

# Mehrdimensionale und relationale Optimierung der Wärmerückgewinnung (Teil 1)



**Wärmerückgewinnung (WRG) ist eine wichtige Effizienzmaßnahme in der Gebäudetechnik.** Es ist 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. Da im Einzelfall aufgrund der verschiedenen Rahmenbedingungen die Erträge der WRG 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. Es wird ersichtlich, dass dabei ein ökonomisches, wie auch ein ökologisches Optimum oder Maximum erreichbar sind. Beide sind aber meist nicht identisch, sodass entschieden werden muss, ob der ökonomischen oder ökologischen Optimierung gefolgt werden soll. Es ergibt sich in beiden Fällen unter projektspezifischen Rahmenbedingungen ein jeweils eindeutiges Optimum oder Maximum beim Einsatz von Wärmerückgewinnungssystemen. 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. Im ersten Teil der Veröffentlichung werden die Grundlagen der Optimierung dargestellt, während im zweiten Teil, der in der GI 3/2019 erscheint, der Einfluss des Einsatzes der WRG in Europa unter verschiedenen Rahmenbedingungen untersucht wird.

VON  
CHRISTOPH KAUP

## A Multi-Dimensional and Relational Optimization Method of Heat Recovery Systems (Part 1)

*Heat recovery is an important efficiency measure in building technology. It is fundamentally to be positively assessed, that the Ecodesign Regulation has created a framework for the mandatory use of this technology. This is also confirmed by the accompanying studies, which have basically confirmed the heat recovery as a very economic measure in a macro-economic context. Since, in individual cases, due to the different framework conditions, the income of the heat recovery can vary widely and can also lead to negative results, the question inevitably arises, as to whether it would not be more sensible, to demand an economical optimum or maximum on the basis of individual framework conditions in each individual case, rather than giving preference to general determinations, since the optima shift significantly due to the different framework conditions. The multidimensional optimization on the basis of a relational calculation methodology can easily show which sensible possibilities can arise in any cases. It can be seen that an economic as well as an ecological optimum or maximum can be achieved. However, as expected, both are not identical, so it must be decided whether the economic or ecological optimization is to be followed. In both cases, a respective optimum or maximum is obtained with the use of heat recovery systems under project-specific conditions. Thus, the establishment of an optimal heat recovery can in any case prevent an economic or ecological potential being omitted through a too small or a too big heat recovery. This makes sense from a micro as well as a macro economic point of view, since the sum of the business optimizations must lead to a macro economic optimization. The first part of the paper presents the basics of 3D optimization method, while the second part examines the influence of the use of heat recovery in Europe under different framework conditions.*

### 1. Effizienz der Wärmerückgewinnung (WRG)

Die Güte eines Wärmerückgewinnungssystems (WRS) wird maßgeblich durch den Temperaturänderungsgrad, auch Rückwärmzahl ( $\Phi$ ), 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.

Die maximal mögliche Leistung wird durch das Temperaturpotenzial, also die Temperaturdifferenz zwischen Abluft ( $\vartheta_1'$ ) und Außenluft ( $\vartheta_2''$ ), gebildet.

Damit ergibt sich ohne Änderung der Feuchte (trockener Betrieb) und der Zulufttemperatur ( $\vartheta_2''$ ) der Temperaturänderungsgrad mit:

$$\Phi_t = (\vartheta_2'' - \vartheta_2') / (\vartheta_1' - \vartheta_2') \quad (1)$$

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.

### 2. 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:

$$P_{el} = \dot{V} \cdot \Delta p_{WRG} \cdot 1 / \eta + P_{aux.} \quad (2)$$

Hierauf greift sowohl die aktuelle Fassung der DIN EN 13053 [1] als auch die Fassung aus 2007 zurück, die selbst heute noch in der Energieeinsparverordnung EnEV zitiert wird.

In der Verordnung EU 1253/2014 [2] 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:

$$SFP_{int} = P_{el} / \dot{V} = \Delta p_{int} / \eta \quad (3)$$

### 3. Beurteilung der Entwicklung der WRG unter ökonomischen Gesichtspunkten

Die WRG hat sich in Deutschland sicherlich sehr positiv entwickelt. Sie zählt zu den wirtschaftlichsten Maßnahmen der Energieeffizienzsysteme. Daher erschien es in der Tat geboten, die WRG verpflichtend festzuschreiben. Diese Festlegung ist 2016 mit der EU-Verordnung EU 1253/2014 erfolgt. Diese EU-Verordnung 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 mit Gültigkeit der zweiten Stufe seit 2018 volkswirtschaftlich und statistisch gesehen eine signifikante Verbesserung (mindestens 68 (KVS) bis 73 %) erwirken wird, da bereits seit 2011 in Deutschland ein mittlerer Temperaturübertragungsgrad von 68 % und damit dem Niveau der ersten Stufe entsprechend statistisch erreicht wurde [3].

Nichtsdestotrotz stellt sich immer häufiger die Frage, ob die generellen Mindestanforderungen in allen Einzelfällen sinnvoll sind und zu positiven Ergebnissen führen. Die Grundidee der Verordnung basiert auf dem politischen Willen, Energie und CO<sub>2</sub>-Emissionen einzusparen. Jedenfalls darf sie nicht dazu führen, dass es in Einzelfällen zur Verschwendung von Energie 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.

### 4. Das ökonomische Optimum der WRG auf Basis der Jahresenergiebetrachtung

Um Wärmerückgewinnungssysteme 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 erhaltenen Nutzen in Form von thermischen Energien bewertet.

Dabei kann neben den gesetzlichen Forderungen auch mithilfe 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, beispielsweise auf Basis der in DIN 4710 [4] oder VDI 4710 [5] vorliegenden meteorologischen Temperaturverteilung für den betreffenden Aufstellungsort der WRG die Jahresenergieberechnungen durchzuführen. 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 je Stunde entnommen werden. Nun müssen in einem Jahresgang-Berechnungsverfahren für jeden Außenluftzustand die Zustände der WRG in Abhängigkeit der Sollwerte berechnet werden.

#### Optimierung der WRG

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) erfolgen.

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

$$NTU = (k \cdot A) / \dot{W} \quad (4)$$

Ebenfalls muss das Wärmekapazitätsstromverhältnis ( $\mu$ ) aus Zu- und Abluft bestimmt werden:

$$\mu = \dot{W}_1 / \dot{W}_2 = \dot{m}_1 \cdot c_{p1} / (\dot{m}_2 \cdot c_{p2}) \quad (5)$$

Die Kennzahl NTU ist somit bei konstanter k-Zahl und konstantem Massenstrom der Luft proportional zur Fläche der WRG und repräsentiert somit die Fläche, die sich bei konstanter Querschnittsfläche linear zur Bautiefe des Wärmeübertragers (WÜ) verhält.

Sie errechnet sich im Gegenstrom aus:

$$NTU = 1 / (1 - \mu) \cdot \ln ((1 - \mu \cdot \Phi) / (1 - \Phi)) \quad (6)$$

bzw. bei  $\mu = 1$  aus:

$$NTU = \Phi / (1 - \Phi) \quad (7)$$

Unter der Voraussetzung, dass sich Aufwendungen und Erträge der WRG entweder proportional zum NTU (damit zur wärmeübertragenden Fläche bei konstanter Geschwindigkeit) oder zur Rückwärmzahl ( $\Phi$ ) 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 ( $\Phi_i$ ) bestimmt:

$$\Phi_i = (1 - e^{-(\mu - 1) \cdot NTU_i}) / (1 - \mu \cdot e^{-(\mu - 1) \cdot NTU_i}) \quad (8)$$

bzw. bei  $\mu = 1$  aus:

$$\Phi = NTU / (NTU + 1) \quad (9)$$

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

- Direkt NTU-abhängig
  - ▶ Kosten der WRG
    - Kapitalkosten

- Wartungs- und Unterhaltungskosten
- Elektroenergie durch den Druckabfall der Wärmerückgewinnung (bei konstanter Anströmfläche)
- Direkt  $\Phi$ -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
  - ▶ Mehrinvestition der WRG
    - Z. B. Wasseraufbereitung für eine Verdunstungskühlung

Jeder Rückwärmzahl ( $\Phi$ ) wird eindeutig sowohl der Aufwand als auch der Nutzen zugeordnet. Der Ertrag (E) 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 ( $\Phi$ ) einen geringeren Ertrag erwirtschaften [6].

## 5. Wirtschaftlichkeitsberechnungen am Beispiel

Im Folgenden werden am Beispiel 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. muss das Lastprofil der WRG und deren Standort definiert werden. Diese Faktoren bilden den Rahmen zur jeweiligen Optimierung im Einzelfall. Aus diesem Lastprofil (Nutzung) errechnen sich die Laufzeiten der WRG.

Als Wärmepreis wurde ein mittlerer Preis von gerundet 8 Cent/kWh gewählt. Dieser Wert ergibt sich für Deutschland aus 9,1 Cent/kWh für Öl (24 % Anteil), 4,5 Cent/kWh für Gas (46,7 % Anteil)

Tabelle 1: Funktion der WRG (Fall 1)

AL °C	RL °C	ETA %	WRG °C	ZL °C	dT °C	QWRG kW	Qzus. kW	Status
-8,5	20,0	68,0	10,9	20,5	19,4	96,1	47,7	
-7,5	20,0	68,0	11,2	20,5	18,7	92,8	46,1	
-6,5	20,0	68,0	11,5	20,5	18,0	89,4	44,6	
-5,5	20,0	68,0	11,8	20,5	17,3	86,0	43,0	
-4,5	20,0	68,0	12,2	20,5	16,7	82,7	41,4	
-3,5	20,0	68,0	12,5	20,5	16,0	79,3	39,8	
-2,5	20,0	68,0	12,8	20,5	15,3	75,9	38,2	
-1,5	20,0	68,0	13,1	20,5	14,6	72,5	36,6	
-0,5	20,0	68,0	13,4	20,5	13,9	69,2	35,0	
0,5	20,0	68,0	13,8	20,5	13,3	65,8	33,4	
1,5	20,0	68,0	14,1	20,5	12,6	62,4	31,9	
2,5	20,0	68,0	14,4	20,5	11,9	59,0	30,3	
3,5	20,0	68,0	14,7	20,5	11,2	55,7	28,7	
4,5	20,0	68,0	15,0	20,5	10,5	52,3	27,1	
5,5	20,0	68,0	15,4	20,5	9,9	48,9	25,5	
6,5	20,0	68,0	15,7	20,5	9,2	45,5	23,9	
7,5	20,0	68,0	16,0	20,5	8,5	42,2	22,3	
8,5	20,0	68,0	16,3	20,5	7,8	38,8	20,7	
9,5	20,0	68,0	16,6	20,5	7,1	35,4	19,2	
10,5	20,0	68,0	17,0	20,5	6,5	32,0	17,6	
11,5	20,0	68,0	17,3	20,5	5,8	28,7	16,0	
12,5	20,0	68,0	17,6	20,5	5,1	25,3	14,4	
13,5	20,0	68,0	17,9	20,5	4,4	21,9	12,8	
14,5	20,0	68,0	18,2	20,5	3,7	18,6	11,2	
15,5	20,0	68,0	18,6	20,5	3,1	15,2	9,6	
16,5	20,0	68,0	18,9	20,5	2,4	11,8	8,0	
17,5	20,0	68,0	19,2	20,5	1,7	8,4	6,4	
18,5	20,0	68,0	19,5	20,5	1,0	5,1	4,9	
19,5	20,0	68,0	19,8	20,5	0,3	1,7	3,3	
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	-7,4	AUS
22,5	22,5	0,0	22,5	22,5	0,0	0,0	-12,4	AUS
23,5	23,5	0,0	23,5	23,5	0,0	0,0	-17,4	AUS
24,5	24,5	0,0	24,5	24,5	0,0	0,0	-22,3	AUS
25,5	25,5	0,0	25,5	25,5	0,0	0,0	-27,3	AUS
26,5	26,0	68,0	26,2	20,0	-0,3	-1,7	-30,6	
27,5	26,0	68,0	26,5	20,0	-1,0	-5,1	-32,1	
28,5	26,0	68,0	26,8	20,0	-1,7	-8,4	-33,7	
29,5	26,0	68,0	27,1	20,0	-2,4	-11,8	-35,3	
30,5	26,0	68,0	27,4	20,0	-3,1	-15,2	-36,9	
31,5	26,0	68,0	27,8	20,0	-3,7	-18,6	-38,5	
32,5	26,0	68,0	28,1	20,0	-4,4	-21,9	-40,1	
33,5	26,0	68,0	28,4	20,0	-5,1	-25,3	-41,7	

Simulation unter konstanten Bedingungen nur trocken ohne Kondensation!

und 10,1 Cent/kWh für Fernwärme (9,2 % Anteil) und 3,8 Cent/kWh für Pellets (16,7 % Anteil), sowie 15 Cent/kWh für Strom (1,8 %) und 8 Cent/kWh für Kohle (1,6 %) [7]. Hieraus ergibt sich ein Mittelwert von 6,2 Cent/kWh. Unter Beachtung der Verteilverluste von 35 % ergibt sich ein Preis von 8,4 Cent/kWh. Für Kälteenergie wurde der Einfachheit halber der gleiche Wert verwendet. Für Strom in Deutschland wurden 15 Cent/kWh [8] gewählt.

Auf der ersten Ergebnisseite (siehe **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 (z. B. Zulufttemperatur (ZL) oder isothermer Betrieb (AUS)) ergibt.

Hieraus ergeben sich die Leistungen der WRG ( $\dot{Q}_{WRG}$ ) mit:

$$\dot{Q}_{WRG} = \dot{m}_2 \cdot c_{pL} \cdot (\vartheta_{WRG} - \vartheta_{AL}) \quad (10)$$

und der zusätzlich benötigten Leistung ( $\dot{Q}_{zus.}$ ) mit:

$$\dot{Q}_{zus.} = \dot{m}_2 \cdot c_{pL} \cdot (\vartheta_{ZL} - \vartheta_{WRG}) \quad (11)$$

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 zeigen sich die benötigten thermischen Arbeiten (Gesamt) und der Anteil, den die WRG, sowohl im Winter ( $W = 122.717$  kWh) als auch im Sommer ( $W = 1.892$  kWh), erbringen kann. Es wird auch deutlich, dass die WRG im Beispiel in  $L = 3.961$  h (79,1 % der Gesamtnutzungszeit) zur Deckung des Wärmebedarfs und zu  $L = 909$  h (18,2 % der Gesamtnutzungszeit im Beispiel  $L = 5.005$  h/a) zur Kühlung genutzt wird.

In **Bild 1** sind die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnung übersichtlich zusammengefasst (Werte für die Wirtschaftlichkeitsberechnung siehe **Tabelle 3**). Neben den Rahmenbedingungen wie Laufzeiten, Energiepreise, Zinssätze etc. wird der Kapitalwert der Ersparnisse, in diesem Fall nach  $n = 15$  Jahren Nutzungsdauer, kalkuliert und die Amortisation als Schnittpunkt der beiden Linien (abgezinsten Einnahmen und Ausgaben) dargestellt.

Die Amortisation liegt in diesem Fall bei  $a = 2,8$  Jahren. Der Kapitalwert der Ersparnisse liegt bei etwa  $KW = 72.579$  Euro (€) bei einem Volumenstrom von  $V = 14.400$  m<sup>3</sup>/h. Ebenfalls sind die Kennzahlen auf Basis des Jahresenergievergleiches (z. B. Jahresarbeitszahl der WRG mit  $JAZ = 10,6$ ) aufgeführt.

Heute wird jedoch immer häufiger die Frage gestellt, mit welchem „optimalen“ Übertragungsgrad der höchste Ertrag erzielt werden kann? Diese Frage beantwortet diese Optimierung der WRG nur teilweise, da im Beispiel durch die Variation der Bautiefe und damit bei konstantem Strömungsquerschnitt die wärmeübertragende Fläche oder NTU der WRG nur eindimensional dargestellt wird.

**Bild 2** zeigt die Ermittlung des eindimensionalen, relationalen Optimums der WRG bei Veränderung der Bautiefe der WRG. Jedem Temperaturübertragungsgrad im Bereich zwischen  $\Phi_t = 30$  % und  $\Phi_t = 70$  % wird der erforderliche Aufwand und der mögliche Nutzen der WRG gegenübergestellt. Der Differenzbetrag stellt den Ertrag pro Jahr dar.

Der höchste Ertrag mit  $E = 5.884$  €/a wird im Beispiel mit einem Temperaturübertragungsgrad von  $\Phi_t = 63$  % erreicht.

Da die Ertragskurve im Bereich des Optimums relativ flach verläuft, kann bei Akzeptanz eines Toleranzbereichs von beispielsweise  $\pm 1$  % der Kosten ein optimaler Bereich des Temperaturübertragungsgrades in diesem Fall von  $\Phi_t = 60$  bis  $\Phi_t = 67$  % bestimmt werden.

Mit diesem Optimum wäre die erste Stufe der Ökodesignverordnung (mindestens  $\Phi_t = 63$  %, für Kreislaufverbundsysteme) erfüllt. Die zweite Stufe mit (mindestens  $\Phi_t = 68$  %) würde betriebswirtschaftlich zu einer WRG führen, die pro Jahr einen etwa 100 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  $w = 1,9$  m/s führt. Demzufolge läge im Beispiel die optimale Bautiefe bei  $b = 80$  % der ursprünglichen Auslegung mit einem Übertragungsgrad von  $\Phi_t = 68$  %.

Ändern sich beispielsweise 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 CO<sub>2</sub>-Emissionen durchzuführen.

Dabei werden sowohl die Aufwände, als auch der Nutzen der WRG analog zur beschriebenen monetären Berechnung in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten bewertet.

Tabelle 2: Energien der WRG

AL °C	Q WRG kW	Stunden Tag h/°C	Stunden Nacht h/°C	Wärme Gesamt kWh	Kälte Gesamt kWh	Wärme WRG kWh	Kälte WRG kWh
<-7,5	96,1	2		247		165	
-7,5	92,8	2	3	456		354	
-6,5	89,4	14	6	2.221		1.567	
-5,5	86,0	9	4	1.493		1.057	
-4,5	82,7	10	2	1.399		961	
-3,5	79,3	10	9	1.787		1.314	
-2,5	75,9	39	11	5.004		3.462	
-1,5	72,5	35	22	5.034		3.611	
-0,5	69,2	49	16	5.910		4.106	
0,5	65,8	75	31	9.027		6.329	
1,5	62,4	92	42	10.615		7.458	
2,5	59,0	91	38	9.823		6.866	
3,5	55,7	99	47	10.381		7.299	
4,5	52,3	99	60	10.265		7.282	
5,5	48,9	139	61	12.595		8.774	
6,5	45,5	135	63	11.616		8.086	
7,5	42,2	162	56	12.264		8.420	
8,5	38,8	170	65	12.036		8.270	
9,5	35,4	151	56	9.758		6.655	
10,5	32,0	129	50	7.653		5.202	
11,5	28,7	133	65	7.395		5.059	
12,5	25,3	151	60	7.186		4.834	
13,5	21,9	147	67	6.286		4.213	
14,5	18,6	153	58	5.415		3.561	
15,5	15,2	159	55	4.616		2.969	
16,5	11,8	153	47	3.485		2.169	
17,5	8,4	138	45	2.395		1.414	
18,5	5,1	172	39	1.901		1.013	
19,5	1,7	133	30	740		260	
20,5	0,0	104	32				
21,5	0,0	127	31		1.054		
22,5	0,0	132	29		1.816		
23,5	0,0	160	16		2.928		
24,5	0,0	86	11		2.032		
25,5	0,0	71	7		2.036		
26,5	-1,7	58	4		1.941		104
27,5	-5,1	60	4		2.306		320
28,5	-8,4	34	3		1.507		304
29,5	-11,8	26	3		1.272		324
30,5	-15,2	24	1		1.280		376
31,5	-18,6	5	1		310		103
32,5	-21,9	14			850		300
> 32,5	-25,3	3			172		65
<b>Gesamt Jahr</b>	<b>Meteon. Frankfurt</b>	<b>3.754</b>	<b>1.251</b>	<b>178.988</b>	<b>19.499</b>	<b>122.717</b>	<b>1.892</b>
						<b>3.961 h</b>	<b>909 h</b>

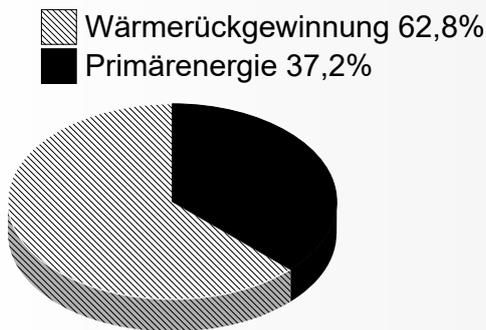


Bild 1: Zusammenfassung der Wirtschaftlichkeitsberechnung (siehe auch Tabelle 3).

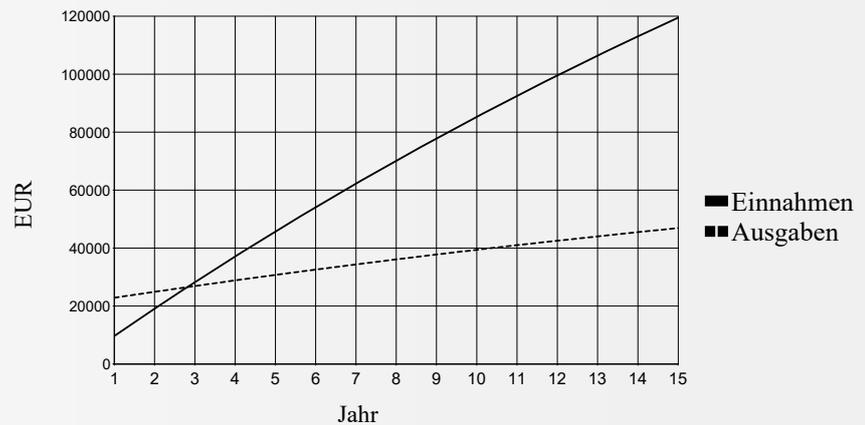


Bild 3 zeigt die Ermittlung des eindimensionalen und ebenfalls relational berechneten Optimums der WRG auf der Basis von CO<sub>2</sub>-Äquivalenten. Dabei wird dem Nutzen der WRG der Aufwand in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten gegenübergestellt.

Im Beispiel wurde für die Wärmeerzeugung CO<sub>2</sub>-Äquivalente von CO<sub>2</sub>eMix = 300 g eCO<sub>2</sub>/kWh (Wärmemix. in der BRD inkl. Verteilverluste von 35 % nach DIN SPEC 15420) [9] und für den elektrischen Aufwand (Strommix) von CO<sub>2</sub>eStrom = 520 g eCO<sub>2</sub>/kWh [10] ausgewählt. Des Weiteren müssen aber auch die zusätzlichen Aufwände zur Herstellung der WRG, zur Wartung etc. in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten berücksichtigt werden. Hierzu wird als „sekundärer CO<sub>2</sub>-Fußabdruck“ sowohl für die Herstellung der WRG CO<sub>2</sub>e<sub>inv</sub> = 500 eCO<sub>2</sub>/kWh, als auch für die sonstigen Betriebskosten ein Mittelwert von CO<sub>2</sub>e<sub>cost</sub> = 200 eCO<sub>2</sub>/kWh gewählt [11]. Aus dieser Optimierung ist zu erkennen, dass sich unter diesen Bedingungen das Optimum sehr deutlich von Φ<sub>t</sub> = 63 % (monetäre Bewertung) auf nun Φ<sub>t</sub> = 75 % verschiebt. Im Beispiel wird also bei einer Rückwärmzahl von Φ<sub>t</sub> = 75 % das größte Potenzial (hier C = 30.853 kg/a) zurückgewonnen.

Auch macht dieses Beispiel deutlich, dass die Basis einer Optimierungsrechnung einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis hat. Liegt der Betrachtungsfokus einer WRG auf der möglichen CO<sub>2</sub>-Einsparung, wäre unter diesen Voraussetzungen eine WRG mit einem deutlich höheren Temperaturübertragungsgrad (Φ<sub>t</sub> = 0,75) sinnvoll, während aus rein monetärer Sicht eine „kleinere“ WRG mit niedrigerem Übertragungsgrad (Φ<sub>t</sub> = 0,63) 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“

Tabelle 3: Werte für die Wirtschaftlichkeitsberechnung

Energiekosten Wärme	0,080 € / kWh
Energiekosten Kälte	0,080 € / kWh
Energiekosten Elektro	0,150 € / kWh
Wasserkosten (inkl. Abwasser)	6,00 € / m <sup>3</sup>
Kalkulationszinsfuß	5,00 %
Preissteigerungsrate	2,00 %
Klimazone/ Standort	Frankfurt
Nutzungsdauer der Anlage	15 a
Betriebstage pro Woche	6 d / w
Betriebstunden pro Tag	12 h / d
Betriebsstunden pro Nacht	4 h / d
Volumenstrom am Tag	100 % / V max
Volumenstrom in der Nacht	50 % / V max
Investitionskosten der WRG	20.766 €
Mehr-/Minderinvestition für die WRG	0 €
Minderinvestition für Wärmeerzeugung	0 € / (0 € / kW)
Minderinvestition für Kälteerzeugung	0 € / (0 € / kW)
Zusatzkosten je Jahr	0 €
Rückgewinn der WRG Wärme	9.817 € / a
Rückgewinn der WRG Kälte	151 € / a
Elektroenergiekosten für die WRG	1.767 € / a
Kapitalkosten für die WRG	2.001 € / a
Wartungs- und Unterhaltungskosten	415 € / a
Jährliche Differenzkosten	5.785 € / a
Kapitalwert der Ersparnisse	72.579 €
Kalkulationszinsfuß	40,0 %
Amortisation	2,8 a
Jahresnutzungsgrad (bezogen auf Energien)	62,8 %
Jahresarbeitszahl nach EN 13053	10,6
Leistungszahl nach EN 13053	21,9
Effektiver Jahreswirkungsgrad EN 13053	64,9 %

rund C = 28,5 Tonnen CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Jahr vermieden werden, statt des optimalen Werts

## WRG-SYSTEME OPTIMIERUNG (ökonomisch / WRG Anströmfläche konstant)

Effizienz WRG	Bautiefe zur Auslegung	Nutzen €/a	Aufwand €/a	Ertrag €/a
30,0 %	20,2 %	4398,0 €	843,7 €	3554,3 €
35,0 %	25,3 %	5131,0 €	1060,0 €	4070,9 €
40,0 %	31,4 %	5864,0 €	1312,4 €	4551,5 €
45,0 %	38,5 %	6596,9 €	1610,7 €	4986,2 €
50,0 %	47,1 %	7329,9 €	1968,6 €	5361,3 €
55,0 %	57,5 %	8062,9 €	2406,1 €	5656,8 €
60,0 %	70,6 %	8795,9 €	2953,0 €	5843,0 €
<b>63,0 %</b>	<b>80,1 %</b>	<b>9235,7 €</b>	<b>3352,0 €</b>	<b>5883,7 €</b>
65,0 %	87,4 %	9528,9 €	3656,1 €	5872,9 €
70,0 %	109,8 %	10261,9 €	4593,5 €	5668,4 €

Kosten (Nutzen, Aufwand und Ertrag der WRG) pro Jahr

Auslegung mit einer Luftgeschwindigkeit im Zu- und Abluftgerätequerschnitt 1,90 m/s - 68,0 %

### Optimale Rückwärmzahl der WRG **63 % ( 60 - 67 % )**

Berechnung auf Basis der Wirtschaftlichkeitsberechnung und deren Rahmenbedingungen (Toleranzband ± 1 % der Kosten)

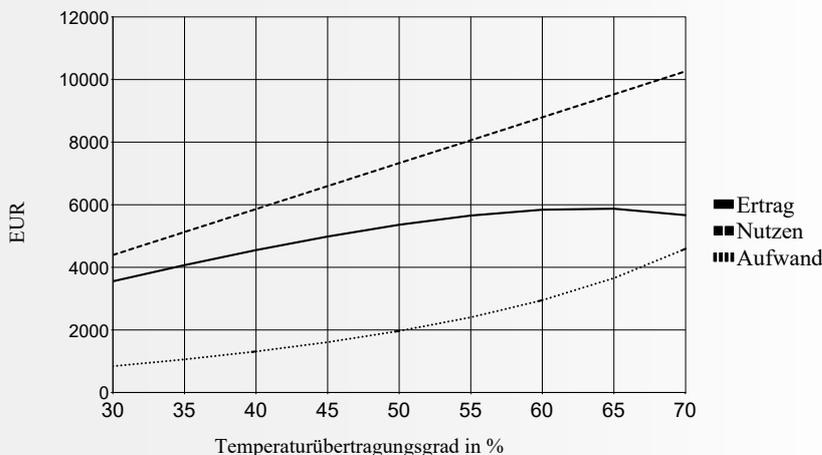


Bild 2: Optimum der Wärmerückgewinnung.

von rund  $C = 30,9$  Tonnen pro Jahr. Umgekehrt würde bei der Wahl des ökologisch optimalen Systems mit  $\Phi_t = 75\%$  zwar  $C = 30,9$  Tonnen  $\text{CO}_2/\text{a}$  vermieden werden, aber monetär läge der Ertrag bei nur noch rund  $E = 5.450$  €/a gegenüber dem monetären Optimum von rund  $E = 5.880$  €/a. Die eindimensionale Optimierung (sowohl monetär als auch ökologisch) setzt allerdings voraus, dass der Anströmquerschnitt, also Höhe und Breite der WRG, konstant bleibt. 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.

## 6. 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.

Zur Berechnung einer Vielzahl von Optimierungen auf Basis von Einzelauslegungen erscheint das klassische Verfahren daher zu kompliziert und zu aufwändig. Außerdem basiert es auf einer rein theoretischen Bestimmung der k-Zahl, die eine messtechnische Verifizierung 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 Grunde 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 Messung ergibt, aufgrund der sich ändernden Luft- und Medientgeschwindigkeiten mit folgender Gleichung nach Kaup korrigiert [12]:

$$k_{\text{korr}} = k_{\text{org}} \cdot (w_{L \text{ korr}} / w_{L \text{ org}})^{0,4} \cdot (w_{W \text{ korr}} / w_{W \text{ org}})^{0,4} \quad (12)$$

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 der Näherungsgleichung nach Kaup [13] zur Umrechnung von Temperaturänderungsgraden von Wärmerückgewinnungssystemen ab.

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

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

$$k_{\text{korr}} = k_{\text{org}} \cdot (w_{1 \text{ korr}} / w_{1 \text{ org}})^{0,4} \cdot (w_{2 \text{ korr}} / w_{2 \text{ org}})^{0,4} \quad (13)$$

### 7. 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:

$$\Delta p = \xi \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot w^2 \quad (14)$$

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 1,4 bis 1,7.

### 8. 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 Bautiefe der WRG durch Iteration nach den beschriebenen Verfahren bestimmt.

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

Mit diesen sich ergebenden k-Zahlen werden dann in einer zweiten Schleife die Bautiefe des WÜs 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.

#### WRG-SYSTEME OPTIMIERUNG (ökologisch / WRG Anströmfläche konstant)

Effizienz WRG	Bautiefe zur Auslegung	Nutzen kg CO2/a	Aufwand kg CO2/a	Reduktion kg CO2/a
30,0 %	20,2 %	16366	1437	14929
35,0 %	25,3 %	19094	1806	17288
40,0 %	31,4 %	21821	2236	19585
45,0 %	38,5 %	24549	2744	21805
50,0 %	47,1 %	27277	3354	23923
55,0 %	57,5 %	30004	4099	25905
60,0 %	70,6 %	32732	5031	27701
65,0 %	87,4 %	35460	6229	29231
70,0 %	109,8 %	38187	7826	30361
<b>75,0 %</b>	<b>141,2 %</b>	<b>40915</b>	<b>10062</b>	<b>30853</b>
80,0 %	188,2 %	43643	13416	30226
85,0 %	266,7 %	46370	19006	27364

CO2-Emissionen (Einsparung, Aufwand und Nettoertrag der WRG)

CO2e-Äquivalente pro Jahr berechnet mit 300 g/kWh Wärme, 520 g/kWh Strom, sowie 500 g/€ WRG Invest und sonstige Betriebskosten 200 g/€

Auslegung mit einer Luftgeschwindigkeit im Zu- und Abluftgerätequerschnitt 1,90 m/s - 68,0 %

Auslegung mit einer CO2 Einsparung von 30,0 to/a

#### Optimale Rückwärmzahl der WRG 75 % ( 72 - 78 % )

Berechnung auf Basis der Wirtschaftlichkeitsberechnung und deren Rahmenbedingungen (Toleranzband ± 1 % der CO2-Emissionen)

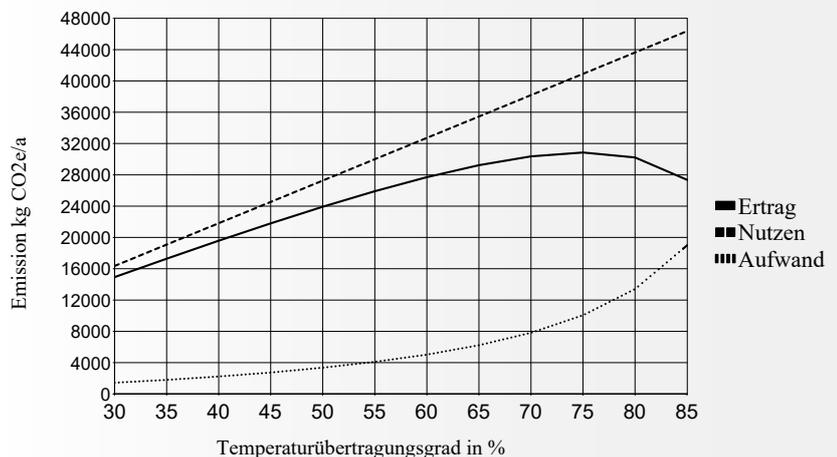


Bild 3: Optimum der Wärmerückgewinnung auf Basis von CO2-Äquivalenten.

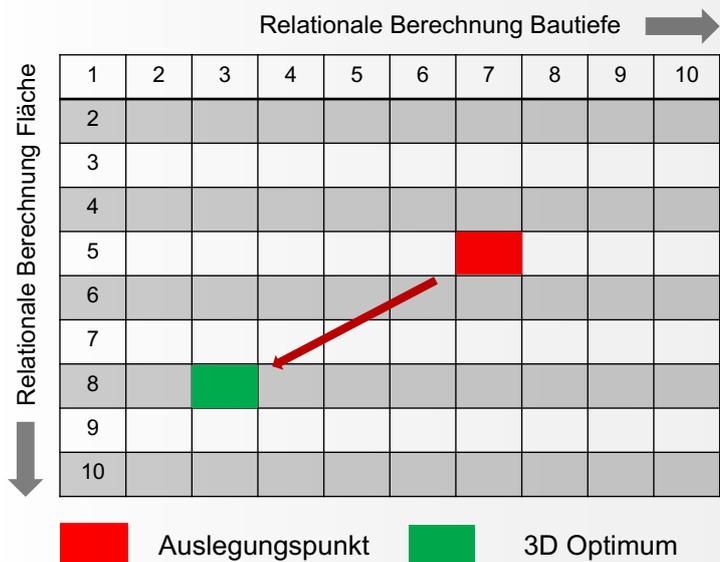


Bild 4: Relative Optimierung nach Fläche und Bautiefe.

## WRG-SYSTEME OPTIMIERUNG (ökonomisch / mehrdimensional)

Effizienz WRG	Q.-Fläche bez. 2 m/s	w in m/s	Bautiefe zur Auslegung	Nutzen €/a	Aufwand €/a	Ertrag €/a
16,7 %	53,7 %	3,73 m/s	14,1 %	2443,3 €	2050,2 €	393,1 €
33,3 %	62,3 %	3,21 m/s	32,2 %	4886,6 €	3207,5 €	1679,1 €
47,4 %	71,9 %	2,78 m/s	53,2 %	6944,2 €	3809,0 €	3135,1 €
54,5 %	83,1 %	2,41 m/s	65,1 %	7996,3 €	3562,0 €	4434,3 €
61,5 %	96,2 %	2,08 m/s	79,5 %	9021,5 €	3583,7 €	5437,8 €
64,3 %	112,0 %	1,79 m/s	81,6 %	9424,2 €	3309,4 €	6114,8 €
66,7 %	131,9 %	1,52 m/s	82,2 %	9773,3 €	3299,9 €	6473,4 €
<b>66,7 %</b>	<b>152,3 %</b>	<b>1,31 m/s</b>	<b>75,4 %</b>	<b>9773,3 €</b>	<b>3221,9 €</b>	<b>6551,3 €</b>
66,7 %	158,3 %	1,26 m/s	73,7 %	9773,3 €	3229,5 €	6543,7 €
65,5 %	196,1 %	1,02 m/s	61,6 %	9604,8 €	3260,4 €	6344,3 €
63,0 %	258,2 %	0,77 m/s	46,7 %	9230,3 €	3392,9 €	5837,4 €

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 1,90 m/s - 68,0 %

### Maximal sinnvolle Rückwärmzahl der WRG **66,7 %**

Berechnung auf Basis der Wirtschaftlichkeitsberechnung und deren Rahmenbedingungen (Toleranzband ca. 2 % der max. Erträge)

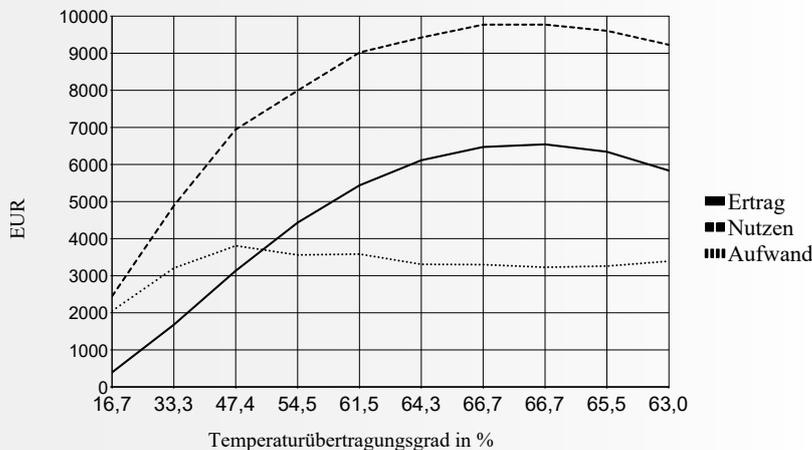


Bild 5: Das mehrdimensionale monetäre Maximum der WRG.

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 ergeben 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 (siehe Bild 4).

Bild 5 stellt das Ergebnis der relationalen mehrdimensionalen Optimierungsrechnung am Beispiel dar. Aus den Ergebnissen wird deutlich, dass es nicht als sinnvoll erscheint, den Übertragungsgrad der WRG über  $\Phi_t = 66,7\%$  zu steigern.

Im vorliegenden Beispiel würde der sinnvolle Übertragungsgrad mit einem Querschnitt von

152 %, also mit  $w = 1,31$  m/s bei einer Bautiefe von  $b = 75\%$  zur ursprünglichen Auslegung erreicht werden. Der Ertrag dieser mehrdimensionalen Optimierungsrechnung würde dann auf  $E = 6.551$  €/a gegenüber der ursprünglichen Auslegung mit  $E = 5.884$  €/a (+11 %) steigen. Unter 1,3 m/s sinkt die Wärmeübertragerleistung und damit der Übertragungsgrad überproportional.

Alternativ kann bei einer möglichen räumlichen (geometrischen) Beschränkung der WRG das maximale mögliche Optimum bestimmt werden.

Es wird an diesem Beispiel ersichtlich, dass es auch aus ökonomischer Sicht sinnvoll ist, die WRG mit niedrigen Luftgeschwindigkeiten zu betreiben, damit einerseits der Übertragungsgrad steigt und andererseits der elektrische Aufwand bedeutend sinkt.

Selbstverständlich lässt sich auch die mehrdimensionale relationale Optimierungsrechnung nicht nur monetär, sondern auch auf Basis von CO<sub>2</sub>-Äquivalenten durchführen (siehe Bild 6).

In diesem Fall könnte ebenfalls bei einer Luftgeschwindigkeit von rund  $w = 0,7$  m/s eine CO<sub>2</sub>-Reduktion von  $C = 41.191$  kg/a erreicht werden. Hier allerdings mit einer Bautiefe der WRG von ca.  $b = 161\%$  zur ursprünglichen Auslegung und damit mit einer rund doppelt so großen Bautiefe, als dies unter monetären Gesichtspunkten sinnvoll wäre. Damit könnte die CO<sub>2</sub>-Einsparung von ursprünglich  $C = 28,5$  Tonnen pro Jahr deutlich auf 40,2 Tonnen erhöht werden (+41 %). 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 [14].

## 8.1 Änderung der Bilanzgrenze

### (Minderung der Wärme- und Kälteerzeugung)

Kann beispielsweise durch die WRG die Wärme- und Kälteerzeugung minimiert werden, ergibt sich bei der ursprünglichen Auslegung ( $L = 5.005$  h/a) folgende Situation:

Die Einsparung auf der Wärmeseite ergibt sich aus einer Minderung auf der Erzeugerseite von  $Q_{WRG} = 96,1$  KW bei  $\vartheta = -8,5$  °C. Durch die WRG sind nur noch  $Q_H = 47,7$  KW statt ursprünglich  $Q_H = 143,8$  KW Wärmeleistung erforderlich. Bei einer mittleren Einsparung von  $\Delta Q = 116$  €/KW beim Heizkessel ergibt sich somit eine Einsparung auf der Erzeugerseite von  $E = 11.148$  €.

Bei der Kälteerzeugung werden durch die WRG  $Q_{WRG} = 25,3$  KW Kälteleistung bei  $\vartheta = 33,5$  °C eingespart. Statt  $Q_K = 67$  KW werden durch die WRG noch 41,7 KW benötigt. Hieraus ergibt sich ein Potenzial durch Minderung der Kälteerzeugung von 9.032 € (357 €/KW).

Die Investition der WRG von  $I = 20.766$  € wird damit um  $\Delta I = 20.180$  € auf  $I = 586$  € minimiert, also fast substituiert. Hierdurch könnte sich der Kapitalwert der Ersparnisse von  $KW = 72.579$  € auf  $KW = 97.597$  € erhöhen. Die Amortisation läge statt  $a = 2,8$  Jahren dann bei unter einem Jahr.

Das eindimensionale Optimum verschiebt sich von  $\Phi_t = 63$  % auf  $\Phi_t = 68$  %. Die jährlichen Differenzkosten erhöhen sich von  $E = 5.884$  €/a auf  $E = 8.133$  €/a. Das mehrdimensionale Optimum würde von  $\Phi_t = 67,7$  % auf  $\Phi_t = 68,8$  % bei 1,12 m/s steigen, wobei die jährlichen Differenzkosten damit von  $E = 6.551$  €/a auf  $E = 9.234$  €/a ansteigen würden.

### 8.2 Änderung der Rahmenbedingungen (Laufzeit)

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

Wird beispielsweise im oben genannten Berechnungsbeispiel die Laufzeit der Anlage von  $L = 5.005$  h/a auf  $L = 8.760$  h/a (sieben Tage pro Woche mit 24 h/Tag, nachts abgesenkter Betrieb mit 50 % der Nennluftmenge) erhöht, so ergeben sich folgende Ergebnisse:

Die WRG wird in  $L = 7.213$  h/a zur Deckung des Wärmebedarfs und in  $L = 1.314$  h/a zur Kühlung herangezogen. Die Amortisationsdauer verkürzt sich von  $a = 2,8$  Jahre auf 1,5 Jahre. Der Kapitalwert der Ersparnisse verdoppelt sich etwa von  $KW = 72.579$  € auf  $KW = 147.060$  €.

Das eindimensionale, ökonomische Optimum steigt von  $\Phi_t = 63$  % auf  $\Phi_t = 70$  %. In diesem Fall wäre die zweite Stufe der Ökodesignverordnung auch betriebswirtschaftlich sinnvoll erreichbar.

Das mehrdimensionale, monetäre Maximum würde sich von  $\Phi_t = 67,7$  % auf  $\Phi_t = 73,7$  % verschieben. Mit diesem mehrdimensionalen Maximum würde in diesem Beispiel der Ertrag von  $E = 6.544$  €/a auf  $E = 13.405$  €/a erhöht werden. Im ersten Beispiel mit geringerer Laufzeit lagen die Erträge bei  $E = 5.884$  €/a (eindimensional) und  $E = 6.544$  €/a (mehrdimensional). Die sinnvolle

#### WRG-SYSTEME OPTIMIERUNG (ökologisch / mehrdimensional)

Effizienz WRG	Q.-Fläche bez. 2 m/s	w in m/s	Bautiefe zur Auslegung	Nutzen kg CO2/a	Aufwand kg CO2/a	Reduktion kg CO2/a
16,7 %	62,3 %	3,21 m/s	12,9 %	9092	7428	1664
37,5 %	71,9 %	2,78 m/s	35,5 %	20457	13359	7098
50,0 %	83,1 %	2,41 m/s	54,2 %	27277	13465	13812
61,5 %	96,2 %	2,08 m/s	79,5 %	33571	13070	20502
69,7 %	112,0 %	1,79 m/s	104,3 %	38022	11411	26610
76,2 %	131,9 %	1,52 m/s	131,5 %	41564	9713	31851
81,1 %	158,3 %	1,26 m/s	158,4 %	44260	8235	36025
84,4 %	196,1 %	1,02 m/s	175,0 %	46029	7130	38899
85,7 %	258,2 %	0,77 m/s	164,8 %	46760	6597	40162
<b>85,9 %</b>	<b>276,3 %</b>	<b>0,72 m/s</b>	<b>160,9 %</b>	<b>46870</b>	<b>6685</b>	<b>40184</b>
84,8 %	395,6 %	0,51 m/s	119,1 %	46288	7057	39230

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 Abluftgerätequerschnitt 1,90 m/s - 68,0 %

Auslegung mit einer CO2 Einsparung von 30,0 t/a

#### Maximal sinnvolle Rückwärmzahl der WRG 85,9 %

Berechnung auf Basis der Wirtschaftlichkeitsberechnung und deren Rahmenbedingungen (Toleranzband ca. 2 % der max. CO2 Reduktion)

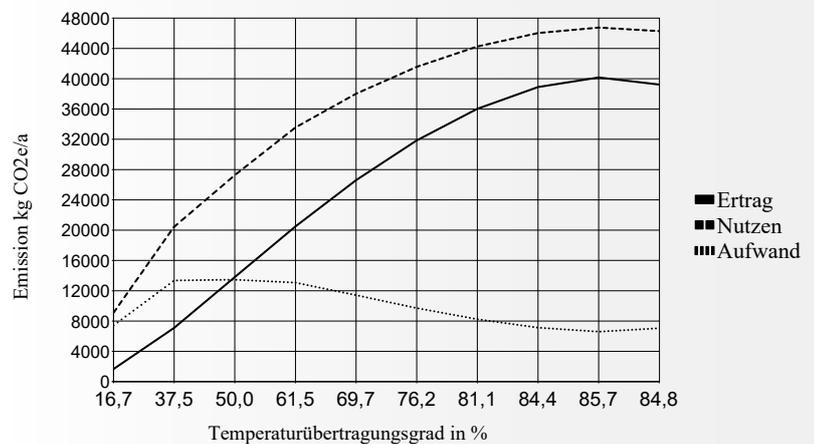


Bild 6: Das mehrdimensionale ökologische Maximum der WRG.

Luftgeschwindigkeit würde ebenfalls bei rund  $w = 1,3$  m/s liegen.

Das ökologische Optimum basierend auf CO<sub>2</sub>-Äquivalenten würde sich von  $\Phi_t = 75$  % auf einen Übertragungsgrad von  $\Phi_t = 79$  % 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  $C = 30.692$  kg/a auf  $C = 56.552$  kg/a. Das mehrdimensionale ökologische Maximum verschiebt sich von  $\Phi_t = 85,9$  % auf  $\Phi_t = 88,1$  %. Absolut werden statt  $C = 40.191$  kg/a nun  $C = 72.186$  kg/a CO<sub>2</sub>-Emissionen eingespart. In diesem Fall läge die sinnvolle Luftgeschwindigkeit bei rund  $w = 0,7$  m/s.

## 9. Fazit

Zusammenfassend ist die WRG unter betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten 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. 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 zur Erreichung des maximalen Ertrags der WRG die Auslegungsluftgeschwindigkeiten signifikant sinken müssen (ca. 1,2 m/s), um sowohl den thermischen Übertragungsgrad, als auch den SFP-Wert einhalten und den maximalen Ertrag erreichen zu 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, sodass entschieden werden muss, ob der ökonomischen oder ökologischen Optimierung oder Maximierung gefolgt werden soll. Es ergibt sich in beiden Fällen unter projektspezifischen Rahmenbedingungen ein jeweils eindeutiges Optimum oder Maximum der Erträge beim Einsatz von WRS.

Kritisch muss allerdings beachtet werden, dass zu niedrige Geschwindigkeiten (unter 1,0 m/s) zu Problemen im Teillastbetrieb führen können, da die Anlagen meist im Teillastbetrieb betrieben werden.

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.

Im zweiten Teil der Veröffentlichung, der in der GI 3/2019 erscheint, wird der Einfluss der Rahmenbedingungen der WRG in Europa betrachtet. Neben dem Einfluss des Standortes werden die Einflüsse der Laufzeit, der Energiepreise und der Abluft- und Sollwerttemperaturen beschrieben.

## Literatur

- [1] DIN EN 13053: Lüftung von Gebäuden – Zentrale raumluftechnische Geräte – Leistungskennndaten für Geräte, Komponenten und Baueinheiten. Deutsche Fassung EN 13053:2012-02.
- [2] Verordnung (EU) Nr. 1253/2014 der Kommission vom 07.07.2014 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] Kaup, Christoph.: Studie zur Entwicklung des Energiebedarfs in RLT-Anlagen, UCB 2015.
- [4] DIN 4710: Statistiken meteorologischer Daten zur Berechnung des Energiebedarfs von heiz- und raumluftechnischen Anlagen in Deutschland: 2003-01.
- [5] VDI 4710 Blatt 1: Meteorologische Grundlagen für die Technische Gebäudeausrüstung, 2013-03.
- [6] Kaup, Christoph: Wirtschaftliche Bewertung und Optimierung von Wärmerückgewinnungssystemen. HLH 06/2012, Springer-VDI-Verlag.
- [7] Destatis: [www.destatis.de/Europa/DE/Thema/Umwelt-Energie/Energiemix.html](http://www.destatis.de/Europa/DE/Thema/Umwelt-Energie/Energiemix.html), (abgerufen am 20.03.2019).
- [8] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: [www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/Energiemix/energiemix-gesamt-pdf-grafiken.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=38](http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/Energiemix/energiemix-gesamt-pdf-grafiken.pdf?__blob=publicationFile&v=38), Tabelle 39, (abgerufen am 20.03.2019).
- [9] Umweltbundesamt: [www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/publikationen/co2-emissionsfaktoren\\_fur\\_fossile\\_brennstoffe\\_korrektur.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/publikationen/co2-emissionsfaktoren_fur_fossile_brennstoffe_korrektur.pdf), (abgerufen am 20.03.2019).
- [10] Umweltbundesamt: [www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-05-22\\_climate-change\\_15-2017\\_strommix.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-05-22_climate-change_15-2017_strommix.pdf), (abgerufen am 20.03.2019).
- [11] Tuomas Mattila, Pekka Leskinen, Ilmo Mäenpää and Jyri Seppälä: An Environmentally Extended Input-Output Analysis to Support Sustainable Use of Forest Resources, Table 3. The Open Forest Science Journal, 2011, 4, Seite 15-23.
- [12] Kaup, Christoph: Berippte Wärmeübertrager, Näherungsgleichung zur k-Zahl-Berechnung. TGA-Fachplaner 03/2015, Gentner Verlag.
- [13] Kaup, Christoph: Referenzbetriebszustand. In: Recknagel, Sprenger, Albers (Hrsg.): Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik, 77. Auflage 2015/16, Bd. 2, Deutscher Industrie-Verlag, München, S. 1525.
- [14] Kaup, Christoph: Die mehrdimensionale Optimierung von Wärmerückgewinnungssystemen, Springer-VDI-Verlag, HLH 07-09/2017.

## Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

A	Wärmeübertragerfläche [m <sup>2</sup> ]
a	Amortisationsdauer [a]
AL	Außenluft
AUS	Isothermer Betrieb
b	Bautiefe [%]
C	CO <sub>2</sub> -Einsparung [kg/a]
CO <sub>2</sub> e	CO <sub>2</sub> -äquivalente Emissionen [g/kWh]
cp	spezifische Wärmekapazität [KJ/kg/K]

$\Delta p$	Druckabfall [Pa]
$\Delta Q$	Wärmeleistungsdifferenz [KW]
DI	Differenz der Investitionskosten [€]
$\eta$	Gesamtwirkungsgrad des Antriebs (z. B. Ventilatoren) [./.]
E	Ertrag [€]
ETA	Temperaturübertragungsgrad
EW1	Endwert 1
EW2	Endwert 2
ErP	Energy related product
F	Faktor [./.]
h	Stunde
JAZ	Jahresarbeitszahl [./.]
k	Wärmedurchgangskoeffizient [ $W / m^2 K$ ]
ke	Spezifische Kosten für Elektroenergie [€/kWh]
kk	Spezifische Kosten für Kälteenergie [€/kWh]
kw	Spezifische Kosten für Wärme [€/kWh]
KV	Kreislaufverbund
KVS	Kreislaufverbundsystem
KW	Kapitalwert der Ersparnisse [€]
L	Laufzeit [h/a]
$\dot{m}$	Massenstrom [kg/s]
$\mu$	Wärmestromkapazitätenverhältnis
n	Nutzungsdauer [a]
NTU	Number of Transfer [./.]
$\rho$	Preissteigerungsrate [%]
P	Leistung [KW]
$\dot{Q}$	Wärmeleistung [KW]
RL	Raumluft
RWZ	Rückwärmzahl
$\rho$	Luftdichte [kg/m <sup>3</sup> ]
SFP	Specific fan power [W/m <sup>3</sup> /s]
SW1	Startwert 1
SW2	Startwert 2
SWE	Schrittweite
J	Lufttemperatur [°C]
V	Vereisungsschutz
$\dot{V}$	Volumenstrom bei Normdichte [m <sup>3</sup> /s]
W	Wärmearbeit [kWh]
$\dot{W}$	Wärmekapazitätstrom [W/K]
w	Strömungsgeschwindigkeit im engsten Querschnitt [m/s]
WMO	World Meteorologic Organization
WÜ	Wärmeübertrager
WRG	Wärmerückgewinnung
WRS	Wärmerückgewinnungssystem
z	Zins [%]
ZL	Zuluft
$\xi$	Widerstandsbeiwert eines Körpers [./.]

## Indizes

1	Abluft	Inv	Investition
2	Zuluft	int	Lüftungskomponenten
ˆ	Eingang	K	Kühlung
“	Ausgang	kor.	Korrigierter Wert
AL	Außenluft	L	Luft
aux.	Hilfsenergie	org.	Ursprungswert
Cost	Kostenbasiert	Strom	Stombasiert
el	Elektrisch	t	Trocken
Gas	Gasbasiert	W	Wärmearbeiten
H	Heizung	WRG	Wärmerückgewinnung
i	Laufvariable	zus.	Zusätzlich

## AUTOREN VITA



Prof. Dr.-Ing. CHRISTOPH KAUP

1982 – 1985	Studium der Verfahrenstechnik mit Schwerpunkt „Versorgungs- und Energietechnik“, Dipl.-Ing. (FH), Fachhochschule des Landes Rheinland-Pfalz, Abteilung Bingen
1985 – 1987	Studium Wirtschaftsingenieurwesen, Dipl.-Wirt.-Ing. (FH), Fachhochschule des Landes Rheinland-Pfalz, Abteilung Ludwigshafen
1990 – 1991	Studium der Mikroelektronik mit Schwerpunkt „Technische Informatik“, Dipl.-Ing., Ingenieurhochschule Mittweida (Sachsen)
1992	Promotion zum Dr.-Ing. in der angewandten Informatik
Seit 1993	Geschäftsführender Gesellschafter, HOWATHERM Klimatechnik GmbH
2009 – 2014	Lehrbeauftragter für Energieeffizienz und Wärmerückgewinnung, Umweltcampus Birkenfeld, Hochschule Trier
Seit 2014	Honorarprofessor für Energieeffizienz und Wärmerückgewinnung, Umweltcampus Birkenfeld, Hochschule Trier
Seit 2017	Vorstandsvorsitzender, Fachverband Gebäude-Klima 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 der VDI Richtlinie VDI 3803 Blatt 1

<b>Kontakt</b>	Hochschule Trier Umwelt-Campus Birkenfeld Postfach 1380 55761 Birkenfeld Tel.: +49 6782 99 99 0 E-Mail: c.kaup@umwelt-campus.de
----------------	--