

Sonderdruck aus HLH 6/2012

HLH

Lüftung/Klima
Heizung/Sanitär
Gebäudetechnik

Organ der VDI-Gesellschaft Technische Gebäudeausrüstung



Sonderdruck

Wirtschaftliche Bewertung und Optimierung von Wärmerückgewinnungssystemen

Wirtschaftliche Bewertung und Optimierung von Wärmerückgewinnungssystemen

Christoph Kaup, Brücken

Um Wärmerückgewinnungssysteme (WRG) zu betreiben, muss nicht nur in die Systeme investiert werden, es müssen auch Hilfsenergien in Form von elektrischer Energie und weitere Kosten für den Betrieb der Systeme aufgewendet werden. Der erhaltene Nutzen in Form von thermischen Energien wird im Verhältnis zu den benötigten Hilfsenergien bewertet. Dabei kann neben den normativen Festlegungen auch mit Hilfe einer Jahressimulation die Effizienz der Wärmerückgewinnung im individuellen Projekt aussagekräftig dokumentiert und optimiert werden.

Autor



Dr.-Ing. Christoph Kaup
 Jahrgang 1963. Studium der Verfahrenstechnik, des Wirtschaftsingenieurwesens und der Informatik mit Promotion. Geschäftsführender Gesellschafter von HOWATHERM Klimatechnik GmbH. Vorstandsmitglied und Obmann für Technik des Herstellerverbandes Raumlufttechnische Geräte e. V., Chairman der Arbeitsgruppe „Non-residential Ventilation“ in EVIA (European Ventilation Industry Association). Lehrbeauftragter am Umwelt-Campus Birkenfeld, Fachhochschule Trier, für Energieeffizienz und Wärmerückgewinnung. Mitglied in verschiedenen Normungsgremien wie zum Beispiel EN 13779, EN 13053 und EN 1886 sowie in verschiedenen Richtlinienausschüssen wie VDI 6022 und VDI 3803.

Die Güte eines Wärmerückgewinnungssystems wird maßgeblich durch den Temperaturänderungsgrad, auch als Rückwärmezahl (Φ) bezeichnet, bestimmt.

Normative Festlegungen zur Effizienz der Wärmerückgewinnung

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 „Wirkungsgrad“ dar und ergibt sich aus der Wärmebilanz:

Φ = Nutzen der WRG/Potenzial der WRG

$$\Phi = \dot{Q}_{WRG} / \dot{Q}_P$$

mit:

\dot{Q}_{WRG} Leistung der WRG [kW]
 \dot{Q}_P maximal mögliche Leistung aufgrund des Temperaturpotenzials [kW]

wobei:

$$\dot{Q}_{WRG} = \dot{m}_2 \cdot c_{pL} \cdot (\vartheta_2'' - \vartheta_2')$$

mit:

\dot{m} Massenstrom der Luft [kg/s]
 c_{pL} spezifische Wärmekapazität [kJ/kg K]
 ϑ Temperatur der Luft [°C]

Die maximal mögliche Leistung wird durch das Temperaturpotenzial, also die Temperaturdifferenz zwischen Abluft (ϑ_1') und Außenluft (ϑ_2'), gebildet (siehe Bild 1).

Damit ergibt sich ohne Feuchteänderung (trockener Betrieb):

$$\Phi_t = \dot{Q}_{WRG} / \dot{Q}_P = \dot{m}_2 \cdot c_{pL} \cdot (\vartheta_2'' - \vartheta_2') / \left[\dot{m}_2 \cdot c_{pL} \cdot (\vartheta_1' - \vartheta_2') \right]$$

der Temperaturänderungsgrad:

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

Festlegung

Da in der überwiegenden Zeit der WRG-Nutzung eine Kondensation auf der Abluftseite ausgeschlossen werden

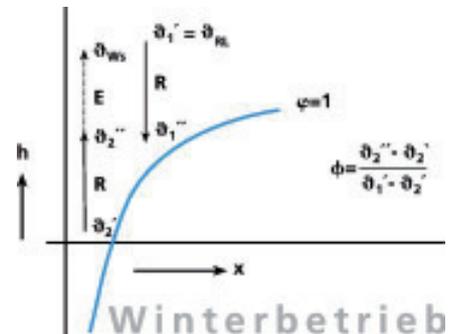


Bild 1

Darstellung der Wärmerückgewinnung im hx-Diagramm (Winterbetrieb)

muss, ist die Angabe des Temperaturänderungsgrades unter trockenen Bedingungen normativ zwingend vorgegeben.

In der geringen Zeit mit Kondensation auf der Abluftseite steigt zwar der Übertragungsgrad deutlich durch den verbesserten Wärmeübergang und die günstigeren Temperaturunterschiede, bedingt durch den latenten Enthalpieanteil, aber aufgrund der geringen Häufigkeit (Stundenanzahl) dieser Zustände hat dies kaum einen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der WRG (siehe Simulationsrechnung Tabelle 3).

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

Bewertung der 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 (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 [KW]
 \dot{V} Volumenstrom bei Normdichte [m³/s]

Δp_{WRG} Differenzdruck der WRG [Pa]
 η Gesamtwirkungsgrad des Antriebs (z. B. Ventilatoren) [./.]
 $P_{aux.}$ Weitere benötigte elektrische Hilfsleistung [KW]

Und hierauf greift die neue EN 13053 [1] zurück.

Die elektrischen Leistungen, die zum Betrieb der WRG notwendig sind, können auch durch eine Leistungsziffer ϵ (COP = coefficient of performance), also das Verhältnis der thermischen Leistung zur elektrischen Leistung, beschrieben werden:

$$\epsilon = \dot{Q}_{WRG} / P_{el}$$

Allerdings sagt die Leistungsziffer allein wenig aus, denn im Prinzip gilt: Je geringer der Wirkungsgrad der WRG, desto größer deren Leistungsziffer, da physikalisch die benötigte Hilfsenergie der WRG überproportional zur ihrer gewonnenen thermischen Leistung wächst. Aus diesem Grund kann die Leistungsziffer nur in Kombination mit den originären Kennzahlen zur Beurteilung von WRG-Systemen herangezogen werden. Daher wird die Leistungsziffer in der EN 13053 nur als Hilfsgröße zur Berechnung des energetischen Wirkungsgrades verwendet.

Wirkungsgrad nach der neuen EN 13053

Da Hilfsenergien zum Betrieb der WRG zwingend notwendig sind, kann der energetische Wirkungsgrad der WRG aus den thermischen und den elektrischen Leistungen oder Leistungskennwerten hergeleitet werden. Er stellt also nach *Kaup* eine zusammengesetzte Größe aus dem Temperaturübertragungsgrad (Φ) und der Leistungsziffer (ϵ) dar:

η_{WRG} = Nettonutzen der WRG / Potenzial der WRG

$$\eta_{WRG} = (\dot{Q}_{WRG} - P_{el}) / \dot{Q}_P$$

und damit:

$$\eta_{WRG} = (1 - P_{el} / \dot{Q}_{WRG}) / (\dot{Q}_P / \dot{Q}_{WRG})$$

$$\eta_{WRG} = (1 - 1/\epsilon) / (1/\Phi)$$

$$\eta_{WRG} = \Phi \cdot (1 - 1/\epsilon)$$

Der große Vorteil dieses kombinierten Werts (η) ist aber die Berücksichtigung des gegenseitigen Einflusses der thermischen und elektrischen Leistungen (Φ und ϵ) in nur einer einzigen Kennzahl.

Klasse	$\eta_{e1:1}$
H1	71
H2	64
H3	55
H4	45
H5	36
H6	keine Anforderung

Tabelle 1

WRG-Klassen der EN 13053

Klasse	Φ	Δp_{HRS}	ϵ	η_e
H1	75	2 x 280	19.5	71
H2	67	2 x 230	21.2	64
H3	57	2 x 170	24.2	55
H4	47	2 x 125	27.3	45
H5	37	2 x 100	26.9	36

Tabelle 1a

Basiswerte zu Tabelle 1

Die Daten der neuen EN 13053 berechnen sich aus den Leistungsdaten gemäß der EN 308 [2]. Damit liegen als Eckparameter die Außenlufttemperatur mit +5 °C und die Ablufttemperatur mit +25 °C als Bezugstemperaturen fest, die als Prüfparameter auch in der EN 308 verwandt werden und eine trockene Betriebsweise der WRG sicherstellen. Die kombinierten Kennzahlen gelten allerdings nur für diesen Betriebszustand und dürfen nicht direkt auf andere Betriebszustände übertragen werden. Sie sind dann für andere Temperaturen aus den originären Kennzahlen (Φ) und (ϵ) neu zu berechnen.

Tabelle 1 definiert die neuen WRG-Klassen in Abhängigkeit des energetischen Wirkungsgrades nach EN 13053 bei ausgeglichenen Massenströmen.

Anmerkung: Die Tabelle 1 basiert auf den in **Tabelle 1a** aufgeführten Basiswerten. Die Tabellenwerte gelten für ein ausgeglichenes Massenstromverhältnis von 1:1, also (\dot{m}_1 / \dot{m}_2) = 1.

Der Hersteller hat deshalb nicht nur den neuen energetischen Wirkungsgrad anzugeben, sondern auch die originären Daten, also den thermischen Übertragungsgrad und die Druckverluste der WRG, um eine Berechnung für sämtliche Zustände ermöglichen zu können.

Die Einteilung in die WRG-Klassen erfolgt jedoch nach dem energetischen Wirkungsgrad, wobei der Hersteller, aber auch der Nutzer nun mehr Freiheitsgrade bei der Wahl der WRG hat.

Umrechnung von Temperaturänderungsgraden

Da mit unterschiedlichen Massenstromverhältnissen die Übertragungskennzahlen beliebig positiv oder negativ beeinflusst werden können, sind die normativen Festlegungen der WRG nach EN 13053 immer auf ein ausgeglichenes Massenstromverhältnis 1:1 definiert.

Bei unterschiedlichen Massenstromverhältnissen zwischen Abluft und Zuluft, also bei nicht ausgeglichenen Massenstromverhältnissen, müssen die geforderten tatsächlichen Übertragungsgrade $\Phi_{tats.}$ aus den normativen Anforderungen

$\Phi_{1:1}$ umgerechnet werden, wenn die Daten vom Hersteller nicht direkt genannt werden.

Da tatsächlich der Wärmedurchgangskoeffizient (U) bei unterschiedlichen Massenströmen nicht konstant ist, kann deshalb vereinfacht die Umrechnung der Übertragungsgrade auch durch die empirische Formel nach *Kaup*:

$$\Phi_{emp} = \Phi_{1:1} \cdot (\dot{m}_1 / \dot{m}_2)^{0,4}$$

im Bereich von $0,67 \geq \mu \geq 1,25$ und $\Phi_{1:1} \leq 0,8$ erfolgen, die in die EN 13053 und in die neue VDI 3803 B.5 eingeflossen ist.

Jahresenergiebetrachtung

Auf Basis von Jahresenergieberechnungen können auch weitere Kennzahlen der WRG gebildet werden. Letztlich muss eine Wirtschaftlichkeitsberechnung auf Jahrestemperaturverlaufswerten die entscheidenden Kennwerte liefern, die zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit der WRG herangezogen werden müssen.

Hier bietet es sich an, z. B. auf Basis der in DIN 4710 [3] vorliegenden meteorologischen Temperaturverteilung, für den betreffenden Aufstellungsort der WRG, die Jahresenergieberechnungen durchzuführen. In der DIN 4710 sind die Stundenverteilungen für mehrere deutsche Städte für 24 Stunden dargestellt. Diese Tabellen sind auch für den Tagesbetrieb (6.00 bis 18.00 Uhr) hinterlegt.

In Abhängigkeit von der Außentemperatur in °C können die Häufigkeitswerte des Auftretens der Luftzustände je Stunde entnommen werden. Nun müssen in einem Jahresgang-Berechnungsverfahren für jeden Außenluftzustand die Zustände der WRG und der Sollwerte berechnet werden. Dieses Verfahren zeigt die neue EN 13053 und die neue VDI 3803 B.5 auf.

Im Winterfall sind damit die Leistungen für die WRG und den benötigten Vorerhitzer (siehe Bild 1) zu berechnen:

$$\dot{Q}_{WRG} = \dot{m}_2 \cdot c_{pL} \cdot (\delta_2'' - \delta_2')$$

und:

$$\dot{Q}_E = \dot{m}_2 \cdot c_{pL} \cdot (\delta_{WS} - \delta_2'')$$

mit:

δ_{WS} Sollwert der Zuluft [°C]

\dot{Q}_E Leistung der Nacherwärmerleistung [kW]

Der Sommerfall ist analog zu betrachten.

Die einzelnen thermischen Leistungen werden dann mit der Häufigkeit ihres Auftretens multipliziert:

$$W_{WRG(x)} = \dot{Q}_{WRG(x)} \cdot t_{(x)}$$

und:

$$W_E(x) = \dot{Q}_E(x) \cdot t_{(x)}$$

wobei:

$t_{(x)}$ Zeit der Häufigkeit z.B. aus der DIN 4710 für den benötigten Ort

mit:

x Temperatur von -19 bis 37 [°C]

Die gesamten Arbeiten des Jahres ergeben sich durch die Summe der Einzelwerte:

$$W_{WRG} = \sum W_{WRG(x)}$$

und:

$$W_E = \sum W_E(x)$$

Daneben müssen auch die energetischen Aufwände der Hilfsenergien ermittelt werden:

$$W_{el(x)} = P_{el(x)} \cdot t_{(x)}$$

Die gesamten elektrischen Arbeiten des Jahres ergeben sich ebenfalls durch die Summe der Einzelwerte:

$$W_{el} = \sum W_{el(x)}$$

Jahresenergiekennzahlen

Genauso wie die einzelnen Kennzahlen auf Leistungen bezogen werden, können nach der Berechnung der Jahresenergien Kennzahlen aus den Gesamtarbeiten ermittelt werden. Dies hat den Vorteil, dass es sich bei den Kennzahlen um mittlere oder durchschnittliche Kennzahlen der WRG handelt, die eine bessere Möglichkeit der Beurteilung ergeben als leistungsbezogene Kennzahlen, deren Größenordnung in Abhängigkeit von Temperatur und Volumenstrom sehr stark schwankt.

Jahresarbeitszahl:

$$\epsilon_a = W_{WRG} / W_{el}$$

Energetischer Jahreswirkungsgrad:

η_{WRG_a} = Nettotonnen der WRG/Potenzial der WRG

Da die beiden Arbeiten (W_{WRG} und W_{el}) eine sehr unterschiedliche Güte der Primärenergien aufweisen, kann diesem Umstand durch die Einführung eines Wertungsfaktors Rechnung getragen werden:

$$\eta_{WRG_a} = (W_{WRG} - f \cdot P_{el}) / W_P$$

mit:

f Primärenergie-Wertungsfaktor

und damit:

$$\eta_{WRG_a} = (1 - f \cdot W_{el} / W_{WRG}) / (W_P / W_{WRG})$$

$$\eta_{WRG_a} = \Phi \cdot (1 - f / \epsilon_a)$$

Wirtschaftlichkeitskennzahlen

Neben den energetischen Betrachtungen müssen die Energieströme auch unter einem finanziellen Gesichtspunkt bewertet werden, da letztendlich die Amortisation der WRG (ab wann die WRG „bezahlt“ ist) und der Kapitalwert der Ersparnisse (wieviel mit der WRG unter Berücksichtigung von Zinseffekten in der Nutzungsphase „verdient“ werden kann) den Ausschlag für die Investition in die WRG geben.

Und dies unter der Berücksichtigung sämtlicher Mehr- und Minderinvestitionen, die sich insbesondere durch die mehrfachfunktionale Nutzung der WRG ergeben, indem z. B. die Kälteerzeugung oder auch die Wärmeerzeugung kleiner dimensioniert werden und weitere Investitionen wie z. B. ein Rückkühlwerk entfallen können.

Hierbei werden neben den Erträgen der WRG auch die Aufwände für die gesamte Nutzungszeit (n) der Anlagen auf den jeweils aktuellen Zeitpunkt abgezinst. Dazu wird das betriebswirtschaftliche Kapitalwert-Verfahren angewandt.

Der Barwertfaktor mit Bezug zum Nutzungszeitraum gibt den Wert künftiger Erträge und Aufwände an, abgezinst auf den heutigen Zeitpunkt, und errechnet sich aus [4]:

$$b = \{1 - [(1 + j / (1 + i))^n] / (1 + j)\}$$

wobei:

i Zinssatz

j Preissteigerungsrate

n Nutzungsdauer [a]

Die jährliche Einsparung (E) der WRG bemisst sich aus der Differenz zwischen dem Nutzen und den Aufwänden:

$$E = \text{Nutzen} - \text{Aufwand}$$

$$E = E_{WRG} - E_{el} - E_U - E_K$$

wobei:

E_{WRG} energetischer Nutzen der WRG im Sommer und Winter [Euro]

E_{el} elektrische Aufwände (Hilfsenergie) [Euro]

E_U Unterhaltungskosten der WRG (z. B. Wartung, Wasser etc.) [Euro]

E_K Kapitalkosten der WRG [Euro]

Der Kapitalwert der Ersparnisse K kalkuliert sich dann aus:

$$K = E \cdot b - I$$

wobei:

E jährliche Einsparung [Euro]

b Barwertfaktor innerhalb der Nutzungsphase

I Kapitaleinsatz durch die Investition [Euro]

Der Kapitaleinsatz für die Investition muss unter der Berücksichtigung aller Rahmenbedingungen ermittelt werden. Hierbei sind neben der Investition für das WRG-System auch die eingesparten Investitionen zu berücksichtigen, die sich z. B. durch eine kleinere Heizungsanlage oder Kälteerzeugung ergeben. Insofern ist es wichtig, dass der Einsatz der WRG im gesamten Kontext der Planung gesehen wird.

Der positive Kapitalwert gibt dann an, welchen Ertrag die WRG innerhalb ihrer Nutzungszeit, abgezinst auf den Zeitpunkt der Betrachtung, erwirtschaftet hat. Ist der Kapitalwert positiv, handelt es sich um einen Gewinn.

Ab welchem Zeitpunkt die WRG sich bezahlt gemacht hat, ergibt sich aus dem Schnittpunkt der beiden Kurven Aufwand und Nutzen, die ebenfalls unter Berücksichtigung von Zinseffekten für jedes Jahr der Nutzung berechnet werden können.

Die Amortisation ermittelt sich damit aus [5]:

$$a = \log \{E / [E - I(i - j)]\} / \log \{(1 + i) / (1 + j)\}$$

wobei:

E jährliche Einsparung [Euro]

I Kapitaleinsatz durch die Investition [Euro]

i Zinssatz

j Preissteigerungsrate



Bild 2

Berechnungsprogramm zur Wirtschaftlichkeit von WRG-Systemen

- Weiteres
- Minderinvestition der WRG
- Verringerung der Wärmeerzeugung und -verteilung
- Verringerung der Kälteerzeugung und -verteilung
- Weiteres

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

Simulationssoftware und Berechnungsbeispiel

Im Folgenden wird eine Software zur Simulation und zur Wirtschaftlichkeitsberechnung nach den beschriebenen Verfahren dargestellt. Bild 2 zeigt den Eingabebildschirm des Programms. Anhand weniger charakteristischer Daten kann die Berechnung erfolgen.

Neben den WRG-Funktionen (Einspeisung von Nachwärme oder Kälte, Einkopplung von Freier Kälte oder Brauchwasservorwärmung), den Sollwerten im Heiz- und Kühlbetrieb und den spezifischen Energiekosten werden das Lastprofil der WRG und deren Standort eingegeben.

Hierbei wird zwischen dem Tag- und dem Nachtbetrieb unterschieden. Aus diesem Lastprofil errechnen sich die Laufzeiten der WRG. Auch die Minderung der Wärme- und Kälteerzeugung kann ebenfalls definiert werden.

Auf der ersten Ergebnisseite (Tabelle 2) wird die Funktion der WRG in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur dargestellt, die sich aus dem Temperaturübertragungsgrad ergibt. Der Einfluss der Leistungsanpassung (L) oder aber des Vereisungsschutzes (V), aber auch der integrierten Einspeisung von Zusatzenergien (Mehrfachfunktionale Nutzung) und deren Beeinflussung des Übertragungsgrades wie Nachheizen (E) oder Nachkühlen (K) und Befeuchtung (B), sowie Freie Kälte (F) oder Brauchwasservorwärmung (B) werden hierbei berücksichtigt.

In Tabelle 3 werden tabellarisch die einzelnen thermischen Arbeiten darge-

Das Optimum der Wärmerückgewinnung

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

Dabei wird die ausgelegte Wärmerückgewinnung mit Ihrer Rückwärmezahl (Φ) in eine korrespondierende dimensionslose Wärmeübertragerkennzahl (NTU) umgewandelt. Diese Kennzahl wird definiert als:

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

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

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

wobei:

u Wärmedurchgangskoeffizient [W/m²K]

A Wärmeübertragende Fläche [m²]

\dot{W} Wärmekapazitätsstrom mit:

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

wobei:

\dot{m} Luftmassenstrom [kg/s]

Die Kennzahl NTU ist somit bei konstanter u-Zahl und konstantem Massenstrom der Luft (W) proportional zur Fläche der WRG und repräsentiert somit die Fläche als dimensionslose Kennzahl. 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 Aufwände und Nutzen der Wärmerückgewinnung entweder proportional zur Fläche (NTU) oder zur Rückwärmezahl (Φ) verhalten, kann durch diskrete Berechnung das Optimum der WRG gefunden werden.

Dabei wird aus den einzelnen NTU_i des zu untersuchenden Bereichs die korrespondierende Rückwärmezahl (Φ) bestimmt:

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

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:

□ NTU-abhängig

Kosten der Wärmerückgewinnung

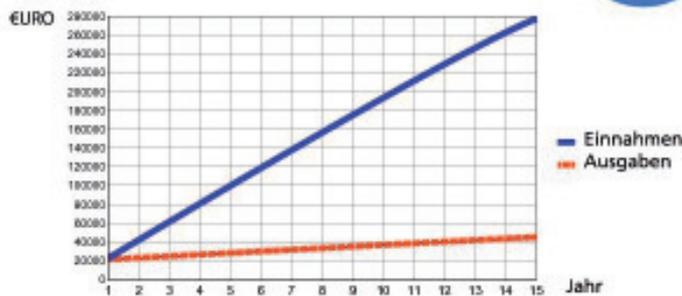
- Kapitalkosten
- Wartungs- und Unterhaltungskosten
- Druckabfall der Wärmerückgewinnung
- Weiteres

□ Φ -abhängig

Wärmeertrag (Nutzen)

- Wärme
- Kälte
- Mehrfachfunktionale Nutzung der WRG (z. B. Freie Kälte)

Energiekosten Wärme	0,08 € / kWh
Energiekosten Kälte	0,10 € / kWh
Energiekosten Elektro	0,12 € / kWh
Wasserkosten (inkl. Abwasser)	6,00 € / m ³
Kalkulationszinsfuß	4,00 %
Preissteigerungsrate	2,00 %
Klimazone	Frankfurt am Main (Stadt)
Nutzungsdauer der Anlage	15 a
Betriebstage pro Woche	7 d / w
Betriebsstunden pro Tag	12 h / d
Betriebsstunden pro Nacht	12 h / d
Volumenstrom am Tag	100 % / V max
Volumenstrom in der Nacht	50 % / V max
Investitionskosten der WRG	44.045 €
Mehr-/Minderinvestition für die WRG	0 €
Min.investition fuer Wärmeerzeugung	-15.997 € / (170 € / kW)
Min.investition fuer Kälteerzeugung	-9.196 € / (190 € / kW)
Zusatzkosten je Jahr	0 €
Rückgewinn der WRG Wärme	15.857 € / a
Rückgewinn der WRG Kälte	5.842 € / a
Elektroenergiekosten für die WRG	1.353 € / a
Wasserkosten (indirekte Verdunstungskühlung)	270 € / a
Kapitalkosten für die WRG	1.698 € / a
Wartungs- und Unterhaltungskosten	377 € / a
Jährliche Differenzkosten	17.804 € / a
Kapitalwert der Ersparnisse	232.435 €
Amortisation	< 1,0 a
Jahresnutzungsgrad brutto (Energien)	92,9 %
Jahresnutzungsgrad netto (Monitär)	90,0 %
Jahresarbeitszahl (Thermisch zu Elektrisch)	22,5
Effektiver Jahreswirkungsgrad EN 13053	73,7 %
Jährliche CO ₂ Einsparung	84,0 t / a
Jährliche CO ₂ Einsparung (CO ₂ Zertifikate)	1.600,0 € / a



WRG-SYSTEME OPTIMIERUNG

Rückwärmzahl	Nutzen	Aufwand	Ertrag
30,0 %	8395,4 €	113,1 €	8252,4 €
35,0 %	9759,7 €	151,9 €	9607,8 €
40,0 %	11153,9 €	221,6 €	10932,3 €
45,0 %	12548,2 €	330,8 €	12217,4 €
50,0 %	13942,4 €	491,2 €	13451,2 €
55,0 %	15336,7 €	719,9 €	14616,7 €
60,0 %	16730,9 €	1042,5 €	15688,4 €
65,0 %	18125,1 €	1499,3 €	16625,9 €
70,0 %	19519,4 €	2157,3 €	17362,1 €
75,0 %	20913,6 €	3137,2 €	17776,4 €
77,0 %	21471,3 €	3666,4 €	17894,9 €
80,0 %	22307,9 €	4880,7 €	17827,2 €
85,0 %	23702,1 €	7351,0 €	16351,1 €

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

Optimale Rückwärmzahl der WRG 77 % (73 - 80 %)

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

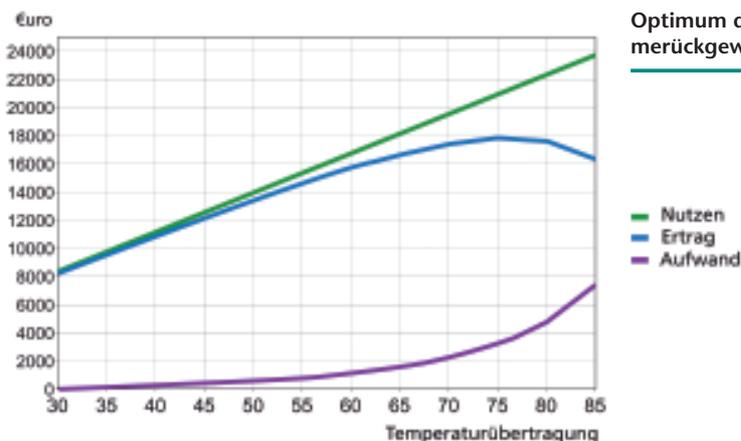


Tabelle 4

Zusammenfassung der Wirtschaftlichkeitsberechnung

durch die Definition des energetischen Wirkungsgrades nach der neuen EN 13053, der sich aus der thermischen Rückwärmzahl und der Leistungsziffer der WRG ergibt. Mit dieser Kennzahl können nun energetisch sinnvoll die thermische Güte und die Qualität der Hilfsenergien in einer Kennzahl zusammengefasst werden.

Letztendlich ist eine energetische Jahresbetrachtung auf Basis der beschriebenen Verfahren sinnvoll. Die hierauf fußenden Kennzahlen sind einfacher vergleichbar, wenn die projektspezifischen Rahmenbedingungen definiert sind.

Die Genauigkeit des beschriebenen Verfahrens zur Wirtschaftlichkeitsberechnung auf Basis von Summenhäufigkeiten kann als völlig ausreichend bewertet werden, da mit jeder Wirtschaftlichkeitsberechnung Prognosen für die Zukunft getroffen werden, deren Eintreffen sowieso mit entsprechenden Unsicherheiten behaftet sind.

Am Ende entscheiden damit die Amortisation und der Kapitalwert der Ersparnisse darüber, ob eine WRG wirtschaftlich ist oder nicht.

Dabei ergibt sich unter projektspezifischen Rahmenbedingungen ein jeweils eindeutiges Optimum beim Einsatz von Wärmerückgewinnungssystemen.

Und die Wirtschaftlichkeit sowie Umweltaspekte sind letztlich die einzigen wirklichen Kaufargumente für eine Wärmerückgewinnung. Dabei kann die Berechnung einer optimalen WRG dafür sorgen, dass weder mit einer zu kleinen noch einer zu großen WRG Potenzial verschenkt wird.

Literatur

- [1] DIN EN 13053: Lüftung von Gebäuden – Zentrale raumlufttechnische Geräte – Leistungskenndaten für Geräte, Komponenten und Baueinheiten; Deutsche Fassung EN 13053:2012-02.
- [2] DIN EN 308:1997-06: Wärmeaustauscher – Prüfverfahren zur Bestimmung der Leistungskriterien von Luft/Luft- und Luft/Abgas-Wärmerückgewinnungsanlagen; Deutsche Fassung EN 308:1997.
- [3] DIN 4710: Statistiken meteorologischer Daten zur Berechnung des Energiebedarfs von heiz- und raumlufttechnischen Anlagen in Deutschland: 2003-01.
- [4] Investition: Investitionsrechnung in der Planung und Beurteilung von Investitionen, von Gerhard Mensch: Oldenbourg Wissenschaftsverlag: 2002.
- [5] VDI 3803 Blatt 5:2011-04 : Raumlufttechnik, Geräteanforderungen – Wärmerückgewinnungssysteme (VDI-Lüftungsregeln).

Tabelle 5

Optimum der Wärmerückgewinnung