Ökonomie versus Ökologie

Bewertung der Wärmerückgewinnung mit raumlufttechnischen Geräten in Schulen und vergleichbaren Räumen versus Fensterlüftung

Dieser Beitrag untersucht unter ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten den Nutzen der Wärmerückgewinnung (WRG) in raumlufttechnischen Anlagen (RLT) beim Einsatz in Schulen und entsprechenden Räumen im Vergleich zur Fensterlüftung. Ermittelt werden die ökonomischen und ökologischen Auswirkungen der WRG auf Basis der Rahmenbedingungen wie spezifische Energiepreise, CO_2-Emissionen, Klimadaten und Soll-Temperaturen sowie Laufzeiten. Das Ergebnis ist eindeutig.

TEXT: *Christoph Kaup*

Als Wärmepreis wurde für die Berechnungen ein mittlerer Preis von abgerundet 8 Cent/kWh gewählt. Dieser ergibt sich für den Wärmemix in Deutschland aus 9,1 Cent/kWh für Öl (Anteil: 25 Prozent), 4,5 Cent/kWh für Gas (Anteil: 44,3 Prozent), 10,1 Cent/kWh für Fernwärme (Anteil: 10,2 Prozent), 3,8 Cent/kWh für Pellets (Anteil: 18 Prozent), 24 Cent/kWh für Strom (Anteil: 1,6 Prozent) sowie 8 Cent/kWh für Kohle (Anteil: 0,9 Prozent) [1]. Der Mittelwert liegt somit bei 6,4 Cent/kWh (die Einzelwerte ergeben sich aus den „Daten zur Energiepreisentwicklung“ aus den Mittelwerten 2008 bis 2017 – Destatis 09/2018). Zusätzlich müssen dabei Verteil- und Erzeugungsverluste berücksichtigt werden. Diese liegen nach DIN SPEC 15240 Tabelle 13 [2] (70 °C Vorlauftemperatur) bei 35 Prozent. Unter Beachtung dieser Verteilverluste ergibt sich ein mittlerer Preis für Nutzwärme von 8,7 Cent/kWh. Für Strom in Deutschland wurde ein Mittelwert von 24 Cent/kWh zwischen den Werten für Industriekunden mit 15 Cent/kWh und für private Haushalte mit 33 Cent/kWh gewählt [3]. Für Kälteenergie wurde ein Wert von ebenfalls 8 Cent/kWh verwendet, der sich aus dem ermittelten Strompreis und einer Leistungsziffer von 3 ergibt.

Die Energiepreise unterliegen aktuell einer hohen Volatilität. Daher können sich die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnungen in Abhängigkeit von den tatsächlichen Preisen maßgeblich ändern. Allerdings sind sowohl die Wärmepreise als auch die Strompreise in den vergangenen Monaten stark angestiegen. Es kann aber nicht davon ausgegangen werden, dass diese Preise dauerhaft auf diesem Niveau verharren. Daher wurde das Vorkrisenniveau bei den Berechnungen berücksichtigt.

Zur Berücksichtigung der CO_2-Emissionen bei der Wärmebereitstellung wurde ein mittlerer Wert von gerundet 300 g CO_2eq/kWh gewählt. Dieser ergibt sich ebenfalls aus 315 g CO_2eq/kWh für Öl (25 Prozent Anteil), 202 g CO_2eq/kWh für Gas (44,3 Prozent Anteil), 341 g CO_2eq/kWh für Fernwärme (10,2 Prozent Anteil), rund 30 g CO_2eq/kWh für Pellets (18 Prozent Anteil) sowie 370 g CO_2eq/kWh für Strom (1,6 Prozent) und 429 g CO_2eq/kWh für Kohle (0,9 Prozent) [4]. Daraus resultiert ein Mittelwert von 220 g CO_2eq/kWh [5]. Unter Beachtung der Verteilverluste von 35 Prozent folgt ein Wert von rund 300 g CO_2eq/kWh.

Für Strom in Deutschland wurde der Strommix in 2021 von 366 g CO_2eq/kWh [6], gerundet 370 g CO_2eq/kWh,a angesetzt. In den vergangenen Jahren haben sich insbesondere die CO_2-Äquivalente für Strom deutlich verringert.

Die Werte der grauen CO_2-Emissionen für die Herstellung und den Betrieb von WRG-Systemen und RLT-Geräten ergeben sich aus mehreren Veröffentlichungen. Dabei wird der CO_2-Fußabdruck mit einem Wert von 450 g CO_2eq/€ (*Construction*) bis 690 g CO_2eq/€ (*Machinery and equipment, Manuf. Prod. metals*) bewertet [7]. In *Carbon footprint decomposition in MRIO models* (Multi-Region Input-Output models) [8] wird für *Metal industry* ein Wert von 470 g CO_2eq/€ angegeben.

Als Mittelwert für die weiteren Betrachtungen werden 500 g CO_2eq/€ gewählt. Wartungs- und Instandhaltungs-

maßnahmen können als *Real estate activities* mit 230 g CO_2eq/€ und *Other service activities* mit 220 kg CO_2eq/€ bewertet werden [9]. Im Folgenden werden Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen mit 220 g CO_2eq/€ berechnet.

Insgesamt wird in Deutschland für das Bruttoinlandsprodukt, also die Wertschöpfung sämtlicher Waren und Dienstleistungen, eine Emission von 251 g CO_2eq/€ (2019) [10] aufgewendet.

Um die CO_2-Reduktion hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit vergleichen zu können, ist die monetäre Bewertung der CO_2-Emissionen notwendig. In Deutschland wurde 2021 ein CO_2-Preis von 25 €/t [11] eingeführt. Neben den nationalen CO_2-Abgaben werden ETS-basierte CO_2-Emissionen europäisch gehandelt. Der Europäische Emissionshandel (EU-ETS) ist seit 2005 das zentrale Klimaschutzinstrument der EU. Dabei ist der CO_2-Preis in den vergangenen Jahren deutlich von rund 5 €/t auf rund 25 €/t (Mittelwert 2019) angestiegen [12].

Als Basiszins für die Wirtschaftlichkeitsberechnung wurden gerundet zwei Prozent pro anno (Nominalzins Mittelwert 2009 bis 2017 [13]) berücksichtigt. Die Preissteigerungsrate wurde mit rund zwei Prozent pro anno (Mittelwert 2009 bis 2017 [14]) gewählt.

Auf Basis der DIN 4710 [15] wurde die meteorologische Temperaturverteilung für den betreffenden Aufstellungsort der WRG angewendet. In der DIN 4710 sind zum Beispiel die Stundenverteilungen für mehrere deutsche Städte für 24 Stunden dargestellt. Diese Tabellen liefern auch die Daten für den Tagesbetrieb (6:00 bis 18:00 Uhr). In Abhängigkeit von der Außentemperatur können die Häufigkeitswerte des Auftretens der Luftzustände in Stunden entnommen werden. Nun müssen in einem Jahresgang-Berechnungsverfahren für jeden Außenluftzustand die Zustände der WRG in Abhängigkeit der Sollwerte berechnet werden. Als repräsentativer mittlerer Standort wurde Kassel (Zone 7) gewählt.

Die Betriebszeiten orientieren sich an der Tabelle 5 – Richtwerte der Nutzungsrandbedingungen für Nichtwohngebäude der DIN V 18599-10:2011-08 – und betragen für Schulen sieben Stunden pro Tag und fünf Tage die Woche. Die Lebensdauer wurde mit 15 Jahren konservativ angesetzt.

Die Ablufttemperatur wurde mit 20 °C im Winter und 26 °C im Sommer in Anlehnung an DIN EN 15251 [16] und DIN EN 16798-1 [17] gewählt. Die Zulufttemperatur wurde ganzjährig mit 20 °C angesetzt. Es werden weder interne Lasten noch Transmissionswärmeverluste oder -einträge berücksichtigt. Es handelt sich hierbei um Räume, in denen nur die Lüftungswärmeverluste bilanziert werden. Zudem wurde keine Strahlungswärme (Einträge und Verluste) einbezogen, da diese ebenfalls vom jeweiligen Gebäude abhängig sind.

Folgende Gerätedaten wurden für die Auslegung gewählt:

1. Ein für Klassenräume typischer Zu- und Abluftvolumenstrom mit 1 200 m³/h (Luftwechselrate von 5 für einen exemplarischen Klassenraum mit 240 m³ Raumvolumen). Mit 30 Personen ergibt sich ein Frischluftvolumenstrom pro Person von rund 40 m³/h.
2. Ein WRG-System als Doppelplatten-Wärmeübertrager mit einer Rückwärmzahl von 78,6 Prozent und Druckverlusten von 104 Pa in der Zuluft und 107 Pa in der Abluft.
3. Als Ventilatorsysteme freilaufende Räder mit einer Gesamtleistungsaufnahme 0,294 kW (Ab- und Zuluft) und einem Systemwirkungsgrad von 61 Prozent und einem $SFP_{int.}$ von 413 Ws/m³. Damit wird die ErP-Verordnung EU 1253/2014 für die Stufe 2018 erfüllt.
4. Die Luftgeschwindigkeit im lichten Querschnitt des RLT-Gerätes mit 0,8 m/s, welche der Klasse V1 nach EN 13053 entspricht.
5. Das Gerät mit normenkonformen Filtern der Klasse ISO ePM1 ≥50 % (F7) in der Zuluft und ISO ePM2,5 ≥ 50 % (M6) in der Abluft (+ 30 Pa) zum Schutz der Komponenten.
6. Um die normativ geforderten akustischen Daten im Raum einzuhalten, wurden raumorientierte Schalldämpfer mit einer Einfügungsdämpfung von 27 dB bei 250 Hz in beiden Luftströmen berücksichtigt.
7. Die Gesamtkosten des RLT-Geräts betragen 12 762 Euro. Dabei liegen die Kosten für die WRG bei 2 450 Euro, der reine RLT-Gerätepreis also bei 10 312 Euro.
8. Minderinvestitionskosten für die Wärmeerzeugung von 1 195 Euro bei Einsatz der WRG.

FUßNOTEN

1) https://de.statista.com/statistik/daten/studie/250403/umfrage/raumwaermebereitstellung-nach-energietraeger-in-deutschen-haushalten/
2) DIN SPEC 15240:2018–08 – Entwurf: Energetische Bewertung von Gebäuden – Lüftung von Gebäuden – Energetische Inspektion von Klimaanlagen, Beuth Verlag, Berlin 8/2018.
3) https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/Energiedaten/energiedaten-gesamt-pdf-grafiken.pdf?__blob=publicationFile&v=38, Tabelle 39
4) https://de.statista.com/statistik/daten/studie/250403/umfrage/raumwaermebereitstellung-nach-energietraeger-in-deutschen-haushalten/
5) https://www.kea-bw.de/service/emissionsfaktoren/
6) https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energieversorgung/strom-waermeversorgung-in-zahlen#Strommix
7) Tuomas, M.; Leskinen, P.; Mäenpää, I.; Seppälä, J.: An environmentally extended input-output analysis to support sustainable use of forest resources, Table 3. The Open Forest Science Journal, 4-2011, pp. 15-23.
8) Wieland, H.; Giljum, S.: 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.
9) Ebenda
10) https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-der-europaeischen-union#emissionen-in-relation-zum-bruttoinlandsprodukt-bip
11) https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/weniger-co2-emissionen-1790134
12) https://www.finanzen.net/rohstoffe/co2-emissionsrechte (siehe auch https://www.boerse-online.de/rohstoffe/co2-emissionsrecht)
13) Das Dokument mit dem GZ II A 3 – H 1012-10/07/0001 wird regelmäßig aktualisiert und enthält den vorgeschriebenen Kalkulationszinssatz; (Stand 2018, Veröffentlichungsdatum 14. Mai 2018).
14) https://de.statista.com/statistik/daten/studie/156285/umfrage/entwicklung-der-inflationsrate-in-der-eu-und-der-eurozone/
15) DIN 4710: Statistiken meteorologischer Daten zur Berechnung des Energiebedarfs von heiz- und raumlufttechnischen Anlagen in Deutschland. Beuth Verlag, Berlin 1/2003.
16) DIN EN 15251: Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik, Deutsche Fassung 2012, Tabelle A.2 – Beispiele für empfohlene Auslegungswerte der Innenraumtemperatur für die Auslegung von Gebäuden und RLT-Anlagen. Beuth Verlag, Berlin.
17) DIN EN 16798-1: Energetische Bewertung von Gebäuden – Lüftung von Gebäuden – Teil 1: Eingangsparameter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik – Modul M1–6, Deutsche Fassung 2019, Tabelle B.2.4 Standard-Innentemperaturen für Energieberechnungen, Tabelle B.5 – Temperaturbereiche für die Berechnung der Kühl- und Heizenergie auf stündlicher Basis für vier Kategorien des Innenraumklimas. Beuth Verlag, Berlin.

AL [°C]	RL [°C]	ETA [%]	WRG [°C]	ZL [°C]	dT [°C]	$\dot{Q}_{WRG}$ [kW]	$\dot{Q}_{zus.}$ [kW]	Status
–14,5	20,0	58,0	5,5	20,5	20,0	8,3	6,2	V
–13,5	20,0	59,7	6,5	20,5	20,0	8,3	5,8	V
–12,5	20,0	61,5	7,5	20,5	20,0	8,3	5,4	V
–11,5	20,0	63,5	8,5	20,5	20,0	8,3	5,0	V
–10,5	20,0	65,6	9,5	20,5	20,0	8,3	4,5	V
–9,5	20,0	67,8	10,5	20,5	20,0	8,3	4,1	V
–8,5	20,0	70,2	11,5	20,5	20,0	8,3	3,7	V
–7,5	20,0	72,7	12,5	20,5	20,0	8,3	3,3	V
–6,5	20,0	75,5	13,5	20,5	20,0	8,3	2,9	V
–5,5	20,0	78,4	14,5	20,5	20,0	8,3	2,5	V
–4,5	20,0	78,6	14,8	20,5	19,3	8,0	2,4	
–3,5	20,0	78,6	15,0	20,5	18,5	7,6	2,3	
–2,5	20,0	78,6	15,2	20,5	17,7	7,3	2,2	
–1,5	20,0	78,6	15,4	20,5	16,9	7,0	2,1	
–0,5	20,0	78,6	15,6	20,5	16,1	6,7	2,0	
0,5	20,0	78,6	15,8	20,5	15,3	6,3	1,9	
1,5	20,0	78,6	16,0	20,5	14,5	6,0	1,8	
2,5	20,0	78,6	16,3	20,5	13,8	5,7	1,8	
3,5	20,0	78,6	16,5	20,5	13,0	5,4	1,7	
4,5	20,0	78,6	16,7	20,5	12,2	5,0	1,6	
5,5	20,0	78,6	16,9	20,5	11,4	4,7	1,5	
6,5	20,0	78,6	17,1	20,5	10,6	4,4	1,4	
7,5	20,0	78,6	17,3	20,5	9,8	4,1	1,3	
8,5	20,0	78,6	17,5	20,5	9,0	3,7	1,2	
9,5	20,0	78,6	17,8	20,5	8,3	3,4	1,1	
10,5	20,0	78,6	18,0	20,5	7,5	3,1	1,0	
11,5	20,0	78,6	18,2	20,5	6,7	2,8	1,0	
12,5	20,0	78,6	18,4	20,5	5,9	2,4	0,9	
13,5	20,0	78,6	18,6	20,5	5,1	2,1	0,8	
14,5	20,0	78,6	18,8	20,5	4,3	1,8	0,7	
15,5	20,0	78,6	19,0	20,5	3,5	1,5	0,6	
16,5	20,0	78,6	19,3	20,5	2,8	1,1	0,5	
17,5	20,0	78,6	19,5	20,5	2,0	0,8	0,4	
18,5	20,0	78,6	19,7	20,5	1,2	0,5	0,3	
19,5	20,0	78,6	19,9	20,5	0,4	0,2	0,3	
20,5	20,5	0,0	20,5	0,0	0,0	0,0	0,0	AUS
21,5	21,5	0,0	21,5	21,5	0,0	0,0	–0,6	AUS
22,5	22,5	0,0	22,5	22,5	0,0	0,0	–1,0	AUS
23,5	23,5	0,0	23,5	23,5	0,0	0,0	–1,4	AUS
24,5	24,5	0,0	24,5	24,5	0,0	0,0	–1,9	AUS
25,5	25,5	0,0	25,5	25,5	0,0	0,0	–2,3	AUS
26,5	26,0	78,6	26,1	20,0	–0,4	-0,2	–2,5	
27,5	26,0	78,6	26,3	20,0	–1,2	–0,5	–2,6	
28,5	26,0	78,6	26,5	20,0	–2,0	–0,8	–2,7	
29,5	26,0	78,6	26,7	20,0	–2,8	–1,1	–2,8	

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

Tabelle 1: Funktion der WRG in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur

Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit der WRG

Im ersten Schritt wird eine Wirtschaftlichkeitsberechnung für die WRG durchgeführt. Dabei werden lediglich die Investitionsausgaben der WRG und die Minderinvestitionen für die Wärmebereitstellung einbezogen.

Die Kapitalkosten für das RLT-Gerät, welches die WRG ermöglicht, werden in der Wirtschaftlichkeitsberechnung üblicherweise nicht berücksichtigt („Sowieso-Kosten"). Es wird also ein RLT-Gerät mit und ohne WRG verglichen. Die Minderkosten zur Wärmeerzeugung wurden in Anlehnung an das Gutachten zur Bezifferung der CO_2-Intensität von Wärmerückgewinnungssystemen für Nicht-Wohngebäude berechnet [18].

In **Tabelle 1** wird die Funktion der WRG in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur (AL) dargestellt, die sich aus dem Temperaturübertragungsgrad (ETA) und den Zuständen der WRG (zum Beispiel Zulufttemperatur (ZL), dem Vereisungsschutz (V) oder isothermem Betrieb (AUS)) ergibt.

Hieraus berechnen sich die Leistungen der WRG ($\dot{Q}_{WRG}$) sowie die zusätzlichen Leistungen ($\dot{Q}_{zus.}$) zum Heizen oder Kühlen, die nötig sind oder wären, um die Soll-Zulufttemperatur zu erreichen.

In **Tabelle 2** werden die einzelnen thermischen Arbeiten dargestellt, die sich aus der Multiplikation der Leistungen ($\dot{Q}$) mit ihrer Häufigkeit am Tag und in der Nacht ergeben.

Im Ergebnis werden die benötigten thermischen Arbeiten (gesamt) und der Anteil ersichtlich, den die WRG im Winter (6 222 kWh) erbringen kann. Es wird auch deutlich, dass die WRG im konkreten Anwendungsfall in 1 617 Stunden zur Deckung des Wärmebedarfs (8 308 kWh) zu rund 74 Prozent genutzt werden kann. Dem Ertrag der Wärmerückgewinnung von 6 222 kWh steht ein elektrischer Aufwand zum Betrieb der WRG-Komponenten von 245 kWh gegenüber. Umgerechnet

FUßNOTEN

18) Kaup, C.:Gutachten zur Bezifferung der CO_2-Intensität von Wärmerückgewinnungssystemen (WRG-Systemen) Raumlufttechnischer Geräte (RLT-Geräte) für Nicht-Wohngebäude, FGK, BTGA, RLT, 2020.

19) Primärenergiefaktoren nach EnEV 2014, 1,1 für Wärme (Öl und Gas) und 1,8 für Strom aus nicht erneuerbaren Quellen (siehe auch https://www.energie-lexikon.info/primaerenergiefaktor.html)

AL [°C]	$\dot{Q}_{WRG}$ [kW]	Stunden Tag [h/°C]	Stunden Nacht [h/°C]	Wärme gesamt [kWh]	Kälte gesamt [kWh]	Wärme WRG [kWh]	Kälte WRG [kWh]
≤ 13,5	8,3	3		39		22	
– 13,5	8,3	1		15		9	
– 12,5	8,3	2		27		16	
– 11,5	8,3	3		36		22	
– 10,5	8,3	3		43		28	
– 9,5	8,3	5		65		44	
– 8,5	8,3	6		73		50	
– 7,5	8,3	8		87		62	
– 6,5	8,3	10		107		79	
– 5,5	8,3	13		134		104	
– 4,5	8,0	17		175		136	
– 3,5	7,6	22		216		166	
– 2,5	7,3	27		260		200	
– 1,5	7,0	37		333		256	
– 0,5	6,7	42		363		280	
0,5	6,3	64		532		404	
1,5	6,0	72		566		430	
2,5	5,7	76		562		433	
3,5	5,4	78		547		422	
4,5	5,0	77		510		386	
5,5	4,7	75		468		354	
6,5	4,4	77		448		340	
7,5	4,1	75		404		307	
8,5	3,7	72		359		266	
9,5	3,4	69		311		235	
10,5	3,1	73		297		225	
11,5	2,8	73		268		203	
12,5	2,4	76		252		183	
13,5	2,1	79		229		166	
14,5	1,8	75		187		135	
15,5	1,5	72		151		108	
16,5	1,1	71		121		78	
17,5	0,8	63		75		50	
18,5	0,5	57		45		28	
19,5	0,2	47		19		9	
20,5	0,0	41					
21,5	0,0	36			21		
22,5	0,0	30			30		
23,5	0,0	24			34		
24,5	0,0	20			38		
25,5	0,0	18			41		
26,5	– 0,2	13			36		3
27,5	– 0,5	8			26		4
28,5	– 0,8	7			24		5
> 28,5	– 1,1	11			44		12
Gesamtjahr DIN 4710 7-Kassel		**1826**		**8308**	**287**	**6222**	**23**
						1617 h	**167 h**

Tabelle 2: Energien der WRG

mit Primärenergiefaktoren [19] ergibt sich ein Primärenergienutzen (6 222 kWh • 1,1 - 245 kWh • 1,8) von 6 403 kWh pro Jahr.

In **Tabelle 3** sind die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnung zusammengefasst. Neben den Rahmenbedingungen wie Laufzeiten, Energiepreise, Zinssätze et cetera werden der Kapitalwert der Ersparnisse, in diesem Fall nach 15 Jahren Nutzungsdauer, kalkuliert und die Amortisation als Schnittpunkt der beiden Linien (abgezinste Einnahmen und Ausgaben) dargestellt. Die Amortisation liegt hier bei 2,7 Jahren. Der Kapitalwert der Ersparnisse liegt bei 5 730 Euro. Ebenfalls sind die Kennzahlen auf Basis des Jahresenergievergleiches (zum Beispiel Jahresarbeitszahl der WRG mit 25,5) aufgeführt.

Kann beispielsweise die Minderung der Wärmeversorgung (hier 1 195 Euro) nicht berücksichtigt werden, da eine Minderung eventuell nicht möglich ist, verlängert sich die Amortisationsdauer von 2,7 auf 5,6 Jahre. Die Annuität verringert sich dann von 361 €/a auf 243 €/a.

Aktuell wird jedoch immer häufiger die Frage gestellt, mit welchem optimalen Übertragungsgrad der höchste Ertrag erzielt werden kann. Diese Frage beantwortet die Optimierung der WRG, die im ersten Schritt eindimensional durch die Variierung der Bautiefe [20] und damit bei konstantem Strömungsquerschnitt der Fläche oder NTU der WRG dargestellt wird. **Bild 1** zeigt im konkreten Fall die Ermittlung des eindimensionalen, relationalen Optimums der WRG bei Veränderung der Bautiefe. Jedem Temperaturübertragungsgrad im Bereich zwischen 30 Prozent und 75 Prozent werden der erforderliche Aufwand und der mögliche Nutzen der WRG gegenübergestellt. Der Differenzbetrag stellt den Ertrag (Annuität) pro Jahr dar.

Der höchste Ertrag mit 393 €/a wird in diesem Beispiel mit einem Temperaturübertragungsgrad von 69 Prozent erreicht. Da die Ertragskurve im Bereich des Optimums relativ flach verläuft, kann bei Akzeptanz eines Toleranzbereichs von zum Beispiel ± 1 Prozent der Kosten ein optimaler Bereich des Temperaturübertragungsgrades in diesem Fall von 66 bis 73 Prozent bestimmt werden.

FUßNOTE

20) Kaup, C.: Wirtschaftliche Bewertung und Optimierung von Wärmerückgewinnungssystemen, HLH Bd. 63 (2012), Nr. 6.

Diese Optimierung gilt selbstverständlich nur für die festgelegten Rahmenbedingungen und den gewählten Querschnitt, der im konkreten Fall eine Luftgeschwindigkeit von 0,8 m/s zugrunde liegt. Demzufolge läge in diesem Fall die optimale Bautiefe bei rund 61 Prozent der ursprünglichen Auslegung. Ändern sich zum Beispiel die Laufzeit der WRG oder die Energiekosten, verschiebt sich auch das Optimum der WRG deutlich. Ohne Berücksichtigung der Minderung der Wärmeerzeugung (- 1 195 Euro) verschiebt sich beispielsweise das Optimum von 69 Prozent auf 66 Prozent.

Bild 2 stellt das Ergebnis der relationalen mehrdimensionalen Optimierungsrechnung [21] am konkreten Fall dar. Aus den Ergebnissen wird deutlich, dass es aus monetären Gründen nicht sinnvoll erscheint, den Übertragungsgrad der WRG über rund 70 Prozent zu steigern. Im vorliegenden Fall würde der sinnvolle Übertragungsgrad mit einer Strömungsgeschwindigkeit von 0,69 m/s bei einer Bautiefe von rund 58 Prozent zur ursprünglichen Auslegung erreicht werden. Der Ertrag dieser mehrdimensionalen Optimierungsrechnung würde dann auf 400 €/a gegenüber der ursprünglichen Auslegung (Tabelle 3) mit 361 €/a (plus elf Prozent) steigen. Ohne die mögliche Minimierung der Wärmeversorgung verschiebt sich das mehrdimensional berechnete Optimum kaum noch, allerdings reduziert sich die mögliche Annuität von rund 400 €/a auf etwa 300 €/a.

Neben der Optimierung auf monetärer Basis besteht selbstverständlich auch die Möglichkeit, eine Optimierung auf der Basis von CO_2-Emissionen durchzuführen. Dabei werden sowohl die Aufwände als auch der Nutzen der WRG analog zur beschriebenen monetären Berechnung in CO_2-Äquivalenten bewertet.

Bild 3 zeigt die Ermittlung des eindimensionalen und ebenfalls relational berechneten Optimums der WRG auf der Basis von CO_2-Äquivalenten. Dabei wird dem Nutzen der WRG der Aufwand in CO_2-Äquivalenten gegenübergestellt. Hierbei werden auch die grauen Emissionen berücksichtigt, die zur Herstellung der WRG notwendig sind.

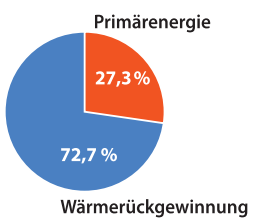
Aus dieser Optimierung ist zu erkennen, dass sich unter diesen Bedingungen das Optimum sehr deutlich von 69 Prozent (monetäre Bewertung) auf jetzt 86 Prozent verschiebt. In diesem Fall wird also bei einer Rückwärmzahl von 86 Prozent das größte Potenzial an CO_2 (hier 1 785 kg/a) zurückgewonnen.

Auch macht dieser Anwendungsfall deutlich, dass die Basis einer Optimierungsrechnung einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis hat. Liegt der Betrachtungsfokus einer WRG auf der möglichen CO_2-Einsparung, wäre unter diesen Voraussetzungen eine WRG mit einem deutlich höheren Temperaturübertragungsgrad (0,86) sinnvoll, während aus rein monetärer Sicht eine kleinere WRG mit niedrigerem Übertragungsgrad (0,69) optimal wäre.

Würde beispielsweise die WRG nach dem monetären Optimum ausgewählt, wäre zwar der ökonomisch höchste Ertrag erreicht, aber es würden unter diesen Rahmenbedingungen „nur“ rund 1,57 Tonnen CO_2-Emissionen pro Jahr vermieden werden, anstatt des maximalen Werts von rund 1,79 Tonnen pro Jahr. Umgekehrt läge bei der Wahl des ökologisch optimalen Systems mit 86 Prozent der monetäre Ertrag nur noch bei rund 355 €/a gegenüber der monetär optimierten WRG mit rund

WIRTSCHAFTLICHKEITSBERECHNUNG

Energiekosten Wärme:	0,08 Euro / kWh
Energiekosten Kälte:	0,08 Euro / kWh
Energiekosten Elektro:	0,24 Euro / kWh
Investitionskosten der WRG:	2 450 Euro
Mehr- / Minderinvestition für die WRG:	0 Euro nur WRG
Minderinvestition für Wärmeerzeugung:	– 1 195 Euro / (144 Euro / kW)
Minderinvestition für Kälteerzeugung:	0 Euro / (0 Euro / kW)
Zusatzkosten je Jahr:	0 Euro
Rückgewinn der WRG Wärme:	498 Euro / a
Rückgewinn der WRG Kälte:	2 Euro / a
Jährliche CO_2-Einsparung:	43 Euro / a / (25 Euro / to)
Elektroenergiekosten für die WRG:	59 Euro / a
Kapitalkosten für die WRG:	98 Euro / a
Wartungs- und Unterhaltungskosten:	25 Euro / a
Jährliche Differenzkosten:	361 Euro / a
Kapitalwert der Ersparnisse:	5 630 Euro
Kalkulationszinsfuß:	39,0 %
Amortisation:	2,7 a
Jahresnutzungsgrad (bezogen auf Energien):	72,7 %
Jahresarbeitszahl nach EN 13053:	25,5
Leistungszahl nach EN 13053:	47,0
Effektiver Jahreswirkungsgrad EN 13053:	76,9 %
Wärmerückgewinnung 72,7 Prozent:	Tortenstück blau
Primärenergie 27,3 Prozent:	Tortenstück rot



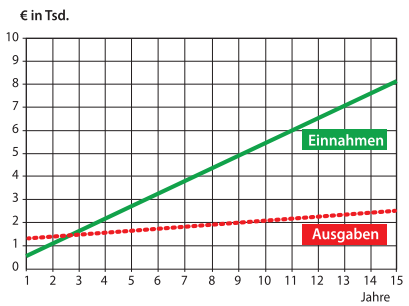


Tabelle 3: Zusammenfassung der Wirtschaftlichkeitsberechnung der WRG bei einer Schullüftung.
Grafiken: Howatherm

FUßNOTE

21) Kaup, C.: Mehrdimensionale und relationale Optimierung der Wärmerückgewinnung (Teil 1), GI Gebäudetechnik in Wissenschaft & Praxis, Recknagel Science, ISSN: 2195–643X Jahrgang 140, Heft 02/19, S. 124-137.

WRG-SYSTEME-Optimierung (ökonomisch / WRG-Anströmfläche konstant)				
Effizienz WRG	Bautiefe zur Auslegung	Nutzen €/a	Aufwand €/a	Ertrag €/a
30,0 %	11,7 %	208,40 €	–3,50 €	211,90 €
35,0 %	14,7 %	243,10 €	–1,20 €	244,30 €
40,0 %	18,2 %	277,80 €	2,50 €	275,30 €
45,0 %	22,3 %	312,40 €	7,90 €	304,50 €
50,0 %	27,2 %	347,00 €	15,60 €	331,40 €
55,0 %	33,3 %	381,60 €	26,30 €	355,30 €
60,0 %	48,8 %	416,00 €	41,10 €	374,90 €
65,0 %	50,6 %	450,40 €	61,90 €	388,50 €
69,0 %	**60,6 %**	**477,80 €**	**84,70 €**	**393,10 €**
70,0 %	63,5 %	484,60 €	91,50 €	393,10 €
75,0 %	81,7 %	518,60 €	135,40 €	383,20 €

Kosten (Nutzen, Aufwand und Ertrag der WRG) pro Jahr.
Auslegung mit einer Luftgeschwindigkeit im Zu- und Abluftgerätequerschnitt 0,80 m/s – 78,6 %.
CO_2-Einsparung im Optimum 1,6 t/a.
Berechnung auf Basis der Wirtschaftlichkeitsberechnung und deren Rahmenbedingungen (Toleranzband ± 1 % der Kosten).

Optimale Rückwärmzahl der WRG - 69 % (66 - 73 %)

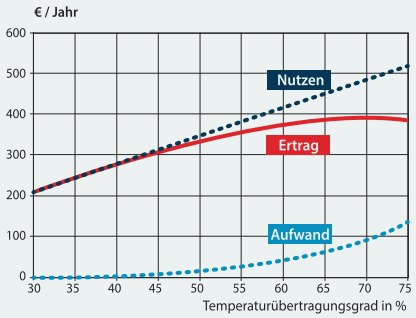


Bild 1: Relationales eindimensionales monetäres Optimum der Wärmerückgewinnung (nur WRG). *Grafik: Howatherm*

WRG-SYSTEME-Optimierung (ökonomisch / mehrdimensional)							
	Effizienz WRG	$\dot{Q}$-Fläche bez. 2 m/s	w in m/s	Bautiefe zur Auslegung	Nutzen €/a	Aufwand €/a	Ertrag €/a
	16,7 %	97,8 %	2,04 m/s	9,6 %	115,90 €	92,90 €	23,10 €
	37,5 %	114,2 %	1,75 m/s	26,1 %	260,80 €	155,40 €	105,40 €
	50,0 %	133,2 %	1,50 m/s	39,7 %	347,60 €	149,10 €	198,50 €
	58,3 %	155,8 %	1,28 m/s	50,6 %	405,40 €	126,30 €	279,20 €
	65,5 %	183,3 %	1,09 m/s	62,3 %	455,20 €	115,40 €	339,80 €
	68,8 %	218,1 %	0,92 m/s	65,0 %	477,40 €	98,60 €	378,80 €
	69,7 %	264,6 %	0,76 m/s	60,5 %	483,90 €	85,90 €	398,00 €
max.	**69,7 %**	**288,1 %**	**0,69 m/s**	**57,5 %**	**483,80 €**	**83,20 €**	**400,60 €**
	69,7 %	331,6 %	0,60 m/s	52,9 %	483,70 €	84,30 €	399,40 €

Geometrie in % der Ursprungsfläche der Auslegung: Kosten (Nutzen, Aufwand und Ertrag der WRG) pro Jahr.
Exponent zur Änderung des dP 1,6.
Auslegung mit einer Luftgeschwindigkeit im Zu- und Abluftgerätequerschnitt 0,80 m/s – 78,6 %.
CO_2-Einsparung im Optimum 1,6 t/a. Berechnung auf Basis der Wirtschaftlichkeitsberechnung und deren Rahmenbedingungen (Toleranzband etwa 2 % der max. Erträge).

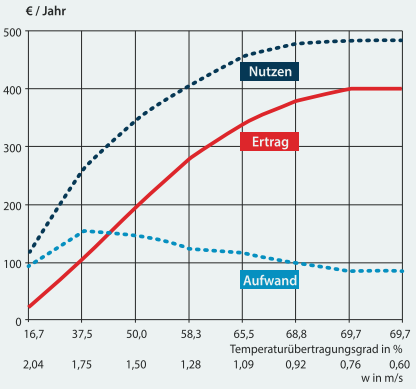


Bild 2: Relationales mehrdimensionales monetäres Optimum der Wärmerückgewinnung (nur WRG). *Grafik: Howatherm*

395 €/a. Die wärmeübertragende Fläche (NTU) müsste im ökologischen Optimum um den Faktor 1,67 gegenüber der Beispielauslegung gesteigert werden.

Auch die mehrdimensionale relationale Optimierungsrechnung lässt sich nicht nur monetär, sondern auch auf Basis von CO_2-Äquivalenten durchführen (**Bild 4**). In diesem Fall könnte bei einer Luftgeschwindigkeit von rund 0,5 m/s eine CO_2-Reduktion von 1 850 kg/a erreicht werden. Hier allerdings mit einer Bautiefe der WRG von etwa 117 Prozent zur ursprünglichen Auslegung. Damit könnte die CO_2-Einsparung von ursprünglich 1,57 t/a auf 1,85 t/a erhöht werden. Eine so niedrige Geschwindigkeit von 0,5 m/s und darunter ist allerdings kritisch zu betrachten, da mit so niedrigen Auslegungsgeschwindigkeiten ein stabiler Wärmeübergang kaum noch gewährleistet werden kann.

Auch beim Einsatz der mehrdimensionalen Optimierung wird die Schwierigkeit ersichtlich, dass letztlich die Entscheidung für eine der beiden Ausgangsbasen zu treffen ist, da das monetäre Optimum nicht mit dem ökologischen Optimum gleichgesetzt werden kann [22].

Berechnungen zum RLT-Komplettgerät

Im zweiten Schritt wird eine Wirtschaftlichkeitsberechnung für die WRG mit Berücksichtigung der Investitionsausgaben für das Komplettgerät durchgeführt. Dabei werden nicht nur die Investitionsausgaben der WRG und Minderinvestitionen für die Wärmebereitstellung einbezogen, sondern auch die Investition für das gesamte RLT-Gerät, welches die WRG ermöglicht. Im betrachteten Fall zusätzlich zur WRG plus 10 312 Euro.

Zudem steht dem unveränderten Ertrag von 6 222 kWh/a der Wärmerückgewinnung jetzt ein elektrischer Aufwand zum Betrieb der kompletten RLT-Anlage von 537 kWh/a gegenüber. Bei Anwendung der Primärenergiefaktoren ergibt sich damit ein Primärenergienutzen von 5 877 kWh pro Jahr (6 222 kWh • 1,1 - 537 kWh • 1,8).

Es wird also die manuelle Fensterlüftung mit der maschinellen Lüftung öko-

FUßNOTE

22) Kaup, C.: Die mehrdimensionale Optimierung von Wärmerückgewinnungssystemen, HLH Bd. 68 (2017), Nr. 7-9.

WRG-SYSTEME-Optimierung (ökologisch/WRG-Anströmfläche konstant)				
Effizienz WRG	**Bautiefe zur Auslegung**	**Nutzen kg CO_2/a**	**Aufwand kg CO_2/a**	**Reduktion kg CO_2/a**
30,0 %	11,7 %	713	4	709
35,0 %	14,7 %	832	7	826
40,0 %	18,2 %	951	10	941
45,0 %	22,3 %	1 070	15	1 055
50,0 %	27,2 %	1 189	21	1 168
55,0 %	33,3 %	1 308	29	1 279
60,0 %	40,8 %	1 427	40	1 386
65,0 %	50,6 %	1 546	55	1 490
70,0 %	63,5 %	1 665	77	1 588
75,0 %	81,7 %	1 783	107	1 676
80,0 %	108,9 %	1 902	155	1 747
85,0 %	154,3 %	2 021	236	1 785
86,0 %	**167,2 %**	**2 045**	**260**	**1 785**
90,0 %	245,0 %	2 140	402	1 738
95,0 %	517,3 %	2 259	905	1 354

CO_2-Emissionen (Einsparung, Aufwand, Nettoertrag der WRG).
CO_{2e}-Äquivalente pro Jahr berechnet mit 300 g/kWh Wärme, 370 g/kWh Strom sowie 500 g/Euro WRG-Invest und sonstige Betriebskosten 220 g/Euro.
Auslegung mit einer Luftgeschwindigkeit im Zu- und Abluftgerätequerschnitt 0,80 m/s – 78,6 %.
Auslegung mit einer CO_2-Einsparung von 1,7 t/a.
Berechnung auf Basis der Wirtschaftlichkeitsberechnung und deren Rahmenbedingungen (Toleranzband ± 1 % der CO_2-Emissionen).

Optimale Rückwärmzahl WRG - 86 % (82 - 88 %)

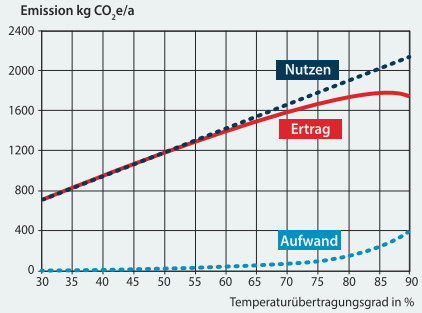


Bild 3: Relationales eindimensionales ökologisches Optimum der Wärmerückgewinnung (nur WRG). *Grafik: Howatherm*

WRG-SYSTEME-Optimierung (ökologisch/mehrdimensional)							
	Effizienz WRG	**$\dot{Q}$-Fläche bez. 2 m/s**	**w in m/s**	**Bautiefe zur Auslegung**	**Nutzen kg CO_2/a**	**Aufwand kg CO_2/a**	**Reduktion kg CO_2/a**
	23,1 %	70,7 %	2,83 m/s	28,9 %	549	416	133
	41,2 %	83,5 %	2,40 m/s	57,1 %	979	572	407
	54,5 %	97,8 %	2,04 m/s	83,5 %	1 297	593	704
	63,0 %	114,2 %	1,75 m/s	101,3 %	1 497	518	979
	70,6 %	133,2 %	1,50 m/s	122,6 %	1 679	458	1 220
	76,7 %	155,8 %	1,28 m/s	144,2 %	1 825	403	1 422
	80,8 %	183,3 %	1,09 m/s	156,0 %	1 921	335	1 586
	83,9 %	218,1 %	0,92 m/s	162,3 %	1 994	284	1 711
	85,9 %	264,6 %	0,76 m/s	156,9 %	2 043	246	1 797
	86,8 %	331,6 %	0,60 m/s	135,5 %	2 065	222	1 843
max.	**87,0 %**	**390,0 %**	**0,51 m/s**	**116,9 %**	**2 069**	**220**	**1 850**
	86,8 %	442,4 %	0,45 m/s	101,5 %	2 065	221	1 845
	85,3 %	688,8 %	0,29 m/s	57,3 %	2 028	246	1 782

Geometrie in % der Ursprungsfläche der Auslegung: CO_{2e} (Nutzen, Aufwand und Reduktion der WRG) pro Jahr.
Exponent zur Änderung des dP 1,6.
Auslegung mit einer Luftgeschwindigkeit im Zu- und Abluftgerätequerschnitt 0,80 m/s – 78,6 %.
Auslegung mit einer CO_2-Einsparung von 1,7 t/a.
Berechnung auf Basis der Wirtschaftlichkeitsberechnung und deren Rahmenbedingungen (Toleranzband etwa 2 % der max. CO_2-Reduktion).

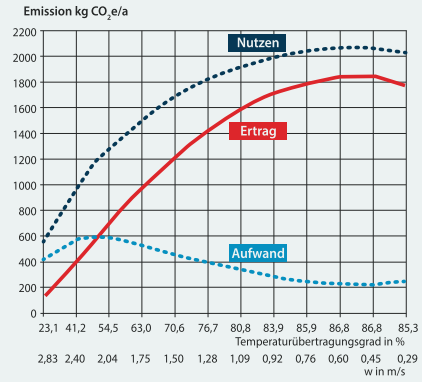


Bild 4: Relationales mehrdimensionales ökologisches Optimum der Wärmerückgewinnung (nur WRG). *Grafik: Howatherm*

nomisch und ökologisch verglichen. Dabei wird deutlich, dass die monetäre Bewertung zu einem negativen Ergebnis führt. Die jährlichen Differenzkosten ergeben eine Annuität von -763 €/a. Die WRG kann die gesamte Anlage erwartungsgemäß nicht refinanzieren. Eine Amortisation im Rahmen der Lebensdauer kann nicht erreicht werden. Aus diesem Grund macht weder die eindimensionale noch mehrdimensionale monetäre Optimierung Sinn, da diese ebenfalls keine positive Annuität liefern. Die Kosten zum Betrieb der Anlage liegen demnach während der Nutzungszeit (15 Jahre) bei 9 036 Euro. Allerdings werden in diesem Fall 1,2 Tonnen CO_2 jährlich eingespart.

Der monetäre Vergleich einer RLT-Anlage mit der Fensterlüftung ist allerdings nicht sinnvoll, da die Luft mit RLT-Anlagen im Gegensatz zur Fensterlüftung aufbereitet, also zumindest gefiltert und temperiert wird, um behagliche Raumluftzustände zu erreichen. Die Fensterlüftung kann systembedingt keine definierten Raumluftbedingungen schaffen, da Untertemperaturen im Winter nicht zu vermeiden sind. Zudem kann nur die kontrollierte Lüftung dauerhaft niedrige CO_2-Partikel- und Aerosolgehalte in der

WRG-SYSTEME-Optimierung (ökologisch/WRG-Anströmfläche konstant)				
Effizienz WRG	Bautiefe zur Auslegung	Nutzen kg CO_2/a	Aufwand kg CO_2/a	Reduktion kg CO_2/a
30,0 %	11,7 %	713	418	296
35,0 %	14,7 %	832	424	409
40,0 %	18,2 %	951	431	520
45,0 %	22,3 %	1 070	440	630
50,0 %	27,2 %	1 189	452	737
55,0 %	33,3 %	1 308	467	841
60,0 %	40,8 %	1 427	486	941
65,0 %	50,6 %	1 546	511	1 034
70,0 %	63,5 %	1 665	547	1 118
75,0 %	81,7 %	1 783	597	1 186
80,0 %	108,9 %	1 902	674	1 228
82,0 %	**124,0 %**	**1 950**	**717**	**1 233**
85,0 %	154,3 %	2 021	805	1 217
90,0 %	245,0 %	2 140	1 068	1 072

CO_2-Emissionen (Einsparung, Aufwand, Nettoertrag der WRG).
CO_{2e}-Äquivalente pro Jahr mit 300 g/kWh Wärme, 370 g/kWh Strom sowie 500 g/Euro WRG-Invest und sonstige Betriebskosten 220 g/Euro.
Auslegung mit einer Luftgeschwindigkeit im Zu- und Abluftgerätequerschnitt 0,80 m/s – 78,6 %.
Auslegung mit einer CO_2-Einsparung von 1,2 t/a.
Berechnung auf Basis der Wirtschaftlichkeitsberechnung und deren Rahmenbedingungen (Toleranzband ± 1 % der CO_2-Emissionen).

Optimale Rückwärmzahl der WRG - 82 % (79 - 84 %)

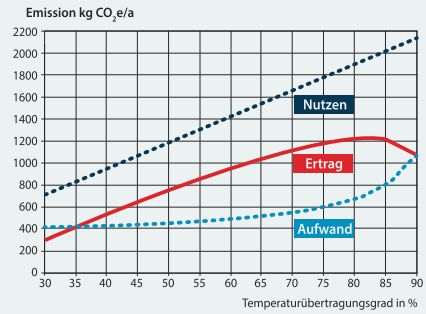


Bild 5: Relationales eindimensionales ökologisches Optimum der Wärmerückgewinnung (RLT-Gerät). *Grafik: Howatherm*

WRG-SYSTEME-Optimierung (ökologsich/mehrdimensional)							
	Effizienz WRG	$\dot{Q}$-Fläche bez. 2 m/s	w in m/s	Bautiefe zur Auslegung	Nutzen kg CO_2/a	Aufwand kg CO_2/a	Ertrag kg CO_2/a
	33,3 %	97,8 %	2,04 m/s	34,8 %	793	944	–152
	47,4 %	114,2 %	1,75 m/s	53,6 %	1 126	1 002	124
	58,3 %	133,2 %	1,50 m/s	71,5 %	1 387	982	405
	66,7 %	155,8 %	1,28 m/s	87,4 %	1 585	922	663
	73,0 %	183,3 %	1,09 m/s	100,3 %	1 735	849	887
	77,8 %	218,1 %	0,92 m/s	109,2 %	1 849	780	1 069
	81,1 %	264,6 %	0,76 m/s	110,6 %	1 929	723	1 206
	83,3 %	331,6 %	0,60 m/s	102,6 %	1 982	690	1 291
max.	**83,9 %**	**414,4 %**	**0,48 m/s**	**85,4 %**	**1 994**	**678**	**1 316**
	83,9 %	442,4 %	0,45 m/s	80,0 %	1 994	679	1 316
	82,1 %	688,8 %	0,29 m/s	45,5 %	1 953	699	1 255

Geometrie in % der Ursprungsfläche der Auslegung. CO_{2e} (Nutzen, Aufwand und Reduktion der WRG) pro Jahr.
Exponent zur Änderung des dP 1,6.
Auslegung mit einer Luftgeschwindigkeit im Zu- und Abluftgerätequerschnitt 0,80 m/s – 78,6 %.
Auslegung mit einer CO_2-Einsparung von 1,2 t/a.
Berechnung auf Basis der Wirtschaftlichkeitsberechnung und deren Rahmenbedingungen (Toleranzband etwa 2 % der max. CO_2-Reduktion)

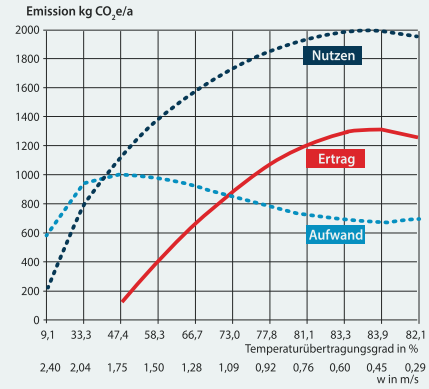


Bild 6: Relationales mehrdimensionales ökologisches Optimum der Wärmerückgewinnung (Komplettgerät). *Grafik: Howatherm*

Raumluft gewährleisten, da die Luftmenge kontrolliert eingebracht wird. Daneben sind RLT-Geräte mit Schalldämpfern ausgestattet und sorgen damit im Vergleich zum geöffneten Fenster für bessere akustische Bedingungen. Des Weiteren könnte mit der RLT das Potenzial der ökologischen Kühlung durch eine indirekte Verdunstungskühlung auf der Abluftseite mit Wasser realisiert werden.

Die trotz hinkendem Vergleich durchgeführte ökologische Optimierung der WRG mit der systembedingt notwendigen RLT ergibt in diesem Fall dagegen ein Optimum von 82 Prozent. Im hier betrachteten Fall wird nun bei einer Rückwärmzahl von 82 Prozent das größte Potenzial an CO_2-Reduktion (hier 1 233 kg/a) trotz zusätzlicher CO_2-Belastung durch die Gesamtanlage realisiert.

Die graue CO_2-Belastung durch das RLT-Gerät beträgt dabei rund 5 160 kg, während die WRG alleine graue CO_2-Emssionen bei der Herstellung von rund 1 230 kg erzeugt. Durch die zusätzliche Belastung, bedingt durch die gesamte Anlage bei veränderter Bilanzgrenze, verschiebt sich das Optimum von 86 Prozent auf jetzt 82 Prozent (nur WRG, vergleiche Bild 3 mit **Bild 5**). Im Auslegungspunkt amorti-

© VDI Fachmedien GmbH & Co. KG, Düsseldorf 2022

siert sich die graue CO_2-Belastung für die Herstellung der Anlage innerhalb von 5,3 Jahren.

Die mehrdimensionale Optimierung zeigt dagegen ein Optimum von rund 84 Prozent bei allerdings 0,5 m/s mit einer Reduktion von 1 316 kg CO_2 pro Jahr (**Bild 6**). Eine so niedrige Geschwindigkeit ist, wie bereits beschrieben, kritisch zu bewerten, da mit so niedrigen Auslegungsgeschwindigkeiten kaum noch stabile Teillastzustände (< 0,5 m/s) mit stabilen Wärmeübertragungsvorgängen gewährleistet werden können.

Fazit

Aus den Berechnungen wird deutlich, dass die WRG eine wirtschaftliche Maßnahme ist, die jedoch wesentlich von den projektspezifischen Rahmenbedingungen und der Bilanzgrenze der Betrachtung abhängig ist.

Der Vergleich zeigt, dass unter monetären Gesichtspunkten die WRG bei Berücksichtigung der gesamten RLT-Gerätekosten systembedingt nicht zu positiven Kapitalwerten führen kann. Jedenfalls nicht bei so geringen Laufzeiten, wie diese in Schulen üblich sind. Dagegen zeigt die Bewertung auf Basis der ökologischen Berechnungen, dass die WRG gegenüber der Fensterlüftung auch in diesem Fall einen signifikanten Beitrag zur CO_2-Reduktion leistet. Die Optimierung auf Basis der CO_2-Bilanz führt zu hohen ökologisch sinnvollen Übertragungsgraden von rund 80 Prozent selbst bei den in Schulen üblichen geringen Laufzeiten von unter 2 000 h/a.

Es muss zudem beachtet werden, dass ein Vergleich von RLT-Anlagen und der Fensterlüftung nicht sinnvoll ist, da die Luft bei RLT-Anlagen im Unterschied zur Fensterlüftung aufbereitet wird, um unbehagliche Raumluftzustände zu vermeiden. Zudem erfolgt die Lüftung mit RLT-Anlagen kontrolliert und gefiltert. Ferner sind RLT-Geräte mit Schalldämpfern ausgestattet und sorgen damit im Vergleich zum geöffneten Fenster für bessere akustische Bedingungen. Des Weiteren kann das Potenzial der ökologischen Kühlung mittels indirekter Verdunstungskühlung auf der Abluftseite mit Wasser genutzt werden, um ökologisch den Komfort auch im Sommer zu steigern.

Letztendlich muss ein Schulträger die Frage beantworten, ob die Fensterlüftung mit negativer CO_2-Bilanz erfolgen darf oder ob eine kontrollierte Raumlufttechnik mit WRG nicht doch die ökologisch bessere Lösung darstellt, die zudem für angenehme Raumkonditionen sorgen kann, die sich positiv auf das Lernen auswirken.

Zusammenfassend muss die Fensterlüftung gegenüber der RLT-Anlage mit WRG als ökologisch negativ bewertet werden. Es macht ökologisch keinen Sinn, dreifach verglaste Fenster zum Lüften dauerhaft auf Kipp stehen zu lassen, um die Wärme buchstäblich aus dem Fenster zu werfen. ■

Prof. Dr.-Ing. Christoph Kaup

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

Ergänzung zum Beitrag „Einfluss der Lüftung auf den CO_2- und den Aerosolpartikelgehalt in Räumen“ (HLH Bd. 72 (2021) Nr. 11-12, S. 18-23)

Als Fachzeitschrift bietet die HLH renommierten Autorinnen und Autoren traditionell ein Forum, um über ihre Forschungsarbeit und aktuelle Projekte zu berichten. Im Fokus steht dabei stets der Mehrwert für den fachlich versierten Leser sowie der wissenschaftliche Diskurs zu aktuellen Themenstellungen. Daher freut es die Redaktion der HLH, dass die Veröffentlichung des Fachartikels von Professor Dr. Christoph Kaup zum Einfluss der Lüftung auf den CO_2- und den Aerosolpartikelgehalt in Räumen eine große Resonanz erfuhr. Im Zuge dessen wurde darauf hingewiesen, dass die auf Seite 20 veröffentlichte Vereinfachung der Gleichung

$$c_{(t)} = c_a + q / (n \cdot V) \cdot (1 - e^{-n \cdot t})$$

akademisch nicht 100 prozentig korrekt sei. Hierzu Professor Dr. Kaup:

„Akademisch richtig ist selbstverständlich die vollständige Form:

$$c_{(t)} = [c_0 - c_a - q / (n \cdot V)] \cdot e^{-n \cdot t} + q / (n \cdot V) + c_a$$

Nur für die betrachteten Fälle mit $c_0 = c_a$, beispielsweise wenn die Startkonzentration CO_2 im Raum der Anfangskonzentration (Außenluft- beziehungsweise Zuluftkonzentration) entspricht, folgt:

$$c_{(t)} = - q / (n \cdot V) \cdot e^{-n \cdot t} + q / (n \cdot V) + c_a$$

beziehungsweise umgeformt folgt die Gleichung wie veröffentlicht:

$$c_{(t)} = c_a + q / (n \cdot V) \cdot (1 - e^{-n \cdot t})$$

Ergo stimmt die Gleichung wie in HLH Bd. 72 (2021) Nr. 11-12 für die dargestellten Fälle mit $c_0 = c_a$.

Es ergeben sich keine Auswirkungen auf die dargestellten Ergebnisse des Artikels, da der unvorbelastete Raum ($c_0 = c_a$) betrachtet wurde.

Bei den CO_2-Berechnungen lag die Ausgangskonzentration bei $c_0 = c_a = 410$ ppm.
Bei den Aerosolbetrachtungen lag $c_0 = c_a = 0$ Aerosolpartikel/m³.“

Mit einem Tool, auf welches Professor Manfred Casties aus Coburg verweist, können die von Professor Kaup dargestellten Fälle verifiziert werden: *https://www.co2-modell.nlga.niedersachsen.de/*

Im thematischen Kontext ebenfalls zur weiteren Information interessant ist die Webseite von Professor Dr.-Ing. habil. Bernd Glück unter: *https://berndglueck.de/lueftung.php*