>2</sub> eq, wobei die WRG mit Verdunstungskühlung davon 42 920 kg CO<sub>2</sub> eq einsparen kann.

Insgesamt kann durch die WRG und das Material-Recycling der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck während der Lebensphase von 1 852 t CO<sub>2</sub> eq auf 559 t CO<sub>2</sub> eq, also um rund 70 Prozent reduziert werden.

Eine Lüftung über Fenster würde keine Elektroenergie benötigen und auch die grauen CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Herstellung des Gerätes würden entfallen. Allerdings würden dann 1 535 140 kg CO<sub>2</sub>-Emissionen für die Wärmeerzeugung und 52 360 kg CO<sub>2</sub>-Emissionen für die externe Kälterzeugung anfallen. Dies entspricht etwa 2,8 Mal mehr CO<sub>2</sub>-Emissionen als bei der Variante mit Raumlufttechnik und WRG.

Werden die Betriebsstunden reduziert, ändert sich der Fußabdruck entscheidend (**Tabelle 8**). Obwohl der Absolutwert der Nettoemissionen bei 2 490 h/a

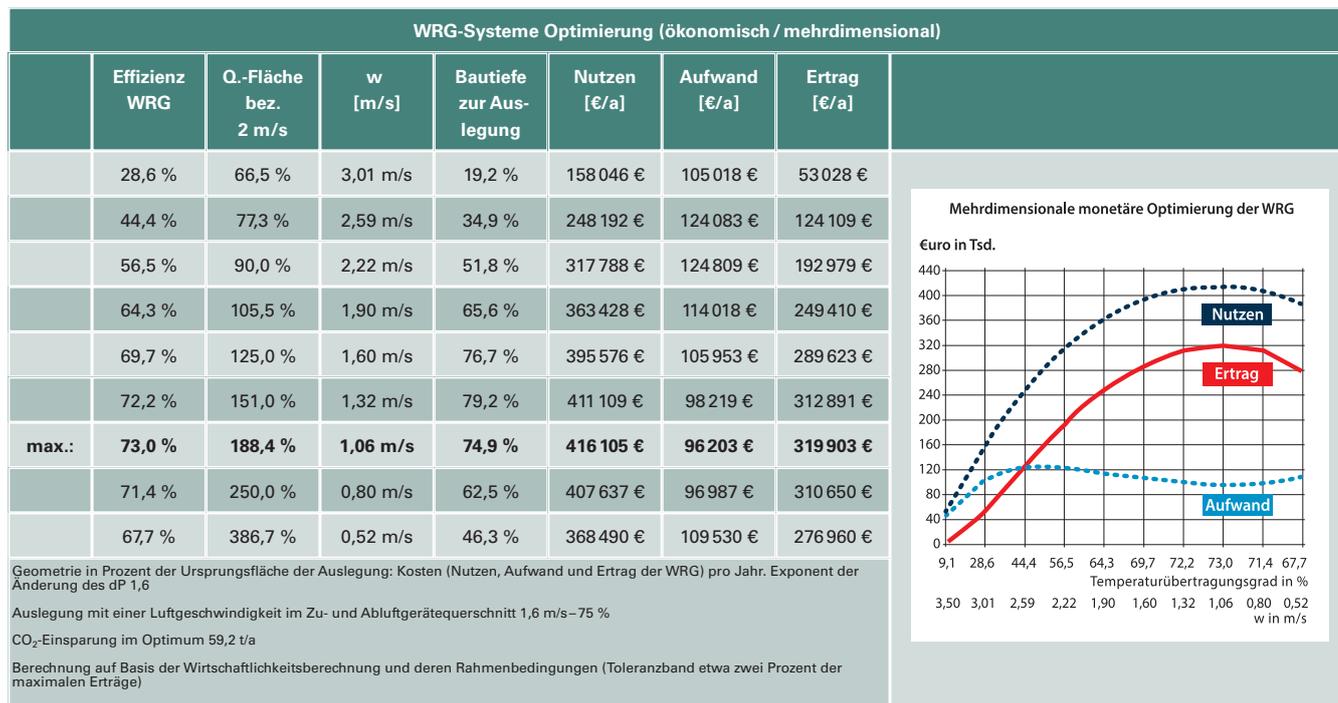


Tabelle 5: Mehrdimensionale monetäre Optimierung der WRG für einen Betrieb mit 8 650 h/a.

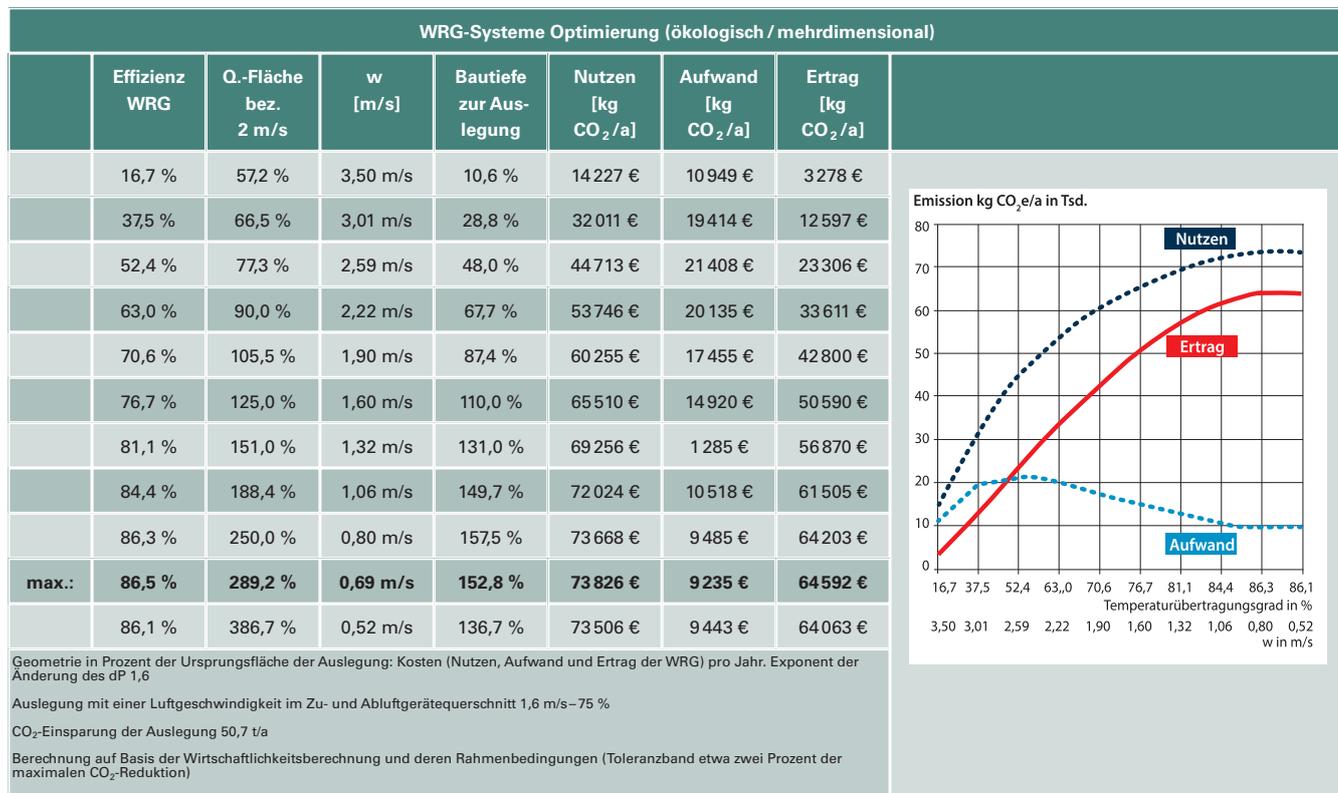


Tabelle 6: Mehrdimensionale ökologische Optimierung der WRG für einen Betrieb mit 8 650 h/a.

gegenüber 8 760 h/a von 559 223 kg CO<sub>2</sub> eq auf 270 323 kg CO<sub>2</sub> eq reduziert wird, steigt der Einfluss der grauen CO<sub>2</sub>-Emissionen relativ von 0,8 Prozent auf 2,2 Prozent. Die WRG hat die Mög-

lichkeit, das Gesamtpotenzial um etwa 60 Prozent zu reduzieren, statt um 70 Prozent im Vollbetrieb. Eine Lüftung über offene Fenster würde 521 200 kg CO<sub>2</sub> eq an Wärmeenergie und 25 260 kg

Kälteenergie verursachen, wenn die gleiche Luftmenge zugrunde gelegt wird. Das ergibt insgesamt 546 460 kg CO<sub>2</sub> eq, genau doppelt so viel wie die Variante mit RLТ.

Herstellungsphase und Recycling		
Graue CO <sub>2</sub> -Emission durch die Herstellung A1-A4 (cradle to shelf)	25 934 kg CO <sub>2</sub> eq	(1,4 %)
Recyclingpotenzial abzüglich Entsorgung am Ende des Lebenszyklus D	-10 651 kg CO <sub>2</sub> eq	(-0,6 %)
Graue CO <sub>2</sub> -Emission (netto)	15 282 kg CO <sub>2</sub> eq	(0,8 %)
Nutzungsphase (Emissionen durch Nutzung B6 gemäß LCC-Berechnung)		
Elektroenergie (0,370 kg/kWh)	238 960 kg CO <sub>2</sub> eq	(12,9 %)
Wärmeenergie (0,270 kg/kWh)	1 535 140 kg CO <sub>2</sub> eq	(82,9 %)
Einsparung Wärme durch WRG (0,270 kg/kWh)	-1 239 600 kg CO <sub>2</sub> eq	(-66,9 %)
Kälteenergie (0,123 kg/kWh)	52 360 kg CO <sub>2</sub> eq	(2,8 %)
Einsparung Kälte durch WRG (0,123 kg/kWh)	-42 920 kg CO <sub>2</sub> eq	(-2,3 %)
<b>Gesamtemissionen</b>	<b>1 852 394 kg CO<sub>2</sub> eq</b>	<b>(100 %)</b>
<b>Gesamtemissionen (netto)</b>	<b>559 223 kg CO<sub>2</sub> eq</b>	<b>(30,2 %)</b>

Berechnungsgrundlage für Nutzungsphase:  
Standort: Potsdam\_DWD (Meteonorm), Laufzeit mit 20 a und 7 d/w bei 12 h/d (tags) mit 100 Prozent und 12 h/d (nachts) mit 50 Prozent des Nennvolumenstroms,  
Laufzeiten: 4 380 h/a (tags) und 4 380 h/a (nachts) mit 7 483 h/a (Heizbetrieb) und 1 277 h/a (Kühlbetrieb)  
Umweltproduktdeklaration (EPD) nach DIN EN 15 804

**Tabelle 7:** Nachhaltigkeitsbewertung im Lebenszyklus für einen Vollzeitbetrieb (8 760 h/a).

Herstellungsphase und Recycling		
Graue CO <sub>2</sub> -Emission durch die Herstellung A1-A4 (cradle to shelf)	25 934 kg CO <sub>2</sub> eq	(3,85 %)
Recyclingpotenzial abzüglich Entsorgung am Ende des Lebenszyklus D	-10 651 kg CO <sub>2</sub> eq	(-1,6 %)
Graue CO <sub>2</sub> -Emission (netto)	15 282 kg CO <sub>2</sub> eq	(2,2 %)
Nutzungsphase (Emissionen durch Nutzung B6 gemäß LCC-Berechnung)		
Elektroenergie (0,370 kg/kWh)	108 580 kg CO <sub>2</sub> eq	(15,9 %)
Wärmeenergie (0,270 kg/kWh)	521 200 kg CO <sub>2</sub> eq	(76,5 %)
Einsparung Wärme durch WRG (0,270 kg/kWh)	-379 840 kg CO <sub>2</sub> eq	(-55,8 %)
Kälteenergie (0,123 kg/kWh)	25 260 kg CO <sub>2</sub> eq	(3,7 %)
Einsparung Kälte durch WRG (0,123 kg/kWh)	-20 160 kg CO <sub>2</sub> eq	(-3,0 %)
<b>Gesamtemissionen</b>	<b>680 974 kg CO<sub>2</sub> eq</b>	<b>(100 %)</b>
<b>Gesamtemissionen (netto)</b>	<b>270 323 kg CO<sub>2</sub> eq</b>	<b>(39,7 %)</b>

Berechnungsgrundlage für Nutzungsphase:  
Standort: Potsdam\_DWD (Meteonorm), Laufzeit mit 20 a und 5 d/w bei 8,75 h/d (tags) mit 100 Prozent und 0,8 h/d (nachts) mit 50 Prozent des Nennvolumenstroms,  
Laufzeiten: 2 281 h/a (tags) und 209 h/a (nachts) mit 1 956 h/a (Heizbetrieb) und 534 h/a (Kühlbetrieb)  
Umweltproduktdeklaration (EPD) nach DIN EN 15 804

**Tabelle 8:** Nachhaltigkeitsbewertung im Lebenszyklus für einen Teilzeitbetrieb (2 490 h/a).

## Fazit

Die Nutzung von Raumluftechnischen Geräten erfordert den Einsatz von Energie, jedoch kann Raumluftechnik im Vergleich zu einer Fensterlüftung etwa zwei- bis dreimal mehr CO<sub>2</sub>-Emissionen einsparen.

Der Bedarf an thermischer Energie ist bei den Energiebedarfen am größten. Eine optimierte Wärmerückgewinnung kann diesen Bedarf jedoch erheblich reduzieren. Der Elektroenergiebedarf ist der zweite

große Verursacher von Treibhausgasen. Der Bedarf an sensibler Kälte liegt ungefähr auf dem Niveau der CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Herstellung des RLT-Geräts. Die grauen Emissionen bei der Herstellung der Geräte sind gering und betragen etwa ein bis drei Prozent je nach Laufzeit der Anlagen. Bei einer Betrachtung der gesamten Anlage sind jedoch auch weitere CO<sub>2</sub>-Emissionen, zum Beispiel für die Herstellung des Kanalnetzes oder der Luftauslässe, zu berücksichtigen. Die Laufzeit der Anlage spielt dabei eine

wichtige Rolle. Je kürzer die Laufzeit, desto geringer ist der Nutzen und der Einfluss der WRG, aber umso geringer sind die Gesamtemissionen. ■



**Prof. Dr.-Ing.  
Dr. rer. pol.  
Christoph Kaup**

ist Honorarprofessor am Umwelt-Campus Birkenfeld und Geschäftsführer der Howatherm Klimatechnik GmbH, Brücken.  
Foto: Nikola Krieger