



HOCHSCHULE TRIER

Umwelt-Campus Birkenfeld

Umwelt macht Karriere.

Kurzgutachten zur Wirtschaftlichkeit der indirekten Verdunstungskühlung in Raumluftechnischen Geräten (RLT-Geräte) für Nicht-Wohngebäude



Prof. Dr.-Ing. **Christoph Kaup**
Honorarprofessur für Energieeffizienz und Wärmerückgewinnung
Diplom-Ingenieur (Verfahrenstechnik)
Diplom-Ingenieur (Angewandte Informatik)
Diplom-Wirtschaftsingenieur

© Umwelt-Campus Birkenfeld 2016

1 Aufgabenstellung

Das Referat KI I 5 (Klimaschutz und Energieeffizienz, Klimaschutztechnologien) des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit benötigt eine Stellungnahme zur Nutzung und zur Wirtschaftlichkeit der indirekten Verdunstungskühlung in Raumluftechnischen Geräten (RLT-Geräte) für Nicht-Wohngebäude.

Der Umwelt-Campus Birkenfeld hat dieses Kurzgutachten unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Christoph Kaup erarbeitet.

2 Indirekte Verdunstungskühlung

Bei der indirekten Verdunstungskühlung (auch adiabate Verdunstungskühlung genannt) 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 Wärmerückgewinnung eine Kühlung der Außenluft erfolgen. Zu beachten ist hierbei, dass dieser Effekt vom Temperaturänderungsgrad der WRG abhängig ist, da mit dem Übertragungsgrad der WRG der Effekt der Verdunstungskühlung auf die Zuluft übertragen wird.

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

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

Die Wirkung der Verdunstungskühlung kann gegenüber vorgeschaltetem Befeuchter verbessert werden, wenn die Befeuchtung der Abluft direkt auf der Oberfläche des Wärmeübertragers (Hybridsystem) 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.

Hybride Befeuchtungssysteme können auch mehrstufig ausgeführt werden, da kein zusätzlicher Druckabfall erzeugt wird. Durch die mehrstufige Befeuchtung wird die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz in der WRG erhöht. Dadurch erhöht sich die Leistung der Verdunstungskühlung um rund 20 bis 30 % gegenüber einer einstufigen Befeuchtung¹.

Grundsätzlich ist die Wirkung der indirekten Verdunstungskühlung umso höher,
– je höher der Befeuchtungswirkungsgrad

¹ Kaup C.: Recknagel, Sprenger, Albers, Seite 1553, Deutscher Industrieverlag 2015/2016

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

3 Mittlere Luftmengen

Zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit wird Bezug genommen auf unsere Studie zur Entwicklung des Energiebedarfs zentraler Raumluftechnischer Anlagen in Nicht-Wohngebäuden in Deutschland aus 2014². Demnach liegt die mittlere Luftmenge von Anlagen aus Nicht-Wohngebäuden bei ca. 14.400 m³/h.

Laut weiteren Studien des Umwelt-Campus Birkenfeld liegt der Median der Luftmengenverteilung bei 7.400 m³/h und der Median der Wärmearbeiten bei 28.800 m³/h³. Diese Werte wurden als Berechnungsgrundlage verwendet. Um das Bild zu kleinen Luftmengen ebenfalls abzurunden wurden auch Berechnungen bei 4.400 m³/h durchgeführt.

4 Rahmenbedingungen

Folgende Rahmenbedingungen wurden zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit der indirekten Verdunstungskühlung herangezogen:

- RLT-Gerät mit einem üblichen Aufbau (Lüftungsfunktion und Lufterwärmung), das mit einer Wärmerückgewinnung (WRG) ausgestattet ist. Das Gerät erfüllt die Bedingungen der Ökodesignverordnung EU 1253/2014 in der Stufe 2016.
- Plattenwärmeübertrager zur WRG mit einem Temperaturübertragungsgrad von 0,7
- Verdunstungskühlung einstufig als Hybridsystem Befeuchtungsgrad ca. 0,8
- Laufzeit der RLT-Anlage 2.611 h/a (10 h pro Tag und 5 Tage pro Woche)
- Nutzungsdauer der Anlage 15 Jahre
- Zinssatz zur Berechnung der Kapitalwerte 5 % und Preissteigerungsrate 2 %
- Erforderliche Zulufttemperatur 20 °C
- Stundenhäufigkeiten nach DIN 4710, Standort: Frankfurt am Main
- Wärmekosten 0,10 €/kWh, Elektro- und Kältekosten 0,15 €/kWh
- Wasserkosten 6 €/m³

5 Berechnungen mit und ohne indirekter Verdunstungskühlung

Die Wirtschaftlichkeitsberechnungen wurden mit einem Berechnungstool erstellt, das am Umwelt-Campus Birkenfeld entwickelt wurde.

² Kaup C., Kampeis P. Studie zur Entwicklung des Energiebedarfs zentraler Raumluftechnischer Anlagen in Nicht-Wohngebäuden in Deutschland, Umwelt-Campus Birkenfeld, 2014

³ Kaup C. Antrittsvorlesung am Umwelt-Campus Birkenfeld, www.umwelt-campus.de/ucb/fileadmin/user_upload/Bilderpool/Labore_Einrichtungen/Raumluftechnik/Scripte_Howatherm/Antrittsvorlesung.pdf

Die indirekte Verdunstungskühlung in der Raumluftechnik

Anhand weniger charakteristischer Daten kann die Berechnung erfolgen. Neben den WRG Daten (Übertragungsgrad und Druckverluste), den Sollwerten im Heiz- und Kühlbetrieb und den spezifischen Energiekosten wird das Lastprofil der WRG und deren Standort eingegeben. Hierbei wird zwischen dem Tag- und dem Nachtbetrieb unterschieden. Aus diesem Lastprofil errechnen sich die Laufzeiten der WRG.

Auf der ersten Ergebnisseite (Tabelle 1) wird die Funktion der WRG dargestellt, die sich aus dem Temperaturübertragungsgrad ergibt. Der Temperaturübertragungsgrad muss hierbei für jede Temperatur berechnet werden. Der Einfluss des Vereisungsschutzes (V), aber auch der Befeuchtung (S1) sind hierbei zu berücksichtigen.

| 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 | 20,5 | 20,0 | 99,2 | 62,0 | 0,0 | V |
| -11,0 | 20,0 | 64,5 | 9,0 | 20,5 | 20,0 | 99,2 | 57,1 | 0,0 | V |
| -10,0 | 20,0 | 66,7 | 10,0 | 20,5 | 20,0 | 99,2 | 52,1 | 0,0 | V |
| -9,0 | 20,0 | 69,0 | 11,0 | 20,5 | 20,0 | 99,2 | 47,1 | 0,0 | V |
| -8,0 | 20,0 | 70,5 | 11,7 | 20,5 | 19,7 | 97,9 | 43,5 | 0,0 | |
| -7,0 | 20,0 | 70,5 | 12,0 | 20,5 | 19,0 | 94,4 | 42,0 | 0,0 | |
| -6,0 | 20,0 | 70,5 | 12,3 | 20,5 | 18,3 | 90,9 | 40,5 | 0,0 | |
| -5,0 | 20,0 | 70,5 | 12,6 | 20,5 | 17,6 | 87,4 | 39,1 | 0,0 | |
| -4,0 | 20,0 | 70,5 | 12,9 | 20,5 | 16,9 | 83,9 | 37,6 | 0,0 | |
| -3,0 | 20,0 | 70,5 | 13,2 | 20,5 | 16,2 | 80,4 | 36,1 | 0,0 | |
| -2,0 | 20,0 | 70,5 | 13,5 | 20,5 | 15,5 | 76,9 | 34,7 | 0,0 | |
| -1,0 | 20,0 | 70,5 | 13,8 | 20,5 | 14,8 | 73,4 | 33,2 | 0,0 | |
| 0,0 | 20,0 | 70,5 | 14,1 | 20,5 | 14,1 | 70,0 | 31,8 | 0,0 | |
| 1,0 | 20,0 | 70,5 | 14,4 | 20,5 | 13,4 | 66,5 | 30,3 | 0,0 | |
| 2,0 | 20,0 | 70,5 | 14,7 | 20,5 | 12,7 | 63,0 | 28,8 | 0,0 | |
| 3,0 | 20,0 | 70,5 | 15,0 | 20,5 | 12,0 | 59,5 | 27,4 | 0,0 | |
| 4,0 | 20,0 | 70,5 | 15,3 | 20,5 | 11,3 | 56,0 | 25,9 | 0,0 | |
| 5,0 | 20,0 | 70,5 | 15,6 | 20,5 | 10,6 | 52,5 | 24,4 | 0,0 | |
| 6,0 | 20,0 | 70,5 | 15,9 | 20,5 | 9,9 | 49,0 | 23,0 | 0,0 | |
| 7,0 | 20,0 | 70,5 | 16,2 | 20,5 | 9,2 | 45,5 | 21,5 | 0,0 | |
| 8,0 | 20,0 | 70,5 | 16,5 | 20,5 | 8,5 | 42,0 | 20,0 | 0,0 | |
| 9,0 | 20,0 | 70,5 | 16,8 | 20,5 | 7,8 | 38,5 | 18,6 | 0,0 | |
| 10,0 | 20,0 | 70,5 | 17,1 | 20,5 | 7,1 | 35,0 | 17,1 | 0,0 | |
| 11,0 | 20,0 | 70,5 | 17,3 | 20,5 | 6,3 | 31,5 | 15,7 | 0,0 | |
| 12,0 | 20,0 | 70,5 | 17,6 | 20,5 | 5,6 | 28,0 | 14,2 | 0,0 | |
| 13,0 | 20,0 | 70,5 | 17,9 | 20,5 | 4,9 | 24,5 | 12,7 | 0,0 | |
| 14,0 | 20,0 | 70,5 | 18,2 | 20,5 | 4,2 | 21,0 | 11,3 | 0,0 | |
| 15,0 | 20,0 | 70,5 | 18,5 | 20,5 | 3,5 | 17,5 | 9,8 | 0,0 | |
| 16,0 | 20,0 | 70,5 | 18,8 | 20,5 | 2,8 | 14,0 | 8,3 | 0,0 | |
| 17,0 | 20,0 | 70,5 | 19,1 | 20,5 | 2,1 | 10,5 | 6,9 | 0,0 | |
| 18,0 | 20,0 | 70,5 | 19,4 | 20,5 | 1,4 | 7,0 | 5,4 | 0,0 | |
| 19,0 | 20,0 | 70,5 | 19,7 | 20,5 | 0,7 | 3,5 | 3,9 | 0,0 | |
| 20,0 | 20,0 | 70,5 | 20,0 | 20,5 | 0,0 | 0,0 | 2,5 | 0,0 | |
| 21,0 | 21,0 | 0,0 | 21,0 | 21,0 | 0,0 | 0,0 | -5,0 | 0,0 | AUS |
| 22,0 | 22,0 | 0,0 | 22,0 | 22,0 | 0,0 | 0,0 | -9,9 | 0,0 | AUS |
| 23,0 | 23,0 | 0,0 | 23,0 | 23,0 | 0,0 | 0,0 | -14,9 | 0,0 | AUS |
| 24,0 | 24,0 | 0,0 | 24,0 | 24,0 | 0,0 | 0,0 | -19,8 | 0,0 | AUS |
| 25,0 | 25,0 | 0,0 | 25,0 | 25,0 | 0,0 | 0,0 | -24,8 | 0,0 | AUS |
| 26,0 | 26,0 | 0,0 | 26,0 | 26,0 | 0,0 | 0,0 | -29,8 | 0,0 | AUS |
| 27,0 | 26,0 | 70,5 | 26,3 | 20,0 | -0,7 | -3,5 | -31,2 | 0,0 | |
| 28,0 | 26,0 | 70,5 | 26,6 | 20,0 | -1,4 | -7,0 | -32,7 | 0,0 | |
| 29,0 | 26,0 | 70,5 | 26,9 | 20,0 | -2,1 | -10,5 | -34,2 | 0,0 | |
| 30,0 | 26,0 | 70,5 | 27,2 | 20,0 | -2,8 | -14,0 | -35,6 | 0,0 | |
| 31,0 | 26,0 | 70,5 | 27,5 | 20,0 | -3,5 | -17,5 | -37,1 | 0,0 | |
| 32,0 | 26,0 | 70,5 | 27,8 | 20,0 | -4,2 | -21,0 | -38,5 | 0,0 | |

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 !

Tabelle 1: Funktion und Leistungswerte der WRG ohne indirekte Verdunstungskühlung

Die indirekte Verdunstungskühlung in der Raumluftechnik

Tabelle 1 gibt neben den charakteristischen Temperaturen die Leistungen der WRG und die zusätzlichen Leistungen an, die sich aus den Sollwerten ergeben.

| AL | Q WRG | Stunden | Stunden | Wärme | Kälte | Wärme | Kälte | Freie | Brauch- | Wasser |
|---------------|-----------------|--------------|---------|----------------|--------------|---------------|------------|-------|---------|----------------|
| °C | kW | Tag | Nacht | Gesamt | Gesamt | WRG | WRG | Kälte | wasser | m ³ |
| | | h/°C | h/°C | kWh | kWh | kWh | kWh | kWh | kWh | |
| < -11,0 | 99,2 | 1 | | 192 | | 118 | | | | |
| -11,0 | 99,2 | 2 | | 372 | | 236 | | | | |
| -10,0 | 99,2 | 4 | | 540 | | 354 | | | | |
| -9,0 | 99,2 | 5 | | 697 | | 472 | | | | |
| -8,0 | 97,9 | 6 | | 842 | | 583 | | | | |
| -7,0 | 94,4 | 8 | | 1.055 | | 730 | | | | |
| -6,0 | 90,9 | 11 | | 1.487 | | 1.028 | | | | |
| -5,0 | 87,4 | 14 | | 1.807 | | 1.249 | | | | |
| -4,0 | 83,9 | 19 | | 2.314 | | 1.598 | | | | |
| -3,0 | 80,4 | 24 | | 2.846 | | 1.962 | | | | |
| -2,0 | 76,9 | 34 | | 3.786 | | 2.609 | | | | |
| -1,0 | 73,4 | 43 | | 4.573 | | 3.146 | | | | |
| 0,0 | 70,0 | 124 | | 12.591 | | 8.667 | | | | |
| 1,0 | 66,5 | 90 | | 8.749 | | 6.017 | | | | |
| 2,0 | 63,0 | 93 | | 8.579 | | 5.888 | | | | |
| 3,0 | 59,5 | 98 | | 8.473 | | 5.808 | | | | |
| 4,0 | 56,0 | 98 | | 8.044 | | 5.500 | | | | |
| 5,0 | 52,5 | 100 | | 7.690 | | 5.250 | | | | |
| 6,0 | 49,0 | 99 | | 7.104 | | 4.842 | | | | |
| 7,0 | 45,5 | 98 | | 6.580 | | 4.469 | | | | |
| 8,0 | 42,0 | 101 | | 6.274 | | 4.250 | | | | |
| 9,0 | 38,5 | 93 | | 5.336 | | 3.598 | | | | |
| 10,0 | 35,0 | 90 | | 4.683 | | 3.146 | | | | |
| 11,0 | 31,5 | 91 | | 4.289 | | 2.869 | | | | |
| 12,0 | 28,0 | 93 | | 3.919 | | 2.600 | | | | |
| 13,0 | 24,5 | 99 | | 3.698 | | 2.435 | | | | |
| 14,0 | 21,0 | 103 | | 3.316 | | 2.163 | | | | |
| 15,0 | 17,5 | 111 | | 3.039 | | 1.948 | | | | |
| 16,0 | 14,0 | 107 | | 2.376 | | 1.492 | | | | |
| 17,0 | 10,5 | 105 | | 1.823 | | 1.100 | | | | |
| 18,0 | 7,0 | 103 | | 1.277 | | 721 | | | | |
| 19,0 | 3,5 | 92 | | 678 | | 321 | | | | |
| 20,0 | 0,0 | 82 | | 205 | | | | | | |
| 21,0 | 0,0 | 73 | | | 363 | | | | | |
| 22,0 | 0,0 | 63 | | | 625 | | | | | |
| 23,0 | 0,0 | 53 | | | 789 | | | | | |
| 24,0 | 0,0 | 45 | | | 884 | | | | | |
| 25,0 | 0,0 | 36 | | | 900 | | | | | |
| 26,0 | 0,0 | 27 | | | 816 | | | | | |
| 27,0 | -3,5 | 21 | | | 744 | | 75 | | | |
| 28,0 | -7,0 | 15 | | | 591 | | 104 | | | |
| 29,0 | -10,5 | 12 | | | 532 | | 125 | | | |
| 30,0 | -14,0 | 9 | | | 443 | | 125 | | | |
| 31,0 | -17,5 | 5 | | | 293 | | 94 | | | |
| > 31,0 | -21,0 | 3 | | | 177 | | 63 | | | |
| Gesamt | DIN 4710 | 2.611 | | 129.615 | 7.418 | 87.389 | 686 | | | |
| | Jahr | | | | | | | | | |

Tabelle 2: Energien der WRG

In Tabelle 2 werden dann neben den Stundenhäufigkeiten für jede Temperatur die Arbeiten (Energien) für Heizung und Kühlung angegeben. Auch werden tabellarisch die einzelnen Energien dargestellt, die sich aus der Multiplikation der Leistungen mit ihrer Häufigkeit ergeben.

Die indirekte Verdunstungskühlung in der Raumluftechnik

| | |
|---|---------------------------|
| 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 | 5 d / w |
| Betriebsstunden pro Tag | 10 h / d |
| Betriebsstunden pro Nacht | 0 h / d |
| Volumenstrom am Tag | 100 % / V max |
| Volumenstrom in der Nacht | 50 % / V max |
| Investitionskosten der WRG | 11.457 € |
| Mehr-/Minderinvestition für die WRG | 0 € |
| Min.investition fuer Wärmeerzeugung | 0 € / (0 € / kW) |
| Min.investition fuer Kälteerzeugung | 0 € / (0 € / kW) |
| Zusatzkosten je Jahr | 0 € |
| Rückgewinn der WRG Wärme | 8.739 € / a |
| Rückgewinn der WRG Kälte | 103 € / a |
| Elektroenergiekosten für die WRG | 1.052 € / a |
| Kapitalkosten für die WRG | 1.104 € / a |
| Wartungs- und Unterhaltungskosten | 229 € / a |
| Jährliche Differenzkosten | 6.456 € / a |
| Kapitalwert der Ersparnisse | 79.182 € |
| Interner Zinssatz | 69,3 % |
| Amortisation | 1,6 a |
| Jahresnutzungsgrad (bezogen auf Energien) | 64,3 % |
| Jahresarbeitszahl nach EN 13053 | 12,6 |
| Leistungszahl nach EN 13053 | 25,2 |
| Effektiver Jahreswirkungsgrad EN 13053 | 67,7 % |
| Jährliche CO2 Einsparung | 29,0 t / a |

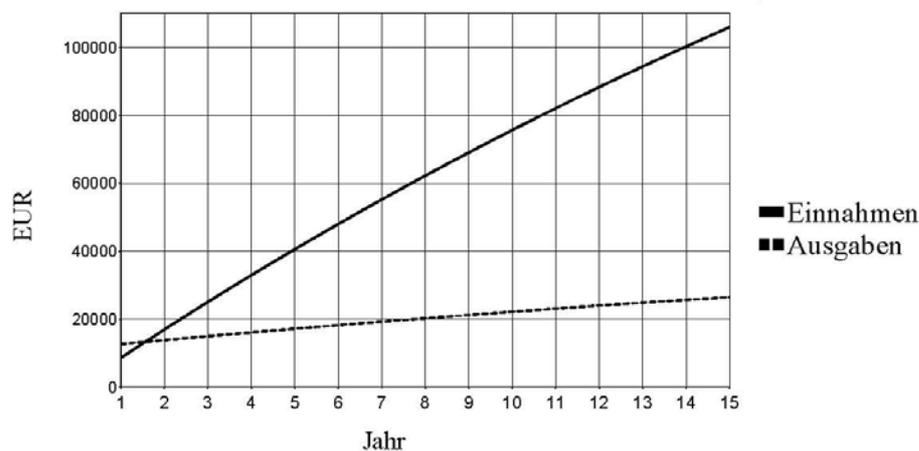
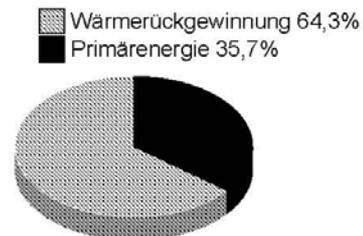


Tabelle 3: Zusammenfassung der Ergebnisse

Tabelle 3 stellt die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen übersichtlich zusammen. Die Wirtschaftlichkeitsberechnung wurde nicht unter der Berücksichtigung der Minderinvestitionen der Wärme- und Kälteerzeugung berechnet. Neben den Rahmenbedingungen wird der Kapitalwert der Ersparnisse, in diesem Fall nach 15 Jahren Nutzungsdauer berechnet und die

Die indirekte Verdunstungskühlung in der Raumluftechnik

Amortisation als Schnittpunkt der beiden Linien (abgezinste Einnahmen und Ausgaben) dargestellt. Die Amortisation ist damit im Beispiel 1,6 Jahr. Der Kapitalwert der Ersparnisse liegt bei einer Investition von 11.457 € (WRG) über 15 Jahre abgezinst bei 79.281 €.

Ebenfalls sind die Kennzahlen auf Basis des Jahresenergievergleiches aufgeführt.

Die Lebenszykluskosten ergeben sich daraus mit:

| | | |
|---|---------------------------|-----------|
| 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 | 5 d / w | |
| Betriebsstunden pro Tag | 10 h / d | |
| Betriebsstunden pro Nacht | 0 h / d | |
| Volumenstrom am Tag | 100 % / V max | |
| Volumenstrom in der Nacht | 50 % / V max | |
| Investitionskosten des RLT-Gerätes | 33.045 € | |
| Min.investition fuer Wärmeerzeugung | 0 € / (0 € / kW) | |
| Min.investition fuer Kälteerzeugung | 0 € / (0 € / kW) | |
| Kosten für Wärme | 12.962 € / a | |
| Rückgewinn der WRG Wärme | -8.739 € / a | |
| Kosten für Kälte | 1.113 € / a | |
| Rückgewinn der WRG Kälte | -103 € / a | |
| Rückwärmzahl der WRG (trocken) | 70,5 % | |
| Elektrische Leistungsaufnahme (Ventilatoren) | 10,5 kW | |
| Elektroenergiekosten für das RLT-Gerät | 4.131 € / a | |
| Filterwechselkosten | 364 € / a | |
| Kapitalkosten für das RLT-Gerät | 3.184 € / a | |
| Wartungs- und Unterhaltungskosten | 661 € / a | |
| Lebenszykluskosten (einschl. Investition abgezinst) | 157.585 € | (100,0 %) |
| Lebenszykluskosten (nicht abgezinst) | 188.865 € | |

Lebenszykluskosten auf Basis der Elektroenergiekosten, der Wärme und Kälte (ohne Entfeuchtung und Befeuchtung) und der Filterwechselkosten

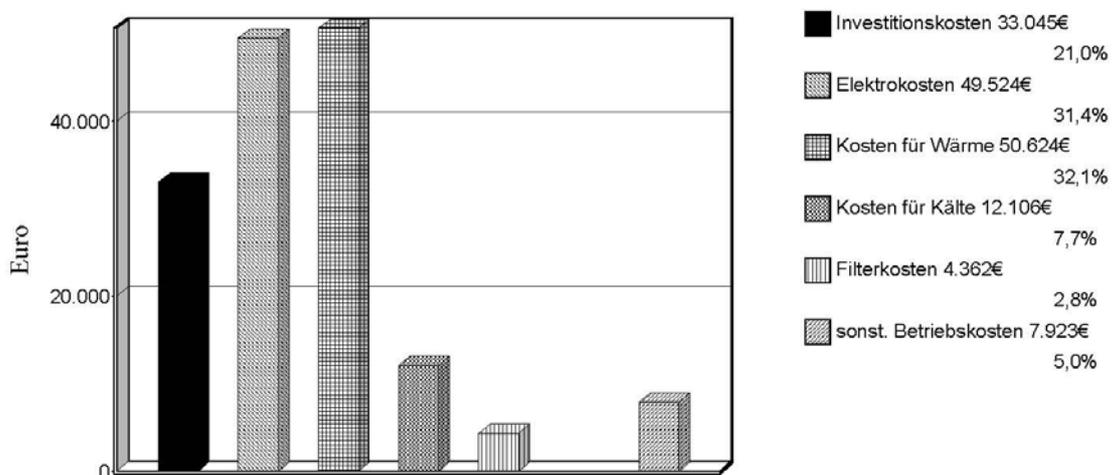


Tabelle 4: Zusammenfassung der Lebenszykluskosten ohne Verdunstungskühlung

Die indirekte Verdunstungskühlung in der Raumluftechnik

Auf Basis der Nutzung und des Aufwands kann eine Optimierung der Wärmerückgewinnung berechnet werden, welche sowohl einen kleineren als auch einen größeren Temperaturübertragungsgrad berücksichtigt.

Diese Optimierung gilt selbstverständlich nur für die festgelegten Rahmenbedingungen. Ändern sich z. B. die Laufzeit der WRG oder die Energiekosten, verschiebt sich auch das Optimum der WRG deutlich.

WRG-SYSTEME OPTIMIERUNG

| Rückwärmzahl | Nutzen | Aufwand | Ertrag |
|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 30,0 % | 3762,5 € | 427,8 € | 3334,7 € |
| 35,0 % | 4389,5 € | 537,5 € | 3852,1 € |
| 40,0 % | 5016,6 € | 665,4 € | 4351,2 € |
| 45,0 % | 5643,7 € | 816,6 € | 4827,1 € |
| 50,0 % | 6270,8 € | 998,1 € | 5272,7 € |
| 55,0 % | 6897,9 € | 1219,9 € | 5677,9 € |
| 60,0 % | 7524,9 € | 1497,2 € | 6027,8 € |
| 65,0 % | 8152,0 € | 1853,7 € | 6298,4 € |
| 70,0 % | 8779,1 € | 2329,0 € | 6450,1 € |
| 72,0 % | 9029,9 € | 2566,6 € | 6463,3 € |
| 75,0 % | 9406,2 € | 2994,4 € | 6411,8 € |
| 80,0 % | 10033,2 € | 3992,5 € | 6040,8 € |
| 85,0 % | 10660,3 € | 5656,0 € | 5004,3 € |

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

Optimale Rückwärmzahl der WRG **72 % (68 - 75 %)**

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

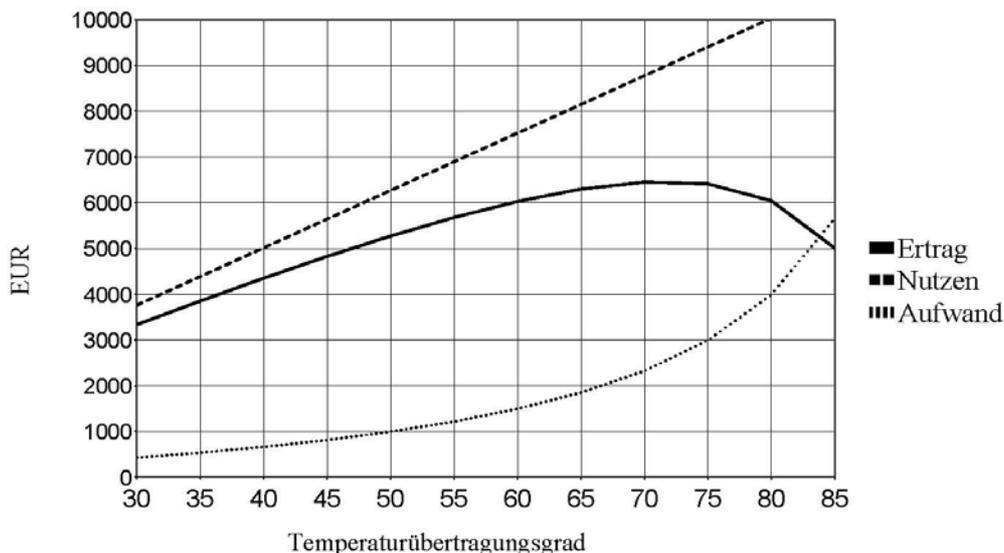
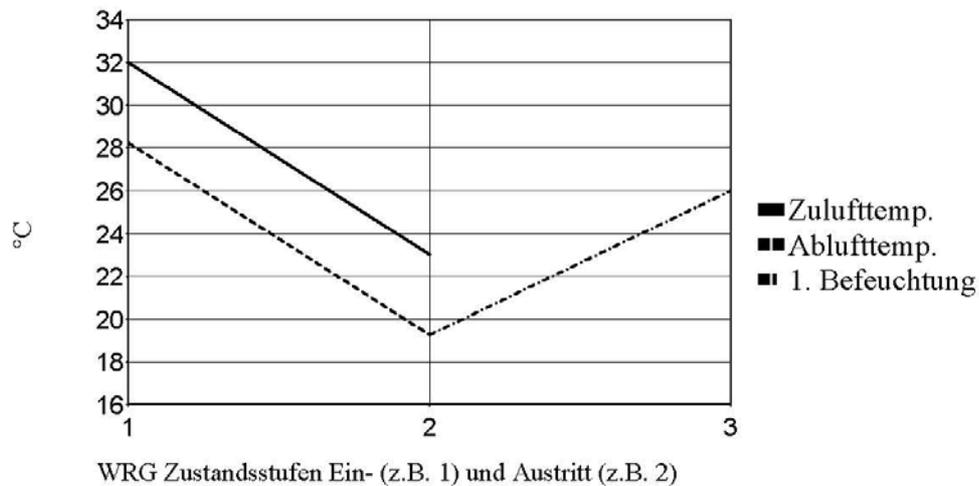


Tabelle 5: Optimierung unter den gegebenen Rahmenbedingungen ohne Verdunstungskühlung

Das Optimum der Nutzung liegt bei den gegebenen Rahmenbedingungen bei ca. 0,72 (Bereich 0,68 bis 0,75 unter Berücksichtigung einer Toleranz von $\pm 1\%$ der Kostenberechnung).

Im zweiten Berechnungsgang wird nun die Verdunstungskühlung berücksichtigt.

Die indirekte Verdunstungskühlung in der Raumluftechnik



Auslegungsdaten

| | |
|--|---------------------------------------|
| Außenluft | 32,0 °C / 40,0 % rH |
| Zuluft | 23,0 °C |
| Abluft | 26,0 °C / 50,0 % rH |
| Anzahl der WRG Stufen | 2 Stck |
| Anzahl der Befeuchter Stufen | 1 Stck |
| Kühlleistung (indirekt adiabatisch) | 42,5 kW |
| Wirkungsgrad der WRG | 70,5 % (Wirkungsgrad der WRG trocken) |
| eff. Kühlwirkungsgrad | 70,5 % |
| Befeuchtungsgrad | 91,0 % (Additiv Netzmittel) |
| durschn. Wasserverbrauch | 115,5 l/h (bei : 2.5 bar) |
| zus. Druckabfall | 11 Pa |
| Min. Vorlauftemperatur Sole | 21,5 °C |
| Rücklauftemperatur Sole | 29,7 °C |
| | |
| Düsen pro Stufe | 12 Stck (3 x 4) |
| | |
| Magnetventile je Düsenreihe | 230 V (lose) |
| Bedienteile | 1 Stck |
| Zeittaktgeber | |

| Stufe | tZL °C | x ZL g/kg | tFo °C | x FO g/kg | mw l/h | bw l/h | bw/mw l/h | Sz s | Pz s |
|-------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|-----------|--------------|---------|---------|
| 0,0 | 32,0 | 11,9 | 26,0 | 10,5 | | | | | |
| 1,0 | 23,0 | 11,9 | 19,3 | 13,2 | 46,2 | 115,5 | 2,5 | 9,0 | 51,0 |

mw = Befeuchterleistung / bw = Betriebswassermenge / Sz = Sprühzeit / Pz = Pausenzeit (inetwa)

Tabelle 6: Funktion und Leistungswerte der WRG mit indirekter Verdunstungskühlung

Mit der Verdunstungskühlung ergibt sich folgende Situation im Jahresverlauf:



Die indirekte Verdunstungskühlung in der Raumluftechnik

| 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 | 20,5 | 20,0 | 99,2 | 62,0 | 0,0 | V |
| -11,0 | 20,0 | 64,5 | 9,0 | 20,5 | 20,0 | 99,2 | 57,1 | 0,0 | V |
| -10,0 | 20,0 | 66,7 | 10,0 | 20,5 | 20,0 | 99,2 | 52,1 | 0,0 | V |
| -9,0 | 20,0 | 69,0 | 11,0 | 20,5 | 20,0 | 99,2 | 47,1 | 0,0 | V |
| -8,0 | 20,0 | 70,5 | 11,7 | 20,5 | 19,7 | 97,9 | 43,5 | 0,0 | |
| -7,0 | 20,0 | 70,5 | 12,0 | 20,5 | 19,0 | 94,4 | 42,0 | 0,0 | |
| -6,0 | 20,0 | 70,5 | 12,3 | 20,5 | 18,3 | 90,9 | 40,5 | 0,0 | |
| -5,0 | 20,0 | 70,5 | 12,6 | 20,5 | 17,6 | 87,4 | 39,1 | 0,0 | |
| -4,0 | 20,0 | 70,5 | 12,9 | 20,5 | 16,9 | 83,9 | 37,6 | 0,0 | |
| -3,0 | 20,0 | 70,5 | 13,2 | 20,5 | 16,2 | 80,4 | 36,1 | 0,0 | |
| -2,0 | 20,0 | 70,5 | 13,5 | 20,5 | 15,5 | 76,9 | 34,7 | 0,0 | |
| -1,0 | 20,0 | 70,5 | 13,8 | 20,5 | 14,8 | 73,4 | 33,2 | 0,0 | |
| 0,0 | 20,0 | 70,5 | 14,1 | 20,5 | 14,1 | 70,0 | 31,8 | 0,0 | |
| 1,0 | 20,0 | 70,5 | 14,4 | 20,5 | 13,4 | 66,5 | 30,3 | 0,0 | |
| 2,0 | 20,0 | 70,5 | 14,7 | 20,5 | 12,7 | 63,0 | 28,8 | 0,0 | |
| 3,0 | 20,0 | 70,5 | 15,0 | 20,5 | 12,0 | 59,5 | 27,4 | 0,0 | |
| 4,0 | 20,0 | 70,5 | 15,3 | 20,5 | 11,3 | 56,0 | 25,9 | 0,0 | |
| 5,0 | 20,0 | 70,5 | 15,6 | 20,5 | 10,6 | 52,5 | 24,4 | 0,0 | |
| 6,0 | 20,0 | 70,5 | 15,9 | 20,5 | 9,9 | 49,0 | 23,0 | 0,0 | |
| 7,0 | 20,0 | 70,5 | 16,2 | 20,5 | 9,2 | 45,5 | 21,5 | 0,0 | |
| 8,0 | 20,0 | 70,5 | 16,5 | 20,5 | 8,5 | 42,0 | 20,0 | 0,0 | |
| 9,0 | 20,0 | 70,5 | 16,8 | 20,5 | 7,8 | 38,5 | 18,6 | 0,0 | |
| 10,0 | 20,0 | 70,5 | 17,1 | 20,5 | 7,1 | 35,0 | 17,1 | 0,0 | |
| 11,0 | 20,0 | 70,5 | 17,3 | 20,5 | 6,3 | 31,5 | 15,7 | 0,0 | |
| 12,0 | 20,0 | 70,5 | 17,6 | 20,5 | 5,6 | 28,0 | 14,2 | 0,0 | |
| 13,0 | 20,0 | 70,5 | 17,9 | 20,5 | 4,9 | 24,5 | 12,7 | 0,0 | |
| 14,0 | 20,0 | 70,5 | 18,2 | 20,5 | 4,2 | 21,0 | 11,3 | 0,0 | |
| 15,0 | 20,0 | 70,5 | 18,5 | 20,5 | 3,5 | 17,5 | 9,8 | 0,0 | |
| 16,0 | 20,0 | 70,5 | 18,8 | 20,5 | 2,8 | 14,0 | 8,3 | 0,0 | |
| 17,0 | 20,0 | 70,5 | 19,1 | 20,5 | 2,1 | 10,5 | 6,9 | 0,0 | |
| 18,0 | 20,0 | 70,5 | 19,4 | 20,5 | 1,4 | 7,0 | 5,4 | 0,0 | |
| 19,0 | 20,0 | 70,5 | 19,7 | 20,5 | 0,7 | 3,5 | 3,9 | 0,0 | |
| 20,0 | 20,0 | 70,5 | 20,0 | 20,5 | 0,0 | 0,0 | 2,5 | 0,0 | |
| 21,0 | 20,0 | 70,5 | 20,3 | 20,0 | -0,7 | -3,5 | -1,5 | 0,0 | S 1 |
| 22,0 | 20,0 | 70,5 | 20,6 | 20,0 | -1,4 | -7,0 | -2,9 | 0,0 | S 1 |
| 23,0 | 20,0 | 70,5 | 20,9 | 20,0 | -2,1 | -10,5 | -4,4 | 0,0 | S 1 |
| 24,0 | 20,0 | 70,5 | 21,2 | 20,0 | -2,8 | -14,0 | -5,9 | 0,0 | S 1 |
| 25,0 | 20,0 | 70,5 | 21,5 | 20,0 | -3,5 | -17,5 | -7,3 | 0,0 | S 1 |
| 26,0 | 20,0 | 70,5 | 21,8 | 20,0 | -4,2 | -21,0 | -8,8 | 0,0 | S 1 |
| 27,0 | 20,0 | 70,5 | 22,1 | 20,0 | -4,9 | -24,5 | -10,2 | 0,0 | S 1 |
| 28,0 | 20,0 | 70,5 | 22,4 | 20,0 | -5,6 | -28,0 | -11,7 | 0,0 | S 1 |
| 29,0 | 20,0 | 70,5 | 22,7 | 20,0 | -6,3 | -31,5 | -13,2 | 0,0 | S 1 |
| 30,0 | 20,0 | 70,5 | 23,0 | 20,0 | -7,0 | -35,0 | -14,6 | 0,0 | S 1 |
| 31,0 | 20,0 | 70,5 | 23,2 | 20,0 | -7,8 | -38,5 | -16,1 | 0,0 | S 1 |
| 32,0 | 20,0 | 70,5 | 23,5 | 20,0 | -8,5 | -42,0 | -17,6 | 0,0 | S 1 |

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 !

Tabelle 7: Funktion und Leistungswerte der WRG im Jahresverlauf

In Tabelle 7 werden ebenfalls neben den Stundenhäufigkeiten für jede Temperatur die Arbeiten (Energien) für Heizung und Kühlung angegeben. Auch werden tabellarisch die einzelnen Energien dargestellt, die sich aus der Multiplikation der Leistungen mit ihrer Häufigkeit ergeben. Des Weiteren wird der Wasserverbrauch der indirekten Verdunstungskühlung mit berechnet, da der Wasserverbrauch ebenfalls in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (Unterhaltungskosten) mit berücksichtigt werden muss.

Die indirekte Verdunstungskühlung in der Raumluftechnik

| AL | Q WRG | Stunden | Stunden | Wärme | Kälte | Wärme | Kälte | Freie | Brauch- | Wasser |
|---------------|-----------------|--------------|---------|----------------|--------------|---------------|--------------|-------|---------|----------------|
| °C | kW | Tag | Nacht | Gesamt | Gesamt | WRG | WRG | Kälte | wasser | m ³ |
| | | h/°C | h/°C | kWh | kWh | kWh | kWh | kWh | kWh | |
| < -11,0 | 99,2 | 1 | | 192 | | 118 | | | | |
| -11,0 | 99,2 | 2 | | 372 | | 236 | | | | |
| -10,0 | 99,2 | 4 | | 540 | | 354 | | | | |
| -9,0 | 99,2 | 5 | | 697 | | 472 | | | | |
| -8,0 | 97,9 | 6 | | 842 | | 583 | | | | |
| -7,0 | 94,4 | 8 | | 1.055 | | 730 | | | | |
| -6,0 | 90,9 | 11 | | 1.487 | | 1.028 | | | | |
| -5,0 | 87,4 | 14 | | 1.807 | | 1.249 | | | | |
| -4,0 | 83,9 | 19 | | 2.314 | | 1.598 | | | | |
| -3,0 | 80,4 | 24 | | 2.846 | | 1.962 | | | | |
| -2,0 | 76,9 | 34 | | 3.786 | | 2.609 | | | | |
| -1,0 | 73,4 | 43 | | 4.573 | | 3.146 | | | | |
| 0,0 | 70,0 | 124 | | 12.591 | | 8.667 | | | | |
| 1,0 | 66,5 | 90 | | 8.749 | | 6.017 | | | | |
| 2,0 | 63,0 | 93 | | 8.579 | | 5.888 | | | | |
| 3,0 | 59,5 | 98 | | 8.473 | | 5.808 | | | | |
| 4,0 | 56,0 | 98 | | 8.044 | | 5.500 | | | | |
| 5,0 | 52,5 | 100 | | 7.690 | | 5.250 | | | | |
| 6,0 | 49,0 | 99 | | 7.104 | | 4.842 | | | | |
| 7,0 | 45,5 | 98 | | 6.580 | | 4.469 | | | | |
| 8,0 | 42,0 | 101 | | 6.274 | | 4.250 | | | | |
| 9,0 | 38,5 | 93 | | 5.336 | | 3.598 | | | | |
| 10,0 | 35,0 | 90 | | 4.683 | | 3.146 | | | | |
| 11,0 | 31,5 | 91 | | 4.289 | | 2.869 | | | | |
| 12,0 | 28,0 | 93 | | 3.919 | | 2.600 | | | | |
| 13,0 | 24,5 | 99 | | 3.698 | | 2.435 | | | | |
| 14,0 | 21,0 | 103 | | 3.316 | | 2.163 | | | | |
| 15,0 | 17,5 | 111 | | 3.039 | | 1.948 | | | | |
| 16,0 | 14,0 | 107 | | 2.376 | | 1.492 | | | | |
| 17,0 | 10,5 | 105 | | 1.823 | | 1.100 | | | | |
| 18,0 | 7,0 | 103 | | 1.277 | | 721 | | | | |
| 19,0 | 3,5 | 92 | | 678 | | 321 | | | | |
| 20,0 | 0,0 | 82 | | 205 | | | | | | |
| 21,0 | -3,5 | 73 | | | 363 | | 254 | | | 4 |
| 22,0 | -7,0 | 63 | | | 625 | | 442 | | | 4 |
| 23,0 | -10,5 | 53 | | | 789 | | 556 | | | 3 |
| 24,0 | -14,0 | 45 | | | 884 | | 625 | | | 3 |
| 25,0 | -17,5 | 36 | | | 900 | | 635 | | | 2 |
| 26,0 | -21,0 | 27 | | | 816 | | 575 | | | 2 |
| 27,0 | -24,5 | 21 | | | 744 | | 525 | | | 1 |
| 28,0 | -28,0 | 15 | | | 591 | | 417 | | | 1 |
| 29,0 | -31,5 | 12 | | | 532 | | 375 | | | 1 |
| 30,0 | -35,0 | 9 | | | 443 | | 313 | | | 1 |
| 31,0 | -38,5 | 5 | | | 293 | | 206 | | | |
| > 31,0 | -42,0 | 3 | | | 177 | | 125 | | | |
| Gesamt | DIN 4710 | 2.611 | | 129.615 | 7.418 | 87.389 | 5.234 | | | 23 |
| | Jahr | | | | | | | | | |

Tabelle 8: Energien und Wasserverbrauch der WRG

Tabelle 9 stellt auf Basis von Tabelle 8 die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen übersichtlich zusammen.

Die Amortisation liegt mit Verdunstungskühlung 1,8 Jahr. Der Kapitalwert der Ersparnisse liegt bei einer Investition von 11.457 € (WRG) über 15 Jahre abgezinst bei 82.149 €.

Die indirekte Verdunstungskühlung in der Raumluftechnik

| | |
|--|---------------------------|
| 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 | 5 d / w |
| Betriebstunden pro Tag | 10 h / d |
| Betriebsstunden pro Nacht | 0 h / d |
| Volumenstrom am Tag | 100 % / V max |
| Volumenstrom in der Nacht | 50 % / V max |
| Investitionskosten der WRG | 14.354 € |
| Mehr-/Minderinvestition für die WRG | 0 € |
| Min.investition fuer Wärmeerzeugung | 0 € / (0 € / kW) |
| Min.investition fuer Kälteerzeugung | 0 € / (0 € / kW) |
| Zusatzkosten je Jahr | 0 € |
| Rückgewinn der WRG Wärme | 8.739 € / a |
| Rückgewinn der WRG Kälte | 785 € / a |
| Elektroenergiekosten für die WRG | 1.052 € / a |
| Wasserkosten (indirekte Verdunstungskühlung) | 135 € / a |
| Kapitalkosten für die WRG | 1.383 € / a |
| Wartungs- und Unterhaltungskosten | 287 € / a |
| Jährliche Differenzkosten | 6.666 € / a |
| Kapitalwert der Ersparnisse | 82.149 € |
| Interner Zinssatz | 59,2 % |
| Amortisation | 1,8 a |
| Jahresnutzungsgrad (bezogen auf Energien) | 67,6 % |
| Jahresarbeitszahl nach EN 13053 | 13,2 |
| Leistungszahl nach EN 13053 | 25,2 |
| Effektiver Jahreswirkungsgrad EN 13053 | 67,7 % |
| Jährliche CO2 Einsparung | 29,0 t / a |

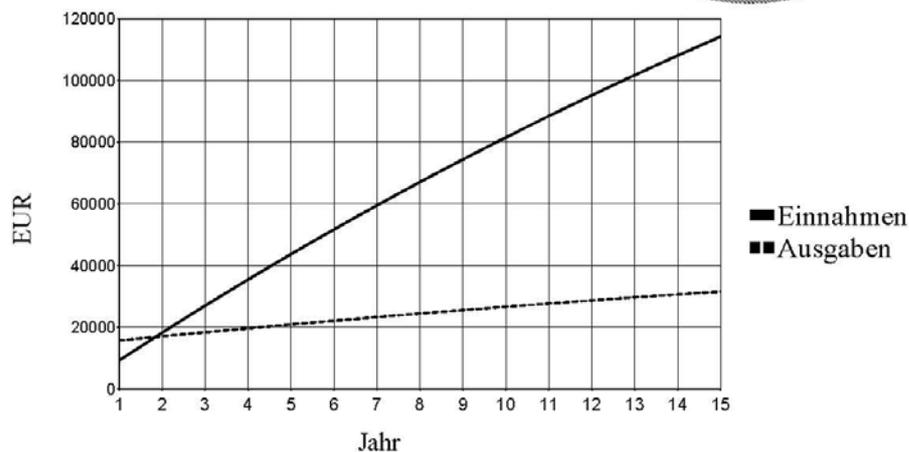
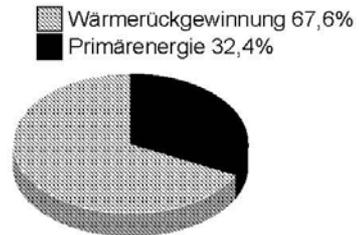


Tabelle 9: Zusammenfassung der Ergebnisse mit Verdunstungskühlung

Aus der Berechnung können ebenfalls die Lebenszykluskosten mit der Nutzung der Verdunstungskühlung berechnet werden. Tabelle 10 stellt die Ergebnisse im Vergleich zur Tabelle 4 dar.

Die indirekte Verdunstungskühlung in der Raumlufttechnik

| | |
|---|---------------------------|
| 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 | 5 d / w |
| Betriebsstunden pro Tag | 10 h / d |
| Betriebsstunden pro Nacht | 0 h / d |
| Volumenstrom am Tag | 100 % / V max |
| Volumenstrom in der Nacht | 50 % / V max |
| Investitionskosten des RLT-Gerätes | 35.808 € |
| Min.investition fuer Wärmeerzeugung | 0 € / (0 € / kW) |
| Min.investition fuer Kälteerzeugung | 0 € / (0 € / kW) |
| Kosten für Wärme | 12.962 € / a |
| Rückgewinn der WRG Wärme | -8.739 € / a |
| Kosten für Kälte | 1.113 € / a |
| Rückgewinn der WRG Kälte | -785 € / a |
| Rückwärmzahl der WRG (trocken) | 70,5 % |
| Elektrische Leistungsaufnahme (Ventilatoren) | 10,5 KW |
| Elektroenergiekosten für das RLT-Gerät | 4.131 € / a |
| Filterwechselkosten | 364 € / a |
| Wasserkosten (indirekte Verdunstungskühlung) | 135 € / a |
| Kapitalkosten für das RLT-Gerät | 3.450 € / a |
| Wartungs- und Unterhaltungskosten | 716 € / a |
| Lebenszykluskosten (einschl. Investition abgezinst) | 154.452 € (100,0 %) |
| Lebenszykluskosten (nicht abgezinst) | 184.251 € |

Lebenszykluskosten auf Basis der Elektroenergiekosten, der Wärme und Kälte (ohne Entfeuchtung und Befeuchtung) und der Filterwechselkosten

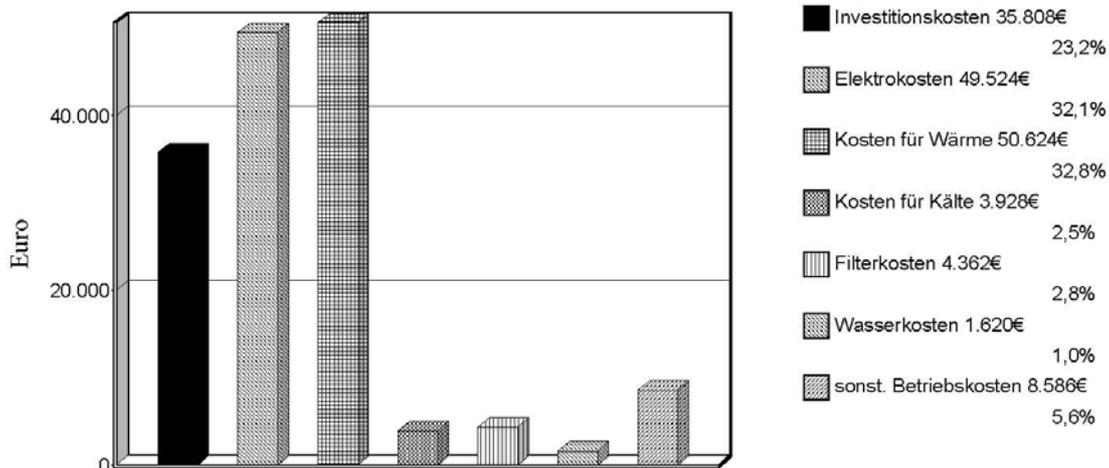


Tabelle 10: Zusammenfassung der Lebenszykluskosten ohne Verdunstungskühlung

Aus der Berechnung können ebenfalls die Lebenszykluskosten mit der Nutzung der Verdunstungskühlung berechnet werden. Tabelle 10 stellt die Ergebnisse im Vergleich zur Tabelle 4 dar. Auch auf Basis kann eine Optimierung der Wärmerückgewinnung berechnet werden, welche sowohl einen kleineren als auch einen größeren Temperaturübertragungsgrad berücksichtigt.

Die indirekte Verdunstungskühlung in der Raumluftechnik

WRG-SYSTEME OPTIMIERUNG

| Rückwärmzahl | Nutzen | Aufwand | Ertrag |
|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 30,0 % | 4052,8 € | 623,3 € | 3429,4 € |
| 35,0 % | 4728,2 € | 748,5 € | 3979,7 € |
| 40,0 % | 5403,7 € | 894,6 € | 4509,1 € |
| 45,0 % | 6079,1 € | 1067,2 € | 5012,0 € |
| 50,0 % | 6754,6 € | 1274,3 € | 5480,3 € |
| 55,0 % | 7430,1 € | 1527,4 € | 5902,6 € |
| 60,0 % | 8105,5 € | 1843,9 € | 6261,7 € |
| 65,0 % | 8781,0 € | 2250,7 € | 6530,3 € |
| 70,0 % | 9456,5 € | 2793,2 € | 6663,3 € |
| 71,0 % | 9591,5 € | 2924,1 € | 6667,5 € |
| 75,0 % | 10131,9 € | 3552,6 € | 6579,3 € |
| 80,0 % | 10807,4 € | 4691,7 € | 6115,6 € |
| 85,0 % | 11482,8 € | 6590,3 € | 4892,5 € |

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

Optimale Rückwärmzahl der WRG 71 % (67 - 74 %)

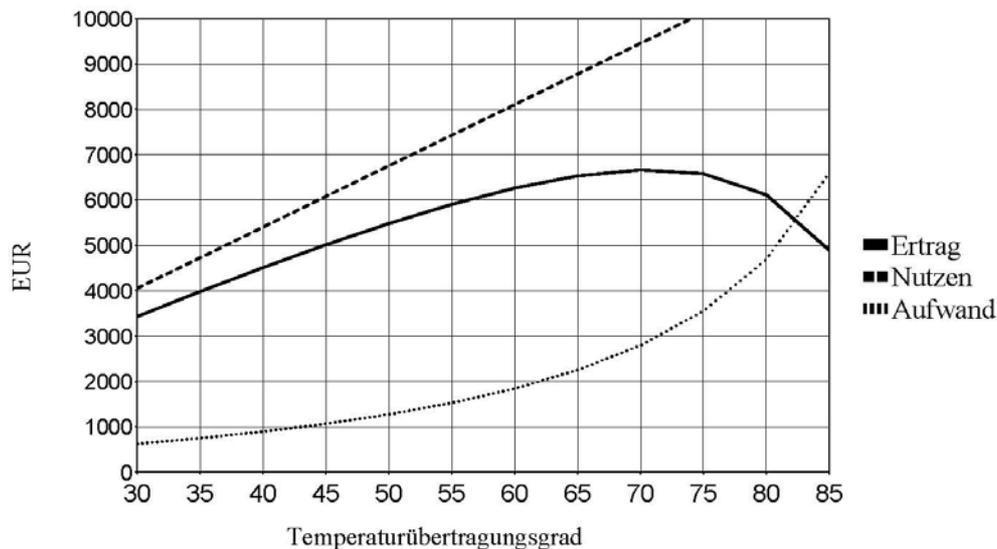
 Berechnung auf Basis der Wirtschaftlichkeitsberechnung und deren Rahmenbedingungen (Toleranzband ± 1 % der Kosten)


Tabelle 11: Optimierung unter den gegebenen Rahmenbedingungen mit Verdunstungskühlung

Das Optimum der Nutzung liegt bei den gegebenen Rahmenbedingungen bei ca. 0,71 (Bereich 0,67 bis 0,74 unter Berücksichtigung einer Toleranz von ± 1 % der Kostenberechnung).

6 Berücksichtigung der erweiterten Bilanzgrenze

Wir die Minderung der Kältemaschinen (mechanische Kältemaschine) mit 269 €/KW ebenfalls berücksichtigt, ergibt sich folgendes Bild (siehe Tabelle 12 und 13).

Es wird ersichtlich, dass der Kapitalwert der Ersparnisse von 87.352 € auf 97.323 € steigt. Die Amortisation liegt in beiden Fällen unter einem Jahr. Ohne Verdunstungskühlung sinkt die Investition für die Kältemaschine durch die WRG um 6.591 € (269 €/KW). Mit Verdunstungskühlung sinkt die Investition der Kälteerzeugung um 12.240 €..

Die indirekte Verdunstungskühlung in der Raumluftechnik

| | |
|---|---------------------------|
| 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 | 5 d / w |
| Betriebsstunden pro Tag | 10 h / d |
| Betriebsstunden pro Nacht | 0 h / d |
| Volumenstrom am Tag | 100 % / V max |
| Volumenstrom in der Nacht | 50 % / V max |
| Investitionskosten der WRG | 11.457 € |
| Mehr-/Minderinvestition für die WRG | 0 € |
| Min.investition fuer Wärmeerzeugung | 0 € / (0 € / kW) |
| Min.investition fuer Kälteerzeugung | -6.591 € / (269 € / kW) |
| Zusatzkosten je Jahr | 0 € |
| Rückgewinn der WRG Wärme | 8.739 € / a |
| Rückgewinn der WRG Kälte | 103 € / a |
| Elektroenergiekosten für die WRG | 1.052 € / a |
| Kapitalkosten für die WRG | 469 € / a |
| Wartungs- und Unterhaltungskosten | 97 € / a |
| Jährliche Differenzkosten | 7.223 € / a |
| Kapitalwert der Ersparnisse | 87.352 € |
| Interner Zinssatz | 1,0 % |
| Amortisation | < 1.0 a |
| Jahresnutzungsgrad (bezogen auf Energien) | 64,3 % |
| Jahresarbeitszahl nach EN 13053 | 12,6 |
| Leistungszahl nach EN 13053 | 25,2 |
| Effektiver Jahreswirkungsgrad EN 13053 | 67,7 % |
| Jährliche CO2 Einsparung | 29,0 t / a |

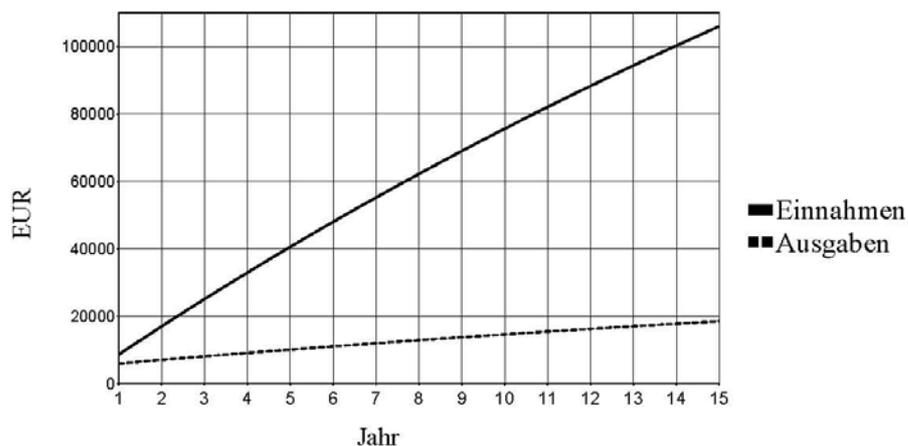
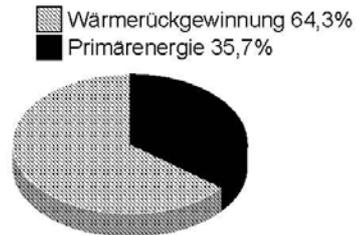


Tabelle 12: : Wirtschaftlichkeit ohne Verdunstungskühlung & kleinerer Kältemaschine

Die indirekte Verdunstungskühlung in der Raumluftechnik

| | |
|--|---------------------------|
| 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 | 5 d / w |
| Betriebsstunden pro Tag | 10 h / d |
| Betriebsstunden pro Nacht | 0 h / d |
| Volumenstrom am Tag | 100 % / V max |
| Volumenstrom in der Nacht | 50 % / V max |
| Investitionskosten der WRG | 14.354 € |
| Mehr-/Minderinvestition für die WRG | 0 € |
| Min.investition fuer Wärmeerzeugung | 0 € / (0 € / kW) |
| Min.investition fuer Kälteerzeugung | -12.240 € / (269 € / kW) |
| Zusatzkosten je Jahr | 0 € |
| Rückgewinn der WRG Wärme | 8.739 € / a |
| Rückgewinn der WRG Kälte | 785 € / a |
| Elektroenergiekosten für die WRG | 1.052 € / a |
| Wasserkosten (indirekte Verdunstungskühlung) | 135 € / a |
| Kapitalkosten für die WRG | 204 € / a |
| Wartungs- und Unterhaltungskosten | 42 € / a |
| Jährliche Differenzkosten | 8.090 € / a |
| Kapitalwert der Ersparnisse | 97.323 € |
| Interner Zinssatz | 1,0 % |
| Amortisation | < 1.0 a |
| Jahresnutzungsgrad (bezogen auf Energien) | 67,6 % |
| Jahresarbeitszahl nach EN 13053 | 13,2 |
| Leistungszahl nach EN 13053 | 25,2 |
| Effektiver Jahreswirkungsgrad EN 13053 | 67,7 % |
| Jährliche CO2 Einsparung | 29,0 t / a |

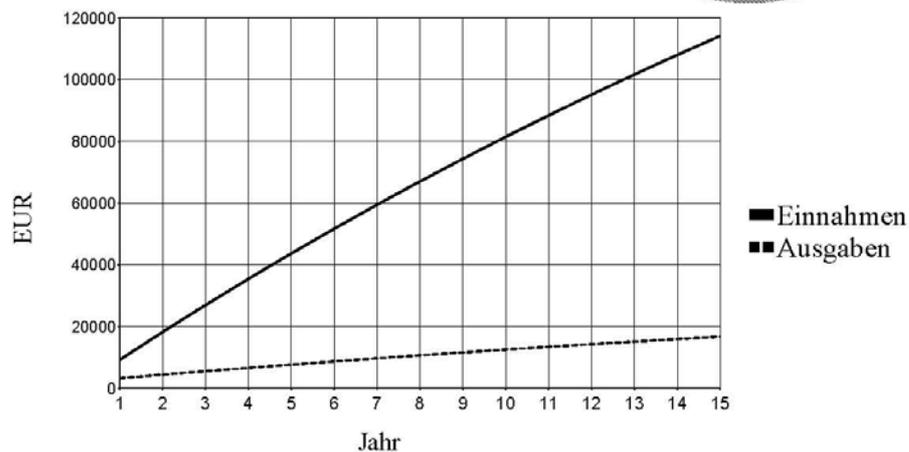
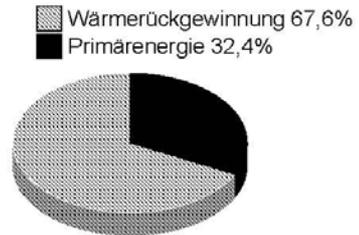


Tabelle 13: : Wirtschaftlichkeit mit Verdunstungskühlung & kleinerer Kältemaschine

7 Alternative Berechnungsergebnisse

Auf Basis des vorgestellten Verfahrens wurden für die genannten Luftmengen folgende Ergebnisse errechnet:

| | erf. | erf. | Anteil sens. | | | | | | | |
|-------------------|-------------|------------|--------------|--------|--------|----------------|------------|-------------|-------------|--|
| Volumenstrom | Wärmearbeit | Kältarbeit | Kühlung | Q erf. | Invest | KW | A | Kühlung WRG | Anteil | |
| m ³ /h | KWh | KWh | % | KW | € | € | a | KWh | % | |
| 4.400 | 39.596 | 2.259 | 5,7% | 18,2 | 16.240 | 22.282 | 1,9 | 208 | 9,2% | |
| 7.400 | 66.616 | 3.799 | 5,7% | 30,6 | 23.626 | 39.229 | 1,7 | 345 | 9,1% | |
| 14.400 | 129.615 | 7.418 | 5,7% | 59,6 | 33.045 | 79.182 | 1,6 | 686 | 9,2% | |
| 28.800 | 259.264 | 14.839 | 5,7% | 119,0 | 50.982 | 157.483 | 1,4 | 1.370 | 9,2% | |

Mit Verdunstungskühlung ergaben sich folgende Werte:

| <i>Mit indirekter Verdunstungskühlung</i> | | | | | | | | | | |
|---|-------------|------------|------------|-------|----------------|------------|-----------------|-------------------|--------------|--|
| | erf. | erf. | | | | | | | | |
| Volumenstrom | Wärmearbeit | Kältarbeit | Invest RLT | Delta | KW | A | Kühlung VK 1:WV | Anteil | | |
| m ³ /h | KWh | KWh | € | % | € | a | KWh | m ³ /a | % | |
| 4.400 | 39.596 | 2.259 | 17.215 | 0,060 | 23.012 | 2,3 | 1.591 | 7 | 70,4% | |
| 7.400 | 66.616 | 3.799 | 25.465 | 0,078 | 40.136 | 2,1 | 2.640 | 12 | 69,5% | |
| 14.400 | 129.615 | 7.418 | 35.808 | 0,084 | 82.149 | 1,8 | 5.234 | 23 | 70,6% | |
| 28.800 | 259.264 | 14.839 | 54.285 | 0,065 | 166.260 | 1,5 | 10.450 | 45 | 70,4% | |

Tabelle 14 : Wirtschaftlichkeitsergebnisse bei anderen Luftmengen (ohne Minderkosten KM)

8 Fazit und Schlussfolgerungen

Anhand der Berechnung ist zu erkennen, dass der Einfluss der Verdunstungskühlung auf die Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems gering ist.

Zuerst einmal bleibt festzuhalten, dass der Schwerpunkt der WRG auf der Wärme, also auf dem Winterfall liegt. Die Wärmearbeiten im Sommerbetrieb, also der sensible Kältebedarf liegt in einer Größenordnung von < 10 % (im Beispiel 5,7 %).

Der Mehrpreis des RLT-Gerätes durch die Verdunstungskühlung liegt im Berechnungsbeispiel bei rund 8,4 %. Ohne Verdunstungskühlung liegt der Anteil der sensiblen Kühlung (WRG basiert) bei rund 9 %. Mit einer einstufigen Verdunstungskühlung kann der Anteil auf rund 70 % gesteigert werden. Damit reduziert sich die erforderliche Kältarbeit von 91 % auf etwa 30 % der ursprünglich benötigten Energiemenge.

Die Amortisationsdauer erhöht sich durch die zusätzliche Investition der Verdunstungskühlung um etwa 0,1 bis 0,4 Jahre. Allerdings steigen im Gegenzug die Kapitalwerte der Ersparnisse um rund 4 %. Je größer die Anlagen werden, desto geringer werden die Unterschiede in der Amortisationszeit. Bei kleinen Anlagen ist der Vergleich der Kapitalwerte zwar immer noch positiv, aber der Unterscheid zu einer Investitionsentscheidung gegen die Verdunstungskühlung führen.

Die indirekte Verdunstungskühlung in der Raumluftechnik

Die Optimierungsrechnung ergibt im Rahmen der Kostentoleranz in etwa gleiche Ergebnisse (Optimum 0,72 ohne zu 0,71 mit Verdunstungskühlung).

Die Lebenszykluskosten für Kälte und Wasserverbrauch reduzieren sich von 12.106 €/a auf 3.926 €/a (Kältekosten) plus 1.620 €/a (Wasserkosten).

Bei anderen Rahmenbedingungen (Laufzeiten, Energie- und Wasserkosten, etc.) können sich die Wirtschaftlichkeitsaussagen verändern. Dies wird vor Allem aus den Tabellen 13 und 14 ersichtlich, welche die Investitionsminderkosten für die Kälteerzeugung berücksichtigen.

Damit kann die Verdunstungskühlung einen entscheidenden Anteil zur Reduzierung der Treibhausgase (F-Gase) leisten.

Auf Basis der Stellungnahme empfehle ich die Förderung der indirekten Verdunstungskühlung im Zusammenhang mit geeigneten WRG-Systemen.

Als Fördervoraussetzung sollte der Temperaturübertragungsgrad der WRG mindestens 0,7 betragen, da das Verdunstungspotenzial nur mit Wirkungsgrad der WRG auf die Zuluftseite übertragen wird.

Des Weiteren würde es Sinn machen den Befeuchtungsgrad der Befeuchtungseinrichtung mit mindestens 0,8 zu fordern.

Generell sollte aus unserer Sicht die Verdunstungskühlung auch an Anwendungsfälle gekoppelt werden, die einen Kühlbedarf aufweisen und Abluftkonditionen besitzen, die für die Verdunstung geeignet sind.

Abschließend sollten Anlagen für Gebäude mit sehr hohen Feuchtelasten (z. B. Schwimmbäder) aus der Förderung ausgenommen werden, da in diesen Fällen die Verdunstungskühlung keinen Sinn macht.

Alternativ bietet sich auch eine Förderung an, die an die mögliche Kühlleistung gekoppelt ist. Dabei ist es aber unabdingbar, einen Referenzzustand zu wählen, um die Leistung normiert bestimmen zu können. Dieser Referenzzustand könnte bei 32°C und 40 % (Rel. Feuchte) der Außenluft und bei 25 und 60 % der Abluft liegen. In beiden Betriebspunkten liegt die absolute Feuchte der Luft somit auf gleichem Niveau.

Birkenfeld, 12.08.2016

Prof. Dr.-Ing. Christoph Kaup

Honoraryprofessur für Energieeffizienz
und Wärmerückgewinnung



Umwelt-Campus Birkenfeld
Hochschule Trier, Standort Birkenfeld
Hochschule für Wirtschaft, Technik und Gestaltung

Postfach 13 80
D-55761 Birkenfeld

Telefon: +49 6782 17-18 19
Telefax: +49 6782 17-13 17
E-Mail: info@umwelt-campus.de

www.umwelt-campus.de

