

Technische Möglichkeiten zur Steigerung der Energieeffizienz von zentralen RLT-Geräten und zentralen RLT-Anlagen

Potenziale der mehrfachfunktionalen Wärmerückgewinnung im Kontext zur Elektroenergieeinsparung

Dr. Christoph Kaup

HOWATHERM Klimatechnik GmbH

Elektrische Leistung

$$P_m = \dot{V} \cdot \Delta p \cdot 1 / \eta$$

P_m Elektrische Leistung [KW]

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

Δp Differenzdruck der Anlage [Pa]

η Gesamtwirkungsgrad des Systems

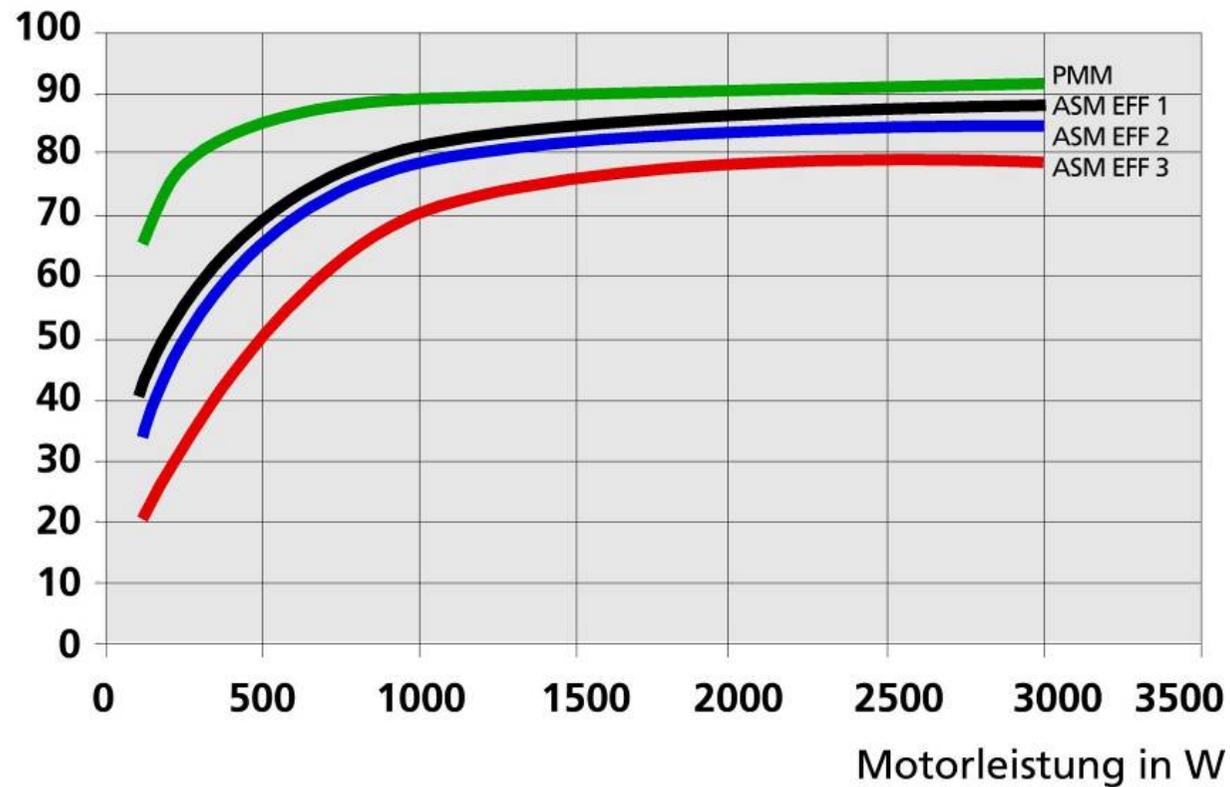
$$\eta = \eta_V \cdot \eta_M \cdot \cancel{\eta_A} \cdot \eta_R$$

Ventilator • Motor • Antrieb • Regelung



Antriebstechnik Motor

Wirkungsgrad
in %



Elektrische Leistung

$$P_m = \dot{V} \cdot \Delta p \cdot 1 / \eta$$

P_m Elektrische Leistung [KW]

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

Δp Differenzdruck der Anlage [Pa]

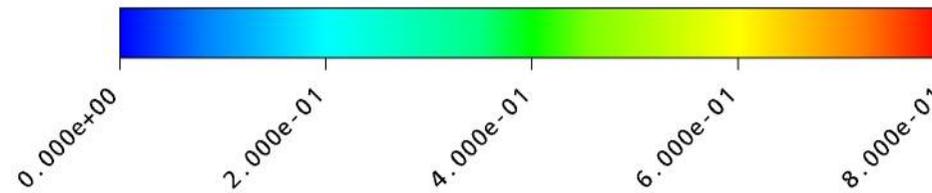
η Gesamtwirkungsgrad des Systems

$$\eta = \eta_V \cdot \eta_M \cdot \eta_A \cdot \eta_R$$

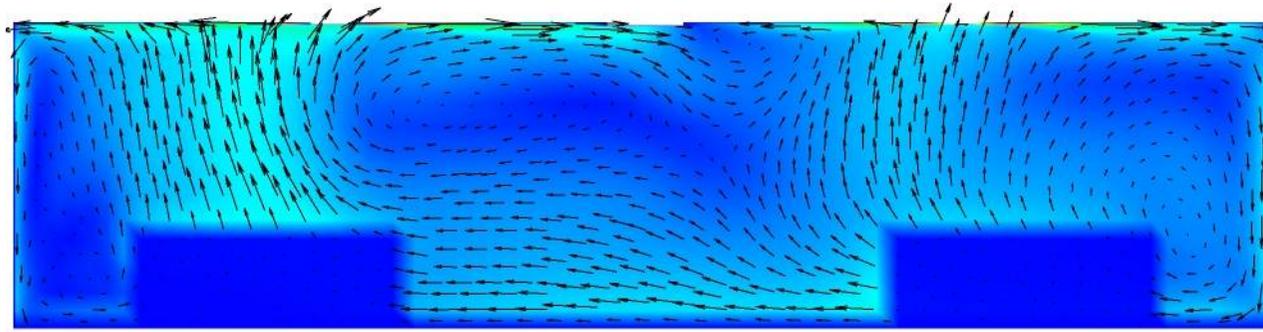
Ventilator • Motor • Antrieb • Regelung



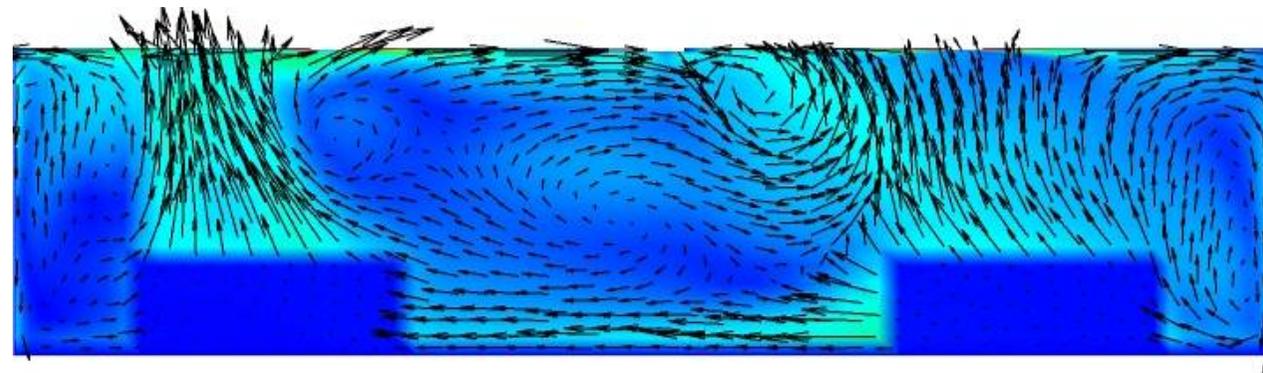
Energieeffizienzpotenzial in der RLT



**Instationärer
Betrieb**

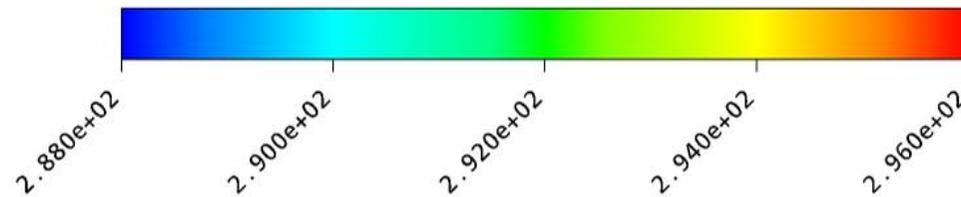


**Stationärer
Betrieb**



Vergleich Strömungsgeschwindigkeiten vertikal LWZ = 1

Energieeffizienzpotenzial in der RLT



**Instationärer
Betrieb**

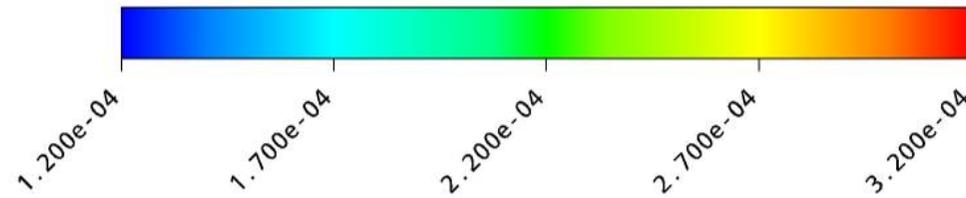


**Stationärer
Betrieb**



Vergleich Temperaturen vertikal LWZ = 1

Energieeffizienzpotenzial in der RLT



**Instationärer
Betrieb**



**Stationärer
Betrieb**

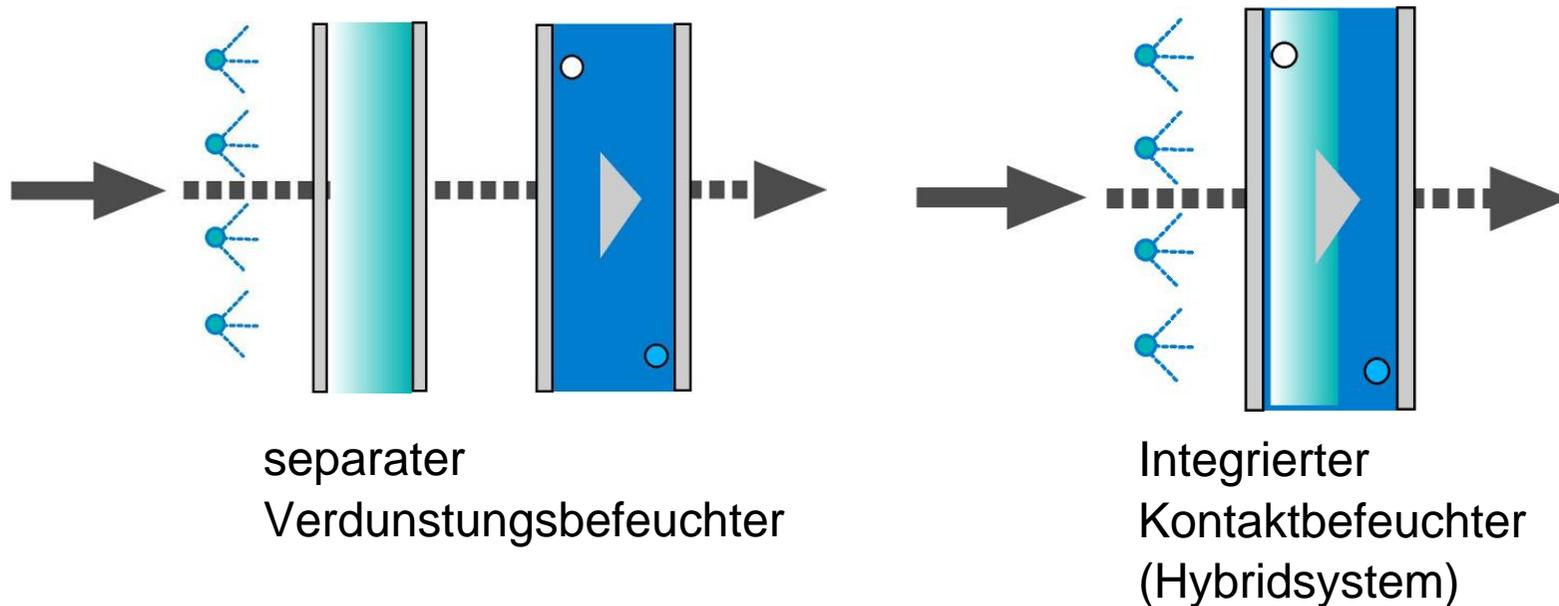


Vergleich Tracer CO₂ vertikal LWZ = 1

Energieeffizienz

Interne Druckverluste

Bauteilwahl (Beispiel hybrider Befeuchter)





European Committee for Standardization
Comité Européen de Normalisation
Europäisches Komitee für Normung

DIN EN 13053 (02/2012)

Lüftung von Gebäuden

Leistungsdaten für zentrale raumluftechnische Geräte und deren Komponenten





European Committee for Standardization
Comité Européen de Normalisation
Europäisches Komitee für Normung

DIN EN 13053 (02/2012)

Wärmerückgewinnung

Temperatur

Übertragungsgrad

$$\eta_t = \frac{t_{ZUL} - t_{AUL}}{t_{ABL} - t_{AUL}} = \frac{\dot{Q}_{WRG}}{\dot{Q}_{Pot.}}$$

Massenstromverhältnis 1:1

$$\Phi = \Phi_{1:1} \cdot (\dot{m}_1 / \dot{m}_2)^{0,4} \quad \text{mit } 0,8 < (\dot{m}_1 / \dot{m}_2) < 1,25$$

„trocken“



European Committee for Standardization
Comité Européen de Normalisation
Europäisches Komitee für Normung

DIN EN 13053 (02/2012)

Wärmerückgewinnung

**Elektrische
Leistungsaufnahme**

$$P_{el} = \dot{q}_V \cdot \Delta p_{WRG} \cdot 1 / \eta_D + P_{el\,zul.}$$

\dot{q}_V	Volumenstrom [m ³ /s] bei $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$
Δp_{WRG}	Differenzdruck der WRG Zu- und Abluft [Pa]
η_D	Gesamtwirkungsgrad des Antriebs
$P_{el\,aux.}$	zus. Hilfsenergien (z. B. Pumpen, etc.) [kW]



European Committee for Standardization
Comité Européen de Normalisation
Europäisches Komitee für Normung

DIN EN 13053 (02/2012)

Wärmerückgewinnung

Leistungsziffer

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_{\text{WRG}}}{P_{\text{el}}}$$

Massenstromverhältnis 1:1

$$\Phi = \Phi_{1:1} \cdot (\dot{m}_1 / \dot{m}_2)^{0,4} \quad \text{mit } (0,8 < (\dot{m}_1 / \dot{m}_2) < 1,25)$$

Außentemperatur 5°C (gem. EN 308)

Fortlufttemperatur 25°C (gem. EN 308)

„trocken“



European Committee for Standardization
Comité Européen de Normalisation
Europäisches Komitee für Normung

DIN EN 13053 (02/2012)

Wärmerückgewinnung

Wirkungsgrad

$$\eta_e = \eta_t \cdot (1 - P_{el} / \dot{Q}_{WRG})$$

$$\eta_e = \eta_t \cdot (1 - 1 / \varepsilon)$$

$$\eta_e = (\dot{Q}_{WRG} - P_{el}) / \dot{Q}_{Pot.}$$





Wärmerückgewinnung

Klassen	$\eta_{e\ 1:1}$ [%]	η_t [%]	ϵ	ΔP [Pa]
H1	≥ 71	(75)	19.5	2 x 280
H2	≥ 64	(67)	21.2	2 x 230
H3	≥ 55	(57)	24.2	2 x 170
H4	≥ 45	(47)	27.3	2 x 125
H5	≥ 36	(37)	26.9	2 x 100
H6	keine Anforderung			

Werte basieren auf EN 308 mit $t_{21} = +5^\circ\text{C}$ und $t_{11} = 25^\circ\text{C}$



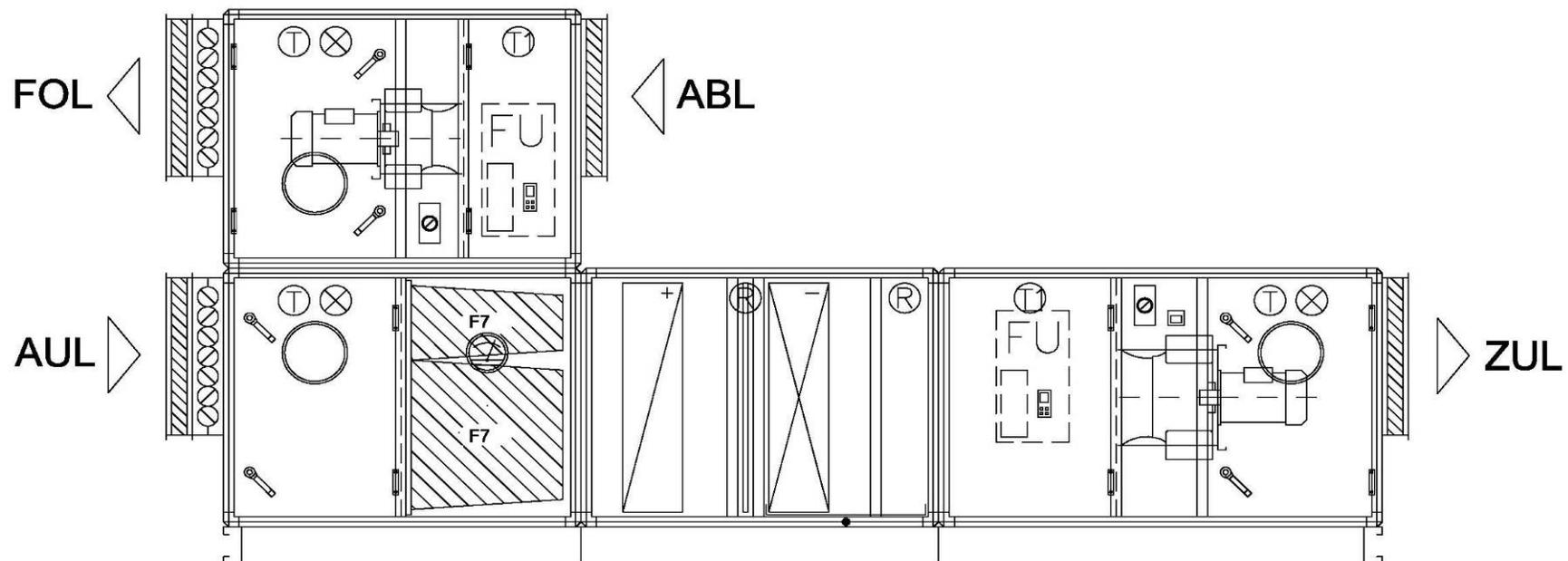
Wärmerückgewinnung

Klassen	$\eta_{e\ 1:1}$ [%]
H1	≥ 71
H2	≥ 64
H3	≥ 55
H4	≥ 45
H5	≥ 36
H6	keine Anforderung

VDI

VDI 3803 Blatt 5 (04/2013)

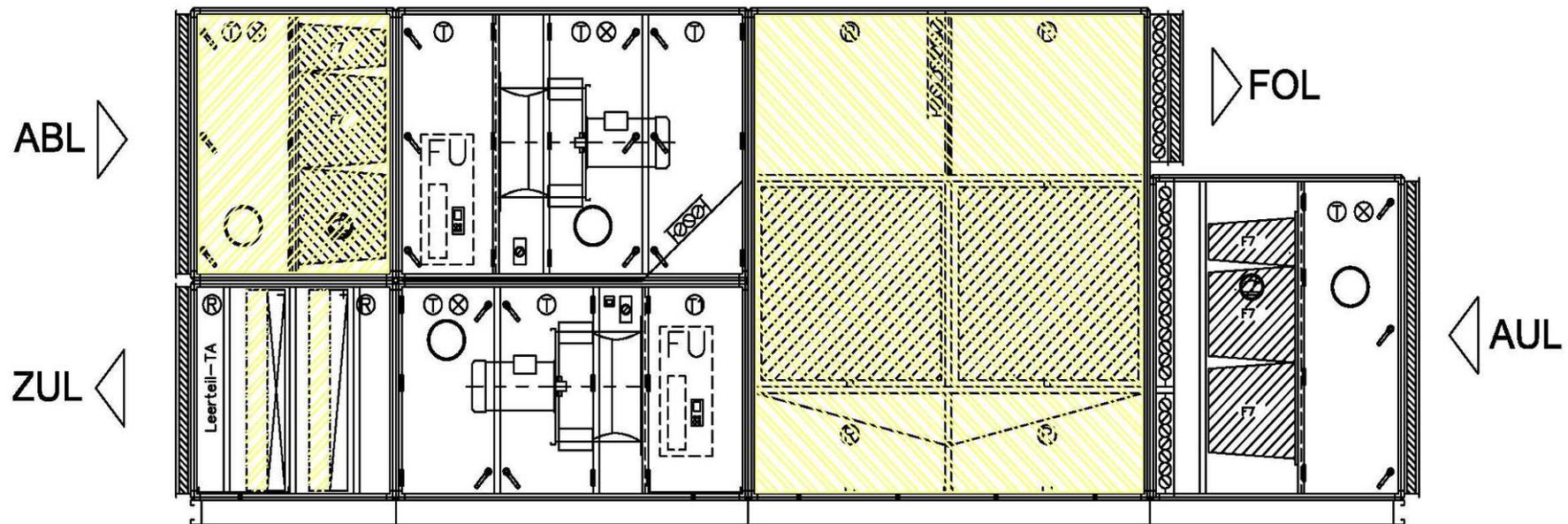
Vereinfachte Bilanzgrenze



VDI

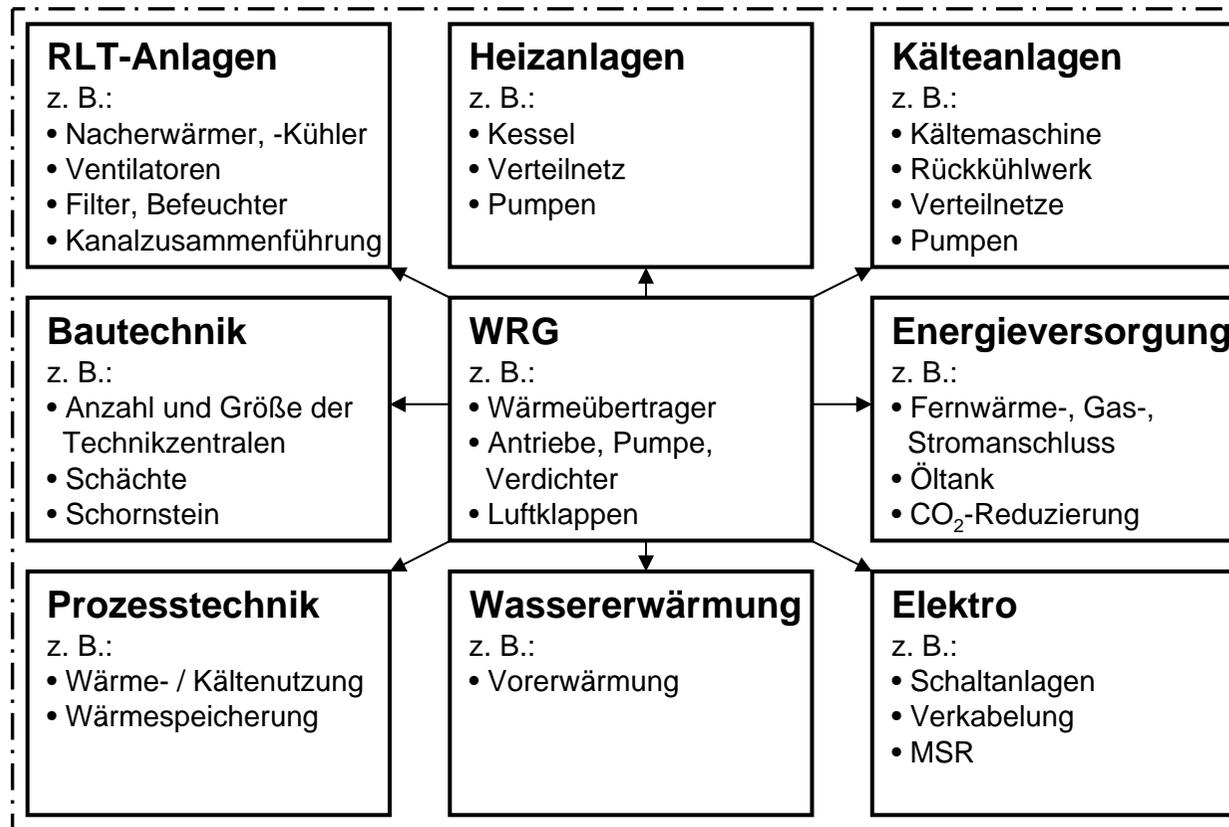
VDI 3803 Blatt 5 (04/2013)

Vereinfachte Bilanzgrenze



VDI 3803 Blatt 5 (04/2013)

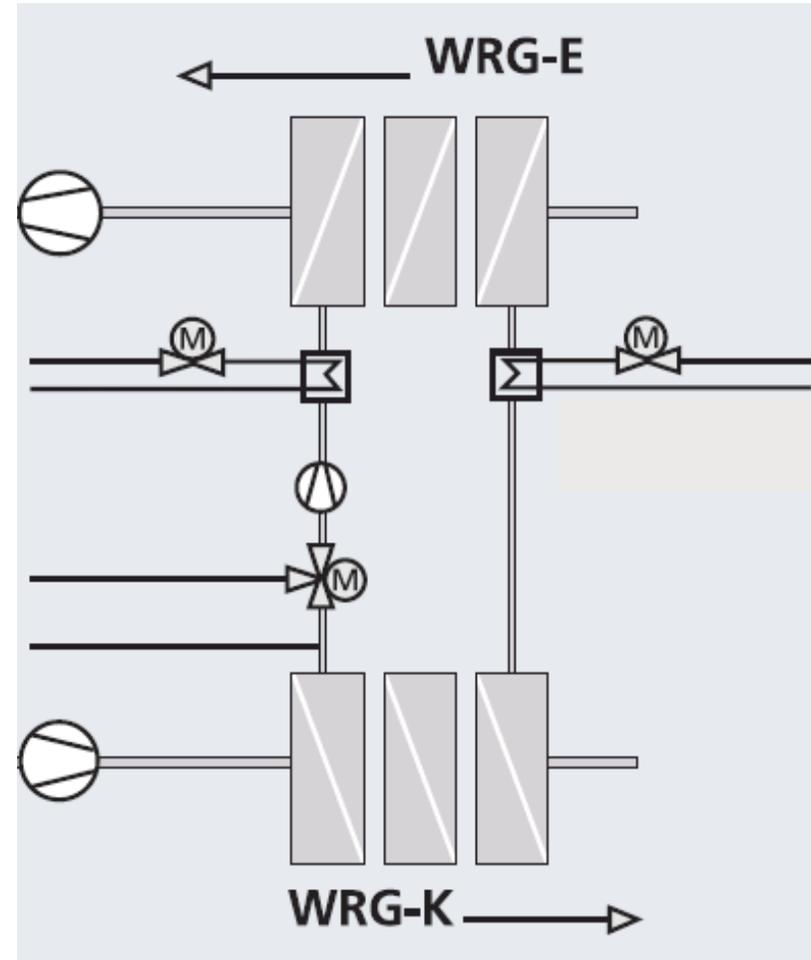
Gesamtbilanzgrenze



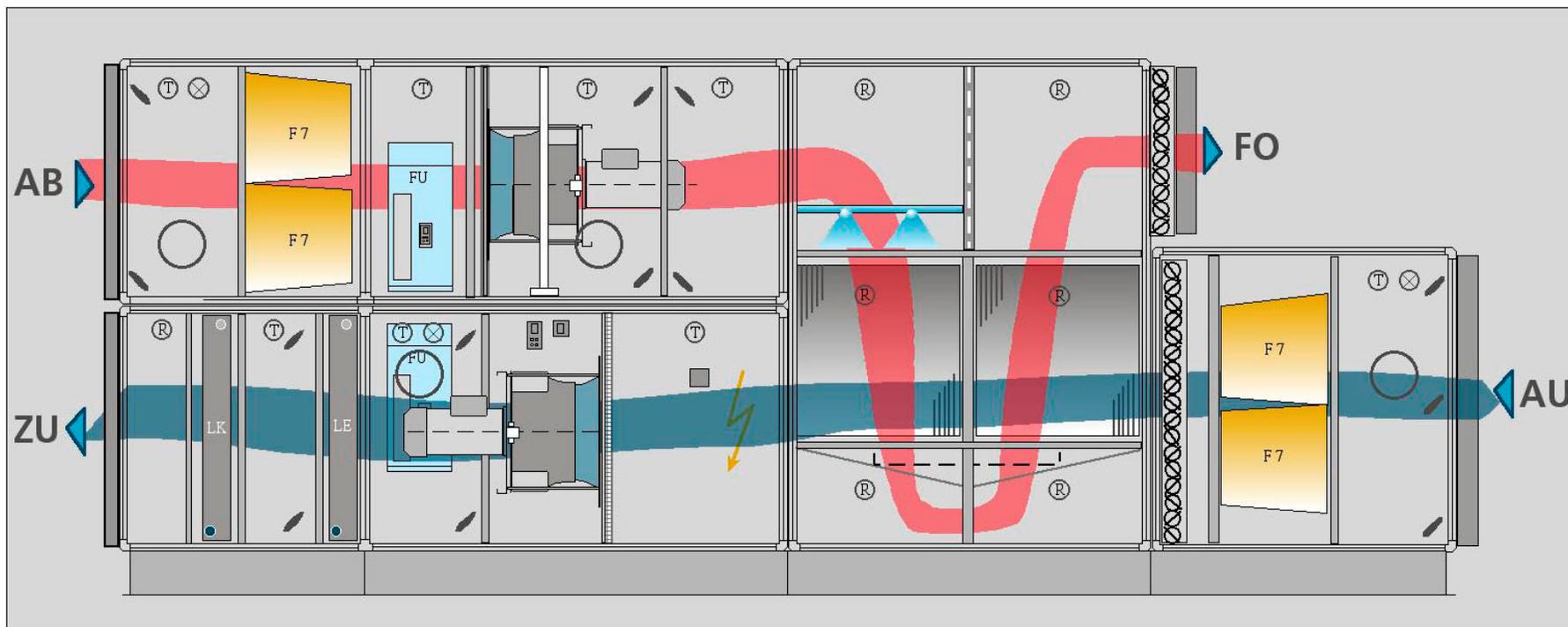
VDI 3803 Blatt 5 (04/2013)

Verdunstungskühlung

Mehrfachfunktionale WRG auf Basis von Kreislaufverbundsystemen durch zusätzliche thermodynamische Funktionen



WRG mit indirekter Verdunstungskühlung



Energieeffizienzpotenzial in der RLT



Wärmerückgewinnung im Jahresverlauf

Leistungen und
Zustände von
-12 °C
bis
32 °C

AL °C	RL °C	ETA %	WRG °C	ZL °C	dT °C	Q WRG kW	Q zus. kW	Q ext. kW	Status
-12,0	20,0	62,5	8,0	8,0	20,0	172,3	0,0	0,0	V
-11,0	20,0	64,5	9,0	9,0	20,0	172,3	0,0	0,0	V
-10,0	20,0	66,7	10,0	10,0	20,0	172,3	0,0	0,0	V
-9,0	20,0	69,0	11,0	11,0	20,0	172,3	0,0	0,0	V
-8,0	20,0	71,4	12,0	12,0	20,0	172,3	0,0	0,0	V
-7,0	20,0	74,1	13,0	13,0	20,0	172,3	0,0	0,0	V
-6,0	20,0	76,9	14,0	14,0	20,0	172,3	0,0	0,0	V
-5,0	20,0	78,9	14,7	14,7	19,7	169,9	0,0	0,0	
-4,0	20,0	78,9	14,9	14,9	18,9	163,1	0,0	0,0	
-3,0	20,0	78,9	15,1	15,1	18,1	156,3	0,0	0,0	
-2,0	20,0	78,9	15,4	15,4	17,4	149,5	0,0	0,0	
-1,0	20,0	78,9	15,6	15,6	16,6	142,7	0,0	0,0	
0,0	20,0	78,9	15,8	15,8	15,8	135,9	0,0	0,0	
1,0	20,0	78,9	16,0	16,0	15,0	129,1	0,0	0,0	
2,0	20,0	78,9	16,2	16,2	14,2	122,3	0,0	0,0	
3,0	20,0	78,9	16,4	16,4	13,4	115,5	0,0	0,0	
4,0	20,0	78,9	16,6	16,6	12,6	108,7	0,0	0,0	
5,0	20,0	78,9	16,8	16,8	11,8	101,9	0,0	0,0	
6,0	20,0	78,9	17,0	17,0	11,0	95,1	0,0	0,0	
7,0	20,0	78,9	17,3	17,3	10,3	88,3	0,0	0,0	
8,0	20,0	78,9	17,5	17,5	9,5	81,5	0,0	0,0	
9,0	20,0	78,9	17,7	17,7	8,7	74,8	0,0	0,0	
10,0	20,0	78,9	17,9	17,9	7,9	68,0	0,0	0,0	
11,0	20,0	78,9	18,1	18,1	7,1	61,2	0,0	0,0	
12,0	20,0	78,9	18,3	18,3	6,3	54,4	0,0	0,0	
13,0	20,0	78,9	18,5	18,5	5,5	47,6	0,0	0,0	
14,0	20,0	78,9	18,7	18,7	4,7	40,8	0,0	0,0	
15,0	20,0	78,9	18,9	18,9	3,9	34,0	0,0	0,0	
16,0	20,0	78,9	19,2	19,2	3,2	27,2	0,0	0,0	
17,0	20,0	78,9	19,4	19,4	2,4	20,4	0,0	0,0	
18,0	20,0	78,9	19,6	19,6	1,6	13,6	0,0	0,0	
19,0	20,0	78,9	19,8	19,8	0,8	6,8	0,0	0,0	
20,0	20,0	78,9	20,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
21,0	18,5	40,0	20,0	20,0	-1,0	-8,6	0,0	0,0	L S 2
22,0	19,0	66,7	20,0	20,0	-2,0	-17,2	0,0	0,0	L S 1
23,0	19,0	75,0	20,0	20,0	-3,0	-25,8	0,0	0,0	L S 1
24,0	18,5	72,7	20,0	20,0	-4,0	-34,5	0,0	0,0	L S 2
25,0	18,5	76,9	20,0	20,0	-5,0	-43,1	0,0	0,0	L S 2
26,0	18,5	78,9	20,1	20,1	-5,9	-51,0	0,0	0,0	S 2
27,0	18,5	78,9	20,3	20,3	-6,7	-57,8	0,0	0,0	S 2
28,0	18,5	78,9	20,5	20,5	-7,5	-64,6	0,0	0,0	S 2
29,0	18,5	78,9	20,7	20,7	-8,3	-71,4	0,0	0,0	S 2
30,0	18,5	78,9	20,9	20,9	-9,1	-78,2	0,0	0,0	S 2
31,0	18,5	78,9	21,1	21,1	-9,9	-84,9	0,0	0,0	S 2
32,0	18,5	78,9	21,3	21,3	-10,7	-91,7	0,0	0,0	S 2

V = Eisschutz / E = Nachheizen / K = Nachkühlen / S = Stufe(n) / F = frei Kälte / B = Brauchwasser
L = Leistungsanpassung / AL = Aussenlufttemp. / RL = Raumlufttemp. (nach Bef.) / ZL = Zulufttemp.
Simulation unter konstanten Bedingungen nur trocken !

Energieeffizienzpotenzial in der RLT



Wärmerückgewinnung im Jahresverlauf

Summenhäufigkeiten
nach **VDI 4710**
multipliziert mit
Leistungen

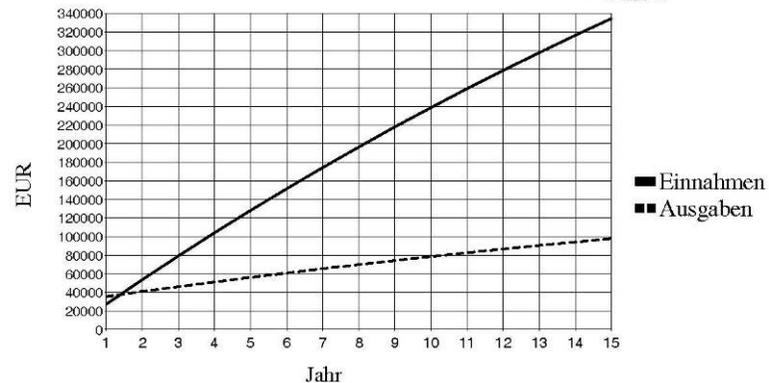
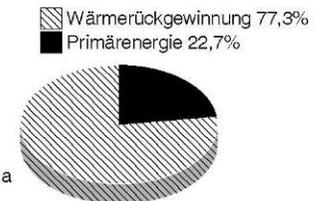
Ergebnis
**Arbeiten für Wärme
und Kälte**

AL	Q WRG	Stunden	Stunden	Wärme	Kälte	Wärme	Kälte	Freie	Brauch-	Wasser
°C	kW	Tag	Nacht	Gesamt	Gesamt	WRG	WRG	Kälte	wasser	m³
		h/°C	h/°C	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	
< -11,0	172,3	2	1	583		359				
-11,0	172,3	3	2	997		633				
-10,0	172,3	5	3	1.480		971				
-9,0	172,3	7	3	1.836		1.245				
-8,0	172,3	9	4	2.225		1.561				
-7,0	172,3	11	5	2.785		2.025				
-6,0	172,3	16	6	3.772		2.848				
-5,0	169,9	21	8	4.598		3.557				
-4,0	163,1	27	11	5.942		4.593				
-3,0	156,3	35	15	7.410		5.722				
-2,0	149,5	49	21	9.848		7.597				
-1,0	142,7	62	27	11.951		9.209				
0,0	135,9	78	33	13.783		10.927				
1,0	129,1	93	40	15.464		12.463				
2,0	122,3	105	45	17.056		13.887				
3,0	115,5	115	48	18.585		15.190				
4,0	108,7	121	49	19.962		16.366				
5,0	101,9	124	48	21.198		17.415				
6,0	95,1	124	45	22.300		18.337				
7,0	88,3	120	40	23.280		19.120				
8,0	81,5	113	33	24.135		19.765				
9,0	74,8	103	24	24.867		20.275				
10,0	68,0	90	17	25.476		20.650				
11,0	61,2	74	11	25.953		20.890				
12,0	54,4	57	7	26.388		21.000				
13,0	47,6	40	5	26.669		21.000				
14,0	40,8	28	3	26.700		20.900				
15,0	34,0	18	2	26.600		20.700				
16,0	27,2	10	1	26.375		20.400				
17,0	20,4	5	0	25.925		19.900				
18,0	13,6	2	0	25.250		19.200				
19,0	6,8	1	0	24.375		18.300				
20,0	0,0	0	0	23.325		17.200				
21,0	-8,6	105	11	22.000	810	15.900	810			25
22,0	-17,2	91	8	20.475	1.396	14.075	1.396			12
23,0	-25,8	76	6	18.725	1.750	12.000	1.750			10
24,0	-34,5	64	3	16.725	1.952	10.000	1.952			15
25,0	-43,1	52	3	14.475	1.979	8.000	1.979			12
26,0	-51,0	39	2	11.925	1.785	6.000	1.761			9
27,0	-57,8	31	1	9.175	1.624	4.000	1.557			7
28,0	-64,6	21	1	6.225	1.282	2.000	1.202			5
29,0	-71,4	17	1	4.175	1.158	1.000	1.067			4
30,0	-78,2	13	0	2.925	959	0	871			3
31,0	-84,9	8	0	1.575	626	0	561			2
> 31,0	-91,7	4	0	825	380	0	337			1
Gesamt	DIN 4710	3.760	1.253	334.708	16.286	251.725	15.757			108
	Jahr									

Wärmerückgewinnung im Jahresverlauf

Ergebnisse
JAZ bezogen auf
Arbeiten **8,8**
im Vergleich
Leistungszahl **16,7**

Energiekosten Wärme	0,10 € / kWh
Energiekosten Kälte	0,15 € / kWh
Energiekosten Elektro	0,15 € / kWh
Wasserkosten (inkl. Abwasser)	6,00 € / m ³
Kalkulationszinsfuß	5,00 %
Preissteigerungsrate	2,00 %
Klimazone	Frankfurt am Main (Stadt)
Nutzungsdauer der Anlage	15 a
Betriebstage pro Woche	6 d / w
Betriebstunden pro Tag	12 h / d
Betriebstunden pro Nacht	4 h / d
Volumenstrom am Tag	100 % / V max
Volumenstrom in der Nacht	50 % / V max
Investitionskosten der WRG	94.977 €
Mehr-/Minderinvestition für die WRG	0 €
Min.investition fuer Wärmeerzeugung	-43.764 € / (254 € / kW)
Min.investition fuer Kälteerzeugung	-21.056 € / (188 € / kW)
Zusatzkosten je Jahr	0 €
Rückgewinn der WRG Wärme	25.464 € / a
Rückgewinn der WRG Kälte	2.443 € / a
Elektroenergiekosten für die WRG	4.639 € / a
Wasserkosten (indirekte Verdunstungskühlung)	484 € / a
Kapitalkosten für die WRG	2.905 € / a
Wartungs- und Unterhaltungskosten	603 € / a
Jährliche Differenzkosten	19.275 € / a
Kapitalwert der Ersparnisse	235.760 €
Amortisation	1,4 a
Jahresnutzungsgrad (bezogen auf Energien)	77,3 %
Jahresarbeitszahl nach EN 13053	8,8
Leistungszahl nach EN 13053	16,7
Effektiver Jahreswirkungsgrad EN 13053	69,9 %
Jährliche CO ₂ Einsparung	84,0 t / a
Jährliche CO ₂ Einsparung (CO ₂ Zertifikate)	2.100,0 € / a



Wärmerückgewinnung im Jahresverlauf

Optimum der WRG

WRG-SYSTEME OPTIMIERUNG

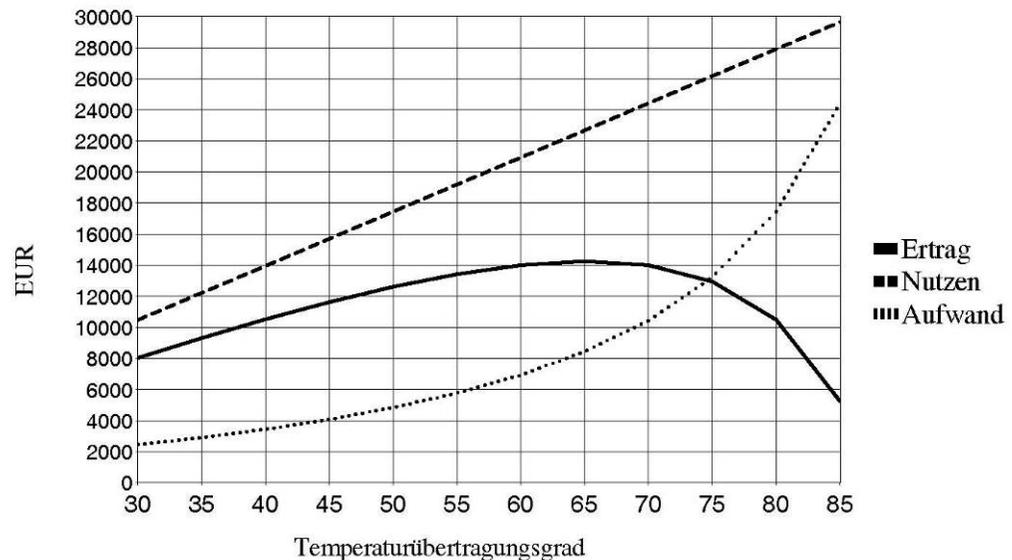
Rückwärmzahl	Nutzen	Aufwand	Ertrag
30,0 %	10470,0 €	2443,2 €	8026,8 €
35,0 %	12215,0 €	2904,3 €	9310,7 €
40,0 %	13960,0 €	3442,2 €	10517,8 €
45,0 %	15705,0 €	4077,9 €	11627,1 €
50,0 %	17450,0 €	4840,7 €	12609,2 €
55,0 %	19195,0 €	5773,1 €	13421,9 €
60,0 %	20940,0 €	6938,6 €	14001,4 €
65,0 %	22685,0 €	8437,0 €	14247,9 €
70,0 %	24430,0 €	10435,0 €	13995,0 €
75,0 %	26175,0 €	13232,1 €	12942,8 €
80,0 %	27919,9 €	17427,8 €	10492,1 €
85,0 %	29664,9 €	24420,6 €	5244,3 €

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

Optimale Rückwärmzahl der WRG

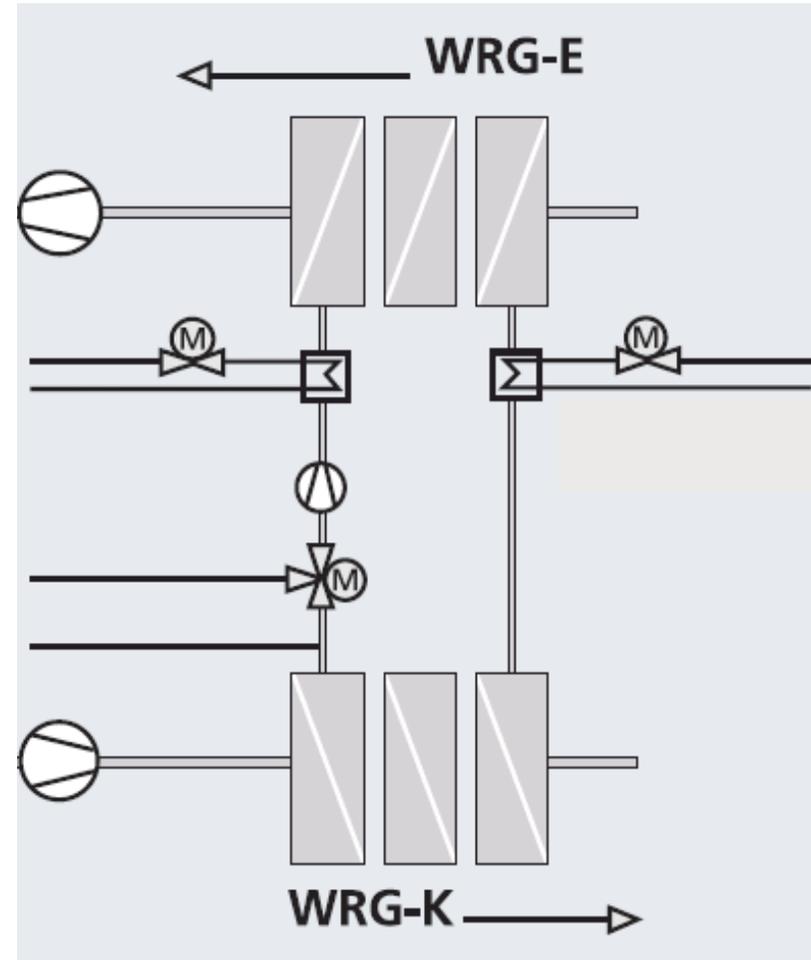
65 % (62 - 68 %)

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

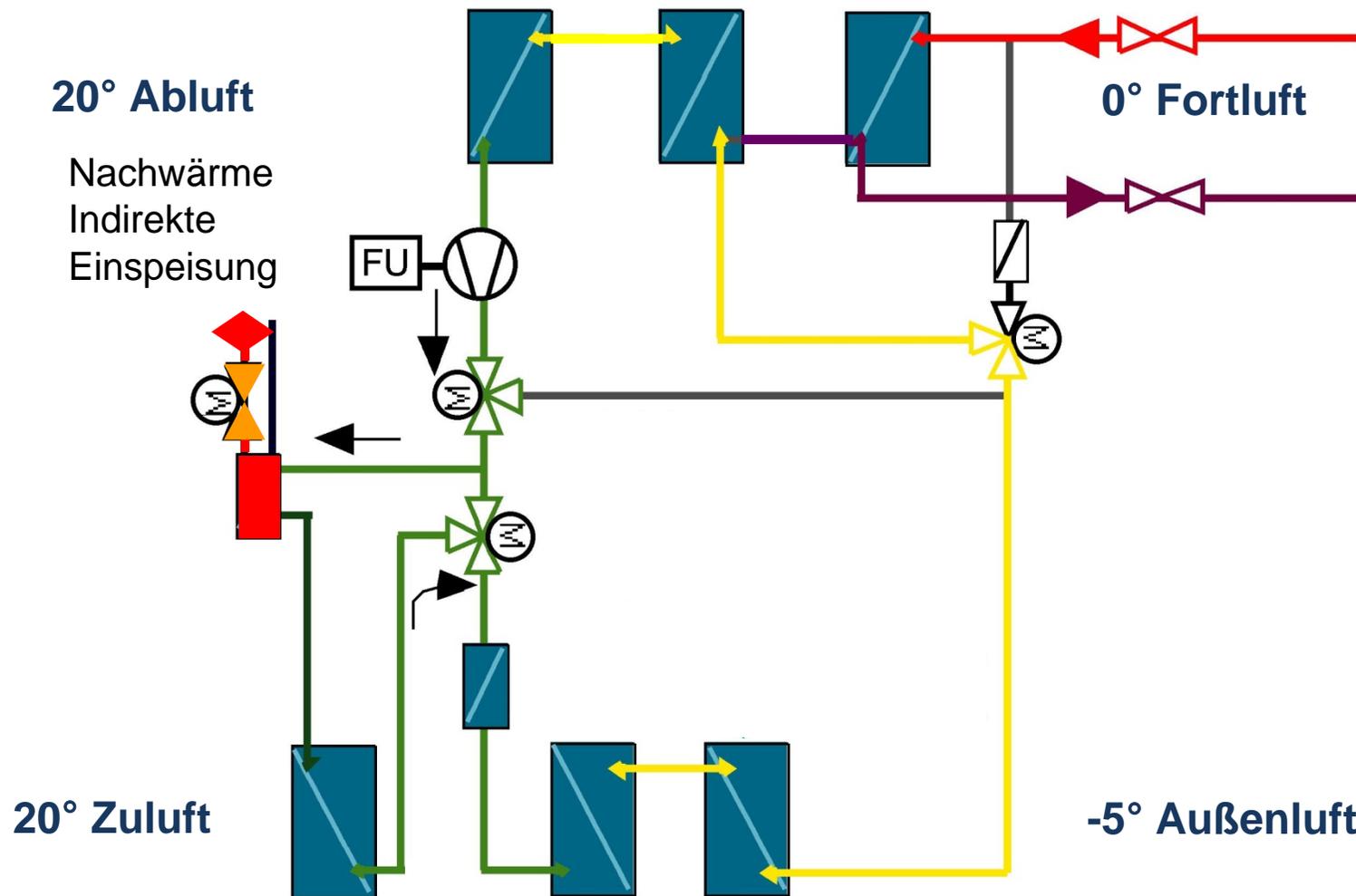


VDI 3803 Blatt 5 (04/2013)

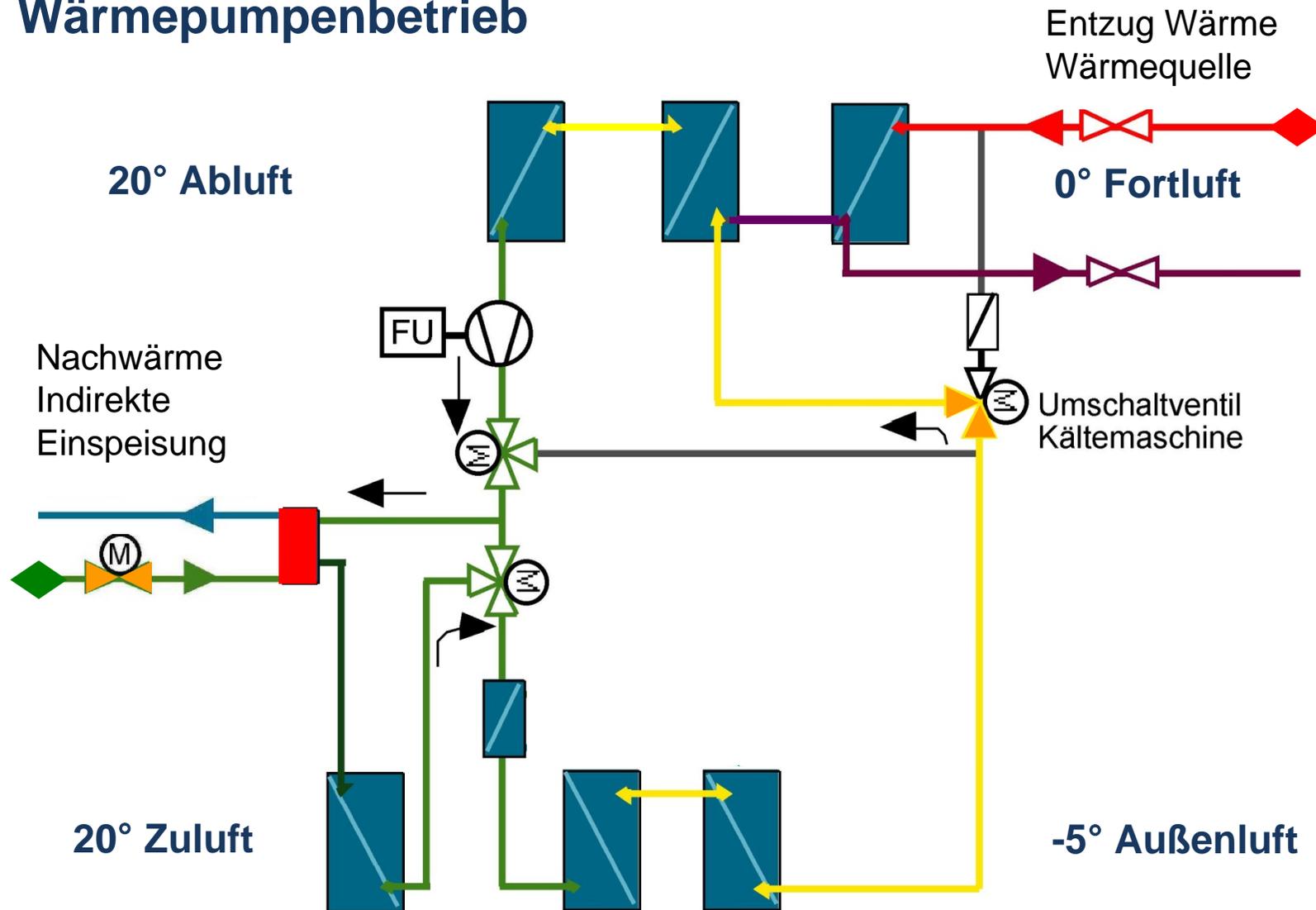
**Mehrfachfunktionale
WRG** auf Basis von
Kreislaufverbund-
systemen durch
zusätzliche thermo-
dynamische Funktionen



Winterbetrieb mit Nacherwärmung

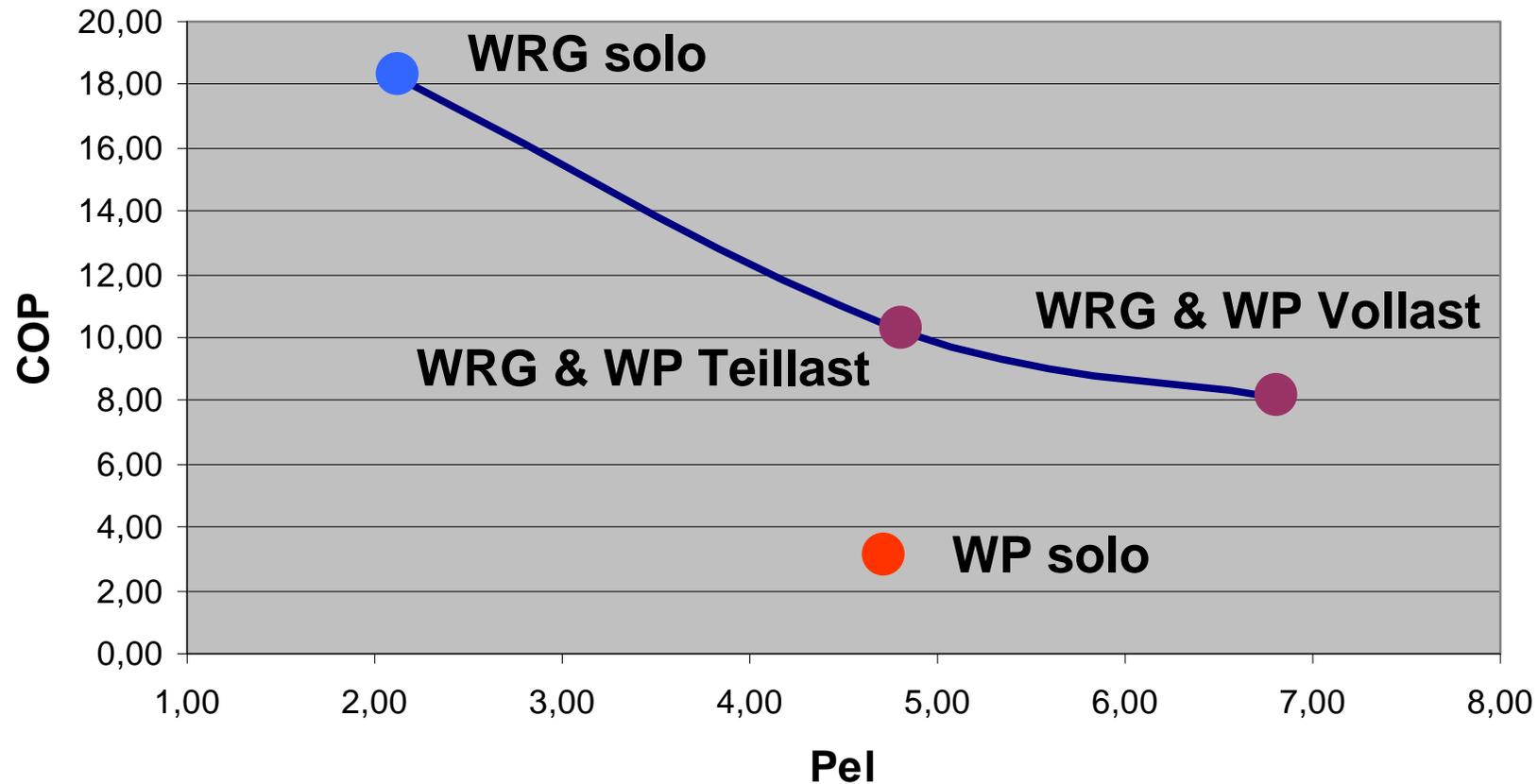


Wärmepumpenbetrieb

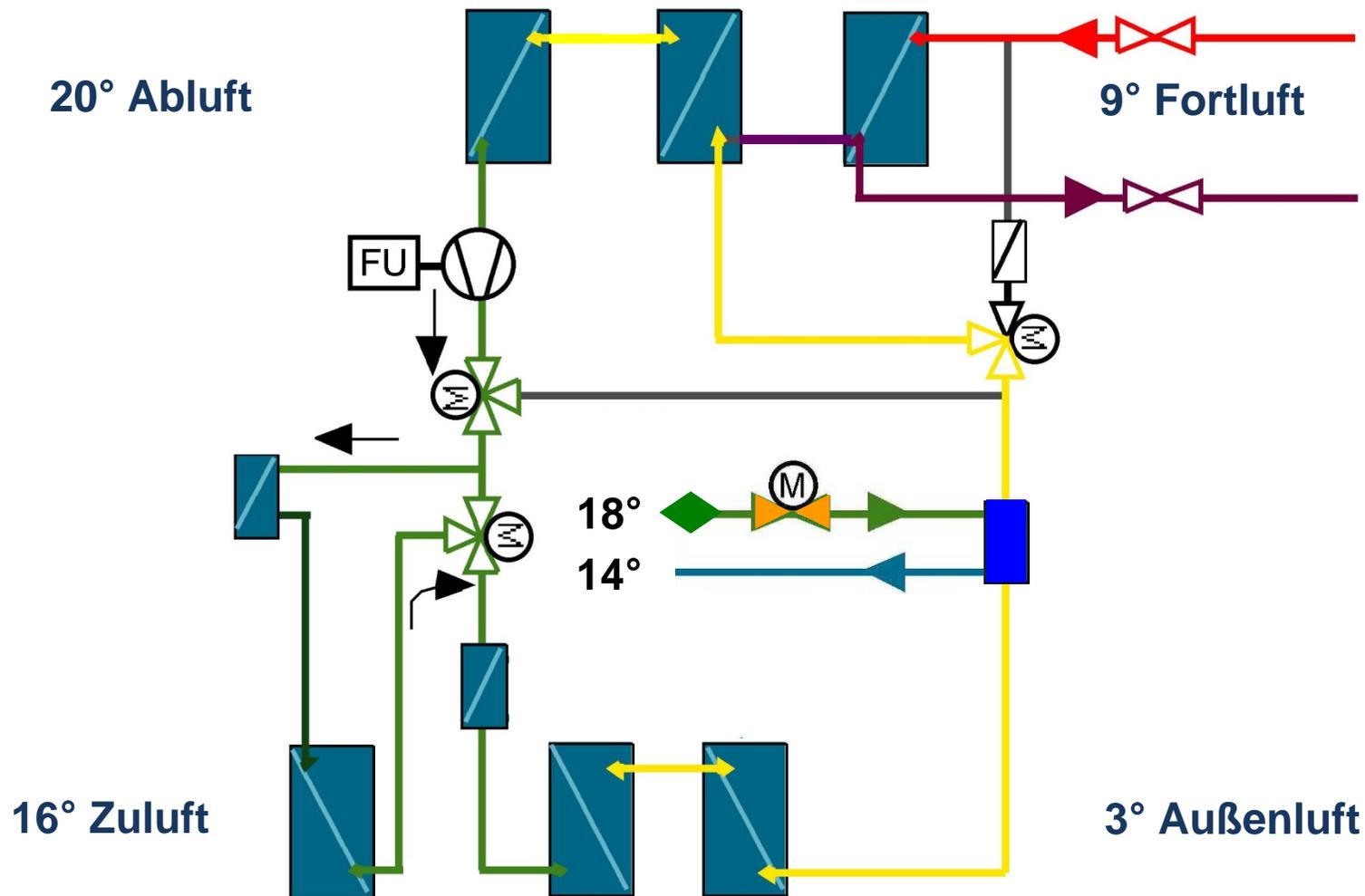


Wärmepumpenbetrieb

$$\text{COP} = f(\text{Pel})$$



Freie Kälte



Energieeffizienzpotenzial in der RLT



**Wärmerückgewinnung
im Jahresverlauf**

**Leistungen und
Zustände von
-12 °C bis 32 °C**

**mit Auskopplung
Q Freie Kälte**

**mit Einspeisung
Q Nacherwärmung
Q Nachkühlung**

AL °C	RL °C	ETA %	WRG °C	ZL °C	dT °C	Q WRG kW	Q zus. kW	Q ext. kW	Status
-12,0	20,0	82,3	14,3	14,3	26,3	226,8	0,0	-90,0	F
-11,0	20,0	82,4	14,5	14,5	25,5	220,0	0,0	-90,0	F
-10,0	20,0	82,5	14,8	14,8	24,8	213,2	0,0	-90,0	F
-9,0	20,0	82,6	15,0	15,0	24,0	206,4	0,0	-90,0	F
-8,0	20,0	82,8	15,2	15,2	23,2	199,6	0,0	-90,0	F
-7,0	20,0	82,9	15,4	15,4	22,4	192,8	0,0	-90,0	F
-6,0	20,0	83,1	15,6	15,6	21,6	186,0	0,0	-90,0	F
-5,0	20,0	83,2	15,8	15,8	20,8	179,2	0,0	-90,0	F
-4,0	20,0	83,4	16,0	16,0	20,0	172,4	0,0	-90,0	F
-3,0	20,0	83,6	16,2	16,2	19,2	165,7	0,0	-90,0	F
-2,0	20,0	83,8	16,4	16,4	18,4	158,9	0,0	-90,0	F
-1,0	20,0	84,1	16,7	16,7	17,7	152,1	0,0	-90,0	F
0,0	20,0	83,9	16,8	16,8	16,8	144,6	0,0	-83,6	F
1,0	20,0	83,8	16,9	16,9	15,9	137,1	0,0	-76,7	F
2,0	20,0	83,6	17,0	17,0	15,0	129,6	0,0	-69,9	F
3,0	20,0	83,4	17,2	17,2	14,2	122,1	0,0	-63,0	F
4,0	20,0	83,1	17,3	17,3	13,3	114,6	0,0	-56,1	F
5,0	20,0	82,9	17,4	17,4	12,4	107,1	0,0	-49,3	F
6,0	20,0	82,6	17,6	17,6	11,6	99,5	0,0	-42,4	F
7,0	20,0	82,2	17,7	17,7	10,7	92,0	0,0	-35,5	F
8,0	20,0	81,8	17,8	17,8	9,8	84,5	0,0	-28,7	F
9,0	20,0	81,3	17,9	17,9	8,9	77,0	0,0	-21,8	F
10,0	20,0	80,7	18,1	18,1	8,1	69,5	0,0	-14,9	F
11,0	20,0	80,0	18,2	18,2	7,2	62,0	0,0	-8,1	F
12,0	20,0	79,1	18,3	18,3	6,3	54,5	0,0	-1,2	F
13,0	20,0	78,9	18,5	18,5	5,5	47,6	0,0	0,0	
14,0	20,0	78,9	18,7	18,7	4,7	40,8	0,0	0,0	
15,0	20,0	78,9	18,9	18,9	3,9	34,0	0,0	0,0	
16,0	20,0	78,9	19,2	19,2	3,2	27,2	0,0	0,0	
17,0	20,0	78,9	19,4	19,4	2,4	20,4	0,0	0,0	
18,0	20,0	78,9	19,6	19,6	1,6	13,6	0,0	0,0	
19,0	20,0	78,9	19,8	19,8	0,8	6,8	0,0	0,0	
20,0	20,0	78,9	20,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
21,0	18,5	40,0	20,0	20,0	-1,0	-8,6	0,0	0,0	L S 2
22,0	19,0	66,7	20,0	20,0	-2,0	-17,2	0,0	0,0	L S 1
23,0	19,0	75,0	20,0	20,0	-3,0	-25,8	0,0	0,0	L S 1
24,0	18,5	72,7	20,0	20,0	-4,0	-34,5	0,0	0,0	L S 2
25,0	18,5	76,9	20,0	20,0	-5,0	-43,1	0,0	0,0	L S 2
26,0	18,5	78,9	20,1	20,1	-5,9	-51,0	0,0	0,0	S 2
27,0	18,5	78,9	20,3	20,3	-6,7	-57,8	0,0	0,0	S 2
28,0	18,5	78,9	20,5	20,5	-7,5	-64,6	0,0	0,0	S 2
29,0	18,5	78,9	20,7	20,7	-8,3	-71,4	0,0	0,0	S 2
30,0	18,5	78,9	20,9	20,9	-9,1	-78,2	0,0	0,0	S 2
31,0	18,5	78,9	21,1	21,1	-9,9	-84,9	0,0	0,0	S 2
32,0	18,5	78,9	21,3	21,3	-10,7	-91,7	0,0	0,0	S 2

V = Eisschutz / E = Nachheizen / K = Nachkühlen / S = Stufe(n) / F = frei Kälte / B = Brauchwasser
 L = Leistungsanpassung / AL = Aussenlufttemp. / RL = Raumlufttemp. (nach Bef.) / ZL = Zulufttemp.
 Simulation unter konstanten Bedingungen nur trocken !

Energieeffizienzpotenzial in der RLT



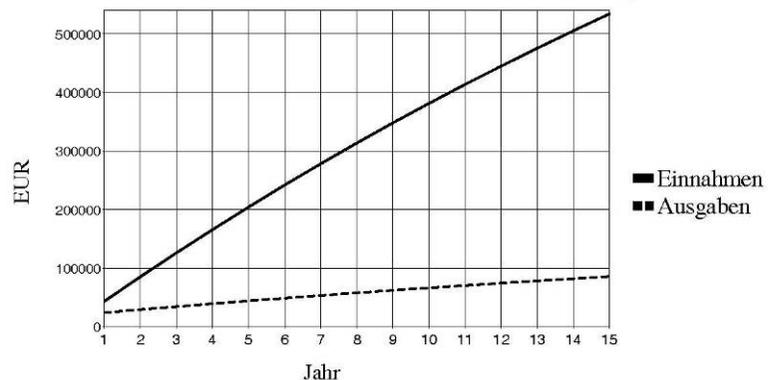
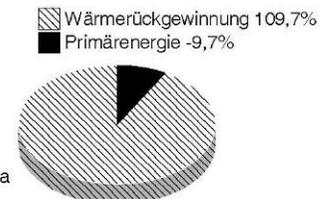
Wärmerückgewinnung im Jahresverlauf

Summenhäufigkeiten
nach **VDI 4710**
multipliziert mit
Leistungen

AL °C	Q WRG kW	Stunden Tag h/°C	Stunden Nacht h/°C	Wärme Gesamt kWh	Kälte Gesamt kWh	Wärme WRG kWh	Kälte WRG kWh	Freie Kälte kWh	Brauch- wasser kWh	Wasser m³
< -11,0	226,8	2	1	583		472		187		
-11,0	220,0	3	2	997		808		331		
-10,0	213,2	5	3	1.480		1.201		507		
-9,0	206,4	7	3	1.836		1.491		650		
-8,0	199,6	9	4	2.225		1.809		816		
-7,0	192,8	11	5	2.785		2.266		1.058		
-6,0	186,0	16	6	3.772		3.075		1.488		
-5,0	179,2	21	8	4.598		3.752		1.884		
-4,0	172,4	27	11	5.942		4.855		2.535		
-3,0	165,7	35	15	7.410		6.067		3.295		
-2,0	158,9	49	21	9.848		8.075		4.573		
-1,0	152,1	62	27	11.951		9.815		5.808		
0,0	144,6	178	77	32.783		26.842		15.519		
1,0	137,1	130	51	22.464		18.332		10.256		
2,0	129,6	135	57	22.256		18.107		9.766		
3,0	122,1	141	54	21.645		17.538		9.049		
4,0	114,6	141	56	20.636		16.643		8.147		
5,0	107,1	144	56	19.698		15.803		7.274		
6,0	99,5	142	55	18.200		14.499		6.178		
7,0	92,0	141	58	16.989		13.440		5.186		
8,0	84,5	146	59	16.155		12.675		4.305		
9,0	77,0	135	56	13.809		10.730		3.038		
10,0	69,5	129	61	12.376		9.514		2.040		
11,0	62,0	131	61	11.328		8.586		1.122		
12,0	54,5	134	64	10.388		7.735		170		
13,0	47,6	143	64	9.690		7.140				
14,0	40,8	148	64	8.654		6.305				
15,0	34,0	160	55	7.638		5.479				
16,0	27,2	153	51	5.953		4.173				
17,0	20,4	151	41	4.415		2.993				
18,0	13,6	148	33	3.038		1.922				
19,0	6,8	132	22	1.583		834				
20,0	0,0	118	15	464						
21,0	-8,6	105	11		810		810			25
22,0	-17,2	91	8		1.396		1.396			12
23,0	-25,8	76	6		1.750		1.750			10
24,0	-34,5	64	3		1.952		1.952			15
25,0	-43,1	52	3		1.979		1.979			12
26,0	-51,0	39	2		1.785		1.761			9
27,0	-57,8	31	1		1.624		1.557			7
28,0	-64,6	21	1		1.282		1.202			5
29,0	-71,4	17	1		1.158		1.067			4
30,0	-78,2	13			959		871			3
31,0	-84,9	8			626		561			2
> 31,0	-91,7	4			380		337			1
Gesamt DIN 4710 Jahr		3.760	1.253	334.708	16.286	263.874	15.757	105.520		108

Wärmerückgewinnung im Jahresverlauf

Energiekosten Wärme	0,10 € / kWh
Energiekosten Kälte	0,15 € / kWh
Energiekosten Elektro	0,15 € / kWh
Wasserkosten (inkl. Abwasser)	6,00 € / m³
Kalkulationszinsfuß	5,00 %
Preissteigerungsrate	2,00 %
Klimazone	Frankfurt am Main (Stadt)
Nutzungsdauer der Anlage	15 a
Betriebstage pro Woche	6 d / w
Betriebstunden pro Tag	12 h / d
Betriebstunden pro Nacht	4 h / d
Volumenstrom am Tag	100 % / V max
Volumenstrom in der Nacht	50 % / V max
Investitionskosten der WRG	94.977 €
Mehr-/Minderinvestition für die WRG	0 €
Min. investition fuer Wärmezeugung	-56.765 € / (243 € / kW)
Min. investition fuer Kälteerzeugung	-19.503 € / (198 € / kW)
Zusatzkosten je Jahr	0 €
Rückgewinn der WRG Wärme	26.387 € / a
Rückgewinn der WRG Kälte	18.192 € / a
Elektroenergiekosten für die WRG	4.639 € / a
Wasserkosten (indirekte Verdunstungskühlung)	645 € / a
Kapitalkosten für die WRG	1.803 € / a
Wartungs- und Unterhaltungskosten	374 € / a
Jährliche Differenzkosten	37.118 € / a
Kapitalwert der Ersparnisse	447.903 €
Amortisation	< 1.0 a
Jahresnutzungsgrad (bezogen auf Energien)	109,7 %
Jahresarbeitszahl nach EN 13053	12,5
Leistungszahl nach EN 13053	16,7
Effektiver Jahreswirkungsgrad EN 13053	72,6 %
Jährliche CO2 Einsparung	87,0 t / a
Jährliche CO2 Einsparung (CO2 Zertifikate)	2.175,0 € / a



Wärmerückgewinnung im Jahresverlauf

Optimum der WRG

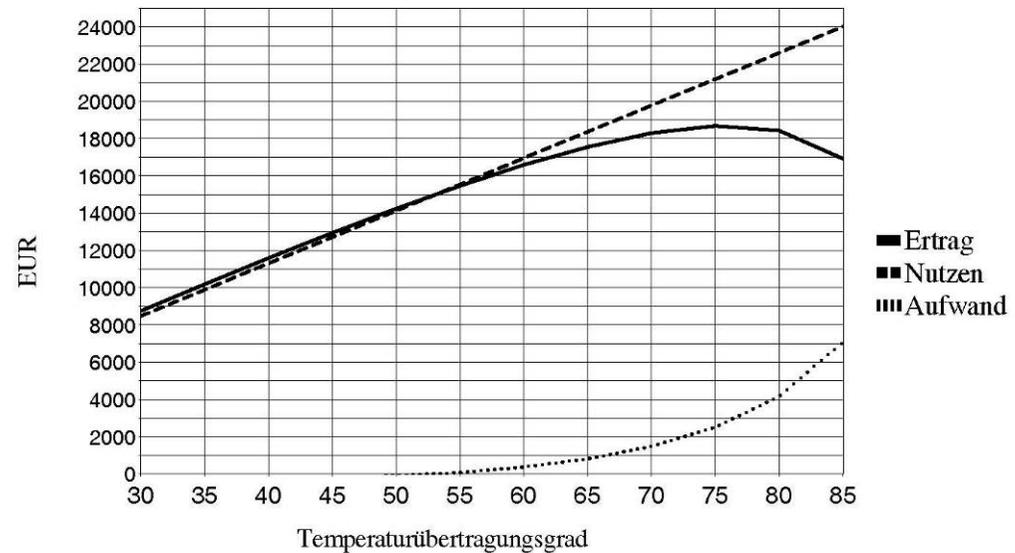
WRG-SYSTEME OPTIMIERUNG

Rückwärmzahl	Nutzen	Aufwand	Ertrag
30,0 %	16950,2 €	-525,4 €	17475,6 €
35,0 %	19775,2 €	-574,8 €	20350,0 €
40,0 %	22600,2 €	-554,9 €	23155,1 €
45,0 %	25425,3 €	-446,6 €	25871,9 €
50,0 %	28250,3 €	-223,6 €	28473,8 €
55,0 %	31075,3 €	152,5 €	30922,8 €
60,0 %	33900,3 €	739,1 €	33161,3 €
65,0 %	36725,4 €	1626,2 €	35099,2 €
70,0 %	39550,4 €	2964,3 €	36586,1 €
75,0 %	42375,4 €	5023,8 €	37351,6 €
76,0 %	42940,4 €	5562,0 €	37378,4 €
80,0 %	45200,5 €	8346,0 €	36854,5 €
85,0 %	48025,5 €	14193,3 €	33832,2 €

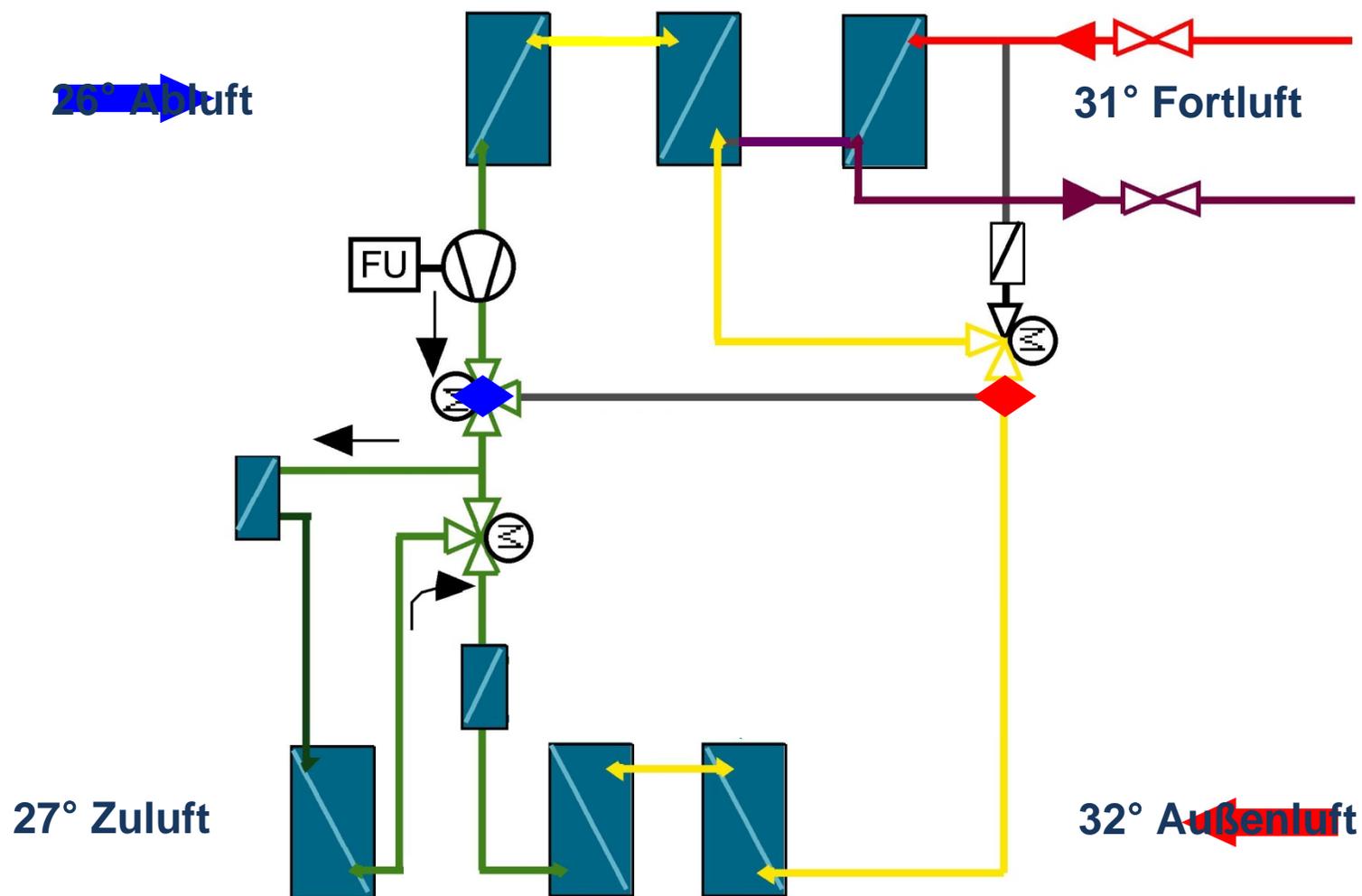
Kosten (Nutzen, Aufwand und Ertrag der WRG) pro Jahr

Optimale Rückwärmzahl der WRG **76 % (73 - 79 %)**

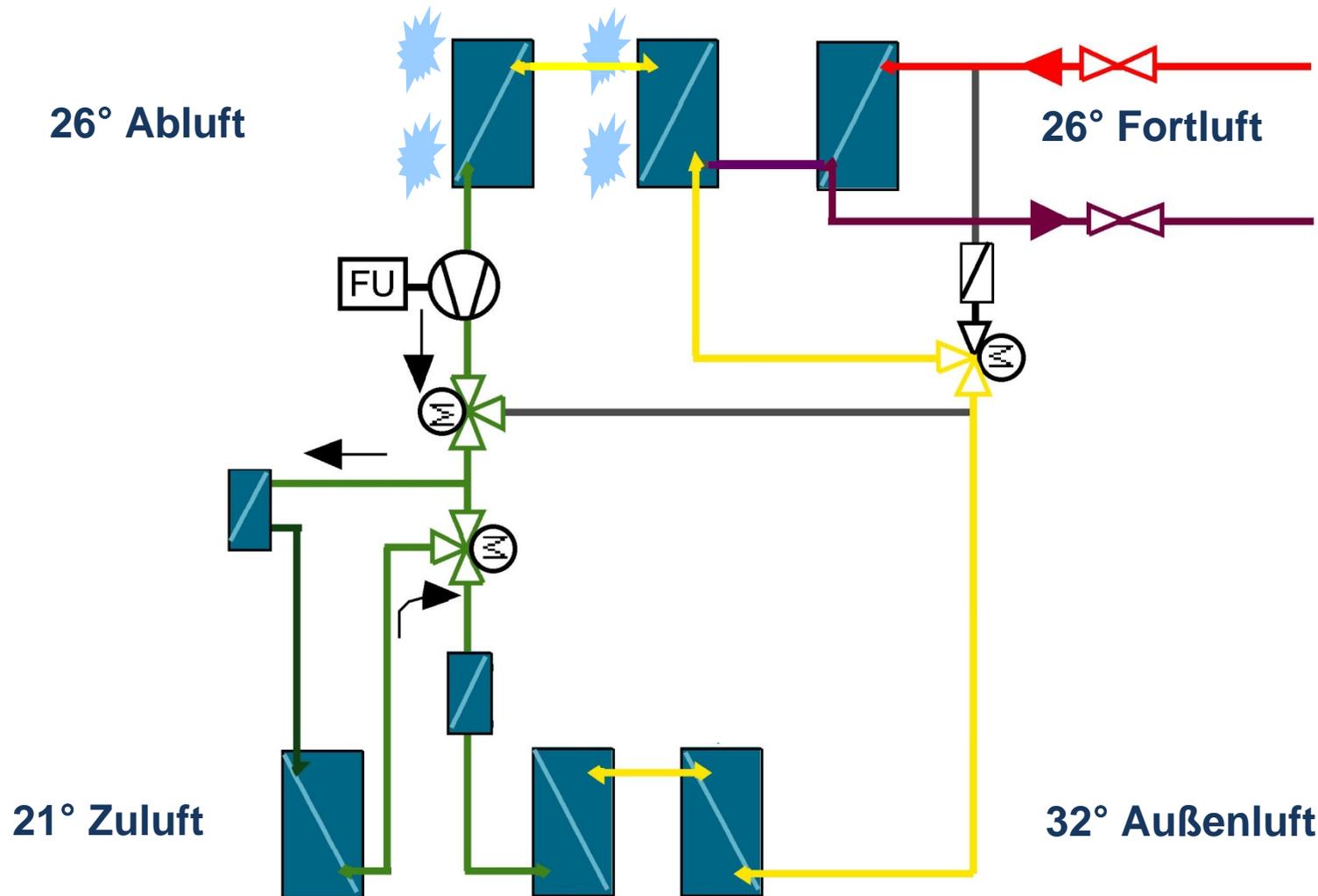
Berechnung auf Basis der Wirtschaftlichkeitsberechnung und deren Rahmenbedingungen (Toleranzband $\pm 1\%$ der Kosten)



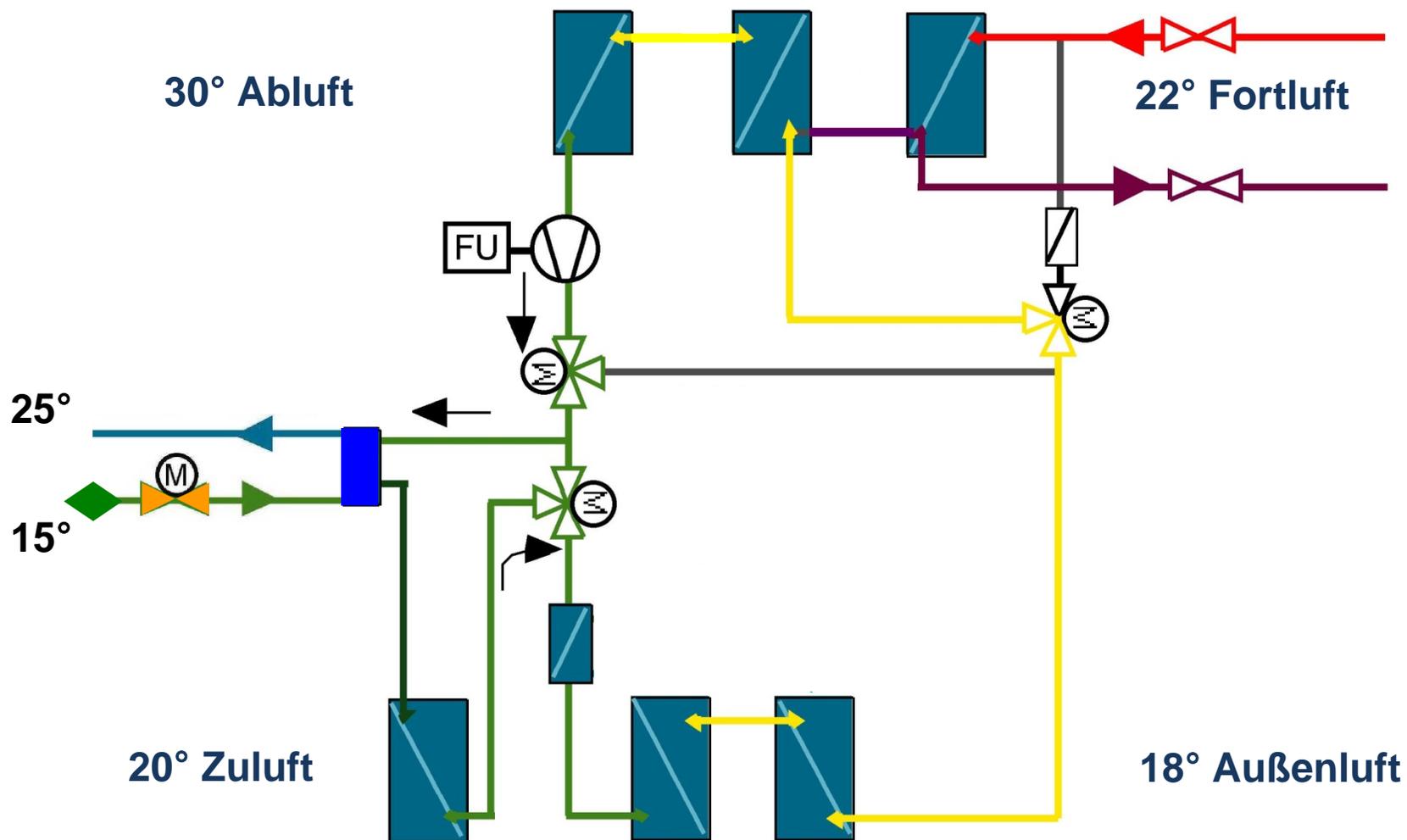
Sommerbetrieb



Indirekte Verdunstungskühlung mit 2 Befeuchtungstufen



Brauchwasservorwärmung



Energieeffizienzpotenzial in der RLT



Wärmerückgewinnung im Jahresverlauf

Leistungen und Zustände von -12 °C bis 32 °C

mit Auskopplung Q Brauchwasser

mit Einspeisung Q Nacherwärmung Q Nachkühlung

AL °C	RL °C	ETA %	WRG °C	ZL °C	dT °C	Q WRG kW	Q zus. kW	Q ext. kW	Status
-12,0	20,0	62,5	8,0	8,0	20,0	172,3	0,0	0,0	V
-11,0	20,0	64,5	9,0	9,0	20,0	172,3	0,0	0,0	V
-10,0	20,0	66,7	10,0	10,0	20,0	172,3	0,0	0,0	V
-9,0	20,0	69,0	11,0	11,0	20,0	172,3	0,0	0,0	V
-8,0	20,0	71,4	12,0	12,0	20,0	172,3	0,0	0,0	V
-7,0	20,0	74,1	13,0	13,0	20,0	172,3	0,0	0,0	V
-6,0	20,0	76,9	14,0	14,0	20,0	172,3	0,0	0,0	V
-5,0	20,0	78,9	14,7	14,7	19,7	169,9	0,0	0,0	
-4,0	20,0	78,9	14,9	14,9	18,9	163,1	0,0	0,0	
-3,0	20,0	78,9	15,1	15,1	18,1	156,3	0,0	0,0	
-2,0	20,0	78,9	15,4	15,4	17,4	149,5	0,0	0,0	
-1,0	20,0	78,9	15,6	15,6	16,6	142,7	0,0	0,0	
0,0	20,0	78,9	15,8	15,8	15,8	135,9	0,0	0,0	
1,0	20,0	78,9	16,0	16,0	15,0	129,1	0,0	0,0	
2,0	20,0	78,9	16,2	16,2	14,2	122,3	0,0	0,0	
3,0	20,0	78,9	16,4	16,4	13,4	115,5	0,0	0,0	
4,0	20,0	78,9	16,6	16,6	12,6	108,7	0,0	0,0	
5,0	20,0	78,9	16,8	16,8	11,8	101,9	0,0	0,0	
6,0	20,0	78,9	17,0	17,0	11,0	95,1	0,0	0,0	
7,0	20,0	78,9	17,3	17,3	10,3	88,3	0,0	0,0	
8,0	20,0	78,9	17,5	17,5	9,5	81,5	0,0	0,0	
9,0	20,0	78,9	17,7	17,7	8,7	74,8	0,0	0,0	
10,0	20,0	78,9	17,9	17,9	7,9	68,0	0,0	0,0	
11,0	20,0	78,5	18,1	18,1	7,1	60,9	0,0	0,4	B
12,0	20,0	77,5	18,2	18,2	6,2	53,4	0,0	1,2	B
13,0	20,0	76,3	18,3	18,3	5,3	46,0	0,0	2,0	B
14,0	20,0	74,7	18,5	18,5	4,5	38,6	0,0	2,8	B
15,0	20,0	72,3	18,6	18,6	3,6	31,2	0,0	3,6	B
16,0	20,0	68,9	18,8	18,8	2,8	23,7	0,0	4,4	B
17,0	20,0	63,1	18,9	18,9	1,9	16,3	0,0	5,2	B
18,0	20,0	51,5	19,0	19,0	1,0	8,9	0,0	6,1	B
19,0	20,0	16,9	19,2	19,2	0,2	1,5	0,0	6,9	B
20,0	20,0	0,0	20,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0	AUS
21,0	19,0	50,0	20,0	20,0	-1,0	-8,6	0,0	1,6	LS 1 B
22,0	19,0	66,7	20,0	20,0	-2,0	-17,2	0,0	2,4	LS 1 B
23,0	19,0	75,0	20,0	20,0	-3,0	-25,8	0,0	3,2	LS 1 B
24,0	19,0	80,0	20,0	20,0	-4,0	-34,5	0,0	4,0	LS 1 B
25,0	19,0	83,3	20,0	20,0	-5,0	-43,1	0,0	4,9	LS 1 B
26,0	19,0	85,7	20,0	20,0	-6,0	-51,7	0,0	5,7	LS 1 B
27,0	18,5	82,4	20,0	20,0	-7,0	-60,3	0,0	6,5	LS 2 B
28,0	18,5	84,2	20,0	20,0	-8,0	-68,9	0,0	7,3	LS 2 B
29,0	18,5	85,7	20,0	20,0	-9,0	-77,5	0,0	8,1	LS 2 B
30,0	18,5	87,0	20,0	20,0	-10,0	-86,1	0,0	8,9	LS 2 B
31,0	18,5	88,0	20,0	20,0	-11,0	-94,7	0,0	9,7	LS 2 B
32,0	18,5	88,9	20,0	20,0	-12,0	-103,4	0,0	10,5	LS 2 B

V = Eisschutz / E = Nachheizen / K = Nachkühlen / S = Stufe(n) / F = frei Kälte / B = Brauchwasser
 L = Leistungsanpassung / AL = Aussenlufttemp. / RL = Raumluftemp. (nach Bef.) / ZL = Zulufttemp.
 Simulation unter konstanten Bedingungen nur trocken !

Energieeffizienzpotenzial in der RLT



Wärmerückgewinnung im Jahresverlauf

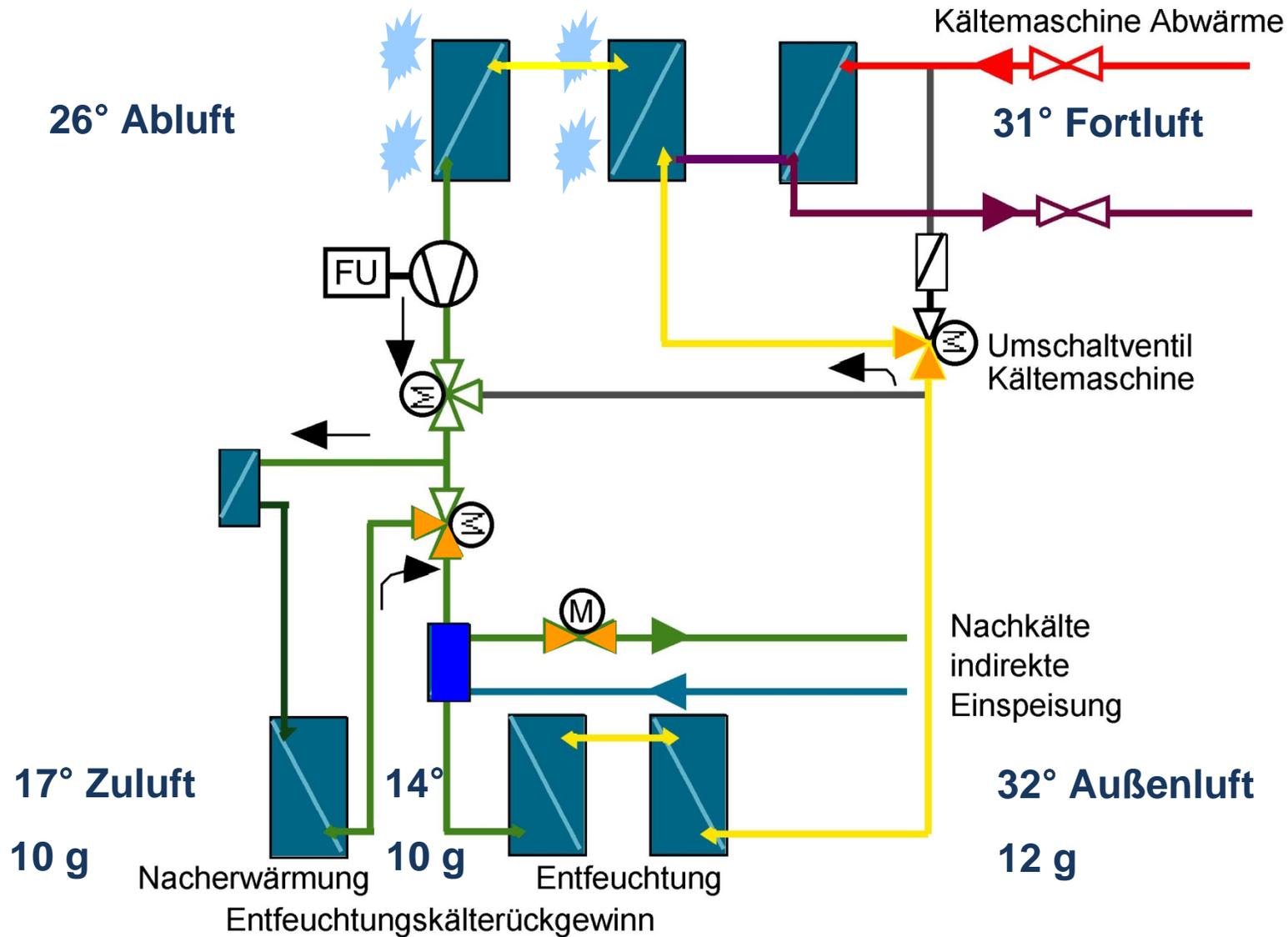
Summenhäufigkeiten
nach **VDI 4710**
multipliziert mit
Leistungen

AL	Q WRG	Stunden	Stunden	Wärme	Kälte	Wärme	Kälte	Freie	Brauch-	Wasser
°C	kW	Tag	Nacht	Gesamt	Gesamt	WRG	WRG	Kälte	wasser	m³
		h/°C	h/°C	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	
< -11,0	172,3	2	1	583		359				
-11,0	172,3	3	2	997		633				
-10,0	172,3	5	3	1.480		971				
-9,0	172,3	7	3	1.836		1.245				
-8,0	172,3	9	4	2.225		1.561				
-7,0	172,3	11	5	2.785		2.025				
-6,0	172,3	16	6	3.772		2.848				
-5,0	169,9	21	8	4.598		3.557				
-4,0	163,1	27	11	5.942		4.593				
-3,0	156,3	35	15	7.410		5.722				
-2,0	149,5	49	21	9.848		7.597				
-1,0	142,7	62	27	11.951		9.209				
0,0	135,9	178	77	32.783		25.227				
1,0	129,1	130	51	22.464		17.263				
2,0	122,3	135	57	22.256		17.087				
3,0	115,5	141	54	21.645		16.590				
4,0	108,7	141	56	20.636		15.786				
5,0	101,9	144	56	19.698		15.035				
6,0	95,1	142	55	18.200		13.857				
7,0	88,3	141	58	16.989		12.899				
8,0	81,5	146	59	16.155		12.225				
9,0	74,8	135	56	13.809		10.423				
10,0	68,0	129	61	12.376		9.309				
11,0	60,9	131	61	11.328		8.434			55	
12,0	53,4	134	64	10.388		7.578			170	
13,0	46,0	143	64	9.690		6.900			300	
14,0	38,6	148	64	8.654		5.965			433	
15,0	31,2	160	55	7.638		5.028			580	
16,0	23,7	153	51	5.953		3.636			675	
17,0	16,3	151	41	4.415		2.391			763	
18,0	8,9	148	33	3.038		1.258			862	
19,0	1,5	132	22	1.583		184			847	
20,0	0,0	118	15							
21,0	-8,6	105	11		810		810		151	14
22,0	-17,2	91	8		1.396		1.396		195	12
23,0	-25,8	76	6		1.750		1.750		217	10
24,0	-34,5	64	3		1.952		1.952		226	9
25,0	-43,1	52	3		1.979		1.979		225	7
26,0	-51,7	39	2		1.785		1.785		197	5
27,0	-60,3	31	1		1.624		1.624		175	7
28,0	-68,9	21	1		1.282		1.282		136	5
29,0	-77,5	17	1		1.158		1.158		121	4
30,0	-86,1	13			959		959		99	3
31,0	-94,7	8			626		626		64	2
> 31,0	-103,4	4			380		380		39	1
Gesamt	DIN 4710	3.760	1.253	334.244	16.286	248.059	16.286		6.580	81
	Jahr									

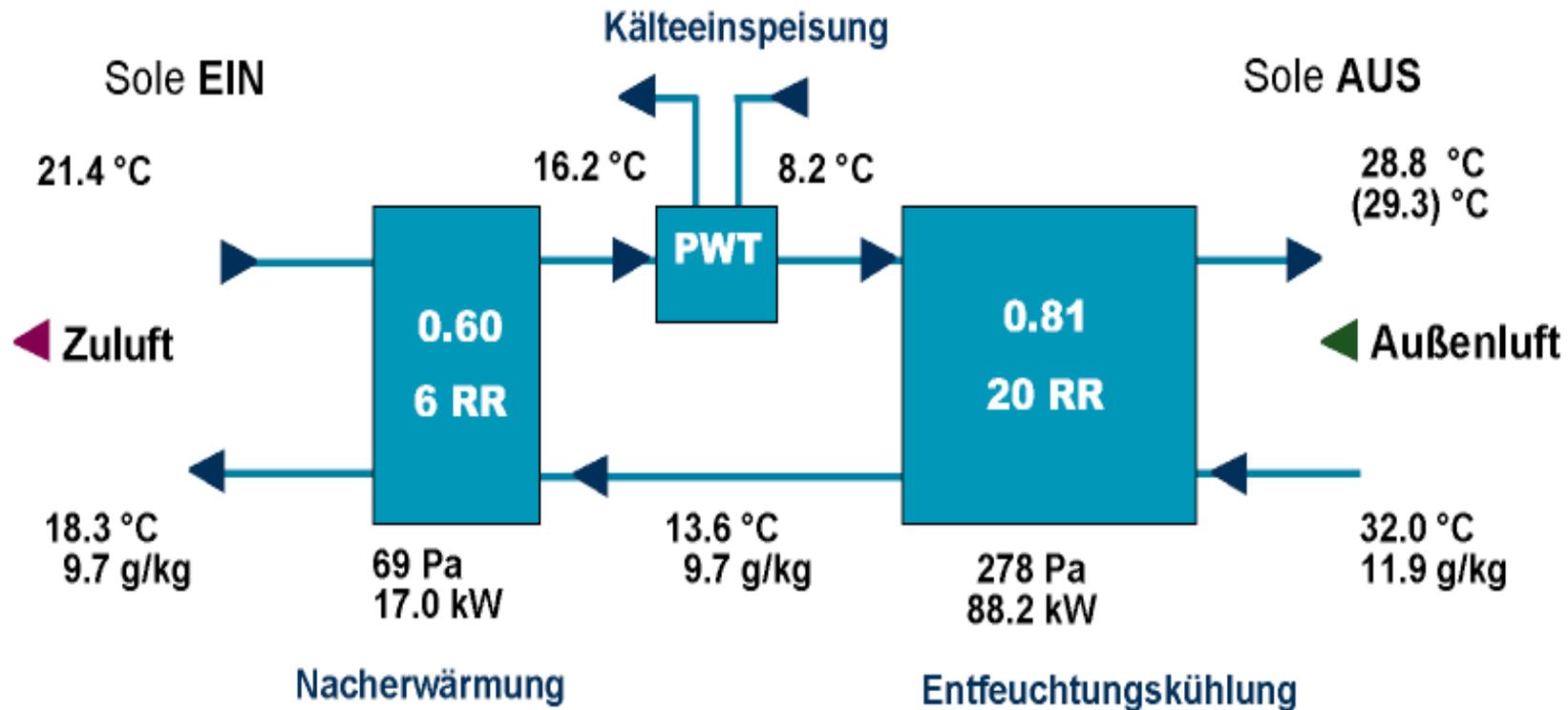
WRG Bilanz

Wärme	263.874 kWh/a
Kälte (indirekte Befeuchtung)	15.757 kWh/a
Freie Kälte	105.520 kWh/a
Brauchwassererwärmung	6.580 kWh/a
WRG	391.731 kWh/a

Entfeuchtungskälterückgewinnung

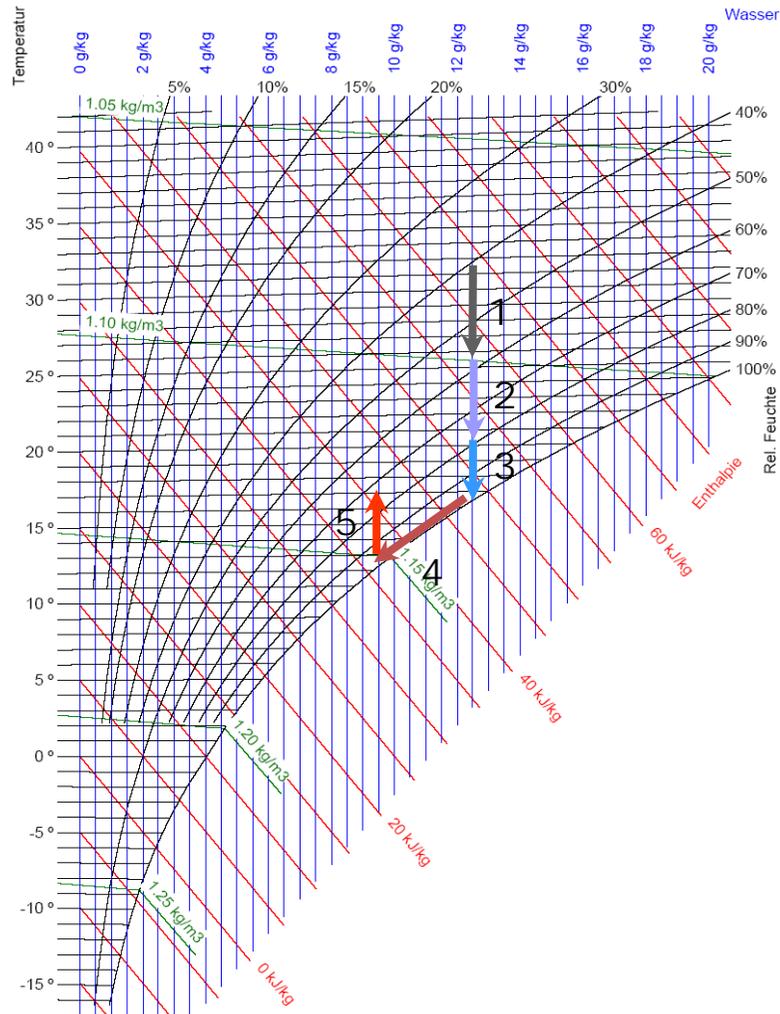


Entfeuchtungskälterückgewinnung



- Kühlleistung indirekte Verdunstung 35.7 kW
 - Kälterückgewinnung Entfeuchtung 17.0 kW
 - Resteinspeisung Kältemaschine 35.5 kW
- Volumenstrom 10.000 m³/h

Entfeuchtungskälterückgewinnung



1. 20 % Kühlung durch WRG
 2. 21 % Verdunstungskühlung
 3. 22 % Kälterückgewinnung
 4. 37 % mechanische Kühlung
-
- 100 % (Σ Kälteleistung)
5. 22 % Wärmerückgewinnung

Energieeffizienzpotenzial in der RLT



Einsparung der
Kühlleistungen
durch Ent-
feuchtung in kW
am Beispiel
bei 25.000 m³/h

°C / g/kg	9,5	10,5	11,5	12,5	13,5	14,5	15,5	16,5	17,5	18,5	19,5
36,5			52,3								
35,5	37,6	47,0	50,8	51,4							
34,5	36,3	45,6	0,0	49,8	47,5						
33,5	35,1	44,2	48,0	48,2	45,9	43,5					
32,5	33,8	42,7	46,5	46,6	44,3	42,0					
31,5	32,5	41,4	45,1	45,1	42,7	40,5	38,2				
30,5	31,2	40,0	42,1	42,2	41,2	38,9	36,7	34,5	32,0		
29,5	30,0	38,6	38,7	38,7	38,8	37,4	35,1				
28,5	28,8	35,4	35,4	35,4	35,4	35,5	33,6				
27,5	27,5	32,0	32,0	32,0	32,1	32,1	32,0	29,6	29,3		
26,5	26,3	28,7	28,7	28,7	28,7	28,7	28,7			28,7	28,7
25,5	25,1	25,4	25,4	25,4	25,4	25,4	25,4	25,4		25,4	
24,5	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	
23,5	18,7	18,7	18,7	18,7	18,7	18,7	18,7	18,7			
22,5	15,3	15,3	15,3	15,3	15,3	15,4	15,4	15,4			
21,5	11,9	11,9	11,9	11,9	12,0	12,0	12,0				
20,5	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6					
19,5	5,2	5,2	5,2	5,2	5,3	5,3					
18,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,6						

Energieeffizienzpotenzial in der RLT



Stundenhäufig-
keiten
Frankfurt am Main
Entfeuchtungs-
zustände

°C / g/kg	9,5	10,5	11,5	12,5	13,5	14,5	15,5	16,5	17,5	18,5	19,5	Summe
												h
36,5			1									0,10
35,5	2	1	1	1								0,50
34,5	4	2		2	1							0,90
33,5	5	6	2	3	2	1						1,90
32,5	14	9	10	6	3	1						4,30
31,5	30	24	23	8	5	2	1					9,30
30,5	44	47	29	21	9	4	1	1	1			15,70
29,5	62	54	43	26	14	8	2					20,90
28,5	78	60	53	31	13	7	3					24,50
27,5	99	85	61	41	22	12	4	1	1			32,60
26,5	117	104	71	46	20	8	5			1	1	37,30
25,5	146	127	88	51	33	14	4	1		2		46,60
24,5	187	149	121	68	39	15	6	2	1	1		58,90
23,5	209	162	115	81	44	19	7	3				64,00
22,5	211	193	156	95	58	30	8	1				75,20
21,5	248	223	171	113	68	32	3					85,80
20,5	267	265	213	158	105	22						103,00
19,5	312	312	259	239	96	1						121,90
18,5	395	373	384	298	13							146,30

Energieeffizienzpotenzial in der RLT



Einsparung der
Kühlenergien durch
Entfeuchtung
in kWh/a
im 24 h-Betrieb

°C / g/kg	9,5	10,5	11,5	12,5	13,5	14,5	15,5	16,5	17,5	18,5	19,5	Summe kWh/a
36,5			5									5,2
35,5	8	5	5	5								22,5
34,5	15	9		10	5							38,4
33,5	18	27	10	15	9	4						81,6
32,5	47	39	46	28	13	4						177,7
31,5	97	99	104	36	21	8	4					369,9
30,5	137	188	122	89	37	15	4	4	4			598,7
29,5	186	208	167	101	54	30	7					753,0
28,5	225	213	187	110	46	25	10					815,4
27,5	272	273	196	132	70	39	13	3	3			999,2
26,5	308	299	204	132	58	23	14			3	3	1043,3
25,5	367	322	223	129	84	36	10	3		5		1178,1
24,5	411	327	266	149	86	33	13	4	2	2		1295,3
23,5	389	302	214	151	82	35	13	6				1192,9
22,5	323	295	239	145	89	46	12	1				1149,4
21,5	296	266	204	135	82	38	4					1023,4
20,5	229	227	182	135	90	19						882,8
19,5	163	163	135	125	51	1						636,4
18,5	140	132	136	106	5							518,3

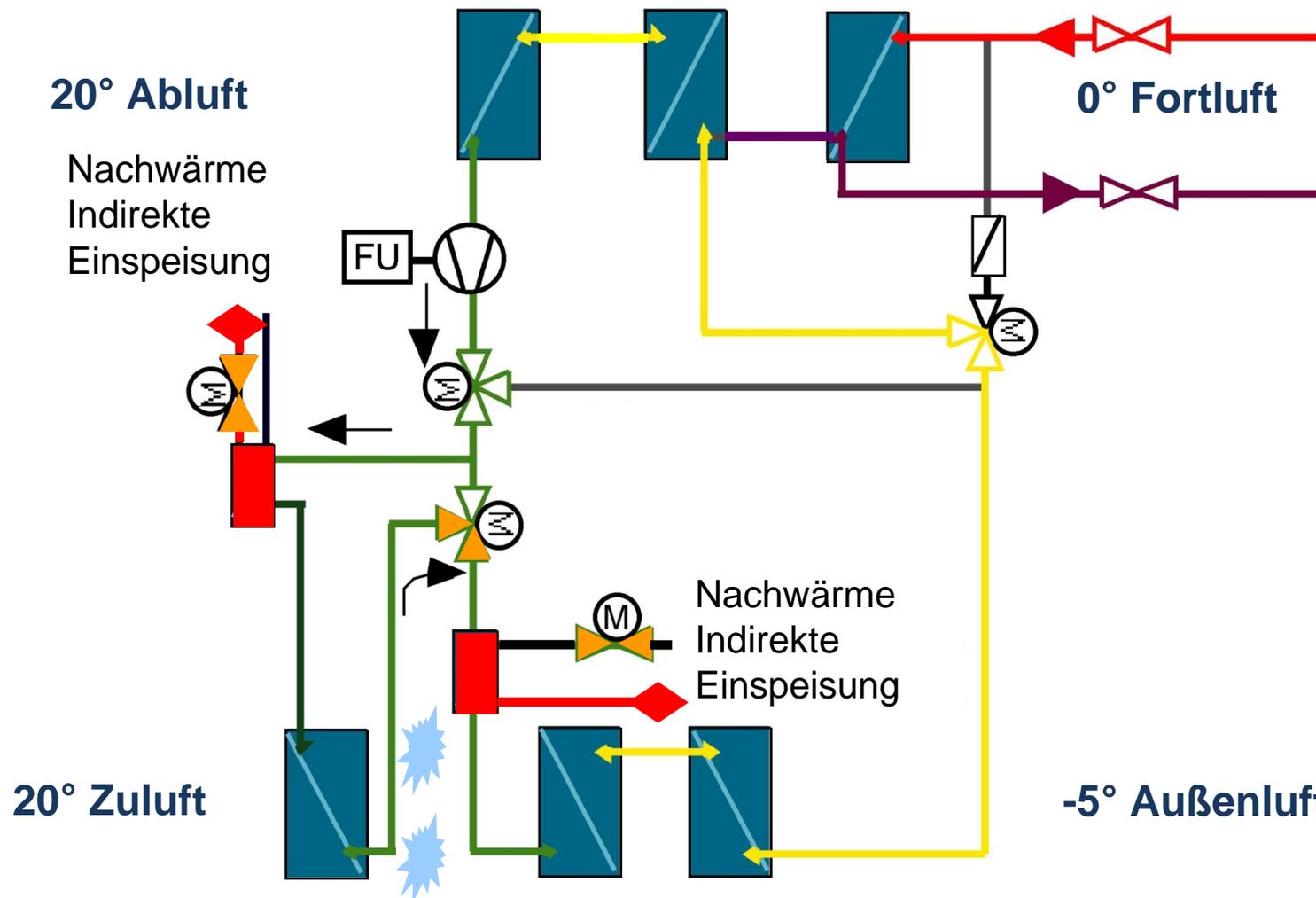
WRG Bilanz

Wärme	263.874 kWh/a
Kälte (indirekte Befeuchtung)	15.757 kWh/a
Freie Kälte	105.520 kWh/a
Brauchwassererwärmung	6.580 kWh/a
WRG	391.731 kWh/a

WRG Bilanz

Wärme	263.874 kWh/a
Kälte (indirekte Befeuchtung)	15.757 kWh/a
Freie Kälte	105.520 kWh/a
Brauchwassererwärmung	6.580 kWh/a
Entfeuchtungskälterückgewinnung	25.564 kWh/a
WRG	417.295 kWh/a

Winterbetrieb mit Zuluftbefeuchtung



Technikwissen transparent

Energieeffizienz

Dr. Christoph Kaup

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit