

HLH

Lüftung/Klima
Heizung/Sanitär
Gebäudetechnik

HOWATHERM 

Mehrdimensional optimierte
Wärmerückgewinnung
im Kontext ökonomischer und
ökologischer Zielsetzungen

SYSTEM HPWRG
by HOWATHERM®

Die mehrdimensionale Optimierung von Wärmerückgewinnungssystemen

Teil 1 und 2

Die mehrdimensionale Optimierung von Wärmerückgewinnungssystemen

Im Kontext ökonomischer und ökologischer Zielsetzungen - Teil 1

Wärmerückgewinnung ist eine wichtige Effizienzmaßnahme in der Gebäudetechnik. Es ist grundsätzlich positiv zu bewerten, dass die Ökodesignverordnung einen Rahmen für die verpflichtende Nutzung dieser Technologie geschaffen hat. Das belegen auch die begleitenden Studien, welche die WRG grundsätzlich als eine sehr wirtschaftliche Maßnahme im volkswirtschaftlichen Kontext bestätigt haben. Auch unter betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten ist die WRG sehr positiv zu bewerten. Im Einzelfall können sich aber auch negative Ergebnisse zeigen, auch wenn statistisch gesehen die Summe der Einzelfälle volkswirtschaftlich immer noch zu einem positiven Ergebnis führt.

Die Güte eines Wärmerückgewinnungssystems (WRS) wird maßgeblich durch den Temperaturänderungsgrad, auch Rückwärmzahl (Φ) genannt, bestimmt. Der Temperaturübertragungsgrad gibt das Verhältnis der möglichen Temperaturänderung einer WRG-Einrichtung zur maximal möglichen Temperaturänderung, also dem Temperaturpotenzial zwischen Außen- und Fortluft, an. Er stellt somit einen thermischen „Übertragungsgrad“ dar.

Effizienz der Wärmerückgewinnung (WRG)

Die maximal mögliche Leistung wird durch das Temperaturpotenzial als die Temperaturdifferenz zwischen Abluft (ϑ_1') und Außenluft (ϑ_2') gebildet.

Damit ergibt sich ohne Änderung der Feuchte (trockener Betrieb) und der Zu-

lufttemperatur (ϑ_2'') der Temperaturänderungsgrad mit:

$$\Phi_t = (\vartheta_2'' - \vartheta_2') / (\vartheta_1' - \vartheta_2')$$

Neben dem Temperaturänderungsgrad wird die Effizienz der WRG auch durch die Druckverluste auf den Medienseiten bestimmt. Deshalb spielen die medienseitigen Widerstände der WRG eine große Rolle.

Bewertung der elektrischen Hilfsenergien

Die Druckverluste der WRG bestimmen die Hilfsenergien, die zum Betrieb einer WRG zwingend notwendig sind. Diese Hilfsenergien werden im Wesentlichen durch die elektrischen Antriebe (wie Ventilatoren und weitere Verbraucher, z. B. Pumpen) bestimmt. Die erforderlichen elektrischen Leistungen errechnen sich dabei aus:

$$P_{el} = \dot{V} \cdot \Delta p_{WRG} \cdot 1 / \eta + P_{aux}$$

mit:

P_{el} elektrische Leistung zum Betrieb der WRG [kW]

\dot{V} Volumenstrom bei Normdichte [m^3/s]

Δp_{WRG} Differenzdruck der WRG [Pa]
 η Gesamtwirkungsgrad des Antriebs (z. B. Ventilatoren) [./.]

P_{aux} weitere benötigte elektrische Hilfsleistung [kW]

Hierauf greift die aktuelle Fassung der DIN EN 13053¹⁾ zurück.

In der Verordnung EU 1253/2014²⁾ fließt dagegen der elektrische Aufwand zur Bewertung der WRG in den SFP_{int} Wert (specific fan power der Lüftungskomponenten) ein.

Dieser Wert berechnet sich aus:

$$SFP_{int} = P_{el} / \dot{V} = \Delta p_{int} / \eta$$

mit:

P_{el} elektrische Leistung für die Lüftungskomponenten [kW]

Δp_{int} Differenzdruck der Lüftungskomponenten (WRG, Filter, Gehäuse) [Pa]

Gesetzliche Anforderungen an die Wärmerückgewinnung gemäß EU 1253/2014

Am 07. Juli 2014 verabschiedete die Europäische Kommission die Verordnung EU Nr. 1253/2014, die die Durchführung der Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG³⁾ regelt. Diese Richtlinie bestimmt die Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Lüftungsgeräten. Nach dieser müssen seit dem 01. Januar 2016 die spezifischen Ökodesign-Anforderungen der Verordnung in Anhang III Nummer 1 und ab dem 01. Januar 2018 die in Anhang III Nummer 2 erfüllt werden.

Als wichtigster Umweltparameter wurde der Energieverbrauch während der

Autor



Prof. Dr.-Ing. Christoph Kaup, Honorarprofessor am Umwelt-Campus Birkenfeld, Hochschule Trier, für Energieeffizienz und Wärmerückgewinnung. Geschäftsführender Gesellschafter von HOWATHERM Klimatechnik GmbH. Vorsitzender des Vorstands Fachverband Gebäude Klima (FGK e. V.). Mitglied in verschiedenen Normungsgremien wie zum Beispiel EN 16798, EN 308, EN 13053 und EN 1886 sowie in verschiedenen Richtlinienausschüssen wie VDI 6022 und VDI 3803. Vorsitzender im VDI Richtlinien-ausschuss der VDI 3803.

¹⁾ DIN EN 13053: Lüftung von Gebäuden – Zentrale raumluftechnische Geräte – Leistungskenndaten für Geräte, Komponenten und Baueinheiten; Deutsche Fassung EN 13053:2012–02.

²⁾ Verordnung (EU) Nr. 1253/2014 der Kommission vom 7. Juli 2014 zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich der Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Lüftungsanlagen. Veröffentlicht am 25.11.2014.

³⁾ Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Oktober 2009 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchrelevanter Produkte. Veröffentlicht am 31.10.2009.

Nutzungsphase der Geräte festgestellt. Bereits im Juli 2012 hat die Europäische Kommission die Ergebnisse ihrer vorbereitenden Studie zur Abschätzung des Energiebedarfs und des Energieeinsparpotenzials von raumlüftungstechnischen Geräten (RLT-Geräte) veröffentlicht⁴.

Spezifische Anforderungen an RLT-Geräte für Nichtwohnraumlüftungsgeräte

Die spezifischen Anforderungen an Nichtwohnraumlüftungsgeräte betreffen im Wesentlichen die Festlegung der minimalen thermischen Übertragungsgrade der Wärmerückgewinnungssysteme, aber auch die maximale elektrische Leistungsaufnahme der verwendeten Ventilatoren.

Ab dem 01. Januar 2016 gelten gemäß Artikel 3 Absatz 2 und 4 zusammenfassend und sinngemäß die Anforderungen aus Anhang III:

□ Alle bidirektionalen Lüftungsgeräte (kombinierte Geräte mit Zu- und Fortluft) müssen über ein WRS und einen thermischen Bypass verfügen.

□ Der Mindestübertragungsgrad η_t aller WRS (außer Kreislaufverbundsystemen) muss 67 % und der Effizienzbonus $E = (\eta_t - 0,67) \cdot 3000$ betragen, wenn der Übertragungsgrad η_t mehr als 67 % beträgt.

□ Der Mindestübertragungsgrad η_t von Kreislaufverbundsystemen (KVS) muss 63 % und der Effizienzbonus $E = (\eta_t - 0,63) \cdot 3000$ betragen, wenn der Übertragungsgrad η_t mehr als 67 % beträgt.

□ Die maximale interne spezifische Ventilatorleistung von Lüftungsgeräten (SFP_{int}) in $W/(m^3/s)$ beträgt:

- für ein bidirektionales Lüftungsgerät mit WRS (außer KVS)
 - $1\,200 + E - 300 \cdot q_{nom}/2 - F$, wenn $q_{nom} < 2\,m^3/s$ und
 - $900 + E - F$, wenn $q_{nom} \geq 2\,m^3/s$
- für ein bidirektionales Lüftungsgerät mit KVS
 - $1\,700 + E - 300 \cdot q_{nom}/2 - F$, wenn $q_{nom} < 2\,m^3/s$ und
 - $1\,400 + E - F$, wenn $q_{nom} \geq 2\,m^3/s$

Ab dem 01. Januar 2018 gilt dann zusammenfassend und sinngemäß über die Anforderungen des Jahres 2016 hinaus:

□ Der Mindestübertragungsgrad η_t aller WRS (außer KVS) muss 73 % und der Effizienzbonus $E = (\eta_t - 0,73) \cdot 3000$ betragen, wenn der Übertragungsgrad η_t mehr als 73 % beträgt.

□ Der Mindestübertragungsgrad η_t von KVS muss 68 % und der Effizienzbonus $E = (\eta_t - 0,68) \cdot 3000$ betragen, wenn der Übertragungsgrad η_t mehr als 68 % beträgt.

□ Die maximale interne spezifische Ventilatorleistung von Lüftungsgeräten (SFP_{int}) in $W/(m^3/s)$ beträgt:

- für ein bidirektionales Lüftungsgerät mit WRS (außer KVS)
 - $1\,100 + E - 300 \cdot q_{nom}/2 - F$, wenn $q_{nom} < 2\,m^3/s$ und
 - $800 + E - F$, wenn $q_{nom} \geq 2\,m^3/s$
- für ein bidirektionales Lüftungsgerät mit KVS
 - $1\,600 + E - 300 \cdot q_{nom}/2 - F$, wenn $q_{nom} < 2\,m^3/s$ und
 - $1\,300 + E - F$, wenn $q_{nom} \geq 2\,m^3/s$

Anforderungen ab 2020 an RLT-Geräte für Nichtwohnraumlüftungsgeräte

Ab Januar 2020 werden die Referenzwerte aus EU1253/2014 für Spannung sorgen. Denn dann wird laut Artikel 8 die Kommission die Verordnung überprüfen und sie kann und wird für Nichtwohnraumlüftungsgeräte schärfere Anforderungen festlegen, die eventuell mit niedrigeren Messtoleranzen verbunden sein werden. Diese schärferen Anforderungen sollen sich an den Referenzwerten der heutigen Verordnung orientieren. Somit würde der SFP_{int} 150 $W/m^3/s$ unter dem Grenzwert des Jahres 2018 bei einem Volumenstrom unter $2\,m^3/s$ liegen und sogar $250\,W/m^3/s$ unter dem Grenzwert für Geräte mit einem Luftvolumenstrom über $2\,m^3/s$.

Für WRG-Systeme wird dann ein Übertragungsgrad von mindestens 85 % mit Ausnahme des KVS gefordert, das mindestens 80 % einhalten muss. Diese Referenzwerte können für alle Systeme und ihre Hersteller ein technisches und ökonomisches Problem darstellen, das im Vorfeld wissenschaftlich untersucht werden soll.

Beurteilung der Entwicklung der WRG unter ökonomischen Gesichtspunkten

Die WRG hat sich in Deutschland sicherlich sehr positiv entwickelt. Ihr Einsatz zählt zu den wirtschaftlichsten Maßnahmen von Energieeffizienzsystemen. Daher erschien es in der Tat geboten, die WRG verpflichtend festzuschreiben. Diese Festlegung ist nun mit der EU-Verordnung EU 1253/2014 erfolgt. Sie erhält in jedem Mitgliedsstaat

der europäischen Gemeinschaft Rechtskraft und bedarf zu ihrer Umsetzung keines weiteren nationalen Rechtsaktes. Grundsätzlich ist die Einführung der Verordnung zu begrüßen. Dies zeigt auch die Entwicklung der Effizienzkriterien, die sich aus den begleitenden Studien ergeben hat. Wobei auch festgestellt werden muss, dass die Verordnung erst mit Gültigkeit der zweiten Stufe ab 2018 volkswirtschaftlich und statistisch gesehen eine signifikante Verbesserung (min. 73 %) erwirken wird, da bereits seit 2011 in Deutschland ein mittlerer Temperaturübertragungsgrad von 68 % und damit dem Niveau der ersten Stufe entsprechend statistisch erreicht wurde⁵.

Trotzdem stellt sich immer häufiger die Frage, ob die generellen Mindestanforderungen auch in allen Einzelfällen sinnvoll sind und zu positiven Ergebnissen führen. Die Grundidee der Verordnung basiert auf dem grundsätzlichen politischen Willen, Energie und CO_2 -Emissionen einzusparen. Jedenfalls darf sie nicht dazu führen, dass es in den jeweiligen Einzelfällen zur Verschwendung von Energie und Ressourcen kommen kann. Aus diesem Grund soll eine Verordnung nicht nur aus volkswirtschaftlicher und statistischer Sicht, sondern auch aus betriebswirtschaftlichen Erwägungen eine optimale Wirtschaftlichkeit in jedem Einzelfall gewährleisten. Denn ein statistisch gutes Ergebnis führt nicht zwangsläufig in jedem Einzelfall zu einem betriebswirtschaftlichen Optimum. Jedoch ergibt die Summe der betriebswirtschaftlichen Optima in jedem Einzelfall zwingend ein volkswirtschaftliches Optimum.

Das ökonomische Optimum der WRG auf Basis der Jahresenergiebetrachtung

Um WRG-Systeme im Einzelfall wirtschaftlich bewerten zu können, müssen die Erträge, welche durch die WRG erzielt werden, den Aufwendungen gegenübergestellt werden. Dazu werden insbesondere die Hilfsenergien in Form von elektrischer Energie und weitere Kosten (auch Kapitalkosten) für den Betrieb der Systeme im Verhältnis zum

⁴ Sustainable Industrial Policy – Building on the Ecodesign Directive – Energy-Using Product Group Analysis/2 – Lot 6: Air-conditioning and ventilation systems ENTR / 2009/ 035/ LOT6 – executive summary 14.06.2012.

⁵ Kaup, C., Studie zur Entwicklung des Energiebedarfs in RLT-Anlagen, UCB 2015.

erhaltenen Nutzen in Form von thermischen Energien bewertet.

Dabei kann neben den gesetzlichen Forderungen auch mit Hilfe einer Jahressimulation die Effizienz der WRG im individuellen Projekt aussagekräftig betriebswirtschaftlich dargestellt und optimiert werden.

Letztlich muss eine Wirtschaftlichkeitsberechnung auf Jahrestemperaturverlaufswerten die entscheidenden Kennwerte liefern, die zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit der WRG in jedem Einzelfall herangezogen werden müssen.

Hier bietet es sich an, z. B. auf Basis der in DIN 4710⁶⁾ oder VDI 4710⁷⁾ vorliegenden meteorologischen Temperaturverteilung für den betreffenden Aufstellungsort der WRG die Jahresenergieberechnungen durchzuführen. In der DIN 4710 sind z. B. 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 in °C können die Häufigkeitswerte des Auftretens der Luftzustände je Stunde entnommen werden. Dann müssen in einem Jahresgang-Berechnungsverfahren für jeden Außenluftzustand die Zustände der WRG und der Sollwerte berechnet werden.

Nach der Auslegung einer beliebigen WRG kann unter den gegebenen projektspezifischen Rahmenbedingungen relational ein diskretes betriebswirtschaftliches Optimum für die Effizienz gefunden werden.

Diese Berechnung basiert auf einer eindimensionalen Optimierung, bei welcher der Querschnitt der WRG als konstant angenommen wird und die Bautiefe der WRG als einzige Variable (Freiheitsgrad) zur Optimierung genutzt wird. Mit konstantem Querschnitt kann die folgende Optimierungsrechnung mit konstanten Reynoldzahlen und somit mit konstantem Wärmedurchgangskoeffizienten (k-Zahl) erfolgen.

Dabei wird die ausgelegte WRG mit ihrer Rückwärmzahl (Φ) in eine korrespondierende dimensionslose Wärmeübertragerkennzahl NTU (Number of Transfer Units) umgewandelt. Diese Kennzahl wird definiert als:

$$NTU = (k \cdot A) / \dot{W}$$

Ebenfalls muss das Wärmestromkapazitätenverhältnis (μ) aus Zu- und Abluft bestimmt werden:

$$\mu = \dot{W}_1 / \dot{W}_2$$

wobei:

k Wärmedurchgangskoeffizient [W/m² K]

A wärmeübertragende Fläche [m²]

\dot{W} Wärmekapazitätsstrom mit

$$\dot{W} = \dot{m} \cdot C_{pL} [W / K]$$

\dot{m} Luftmassenstrom [kg / s]

Die Kennzahl NTU ist somit bei konstanter k-Zahl und konstantem Massenstrom der Luft (\dot{W}) proportional zur Fläche der WRG und repräsentiert somit die Fläche, die sich bei konstanter Querschnittsfläche linear zur Bautiefe des Wärmeübertragers verhält. Sie errechnet sich im Gegenstrom aus:

$$NTU = 1 / (1 - \mu) \cdot \ln ((1 - \mu \cdot \Phi) / (1 - \Phi))$$

bzw. bei $\mu = 1$ aus:

$$NTU = \Phi / (1 - \Phi)$$

Unter der Voraussetzung, dass sich Aufwendungen und Erträge der WRG entweder proportional zur Fläche (damit zum NTU) oder zur Rückwärmzahl (Φ) verhalten, kann durch diskrete Berechnung das Optimum der WRG gefunden werden.

Dabei wird aus den einzelnen NTU_i des zu untersuchenden Bereichs der korrespondierende Temperaturübertragungsgrad (F_i) bestimmt:

$$\Phi_i = (1 - e^{[(\mu-1) \cdot NTU_i]}) / (1 - \mu \cdot e^{[(\mu-1) \cdot NTU_i]})$$

bzw. bei $\mu = 1$ aus:

$$\Phi = NTU / (NTU + 1)$$

Zu den einzelnen Werten werden dann sowohl der jeweilige Aufwand als auch der Nutzen bestimmt. Dabei muss zwischen NTU- und Φ -abhängigen Kosten und Erträgen unterschieden werden:

- Direkt NTU-abhängig
 - Kosten der WRG
 - Kapitalkosten
 - Wartungs- und Unterhaltungskosten
 - Druckabfall der Wärmerückgewinnung
- Direkt Φ -abhängig
 - Wärmeertrag (Nutzen)
 - Wärme
 - Kälte

- Mehrfachfunktionale Nutzung der WRG (z. B. Freie Kälte)
- Minderinvestition der WRG
 - Verringerung der Wärmeerzeugung und -verteilung
 - Verringerung der Kälteerzeugung und -verteilung

Jeder Rückwärmzahl (Φ) wird eindeutig sowohl der Aufwand als auch der Nutzen zugeordnet. Der Ertrag für jede Rückwärmzahl ergibt sich nun aus der Differenz zwischen dem Nutzen und dem entsprechenden Aufwand. Der höchste Ertrag bestimmt dann das eindimensionale Optimum der WRG. Damit liegt fest, welcher Temperaturübertragungsgrad der optimale unter den gegebenen Bedingungen ist. Unter den gegebenen Rahmenbedingungen würde somit eine WRG mit geringerer, aber auch mit höherer Rückwärmzahl einen geringeren Ertrag erwirtschaften⁸⁾.

Wirtschaftlichkeitsberechnungen am Beispiel

Im Folgenden werden beispielhafte Wirtschaftlichkeitsberechnungen nach den beschriebenen Verfahren dargestellt. Anhand weniger charakteristischer Daten kann die Berechnung im Einzelfall erfolgen.

Neben den WRG-Funktionen, den Sollwerten im Heiz- und Kühlbetrieb, den spezifischen Energiekosten etc. müssen das Lastprofil der WRG und ihr Standort definiert werden. Diese Faktoren bilden den Rahmen zur jeweiligen Optimierung im Einzelfall. Aus diesem Lastprofil (Nutzung) errechnen sich die Laufzeiten der WRG.

Auf der ersten Ergebnisseite (**Tabelle 1**) wird die Funktion der WRG in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur dargestellt, die sich aus dem Temperaturübertragungsgrad und den Zuständen der WRG (z. B. Vereisungsschutz oder mehrstufige Verdunstungskühlung) ergibt.

In **Tabelle 2** werden die einzelnen thermischen Arbeiten dargestellt, die sich aus der Multiplikation der Leistungen mit ihrer Häufigkeit ergeben. Auch der Wasserverbrauch einer indirekten Verdunstungskühlung wird aufgezeigt.

⁶⁾ DIN 4710: Statistiken meteorologischer Daten zur Berechnung des Energiebedarfs von heiz- und raumlufttechnischen Anlagen in Deutschland: 2003–01.

⁷⁾ VDI 4710 Blatt 1: Meteorologische Grundlagen für die Technische Gebäudeausrüstung, 2013–03.

⁸⁾ Kaup, C., Wirtschaftliche Bewertung und Optimierung von Wärmerückgewinnungssystemen, Springer-VDI Verlag, HLH 06/2012, S. 17-22.

AL °C	RL °C	ETA %	WRG °C	ZL °C	dT °C	Q WRG kW	Q zus. kW	Q ext. kW	Status
-11,5	20,0	63,5	8,5	22,0	20,0	68,9	46,5	0,0	V
-10,5	20,0	65,6	9,5	22,0	20,0	68,9	43,1	0,0	V
-9,5	20,0	67,8	10,5	22,0	20,0	68,9	39,6	0,0	V
-8,5	20,0	70,0	11,5	22,0	20,0	68,7	36,3	0,0	
-7,5	20,0	70,0	11,8	22,0	19,3	66,3	35,3	0,0	
-6,5	20,0	70,0	12,0	22,0	18,5	63,9	34,3	0,0	
-5,5	20,0	70,0	12,3	22,0	17,8	61,5	33,2	0,0	
-4,5	20,0	70,0	12,6	22,0	17,2	59,1	32,2	0,0	
-3,5	20,0	70,0	13,0	22,0	16,5	56,7	31,2	0,0	
-2,5	20,0	70,0	13,2	22,0	15,7	54,3	30,1	0,0	
-1,5	20,0	70,0	13,6	22,0	15,1	51,9	29,1	0,0	
-0,5	20,0	70,0	13,9	22,0	14,4	49,4	28,1	0,0	
0,5	20,0	70,0	14,2	22,0	13,7	47,0	27,0	0,0	
1,5	20,0	70,0	14,5	22,0	13,0	44,6	26,0	0,0	
2,5	20,0	70,0	14,8	22,0	12,3	42,2	25,0	0,0	
3,5	20,0	70,0	15,1	22,0	11,5	39,8	23,9	0,0	
4,5	20,0	70,0	15,4	22,0	10,9	37,4	22,9	0,0	
5,5	20,0	70,0	15,7	22,0	10,1	35,0	21,9	0,0	
6,5	20,0	70,0	16,0	22,0	9,5	32,6	20,8	0,0	
7,5	20,0	70,0	16,3	22,0	8,8	30,1	19,8	0,0	
8,5	20,0	70,0	16,5	22,0	8,0	27,7	18,8	0,0	
9,5	20,0	70,0	16,9	22,0	7,4	25,3	17,7	0,0	
10,5	20,0	70,0	17,2	22,0	6,6	22,9	16,7	0,0	
11,5	20,0	70,0	17,5	22,0	5,9	20,5	15,7	0,0	
12,5	20,0	70,0	17,8	22,0	5,3	18,1	14,6	0,0	
13,5	20,0	70,0	18,1	22,0	4,6	15,7	13,6	0,0	
14,5	20,0	70,0	18,4	22,0	3,9	13,3	12,6	0,0	
15,5	20,0	70,0	18,7	22,0	3,1	10,9	11,5	0,0	
16,5	20,0	70,0	19,0	22,0	2,4	8,4	10,5	0,0	
17,5	20,0	70,0	19,3	22,0	1,8	6,0	9,5	0,0	
18,5	20,0	70,0	19,6	22,0	1,1	3,6	8,4	0,0	
19,5	19,5	0,0	19,5	19,5	0,0	0,0	0,0	0,0	AUS
20,5	20,5	0,0	20,5	20,5	0,0	0,0	0,0	0,0	AUS
21,5	17,6	70,0	18,8	18,0	-2,7	-9,4	-2,7	0,0	S 2
22,5	17,6	70,0	19,1	18,0	-3,4	-11,8	-3,7	0,0	S 2
23,5	17,6	70,0	19,4	18,0	-4,1	-14,2	-4,7	0,0	S 2
24,5	17,6	70,0	19,7	18,0	-4,8	-16,6	-5,8	0,0	S 2
25,5	17,6	70,0	20,0	18,0	-5,5	-19,1	-6,8	0,0	S 2
26,5	17,6	70,0	20,3	18,0	-6,2	-21,5	-7,8	0,0	S 2
27,5	17,6	70,0	20,6	18,0	-6,9	-23,9	-8,9	0,0	S 2
28,5	17,6	70,0	20,9	18,0	-7,6	-26,3	-9,9	0,0	S 2
29,5	17,6	70,0	21,2	18,0	-8,3	-28,7	-10,9	0,0	S 2
30,5	17,6	70,0	21,5	18,0	-9,0	-31,1	-12,0	0,0	S 2
31,5	17,6	70,0	21,8	18,0	-9,7	-33,5	-13,0	0,0	S 2
32,5	17,6	70,0	22,1	18,0	-10,4	-35,9	-14,0	0,0	S 2

V = Eisschutz / E = Nachheizen / K = Nachkühlen / S = 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
Funktion der WRG (Fall 1)

Man erkennt auch, dass die WRG im Beispiel in 3862 h (82,2% der Gesamtnutzungszeit) zur Deckung des Wärmebedarfs und zu 572 h (12,2% der Gesamtnutzungszeit im Beispiel 4 697 h/a) zur Kühlung genutzt wird.

In Tabelle 3 sind die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnung übersichtlich zusammengefasst. Neben den Rahmenbedingungen wie Laufzeiten, Energiepreise, Zinssätze etc. wird der Kapitalwert der Ersparnisse, in diesem Fall nach 15 Jahren Nutzungsdauer, kalkuliert und die Amortisation als Schnittpunkt der beiden Linien (abgezinsten Einnahmen und Ausgaben) dargestellt.

Die Amortisation liegt in diesem Fall bei 3,2 Jahren. Der Kapitalwert der Ersparnisse liegt bei etwa 68 750 Euro. Ebenfalls sind die Kennzahlen auf Basis des Jahresenergievergleiches (z. B. Jahresarbeitszahl der WRG mit 11,9) aufgeführt.

Heute wird jedoch immer häufiger die Frage gestellt, mit welchem „optimalen“ Übertragungsgrad der höchste Ertrag erzielt werden kann. Diese Frage be-

antwortet die Optimierung der WRG, die im Beispiel eindimensional durch die Variierung der Bautiefe und damit bei konstantem Strömungsquerschnitt der Fläche oder NTU der WRG dargestellt ist.

Tabelle 4 zeigt die Ermittlung des eindimensionalen, relationalen Optimums der WRG bei Veränderung der Bautiefe der WRG. Jedem Temperaturübertragungsgrad zwischen 30% und 85% wird der erforderliche Aufwand und der mögliche Nutzen der WRG gegenübergestellt. Der Differenzbetrag stellt den Ertrag pro Jahr dar. Der höchste Ertrag mit 4 932 Euro/a wird im Beispiel mit einem Temperaturübertragungsgrad von 63% erreicht.

Da die Ertragskurve im Bereich des Optimums relativ flach verläuft, kann bei Akzeptanz eines Toleranzbereichs von ± 1% der Kosten ein optimaler Bereich des Temperaturübertragungsgrades in diesem Fall von 60 bis 66% bestimmt werden.

°C	kW	Tag h/°C	Nacht h/°C	gesamt kW/h	gesamt kW/h	WRG kW/h	WRG kW/h	Kälte kW/h	Wasser kW/h	m³
<-10,5	68,9	4	3	659		429				
-10,5	68,9	3	2	411		277				
-9,5	68,9	4	3	531		369				
-8,5	68,7	5	4	663		474				
-7,5	66,3	6	5	864		617				
-6,5	63,9	8	7	1.121		799				
-5,5	61,5	12	10	1.578		1.123				
-4,5	59,1	17	13	2.123		1.505				
-3,5	56,7	25	20	3.113		2.199				
-2,5	54,3	35	28	4.169		2.937				
-1,5	51,9	47	38	5.333		3.742				
-0,5	49,4	53	42	5.735		4.004				
0,5	47,0	75	60	7.731		5.371				
1,5	44,6	81	65	8.041		5.563				
2,5	42,2	86	69	8.126		5.589				
3,5	39,8	93	75	8.323		5.696				
4,5	37,4	96	77	8.094		5.489				
5,5	35,0	106	85	8.405		5.672				
6,5	32,6	109	87	8.157		5.454				
7,5	30,1	115	92	8.033		5.297				
8,5	27,7	113	90	7.330		4.782				
9,5	25,3	114	91	6.878		4.422				
10,5	22,9	111	88	6.131		3.883				
11,5	20,5	113	90	5.720		3.547				
12,5	18,1	112	90	5.131		3.111				
13,5	15,7	110	88	4.492		2.636				
14,5	13,3	107	86	3.863		2.181				
15,5	10,9	106	85	3.328		1.774				
16,5	8,4	101	81	2.670		1.300				
17,5	6,0	94	75	2.040		865				
18,5	3,6	87	70	1.477		481				
19,5	0,0	78	62							
20,5	0,0	68	54							
21,5	-9,4	59	47		994		846			6
22,5	-11,8	48	39		1.051		877			5
23,5	-14,2	42	34		1.110		913			4
24,5	-16,6	36	29		1.142		927			4
25,5	-19,1	30	24		1.077		873			3
26,5	-21,5	24	19		989		795			2
27,5	-23,9	21	17		984		787			2
28,5	-26,3	18	14		890		708			2
29,5	-28,7	13	10		728		578			1
30,5	-31,1	11	8		636		502			1
31,5	-33,5	6	5		406		320			1
>31,5	-35,9	10	8		679		533			1
gesamt VDI 4710	2.610	2.087	140.254	10.678	91.580	8.652				32
Jahr 12-Mannheim			3.862 h	572 h						

Tabelle 2
Energien der WRG

Mit diesem Optimum wäre die erste Stufe der Ökodesignverordnung (min. 63% für Kreislaufverbundsysteme) erfüllt. Die zweite Stufe mit (min. 68%) würde betriebswirtschaftlich zu einer WRG führen, die pro Jahr einen etwa 200 Euro geringeren Ertrag erwirtschaftet, als dies im ökonomischen Optimum bei konstanter Anströmfläche der Fall wäre.

Diese Optimierung gilt selbstverständlich nur für die festgelegten Rahmenbedingungen und den gewählten Querschnitt, der im Beispiel zu einer Luftgeschwindigkeit von 1,7 m/s führt. Demzufolge läge im Beispiel die optimale Bautiefe bei 73% der ursprünglichen Auslegung mit einem Übertragungsgrad von 70%.

Ändern sich z. B. die Laufzeit der WRG oder die Energiekosten, verschiebt sich auch das Optimum der WRG deutlich.

Neben der Optimierung auf monetärer Basis besteht selbstverständlich auch die Möglichkeit, eine Optimierung auf der Basis von CO₂-Emissionen durchzuführen.

Wirtschaftlichkeitsberechnung	
Energiekosten Wärme	0,080 €/ kWh
Kälte	0,120 €/ kWh
Elektro	0,150 €/ kWh
Wasserkosten inkl. Abwasser	10,00 €/ m ³
Kalkulationszinsfuß	3,00 %
Preissteigerungsrate	2,00 %
Klimazone / Standort	12-Mannheim
Nutzungsdauer der Anlage	15 a
Betriebsstage pro Woche	5 d / w
Betriebsstunden pro Tag	10 h / d
Betriebsstunden pro Nacht	8 h / d
Volumenstrom am Tag	100 % / V
Volumenstrom in der Nacht	50 % / V _{max}
Investitionskosten der WRG	30.576 €
Mehr- / Minderinvestition für die WRG	0 €
Minderinvestition für Wärmeerzeugung	0 € / (0 € / kWh)
Minderinvestition für Kälteerzeugung	-10.626 € / (296 € / kWh)
Zusatzkosten pro Jahr	0 €
Rückgewinn aus der WRG-Wärme	7.326 € / a
Rückgewinn aus der WRG-Kälte	1.038 € / a
Elektroenergiekosten für die WRG	1.260 € / a
Wasserkosten (indirekte Verdunstungskühlung)	318 € / a
Kapitalkosten für die WRG	1.671 € / a
Wartungs- und Unterhaltungskosten	399 € / a
jährliche Differenzkosten	4.717 € / a
Kapitalwert der Ersparnisse	68.751 €
Kalkulationszinsfuß	34,2 %
Amortisation	3,2 a
Jahresnutzungsgrad (bezogen auf Energien)	66,4 %
Jahresarbeitszahl nach EN 13053	11,9
Leistungszahl nach EN 13053	16,4
effektiver Jahreswirkungsgrad EN 13053	65,7 %

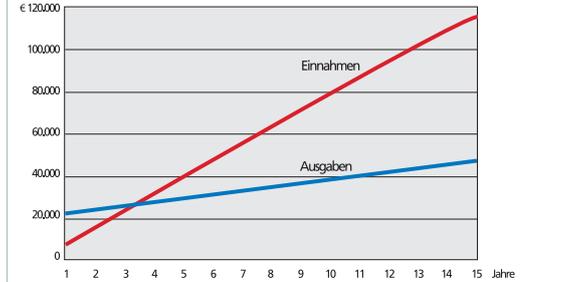
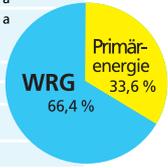


Tabelle 3
Zusammenfassung der Wirtschaftlichkeitsberechnung

Dabei werden sowohl der Aufwand als auch der Nutzen der WRG analog zur beschriebenen monetären Berechnung in CO₂-Äquivalenten bewertet.

Tabelle 5 zeigt die Ermittlung des eindimensionalen und ebenfalls relational berechneten Optimums der WRG auf der Basis von CO₂-Äquivalenten. Dabei wird dem Nutzen der WRG der Aufwand in CO₂-Äquivalenten gegenübergestellt.

Im Beispiel wurde für die Wärmeerzeugung ein CO₂-Äquivalent von 340 g eCO₂/kWh (Öl) und für den elektrischen Aufwand (Strommix) von 630 g eCO₂/kWh ausgewählt. Des Weiteren müssen aber auch die zusätzlichen Aufwände zur Herstellung der WRG, zur Wartung etc. in CO₂-Äquivalenten berücksichtigt werden. Hierzu wird als „sekundärer CO₂-Fußabdruck“ sowohl für die Herstellung der WRG als auch für die sonstigen Betriebskosten ein Mittelwert von 600g eCO₂/€ gewählt⁹⁾¹⁰⁾.

Aus dieser Optimierung ist zu erkennen, dass sich unter diesen Bedingungen das Optimum sehr deutlich von

Tabelle 5
Optimum der Wärmerückgewinnung auf Basis von CO₂-Äquivalenten

Optimierung WRG-Systeme (ökonomisch / Anströmfläche konstant)				
Effizienz WRG	Bautiefe zur Auslegung	Nutzen €/a	Aufwand €/a	Ertrag €/a
30,0%	18,4%	3.584,80 €	711,70 €	2.873,10 €
35,0%	23,1%	4.182,30 €	846,90 €	3.335,40 €
40,0%	28,6%	4.779,80 €	1.015,20 €	3.764,60 €
45,0%	35,1%	5.377,30 €	1.225,60 €	4.151,60 €
50,0%	42,9%	5.974,70 €	1.490,90 €	4.483,90 €
55,0%	52,4%	6.572,20 €	1.829,20 €	4.743,00 €
60,0%	64,3%	7.169,70 €	2.268,00 €	4.901,70 €
63,0%	73,0%	7.528,20 €	2.596,50 €	4.931,70 €
65,0%	79,6%	7.767,20 €	2.850,40 €	4.916,80 €
70,0%	100,0%	8.364,60 €	3.648,00 €	4.716,60 €

Kosten (Nutzen, Aufwand und Ertrag der WRG) pro Jahr. Auslegung mit einer Luftgeschwindigkeit im Zu- und Abluft-Gerätequerschnitt 1,70 m/s - 70 %

Optimale Rückwärmzahl der WRG 63 % (60 - 66 %)
Berechnung auf Basis der Wirtschaftlichkeitsberechnung und deren Rahmenbedingungen (Toleranzband ± 1 % der Kosten)

Optimierung WRG-Systeme (ökologisch / Anströmfläche konstant)				
Effizienz WRG	Bautiefe zur Auslegung	Nutzen kg CO ₂ /a	Aufwand kg CO ₂ /a	Ertrag kg CO ₂ /a
30,0%	18,4%	14012	1025	12987
35,0%	23,1%	16347	1309	15039
40,0%	28,6%	18683	1646	17037
45,0%	35,1%	21018	2051	18967
50,0%	42,9%	23353	2545	20809
55,0%	52,4%	25689	3157	22532
60,0%	64,3%	28024	3932	24092
65,0%	79,6%	30359	4938	25421
70,0%	100,0%	32695	6294	26401
75,0%	128,6%	35030	8206	26823
80,0%	171,4%	37365	11095	26271
85,0%	242,9%	39701	15933	23767

CO₂-Emissionen (Einsparung, Aufwand und Nettoertrag der WRG)
CO₂-Äquivalente pro Jahr berechnet mit 340 g/kWh Wärme, 630 g/kWh Strom sowie 600 g/€ WRG-Invest und sonstige Betriebskosten 600 g/€

Auslegung mit einer Luftgeschwindigkeit im Zu- und Abluft-Gerätequerschnitt 1,70 m/s - 70 %
Auslegung mit einer CO₂-Einsparung von 26,4 t/a

Optimale Rückwärmzahl der WRG 75 % (72 - 78 %)
Berechnung auf Basis der Wirtschaftlichkeitsberechnung und deren Rahmenbedingungen (Toleranzband ± 1 % der CO₂-Emissionen)

63 % (monetäre Bewertung) auf 75 % verschiebt.

Im Beispiel wird also bei einer Rückwärmzahl von 75 % das größte Potenzial an CO₂ (hier 26 823 kg/a) zurückgewonnen.

Auch macht dieses Beispiel deutlich, dass die Basis einer Optimierungsrechnung einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis hat. Liegt der Betrachtungs-

Tabelle 4
Optimum der Wärmerückgewinnung

tungsfokus einer WRG auf der möglichen CO₂-Einsparung, wäre unter diesen Voraussetzungen eine WRG mit einem deutlich höheren Temperaturübertragungsgrad (0,75) sinnvoll, während aus rein monetärer Sicht eine „kleinere“ WRG mit niedrigerem Übertragungsgrad (0,63) optimal wäre.

Würde beispielsweise die WRG nach dem monetären Optimum ausgewählt, wäre zwar der ökonomische höchste Ertrag erreicht, aber es würden unter diesen Rahmenbedingungen „nur“ rund 25 t CO₂-Emissionen pro Jahr vermieden werden, statt des optimalen Werts von rund 26,8 t/a. Umgekehrt würde bei der Wahl des ökologisch optimalen Systems mit 75 % zwar 26,8 t CO₂/a vermieden werden, aber monetär läge der Ertrag bei nur noch rund 4 500 Euro/a gegenüber dem monetären Optimum von rund 4 900 €/a. Die eindimensionale Optimierung (sowohl monetär als auch ökologisch) setzt allerdings voraus, dass der Anströmquerschnitt, also Höhe und Breite der WRG, konstant groß ist. Wird nicht die Bautiefe der WRG, sondern ihre Anströmfläche in der Optimierungsrechnung variiert, wird die Optimierung der WRG deutlich komplexer, da sich auch die Wärmeübertragung und die spezifischen Druckverluste der WRG mit der geänderten Geschwindigkeit signifikant ändern.

(Wird fortgesetzt in HLH 9/2017)

⁹⁾ Interseroh-Gruppe und Fraunhofer UMSICHT, 2008.

¹⁰⁾ <http://calculator.carbonfootprint.com/calculator.aspx?lang=de&tab=7>

Die mehrdimensionale Optimierung von Wärmerückgewinnungssystemen

Im Kontext ökonomischer und ökologischer Zielsetzungen - Teil 2

Wärmerückgewinnung ist eine wichtige Effizienzmaßnahme in der Gebäudetechnik. Es ist grundsätzlich positiv zu bewerten, dass die Ökodesignverordnung einen Rahmen für die verpflichtende Nutzung dieser Technologie geschaffen hat. Das belegen auch die begleitenden Studien, welche die WRG grundsätzlich als eine sehr wirtschaftliche Maßnahme im volkswirtschaftlichen Kontext bestätigt haben. Auch unter betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten ist die WRG sehr positiv zu bewerten. Im Einzelfall können sich aber auch negative Ergebnisse zeigen, auch wenn statistisch gesehen die Summe der Einzelfälle volkswirtschaftlich immer noch zu einem positiven Ergebnis führt.

Im ersten Teil dieses Beitrages*) wurden neben den gesetzlichen Anforderungen an die Wärmerückgewinnung und den spezifischen Anforderungen an RLT-Geräten auch ökonomische Gesichtspunkte betrachtet. Beispielhafte Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen rundeten den ersten Teil ab. Der folgende Teil 2 schließt unmittelbar daran an.

Änderung der Wärmeübertragung bei Anpassung des Querschnitts der WRG

Mit der Änderung des Anströmquerschnitts kann die k -Zahl (Wärmedurchgangskoeffizient) der WRG nicht mehr als konstant angenommen werden. Sie ändert sich mit der Änderung der Strömungsgeschwindigkeit deutlich.

Der Wärmedurchgangskoeffizient (k) ist der reziproke Wert des Wärmewiderstandes (R), der sich errechnet mit:

Autor



Prof. Dr.-Ing. Christoph Kaup, Honorarprofessor am Umwelt-Campus Birkenfeld, Hochschule Trier, für Energieeffizienz und Wärmerückgewinnung. Geschäftsführender Gesellschafter von HOWATHERM Klimatechnik GmbH. Vorsitzender des Vorstands Fachverband Gebäude Klima (FGK e. V.). Mitglied in verschiedenen Normungsgremien wie zum Beispiel EN 16798, EN 308, EN 13053 und EN 1886 sowie in verschiedenen Richtlinienausschüssen wie VDI 6022 und VDI 3803. Vorsitzender im VDI Richtlinienausschuss der VDI 3803.

$$R = 1/k = 1 / (1/\alpha_i + d/\lambda + 1/\alpha_a)$$

wobei:

- α_i Wärmeübergangskoeffizient innen (z. B. Wasser) in $W/m^2/K$
- d Dicke des wärmeleitenden Materials (z. B. des Rohres) in m
- λ Wärmeleitkoeffizient in $W/m/K$
- α_a Wärmeübergangskoeffizient außen (z. B. Luft) in $W/m^2/K$

Die Wärmeübertragung durch eine erzwungene Strömung ergibt sich aus folgender Beziehung:

$$\alpha = \dot{q} / (\vartheta_M - \vartheta_W) = Nu \cdot \lambda / l$$

wobei:

- \dot{q} Wärmestrom in W/s
- Nu dimensionsloser Wärmeübergangskoeffizient, Nusseltzahl mit:
 $Nu = f(Pr, Re)$
- λ Wärmeleitkoeffizient des strömenden Mediums in $W/m/K$
- l charakteristische Länge der Lamelle in m
- ϑ Temperatur des Mediums (M) abzüglich der Wand-Temperatur (W) (z. B. Lamelle)

Wärmeübertragung auf der Luftseite

Die dimensionslose Nusseltzahl (Nu) errechnet sich an der berippten Oberfläche (Lamelle) eines Wärmeübertragers mit versetzter Rohranordnung auf vier Rohrreihen auf der Luftseite¹¹⁾ aus:

$$Nu = 0,38 \cdot Re^{0,6} \cdot (A/A_0)^{-0,15} \cdot Pr^{1/3}$$

für turbulente Strömung mit $10^3 < Re < 10^5$ und $5 < A/A_0 < 30$

wobei:

Pr Prandtl-Zahl (stoffabhängige Größe des Mediums, z. B. Luft)

$$Pr = \rho \cdot \vartheta \cdot c_p / \lambda$$

mit:

- ρ Luftdichte in kg/m^3
- ϑ kinematische Viskosität in m^2/s
- c_p spezifische Wärmekapazität in $kJ/kg/K$
- λ Wärmeleitfähigkeit in $W/m/K$
- Re Reynold-Zahl (strömungsabhängige Größe) mit

$$Re = w \cdot l / \vartheta$$

mit:

- w Strömungsgeschwindigkeit im engen Querschnitt in m/s
- l charakteristische Länge der Lamelle in m

A/A_0 Oberflächenverhältnis äußere Fläche A zur Rohrfläche innen A_0

$$A/A_0 = 1 + 2 \cdot h \cdot (h + d + s) / t_r / d$$

wobei:

- h charakteristische Lamellenhöhe
- $$h = (4 \cdot s_1 \cdot s_2 / (2 \cdot s_1 + 2 \cdot s_2) - d) / 2$$

mit:

- s_1 Achsabstand der Rohre in Luftrichtung in m
- s_2 Achsabstand der Rohre quer zur Luftrichtung in m
- d Rohrdurchmesser in m
- s Materialdicke der Lamelle in m
- t_r Lamellenteilung in m

^{*)} Teil 1 dieses Beitrages ist erschienen in HLH Bd. 68 (2017) Nr. 7-8, S. 22-26.

¹¹⁾ VDI-Wärmeatlas, Berechnungsblätter für den Wärmeübergang, 7. Auflage, Mb 3.

Wärmeübertragung innerhalb des Rohres

Die dimensionslose Nusseltzahl (Nu) errechnet sich hier innerhalb der Rohre¹²⁾ (Medienseite) aus:

$$Nu_{\text{turb}} = \zeta / 8 \cdot (Re - 1000) \cdot Pr / \left[1 + 12,7 \cdot \sqrt{\zeta / 8} \cdot (Pr^{2/3} - 1) \right] \cdot \left\{ 1 + (d_i / l)^{2/3} \right\}$$

für turbulente Strömung mit $2\,300 < Re < 10^5$ und $0,6 < Pr < 2000$

wobei:
 ζ Widerstandsbeiwert des Rohres mit:

$$\zeta = [1,82 \cdot \log(Re) - 1,64]^{-2}$$

mit:

$$Re = w \cdot d_i / \vartheta$$

mit:

d_i Innendurchmesser des Rohres in m
 l Rohrlänge in m

Aus der dimensionslosen Nusseltzahl (Nu) ergibt sich der Wärmeübergangskoeffizient (α) mit:

$$\alpha = Nu \cdot \lambda / d$$

Aus den beiden Wärmeübergangskoeffizienten und dem Kehrwert aus Materialstärke (z. B. Rohrdicke) zum Wärmeleitkoeffizienten wird die k -Zahl bestimmt.

Näherungsgleichung zur Umrechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten

Das vorab beschriebene Verfahren ist relativ komplex und aufwändig. Zur Berechnung einer Vielzahl von Optimierungsrechnungen auf Basis von Einzelauslegungen erscheint das oben beschriebene klassische Verfahren daher zu kompliziert. Außerdem basiert es auf einer rein theoretischen Bestimmung der k -Zahl, die eine messtechnische Erfassung nicht berücksichtigt.

Insbesondere bei veränderten Bedingungen, also bei veränderlichen Luft- oder Medienmengen, müssen für sämtliche Zustände die Wärmedurchgangskoeffizienten explizit berechnet werden. Häufig wird in der Praxis vereinfacht mit einer konstanten k -Zahl gerechnet, was dann zu erheblichen Fehlern führt und daher für eine Optimierungsrechnung gänzlich ungeeignet ist.

Aus diesem Grund bietet sich ein relatives Näherungsverfahren an, mit dem ein ausgelegter und validierter Wärmedurchgangskoeffizient (k) leicht auf unterschiedliche Betriebsbedingungen umgerechnet werden kann.

Dazu wird die ursprüngliche k -Zahl, die sich aus der Auslegung oder der Messung ergibt, aufgrund der sich ändernden Luft- und Mediengeschwindigkeiten mit folgender Gleichung nach *Kaup* korrigiert¹³⁾:

$$k_{\text{korr}} = k_{\text{org}} \cdot (w_{L\text{korr}} / w_{L\text{org}})^{0,4} \cdot (w_{M\text{korr}} / w_{M\text{org}})^{0,4}$$

mit:

- k_{korr} umzurechnende k -Zahl in $W/m^2/K$
- k_{org} ursprüngliche k -Zahl gemessen oder berechnet in $W/m^2/K$
- $w_{L\text{korr}}$ Luftgeschwindigkeit im umzurechnenden Betriebszustand in m/s
- $w_{L\text{org}}$ ursprüngliche Luftgeschwindigkeit in m/s
- $w_{M\text{korr}}$ Mediengeschwindigkeit im umzurechnenden Betriebszustand in m/s
- $w_{M\text{org}}$ ursprüngliche Mediengeschwindigkeit im Rohr in m/s

Aufgrund umfangreicher Vergleichsberechnungen kann die Gleichung im Bereich von:

$$1,6 < w_{L\text{korr}} / w_{L\text{org}} < 0,4$$

und:

$$1,4 < w_{M\text{korr}} / w_{M\text{org}} < 0,8$$

verwendet werden. Sie leitet sich von der Näherungsgleichung nach *Kaup*¹⁴⁾ zur Umrechnung von Temperaturänderungsgraden von Wärmerückgewinnungssystemen ab.

Die Abweichungen zur Berechnung nach VDI-Wärmeatlas im reinen Gegenstrom liegen innerhalb der o. g. Gültigkeitsgrenzen im Bereich von etwa $\pm 3\%$ und damit auf einem niedrigen Niveau.

Bei Luft-/Luftwärmeübertragern kann analog folgende Gleichung verwendet werden:

$$k_{\text{korr}} = k_{\text{org}} \cdot (w_{1\text{korr}} / w_{1\text{org}})^{0,4} \cdot (w_{2\text{korr}} / w_{2\text{org}})^{0,4}$$

mit:

- k_{korr} umzurechnende k -Zahl in $W/m^2/K$
- k_{org} ursprüngliche k -Zahl, gemessen oder berechnet in $W/m^2/K$
- $w_{1\text{korr}}$ Luftgeschwindigkeit des Abluftstromes im Betriebszustand in m/s
- $w_{1\text{org}}$ ursprüngliche, ausgelegte Luftgeschwindigkeit der Abluft in m/s
- $w_{2\text{korr}}$ Luftgeschwindigkeit der Zuluft im Betriebszustand in m/s
- $w_{2\text{org}}$ ursprüngliche, ausgelegte Luftgeschwindigkeit der Zuluft in m/s

Überprüfung der Näherungsgleichung im Versuch

Zur Prüfung der beschriebenen Näherungsgleichung, insbesondere bei niedrigen Geschwindigkeiten, wurde eine Messung im Labor (**Bild 1**) sowohl an einem Doppelplattenwärmeübertrager im Kreuz-/Gegenstrom als auch bei berippten Wärmeübertragern im Gegenstrom durchgeführt.

Durch die Messung wird deutlich, dass die Näherungsgleichung bis zu einer Luftgeschwindigkeit von 0,6 m/s sehr gute Ergebnisse im Vergleich zur Messung liefert. Der Fehler der Näherungsgleichung im Vergleich zur Messung lag bei unter 1%.

Es war hierbei allerdings zu beobachten, dass der Wärmeübergang bei Luftgeschwindigkeiten von $\leq 0,25$ m/s kaum noch stabil im Beharrungszustand gehalten werden konnte. Auch die Wärmebilanz beider Massenströme lag 9% auseinander und damit über der maximal zulässigen Abweichung von 5% der EN 308.

Änderung des Druckabfalls der Wärmerückgewinnung

Parallel zur Änderung der Wärmeübertragung muss der sich ergebende Druckabfall bei geänderter Fläche bestimmt werden. Theoretisch ändert sich der Druckabfall ΔP eines Körpers nach der Beziehung:

$$\Delta P = \zeta \cdot \frac{1}{2} \cdot \varrho \cdot w^2$$

¹²⁾ VDI-Wärmeatlas, Berechnungsblätter für den Wärmeübergang, 7. Auflage, Gb 7.

¹³⁾ *Kaup, C., Berippte Wärmeübertrager, Näherungsgleichung zur k-Zahl-Berechnung, Genthner-Verlag, TGA-Fachplaner 03/2015.*

¹⁴⁾ *Recknagel-Sprenger, Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik, 77. Ausgabe 2015/16, Kapitel -3.3.2-5.5.3, Seite 1525.*

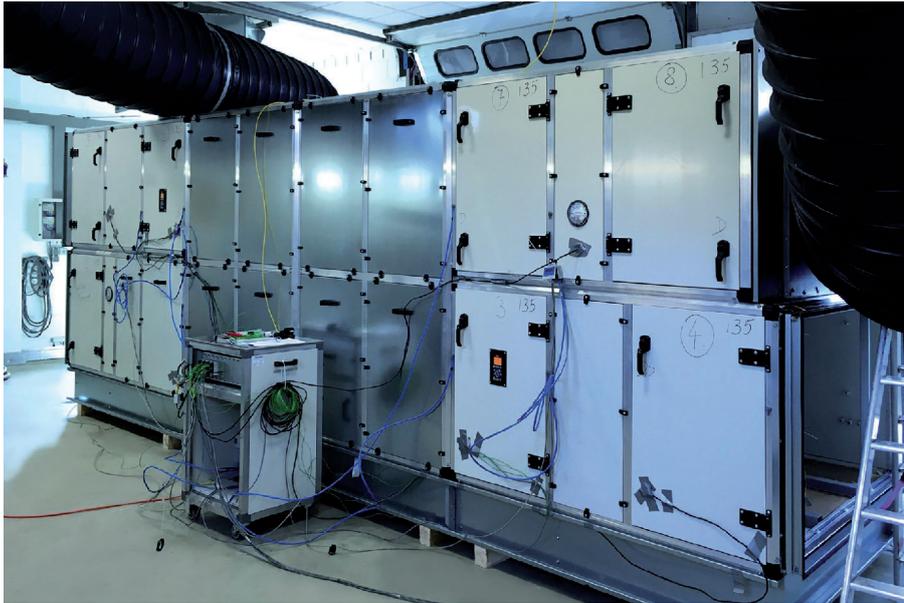


Bild 1

Messung des Temperaturübertragungsgrades eines Doppelplattenwärmeübertragers im Niedriggeschwindigkeitsbereich

de. Dies muss aber nicht immer so sein, da sowohl das eindimensionale als auch das zweidimensionale Optimum sich völlig unabhängig voneinander ergeben und von der ursprünglichen Auslegungsgeschwindigkeit abhängig sind.

Das mehrdimensionale Optimum der Wärmerückgewinnung

Aus den vorangegangenen Betrachtungen wird leicht ersichtlich, dass eine tatsächliche und grundlegende Optimierung der WRG nur erfolgen kann, wenn sämtliche Geometrien, also alle drei Dimensionen geändert werden können.

Sowohl der Querschnitt (Höhe und Breite der WRG) als auch die Bautiefe müssen in die Optimierung einfließen und dienen daher als Variablen zur Berechnung des maximalen Ertrags.

In einem Algorithmus werden daher sowohl der Querschnitt als auch in einer zweiten Berechnungsschleife die

mit:

- ζ Widerstandsbeiwert eines Körpers (hier WÜ)
- ρ Dichte des Mediums (hier Luft mit 1,2 kg/m³)
- w Strömungsgeschwindigkeit des Mediums

Aufgrund von zahlreichen Messungen an ausgeführten WRG-Einrichtungen hat sich jedoch gezeigt, dass sich der Druckverlust nicht quadratisch ändert, sondern mit einem Exponenten in einem Bereich von 1,5 bis 1,7.

Das zweidimensionale Optimum der Wärmerückgewinnung

Wird beispielsweise die Bautiefe der WRG konstant belassen und als Freiheitsgrad der Berechnung der Querschnitt der WRG verändert, ergibt sich ein völlig anderes, zweidimensionales Optimum als das im 1. Teil aufgezeigte eindimensionale Optimum, da bei sehr niedrigen Querschnitten und den damit verbundenen sehr hohen Strömungsgeschwindigkeiten die Druckverluste und somit der elektrische Aufwand der WRG mit dem Exponent von etwa 2,6 bezogen auf die Luftgeschwindigkeit steigen.

Bei sehr großen Querschnitten sinkt der Druckabfall, aber die Kosten der WRG steigen exponentiell zum Querschnitt.

Auf Basis der zweidimensionalen Optimierung verschiebt sich das monetäre Optimum im Beispiel auf 72%. Der höchste Ertrag mit 4 794 Euro wird bei einem Querschnitt von rund 130% (bez. auf 2 m/s), also bei 1,54 m/s erreicht.

Zu erkennen ist, dass bei einer Optimierung unter Veränderung der Querschnittsänderung das Optimum deutlich schärfer zum Tragen kommt.

Allerdings liegt in diesem Beispiel (Tabelle 6) der maximale Ertrag mit rund 4 790 Euro/a um rund 200 Euro niedriger als der Ertrag, der durch die eindimensionale Optimierung erreicht wur-

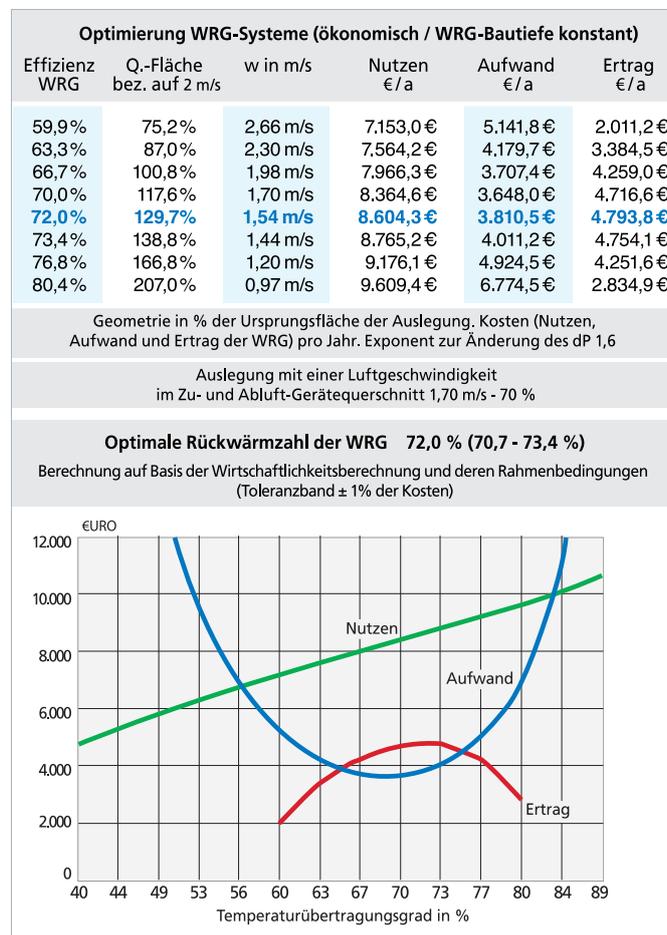


Tabelle 6
Das zweidimensionale Optimum der WRG

Optimierung WRG-Systeme (ökonomisch / mehrdimensional)						
Effizienz WRG	Q-Fläche bez. auf 2 m/s	w in m/s	Bautiefe zur Auslegung	Nutzen €/a	Aufwand €/a	Ertrag €/a
23,1%	65,0%	3,08 m/s	23,3%	2.757,6€	1.752,6€	1.004,9€
37,5%	75,2%	2,66 m/s	40,2%	4.481,1€	2.298,6€	2.182,5€
50,0%	87,0%	2,30 m/s	58,0%	5.974,7€	2.624,2€	3.350,6€
56,5%	100,8%	1,98 m/s	65,0%	6.754,1€	2.436,3€	4.317,8€
61,5%	117,6%	1,70 m/s	68,6%	7.353,5€	2.321,7€	5.031,8€
64,3%	138,8%	1,44 m/s	65,4%	7.681,8€	2.160,8€	5.521,0€
65,5%	166,8%	1,20 m/s	57,4%	7.829,0€	1.993,5€	5.835,5€
66,7%	207,0%	0,97 m/s	48,7%	7.966,3€	1.935,2€	6.031,2€
67,7%	273,2%	0,73 m/s	38,8%	8.094,8€	1.941,7€	6.153,1€
67,7%	419,6%	0,48 m/s	25,2%	8.094,8€	1.852,3€	6.242,6€

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 Abluft-Gerätequerschnitt 1,70 m/s - 70 %

Maximal sinnvolle Rückwärmzahl der WRG 67,7 %
Berechnung auf Basis der Wirtschaftlichkeitsberechnung und deren Rahmenbedingungen (Toleranzband ca. 2 % der max. Erträge)

Tabelle 7
Das mehrdimensionale monetäre Maximum der WRG

Bautiefe der WRG durch Iteration nach den beschriebenen Verfahren bestimmt.

Hierzu wird in einer ersten Berechnungsschleife die Fläche des WÜ der WRG von einem minimalen Startwert SW1 bis zu einem maximal zu wählenden Endwert EW1 in einer Schrittweite SWE1 geändert. Für jeden Einzelwert werden auf Basis der ursprünglichen *k*-Zahl der Auslegung die sich nun ergebenden relationalen *k*-Zahlen und spezifischen Druckverluste für die jeweiligen Flächen bestimmt.

Mit diesen sich ergebenden *k*-Zahlen werden nun in einer zweiten Schleife die Bautiefe des WÜ der WRG von einem zweiten Startwert SW2 bis zu einem maximal zu wählenden Endwert EW2 in einer Schrittweite SWE2 geändert.

Die relationale *k*-Zahl aus der Iterationsschleife 1 bleibt in der zweiten Iterationsschleife konstant.

In dieser zweiten Schleife wird auf Basis der bereits beschriebenen eindimensionalen Optimierung der jeweilige maximale Ertrag aus der Differenz zwischen Nutzen und Aufwand bestimmt.

So ergibt sich für jede Fläche im Bereich des Startwerts SW2 bis zum maximalen Endwert EW2 das jeweilige Optimum, das sich durch den maximalen Ertrag für jede zu berechnende Fläche auszeichnet.

Hieraus ergibt sich eine Vielzahl von Optima, die den jeweiligen Flächen und den daraus resultierenden Luftgeschwindigkeiten bzw. Anströmflächen zugeordnet sind. Aus dieser Vielzahl von Optima kann durch eine Maximalwertbetrachtung das größte Optimum (Maximum der Einsparung oder maximaler Ertrag) bestimmt werden.

Alternativ kann bei einer möglichen räumlichen (geometrischen) Beschränkung das maximal realisierbare Optimum bestimmt werden.

Optimierung WRG-Systeme (ökologisch / mehrdimensional)						
Effizienz WRG	Q-Fläche bez. auf 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
9,1%	65,0%	3,08 m/s	7,8%	4.246	3.898	348
28,6%	75,2%	2,66 m/s	26,8%	13.345	8.967	4.378
47,4%	87,0%	2,30 m/s	52,2%	22.124	11.573	10.551
60,0%	100,8%	1,98 m/s	75,0%	28.024	11.078	16.946
69,7%	117,6%	1,70 m/s	98,6%	32.553	9.814	22.739
76,7%	138,7%	1,44 m/s	119,9%	35.845	8.288	27.557
81,5%	166,6%	1,20 m/s	132,9%	38.057	6.824	31.233
84,6%	205,9%	0,97 m/s	133,4%	39.521	5.795	33.726
86,3%	267,6%	0,75 m/s	114,6%	40.308	5.164	35.144
87,0%	383,7%	0,52 m/s	75,1%	40.641	4.874	35.766

Geometrie in % der Ursprungsfläche der Auslegung. CO₂e (Nutzen, Aufwand und Reduktion der WRG) pro Jahr. Exponent zur Änderung des dP 1,6

Auslegung mit einer Luftgeschwindigkeit im Zu- und Abluft-Gerätequerschnitt 1,70 m/s - 70 %. Auslegung mit einer CO₂-Einsparung von 26,4 t/a

Maximal sinnvolle Rückwärmzahl der WRG 86,3 %
Berechnung auf Basis der Wirtschaftlichkeitsberechnung und deren Rahmenbedingungen (Toleranzband ca. 2 % der max. CO₂-Reduktion)

Tabelle 8
Das mehrdimensionale ökologische Maximum der Wärmerückgewinnung

Tabelle 7 stellt das Ergebnis der relationalen mehrdimensionalen Optimierungsberechnung dar. Tatsächlich ergibt sich aus der Berechnung kein Optimum im klassischen Sinne, sondern eine Maximalwertberechnung. Aus den Ergebnissen wird deutlich, dass es nicht als sinnvoll erscheint, den Übertragungsgrad der WRG deutlich über 67,7 % zu steigern, da der Ertrag asymptotisch auf ein Maximum zuläuft.

Im Beispiel würde dieser maximal sinnvolle Übertragungsgrad bei 67,7 % liegen, wenn unterstellt wird, dass 2 % des theoretisch maximal möglichen Ertrages vernachlässigt werden können. Diese Annahme ist begründbar, da die Fehler zur Berechnung der geänderten *k*-Zahl schon in einem ähnlich großen Bereich (3 %) liegen. Denn gerade bei geringen Geschwindigkeiten ist die Vorhersage der tatsächlichen Wärmeübertragungsvorgänge beson-

ders schwierig. Es wird auch ersichtlich, dass mit noch kleineren Luftgeschwindigkeiten unter 0,73 m/s der sinnvolle Übertragungsgrad nicht weiter steigt und im Beispiel bei max. 67,7 % verharnt.

Im vorliegenden Beispiel würde der sinnvolle Übertragungsgrad mit einem Querschnitt von 273 %, also mit 0,73 m/s bei einer Bautiefe von 38 % zur ursprünglichen Auslegung erreicht werden (Die Werte sieht man auch aus Tabelle 7). Der Ertrag dieser mehrdimensionalen Optimierungsrechnung würde dann auf 6 153 Euro/a gegenüber der ursprünglichen Auslegung mit 4 932 Euro/a (+25 %) steigen.

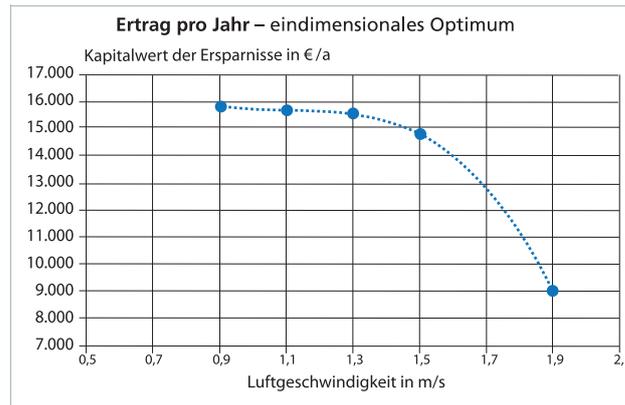
Selbst wenn die Luftgeschwindigkeit deutlich unter 1 m/s in der Auslegung nicht gewollt wäre, würde der Ertrag immer noch bei rund 6 030 Euro/a liegen, während der Wärmeübertrager noch rund 50 % seiner ursprünglichen Bautiefe aufweisen würde.

Es wird an diesem Beispiel ersichtlich, dass es auch aus ökonomischer Sicht sinnvoll ist, die WRG mit niedrigen Luftgeschwindigkeiten zu betreiben, da damit einerseits der Übertragungsgrad steigt und andererseits der elektrische Aufwand bedeutend sinkt. Diese Auslegungsalternative führt im Beispiel zu einem um 25 % größeren Ertrag (Kapitalwert der Ersparnisse) trotz großem Querschnitt und den damit verbundenen höheren Investitionskosten.

Selbstverständlich lässt sich auch die mehrdimensionale relationale Optimierung nicht nur monetär, sondern auch auf Basis von CO₂-Äquivalenten durchführen (Tabelle 8).

In diesem Fall könnte ebenfalls bei einer Luftgeschwindigkeit von rund 0,75 m/s eine CO₂-Reduktion von 35 144 kg/a erreicht werden. Hier allerdings mit einer Bautiefe der WRG von ca. 115 % zur ursprünglichen Auslegung und damit mit einer fast dreimal größeren Bautiefe, als dies unter monetären Gesichtspunkten sinnvoll wäre. Damit könnte die CO₂-Einsparung von ursprünglich 26 823 kg/a deutlich erhöht werden (+31 %).

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 gleichzusetzen ist.



Validierung in einer konkreten Auslegung

Zur Validierung der Berechnung wurde in einem konkreten Fall ein Kreislaufverbundsystem mit verschiedenen Luftgeschwindigkeiten und Bautiefen mit einer leistungszertifizierten Software ausgelegt. Die sich ergebenden, eindimensional ermittelten, optimalen Erträge im Verhältnis zu den Luftgeschwindigkeiten im Gerätequerschnitt zeigt Bild 2.

Im Bereich von 0,9 bis 1,3 m/s liegen die Erträge bei 15 571 Euro/a (bei 1,3 m/s) und 15 843 Euro/a (bei 0,9 m/s). Erst bei Geschwindigkeiten über 1,5 m/s sinken diese deutlich von 14 774 Euro/a (bei 1,5 m/s) auf 8 991 Euro/a (bei einer heute üblichen Auslegungsgeschwindigkeit von 1,9 m/s). Die optimalen Übertragungsgrade liegen in diesem Beispiel bei max. 72 % (bei 0,9 m/s) und sinken auf 64 % bei 1,9 m/s.

Auch an diesem Beispiel wird deutlich, dass es einen maximalen Ertrag gibt, den eine WRG erwirtschaften kann. Je niedriger die Auslegungsgeschwindigkeit ist, desto mehr nähert sich der Ertrag diesem Grenzwert asymptotisch an. In diesem Beispiel sollte daher die optimale Luftgeschwindigkeit in einem Bereich von 1,0 bis maximal 1,3 /s liegen.

Änderung der Rahmenbedingungen

Wie bereits beschrieben, gilt die relationale Optimierung der WRG nur für klar definierte Rahmenbedingungen. Ändern sich diese, verschieben sich die Optima deutlich.

Bei dem o. g. Berechnungsbeispiel mit einer Laufzeit der Anlage von 4 697 h/a auf 8 760 h/a (7 Tage pro Woche mit 24 h/Tag, nachts abgesenkter Betrieb mit 50 % der Nennluftmenge) ergeben sich folgende Werte:

Bild 2

Kapitalwert der Ersparnisse bei verschiedenen Auslegungsgeschwindigkeiten

Die WRG wird in 7 209 h/a zur Deckung des Wärmebedarfs und in 1 068 h/a zur Kühlung herangezogen. Die Amortisationsdauer verkürzt sich von 3,2 Jahren auf 1,7 Jahre. Der Kapitalwert der Ersparnisse verdoppelt sich etwa von 68 750 Euro auf 145 260 Euro.

Das eindimensionale ökonomische Optimum steigt von 63 % auf 69 %. In diesem Fall wäre die zweite Stufe der Ökodesign-Verordnung auch betriebswirtschaftlich sinnvoll erreichbar¹⁵⁾.

Das mehrdimensionale monetäre Maximum würde sich von 67,7 % auf 75 % verschieben. Mit diesem mehrdimensionalen Maximum würde in diesem Beispiel der Ertrag von 10 232 Euro/a auf 12 373 Euro/a erhöht werden. Im ersten Beispiel mit geringerer Laufzeit lagen die Erträge bei 4 932 Euro/a (eindimensional) und 6 153 Euro/a (mehrdimensional). Die sinnvolle Luftgeschwindigkeit würde bei rund 1,1 m/s liegen.

Das ökologische Optimum basierend auf CO₂-Äquivalenten würde sich von 75 % auf 77 % verschieben. Dies erscheint auf den ersten Blick als geringe relative Veränderung, aber absolut gesehen verdoppelt sich bedingt durch die längere Laufzeit die CO₂-Einsparung nahezu von 26 823 kg/a auf 50 937 kg/a. Das mehrdimensionale ökologische Maximum verschiebt sich von 86,3 % auf 89,5 %. Absolut werden statt 35 144 kg/a nun 68 072 kg/a CO₂-Emissionen eingespart. In diesem Fall läge die sinnvolle Luftgeschwindigkeit unter ökologischen Gesichtspunkten bei rund 0,75 m/s.

¹⁵⁾ Optimierung von Wärmerückgewinnungssystemen im Kontext volks- und betriebswirtschaftlicher Rahmenbedingungen (Teil 1 und 2), Huss Medien, Moderne Gebäudetechnik, 11 und 12/2016.

Fazit

Wärmerückgewinnung ist eine wichtige Effizienzmaßnahme in der Gebäudetechnik. Es ist grundsätzlich positiv zu bewerten, dass die Ökodesignverordnung einen Rahmen für die verpflichtende Nutzung dieser Technologie geschaffen hat. Das belegen auch die begleitenden Studien, welche die WRG grundsätzlich als eine sehr wirtschaftliche Maßnahme im volkswirtschaftlichen Kontext bestätigt haben.

Auch unter betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten ist die WRG sehr positiv zu bewerten. Im Einzelfall können sich aber negative Ergebnisse zeigen, auch wenn statistisch gesehen die Summe der Einzelfälle volkswirtschaftlich immer noch zu einem positiven Ergebnis führt.

Da im Einzelfall aufgrund der verschiedenen Rahmenbedingungen die Ergebnisse sehr stark variieren und auch zu negativen Ergebnissen führen können, stellt sich zwingend die Frage, ob es nicht sinnvoller wäre, auf Basis von individuellen Rahmenbedingungen ein betriebswirtschaftliches Optimum oder Maximum in jedem Einzelfall zu fordern, anstatt pauschalen Festlegungen

den Vorzug zu geben, da sich aufgrund der unterschiedlichen Rahmenbedingungen die Optima deutlich verschieben.

Weiter wird deutlich, dass sowohl zur Erreichung der Referenzwerte der Ökodesignverordnung für Lüftungsgeräte als auch zur Erreichung des maximalen Ertrags der WRG die Auslegungsluftgeschwindigkeiten signifikant sinken müssen (auf rund 1 m/s), um sowohl den thermischen Übertragungsgrad als auch den SFP-Wert einhalten und den maximalen Ertrag erreichen zu können. So können auch die Referenzwerte der Ökodesignverordnung ab 2020 wirtschaftlich sinnvoll erreicht werden.

Denn schließlich soll eine gesetzliche Maßnahme die Amortisation und den Kapitalwert der Ersparnisse, also letztendlich den maximalen Ertrag im Einzelfall ermöglichen.

Die mehrdimensionale Optimierung auf Basis einer relationalen Berechnungsmethodik kann hier leicht aufzeigen, welche sinnvollen Möglichkeiten sich ergeben können.

Es wird ersichtlich, dass dabei ein ökonomisches wie auch ein ökologisches Optimum oder Maximum erreichbar

sind. Beide sind aber wie zu erwarten meist nicht identisch, so dass entschieden werden muss, ob der ökonomischen oder ökologischen Optimierung oder Maximierung gefolgt werden soll.

Dabei spielt es eine große Rolle, ob die Bewertung letztendlich monetär in Euro und Cent oder ob die Berechnung auf Basis einer CO₂-Einsparung in kg/a erfolgt.

Es ergibt sich in beiden Fällen unter projektspezifischen Rahmenbedingungen ein jeweils eindeutiges Optimum oder Maximum beim Einsatz von WRG-Systemen.

Somit kann die Festlegung einer optimalen WRG in jedem Fall verhindern, dass mit einer zu kleinen oder einer zu großen WRG ein ökonomisches oder ökologisches Potenzial verschenkt wird. Dies ist sowohl unter betriebswirtschaftlichen als auch unter volkswirtschaftlichen Gesichtspunkten sinnvoll, da die Summe der betriebswirtschaftlichen Optima zu einem volkswirtschaftlichen Optimum führen muss.

Allerdings ruht der Fokus der Betrachtungen immer häufiger auf dem Ziel einer CO₂-Einsparung – und dies tut unserer Umwelt gut.