

Die deutsche Version dieser Richtlinie ist verbindlich.

The German version of this guideline shall be taken as authoritative. No guarantee can be given with respect to the English translation

Inhalt	Seite	Contents	Page
Vorbemerkung	2	Preliminary note	2
Einleitung	2	Introduction	2
1 Anwendungsbereich	3	1 Scope	4
2 Normative Verweise	4	2 Normative references	4
3 Begriffe	4	3 Terms and definitions	5
4 Formelzeichen und Indizes	5	4 Symbols and indices	5
5 Kennzahlen der Wärmerückgewinnung	7	5 Heat recovery characteristics	6
5.1 Leistungskennzahlen	7	5.1 Performance characteristics	7
5.2 Energiekennzahlen	10	5.2 Energy characteristics	10
5.3 Berechnungsverfahren für Energiekennzahlen	12	5.3 Calculation methods for the energy characteristics	11
5.4 Leckage der Wärmerückgewinnung	13	5.4 Leakage in heat recovery	13
6 Grundlagen	15	6 Basics	14
6.1 Bilanzgrenzen der Wärmerückgewinnung	15	6.1 Balance boundaries of heat recovery	14
6.2 Vereinfachte Bilanzgrenzen	16	6.2 Simplified balance boundaries	16
6.3 Wärmerückgewinnungssysteme	18	6.3 Heat recovery systems	17
6.4 Wärmerückgewinnung mit erweiterten Funktionen	29	6.4 Heat recovery with additional functions	29
7 Abnahme, Leistungsmessung, energetische Inspektion	37	7 Commissioning, capacity measurement, energetic inspection	37
7.1 Abnahme	37	7.1 Commissioning	37
7.2 Leistungsmessung	37	7.2 Performance measurement	37
7.3 Energetisches Monitoring	38	7.3 Energetic monitoring	38
7.4 Energetische Inspektion	39	7.4 Energetic inspection	39
8 Wirtschaftlichkeit	40	8 Efficiency	40
8.1 Kapitalwert-Verfahren	40	8.1 Net present value method	40
8.2 Amortisation	41	8.2 Amortisation	41
8.3 Interner Zinssatz	42	8.3 Internal rate of return	42
9 CO₂-Bilanz	42	9 CO₂ balance	42

VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik (GBG)

Fachbereich Technische Gebäudeausrüstung

VDI-Handbuch Raumlufthtechnik
VDI-Handbuch Ressourcenmanagement in der Umwelttechnik

ervielfältigung – auch für innerbetriebliche Zwecke – nicht gestattet / Reproduction – even for internal use – not permitted

	Seite
10 Planungskriterien	43
10.1 Auslegungsgrundlagen	43
10.2 Festlegung der Bilanzgrenze	44
10.3 Vorschriften.	44
10.4 Geometrie	44
10.5 Besondere Anforderungen	44
10.6 Mehrfachfunktionale Systeme	44
10.7 Feuchteübertragung	44
10.8 Betrieb/Nutzung	44
10.9 Konzeption	45
10.10 Technische Daten.	45
Schrifttum	47

	Page
10 Design criteria	43
10.1 Basis for design	43
10.2 Determination of the balance boundary	44
10.3 Regulations.	44
10.4 Geometry.	44
10.5 Special requirements.	44
10.6 Multifunctional systems	44
10.7 Moisture transmission	44
10.8 Operation/use	44
10.9 Design	45
10.10 Technical data	45
Bibliography	47

Vorbemerkung

Der Inhalt dieser Richtlinie ist entstanden unter Beachtung der Vorgaben und Empfehlungen der Richtlinie VDI 1000.

Alle Rechte, insbesondere die des Nachdrucks, der Fotokopie, der elektronischen Verwendung und der Übersetzung, jeweils auszugsweise oder vollständig, sind vorbehalten.

Die Nutzung dieser VDI-Richtlinie ist unter Wahrung des Urheberrechts und unter Beachtung der Lizenzbedingungen (www.vdi-richtlinien.de), die in den VDI-Merkblättern geregelt sind, möglich.

Allen, die ehrenamtlich an der Erarbeitung dieser VDI-Richtlinie mitgewirkt haben, sei gedankt.

Einleitung

Die europäische Richtlinie EPBD (Energy Performance of Buildings Directive) legt Energieeinsparungsziele fest, die in Deutschland durch die Energieeinsparverordnung (EnEV) umgesetzt werden. Die technische Umsetzung geschieht dabei auf der Basis von Gesetzen, Verordnungen und Technischen Regeln, in denen Art, Umfang und Ablauf der Berechnungen definiert sind.

Aus der EnEV geht dabei hervor, dass die Wärmerückgewinnung in Raumluftheizungsanlagen mit einem Luftvolumenstrom von mehr als 4000 m³/h Pflicht ist und keine Option. Werden RLT-Anlagen in Gebäude eingebaut oder erneuert, müssen diese gemäß § 15 EnEV mit einer Einrichtung zur Wärmerückgewinnung ausgestattet sein, die mindestens der Klassifizierung H3 nach DIN EN 13053 entspricht.

Politische Entscheidungen fordern gemäß dem Kyoto-Protokoll eine Verringerung der CO₂-Konzentration

Preliminary note

The content of this guideline has been developed in strict accordance with the requirements and recommendations of the guideline VDI 1000.

All rights are reserved, including those of reprinting, reproduction (photocopying, micro copying), storage in data processing systems and translation, either of the full text or of extracts.

The use of this guideline without infringement of copyright is permitted subject to the licensing conditions specified in the VDI Notices (www.vdi-richtlinien.de).

We wish to express our gratitude to all honorary contributors to this guideline.

Introduction

The European Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) has set goals to save energy, which are now being implemented in Germany through the Energy Savings Ordinance (EnEV). It will be technically implemented through a series of acts, ordinances and technical regulations, in which the type and scope of calculations required, as well as the procedures to be used in carrying them out, are defined.

In this conjunction, the EnEV determines that heat recovery in air-conditioning systems with an air volume flow of more than 4000 m³/h are obligatory and not optional. According to § 15 EnEV, all air-conditioning systems that are installed in a building or refurbished must be equipped with a heat recovery system that at least corresponds to the classification H3 as determined in DIN EN 13053.

In keeping with the Kyoto Protocol, there is now a political will to reduce the CO₂ concentration in the

in der Luft. Als Folge gilt in Deutschland das „Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich“ (EEWärmeG), worunter auch die Wärmerückgewinnung fällt.

Die Rückgewinnung von Wärme aus dem Fortluftstrom von Gebäuden ist eine wichtige Maßnahme zur Senkung des Primärenergiebedarfs für die Raumwärmebereitstellung.

Es ist energetisch sinnvoll, Abwärme mit höherem Temperaturniveau direkt zu nutzen. Somit ist die Abwärmenutzung regenerativen Energiequellen energetisch zumindest gleichzustellen.

Wärmerückgewinnungssysteme (WRG-Systeme) können sich Energieströmen innerhalb des Gebäudes bedienen, die nicht primär den Raumluftechnischen Anlagen zugerechnet werden (Abwärmeströme von Maschinen, Überschusskälte usw.).

Aufgrund der projektspezifischen Randbedingungen sind nicht nur die Leistungskennzahlen (z. B. Temperaturänderungsgrad) entscheidend für die Beurteilung eines WRG-Systems, sondern Energiekennzahlen, die über einen repräsentativen Betriebszeitraum Nutzen und Aufwand im Rahmen einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung bilanzieren.

Diese Richtlinie ersetzt VDI 2071 „Wärmerückgewinnung in Raumluftechnischen Anlagen“.

Die Richtlinienreihe VDI 3803 gliedert sich wie folgt:

VDI 3803 Raumluftechnik, Geräteanforderungen

Blatt 1 Bauliche und technische Anforderungen zentrale Raumluftechnische Anlagen

Blatt 2 Bauliche und technische Anforderungen dezentrale Raumluftechnische Anlagen (zurzeit VDI 6035)

Blatt 3 Luftbefeuchtungssysteme

Blatt 4 Luftfiltersysteme

Blatt 5 Wärmerückgewinnungssysteme

Eine Liste der aktuell verfügbaren Blätter dieser Richtlinienreihe ist im Internet abrufbar unter www.vdi.de/3803.

1 Anwendungsbereich

Diese Richtlinie gilt für Raumluftechnische Anlagen. In ihr werden Grundbegriffe und Definitionen der Wärmerückgewinnung festgelegt und die dazu erforderlichen Geräte, Systeme und Verfahren sowie deren Betrieb beschrieben. Hierzu liefert sie Entscheidungskriterien und Kennzahlen für die Auswahl und Berechnung.

air. As a consequence, the Act to Support Renewable Energy Sources in Heating (EEWärmeG), under which heat recovery falls, is now in force in Germany.

Heat recovery from the extract airflow of buildings is an important measure for sinking the primary energy requirements for room heating.

It makes sense, in terms of energy use, to directly use waste heat with a higher temperature level. Thus, the use of waste heat can be equated, at least in terms of energy use, with renewable energy sources.

Heat recovery systems (HRS) can make use of energy flows within a building that are not primarily attributed to air-conditioning systems (waste heat flows from machines, excess cooling, etc.).

Due to specific conditions that affect any given project, it is not only the performance characteristics, (e.g. the temperature differential) that are decisive for the assessment of an HRS, but also the energy performance indicators, which make it possible to calculate the balance of the costs and benefits over a representative operating period within the context of a cost-efficiency analysis.

This guideline replaces VDI 2071 “Heat recovery in heating, ventilation and air conditioning plants”.

The series of guidelines VDI 3803 structures as follows:

VDI 3803 Air-conditioning, system requirements

Part 1 Structural and technical principles central ventilation and air-conditioning systems

Part 2 Structural and technical principles decentralized ventilation and air-conditioning system (at present VDI 6035)

Part 3 Air moistening systems

Part 4 Air filter systems

Part 5 Heat recovery systems

A catalogue of all available parts of this series of guidelines can be accessed on the internet at www.vdi.de/3803.

1 Scope

This guideline applies to air-conditioning systems. In this guideline, basic terminology and definitions for heat recovery are established, and the required components, systems and procedures are described, along with their modes of operation. In this context, it also provides criteria and characteristics for making selections as well as for performing calculations.

Die Richtlinie ermöglicht weiterhin Aussagen zur Eignung und Wirtschaftlichkeit sowie zur Reduktion des Energieaufwands und der CO₂-Emission.

Es gelten die Anforderungen der VDI 6022 Blatt 1 und der VDI 3803 Blatt 1.

The guideline also facilitates assessments concerning suitability and efficiency as well as reductions in the energy requirements and CO₂ emissions.

The requirements from VDI 6022 Part 1 and VDI 3803 Part 1 apply.

2 Normative Verweise / Normative references

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieser Richtlinie erforderlich: /

The following referenced documents are indispensable for the application of this guideline:

Richtlinie 2010/31/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. Mai 2010 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings)

Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich (Erneuerbare-Energien-Wärme-gesetz – EEWärmeG)

Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV)

DIN EN 308:1997-06 Wärmeaustauscher; Prüfverfahren zur Bestimmung der Leistungskriterien von Luft-Luft- und Luft-Abgas-Wärmerückgewinnungsanlagen; Deutsche Fassung EN 308:1997 (Heat exchangers; Test procedures for establishing performance of air to air and flue gases heat recovery devices; German version EN 308:1997)

DIN EN 13053:2012-02 Lüftung von Gebäuden; Zentrale raumluftechnische Geräte; Leistungs-kennndaten für Geräte, Komponenten und Bauein-heiten; Deutsche Fassung EN 13053:2006+A1:

2011 (Ventilation for buildings; Air handling units; Rating and performance for units, components and sections; German version EN 13053:2006+A1: 2011)

DIN EN 13779:2007-09 Lüftung von Nichtwohnge-bäuden; Allgemeine Grundlagen und Anforderun-gen für Lüftungs- und Klimaanlage und Raum-kühlsysteme; Deutsche Fassung EN 13779: 2007 (Ventilation for non-residential buildings; Perform-ance requirements for ventilation and room-condi-tioning systems; German version EN 13779: 2007)

DIN EN 15251:2012-12 Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden; Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik; Deutsche Fassung EN 15251:2007 (Indoor environmental input pa-rameters for design and assessment of energy per-formance of buildings addressing indoor air qual-ity; thermal environment, lighting and acoustics; German version EN 15251:2007)

VDI 3803 Blatt 1:2010-02 Raumluftechnik; Zen-trale Raumluftechnische Anlagen; Bauliche und technische Anforderungen (VDI-Lüftungsregeln) (Air-conditioning; Central air-conditioning sys-tems; Structural and technical principles (VDI ventilation code of practice))

VDI 6022 Hygiene-Anforderungen an Raumluf-technische Anlagen und Geräte (Hygiene require-ments for ventilation and air-conditioning systems and units)

3 Begriffe

Für die Anwendung dieser Richtlinie gelten die fol-genden Begriffe:

Abwärme

Der an definierten Stellen des Systems in einem Stoffstrom (z.B. Luftstrom) abgeführte Enthalpie-strom.

3 Terms and definitions

For the purposes of this guideline, the following terms and definitions apply:

Waste heat

The enthalpy flow that is rejected into a mass flow (e.g. air flow) at defined points in the system.

Fortwärme

Der Teil der Abwärme, der nicht durch Wärmerückgewinnung genutzt wird.

Mehrfachfunktionales WRG-System

WRG-System, das in der Lage ist, neben seiner primären Funktion der Wärmerückgewinnung zusätzliche thermodynamische Funktionen zu übernehmen.

Rückwärme

Teil der Abwärme, der durch Wärmerückgewinnung in dasselbe System unter Wechsel des Wärmeträgers zurückgeführt wird (z. B. von Fortluft zur Außenluft).

WRG (Wärmerückgewinnung)

Maßnahme zur technischen Nutzung von thermischer Energie der in die Umwelt entlassenen Massenströme (z. B. Fortluft).

Anmerkung: Umluft ist keine Wärmerückgewinnung.

WRG-System (Wärmerückgewinnungssystem)

System, das durch Anordnen und Verknüpfen von einem oder mehreren Wärmerückgewinnern (Wärmeübertragern) einschließlich ihrer Zusatzeinrichtungen in einer Raumlufttechnischen Anlage entsteht.

4 Formelzeichen und Indizes

In dieser Richtlinie werden die nachfolgend aufgeführten Formelzeichen verwendet:

Formelzeichen

Formelzeichen	Benennung	Einheit
a	Amortisation	–
b	Barwertfaktor	%
E	jährliche Einsparung	€
E_{el}	elektrische Aufwendungen	€
E_K	Kapitalkosten der WRG	€
E_U	Unterhaltskosten der WRG	€
E_{WRG}	energetischer Nutzen der WRG	€
e	CO ₂ -Emissionsfaktor	–
f	Primärenergiefaktor (z. B. $f = 2$)	–
I	Kapitaleinsatz durch die Investition	€
i	Zinssatz	%
j	Preissteigerungsrate	%
K	Kapitalwert der Ersparnisse	€

Outgoing heat

The share of waste heat that is not used by the heat recovery system.

Multifunctional HRS

HRS, that is able to perform other thermodynamic functions in addition to its primary function of heat recovery.

Return heat

Share of waste heat that is returned to the same system through heat recovery by transferring it from one heat transfer medium to another (e. g. from extract air to outside air).

HR (heat recovery)

Measure for the technical use of the thermal energy in the mass flows (e. g. extract air) that are rejected into the environment.

Note: Air recirculation cannot be equated with heat recovery.

HRS (heat recovery system)

System that is created by arranging and connecting one or more heat recovery units (heat exchangers), as well as related equipment, within an air-conditioning unit.

4 Symbols and indices

The following symbols are used throughout this guideline:

Symbols

Symbol	Term	Unit
a	amortisation	–
b	present value factor	%
E	annual savings	€
E_{el}	electric energy expenditures	€
E_K	capital costs of HR	€
E_U	maintenance costs of HR	€
E_{WRG}	energetic benefit of HR	€
e	CO ₂ emission factor	–
f	primary energy factor (e. g. $f = 2$)	–
I	capital expenditure	€
i	interest rate	%
j	rate of price increases	%
K	capital value of savings	€

Formelzeichen	Benennung	Einheit
L	Leckagezahl	–
m	CO ₂ -Reduktion	–
\dot{m}	Massenstrom	kg/s
N_a	Jahresdeckungsgrad	–
n	Nutzungsdauer	a
P_{el}	elektrische Antriebsleistung	W
P_{el}	elektrische Wirkleistung	W
P_{Zus}	Hilfsleistungen	W
Δp_{WRG}	Druckverlust der WRG	Pa
\dot{Q}_{P}	maximal mögliches thermisches Potenzial	kW
Q_{RLT}	Lüftungswärmebedarf	Wh
\dot{Q}_{WRG}	Leistung der WRG	kW
Q_{WRG}	thermische Nutzenergie der WRG	kWh
r	interner Zinssatz	%
t	Temperatur	°C
U	Umluftzahl	–
\dot{V}	Volumenstrom	m ³ /s
W_{el}	elektrische Energie	Wh
x	absolute Feuchte der Luft	g/kg
ε	Leistungszahl	–
ε_a	Jahresarbeitszahl	–
η	Gesamtwirkungsgrad des Antriebs (z. B. Ventilatoren)	–
η_a	Jahreswirkungsgrad	–
η_{WRG}	Wirkungsgrad der WRG	–
ρ	Dichte	kg/m ³
Φ_t	Temperaturänderungsgrad	–
Φ_a	Jahrestemperaturänderungsgrad	–
Ψ	Feuchteänderungsgrad	–

Indizes

In dieser Richtlinie werden die nachfolgenden aufgeführten Indizes verwendet:

1. Index:
1 Fortluft (FO)
2 Außenluft (AU)
2. Index:
1 Eintritt
2 Austritt

Symbol	Term	Unit
L	leakage factor	–
m	CO ₂ reduction	–
\dot{m}	mass flow	kg/s
N_a	annual coverage rate	–
n	utilization period	a
P_{el}	required electrical power	W
P_{el}	effective electrical power	W
P_{Zus}	auxiliary power	W
Δp_{WRG}	pressure drop of the HR unit	Pa
\dot{Q}_{P}	maximum possible thermal performance	kW
Q_{RLT}	ventilation heat requirement	Wh
\dot{Q}_{WRG}	performance of the HR unit	kW
Q_{WRG}	usable thermal energy of the HR unit	kWh
r	internal rate of return	%
t	temperature	°C
U	recirculation factor	–
\dot{V}	volume flow	m ³ /s
W_{el}	electrical input	Wh
x	absolute humidity	g/kg
ε	coefficient of performance	–
ε_a	seasonal energy efficiency ratio	–
η	total efficiency of the drive (e.g. ventilators)	–
η_a	annual efficiency	–
η_{WRG}	efficiency of the HR unit	–
ρ	density	kg/m ³
Φ_t	temperature differential	–
Φ_a	annual temperature differential	–
Ψ	humidity differential	–

Indices

The following indices are used throughout this guideline:

- 1st index:
1 exhaust air (FO)
2 outside air (AU)
2nd index:
1 inlet
2 outlet

5 Kennzahlen der Wärmerückgewinnung

Die für die Beurteilung einer Wärmerückgewinnung benötigten Kennzahlen unterteilen sich in die Leistungskennzahlen und die Energiekennzahlen. Grundsätzlich dienen die Leistungskennzahlen zur Vergleichbarkeit der Systeme unter fest definierten Betriebsbedingungen.

Energiekennzahlen bilanzieren Kenngrößen einer Wärmerückgewinnung über mindestens ein Jahr.

Die Einflüsse von mehrfachfunktionalen Systemen sind in den folgenden Kennzahlen nicht berücksichtigt.

5.1 Leistungskennzahlen

Die Güte einer Wärmerückgewinnung wird unter trockenen Bedingungen durch den Temperaturänderungsgrad Φ_t (Rückwärmzahl) bezogen auf die Außenluft bestimmt.

Bei Feuchteübertragung wird die Wärmerückgewinnung zusätzlich durch den Feuchteänderungsgrad Ψ (Rückfeuchtzahl) beschrieben.

Die Änderungsgrade werden gemäß DIN EN 308 nur auf der Außenluftseite definiert, um Verwechslungen zu vermeiden. Physikalisch ist aber auch die Definition der Änderungsgrade, bezogen auf die Fortluft, möglich.

Da in der überwiegenden Zeit der Nutzung eine Kondensation auf der Fortluftseite ausgeschlossen werden kann, ist die Angabe des Temperaturänderungsgrades Φ_t unter trockenen Bedingungen (ohne Kondensation) definiert. Mit zunehmender Kondensation auf der Fortluftseite kann der Änderungsgrad deutlich durch den verbesserten Wärmeübergang und die höheren Temperaturdifferenzen, bedingt durch den latenten Enthalpieanteil, ansteigen.

5.1.1 Temperaturänderungsgrad Φ_t (Rückwärmzahl)

Der Temperaturänderungsgrad Φ_t gibt das Verhältnis der Temperaturänderung der Außenluft einer Wärmerückgewinnung zur maximal möglichen Temperaturänderung, der Differenz zwischen Außenluft- und Ablufttemperatur, an:

$$\Phi_t = (t_{22} - t_{21}) / (t_{11} - t_{21}) \quad (1)$$

Der Temperaturänderungsgrad ist unter „trockenen Bedingungen“, das heißt ohne Kondensation, definiert, siehe Bild 1.

5 Heat recovery characteristics

The characteristics that are required for the assessment of a heat recovery are divided into two groups: performance characteristics and energy efficiency characteristics. The fundamental role of the performance characteristics is to allow comparisons between systems under clearly defined operating conditions.

Energy efficiency characteristics represent a balance of the characteristics of a heat recovery over the course of at least one year.

The influences of multi-functional systems are not taken into consideration in the following characteristics.

5.1 Performance characteristics

The quality of a heat recovery is determined on the basis of the temperature differential Φ_t (temperature efficiency) in relation to the outside air under dry conditions.

In the case of moisture transfer, the heat recovery is also described by means of the moisture differential Ψ (humidity efficiency).

The degrees of change are defined only for the outside air side, according to DIN EN 308, in order to avoid confusion. It would, however, be physically possible to define the degree of change in relation to the extract air.

Since the use of condensation on the extract air side is not possible most of the time, the temperature differential Φ_t is defined under dry conditions (without condensation). With increasing condensation on the extract air side, the degree of change can increase markedly through improved heat transfer and higher temperature differences, due to the proportion of latent enthalpy.

5.1.1 Temperature differential Φ_t (temperature efficiency)

The temperature differential Φ_t indicates the relationship between the temperature change in the outside air of a heat recovery and the maximum possible temperature change, the difference between the outside air and the exhaust air temperatures:

$$\Phi_t = (t_{22} - t_{21}) / (t_{11} - t_{21}) \quad (1)$$

The temperature differential is defined under “dry conditions”, i.e., without condensation, see Figure 1.

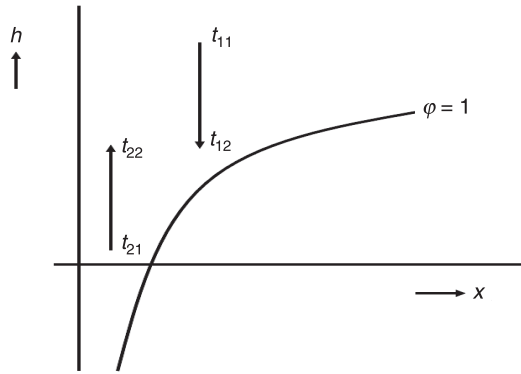


Bild 1. Darstellung der trockenen (ohne Kondensation) Wärmehückgewinnung im h - x -Diagramm (Winterbetrieb)

Figure 1. Illustration of sensible heat recovery (without condensation) in an h - x -diagram (winter operation)

5.1.2 Feuchteänderungsgrad Ψ (Rückfeuchtzahl)

Bei einer möglichen Feuchteübertragung kann auch ein Feuchteänderungsgrad Ψ analog gebildet werden aus

$$\Psi = \frac{(x_{22} - x_{21})}{(x_{11} - x_{21})} \quad (2)$$

Dabei ist

x absolute Feuchte der Luft in g/kg

Hierbei ist zu beachten, dass der Feuchteänderungsgrad der WRG unter Umständen nicht konstant ist und von den Luftzuständen der beiden Luftströme abhängig ist.

5.1.3 Leistungszahl ε

Neben den Änderungsgraden wird die Effizienz der WRG durch die Druckverluste auf den Medienseiten und durch weitere Hilfsenergien bestimmt. Die Richtlinie VDI 3803 Blatt 1 definiert neben den Mindestrückwärmzahlen die maximalen Druckverluste auf der Luftseite der WRG bei einem ausgeglichenen Massenstromverhältnis.

Die Hilfsenergien werden im Wesentlichen durch die elektrischen Antriebe (Ventilatoren und weitere Verbraucher, z.B. Pumpen oder Verdichter) bestimmt. Die erforderlichen elektrischen Leistungen errechnen sich dabei aus

$$P_{\text{el}} = \frac{\dot{V}_{\text{AU}} \cdot \Delta p_{\text{WRG,AU}}}{\eta_{\text{AU}}} + \frac{\dot{V}_{\text{FO}} \cdot \Delta p_{\text{WRG,FO}}}{\eta_{\text{FO}}} + P_{\text{Zus}} \quad (3)$$

Dabei ist

P_{el}	elektrische Wirkleistung in W
\dot{V}	Volumenstrom in m^3/s
Δp_{WRG}	Druckverluste für die WRG in Pa, die innerhalb der gewählten Bilanzgrenze verursacht werden
η	Gesamtwirkungsgrad des Antriebs (z.B. Ventilatoren)
P_{Zus}	zusätzliche Hilfsleistungen in W

5.1.2 Humidity differential Ψ (humidity efficiency)

In cases of moisture transfer, the humidity differential Ψ can also be calculated analogously on the basis of

$$\Psi = \frac{(x_{22} - x_{21})}{(x_{11} - x_{21})} \quad (2)$$

where

x absolute humidity in the air, in g/kg

It should be noted, in this context, that the humidity differential in the HR may not be constant and is dependent upon the condition of the air in the two airflows.

5.1.3 Coefficient of performance ε

The efficiency of the HR is not only determined by the differentials, but also by the pressure drops on the fluid media side and additional sources of auxiliary power. Guideline VDI 3803 Part 1 defines not only the minimum heat efficiency, but also the maximum pressure drops on the air side of the HR in the case of a balanced mass flow ratio.

The level of auxiliary power is essentially determined by the electrical drives (ventilators and other consumers, e.g. pumps and condensers). The required electrical input is calculated on the basis of

$$P_{\text{el}} = \frac{\dot{V}_{\text{AU}} \cdot \Delta p_{\text{WRG,AU}}}{\eta_{\text{AU}}} + \frac{\dot{V}_{\text{FO}} \cdot \Delta p_{\text{WRG,FO}}}{\eta_{\text{FO}}} + P_{\text{Zus}} \quad (3)$$

where

P_{el}	effective electrical power, in W
\dot{V}	volume flow, in m^3/s
Δp_{WRG}	pressure drops for the HR, in Pa, which are caused within the chosen balance boundary
η	total efficiency of the drive (e.g. ventilators)
P_{Zus}	additional auxiliary power, in W

Die elektrischen Leistungen die zum Betrieb der WRG notwendig sind, können auch durch eine Leistungszahl ε , also das Verhältnis der thermischen Leistung zur elektrischen Leistung, bewertet werden:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_{\text{WRG}}}{P_{\text{el}}} \quad (4)$$

The electric power input that is required for the operation of the HR can also be assessed by means of a coefficient of performance ε , i.e., the ratio of thermal power to electrical power:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_{\text{WRG}}}{P_{\text{el}}} \quad (4)$$

5.1.4 Wirkungsgrad η_{WRG}

Der Wirkungsgrad der WRG (Bild 2) wird aus den thermischen und den elektrischen Leistungen abgeleitet. Er stellt eine zusammengesetzte Größe aus dem Temperaturänderungsgrad und der Leistungszahl dar:

$$\begin{aligned} \eta_{\text{WRG}} &= \frac{(\dot{Q}_{\text{WRG}} - P_{\text{el}})}{\dot{Q}_{\text{P}}} \\ \eta_{\text{WRG}} &= \frac{\left(1 - \frac{P_{\text{el}}}{\dot{Q}_{\text{WRG}}}\right)}{\left(\frac{\dot{Q}_{\text{P}}}{\dot{Q}_{\text{WRG}}}\right)} \\ \eta_{\text{WRG}} &= \frac{\left(1 - \frac{1}{\varepsilon}\right)}{\left(\frac{1}{\Phi_t}\right)} \\ \eta_{\text{WRG}} &= \Phi_t \cdot \left(1 - \frac{1}{\varepsilon}\right) \\ \eta_{\text{WRG}} &= \Phi_t \cdot \left(1 - \frac{P_{\text{el}}}{\dot{Q}_{\text{WRG}}}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

5.1.4 Efficiency η_{WRG}

The efficiency of the HR (Figure 2) is calculated on the basis of the thermal and the electrical inputs. It represents a composite value of the temperature differential and the coefficient of performance:

$$\begin{aligned} \eta_{\text{WRG}} &= \frac{(\dot{Q}_{\text{WRG}} - P_{\text{el}})}{\dot{Q}_{\text{P}}} \\ \eta_{\text{WRG}} &= \frac{\left(1 - \frac{P_{\text{el}}}{\dot{Q}_{\text{WRG}}}\right)}{\left(\frac{\dot{Q}_{\text{P}}}{\dot{Q}_{\text{WRG}}}\right)} \\ \eta_{\text{WRG}} &= \frac{\left(1 - \frac{1}{\varepsilon}\right)}{\left(\frac{1}{\Phi_t}\right)} \\ \eta_{\text{WRG}} &= \Phi_t \cdot \left(1 - \frac{1}{\varepsilon}\right) \\ \eta_{\text{WRG}} &= \Phi_t \cdot \left(1 - \frac{P_{\text{el}}}{\dot{Q}_{\text{WRG}}}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

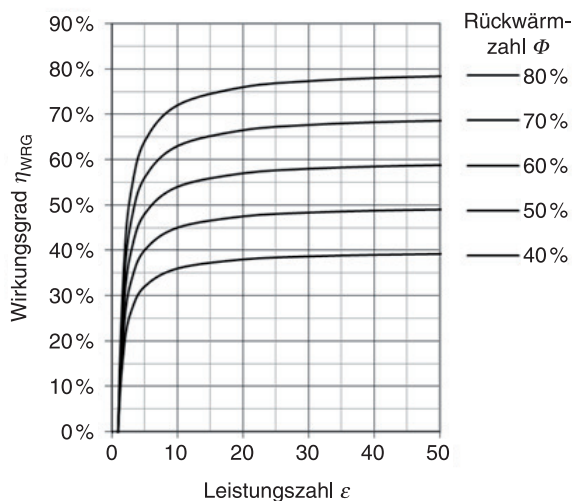


Bild 2. Wirkungsgrad η_{WRG}

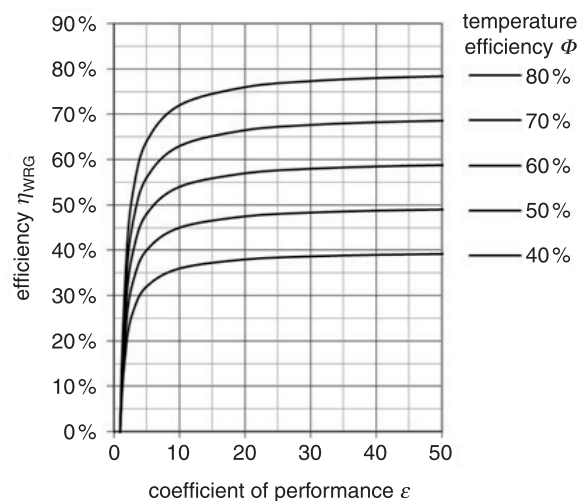


Figure 2. Efficiency η_{WRG}

5.1.5 Wärmebereitstellungsgrad

Der Wärmebereitstellungsgrad ist nicht identisch mit dem Temperaturänderungsgrad.

Er berücksichtigt die durch die Wärmerückgewinnung insgesamt zugeführte Wärme, die sich aus der Wärmerückgewinnung selbst und der zugeführten elektrischen Leistung zum Betrieb der WRG ergibt. Der in der Wohnungslüftung verwendete Wärmebereitstellungsgrad ist für die Beurteilung von WRG-Systemen in RLT-Anlagen ungeeignet.

5.1.6 Referenzbetriebszustand

Zum Vergleich von Systemen in individuellen Projekten und hinsichtlich der Forderungen der DIN EN 13053 sind die in dieser Richtlinie definierten Leistungskennzahlen für folgende Referenzbedingungen, in Anlehnung an DIN EN 308, anzugeben:

- Massenstromverhältnis $\dot{m}_1/\dot{m}_2 = 1$ (bei $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$)
- Außenlufttemperatur = 5 °C
- Fortlufttemperatur = 25 °C
- keine Taupunktunterschreitung auf der Fortluftseite und somit keine Kondensatbildung (sensible Wärmeübertragung)
- ohne Wärmeein- oder Auskopplung
- ohne Umluftanteil

Anmerkung: Die vorgenannten Kennzahlen sind von der Luftgeschwindigkeit abhängig.

Die Leistungskennzahlen gelten nur für diesen Referenzbetriebszustand und dürfen nicht für andere Betriebszustände übernommen werden. Sie müssen für andere Zustände jeweils neu berechnet werden.

Auf abweichende Massenstromverhältnisse kann im Bereich von $0,8 < (\dot{m}_1/\dot{m}_2) < 1,25$; $\Phi_{t,1:1} < 0,8$ und $\dot{m}_1/\dot{m}_2 = \text{const.}$ näherungsweise den Temperaturänderungsgrad nach folgender empirischer Gleichung umgerechnet werden:

$$\Phi_t = \Phi_{t,1:1} \cdot \left(\frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_2} \right)^{0,4} \quad (6)$$

5.2 Energiekennzahlen

Ergänzend zu den zuvor aufgeführten Leistungskennzahlen können die Energiekennzahlen zu Aussagen über die Wirtschaftlichkeit und den tatsächlichen Nutzen einer WRG herangezogen werden. Dazu müssen Energie- und Wärmeströme über ein Jahr bilanziert werden.

Die Energiekennzahlen werden aus den kumulierten Energien ermittelt und sind somit repräsentative Beurteilungskriterien für die WRG.

5.1.5 Heat recovery efficiency

The heat recovery efficiency is not identical to the temperature differential.

It takes the total amount of heat that is added by the heat recovery into consideration, i.e. the recovered heat as well as added electrical input to operate the heat recovery. The measure of heat recovery efficiency used in conjunction with residential ventilation is not suited for the assessment of HR in air-conditioning units.

5.1.6 Reference operating condition

In order to be able to compare systems in individual projects and in view of the requirements of DIN EN 13053, the performance characteristics as defined in this guideline must be provided for the following reference conditions, in orientation on DIN EN 308:

- mass flow ratio $\dot{m}_1/\dot{m}_2 = 1$ (at $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$)
- outside air temperature = 5 °C
- extract air temperature = 25 °C
- no drop below the dewpoint on the extract air side and thus no condensation formation (sensible heat transfer)
- without heat coupling and decoupling
- without any proportion of recirculated air

Note: The named characteristics are dependent from air velocity.

The performance characteristics are only valid for these reference operating conditions and cannot be applied to other operating conditions. They must be calculated individually for all other conditions.

The temperature differential can be recalculated to take approximate account of deviant mass flow conditions in the a range from $0,8 < (\dot{m}_1/\dot{m}_2) < 1,25$; $\Phi_{t,1:1} < 0,8$ and $\dot{m}_1/\dot{m}_2 = \text{const.}$ by using the following empirical equation:

$$\Phi_t = \Phi_{t,1:1} \cdot \left(\frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_2} \right)^{0,4} \quad (6)$$

5.2 Energy characteristics

Energy characteristics can be used in addition to the previously cited performance characteristics to determine the efficiency and the actual benefit of an HR. This requires the balancing of energy and heat flows over the course of a year.

The energy characteristics are determined on the basis of the accumulated energy and are thus representative assessment criteria for the HR.

5.2.1 Jahresarbeitszahl ε_a

Da die thermische Energie Q_{WRG} und die elektrische Energie W_{el} eine sehr unterschiedliche Wertigkeit aufweisen, wird diesem Umstand durch die Einführung eines Primärenergiefaktors f Rechnung getragen.

$$\varepsilon_a = \frac{Q_{\text{WRG}}}{f \cdot W_{\text{el}}} = \frac{\int_0^{8760} |\dot{Q}_{\text{WRG}}| dt}{f \cdot \int_0^{8760} P_{\text{el}} dt} \quad (7)$$

Dabei ist

Q_{WRG}	thermische Nutzenergie der WRG
f	Primärenergiefaktor (z.B. $f = 2$)
W_{el}	elektrische Energie in Wh
P_{el}	elektrische Antriebsleistung (Wirkleistung) in W

5.2.2 Jahresdeckungsgrad N_a

Der Jahresdeckungsgrad beschreibt den Anteil der WRG am Gesamtwärmebedarf der RLT-Anlage. Er kann nicht, bzw. nur eingeschränkt, zur Beurteilung der Qualität der WRG verwendet werden, da er nicht nur von der Güte der WRG, sondern auch stark von den definierten Sollwerten im Anwendungsfall abhängt.

$$N_a = \frac{Q_{\text{WRG}}}{Q_{\text{RLT}}} = \frac{\int_0^{8760} |\dot{Q}_{\text{WRG}}| dt}{\int_0^{8760} |\dot{Q}_{\text{RLT}}| dt} \quad (8)$$

Dabei ist

Q_{RLT} Lüftungswärmebedarf

5.2.3 Jahrestemperaturänderungsgrad Φ_a

$$\Phi_a = \frac{Q_{\text{WRG}}}{Q_p} = \frac{\int_0^{8760} |\dot{Q}_{\text{WRG}}| dt}{\int_0^{8760} |\dot{m}_2 \cdot c_p \cdot (t_{21} - t_{11})| dt} \quad (9)$$

5.2.4 Jahreswirkungsgrad η_a

$$\eta_a = \frac{Q_{\text{WRG}} - f \cdot W_{\text{el}}}{Q_p} = \frac{\int_0^{8760} (|\dot{Q}_{\text{WRG}}| - f \cdot P_{\text{el}}) dt}{\int_0^{8760} |\dot{m}_2 \cdot (t_{21} - t_{11})| dt} \quad (10)$$

5.2.1 Seasonal energy efficiency ratio ε_a

Since the thermal input Q_{WRG} and the electrical input W_{el} exhibit very different values, this situation has been taken into account by the introduction of a primary energy factor f .

$$\varepsilon_a = \frac{Q_{\text{WRG}}}{f \cdot W_{\text{el}}} = \frac{\int_0^{8760} |\dot{Q}_{\text{WRG}}| dt}{f \cdot \int_0^{8760} P_{\text{el}} dt} \quad (7)$$

where

Q_{WRG}	net thermal energy of the HR
f	primary energy factor (e.g. $f = 2$)
W_{el}	electrical input, in Wh
P_{el}	required electrical power (effective power), in W

5.2.2 Average annual coverage N_a

The average annual coverage describes the share of the total heat demand of the air-conditioning unit provided by the HR. It cannot, or only to a limited extent, be used for the assessment of the quality of the HR, since it not only depends on the quality of the HR, but also, to a considerable extent, on the defined set points in the actual application.

$$N_a = \frac{Q_{\text{WRG}}}{Q_{\text{RLT}}} = \frac{\int_0^{8760} |\dot{Q}_{\text{WRG}}| dt}{\int_0^{8760} |\dot{Q}_{\text{RLT}}| dt} \quad (8)$$

where

Q_{RLT} ventilation heat requirement

5.2.3 Annual temperature differential Φ_a

$$\Phi_a = \frac{Q_{\text{WRG}}}{Q_p} = \frac{\int_0^{8760} |\dot{Q}_{\text{WRG}}| dt}{\int_0^{8760} |\dot{m}_2 \cdot c_p \cdot (t_{21} - t_{11})| dt} \quad (9)$$

5.2.4 Annual efficiency η_a

$$\eta_a = \frac{Q_{\text{WRG}} - f \cdot W_{\text{el}}}{Q_p} = \frac{\int_0^{8760} (|\dot{Q}_{\text{WRG}}| - f \cdot P_{\text{el}}) dt}{\int_0^{8760} |\dot{m}_2 \cdot (t_{21} - t_{11})| dt} \quad (10)$$

5.3 Berechnungsverfahren für Energiekennzahlen

Bereits in der Planungsphase sollen die Kennzahlen und Berechnungsverfahren zur Bewertung von Nutzen und Aufwand von WRG-Systemen angewendet werden. Dafür sind Berechnungsverfahren auf der Basis von Summenhäufigkeiten und gegebenenfalls zur umfassenderen Betrachtung quasidynamische oder dynamische Berechnungsverfahren geeignet.

Grafische Verfahren und statische Rechenverfahren zur Ermittlung der Energiekennzahlen auf Basis von mittleren Monatstemperaturen sind nicht zulässig.

Es müssen folgende Parameter zugrunde gelegt und dokumentiert werden:

- Wetterdatensatz entsprechend der Klimazone und den Betriebszeiten
- Betriebszeiten der Anlage
- Luftzustände (Temperatur, Feuchte, Position des Ventilators und Luftmassenströme)
- Sollwerte entsprechend der Bilanzgrenze (Temperatur, Feuchte, Position des Ventilators und Luftmassenströme) entsprechend den Nutzervorgaben
- Erfassung aller durch das WRG-System, innerhalb der festgelegten Bilanzgrenzen, direkt und indirekt verursachten zusätzlichen elektrischen und thermischen Zusatzenergien (im Vergleich zu einer Anlage ohne WRG-System)

5.3.1 Berechnungsverfahren auf der Basis von Summenhäufigkeiten

Zur Ermittlung der Energiekennzahlen von WRG-Systemen ohne Mehrfachfunktionen können Berechnungsverfahren eingesetzt werden, die auf Basis von Summenhäufigkeiten der Temperatur und Feuchte der Außenluft arbeiten. Diese Daten sind z.B. in DIN 4710 und VDI 4710 hinterlegt.

5.3.2 Quasidynamische Berechnungsverfahren

Bei RLT-Anlagen mit zeitlich variablen Betriebsparametern wird das quasidynamische Berechnungsverfahren empfohlen. Bei diesem Berechnungsverfahren werden jedem Zeitintervall von einer Stunde im Jahresverlauf Temperatur und Feuchte zugeordnet. Jedem Zeitintervall werden dann Sollwerte entsprechend der Bilanzgrenze gegenübergestellt. Damit kann das quasidynamische Betriebsverhalten abgebildet werden.

Zusätzlich müssen folgende Parameter im Zeitschritt (maximal eine Stunde) erfasst und dokumentiert werden:

- Wetterdatensatz in stündlicher Auflösung
- zeitlich abhängige Mehrfachfunktion (z.B. freie Kühlung)

5.3 Calculation methods for the energy characteristics

The characteristics and the calculation methods for the assessment of the cost and benefit of an HRS should already be used in the design phase. Calculation methods on the basis of cumulative frequencies and, if needed, quasidynamic or dynamic calculation methods for more comprehensive analysis are suited for this purpose.

Graphic methods and statistical calculation methods to determine the energy characteristics on the basis of mean monthly temperatures are not acceptable.

The following parameters must be used and documented:

- weather data sets corresponding to the climate zone the operating periods
- operating times of the plant
- air conditions (temperature, humidity, position of the ventilator and the air mass flows)
- set points corresponding to the balance boundaries (temperature, humidity, position of the ventilator and air mass flows) according to user requirements
- survey of all of the direct and indirect additional electrical and thermal auxiliary power generated by the HRS within the predetermined balance boundary (in comparison to a plant without an HRS)

5.3.1 Calculation methods on the basis of cumulative frequencies

To determine the energy characteristics of a non-multifunctional HRS, calculation methods based on the cumulative frequencies of temperature and humidity in the outside air can be used. These data are, for example, found in DIN 4710 and VDI 4710.

5.3.2 Quasidynamic calculation methods

In the case of air-conditioning systems with periodically variable operating parameters, the quasidynamic calculation method is recommended. For this calculation method, all temperature and humidity levels are linked to hourly intervals of throughout the year. Then the design values for the balance boundary are contrasted with each of these intervals. Quasidynamic operating behaviour can thus be modelled.

In addition, the following parameters must be recorded and documented in intervals (of no more than an hour):

- weather data sets in hourly intervals
- seasonally or chronologically dependent multifunctions (e.g. free cooling)

- gegebenenfalls Erfassung von zeitlich versetzten Speichereffekten (z.B. Pufferspeicher)

5.3.3 Thermodynamische Gebäude- und Anlagensimulationsprogramme

Bei thermodynamischen Gebäude- und Anlagensimulationsprogrammen werden das dynamische Speicherverhalten des Gebäudes, thermische Gewinne bzw. Verluste und deren Einfluss auf die Luftzustände zusätzlich berechnet. Es können exaktere Lastprofile als mit den zuvor genannten Berechnungsverfahren bestimmt werden.

Die dynamische Simulation erfordert einen umfangreichen Eingabe-, Berechnungs- und Auswerteaufwand. Der Einfluss geänderter Randbedingungen (z.B. Nutzerverhalten) kann nach einmaliger Modellierung einfacher berechnet werden. Es ist auch möglich, die Ergebnisse einer Gebäudesimulation als Randbedingung für ein quasidynamisches Rechenverfahren zu verwenden.

Zusätzlich müssen folgende Parameter zugrunde gelegt und dokumentiert werden:

- erweiterter Wetterdatensatz (z.B. Strahlung)
- Gebäudedaten (z.B. Geometrie, Fensterflächen, Daten der Baumaterialien, Luftdichtigkeit)
- Nutzerdaten
- Zonierung

5.4 Leckage der Wärmerückgewinnung

Die Leckagen einer Wärmerückgewinnung entstehen systembedingt bei der Luftzusammenführung. In Abhängigkeit von der Anordnung der Ventilatoren und der gewählten WRG resultieren hieraus Differenzen zum Nennvolumenstrom. Diese Abweichungen haben Auswirkungen auf

- die Leistung der Wärmerückgewinnung
- die Leistungsaufnahme der jeweiligen Ventilatoren und
- die Luftqualität

und müssen bei der Planung berücksichtigt werden.

Die Leckagezahlen L beschreiben die durch Leckagen verursachten Massenstromerhöhungen im Vergleich zum leckagefreien System.

$$L_1 = \dot{m}_{11}/(\dot{m}_{11} - \dot{m}_{1,2}) = \dot{m}_{11}/\dot{m}_1 \quad (11)$$

$$L_2 = \dot{m}_{21}/(\dot{m}_{21} - \dot{m}_{2,-1}) = \dot{m}_{21}/\dot{m}_2 \quad (12)$$

Dabei ist

- L_1 Leckagezahl Fortluftstrom (1)
- L_2 Leckagezahl Außenluftstrom (2)
- \dot{m}_1 leckagefreier Fortluftstrom in kg/s
- \dot{m}_2 leckagefreier Außenluftstrom in kg/s

- if needed, a survey of storage effects with a time delay (e.g. buffer storage)

5.3.3 Thermically dynamic buildings and plant simulation programmes

In the case of thermodynamic building and plant simulation programmes, the dynamic storage behaviours of the building, thermal gain and/or loss and their influence on the air conditions are also calculated. More exact load profiles can be calculated than with the previously mentioned calculation methods.

Dynamic simulation requires extensive effort for data entry, calculation and evaluation. The influence of altered framework conditions (e.g. user behaviour) can be more easily calculated once it has been modelled. It is also possible to use the results of building simulation as framework conditions for a quasidynamic calculation method.

In addition, the following parameter must be used and documented:

- expanded weather data set (e.g. radiation)
- building data (e.g. geometry, window area, data on the building materials, air tightness)
- user data
- zoning

5.4 Leakage in heat recovery

Leakage in the course of bringing airflows together in heat recovery is system-related. Depending upon the arrangement of the ventilators and the chosen HR, differences in the nominal volume flow result. These deviations have effects on

- the heat recovery performance
- the power consumption of each of the ventilators and
- the air quality

and must be taken into consideration in the design process.

The leakage indices L indicate increases in the mass flow that result in a system with leakage in comparison to a system without leakage.

$$L_1 = \dot{m}_{11}/(\dot{m}_{11} - \dot{m}_{1,2}) = \dot{m}_{11}/\dot{m}_1 \quad (11)$$

$$L_2 = \dot{m}_{21}/(\dot{m}_{21} - \dot{m}_{2,-1}) = \dot{m}_{21}/\dot{m}_2 \quad (12)$$

where

- L_1 leakage index extract airflow (1)
- L_2 leakage index outside airflow (2)
- \dot{m}_1 leakage-free extract airflow, in kg/s
- \dot{m}_2 leakage-free outside airflow, in kg/s

- \dot{m}_{1-2} Umluft-Leckage von Fortluftstrom (1) nach Außenluftstrom (2) in kg/s
 \dot{m}_{2-1} Kurzschlussluft-Leckage von Außenluftstrom (2) nach Fortluftstrom (1) in kg/s

Unabhängig vom Entstehungsort ist ein Leckagestrom die Summe aller Teilleckagen, die mit gleicher Richtung von dem einen in den anderen Luftstrom übertreten. Die entgegengesetzten Leckageströme \dot{m}_{1-2} und \dot{m}_{2-1} treten gleichzeitig auf und mindern sich niemals wechselseitig.

Die Umluftzahl U beschreibt den Umluftanteil des Luftstroms im Außenluftaustritt,

$$U = \dot{m}_{1-2} / (\dot{m}_{21} - \dot{m}_{2-1}) = \dot{m}_{1-2} / \dot{m}_2 \quad (13)$$

Die Leckagen, und damit die Kennzahlen, sind abhängig von der Anordnung der Ventilatoren und damit von den Differenzdrücken zwischen den beiden Luftströmen. Mitrotation und Umschaltvolumen sind unabhängig vom Differenzdruck.

Die genannten Kennzahlen sind zur Charakterisierung einer WRG immer gemeinsam anzugeben.

Die sich tatsächlich einstellenden Luftströme ergeben sich erst durch Korrektur der leckagenfreien Luftströme:

- $\dot{m}_{11} = \dot{m}_1 + \dot{m}_{1-2}$
- $\dot{m}_{12} = \dot{m}_1 + \dot{m}_{2-1}$
- $\dot{m}_{21} = \dot{m}_2 + \dot{m}_{2-1}$
- $\dot{m}_{22} = \dot{m}_2 + \dot{m}_{1-2}$

Dabei sind die leckagenfreien Luftströme (\dot{m}_1, \dot{m}_2) Planerdaten und die Leckagen ($\dot{m}_{1-2}, \dot{m}_{2-1}$) Angaben des WRG-Herstellers.

Zur Sicherstellung der erforderlichen Leistungen sind die Auswirkungen der Leckage bei der Auslegung zu kompensieren:

- bei der Wärmerückgewinnung, indem die zugrunde liegenden leckagenfreien Luftströme \dot{m}_1 und \dot{m}_2 um die durch die Leckage verursachten Unterschiede angepasst werden,
- bei den Ventilatoren durch Berücksichtigung der Druckverluste und Leistungsaufnahmen bei den tatsächlichen Volumenströmen.

Liegen zum Zeitpunkt der Auslegung noch keine projektspezifischen Angaben über die Leckage vor, ist zur Berücksichtigung der Auswirkungen bei Rotationswärmeübertragern und Umschaltspeichern zunächst von einer Leckage von 10 % auszugehen. Hierbei sind bei Auslegung des WRG-Systems und der Ventilatoren der Anlage jeweils mindestens 10 % Volumenstromerhöhung auf beiden Luftseiten (Außenluft und Fortluft) zu berücksichtigen.

- \dot{m}_{1-2} circulation air leakage from extract airflow (1) downstream from outside air flow (2), in kg/s
 \dot{m}_{2-1} short-circuit air leakage from outside air flow (2) downstream from extract airflow (1), in kg/s

Regardless of the location at which the leakage originates, a leakage flow is always the sum of all partial leakage that crosses from one airflow into the other in the same direction. The leakage flows in the opposite direction \dot{m}_{1-2} and \dot{m}_{2-1} occur at the same time and never reduce each other reciprocally.

The recirculation factor U is an indicator of the share of recirculated air in the airflow in the outside air outlet,

$$U = \dot{m}_{1-2} / (\dot{m}_{21} - \dot{m}_{2-1}) = \dot{m}_{1-2} / \dot{m}_2 \quad (13)$$

The leakage and the corresponding characteristics depend upon the arrangement of the ventilators and, thus, upon the differential pressures between the two airflows. Co-rotation and switching volumes are independent of the differential pressure.

The characteristics cited are always to be provided jointly to characterise an HR.

The airflows that actually occur can only be determined after making corrections in relation to the leakage-free airflows:

- $\dot{m}_{11} = \dot{m}_1 + \dot{m}_{1-2}$
- $\dot{m}_{12} = \dot{m}_1 + \dot{m}_{2-1}$
- $\dot{m}_{21} = \dot{m}_2 + \dot{m}_{2-1}$
- $\dot{m}_{22} = \dot{m}_2 + \dot{m}_{1-2}$

This includes leakage-free airflows (\dot{m}_1, \dot{m}_2), design data and the leakage ($\dot{m}_{1-2}, \dot{m}_{2-1}$) information provided by the manufacturer of the heat recovery.

To ensure the required capacity, the effects of the leakage must be compensated during the design process:

- in the case of heat recovery by adapting the leakage-free airflows \dot{m}_1 and \dot{m}_2 , which are used as a basis for planning; to compensate for the differences caused by leakage,
- in the case of the ventilators by taking the pressure drops and power consumption in relation to the actual volume flows into consideration.

If no project-specific data regarding leakage is available at the time of design, a leakage rate of 10 % should be initially assumed in taking the effects of rotating heat exchangers and change over units into consideration. In this conjunction, a volume flow increase of at least 10 % on both air sides (outside air and extract air) is to be taken into consideration in the design of both HRS and ventilators for the system.

6 Grundlagen

Zur Vermeidung einer Umluftführung über die WRG wird das Wärmerückgewinnungssystem immer in Außen- und Fortluft eingesetzt.

6.1 Bilanzgrenzen der Wärmerückgewinnung

Zur energetischen und wirtschaftlichen Betrachtung der Wärmerückgewinnungssysteme ist es von besonderer Bedeutung, wo und wie die Bilanzgrenzen für die Beurteilung gezogen werden.

Innerhalb der Bilanzgrenze wird der Nutzen einer WRG im Vergleich zur Technik ohne WRG bewertet. Die Bilanzgrenze ist so festzulegen, dass die Wärmerückgewinnung und alle davon beeinflussten Energieströme, Anlagenteile sowie die baulichen Rahmenbedingungen einbezogen sind (Bild 3).

Die so gezogene Bilanzgrenze gestattet eine konsistente Betrachtung hinsichtlich Kennzahlen, Energieströmen, Umweltschutz und Wirtschaftlichkeit (Investitions-, Substitutions- sowie Betriebskosten). Erst hierdurch ist abschließend eine sichere Bewertung von WRG-Systemen möglich.

Je nach Zielsetzung der Betrachtung kann eine vereinfachte Bilanzgrenze gezogen werden. Dabei ist zu beachten, dass mit der Wahl der Bilanzgrenze die Ergebnisse der Betrachtung beeinflusst werden können. Deshalb ist zu jeder Betrachtung die verwendete Bilanzgrenze anzugeben.

6 Basics

To avoid the conduction of recirculated air through the HR unit, the HRS is always installed in the outside and in the extract air flows.

6.1 Balance boundaries of heat recovery

For the energetic and economic assessment of the heat recovery system it is particularly important to determine where and how the balance boundaries for the assessment were drawn.

The benefit of HR is assessed in comparison to technology without HR within the balance boundary. The balance boundary is to be determined in a manner that takes heat recovery, all other energy flows influenced by it, plant components and the conditions of the surrounding construction into consideration (Figure 3).

The balance boundary drawn in this manner allows for consistent assessment of the indicators, energy flows, environmental protection and economy (investment, substitution as well as operating costs). Only in this manner a final and reliable assessment of an HRS is possible.

Depending upon the purpose of the assessment, a simplified balance boundary can also be drawn. In this context, it should be kept in mind that the selection of the balance boundary influences the results of the assessment. Therefore, the balance boundary used for every assessment must be provided.

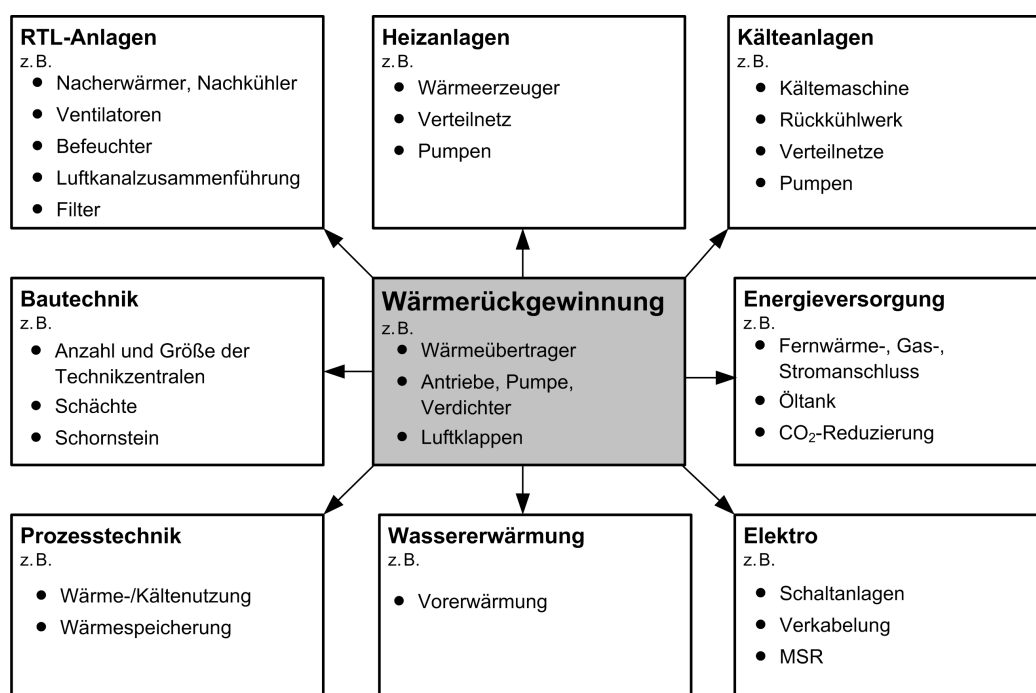


Bild 3. Beispiel der Gesamtbilanzgrenze für WRG und deren beeinflusste Bereiche

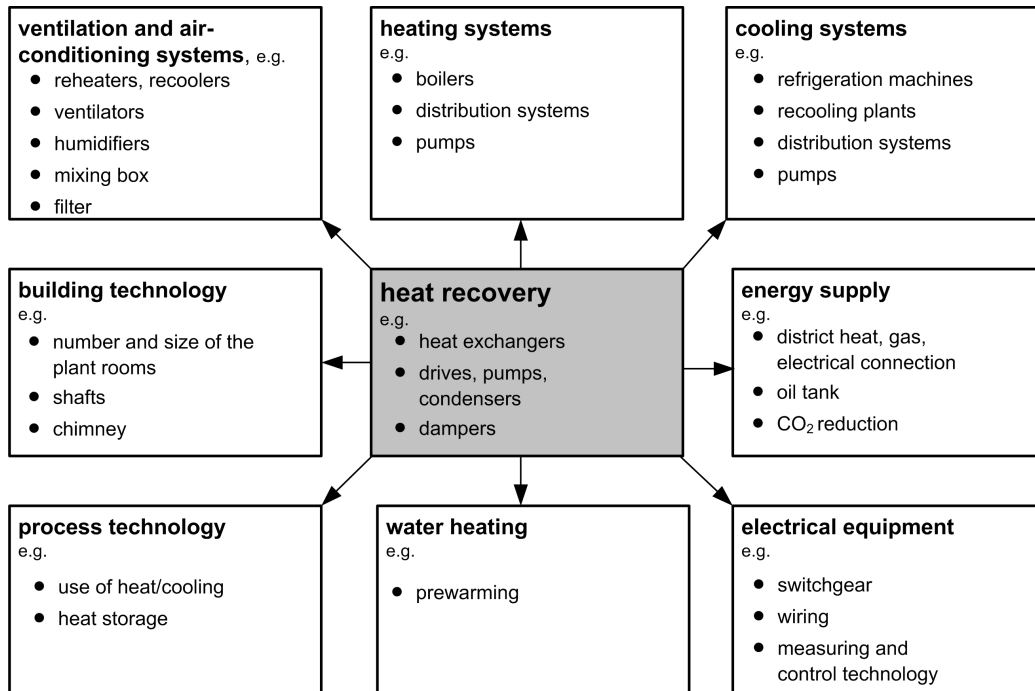


Figure 3. Example of the total balance boundary for HR and figure areas influenced by it

6.2 Vereinfachte Bilanzgrenzen

Zur Vereinfachung werden Energieströme und Anlagenteile ausgeblendet und damit vernachlässigt. Vereinfachte Bilanzgrenzen können zur Betrachtung unterschiedlicher Betriebsfälle gleicher WRG-Systeme verwendet werden (Bild 4 bis Bild 6).

6.2.1 Anlagenbilanz

Vereinfachend wird die Bilanzgrenze nur um die RLT-Anlage gezogen. Insofern werden das Lüftungs-

6.2 Simplified balance boundaries

For the purpose of simplification, the energy flows and components are excluded and thus not taken into consideration. Simplified balance boundaries can be used for the assessment of different operating cases for the same HRS (Figure 4 to Figure 6).

6.2.1 Plant balance

For purposes of simplification, the balance boundary is only drawn around the air-conditioning system. To this

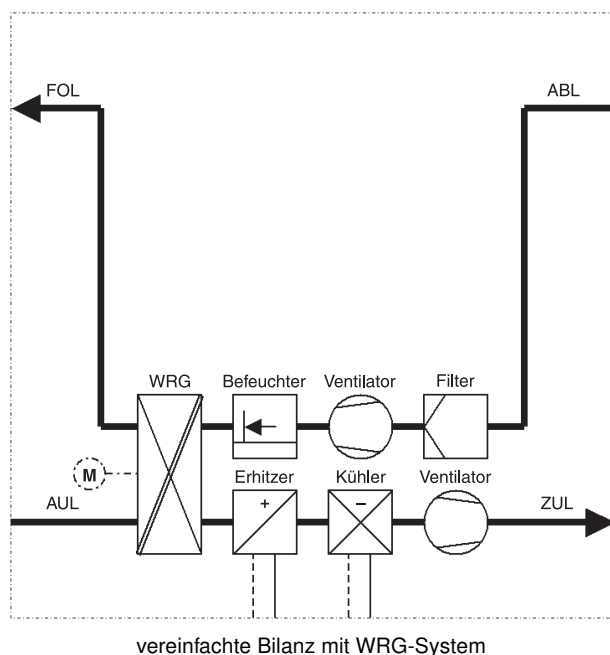
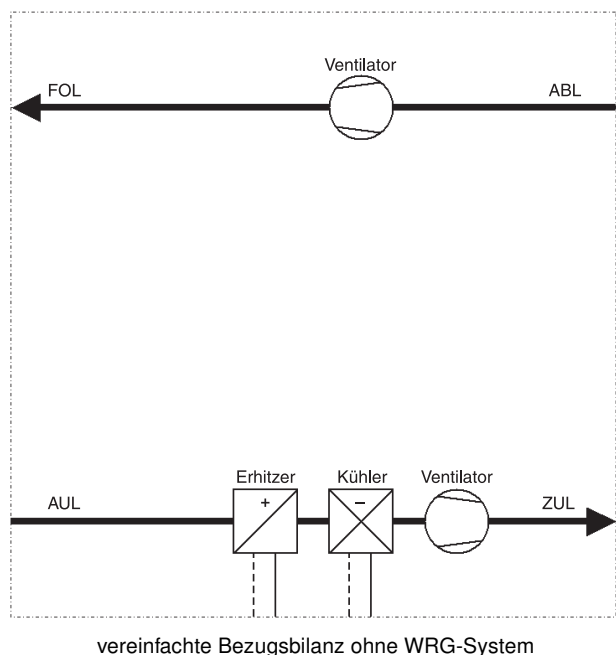
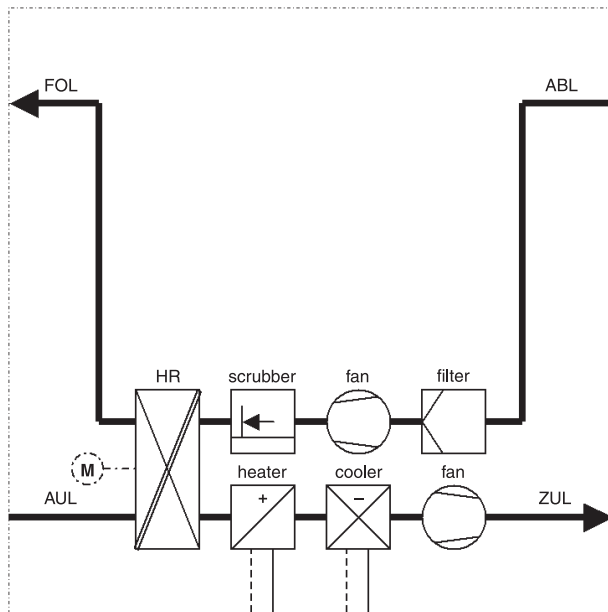


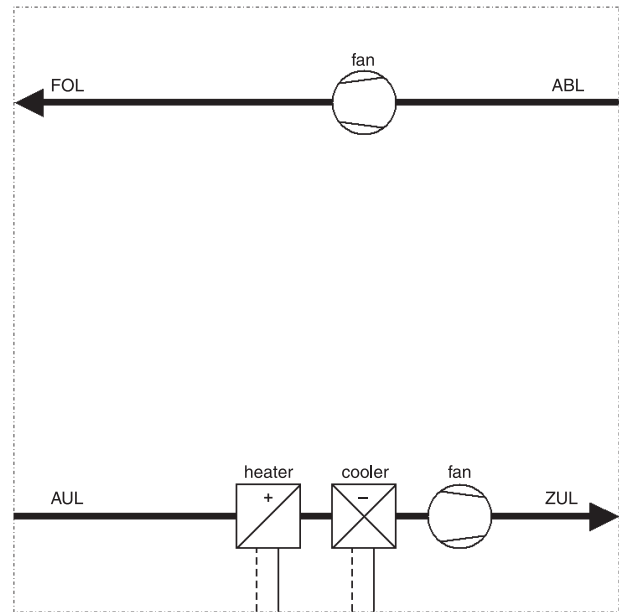
Bild 4. Beispiel für Luftverbundsystem



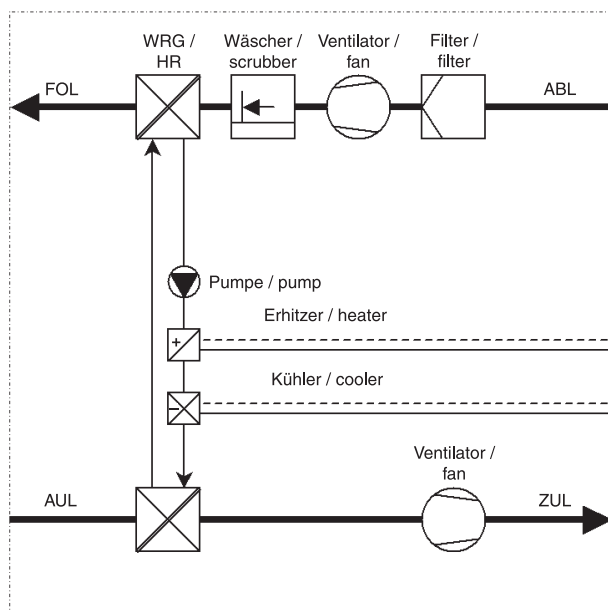
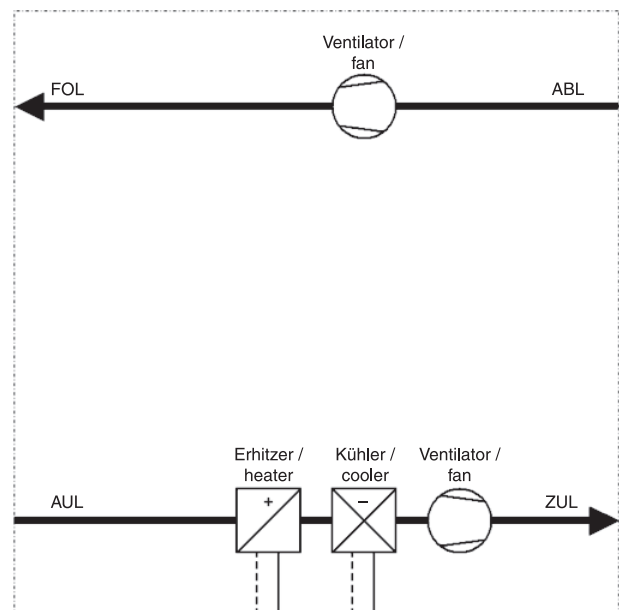


simplified balance with an HRS

Figure 4. Example of an air loop system



simplified delivery balance without an HRS

vereinfachte Bilanz mit WRG-System /
simplified balance with an HRSvereinfachte Bezugsbilanz ohne WRG-System /
simplified delivery balance without an HRSBild 5. Beispiel für Kreislaufverbundsystem, insbesondere mehrfachfunktionales WRG-System /
Figure 5. Example of a coil energy recovery loop system, particularly of a multifunctional HRS

system mit seinen luftseitigen Widerständen und externen Wärme- und Kälteströmen sowie die bauliche Situation der RLT-Anlage noch adäquat berücksichtigt.

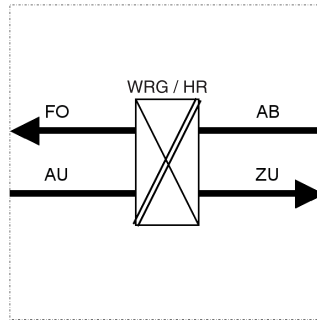
6.2.2 Bilanz der Wärmerückgewinnungskomponente

Bei ausschließlicher Betrachtung der Wärmerückgewinnung kann die Bilanzgrenze nur um die einzelnen Komponenten gezogen werden.

extent, the airflows with their air-side resistances and external heat and cooling flows, as well and building situation in which the air-conditioning system is located, are still adequately taken into consideration.

6.2.2 Balance of the heat recovery components

When the focus is solely on heat recovery, the balance boundary can be drawn around the individual components alone.



Einzelbilanz mit WRG-System / individual balance with an HRS

Bild 6. Beispiel für ein WRG-System

Figure 6. Example of an HRS

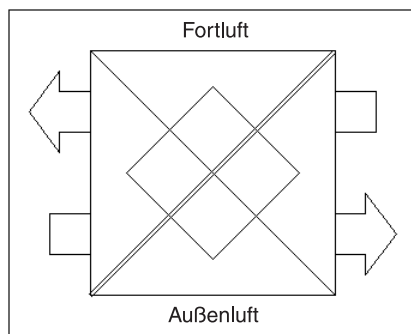
6.3 Wärmerückgewinnungssysteme

6.3.1 Einteilung und Übersicht

Die Wahl eines geeigneten WRG-Systems hängt von einigen Kriterien ab. Bild 7 und Tabelle 1 sollen hier eine Hilfe für die Auswahl sein.

6.3.2 Systembeschreibungen der Wärmerückgewinnung

6.3.2.1 Plattenwärmeübertrager



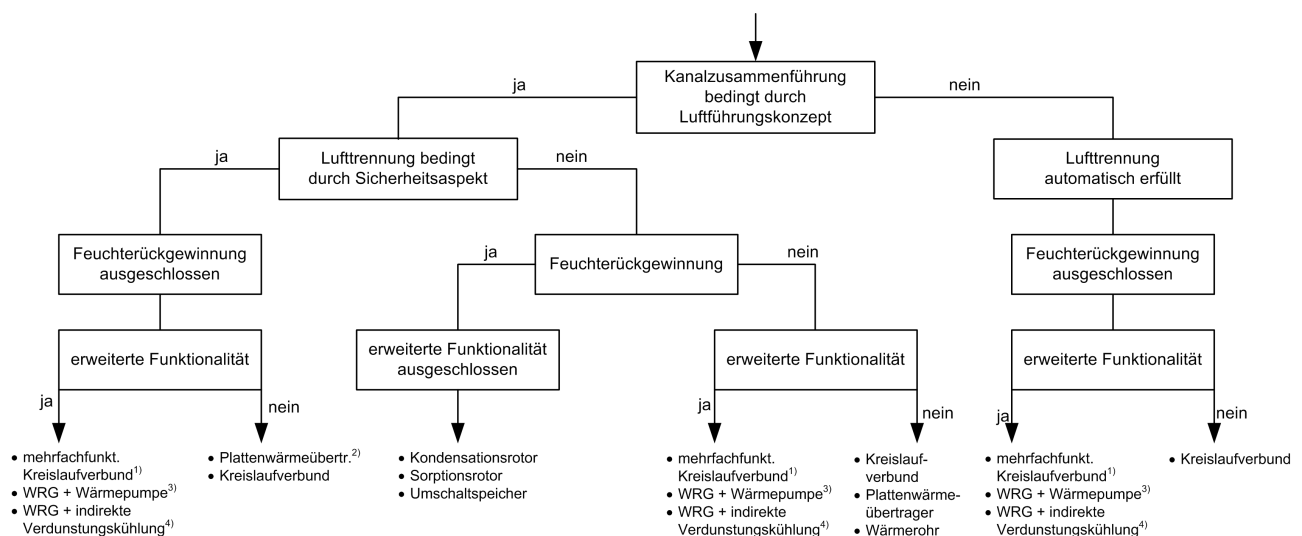
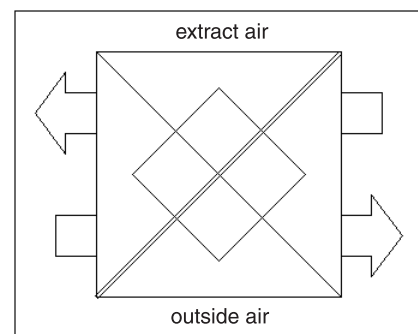
6.3 Heat recovery systems

6.3.1 Classification and overview

The selection of a suitable HRS depends on a number of criteria. Figure 7 and Table 1 are meant to provide assistance in making a selection.

6.3.2 System description of the heat recovery

6.3.2.1 Plate heat exchangers



¹⁾ Temperaturänderungsgrad von mindestens 70 % erforderlich

²⁾ Druckgefälle von Zuluft zu Fortluft erforderlich

³⁾ Wärmepumpe nur in Verbindung mit WRG-System

⁴⁾ indirekte Verdunstungskühlung ausgeschlossen bei sorptiven Systemen

Bild 7. Auswahlkriterien für WRG-Systeme

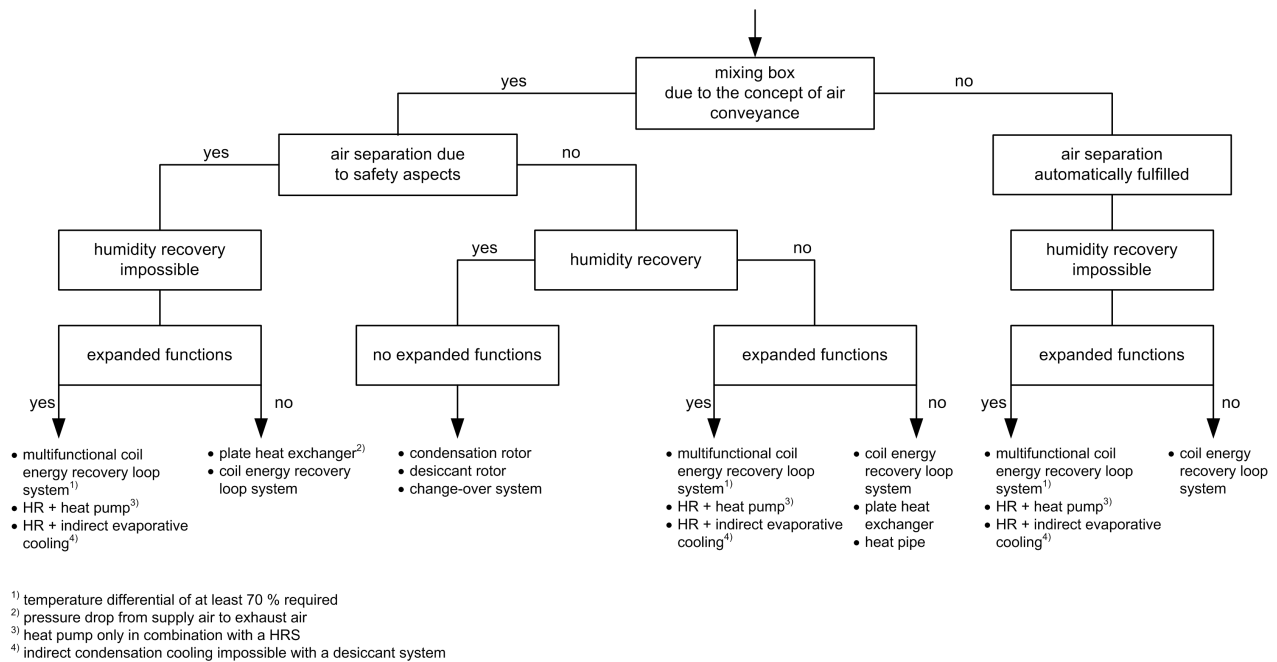


Figure 7. Selection criteria for HRS

Tabelle 1. Übliche Merkmale der WRG-Systeme

Merkmale	Platten- wärme- übertrager	Wärmerohr	Rotations- wärme- übertrager	Umschalt- speicher	Kreislauf- verbund- system
Außenluft- und Fortluftkanal zusammengeführt	ja	ja	ja	ja	nein
Luftvolumenstrom	klein bis mittel	klein bis mittel	klein bis groß	klein bis mittel	klein bis groß
Kontamination der Zuluft möglich (bei Druckgefälle von Fortluft in die Außenluft)	ja	ja	ja	ja	nein
Kontamination der Zuluft möglich (bei Druckgefälle von Außenluft in die Fortluft)	nein	nein	ja ^{a)}	ja	nein
Feuchteübertragung bei Kondensation	nein	nein	ja	ja	nein
Feuchteübertragung durch Sorption	nein	nein	ja	ja	nein
Indirekte Verdunstungskühlung	ja	nein ^{b)}	ja ^{c)}	nein	ja
Mehrfachfunktionale Nutzung möglich	nein	nein	nein	nein	ja ^{d)}
Hilfsenergie	nein	nein	ja	ja	ja
Leckage	gering	gering	deutlich	deutlich	nein
Leckage bei Defekt möglich	ja	ja	ja	ja	nein
Einfriergefahr	hoch	mittel	gering	gering	mittel
Kälterückgewinnung	ja	nein ^{b)}	ja	ja	ja
Wartungsaufwand	gering	gering	mittel	mittel	mittel
Brand- oder Rauchübertragung möglich	ja	ja	ja	ja	nein
Begrenzung max. Druckdifferenz der Luftströme notwendig	ja	nein	ja	ja	nein
Konstante Druckverhältnisse möglich	ja	ja	ja	nein	ja

a) kann durch Einsatz einer Spülkammer minimiert oder verhindert werden

b) Ausnahme bei Kapillarwärmerohr oder Kippregelung

c) wenn Feuchteübertragung ausgeschlossen werden kann (kein Sorptionsrotor zulässig)

d) ab 70 % Temperaturänderungsgrad sinnvoll

Table 1. Common features of HRS

Feature	Plate heat exchangers	Heat pipe	Rotary heat exchangers	Switchover unit	Coil energy recovery loop
Outside air and extract air canal brought together	yes	yes	yes	yes	no
Air volume flow	small to medium	small to medium	small to large	small to medium	small to large
Contamination of supply air possible (in cases of pressure drop from extract air to the outside air)	yes	yes	yes	yes	no
Contamination of supply air possible (in cases of pressure drop from outside air to extract air)	no	no	yes ^{a)}	yes	no
Moisture transfer in cases of condensation	no	no	yes	yes	no
Moisture transfer through sorption	no	no	yes	yes	no
Indirect evaporative cooling	yes	no ^{b)}	yes ^{c)}	no	yes
Multifunctional use possible	no	no	no	no	yes ^{d)}
Auxiliary power	no	no	yes	yes	yes
Leakage	slight	slight	considerable	considerable	no
Leakage possible in case of a defect	yes	yes	yes	yes	no
Danger of freezing	high	moderate	slight	slight	moderate
Cooling recovery	yes	no ^{b)}	yes	yes	yes
Maintenance	slight	slight	moderate	moderate	moderate
Fire or smoke transmission possible	yes	yes	yes	yes	no
Limitation of max. pressure difference of the airflows required	yes	no	yes	yes	no
Constant pressure conditions possible	yes	yes	yes	no	yes

a) can be minimised or prevented by the use of a purging chamber

b) exception in the case of horizontal capillary heat pipe or tilt control

c) when moisture transmission can be excluded (sorption rotor is not acceptable)

d) recommended as of 70 % temperature differential

Konstruktion und Bauform

Fortluft und Außenluft werden in einem Gehäuse getrennt durch dünne Platten (Trennflächen) aneinander vorbeigeführt. Die Platten aus z.B. Aluminium, Edelstahl oder Kunststoff sind untereinander verklebt oder mechanisch verbunden sowie in den Eckprofilen abgedichtet. Horizontale Plattenposition soll vermieden werden. Die Luftführung erfolgt im Kreuzstrom, Kreuz-/Gegenstrom oder Gegenstrom.

Wirkungsweise

Als Folge der Temperaturdifferenz zwischen den beiden Luftströmen wird durch die trennende Wand Wärme übertragen. Bei Taupunktunterschreitung des feuchten Luftstroms wird Kondensat ausgeschieden und die Wärmeübertragung des Rückgewinners verbessert.

Leckage

Durch die Platten sind Fortluft- und Außenluftstrom voneinander getrennt. Die Leckage der Plattenwärmeübertrager liegt dabei im Promillebereich des Nennluftstroms. Durch den Einbau im Gehäuse können zusätzliche Leckagen entstehen.

Construction and configuration

Extract air and outside air pass by each other within a casing, separated only by thin plates. The plates made of materials such as aluminium, stainless steel or plastic are glued together or mechanically fastened and sealed within the frames. Positioning the plates horizontally should be avoided. The air is conducted in cross flow, cross/counterflow or counterflow patterns.

Mode of operation

As a consequence of the temperature difference between the two airflows, heat is transferred through the separating wall. If the moist airflow falls below the dewpoint, condensation is discharged and the heat transfer of the heat recovery unit is improved.

Leakage

Extract air and outside airflows are separated from each other by the plates. The leakage for plate heat exchangers is thus in the pars pro mille range of the nominal airflow. Additional leakage can occur as a result of the installation in a casing.

Leistungsanpassung

Die übertragene Leistung kann mit einem Klappensystem zum Luftbypass stetig reduziert werden. Dieses befindet sich meist im Außenluftstrom.

Vereisungsschutz

Um bei niedrigen Außenlufttemperaturen und bei entsprechenden Feuchtelasten eine Vereisung des Kondensats auf der Fortluftseite zu vermeiden, ist die Übertragungsleistung eines WRG-Systems zu begrenzen (z.B. Außenluftbypass, Intervallschaltung). Für diese Betriebsfälle muss die Erhitzerleistung auf die begrenzte Wärmerückgewinnungsleistung ausgelegt werden. Die Temperaturverteilung nach dem Kreuzstrom-Plattenwärmeübertrager ist inhomogen. Dies ist bei der Auslegung des Vereisungsschutzes zu berücksichtigen.

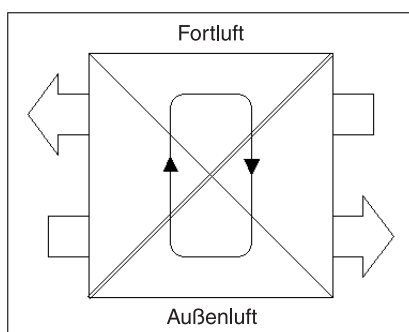
Frostschutz

Um Folgeschäden bei nicht ordnungsgemäßem Betrieb zu vermeiden, sollen zuluftseitig wasserführende Komponenten (z.B. Kühler, Erhitzer) zu ihrem Schutz mit einem Frostschutz versehen werden.

Planungs- und Betriebshinweise

Zur Leistungsverbesserung können mehrere Wärmeübertrager hintereinander geschaltet werden. Eine Zusammenführung der Luftströme der Anlage ist notwendig. Die Differenzdrücke zwischen beiden Luftströmen und die zulässigen Leckluftraten beeinflussen die Bauart und die Einbausituation. Etwaiges Kondensat ist zu sammeln und abzuleiten. Das Material ist entsprechend den Anforderungen in Bezug auf Statik, Wärmeaustausch, Korrosion und Verschmutzung auszuwählen. Zur Beibehaltung der Betriebssicherheit sind Klappenmechaniken und -antriebe mit in die Wartungsarbeiten aufzunehmen.

6.3.2.2 Wärmerohr



Konstruktion und Bauform

Wärmeübertragende Luftströme sind in einem Gehäuse zusammengeführt. Die Wärmeübertragung erfolgt beim Wärmerohr über Trennflächen mithilfe ei-

Adaptation of capacity

The transfer capacity can be constantly reduced by a damper system diverting the air to a bypass. This is usually located in the outside airflow.

Protection against icing

In order to avoid the icing of the condensation on the extract air side in cases of low outside air temperatures and corresponding moisture loads, the transfer capacity of the HRS must be limited (e.g. outside air bypass, interval switching). The heater capacity must be designed to compensate for the limited heat recovery capacity under these operating conditions. The temperature distribution downstream from the cross-flow plate heat exchanger is inhomogeneous. This must be taken into consideration in designing measures to protect against icing.

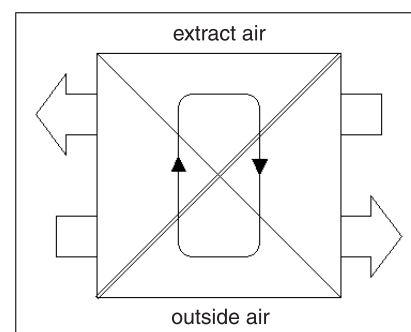
Frost protection

In order to avoid damage due to inappropriate operation, water-conducting components on the supply air side (e.g. coolers, heaters) should be equipped with frost protection.

Notes on design and operation

In order to improve performance, a number of heat exchangers can be installed in succession. This requires bringing the airflows in the system together. The differential pressures between the two airflows and the acceptable air leakage rates influence the configuration and the installation situation. Any condensation that occurs must be collected and discharged. The material must be chosen according to the requirements in relation to structural demands, heat exchange, corrosion and the ingress of contaminants. In order to maintain operating safety, the damper mechanisms and the damper motors must be included in regular maintenance.

6.3.2.2 Heat pipe



Construction and configuration

Heat transferring airflows are brought together in a casing. The heat transfer in the heat pipe takes place by means of separating panels with the help of a heat

nes Wärmeträgers. Die Wärmerückgewinnung besteht aus mehreren verbundenen Wärmerohren (Schlangen oder kommunizierende Röhren), oder er besteht aus einer Vielzahl einzelner Wärmerohre, die mit einem für die jeweiligen Einsatzbereiche ausgewählten Wärmeträger gefüllt sind. Man unterscheidet die Ausführung in Gravitationswärmerohre und Kapillarkraftwärmerohre. Ein Gravitationswärmerohr besteht aus Glattrohr ohne Kapillareinbauten. Der Rückfluss des Wärmeträgers von der Kondensationszone zur Verdampfungszone erfolgt ausschließlich aufgrund der Schwerkraft. Kapillarkraftwärmerohre weisen zusätzlich Kapillareinbauten auf, die aus Dochten, Gazegeweben, Profilen oder porösen Strukturen bestehen können. Sie bewirken eine bessere Oberflächenbenetzung und verbessern das Reaktionsverhalten sowie den Rückfluss des Wärmeträgers durch Kapillarkraft.

Wirkungsweise

Durch das Verdampfen des Kältemittels im Wärmerohr wird die Wärme über die anteilige Wärmeaustauschfläche dem Warmluftstrom entzogen und durch Kondensation in der restlichen Austauschfläche dem Kaltluftstrom zugeführt. Das flüssige Kältemittel strömt in demselben Rohr ohne zusätzliche äußere Antriebskräfte zur erneuten Verdampfung zum Ausgangspunkt zurück.

Bei Wärmerohren sind die Temperaturverläufe der beiden Luftströme quer zum Strömungsweg homogen. Es stellt sich je Rohr ein Phasengleichgewicht ein (Isothermie).

Bei Taupunktunterschreitung des feuchten Luftstroms erfolgt eine Kondensatausscheidung.

Leckage

Durch die Trennfläche sind Fortluft- und Außenluftstrom voneinander getrennt. Eine Leckage zwischen den beiden Luftströmen ist möglich und kann durch besondere Abdichtungsmaßnahmen deutlich reduziert werden. Bis auf die Leckagen findet kein Stoffaustausch statt. Durch den Einbau im Gehäuse können zusätzliche Leckagen entstehen. Gasdichte Sonderausführungen sind ebenfalls möglich.

Leistungsanpassung

Die übertragene Leistung kann mit einem Klappensystem zum Luftbypass oder durch Kippregelung stetig reduziert werden. Mit einer Kippregelung sind bei Kapillarkraftwärmerohren eine stufenlose Leistungsanpassung und das Ein- oder Ausschalten möglich.

Vereisungsschutz

Um bei niedrigen Außenlufttemperaturen und bei entsprechenden Feuchtelasten eine Vereisung des

transfer medium. The heat recovery consists of a number of connected heat pipes (coils or communicating pipes) or a number of individual heat pipes that are filled with a heat transfer medium that has been chosen for the given area of deployment. One differentiates between heat pipes that make use of gravity and those that rely on a capillary effect. A heat pipe that uses gravity consists of a smooth pipe without capillary structures. The return flow of the heat transfer medium from the condensation zone to the evaporation zone is driven solely by gravity. Capillary force heat pipes have additional capillary structures that can consist of wicks, gauze textiles, profiles or other porous structures. They contribute to the improved exploitation of the surface and enhance the reaction behaviour as well as the return flow of the heat transfer media through a capillary effect.

Mode of operation

By evaporation of the coolant in the heat pipe, heat is removed from the hot air flow across the heat exchanger surface and channelled into the cold air flow of the remaining exchanger surface through condensation. The liquid coolant flows into the same pipe, without being driven by additional external power, back to the starting point for renewed evaporation.

In the case of heat pipes, the temperature curves of the two airflows across the airflow path are homogeneous. A phase balance is achieved for each pipe (isothermal process).

If a moist airflow falls below the dewpoint, a discharge of condensation takes place.

Leakage

The extract air and the outside airflow are separated from each other by a separation panel. Leakage between the two airflows is possible and can be markedly reduced through special sealing measures. No exchange of materials takes place beyond the leakage. Additional leakage can result from installation in a casing. Special gas tight models are also possible.

Adjustment of capacity

The transferred capacity can be constantly reduced by means of a damper system to cause an air bypass or by tilt control. Tilt control makes it possible to adjust the capacity continuously and to turn it on and off in the case of capillary force heat pipes.

Protection against icing

In order to avoid the icing of the condensation on the extract air side in the case of low outside air temper-

Kondensats auf der Fortluftseite zu vermeiden, ist die Übertragungsleistung eines WRG-Systems zu begrenzen (z.B. Außenluftbypass, Kippregelung, Vorwärmung). Für diese Betriebsfälle muss die Erhitzerleistung auf die begrenzte Wärmerückgewinnungsleistung ausgelegt werden.

Frostschutz

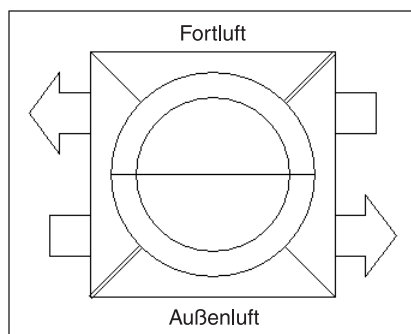
Um Folgeschäden bei nicht ordnungsgemäßigem Betrieb zu vermeiden, sollen zuluftseitig wasserführende Komponenten (z.B. Kühler, Erhitzer) zu ihrem Schutz mit einem Frostschutz versehen werden.

Planungs- und Betriebshinweise

Eine Zusammenführung der Luftströme der Anlage ist notwendig. Bei stehenden Wärmerohren muss der warme Luftstrom unten und der kalte Luftstrom oben angeordnet werden. In diesem Fall ist eine Umkehr des Wärmestroms (Kälterückgewinn) nicht möglich.

Bei Auswahl des Kältemittels ist u.a. die Verordnung zum Verbot von bestimmten, die Ozonschicht abbauenden Halogenkohlenwasserstoffen zu beachten. Die Materialwahl erfolgt entsprechend den Anforderungen in Bezug auf Statik, Wärmeaustausch, Korrosion und Verschmutzung.

6.3.2.3 Rotationswärmeübertrager



Konstruktion und Bauform

Wärmeübertragende Luftströme sind in einem Gehäuse zusammengefasst. Der Rotor wird meist aus einer dünnen Wellfolie in Verbindung mit einer Glattfolie gewickelt und besteht z.B. aus Aluminium, Edelstahl oder Kunststoff. Er kann sorptiv durch Oberflächenbehandlung oder -beschichtung ausgeführt sein (z.B. mit Aluminiumoxid, Silicagel, Molekularsieb), um die Feuchteübertragung zu verstärken.

Wirkungsweise

Die drehende Speichermasse wird je zur Hälfte axial im Gegenstrom von beiden Luftströmen durchströmt. Dabei wird Wärme von einem Luftstrom an die Speichermasse abgeführt und danach von dem anderen Luftstrom aufgenommen. Durch Mitrotation und

atures and corresponding moisture loads, the transfer capacity of an HRS must be limited (e.g. by an outside air bypass, tilt control, prewarming). The heater capacity must be designed to compensate for the limited heat recovery capacity under these operating conditions.

Frost protection

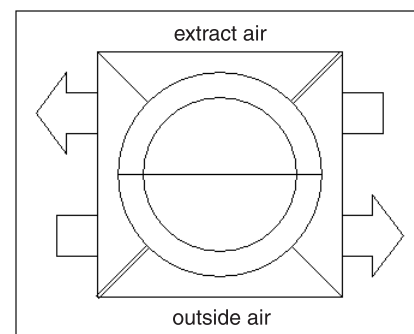
In order to avoid damage due to improper operation, the water conveying components on the air supply side (e.g. cooler, heater) should be equipped with frost protection.

Notes on design and operation

It is necessary to bring the two airflows in the system together. In the case of standing heat pipes, the warm airflow must be arranged below and the cold airflow on top. In this case, it is not possible to reverse the heat flow (cooling recovery).

In choosing the coolant, the ordinance prohibiting halocarbons that destroy the ozone layer must be taken into consideration. The choice of material is made according to the structural, heat exchange, corrosion and pollution requirements.

6.3.2.3 Rotary heat exchangers



Construction and configuration

Heat conveying airflows are brought together in a casing. The rotor usually consists of alternatingly wound layers of thin corrugated foil and smooth foil made of materials such as aluminium, stainless steel or plastic. It can be designed to be sorptive by treating the surface or applying coatings (e.g. with aluminium oxide, silica gel or a molecular filter) in order to enhance the transmission of moisture.

Mode of operation

Counterflows of each of the air masses axially flow through one half of the rotating storage mass. The heat from one of the airflows is transferred to the storage mass and then absorbed by the other airflow. Through co-rotation and leakage, there is inevitably a

Leckagen werden zwangsläufig Luftströme auf die Warm- und Kaltseite übertragen. Durch eine Spülzone kann die Mitrotation der Fortluft in die Außenluft gemindert oder ausgeschlossen werden.

Durch die Drehung der Speichermasse entsteht ein ungleichmäßiges Temperaturprofil nach dem Rotor. Bei Taupunktunterschreitung des feuchten Luftstroms erfolgt Kondensatausscheidung. Jedoch ergibt sich hieraus im Gegensatz zu anderen Wärmerückgewinnungssystemen keine nennenswerte Erhöhung des Temperaturänderungsgrads. Das Kondensat wird zu einem hohen Anteil auf den anderen Luftstrom übertragen. Rotoren sind bei Kondensation immer Feuchterückgewinner.

Sorptiv wirksame Rotoren übertragen neben der Wärme zusätzlich und ganzjährig Feuchte auch ohne Taupunktunterschreitung. Grundlage der Sorption sind kapillare oder physikalische/chemische Effekte. Die Übertragungseffizienz hängt entscheidend von der Oberfläche ab. Bei Kondensation wird zusätzlich Feuchte übertragen.

Leckage

Dichtungen zwischen Rotor und Gehäuse können Leckagen zwischen den beiden Luftströmen nicht vermeiden. Die Leckage hängt von der Druckdifferenz, der Dichtungs konstruktion und der Wartungsqualität ab. Wenn Kontamination der Außenluft zu minimieren ist, müssen die Ventilatoren so angeordnet sein, dass ein Druckgefälle zur Fortluft hin entsteht.

Neben der Leckage wird auch durch die Rotation der Speichermasse Luft von einem Strom auf den anderen übertragen (Mitrotation). Der Umluftanteil lässt sich durch eine Spülzone mit ausreichendem Druckgefälle (alternativ Spülkammerventilator) von der Außenluft zur Fortluft minimieren oder verhindern.

Je nach Konstruktion und Wartungsqualität können Leckagen zwischen den Luftströmen entstehen. Diese sind auf jeden Fall bei der Dimensionierung der Volumenströme zu berücksichtigen.

Leistungsanpassung

In der Übergangszeit kann durch das WRG-System mehr Wärme übertragen werden als erforderlich ist. In diesem Fall muss die Leistung des WRG-Systems stetig reduziert werden. Diese Aufgabe erfolgt üblicherweise durch Drehzahlreduzierung des Rotors.

Vereisungsschutz

Um bei niedrigen Außenlufttemperaturen und bei entsprechenden Feuchtelasten eine Vereisung des Rotors zu vermeiden, kann es notwendig werden, die Übertragungsleistung eines WRG-Systems zu be-

certain degree of transfer between the airflows on the warm and cold sides. Through a purging zone, the corotation of the extract air in the outside air can be diminished or prevented.

By the rotation of the storage media, an uneven temperature profile is created downstream from the rotor. When the moist airflow sinks below the dewpoint, a discharge of condensation results. However, in contrast to other heat recovery systems, this does not result in a notable increase in the temperature differential. Much of the condensation is transmitted into other airflows. Rotors always recover moisture in cases of condensation.

Rotors with a sorptive effect also serve to transmit moisture, along with heat, throughout the year without the temperature sinking below the dewpoint. The sorption is based on capillary and physical/chemical effects. The surface is of decisive importance for the efficiency of the transfer. In the case of condensation, additional moisture is transmitted.

Leakage

Seals between the rotor and the case cannot prevent leakage between the two airflows. The leakage depends on the pressure differences, the construction of the seals and the quality of maintenance. When contamination of the outside air is to be minimised, the ventilators must be arranged in such a manner that a pressure drop in the direction of the extract air occurs.

In addition to leakage, air is conveyed from one flow to the other (corotation) by rotation of the transfer media. The proportion of recirculated air can be minimized or completely prevented by a purging zone (or, as an alternative, a purging chamber) with a sufficient pressure drop from the outside air to the extract air.

Depending on the construction and the maintenance quality, this can lead to leakage between the airflows. These must, at any rate, be taken into consideration in choosing the dimensions of the volume flows.

Adaptation of capacity

In transitional periods, more heat can be recovered by the HRS than is needed. In this case, the capacity of the HRS must be constantly reduced. This task is usually performed by reducing the rotation speed of the rotor.

Protection against icing

In order to avoid the icing of the rotor in the case of low outside air temperatures and corresponding moisture loads, it may be necessary to limit the exchange capacity of the HRS (e.g. through low rota-

grenzen (z.B. niedrige Drehzahl, Außenluftbypass, Vorwärmung). Für diese Betriebsfälle muss die Erhitzerleistung auf die begrenzte Wärmerückgewinnungsleistung ausgelegt werden.

Die Vereisung ist bei Rotoren selten zu erwarten. Bei sorptiver Oberfläche liegt die Einfriergrenze noch tiefer.

Frostschutz

Um Folgeschäden bei nicht ordnungsgemäßigem Betrieb zu vermeiden, sollen zuluftseitig wasserführende Komponenten (z.B. Kühler, Erhitzer) zu ihrem Schutz mit einem Frostschutz versehen werden.

Planungs- und Betriebshinweise

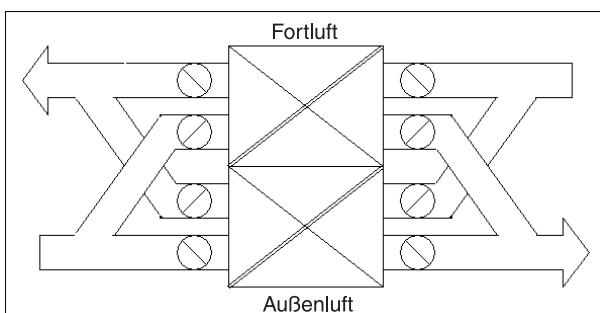
Die Zusammenführung der Luftströme an einen Punkt der Anlage ist notwendig. Die Übertragung von Feuchte, Gasen, Partikeln und Keimen ist möglich, da sich die Speichermasse abwechselnd in beiden Luftströmen befindet. Aus diesen Gründen dürfen Rotoren nur dann eingesetzt werden, wenn die Vorgaben der VDI 6022 Blatt 1 eingehalten werden.

Die Qualität und die Dauerhaftigkeit der Dichtungen sind bei der Auswahl zu beachten. Wegen des Antriebs und der Dichtungen ist regelmäßige Inspektion und Wartung nötig.

Aufgrund der Leckagen zwischen den Luftströmen, Mitrotation sowie Spülluft sind die Volumenströme größer zu bemessen.

Die Feuchteübertragung kann bei den Betriebskosten nur berücksichtigt werden, wenn entsprechender Bedarf (definiert durch die Sollwerte) vorliegt. Dagegen darf die Einsparung bei der Investition für die Kälteerzeugung durch die Trocknung der Außenluft mit einem Sorptionsrotor berücksichtigt werden.

6.3.2.4 Umschalt Speicher



Konstruktion und Bauform

Wärmeübertragende Luftströme sind in einem Gehäuse zusammengeführt, das thermische Speicher enthält. Die Oberfläche der Speichermasse kann zur besseren Feuchteübertragung sorptiv behandelt sein. Zur Umschaltung der Luftwege ist ein Klappensystem

tion rates, an outside air bypass or prewarming). The heater capacity must be designed in keeping with the limited heat recovery capacity under these operating conditions.

The icing of the rotors is expected to be a rare event. In the case of a sorptive surface, the freezing limit is even lower.

Frost protection

In order to avoid damage due to improper operation, the water conveying components on the air supply side (e.g. cooler, heater) should be equipped with frost protection.

Notes on design and operation

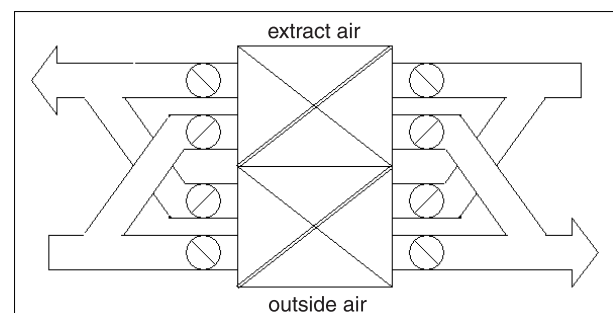
It is necessary for the airflows to be brought together at one point in the system. The transmission of moisture, gases, particles and bacteria is possible, since the storage media moves between the two airstreams. For this reason, rotors can only be used when the requirements of VDI 6022 Part 1 are adhered to.

When choosing seals, their quality and durability should be taken into consideration. The drives and seals require regular inspections and maintenance.

The dimensions of the volume flows must be increased due to the leakage between the airflows, corotation, and purged air.

The transmission of moisture can only be taken into consideration in conjunction with the operating costs, when the design conditions are known. By contrast, the savings in relation to the investment for cooling through the dehumidification of the outside air with a sorption rotor can be taken into consideration.

6.3.2.4 Change over system



Construction and configuration

Heat conveying airflows are brought together in a casing that contains thermal storage units. The surface of the storage medium can be sorptively treated in order to improve the transmission of moisture. In order to change the airflow paths, the ventilators must

tem oder die Umschaltung der Ventilatoren notwendig.

Wirkungsweise

Die Volumenströme erwärmen und kühlen wechselseitig periodisch im Gegenstrom die Wärmespeicher, die dadurch be- und entladen werden. Die gespeicherte Wärme wird zeitversetzt auf den anderen Luftstrom übertragen; dazu werden gleichzeitig alle Luftwegeklappen in Intervallen (0,5 min bis 2 min) „Auf“ oder „Zu“ geschaltet.

Das zeitliche Temperaturprofil nach dem Umschaltenspeicher ist ungleichmäßig und hängt von den Schaltzyklen ab. Bei Taupunktunterschreitung des feuchten Luftstroms erfolgt Kondensatausscheidung, jedoch ergibt sich hieraus im Gegensatz zu anderen WRG-Systemen keine nennenswerte Erhöhung des Temperaturänderungsgrads. Das Kondensat wird zu einem hohen Anteil auf den anderen Luftstrom übertragen. Umschaltenspeicher sind bei Kondensation immer Feuchterückgewinner.

Sorptiv wirksame Speicher übertragen neben der Wärme zusätzlich Feuchte auch ohne Taupunktunterschreitung. Grundlage der Sorption sind kapillare oder elektrostatische Effekte. Die Übertragungseffizienz hängt entscheidend von der Oberfläche ab. Dieser Übertragungsmechanismus kann durch Kondensation überlagert sein.

Leckage

Leckagen entstehen durch das Luftvolumen der Umschaltenspeicher und die Undichtigkeiten der Klappen. Die Leckage hängt von den Schaltzyklen, der Druckdifferenz, der Klappenkonstruktion und der Wartungsqualität ab. Wenn Kontamination der Außenluft zu minimieren ist, müssen die Ventilatoren so angeordnet sein, dass ein Druckgefälle zur Fortluft hin entsteht.

Je nach Konstruktion und Wartungsqualität können Leckagen zwischen den Luftströmen entstehen. Diese sind auf jeden Fall bei der Dimensionierung der Volumenströme zu berücksichtigen.

Neben der Leckage wird auch während des Umschaltens der Klappen Luft von einem Strom auf den anderen übertragen (Umschaltübertragung). Das Speichervolumen wird in den anderen Luftstrom übertragen.

Die Leckagen und die Übertragungen sind bei der Dimensionierung der Volumenströme zu berücksichtigen.

Leistungsanpassung

In der Übergangszeit kann mehr Wärme oder Kälte übertragen werden als erforderlich ist. In diesem Fall muss die Leistung des WRG-Systems stetig reduziert

be equipped with a damper system or the switching mechanism.

Mode of operation

The volume flows alternately heat or cool the heat storage units in their counterflow, thus charging and discharging them. The stored heat is transferred to the other airflow with a time lag; for this purpose, all of the dampers controlling the airflow are simultaneously turned “On” or “Off” at regular intervals (0,5 min to 2 min).

The periodic temperature profile downstream of the change over unit is uneven and depends upon the switching cycles. When the moist air falls below the dewpoint, condensation discharge takes place. However, in contrast to the other HRS, this does not result in a notable increase in the temperature differential. A high proportion of the condensation is transmitted into the other airflow. Change over systems always recover moisture in cases of condensation.

Storage mass with a sorptive effect not only transfers heat, but also moisture, when temperatures do not drop below the dewpoint. The sorption is based on capillary or electrostatic effects. The surface is of decisive importance for the transfer efficiency. Condensation can interfere with this transfer mechanism.

Leakage

Leakage is a result of the airflow volume of the change over unit and the lack of tightness of the damper. The leakage depends upon the switching cycles, pressure differences, construction of the damper and the quality of maintenance. When contamination of the outside air is to be minimised, the ventilation must be arranged so that a pressure drop to the extract air results.

Depending upon the quality of the construction and maintenance, leakage between the airflows can result. They are, at any rate, to be taken into consideration in determining the dimensions of the volume flows.

In addition to leakage, the air from the damper is also conveyed from one flow to the other during the change over process (cross leakage). The storage volume is conveyed into the other airflow.

Leakage and transfer are to be taken into consideration, when determining the volume flows.

Adaptation of capacity

During transition periods, more heat or cooling can be recovered than is needed. In such cases, the capacity of the HRS must be constantly reduced. This takes

werden. Dies erfolgt durch eine Verlängerung der Intervalle oder durch die Verwendung stetiger Luftbypass-Systeme. Die Wärmeübertragung lässt sich über die Intervallschaltung ein- und ausschalten.

Vereisungsschutz

Um bei niedrigen Außenlufttemperaturen und bei entsprechenden Feuchtelasten eine Vereisung des Kondensats auf der Speichermasse zu vermeiden, ist es notwendig, die Übertragungsleistung eines WRG-Systems zu begrenzen (z.B. Änderung der Umschaltzeiten, Außenluftbypass). Für diese Betriebsfälle muss die Erhitzerleistung auf die begrenzte Wärmerückgewinnungsleistung ausgelegt werden. Bei sorptiver Oberfläche liegt die Einfriergrenze tiefer.

Frostschutz

Um Folgeschäden bei nicht ordnungsgemäßigem Betrieb zu vermeiden, sollen zuluftseitig wasserführende Komponenten (z.B. Kühler, Erhitzer) zu ihrem Schutz mit einem Frostschutz versehen werden.

Planungs- und Betriebshinweise

Die Zusammenführung der Luftströme an einen Punkt der Anlage ist bei der Verwendung von parallelen, wechselseitig verwendeten Speichermassen notwendig. Die Übertragung von Feuchte, Gasen, Partikeln und Keimen ist möglich, da sich die Speichermasse abwechselnd in beiden Luftströmen befindet. Aus diesen Gründen dürfen Speicherpakete nur dann eingesetzt werden, wenn aus hygienischer Sicht auch Umluftbetrieb zulässig ist.

Die Qualität und die Dauerhaftigkeit der Umschaltklappen sind bei der Auswahl zu beachten. Klappenantriebe und Klappendichtungen erfordern regelmäßige Inspektion und Wartung.

Aufgrund der Leckagen zwischen den Luftströmen und den Umschaltübertragungen sind die Volumenströme größer zu bemessen. Durch die Schaltvorgänge können die Druck- und Strömungsverhältnisse zyklisch beeinflusst werden.

Die Feuchteübertragung kann bei den Betriebskosten nur berücksichtigt werden, wenn entsprechender Bedarf (= Sollwert) vorliegt. Dagegen darf die Einsparung bei der Investition für die Kälteerzeugung durch die Trocknung der Außenluft mit einem Sorptionspeicher berücksichtigt werden.

6.3.2.5 Kreislaufverbundsysteme (KVS)

Konstruktion und Bauform

Bei Kreislaufverbundsystemen ist zur Wärmerückgewinnung im warmen und auch im kalten Luftvolumenstrom jeweils ein Wärmeübertrager integriert. Die einzelnen Wärmeübertrager sind mit wärmeträ-

place through the extension of the intervals or through the use of constant air bypass systems. The heat exchange function can be turned on or off by means of the interval switching.

Icing protection

In order to avoid the icing of the condensation on the extract air side in the case of low outside air temperatures and corresponding moisture loads, the transfer capacity of an HRS must be limited (e.g. by an outside air bypass, tilt control). The heater capacity must be designed to compensate for the limited heat recovery capacity under these operating conditions. In the case of sorptive surfaces, the freezing limit is lower.

Frost protection

In order to avoid damage due to improper operation, the water conveying components on the supply air side (e.g. cooler, heater) should be equipped with frost protection.

Notes on design and operation

It is necessary to bring the airflows together at one point in the system when storage media are alternately used parallel to each other. The transfer of moisture, gases, particles or bacteria is possible, since the storage media are alternately located in both of the airflows. For this reason, storage packages may only be employed in cases where recirculated air is acceptable from a hygienic standpoint.

The quality and the durability of the switching dampers are to be taken into consideration in selecting them. Damper drives and damper seals require regular inspection and maintenance.

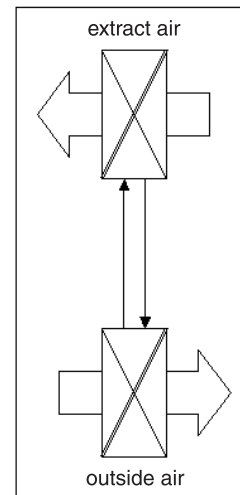
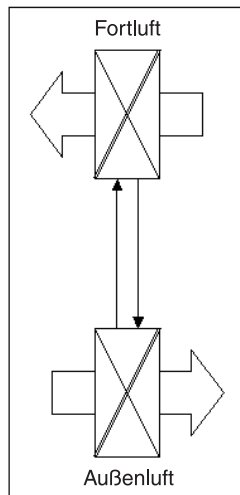
Due to cross leakages between the airflows and the cross-over transmissions, the volume flows have greater dimensions. The pressure and flow conditions can be cyclically influenced by the switching operations.

The transfer of moisture can only be taken into consideration in relation to the operating costs when the design conditions are known. On the other hand, the savings on investments for cooling that result from the dehumidification of the outside air with a sorption storage unit can be taken into consideration.

6.3.2.5 Coil energy recovery loops

Construction and configuration

In the case of coil heat recovery loop systems, a heat exchanger is integrated into both the warm and the cold air volume flows for the purpose of heat recovery. The individual heat exchangers are connected to



gergefüllten Rohrleitungen verbunden. Damit handelt es sich um gekoppelte Wärmeübertrager.

Sie bestehen aus Wasser/Wasser-Frostschutz-Gemisch führenden Rohren, die glatt oder mit Lamellen berippt ausgeführt sind. Die Rohre bestehen beispielsweise aus Kupfer oder Stahl, die Lamellenpakete aus Aluminium oder Kupfer. Wärmeübertrager können gegebenenfalls auch beschichtet ausgeführt sein, z.B. mit Epoxidharz als Korrosionsschutz. Wärmeübertrager können einteilig sein oder horizontal oder vertikal geteilt ausgeführt werden.

Wirkungsweise

Die warme Luft überträgt die Wärme an das Trägermedium (z.B. Wasser-Glykolgemisch), wobei eine Pumpe dieses zum zweiten Wärmeübertrager fördert und die Wärmeenergie an die kalte Luft abgibt. Die Übertragungsleistung der Wärmerückgewinnung ist von der Bauart der einzelnen Wärmeübertrager sowie von der Art des umlaufenden Wärmeträgers abhängig. Die Zustandsänderung des Luftstroms bei Durchgang durch das WRG-System ist gekennzeichnet durch eine Temperaturerhöhung des kälteren Luftstroms bei konstantem Feuchtegehalt. Der warme Luftstrom wird abgekühlt und bei Unterschreiten der Taupunkttemperatur an der Wärmeübertragerfläche auch entfeuchtet. Dabei wird auch die latente Wärme übertragen.

Ein Vorteil dieses Systems besteht darin, dass beide Luftströme örtlich voneinander entfernt liegen können, da die Verbindung mit einem Rohrleitungssystem hergestellt wird. Der erforderliche Aufwand für die Installation und den Betrieb des Rohrleitungssystems kann geringer als bei einer Zusammenführung der Luftströme an einem Punkt im Gebäude sein. Durch die absolute Trennung der Luftströme gibt es auch im Störfall keine Stoff- oder Brandübertragung. Damit eignet sich das Kreislaufverbundsystem zum

pipes that are filled with a heat transfer medium. Hence, this is a case of coupled heat exchangers.

They consist of pipes that conduct water/water frost protection mixtures, and have fins that are either smooth or corrugated. The pipes are made of materials such as copper or steel. Fin packages are made of aluminium or copper. Heat exchangers can be coated, if necessary, e.g. with epoxy resin as protection against corrosion. Heat exchangers can consist of one part or be divided horizontally or vertically.

Mode of operation

The warm air transfers the heat to the heat storage media (e.g. a mixture of water and glycol), whereby a pump distributes it to a second heat exchanger and discharges the enthalpy to the cold air. The transfer capacity of the heat recovery depends upon the configuration of the individual heat exchanger as well as on the type of heat transfer medium in circulation. The change in the condition of the airflow when it passes through the HRS is characterised by a temperature increase of the cold airflows and a constant humidity level. The warm airflow is cooled and, when the temperature of the heat exchanger surface drops below the dewpoint, also dehumidified. The latent heat is thereby also transferred.

An advantage of this system is that the two airflows can be in separate locations, since they are connected by means of a pipe system. The effort required for the installation and operation of the pipe system can be lower than for bringing the airflows together at one point in the building. Through the absolute separation of the airflows, there is also no transmission of material or fire. Hence, the coil energy recovery loop system is suited for preventive smoke and fire protection and for use in systems in which no bacteria, odours,

präventiven Rauch- und Brandschutz und zum Einsatz in Anlagen, in denen keine Keime, Gerüche, Feuchte, Schadstoffe oder sonstige Kontaminationen übertragen werden dürfen.

Leakage

Konstruktionsbedingt gibt es keine Leakage.

Leistungsanpassung

In der Übergangszeit kann mehr Wärme oder Kälte übertragen werden als erforderlich ist. In diesem Fall muss die Leistung des WRG-Systems stetig reduziert werden. Diese Aufgabe wird vorzugsweise durch die drehzahlgeregelte Pumpe und/oder durch ein Regelventil gelöst.

Vereisungsschutz

Um bei sehr niedrigen Außenlufttemperaturen und bei entsprechenden Feuchtelasten eine Vereisung des Kondensats auf den Lamellen des Wärmeübertragers in der Fortluft zu vermeiden, ist es notwendig die Übertragungsleistung eines WRG-Systems zu begrenzen. Dies erfolgt entweder durch Beeinflussung des Kreislaufs (Drehzahlregelung der Pumpe) oder über ein Regelventil. Für diese Betriebsfälle muss die Erhitzerleistung auf die begrenzte Wärmerückgewinnungsleistung ausgelegt werden.

Frostschutz

Die Wärmeträgerflüssigkeit im Kreislaufverbund besteht vorzugsweise aus einem Wasser-Frostschutz-Gemisch. Da mit zunehmendem Frostschutzgehalt die Übertragungsleistung sinken kann und die Pumpenarbeit zunimmt, ist der Frostschutzgehalt sinnvoll zu begrenzen. Sofern zuluftseitig wasserführende Komponenten vorhanden sind, ist zu deren Schutz auch ein luftseitiger Frostschutz vorzusehen.

Planungs- und Betriebshinweise

Kreislaufverbundsysteme sind besonders für einen nachträglichen Einbau geeignet, da sie den gegebenen Örtlichkeiten einfach angepasst werden können. Das Material und seine Oberflächenbeschichtung können entsprechend den Anforderungen in Bezug auf Statik, Wärmeaustausch, Korrosion und Verschmutzung gewählt werden.

Die Wirtschaftlichkeit von Kreislaufverbundsystemen kann bei höheren Temperaturübertragungsgraden (über 70 %) durch Einsatz von Mehrfachfunktionen weiter gesteigert werden.

6.4 Wärmerückgewinnung mit erweiterten Funktionen

Wärmerückgewinnungssysteme mit erweiterten Funktionen sind Systeme, die neben der primären Funktion

humidity, toxic substances or other forms of contamination should be transmitted.

Leakage

Due to the type of construction, there is no leakage.

Adaptation of capacity

In transition periods, more heat or cold may be exchanged than is absolutely necessary. In this case, the capacity of the HRS must be constantly reduced. The best way to achieve this is by a speed-controlled pump and/or through a control valve.

Protection against icing

In order to avoid the icing of the condensation on the fins of the heat exchanger in the extract air at very low outside air temperatures and corresponding humidity loads, the transfer capacity of the HRS must be limited. This is done either by reducing the circulation (control of the pump speed) or by a control valve. The heater capacity must be designed to compensate for the limited heat recovery capacity under these operating conditions.

Frost protection

It is best when the liquid heat transfer medium in a coil energy recovery loop consists of a mixture of water and a freeze-protection solution. Since the transfer capacity can sink with increasing freeze-protection content and the work of the pump increases, it makes sense to limit the freeze-protection content. If there are water-conducting components on the supply air side, they should be protected by planning for airside frost protection.

Notes on design and operation

Coil energy recovery (runaround) loops are especially well suited for retrofitting, since they must only be fitted to the existing location. The material and its surface coating can be chosen according to structural, heat exchange, corrosion and hygienic demands.

In the case of higher heat transfer rates (over 70 %) the efficiency of coil energy recovery (runaround) loops can be further increased through multifunctional use.

6.4 Heat recovery with additional functions

Heat recovery systems with additional functions are systems that perform additional thermodynamic

der WRG noch zusätzliche thermodynamische Funktionen übernehmen. Diese können sich sowohl auf die Behandlung der Zuluft (z.B. Nacherwärmung, Nachkühlung und Entfeuchtung), auf die Behandlung der Abluft (indirekte Verdunstungskühlung) oder die Ein-/Auskopplung von Energieströmen anderer Prozesse (z.B. freie Kühlung, Abwärme) in dem System beziehen. Man unterscheidet dabei in Zusatzfunktionen mit:

- Anordnung außerhalb des WRG-Systems (z.B. indirekte Verdunstungskühlung oder Kopplung verschiedener Systeme)
- Anordnung innerhalb des WRG-Systems (z.B. mehrfachfunktionale Systeme auf der Basis von KVS)

Merkmal dieser Systeme ist die Mehrfachnutzung von Komponenten und die Vernetzung mehrerer Wärmequellen und -senken innerhalb eines Gebäudes.

6.4.1 Indirekte Verdunstungskühlung

Bei der indirekten Verdunstungskühlung (auch adiabate Verdunstungskühlung) wird Wasser in der Abluft mit einem geeigneten Befeuchter verdunstet. Die dabei benötigte Verdunstungsenergie wird der Luft entzogen, was eine Abkühlung bei gleichzeitiger Zunahme der Fortluftfeuchte bewirkt. Die physikalische Grenze der Abkühlung ist dabei die Feuchtkugeltemperatur. Sobald die Temperatur nach der Befeuchtung kleiner als die Außentemperatur ist, kann in Verbindung mit einer WRG eine Kühlung der Außenluft erfolgen. Zu beachten ist hierbei, dass dies von dem Temperaturänderungsgrad der WRG abhängig ist.

Verdunstungskühlung kann sowohl vorgeschaltet in der Fortluft erfolgen, als auch direkt im Wärmeübertrager.

Die indirekte Verdunstungskühlung soll nur in Verbindung mit WRG-Systemen ohne Feuchteübertragung eingesetzt werden, damit keine Feuchteübertragung in die Zuluft stattfindet. Die Feuchte wird mit der Fortluft abgeführt.

Neben den entsprechenden Anforderungen an die Hygiene ist vor allem eine ausreichende Wasserqualität zu gewährleisten (siehe VDI 3803 Blatt 1, Anhang B).

Die Wirkung der Verdunstungskühlung kann gegenüber vorgeschaltetem Befeuchter verbessert werden, wenn die Befeuchtung der Abluft auf der Oberfläche des Wärmeübertragers erfolgt. Wichtig dabei ist es, auf die Beständigkeit der Oberflächen gegen das verwendete Wasser zu achten (z.B. bei VE-Wasser) und die Bildung von Ablagerungen z.B. durch geeignete Vorfilterung zu verhindern.

functions in addition to the primary function of HR. These can be related both to the treatment of supply air (e.g. reheating, recooling and dehumidification), to the treatment of the exhaust air (indirect evaporative cooling) or the coupling and decoupling energy flows from other processes (e.g. free cooling, waste heat) in the system. One differentiates in this context between additional functions:

- installed outside of the HRS (e.g. indirect evaporative cooling or the coupling of different systems)
- installed within the HRS (e.g. multifunctional systems on the basis of a coil energy recovery loop system)

Characteristic of these systems is the multiple use of components and the linking of a number of heat sources and sinks within a building.

6.4.1 Indirect evaporative cooling

In the case of indirect evaporative cooling (as well as adiabatic evaporative cooling) water is evaporated in the exhaust air flow by means of with a suitable humidifier. The energy that is required for the evaporation is drawn from the air, which leads to a cooling along with the simultaneous increase of the extract air humidity. The physical boundary of the cooling is, in this context, the wet bulb temperature. As soon as the temperature after humidification is lower than the outside temperature, a cooling of the outside air can take place in connection with HR. In this context, it should be noted that this is dependent upon the temperature differential of the HR.

Evaporate cooling can be done both upstream in the exhaust air and also directly in the heat exchanger.

Indirect evaporative cooling should only be employed in connection with HRS without moisture transmission, so that no transmission of moisture into the supply air takes place. The humidity is rejected with the extract air.

In addition to the corresponding demands on hygiene, it is also especially important to ensure sufficient water quality (see VDI 3803 Part 1, Annex B).

The effect of evaporative cooling can be improved by an upstream humidifier when the humidification of the exhaust air takes place on the surface of the heat exchanger. In this conjunction, it is important to consider the resistance of the surfaces to the water that is used (e.g. in the case of DI water) and to prevent the formation of films, e.g. through suitable prefiltering.

Grundsätzlich ist die Wirkung der indirekten Verdunstungskühlung umso höher,

- je höher der Befeuchtungswirkungsgrad,
- je höher der Temperaturänderungsgrad der WRG und
- je niedriger die Abluftfeuchte ist.

6.4.2 Wärmepumpe

Die Wärmepumpe wird im Sinne dieser Richtlinie nicht als eigenständiges WRG-System behandelt. Eine Einordnung ist nicht möglich, da mit sinkender Außenlufttemperatur die Leistungszahl der WRG steigt, während sie bei der Wärmepumpe sinkt. Jedoch kann sie in Verbindung mit einem WRG-System dessen Wirkung unterstützen und zu effizienten Gesamtsystemen führen.

Konstruktion und Bauform

Wärmepumpen sind in der Regel klassische Kompressionskältemaschinen, die mit ihrem Verdampfer der Fortluft die Wärme entziehen und durch ihren Kondensator der Außenluft zuführen.

Wirkungsweise

Die Wärmepumpe wird zur Wärme- und/oder Kältebereitstellung genutzt. Allen Ausführungen gemeinsam ist ein im Kreislauf zirkulierendes Kältemittel, das auf der Hochdruckseite (Kondensator/Verflüssiger) durch Abkühlen den Phasenwechsel gasförmig zu flüssig und auf der Niederdruckseite (Verdampfer) den invertierten Phasenwechsel durch Wärmeaufnahme vollzieht, siehe Bild 8.

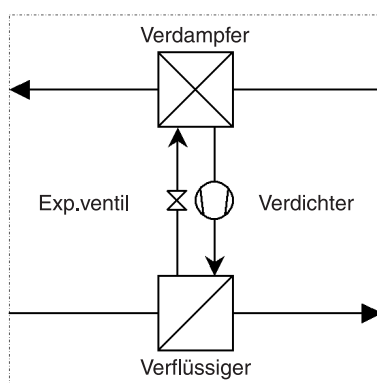


Bild 8. Vereinfachter Aufbau einer Kompressions-Wärmepumpe

Wärmepumpen sind in der Anwendung flexibel, da Verdampfungs- und Kondensationstemperatur durch Auswahl des Kältemittels und Einstellung der Drücke auf Nieder- und Hochdruckseite über einen weiten Bereich ausgelegt werden können. Dies ermöglicht auch die dynamische Anpassung an die Temperaturniveaus von Wärmequellen und -senken.

Fundamentally, the effect of indirect evaporative cooling is higher,

- the higher the humidification efficiency is,
- the higher the temperature differential of the HR is and
- the lower the exhaust air humidity is.

6.4.2 Heat pump

The heat pump is not treated as an independent HRS in the sense of this guideline. A classification is not possible, since the coefficient of performance of the HR increases with sinking outside air temperatures, while it sinks in the case of the heat pump. However, in combination with an HRS, it can support the effect of the latter and contribute to total system efficiency.

Construction and configuration

A heat pump is, generally, a classic compression chiller, which extracts heat from the extract air by means of its evaporator and disperses it into the outside air by its condenser.

Mode of operation

The heat pump is used to provide heat and/or cooling. A common characteristic of all models is a coolant circulating in a loop which undergoes a phase change from a vapour to liquid by cooling on the high pressure side (condenser/liquefier) and undergoes an inverse phase change by absorption of heat on the low pressure side (evaporator), see Figure 8.

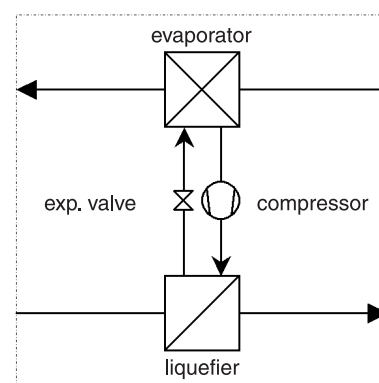


Figure 8. Simplified configuration of a compression heat pump

Heat pumps are flexible in their application, since they can be designed to cover a broad range of evaporation and condensation temperatures by selection of the coolant and adjustment of the pressures on the low and the high-pressure sides. This makes it possible to dynamically adjust the temperature levels of the heat sources and sinks.

Die Wärmepumpe kann auf die primäre Funktion der WRG reduziert werden. Allerdings ist der nicht zu vernachlässigende Aufwand zum Antrieb des Verdichters zu berücksichtigen. Dieser nimmt mit zunehmender Differenz der Verdampfungs- und Kondensationstemperatur zu, weshalb die Wärmepumpe in der primären Funktion der WRG in Klimazonen mit einer hohen Stundensumme von tiefen Außentemperaturen zur WRG selten eingesetzt wird.

Leistungsanpassung

Grundsätzlich gibt es zwei Arten der Leistungsanpassung: das zyklische Ein- und Ausschalten des bzw. der Verdichter und die stetige Regelung durch Eingriff in den Kältemittelfluss.

Das zyklische Ein- und Ausschalten kann mit einem Verdichter oder mit einem Verdichterverbund erfolgen und erfordert in der Regel die Einbindung eines Pufferspeichers zur Glättung der Temperaturverläufe. Die stetige Regelung erfolgt vorzugsweise durch frequenzgeregelte Verdichter.

Vereisungsschutz

Um die Vereisung des Verdampfers zu vermeiden, sind verschiedene Maßnahmen möglich:

- Reduktion der Übertragungsleistung durch Leistungsanpassung
- zyklische Abtauschaltung durch Heißgas-einspritzung oder Abschalten
- zyklische Aktivierung einer elektrischen Begleitheizung

Alle Maßnahmen haben die Begrenzung der Übertragungsleistung zum Ziel.

Planungs- und Betriebshinweise

Bei Auswahl des Kältemittels ist die Verordnung zum Verbot von bestimmten, die Ozonschicht abbauenden Halogenkohlenwasserstoffen zu beachten.

Die Wärmepumpe ist aufgrund des Kältemittelkreislaufs und der Gestaltungsmöglichkeiten der Wärmeübertrager geeignet, nahezu alle thermodynamischen Funktionen für eine RLT-Anlage zu erfüllen. Durch Nachschalten zu einem Wärmerückgewinnungssystem kann der Leistungsbedarf des Verdichters reduziert werden.

- Heizen
Soll eine Wärmerzeugung zur Nachkonditionierung der Zuluft oder zum dezentralen Wärmeeintrag ersetzt oder reduziert werden, kann die Wärmepumpe die zusätzlich erforderliche Wärme durch Abkühlen der Fortluft unter das Niveau der Außenlufttemperatur bereitstellen.

The heat pump can be reduced to the primary function of a HR. However, the considerable expense of driving the condenser should be taken into consideration. This increases with greater differences in the evaporation and condensation temperatures, which is why the heat pump is seldom used for the primary function of HR in climate zones with a higher number of hours with low outside temperatures.

Adaptation of capacity

Fundamentally, there are two ways to adapt capacity: the cyclical switching on and off of the compressor and the continual control by manipulating the flow of coolant.

Cyclically switching on and off can take place with a compressor or a compressor combination and requires, as a rule, the integration of a buffer storage unit to even out the temperature distribution. It is best when a frequency-regulated compressor is used for constant regulation.

Protection against freezing

In order to avoid the freezing of the evaporator, various measures are possible:

- reduction of the transfer capacity through the adaptation of capacity
- cyclical switching to defrost either by injecting hot gas or turning the unit off
- cyclical activation of an electric auxiliary heating system

All measures are aimed at limiting the transfer capacity.

Notes on design and operation

In choosing the coolant, the ordinance prohibiting the use of certain halocarbons that damage the ozone layer must be taken into consideration.

The heat pump is suited, due to the coolant circulation system and the design possibilities of the heat exchanger, to perform nearly all thermodynamic functions for an air conditioning system. By installing a heat recovery system downstream, the energy requirements of the compressor can be reduced.

- heating
If a source of heat generation for the purpose of heating the supply air or as a source of decentral heat input, the heat pump can provide the additionally required heat by cooling the extract air below the level of the outside air temperature.

- Kühlen

Soll eine Kälteanlage zur Nachkonditionierung der Zuluft oder zum dezentralen Kälteeintrag ersetzt oder reduziert werden, kann die Wärmepumpe die zusätzlich erforderliche Kälte durch Aufheizen der Fortluft über das Niveau der Außenlufttemperatur bereitstellen. Die Abwärme der Wärmepumpe kann auch für andere Prozesse genutzt werden (z.B. Brauchwasservorwärmung).

- Entfeuchten

Die Wärmepumpe kann auch zur Entfeuchtung der Luft eingesetzt werden. Dazu ist die Außenluft unter den Taupunkt zu kühlen. Besonders vorteilhaft lässt sich ein Teil der Kondensationswärme für eine eventuell erforderliche Nacherwärmung nutzen. Dazu muss dem Verdampfer ein Kondensator nachgeschaltet werden.

- cooling

If a cooling plant to cool the supply air or to provide decentral cooling is to be replaced or reduced, a heat pump can provide the additionally required cooling by heating the extract air above the level of the outside air temperature. The waste heat from the heat pump can also be used for other purposes (e.g. to heat process water).

- dehumidification

The heat pump can be used to dehumidify the air. For this purpose, the outside air must be cooled below the dewpoint. A particular advantage is that part of the condensation heat can be used for any reheating that may be required. For this purpose an evaporator must be installed downstream from the condenser.

6.4.3 Mehrfachfunktionale Wärmerückgewinnung auf Basis von Kreislaufverbundsystemen

Systeme für mehrfachfunktionale WRG kommen vorzugsweise dann zum Einsatz, wenn bei der Planung die Systemgrenzen über das WRG-System hinaus erweitert werden und beispielsweise Kältemaschine, Rückkühlung oder Wärmeerzeugung mit in das Konzept einbezogen werden. Der Mehraufwand bei der Wärmerückgewinnung kann sich bei Betrachtung des Gesamtsystems schnell amortisieren.

Einfache Kreislaufverbundsysteme (KV-Systeme) werden üblicherweise als WRG-Systeme mit niedrigen Temperaturänderungsgraden bis ca. 50 % eingesetzt. Mit entsprechender Geometrie, Stromführung und Regelung des Wärmestromkapazitätsverhältnisses können KV-Systeme mit höheren Temperaturänderungsgraden (größer ca. 70 %) als mehrfachfunktionale Systeme eingesetzt werden. Daraus resultieren große Wärmeübertragungsflächen. Die Wärmeübertrager werden einteilig oder horizontal bzw. vertikal geteilt ausgeführt. Neben der primären Funktion der WRG lassen sich dann auch zusätzliche thermodynamische Funktionen, wie beispielsweise Nacherwärmung und Kühlung innerhalb des WRG-Systems, realisieren.

Zur Leistungserfüllung bei mehrfachfunktionalen Wärmerückgewinnungssystemen sind grundlegende Eigenschaften erforderlich.

6.4.3 Multifunctional heat recovery on the basis of a coil energy recovery loop system

It is best to use multifunctional HRS when the system boundaries are extended beyond the HRS during the design phase and components such as refrigeration machines, recooling or heat generation are included in the concept. The additional expense for heat recovery amortises itself quickly when the total system is taken into consideration.

Simple coil energy recovery loop systems are usually used as HRS with a low temperature differential of up to approx. 50 %. With the appropriate geometry, flow path and control of the relative heat flow capacity; a coil energy recovery loop system can be used as a multifunctional system with higher temperature differentials (greater than approx. 70 %). This results in large heat transfer surfaces. The heat exchangers are installed in one part, either horizontally or vertically. In addition to the primary function of HR, additional thermodynamic functions such as reheating and cooling can be realised within the HRS.

In order to be able to fulfil the demands of a multifunctional heat recovery system, fundamental attributes are required.

6.4.3.1 Optimierung des Temperaturänderungsgrads

Je höher der angestrebte Temperaturänderungsgrad der WRG ist, desto wichtiger ist die Optimierung des Systems. Dabei muss der Wärmeträgerkreislauf exakt auf die Luftmassenströme abgestimmt und in der Ausführung messtechnisch erfasst werden. Das Opti-

6.4.3.1 Optimisation of the temperature differential

The higher the target temperature differential of the HR, the more important it is to optimise the system. In this conjunction, the heat storage circuit must be precisely adapted to the air mass flow and monitored by measurement devices after it is installed. The op-

mum ist in der Regel dann erreicht, wenn die beiden Wärmestromkapazitäten (Luftseite-Wärmeträgerkreislauf) gleich sind.

Bei variablen Betriebsbedingungen ist eine stetige Regelung auch der Wärmeträgermassenströme erforderlich.

6.4.3.2 Zusätzliche thermodynamische Funktionen

Die mehrfachfunktionale WRG ist aufgrund des Wärmeträgerkreislaufs und der Gestaltungsmöglichkeiten der Wärmeübertrager geeignet, nahezu alle wichtigen thermodynamischen Funktionen für eine RLT-Anlage zu erfüllen. Zudem lassen sich durch Wärme- bzw. Kälteauskopplung externe technische Anlagensysteme energieeffizient einbinden. Die wichtigsten zusätzlichen thermodynamischen Funktionen sind im Folgenden beschrieben.

6.4.3.2.1 Ein- und Auskoppelung von Wärme bzw. Kälte

Die mehrfachfunktionale WRG bietet aufgrund der hohen Wärmeübertragungsflächen die Möglichkeit, sonst übliche Komponenten, wie z.B. nachgeschaltete luftseitige Wärmeübertrager inkl. deren Druckverluste und deren Platzbedarf, einzusparen.

Der Wärmeträgerkreislaufstrom des WRG-Systems ist nutzbar, um zusätzliche Wärme, aber auch Kälte beim normalen Betrieb in das System einzuspeisen. Dies kann durch direkte Einspeisung oder zur Systemtrennung durch indirekte Einspeisung über kreislaufseitige Flüssig-Flüssig-Wärmeübertrager erfolgen. Energie wird dabei ein- bzw. ausgekoppelt.

Wenn in den Zwischenkreis des WRG-Systems Energieströme ein- oder ausgekoppelt werden, wie Nacherwärmung, Nachkühlung, freie Kälte, Brauchwasservorerwärmung, Kältemaschinenabwärme etc., muss der Einfluss auf das WRG-System berücksichtigt werden. Hierbei ist zu unterscheiden, ob dies im Vorlauf oder im Rücklauf des Systems geschieht. Damit wird der Übertragungsgrad der WRG zwingend beeinflusst.

Ausgehend von der zusätzlich geforderten Lufttemperaturänderung (z.B. Nacherwärmung), bemisst sich die Temperaturänderung im Umlaufstrom abhängig vom Übertragungsgrad des betreffenden Wärmeübertragers und damit der Einfluss auf die Wärmerückgewinnung.

Je höher der ursprüngliche Temperaturänderungsgrad der WRG und je kleiner die Temperaturdifferenz der ein- oder auszukoppelnden Leistungen sind,

timum is achieved, as a rule, when both heat flow capacities (air side/heat transfer medium) are equal to each other.

In the case of variable operating conditions, the constant control of the heat transfer medium mass flow is necessary.

6.4.3.2 Additional thermodynamic functions

Multifunctional HR is suited, due to the circulation of the heat transfer medium and the design possibilities of the heat exchangers, to perform nearly all important thermodynamic functions for an air conditioning system. In addition, external technical plant systems can be integrated by means of heat and/or cooling decoupling in an energy efficient manner. The most important additional thermodynamic functions are described in the following.

6.4.3.2.1 Coupling and decoupling of heat and/or cooling

Due to their extensive heat transfer surfaces, multifunctional HR make it possible to do without otherwise common components such as downstream supply side heat exchangers, incl. the pressure drops and space requirements that they entail.

The heat transfer medium circuit flow of the HRS can be used in order to feed additional heat as well as additional cooling into the system under normal operating conditions. This can take place through direct feed or, in order to separate the system, through an indirect feed into the liquid/liquid heat exchangers on the circuit side. Energy is thereby coupled or decoupled.

When energy flows are coupled or decoupled in the intermediate circuit of the HRS, such as by reheating, recooling, free cooling, pre-warming process water, discharging heat from chillers, etc., the influence on the HRS must be taken into consideration. In this conjunction, a differentiation must be made as to whether this takes place in the supply or the return system. The transfer rate of the HR will inevitably be influenced.

Based on the additionally required change in the air temperature (e.g. reheating), the temperature change in the circulation flow is measured dependently of the transfer rate of the heat exchanger in question and, thus, of the influence of heat recovery.

The higher the original temperature differential of the HR is, the smaller the temperature difference of the coupled and decoupled inputs are, and the lesser the

desto geringer ist der Einfluss der Ein- oder Auskopplung auf den Temperaturänderungsgrad.

Allerdings beeinflussen sich die beiden Faktoren positiv. Denn je größer der ursprüngliche Temperaturänderungsgrad der WRG ist, desto geringer sind die zusätzlichen Leistungen, die ein- oder ausgekoppelt werden müssen, und desto geringer ist auch deshalb die Beeinflussung der Ein- oder Auskopplung auf den Temperaturänderungsgrad.

Um exakte Zustandsänderungen auf der Umlaufmedienseite sowie auf den Luftseiten zu erhalten, muss diesbezüglich eine Berechnung erfolgen.

Nachwärmung

Zur Ergänzung der Wärmerückgewinnungsleistung wird z.B. vom Heizungssystem, aus der Solaranlage, von Maschinen o.Ä. Wärme in das System direkt oder indirekt in den Wärmeträgerkreislauf eingespeist. Ein luftseitiger Nacherhitzer kann in der RLT-Anlage entfallen.

Wenn der Wärmeträger durch die Fortluft nicht erwärmt werden kann, ist der Fortluftwärmeübertrager vom Wärmeträgerkreislauf abzukoppeln und im Bypass zu umfahren.

Nachkühlung

Zur Ergänzung der Kälterückgewinnungsleistung wird z.B. von der Kälteanlage, Erdkälte o.Ä. Kälte in das System direkt oder indirekt in den Flüssigkeitskreislauf eingespeist. Ein luftseitiger Nachkühler kann in der RLT-Anlage entfallen.

Wenn der Wärmeträger durch die Fortluft nicht gekühlt werden kann, ist der Fortluftwärmeübertrager vom Wärmeträgerkreislauf abzukoppeln und im Bypass zu umfahren.

Entfeuchtungskälterückgewinnung

Die mehrfachfunktionale WRG kann auch zur Entfeuchtung der Luft eingesetzt werden. Dazu ist die Außenluft unter den Taupunkt zu kühlen. Die sensible Kühlung erfolgt in der Regel mithilfe der indirekten Verdunstungskühlung und die latente Kühlung mittels z.B. mechanischer Kälteerzeugung. Um den Energiebedarf für die latente Kühlung weiter zu minimieren, lässt sich ein Großteil der latenten Entfeuchtungskälte zurückgewinnen.

Dazu wird die mehrfachfunktionale WRG in der Außenluft mindestens in zwei Register aufgeteilt. Zwischen den Registern wird zur latenten Entfeuchtung Kälte über den Wärmeträgerkreislauf eingekoppelt. Danach wird die so entfeuchtete und unterkühlte Luft durch das in Luftrichtung letzte Register geführt. In diesem findet eine Nacherwärmung der Außenluft

influence of coupling and decoupling on the temperature differential.

However, the two factors have a positive influence on each other. Because the greater the initial temperature differential of the HR is, the lower the level of additional energy that must be coupled or decoupled will be, this also holds true for the influence of the coupling and decoupling on the temperature differential.

In order to attain exact information on the changes in conditions on the circulating media side, as well as on the air side, calculations must be made.

Reheating

To augment the heat recovery capacity, heat is directly or indirectly fed into the heat transfer medium circuit, e.g. from heating systems, from solar energy systems, from machines or the like. A reheater on the air side is no longer necessary in the air-conditioning system.

If the heat transfer medium cannot be warmed by the extract air, the extract air heat exchanger must be decoupled from the heat transfer medium circuit and diverted through a bypass.

Recooling

To augment the cooling recovery capacity, cooling from sources such as the cooling plant or ground cooling are fed directly into the system or indirectly into the liquid medium circuit. A recooler on the air side is then no longer necessary in the air-conditioning system.

If the heat transfer medium cannot be cooled by the extract air, the extract air heat exchanger must be decoupled from the heat transfer medium circuit and diverted through a bypass.

Dehumidifying cooling recovery

Multifunctional HR can also be used to dehumidify the air. For this purpose, the outside air must be cooled to below the dewpoint. As a rule, sensible cooling takes place with the help of indirect evaporative cooling or latent cooling by such means as mechanical refrigeration. In order to further minimise the energy requirements for latent cooling, most of the latent dehumidification cooling can be recovered.

In order to do so, multifunctional HR in the outside air is divided into at least two registers. Cooling is coupled between the registers via the heat transfer medium circuit for the purpose of latent dehumidification. After that, the air that has thus been dehumidified and supercooled is conducted through the last register in relation to the airflow direction. This is

statt, die gleichzeitig den Wärmeträger vor der Kälte-einkopplung vorkühlt. Diese Vorkühlung verringert die einzuspeisende Kälteleistung deutlich, und die Nacherwärmung kann ohne zusätzlichen Energieaufwand realisiert werden.

Kältemaschinenabwärme

Die Abwärme von Kältemaschinen kann energetisch vorteilhaft in die mehrfachfunktionale WRG eingekoppelt werden. Dazu wird die Abwärme der Kältemaschinen über die Fortluft rückgekühlt oder die Abwärme zu Heizzwecken in der Außenluft genutzt. Dies erspart Rückkühlwerke und zusätzliche Heizregister.

Freie Kälte

Wird ganzjährig Kälteenergie benötigt, kann während der Heizperiode der Rücklauf des Wärmeträgerkreislaufts direkt oder indirekt zur Auskopplung von Kälte genutzt werden. Hier besteht die Möglichkeit, ein externes flüssiges Medium energetisch vorteilhaft zu kühlen. Dadurch werden Kälteanlagen zur Kühlung eines externen flüssigen Mediums saisonweise entlastet.

Wasservorwärmung

Bei hohen latenten Wärmegehalten der Abluft, beispielsweise bei Schwimmbadnutzung, kann mit einer mehrfachfunktionalen WRG dem Abluftstrom mehr Wärme entzogen werden als die Zuluftseite benötigt. Die überschüssige Wärme kann direkt oder indirekt zur Wasservorwärmung ausgekoppelt werden.

WRG-Kopplung

Mehrfachfunktionale WRG-Systeme können beliebig miteinander gekoppelt werden. Im einfachsten Fall besteht das WRG-System aus einem gekoppelten Wärmeübertrager, der aus einem Fortluft- und einem Außenluftwärmeübertrager zusammengesetzt ist. Möglich sind aber auch Kopplungen von mehreren Fortluftwärmeübertragern mit mehreren Außenluftwärmeübertragern. So kann Wärme bzw. Kälte verschiedener Fortluftströme im Gebäude lastabhängig in verschiedenen Zuluftanlagen genutzt werden (Wärmeverschiebung). Die Entfernungen untereinander spielen dabei eine untergeordnete Rolle, da die Wärme bzw. Kälte über flüssige Wärmeträger transportiert wird.

6.4.3.2.2 Zeitversetztes Ein- und Auskoppeln von thermischer Energie

Werden mehrfachfunktionale WRG-Systeme auf Basis von KVS eingesetzt, besteht die Möglichkeit En-

where a reheating of the outside air takes place, which simultaneously pre-cools the heat transfer medium before the coupling of the cooling. This precooling markedly reduces the cooling capacity that must be fed into the system, and the rewarming can be realised without the expenditure of additional energy.

Waste heat from refrigeration machines

The waste heat from refrigeration machines can be coupled into multifunctional HR with energy saving benefits. For this purpose, waste heat from the refrigeration machine is recooled by the extract air, or the waste heat is used for the purpose of heating the outside air. This eliminates the need for a recooling system and additional heating registers.

Free cooling

If cooling energy is required throughout the year, the return from the heat transfer medium circuit can be used during the heating period to directly or indirectly decouple cooling. Here it is possible to use an external fluid medium for cooling with energy saving benefits. This allows cooling plants to cool during certain seasons without an external fluid medium.

Prewarming water

In the case of high latent heat content in the exhaust air, for example in the case of a swimming pool, a multifunctional HR can extract more heat from the exhaust flow than is required on the supply side. This excess heat can be directly or indirectly decoupled for the purpose of preheating water.

Heat recovery coupling

Multifunctional HRS can be coupled with each other as desired. In the simplest case, the HRS consists of a coupled heat exchanger, which is composed of an extract air and an outside air heat exchanger. It is also possible to couple a number of extract air heat exchangers with a number of outside air heat exchangers. Heat and/or cooling from different extract airflows in the building can thus be used, depending on the demand, in different supply plants (heat distribution). The distance from each other is of less importance in this context since the heat and/or cooling is/are transported by a liquid heat transfer medium.

6.4.3.2.2 Coupling and decoupling of thermal energy with a time delay

If multifunctional HRS on the basis of coil energy recovery loop systems are used, it is possible to decou-

ergien aus dem Gesamtsystem zeitversetzt aus- und wieder einzukoppeln.

Dies ist in z.B. folgenden Betriebssituationen sinnvoll:

- Winterbetrieb: Wenn aufgrund hoher innerer Lasten einem Gebäude keine weitere Wärme mehr zugeführt werden muss, kann überschüssige zurückgewonnene Wärme nicht verwendet werden.
- Sommerbetrieb: Wenn überschüssige Kälte, z.B. aus solarthermisch angetriebenen Kältemaschinen, nicht verwendet werden kann.

Für die Aus- und wieder Einkopplung der Energien sind geeignete Speichersysteme einsetzbar. Sensible Speichersysteme können über einen großen Temperaturbereich eingesetzt werden, während Latentspeichersysteme nur auf einem definierten Temperaturniveau Energien aufnehmen und abgeben können.

7 Abnahme, Leistungsmessung, energetische Inspektion

7.1 Abnahme

Im Rahmen der Abnahme sind nur solche Zustände und Eigenschaften prüffähig, die garantierbar und kontrollierbar sind. Beispielsweise sind Jahresenergieverbräuche und daraus abgeleitete Werte nicht abnahmefähig, da die Prüfung nur zeitlich unangemessen nach Nutzungsbeginn stattfinden kann und sich das Wetter sowie das Nutzerverhalten dem Einfluss des Auftragnehmers entziehen.

Werden zur Abnahme vor Ort Messungen physikalischer Größen herangezogen, ist im Rahmen der erreichbaren Messgenauigkeit die benötigte Genauigkeit anhand der gewünschten Toleranz im Vorfeld vertraglich festzulegen. Unter Umständen kann deswegen auch der Einsatz von Prüfinstituten oder Prüfsachverständigen notwendig sein. Ist bei den Messungen vor Ort aufgrund hoher Komplexität oder fehlender Messgenauigkeit keine Abnahmefähigkeit erreichbar, kann eine Vorabprüfung, beispielsweise im Prüffeld erfolgen.

7.2 Leistungsmessung

Im Gegensatz zu den Energiemessungen werden Leistungsmessungen nur zu einem Zeitpunkt ausgeführt. Daher eignen sich Leistungsmessungen zur Prüfung im Rahmen einer Abnahme. Bei der WRG werden innerhalb der gewählten Bilanzgrenze thermische und elektrische Leistungen gemessen. Das Messergebnis errechnet sich aus mehreren zu messenden physikalischen Größen. Die Messungen er-

ple and then recouple energy from the entire system with a time delay.

This makes sense, for example, under the following operating conditions:

- winter operation: When no additional heat needs to be brought into a building, due to high internal loads, excess recovered heat cannot be used.
- summer operation: When excess cooling, e.g. from a solar thermally driven refrigeration machine, cannot be used.

Suitable storage systems are available for decoupling and recoupling energies. Sensible storage systems can be used over a broad temperature range, while latent storage systems can only absorb and disperse energy at a defined temperature level.

7 Commissioning, capacity measurement, energetic inspection

7.1 Commissioning

Within the context of the commissioning process, it is only possible to verify conditions and characteristics that can be guaranteed and controlled. For example, the annual energy consumption and the values derived from it cannot be certified, since the verification can only take place at an inappropriate time, namely after the system has been in use, and because the weather and user behaviour cannot be influenced by the contractor.

If physical quantities are drawn upon to certify measurements undertaken on site, the required precision, within the context of the attainable measurement precision, must be contractually determined on the basis of the desired tolerance beforehand. Under certain circumstances, it may become necessary to make use of the services of testing institutes or testing experts. If, in the case of measurements undertaken on site, certifiability cannot be attained due to the great complexity or the lack of precise measurements, verification can, for example, be undertaken in advance in a testing facility.

7.2 Performance measurement

In contrast to energy measurements, performance measurements are only undertaken at one point in time. Hence, performance measurements can be verified within the context of commissioning. In the case of HR, the thermal and electrical performance is measured within the chosen balance boundaries. The results are calculated on the basis of a number of physical quantities that must be measured. The meas-

Kälterückgewinnung müssen getrennt voneinander bewertet werden.

Basis einer energetischen Messung ist die ausreichende Anzahl von Sensoren sowie deren repräsentative Anordnung. Aufgrund der ungleichmäßigen Lufttemperaturverteilungen bei Rotationswärmeübertragern und Kreuzstrom-Plattenwärmeübertragern ist dies nur mit eingeschränkter Genauigkeit möglich. Hier müssen Mittelwertfühler mit ausreichender Länge über den Gerätequerschnitt verwendet werden.

Voraussetzung sind in jedem Fall eine abgeschlossene Funktionsprüfung und zum Abgleich begleitend mindestens eine Validierung. Energetische Messungen können aufwendig sein und bedürfen im Vorfeld einer entsprechenden vertraglichen Vereinbarung.

7.4 Energetische Inspektion

Ziel der energetischen Inspektion ist es, vermeidbare Energieverluste zu erkennen und in der Folge abzuwenden. Damit lässt sich die Luftaufbereitungsanlage so betreiben und instand halten bzw. erneuern, dass nicht mehr Energie verbraucht wird, als zu ihrer bestimmungsgemäßen Nutzung erforderlich ist.

Die WRG hat die Aufgabe, den Energieverbrauch einer Luftaufbereitung zu senken. Daher umfasst die Inspektion, unabhängig von der Bilanzgrenze, Maßnahmen zur Funktionsprüfung aller Komponenten im Gebäude, die den Wirkungsgrad und die Effizienz des WRG-Systems beeinflussen, sowie die Prüfung der Anlagenauslegung im Verhältnis zum Stand der Technik.

Dabei zielt die Inspektion auch auf die Überprüfung und Bewertung der Einflüsse, die für die Auslegung der Anlage verantwortlich sind, insbesondere die noch notwendigerweise verbleibenden extern zugeführten Energien der kompletten Luftaufbereitung, wie Strom, Wärme, Kälte etc. Damit sind neben beispielsweise Verschmutzung, Leckagen oder Luftmengen auch nutzungsabhängige Veränderungen der geforderten Sollwerte hinsichtlich Temperatur, Feuchte, Betriebszeiten, Betriebsweisen sowie Toleranzen mit in die Inspektion einzubeziehen.

Zur sicheren Trenderkennung wird empfohlen, die in regelmäßigen Intervallen erfassten Zählerstände von fest installierten Strom-, Wärme- und Kältezählern der extern zugeführten Energien oder ein energetisches Monitoring mit heranzuziehen.

must be assessed separately from one another.

The basis for energetic measurements are a sufficient number of sensors as well as their arrangement in a representative pattern. Due to the unequal distribution of the air temperature in the case of rotary heat exchangers and cross flow plate heat exchangers, this can only be done with limited precision. In this case, average temperature value sensors of sufficient length must be used to span the cross-section of the unit.

The precondition that applies in every case is a completed function test and, for the purpose of comparison, at least one validation. Energy measurements can be very labour intensive and require a corresponding contractual agreement beforehand.

7.4 Energetic inspection

The goal of energetic inspection is to recognise avoidable energy losses and to subsequently prevent them. The air preparation system can thus be operated and maintained and/or refurbished in such a manner that no more energy is used than is necessary for its intended purpose.

The purpose of HR is to reduce the energy consumption in air preparation systems. Hence, the inspection includes, regardless of the balance boundaries, measures to verify the functions of all of the components in the building that influence the efficiency of the HRS, as well as the testing of the system design in relation to the state of technology.

In this conjunction, the inspection is also aimed at testing and assessing the influences that were responsible for the design of the system, especially the remaining auxiliary energy that must still be fed into the complete air preparation system, such as electricity, heat, cooling etc. Thus, in addition to such issues as the ingress of contaminants, leakage and air volumes, it is important to take use-dependent changes of the required design conditions in relation to the temperature, humidity, operating time, operating modi and tolerances into consideration during the inspection.

In order to be able to recognise trends with certainty, it is recommended that meter readings for the energy from external sources, recorded at regular intervals by permanently installed electricity, heat and cooling meters, or energetic monitoring be taken into consideration.

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

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

$$E = E_{\text{WRG}} - E_{\text{el}} - E_{\text{U}} - E_{\text{K}} \quad (15)$$

Dabei ist

- E_{WRG} energetischer Nutzen der WRG im Sommer und Winter in €
 E_{el} elektrische Aufwendungen (Hilfsenergie) in €
 E_{U} Unterhaltskosten der WRG (z.B. Wartung, Wasser etc.) in €
 E_{K} Kapitalkosten der WRG in €

Der Barwertfaktor b mit Bezug zum Nutzungszeitraum gibt den relativen Wert künftiger Erträge und Aufwendungen, abgezinst auf den heutigen Zeitpunkt, an und errechnet sich unter Berücksichtigung der Preissteigerung aus

$$b = \frac{1 - \left(\frac{1+j}{1+i}\right)^n}{i-j} \quad (16)$$

Dabei ist

- i Zinssatz
 j Preissteigerungsrate
 n Nutzungsdauer in Jahren

Ein positiver Kapitalwert gibt an, welchen Ertrag die WRG innerhalb ihrer Nutzungszeit, abgezinst auf heute, erwirtschaftet. Ist der Kapitalwert negativ, handelt es sich um einen Verlust.

8.2 Amortisation

Die Amortisation kann aus den kumulierten Einnahmen und Ausgaben der Einzelperioden ermittelt werden. Sie ist dann erreicht, wenn die kumulierten Ausgaben den Einnahmen entsprechen.

Im Fall von gleichbleibenden Ein- und Ausgaben ermittelt sich die Amortisation a unter Berücksichtigung von Zinseffekten nach der folgenden Gleichung:

$$a = \frac{\log\left(\frac{E}{E - I(i-j)}\right)}{\log\left(\frac{1+i}{1+j}\right)} \quad (17)$$

Dabei ist

- E jährliche Einsparung durch die Investition ohne Kapitalkosten in €
 I Kapitaleinsatz durch die Investition in €
 i Zinssatz
 j Preissteigerungsrate

The annual savings E of HR is calculated as the difference between the costs and the benefits:

$$E = \text{benefits} - \text{costs}$$

$$E = E_{\text{WRG}} - E_{\text{el}} - E_{\text{U}} - E_{\text{K}} \quad (15)$$

where

- E_{WRG} energetic benefit of HR in summer and winter, in €
 E_{el} electric energy expenditures (auxiliary energy), in €
 E_{U} maintenance costs of HR (e.g. maintenance, water, etc.), in €
 E_{K} capital costs of HR, in €

The present value factor b in relation to the utilization period indicates the relative value of future returns and expenditures discounted to the present value, and is calculated in view of price increases as

$$b = \frac{1 - \left(\frac{1+j}{1+i}\right)^n}{i-j} \quad (16)$$

where

- i interest rate
 j rate of price increase
 n utilization period, in years

A positive present net value indicates the returns produced by the HR within its utilization period discounted to the present value. If the capital value is negative, this represents a loss.

8.2 Amortisation

Amortisation can be determined on the basis of the cumulative income and expenditures for the individual period. It is achieved when the cumulative expenditures are equal to the income.

In the case of constant income and expenditures, amortisation a is calculated according to the following equation which takes the impact of interest into consideration:

$$a = \frac{\log\left(\frac{E}{E - I(i-j)}\right)}{\log\left(\frac{1+i}{1+j}\right)} \quad (17)$$

where

- E annual savings resulting from the investment without capital costs, in €
 I capital expenditure resulting from the investment, in €
 i interest rate
 j rate of price increases

8.3 Interner Zinssatz

Der interne Zinssatz beruht auf der Umformung der Kapitalwertmethode mit der Fragestellung, welcher interne Zinssatz zu einem Kapitalwert von null führt. Er stellt die effektive Verzinsung der Investition dar.

$$K = E \cdot b - I = 0 \quad (18)$$

Daraus folgt

$$I/E = b \quad (19)$$

$$\frac{I}{E} = \frac{1 - \left(\frac{1+j}{1+r} \right)^n}{r-j} \quad (20)$$

Dabei ist

r interner Zinssatz

Der interne Zinssatz ermittelt sich iterativ aus Gleichung (20).

9 CO₂-Bilanz

Wärme- und Kälteenergieeinsparungen haben unmittelbar einen reduzierten Verbrauch der Energieresourcen zu Folge. Dies ist gleichbedeutend mit der Vermeidung von Schadstoffemissionen, die ohne die WRG bei der Energieerzeugung angefallen wären. Damit steht neben anderen Auswahlkriterien ebenfalls eine ökologische Entscheidungshilfe für ein geeignetes WRG-System zur Verfügung.

Die Schadstoffemissionen sind zudem von den eingesetzten Energieträgern abhängig. Aufgrund der größten Schadstoffemissionsmenge wird Kohlendioxid (CO₂) repräsentativ für alle Schadstoffemissionen betrachtet (Tabelle 2).

Tabelle 2. Richtwerttabelle CO₂-Emissionsfaktor
(Quelle: Bundesministerium für Wirtschaft 08.10.2008)

Strommix	0,630 t/MWh _{el}
Erdgas	0,265 t/MWh _{th}
Heizöl	0,340 t/MWh _{th}
Steinkohle	0,450 t/MWh _{th}
Holzackschnitzel	0,025 t/MWh _{th}

Die in der Richtwerttabelle angegebenen Werte sind auf Nutzenergie bezogen und beinhalten 5 % Verteilverluste sowie die gesamte Prozesskette der Energiegewinnung. Bei anderen Energieträgern als in der Tabelle angegeben oder bei projektspezifisch vorliegenden Daten sind die entsprechenden aktuellen spezifischen Emissionswerte zu verwenden.

Die Berechnung der CO₂-Reduzierung erfolgt über die Differenz von energetischem Nutzen und energie-

8.3 Internal rate of return

The internal rate of return is based on the conversion of the net present value method by posing the question as to which internal rate of return will lead to a net present value of zero. It indicates the effective rate of interest on the investment.

$$K = E \cdot b - I = 0 \quad (18)$$

from which follows

$$I/E = b \quad (19)$$

$$\frac{I}{E} = \frac{1 - \left(\frac{1+j}{1+r} \right)^n}{r-j} \quad (20)$$

where

r internal rate of return

The internal rate of return can be iteratively determined using Equation (20).

9 CO₂ balance

Energy savings for heating and cooling result directly in a reduced consumption of energy resources. This also means the elimination of the emission of pollutants that would have otherwise occurred through the generation of energy without the HR. Hence, in addition to the other selection criteria, an ecological decision-making aid is also available for a suitable HRS.

The emission of pollutants is also dependent upon the energy source used. Because it represents the largest amount of pollutants emitted, carbon dioxide (CO₂) will be viewed as representative of all emissions (Table 2).

Table 2. Reference values for CO₂ emission factors
(source: Federal Ministry of Economics, 8 Oct. 2008)

Electricity mix	0,630 t/MWh _{el}
Natural gas	0,265 t/MWh _{th}
Heating oil	0,340 t/MWh _{th}
Anthracite	0,450 t/MWh _{th}
Wood chips	0,025 t/MWh _{th}

The reference values provided in the table are related to net energy and include a 5 % distribution loss as well as the entire process chain of energy production. Auch nicht so eindeutig im Deutschen. In the case of other energy sources than those listed in the table, or in the case of available project specific data, the corresponding current specific emission values are to be used.

The calculation of CO₂ reduction is undertaken by determining the difference between the energy bene-

tischem Aufwand einer WRG. Das Ergebnis ist umso aussagekräftiger, je weiter die Bilanzgrenze gefasst ist, damit auch die erweiterten Funktionen oder Auswirkungen auf andere Gewerke sicher erfasst werden.

Anhand der jährlichen Energieeinsparungen wird die CO₂-Reduzierung bestimmt. Während als Nutzen die Wärmeeinsparung direkt einem Brennstoff zugeordnet werden kann, ist bei der Kälteeinsparung die eingesparte Energie für eine reduzierte bzw. vermiedene Kältemaschine anzusetzen:

$$m = (E_{\text{Nutzen}} - E_{\text{Aufwand}}) \cdot e \quad (21)$$

Dabei ist

- m CO₂-Reduktion
- E Energie
- e CO₂-Emissionsfaktor

Die CO₂-Reduzierungen sind getrennt nach Energieträger zu ermitteln und anschließend zu summieren.

10 Planungskriterien

Bei Auswahl und Planung eines WRG-Systems sind vielfältige Kriterien und Randbedingungen zu berücksichtigen. Die folgenden Planungskriterien sollen helfen, die fallbezogene beste Lösung zu finden.

10.1 Auslegungsgrundlagen

Diese Werte haben eine große Bedeutung; sie müssen besonders hinterfragt und für den Ein- und Austritt am Wärmerückgewinner definiert werden.

- Luftvolumenströme
Da die Volumenströme von Luftdruck und Temperatur abhängen, empfiehlt es sich, Massenströme zu definieren. Das Massenstromverhältnis hat Einfluss auf den Temperaturänderungsgrad.
- Anlagengröße
Die Anlagengröße (Luftvolumenstrom) ist ein wichtiges Kriterium für die Auswahl des WRG-Systems.
- Abluftkonditionen
Temperatur und Feuchte haben einen erheblichen Einfluss auf die WRG (z.B. Einfriergrenze) und werden häufig zu hoch angenommen.
- Zulufttemperatur
Die Zulufttemperatur beeinflusst den Energiebedarf und -rückgewinn entscheidend (insbesondere bei der Kühlung).

fit and energy expenditure of a HR. The result is all the more significant, the broader the defined balance boundary, so that the expanded functions and the effects on other areas can also be determined with certainty.

The reduction in CO₂ is determined on the basis of annual energy savings. While the savings on heating can be attributed to a benefit directly related to a type of fuel, the savings on energy through a reduced or eliminated refrigeration machine is used to determine the savings on cooling:

$$m = (E_{\text{Nutzen}} - E_{\text{Aufwand}}) \cdot e \quad (21)$$

where

- m CO₂ reduction
- E energy
- e CO₂ emission factor

The reduction in CO₂ must be determined individually according to the energy source and then subsequently added together.

10 Design criteria

Various criteria and framework conditions must be taken into consideration in selecting and designing an HRS. The following design criteria should provide help in finding the best solution for the case in question.

10.1 Basis for design

These values are of great importance; they must be viewed critically and defined for the inlet and outlet in the heat recovery unit.

- air volume flows
Since the air volume flows are dependent upon the air pressure and the temperature, the definition of the mass flows is recommended. The mass flow relationship has an influence on the temperature differential.
- system size
The size of the plant (air volume flow) is an important criterion for the selection of the HRS.
- exhaust air conditions
Temperature and moisture content have a considerable influence on HR (e.g. freezing limit) and are often assumed to be too high.
- supply air temperature
The supply air temperature influences the energy requirements and energy recovery decisively (especially in the case of cooling).

- Außenluftzustände
Die minimalen und maximalen Auslegungswerte für den jeweiligen Standort müssen festgelegt werden.
- Zuluftqualität
Mischluft/Umluft aufgrund von Leckage und gemeinsame Oberflächen (z.B. Rotor) haben Einfluss auf die Zuluftqualität und damit auf die Auswahl des Wärmerückgewinnungssystems.

10.2 Festlegung der Bilanzgrenze

Zur Festlegung von Bilanzgrenzen siehe Abschnitt 6.1.

10.3 Vorschriften

Es sind die geltenden Gesetze, Verordnungen und Technischen Regeln sowie weitere Vorgaben (z.B. des Betreibers, Fördermaßnahmen) zu berücksichtigen.

10.4 Geometrie

- Platzbedarf
Höhe, Breite und Tiefe bestimmen die Systemauswahl. Insbesondere eventuell notwendige Revisionszugänge bei geteilten Wärmetauschern sind zu beachten.
- Luftführung
Ein Entscheidungskriterium ist die mögliche und sinnvolle Zusammenführung der Luftströme.

10.5 Besondere Anforderungen

Anforderungen bezüglich Material und/oder Geometrie durch Temperatur (min./max.), Korrosion, Beständigkeit (z.B. Lösungsmittel), Verschmutzung und Differenzdruck bedingen gegebenenfalls eine Sonderausführung des WRG-Systems.

10.6 Mehrfachfunktionale Systeme

- indirekte Verdunstungskühlung
Nicht alle WRG-Systeme sind für indirekte Verdunstungskühlung geeignet.
- mehrfachfunktionale Systeme
Externe Wärmequellen und -senken können gegebenenfalls ein- und ausgekoppelt werden, um ein wirtschaftlicheres Gesamtkonzept zu erreichen.

10.7 Feuchteübertragung

WRG-Systeme mit Feuchteübertragung nutzen zusätzliches Energiepotenzial. Dies ist vor allem bei maschineller Kühlung und Feuchteregelung zu prüfen.

10.8 Betrieb/Nutzung

- Vereisungsschutz
Unterhalb der Außenlufttemperatur, bei der das Kondensat der Abluft zu gefrieren beginnt (Einfriergrenze), ist ein Vereisungsschutz erforderlich.

- outside air conditions
The minimum and maximum design values for the given location must be determined.
- Supply air quality
Mixed air/recirculated air due to leakage and shared surfaces (e.g. rotors) have an influence on the supply air quality and thus on the selection of a heat recovery system.

10.2 Determination of the balance boundary

To determinate balance boundaries see Section 6.1.

10.3 Regulations

Currently valid acts, ordinances and technical rules and other specifications (e.g. of the operator or for subsidiary programmes) must be taken into consideration.

10.4 Geometry

- space requirements
Height, width and depth determine the selection of a system. Special attention should be given to any access for maintenance that may be required in the case of divided heat exchangers.
- air conduction
A decisive criterion is whether it is possible and advantageous to bring the airflows together.

10.5 Special requirements

Requirements in relation to material and/or geometry due to temperature (min./max.), corrosion, durability (e.g. solvents), contamination and differential pressure can require a special design of the HRS.

10.6 Multifunctional systems

- indirect evaporative cooling
Not all HRS are suited for indirect evaporative cooling.
- multifunctional systems
External heat sources and sinks can, under certain circumstances, be coupled and decoupled, in order to achieve a more efficient overall concept.

10.7 Moisture transmission

HRS that transmit moisture make use of additional energy potential. This should be examined especially in the case of mechanical cooling and humidity control.

10.8 Operation/use

- protection against icing
At temperatures below the exhaust air temperature, at which condensation in the exhaust air begins to freeze, icing protection is required. The

Die Einfriergrenze hängt von den Abluftkonditionen (Temperatur und Feuchte), von dem Temperaturänderungsgrad und vom WRG-System ab. Für die Dimensionierung des Erhitzers und der Wärmeerzeugung/-verteilung muss die Einfriergrenze berücksichtigt werden.

- **Nutzung**
Das Energiepotenzial zwischen Ab- und Zuluft bestimmt den wirtschaftlichen Temperaturänderungsgrad. Gegebenenfalls muss die Leistung begrenzt oder geregelt werden.
- **Betriebszeit**
Die Betriebszeit hat einen deutlichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit. Je länger die Betriebszeit angesetzt wird, desto höher soll der Temperaturänderungsgrad und desto niedriger der Druckverlust der WRG sein.

10.9 Konzeption

- **Ventilatoranordnung**
Die Anordnung der Ventilatoren hat Einfluss auf den Differenzdruck im Wärmerückgewinner. Damit wird etwaige Leckage entscheidend beeinflusst. Die Temperaturerhöhung im Ventilator ist bei der Anordnung der Ventilatoren ebenfalls zu berücksichtigen.
- **Leistungsreserven/Betriebssicherheit**
Eventuelle Leistungsreserven sind bei der Auslegung der Wärmerückgewinnung sowie bei der Wärme- und Kälteerzeugung zu berücksichtigen. Kriterien dafür sind die Betriebssicherheit der WRG und deren Komponenten.
- **Hilfsenergie**
Notwendige Hilfsenergie für den Betrieb der Wärmerückgewinnung (z.B. Antriebe, Pumpen, Verdichter) soll möglichst klein gehalten werden.
- **Wartung**
Der Aufwand für Reinigung und Wartung hat Einfluss auf die Auswahl des WRG-Systems.

10.10 Technische Daten

- **Temperaturänderungsgrad**
Der wirtschaftliche Temperaturänderungsgrad ist von individuellen Kriterien abhängig und kann mit einer Wirtschaftlichkeitsrechnung fallweise festgelegt werden. Ein hoher Temperaturänderungsgrad ist nicht automatisch optimal. Weiterhin sind zu berücksichtigen:
 - geforderte Mindestwerte
 - Vereisungsschutz; gilt besonders bei hohem Temperaturänderungsgrad
 - Investition, Substitution (Mehr- und Minderkosten)
 - Potenzial der Rückwärmernutzung

freezing limit depends upon the exhaust air conditions (temperature and humidity), the temperature differential and the HRS. In choosing the dimensions of the heater and the heat generation/distribution, the freezing limit must be taken into consideration.

- **use**
The energy potential between the exhaust and the supply air determines the efficient temperature differential. Under certain circumstances the capacity must be limited or controlled.
- **operating period**
The operating period has a marked influence on the efficiency. The longer the assumed operating period, the higher the temperature differential and the lower the pressure drops of the HR should be.

10.9 Design

- **arrangement of the ventilators**
The arrangement of the ventilators has an influence on the differential pressure in the heat recovery unit. This, in turn, has a decisive influence on any leakage that takes place. The temperature increase in the ventilators must be taken into consideration in determining their arrangement.
- **capacity reserves/operating safety**
Any existing capacity reserves are to be taken into consideration in the design of heat recovery systems as well as in generating heat and cooling. The operating safety of the HR and its components are important criteria.
- **auxiliary energy**
Any auxiliary energy required for the operation of the heat recovery unit (e.g. drives, pumps or compressors) should be kept to a minimum.
- **maintenance**
The amount of effort for cleaning and maintenance has an influence on the choice of an HRS.

10.10 Technical data

- **temperature differential**
The efficient temperature differential is dependent upon individual criteria and can be determined from case-to-case by a cost-benefit analysis. A higher temperature differential is not automatically optimal. The following must also be taken into consideration:
 - minimum values required
 - icing protection; pertains especially in the case of a high temperature differential
 - investment, substitution (additional and avoided costs)
 - potential for using the return heat

- Druckverlust

Druckverluste hängen von der Luftgeschwindigkeit, der Konstruktion der Wärmerückgewinnung und der Luftzusammenführung ab. Der Druckverlust soll möglichst gering sein, da durch ihn der energetische Aufwand definiert wird. Relevante Grenzwerte sind zu beachten.

- Wirtschaftlichkeit

Eine Bewertung des WRG-Systems ist mit einer Wirtschaftlichkeitsrechnung möglich. Es ist aber zu beachten, dass diese nur fallbezogen gilt und von den jeweils zugrunde gelegten individuellen Kriterien und Annahmen abhängt. Es empfiehlt sich, mehrere Varianten zu betrachten (optimistisch, pessimistisch, wahrscheinlich), um einen Wertebereich für die mögliche Entwicklung und damit eine Entscheidungsgrundlage zu erhalten.

- pressure drop

Pressure drops depend upon the air speed, the construction of the heat recovery, and how the air is brought together. The pressure drop should be as low as possible, since the energy expenditure is defined by it. Relevant boundary values are to be taken into consideration.

- efficiency

An assessment of the HRS is possible by means of a cost-benefit analysis. It should, however, be taken into account that this only applies to the case at hand and depends upon the individually determined criteria and assumptions on which each case is based. The consideration of a number of variants (optimistic, pessimistic, probable) is recommended in order to attain a value range for possible developments and, thus, a basis for making decision.

Schrifttum / Bibliography

Gesetze, Verordnungen, Verwaltungsvorschriften / Acts, ordinances, administrative regulations

Richtlinie **2010/31/EU** des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. Mai 2010 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings), ABl EU, 2010, Nr. L 153, S. 13–35 (EPBD Energy Performance of Buildings Directive)

Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich (Erneuerbare-Energien-Wärme-gesetz – **EEWärmeG**) vom 7. August 2008 (BGBl I, 2008, Nr. 36, S. 1658–1665)

Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – **EnEV**) vom 24. Juli 2007 (BGBl I, 2007, Nr. 34, S. 1519–1563)

Technische Regeln / Technical rules

DIN 1946-4:2008-12 Raumluftechnik; Teil 4: Raumluftechnische Anlagen in Gebäuden und Räumen des Gesundheitswesens (Ventilation and air conditioning; Part 4: Ventilation in buildings and rooms of health care). Berlin: Beuth Verlag

DIN 4710:2003-01 Statistiken meteorologischer Daten zur Berechnung des Energiebedarfs von heiz- und raumluftechnischen Anlagen in Deutschland (Statistics on German meteorological data for calculating the energy requirements for heating and air conditioning equipment). Berlin: Beuth Verlag

DIN V 18599 Energetische Bewertung von Gebäuden; Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung (Energy efficiency of buildings; Calculation of the net, final and primary energy demand for heating, cooling, ventilation, domestic hot water and lighting). Berlin: Beuth Verlag

DIN EN 308:1997-06 Wärmeaustauscher; Prüfverfahren zur Bestimmung der Leistungskriterien von Luft-Luft- und Luft-Abgas-Wärmerückgewinnungsanlagen; Deutsche Fassung EN 308:1997 (Heat exchangers; Test procedures for establishing performance of air to air and flue gases heat recovery devices; German version EN 308:1997). Berlin: Beuth Verlag

DIN EN 12599:2013-01 Lüftung von Gebäuden; Prüf- und Messverfahren für die Übergabe raumluftechnischer Anlagen; Deutsche

Fassung EN 12599:2012 (Ventilation for buildings; Test procedures and measuring methods to hand over air conditioning and ventilation systems; German version EN 12599:2012). Berlin: Beuth Verlag

DIN EN 13053:2012-02 Lüftung von Gebäuden; Zentrale raumluftechnische Geräte; Leistungskennndaten für Geräte, Komponenten und Baueinheiten; Deutsche Fassung EN 13053:2006+A1:2011 (Ventilation for buildings; Air handling units; Rating and performance for units, components and sections; German version EN 13053:2006+A1:2011). Berlin: Beuth Verlag

DIN EN 13779:2007-09 Lüftung von Nichtwohngebäuden; Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlage und Raumkühlsysteme; Deutsche Fassung EN 13779:2007 (Ventilation for non-residential buildings; Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems; German version EN 13779:2007). Berlin: Beuth Verlag

DIN EN 15251:2012-12 Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden; Raumlufqualität, Temperatur, Licht und Akustik; Deutsche Fassung EN 15251:2007 (Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics; German version EN 15251:2007). Berlin: Beuth Verlag

VDI 1000:2010-06 VDI-Richtlinienarbeit; Grundsätze und Anleitungen (VDI Guideline Work; Principles and procedures). Berlin: Beuth Verlag

VDI 3803 Blatt 1:2010-02 Raumluftechnik; Zentrale Raumluftechnische Anlagen; Bauliche und technische Anforderungen (VDI-Lüftungsregeln) (Air-conditioning; Central air-conditioning systems; Structural and technical principles (VDI ventilation code of practice)). Berlin: Beuth Verlag

VDI 3804:2009-03 Raumluftechnik; Bürogebäude (VDI-Lüftungsregeln) (Air-conditioning; Office buildings (VDI ventilation code of practice)). Berlin: Beuth Verlag

VDI 4710 Meteorologische Grundlagen für die Technische Gebäudeausrüstung (Meteorological data for building-services purposes). Berlin: Beuth Verlag

VDI 6022 Hygiene-Anforderungen an Raumluftechnische Anlagen und Geräte (Hygiene requirements for ventilation and air-conditioning systems and units). Berlin: Beuth Verlag