

# 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:

- $\alpha_i$  Wärmeübergangskoeffizient innen (z. B. Wasser) in  $W/m^2/K$
- $d$  Dicke des wärmeleitenden Materials (z. B. des Rohres) in m
- $\lambda$  Wärmeleitkoeffizient in  $W/m/K$
- $\alpha_a$  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:  
 $Nu = f(Pr, Re)$
- $\lambda$  Wärmeleitkoeffizient des strömenden Mediums in  $W/m/K$
- $l$  charakteristische Länge der Lamelle in m
- $\vartheta$  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 Luftseite<sup>11)</sup> 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:

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

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

mit:

- $w$  Strömungsgeschwindigkeit im engsten 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

<sup>\*)</sup> Teil 1 dieses Beitrages ist erschienen in HLH Bd. 68 (2017) Nr. 7-8, S. 22-26.

<sup>11)</sup> VDI-Wärmeatlas, Berechnungsblätter für den Wärmeübergang, 7. Auflage, Mb 3.

## Wärmeübertragung innerhalb des Rohres

Die dimensionslose Nusseltzahl ( $Nu$ ) errechnet sich hier innerhalb der Rohre<sup>12)</sup> (Medienseite) aus:

$$Nu_{\text{turb}} = \zeta / 8 \cdot (Re - 1000).$$

$$Pr / \left[ 1 + 12.7 \cdot \sqrt{(\zeta / 8)} \cdot (Pr^{2/3} - 1) \right] \cdot$$

$$\left\{ 1 + (d_i / l)^{2/3} \right\}$$

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

wobei:

$\zeta$  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 ( $\alpha$ ) 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* korrigiert<sup>13)</sup>:

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

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

mit:

$k_{\text{korr}}$  umzurechnende  $k$ -Zahl in  $W/m^2/K$

$k_{\text{org}}$  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*<sup>14)</sup> 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:

$k_{\text{korr}}$  umzurechnende  $k$ -Zahl in  $W/m^2/K$

$k_{\text{org}}$  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

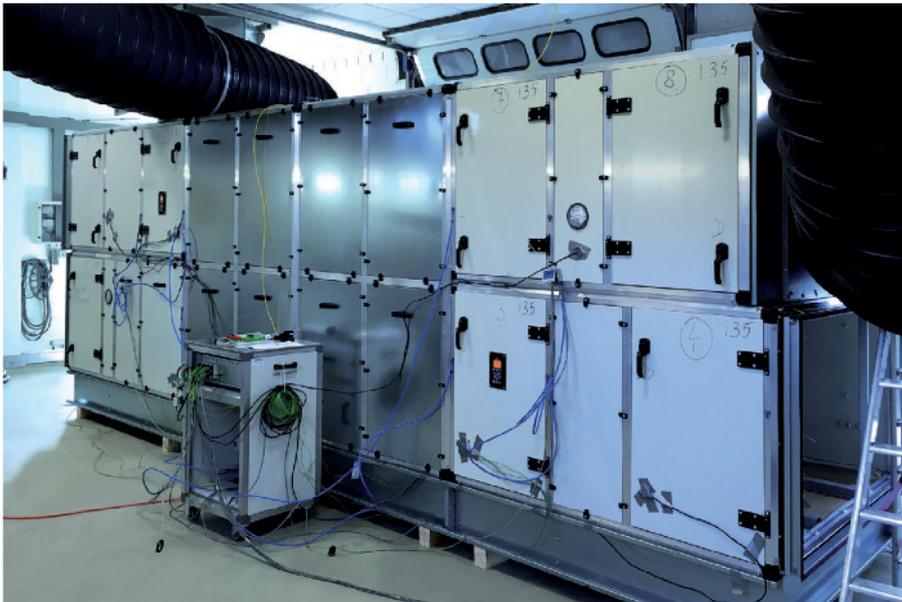
Parallel zur Änderung der Wärmeübertragung muss der sich ergebende Druckabfall bei geänderter Fläche bestimmt werden. Theoretisch ändert sich der Druckabfall  $\Delta P$  eines Körpers nach der Beziehung:

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

<sup>12)</sup> VDI-Wärmeatlas, Berechnungsblätter für den Wärmeübergang, 7. Auflage, Gb 7.

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

<sup>14)</sup> *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/m<sup>3</sup>)
- 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**

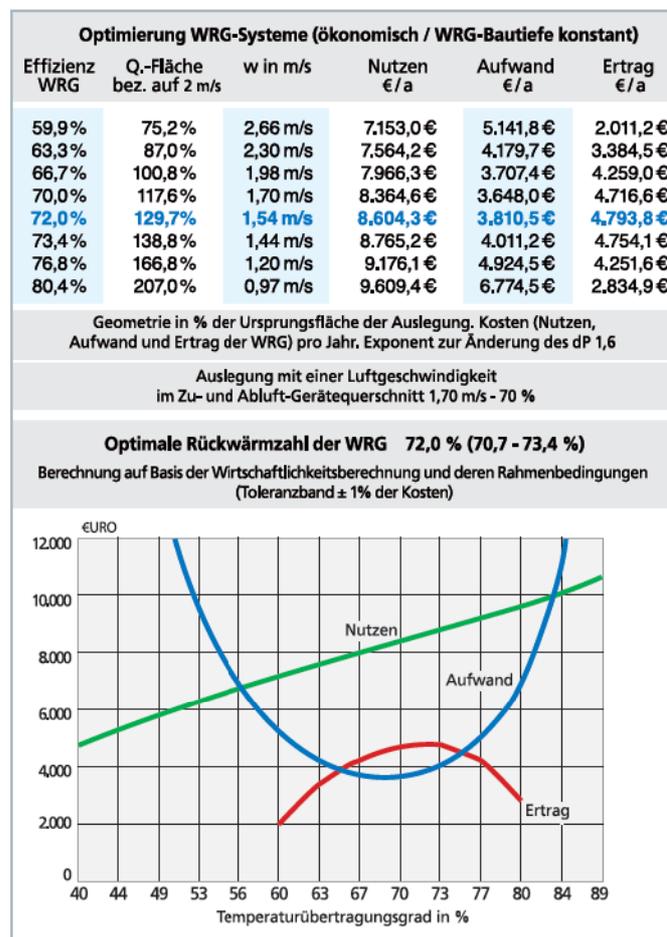
Wird beispielsweise die Bautiefe der WRG konstant belassen und als Freiheitsgrad der Berechnung der Querschnitt der WRG verändert, ergibt sich ein völlig anderes, zweidimensionales Optimum als das im 1. Teil aufgezeigte eindimensionale Optimum, da bei sehr niedrigen Querschnitten und den damit verbundenen 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€
<b>67,7%</b>	<b>273,2%</b>	<b>0,73 m/s</b>	<b>38,8%</b>	<b>8.094,8€</b>	<b>1.941,7€</b>	<b>6.153,1€</b>
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 <sub>2</sub> /a	Aufwand kg CO <sub>2</sub> /a	Reduktion kg CO <sub>2</sub> /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
<b>86,3%</b>	<b>267,6%</b>	<b>0,75 m/s</b>	<b>114,6%</b>	<b>40.308</b>	<b>5.164</b>	<b>35.144</b>
87,0%	383,7%	0,52 m/s	75,1%	40.641	4.874	35.766

Geometrie in % der Ursprungsfläche der Auslegung, CO<sub>2</sub>e (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 CO<sub>2</sub>-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. CO<sub>2</sub>-Reduktion)

**Tabelle 8**  
Das mehrdimensionale ökologische Maximum der Wärmerückgewinnung

**Tabelle 7** stellt das Ergebnis der relationalen mehrdimensionalen Optimierungsschleife 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 % verharret.

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.

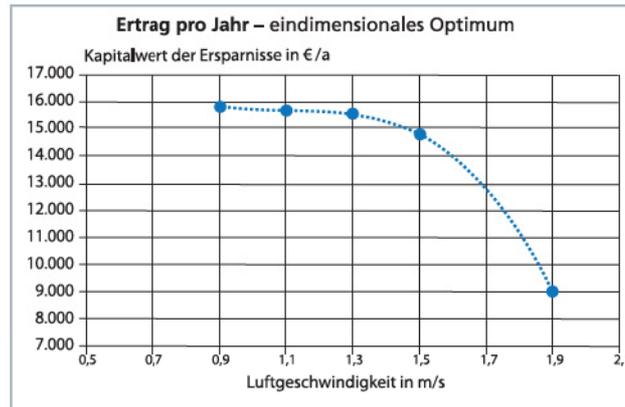
Selbst wenn die Luftgeschwindigkeit deutlich unter 1 m/s in der Auslegung nicht gewollt wäre, würde der Ertrag immer noch bei rund 6 030 Euro/a liegen, während der Wärmeübertrager noch rund 50 % seiner ursprünglichen Bautiefe aufweisen würde.

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 CO<sub>2</sub>-Äquivalenten durchführen (Tabelle 8).

In diesem Fall könnte ebenfalls bei einer Luftgeschwindigkeit von rund 0,75 m/s eine CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-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.



**Bild 2**  
Kapitalwert der Ersparnisse bei verschiedenen Auslegungsgeschwindigkeiten

### 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:

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 erreichbar<sup>15)</sup>.

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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-Emissionen eingespart. In diesem Fall läge die sinnvolle Luftgeschwindigkeit unter ökologischen Gesichtspunkten bei rund 0,75 m/s.

<sup>15)</sup> 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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-Einsparung – und dies tut unserer Umwelt gut.