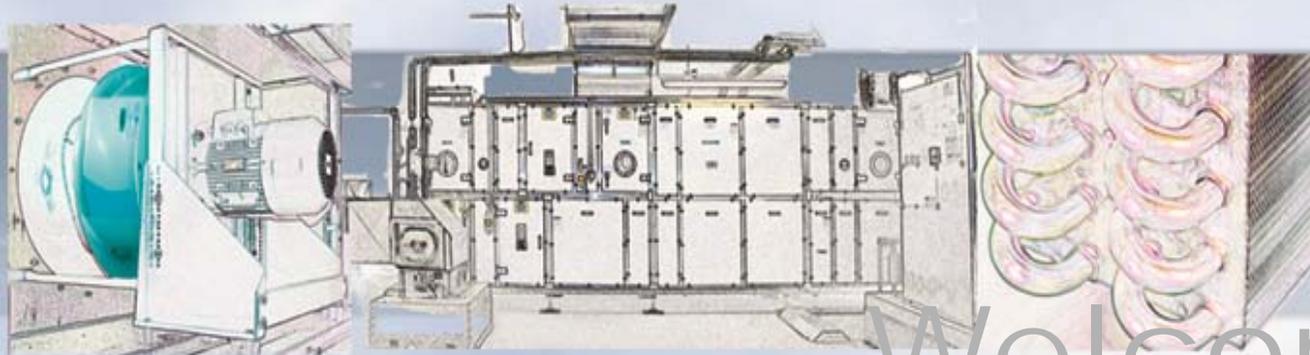


# Willkommen



# Bienvenue

# Welcome

## Bessere Raumluftqualität durch Raumlüftung

Wie im Vergleich zur Fensterlüftung Raumluft-  
technische Anlagen mit WRG Aerosole und CO<sub>2</sub>-  
Belastungen in Räumen verringern.

Prof. Dr.-Ing. Christoph Kaup  
c.kaup@umwelt-campus.de



Umwelt-Campus  
Birkenfeld

H O C H  
S C H U L E  
T R I E R

# Systemkriterien Lüftung

|                                   | <b>Fensterlüftung</b>  | <b>Abluftunterstützte Fensterlüftung</b>   | <b>Raumlufttechnik mit WRG</b>  | <b>Luftreiniger</b>  |
|-----------------------------------|--|--|---|--|
| <b>Luftaustausch</b>              | vom Dichteunterschied und Winddruck abhängig   | unterstützt durch kontrollierten Abluftstrom   | Zu- und Abluft werden maschinell und kontrolliert eingebracht   | Kein Luftaustausch, da Umluftbetrieb (keine Frischluft, keine Reinigung von Gasen) |
| <b>Temperaturabhängigkeit</b>     | hoch, da Dichteunterschied von der Temperaturdifferenz abhängt   | mittel, da Abluftventilator unterstützt  | gering bis nicht vorhanden da Menge mechanisch kontrolliert und temperiert  | Keine  |
| <b>Regelung</b>                   | Manuell, Fenster zu, Kipp oder offen<br>Stoß oder Dauerlüftung   | Manuell, Fenster zu, Kipp oder offen<br>Ventilator an/aus oder drehzahl geregelt   | Ventilatoren an/aus oder drehzahl geregelt (z. B. nach CO <sub>2</sub> -Konzentration)                              | Meist manuell nach Belegung<br>Luftmenge teilweise nach CO <sub>2</sub> geregelt   |
| <b>Eingriff durch Nutzer</b>      | wenn Fenster zu öffnen hoch  | wenn Fenster zu öffnen hoch  | gering, da meist Bedienung automatisch  | Je nach Belegung nötig   |
| <b>Fehlverhalten durch Nutzer</b> | Leicht möglich, da Fenster geschlossen werden, wenn Komfort unbehaglich<br>Luftaustausch bei geschlossenen Fenstern nicht mehr gegeben | Leicht möglich, da Fenster geschlossen werden, wenn Komfort unbehaglich<br>Luftaustausch bei geschlossenen Fenstern nicht mehr gegeben - Luftaustausch zu Räumen möglich (Querkontamination) | kaum möglich, da Bedienung durch Nutzer meist gesperrt oder Bedienung durch Nutzer in klaren Grenzen definiert sind | Möglich durch falsche Einstellung (Stufen)   |
| <b>Nutzerakzeptanz</b>            | hoch, da Eingriff bei zu öffnenden Fenstern möglich<br>und niedrig, wenn der Komfort unbehaglich wird (tiefe Temp.)                    | hoch, da Eingriff bei zu öffnenden Fenstern möglich<br>und niedrig, wenn der Komfort unbehaglich wird (tiefe Temp.)  | mittel, da Nutzer meist keine oder wenige Eingriffsmöglichkeit haben  | hoch, da Eingriff bei zu öffnenden Fenstern möglich                                |
| <b>Nachströmung</b>               | Durch geöffnetes Fenster, wenn nicht geschlossen   | Durch geöffnetes Fenster, wenn nicht geschlossen   | kontrolliert durch Zuluftventilator   | Systembedingt keine  |

# Systemkriterien Lüftung

|                           | <b>Fensterlüftung</b>  | <b>Abluftunterstützte Fensterlüftung</b>  | <b>Raumlufttechnik mit WRG</b>  | <b>Luftreiniger</b>   |
|---------------------------|--|---|---|---|
| <b>Lufterwärmung</b>      | Keine bzw. durch statische Heizflächen im Raum   | Keine bzw. bedingt durch statische Heizflächen im Raum  | Vorerwärmung durch WRG und bei Bedarf durch stat. Heizflächen im Raum oder Erwärmer in der RLT  | Keine, bzw. nur durch Abwärme   |
| <b>Luftkühlung</b>        | Keine bzw. durch statische Kühlflächen im Raum (meist nicht vorhanden)   | Keine bzw. bedingt durch statische Kühlflächen im Raum (meist nicht vorhanden)  | Kühlung durch WRG möglich und bei Bedarf durch stat. Kühlflächen im Raum oder Kühler in der RLT<br><br>Kühlung durch indirekte Verdunstungskühlung über die WRG ohne Kältemaschine möglich  | systembedingt keine Kühlung   |
| <b>Wärmerückgewinnung</b> | Keine  | Keine   | bis 80 % RWZ ökologisch sinnvoll  | nicht erforderlich, da Umluft   |
| <b>Ökonomie</b>           | Schlecht, da Nutzwärme aus dem Fenster entweicht<br><br>Weitere Kosten sind nicht vorhanden, da Fenster sowieso vorhanden sind | Schlecht, da Nutzwärme aus dem Fenster entweicht<br><br>Schlechter als reine Fensterlüftung, da Abluftanlage investiert werden muss | Bezogen auf WRG sehr positiv, insbesondere da die Wärme- und Kälteversorgung verringert werden können<br><br>Schlecht wenn die komplette RLT durch die WRG "finanziert" werden soll ergeben sich meist negative Kapitalwerte (Kosten entstehen) | positiv, da Wärme nicht beeinflusst wird  |
| <b>Ökologie</b>           | Schlecht, da Nutzwärme aus dem Fenster entweicht<br><br>keine CO <sub>2</sub> -Reduktion                                       | Schlecht, da Nutzwärme aus dem Fenster entweicht<br><br>keine CO <sub>2</sub> -Reduktion  | Sehr gut, da die CO <sub>2</sub> -Bilanz trotz RLT-Anlage positiv ist<br><br>CO <sub>2</sub> -Einsparung rund 1 to./a pro Klassenraum (ca. 1.000 m <sup>3</sup> /h)   | Neutral, da keine Wärme oder Feuchte beeinflusst wird (nur graue CO <sub>2</sub> -Emission) |
| <b>zusätzliche Kosten</b> | Keine  | ca. 2.000 €   | ca. 13.000 €  | ca. 4.000 €   |

# Systemkriterien Lüftung

|   | <b>Fensterlüftung</b>   | <b>Abluftunterstützte Fensterlüftung</b>  | <b>Raumlufttechnik mit WRG</b>  | <b>Luftreiniger</b>   |
|---|---|---|---|---|
| <b>Komfort</b>                          | eingeschränkt, da im Winter unbehandelte Luft einströmt<br><br>Zugerscheinungen insbesondere bei kalter Luft wahrscheinlich | eingeschränkt, da im Winter unbehandelte Luft einströmt<br><br>Zugerscheinungen insbesondere bei kalter Luft gegeben    | gegeben, da Temperierung der Zuluft   | kein Einfluss auf Komfort<br><br>Zugerscheinungen möglich, da Einpunktquelle  |
| <b>Filterung</b>                        | Keine   | Keine (bei Verwendung von Abluft ist normativ keine Zuluftfilterung erforderlich)                                       | Ausreichend - nach VDI und Normen ISO ePM1 60 % erforderlich  | Sehr gut, meist HEPA min. H13   |
| <b>Lüftungseffektivität</b>             | eingeschränkt, da Luftaustausch unkontrolliert  | hoch, da meist Quelllüftung vorherrscht (bei Untertemperatur)<br><br>je nach Außenlufttemp. kann Mischlüftung entstehen | sehr hoch, da Quelllüftung immer gewährleistet werden kann (Untertemperatur)<br><br>bei Bedarf ist auch Mischlüftung kontrolliert möglich | niedrig da Mischlüftung (Einpunktquelle im Raum, keine Untertemperatur möglich)   |
| <b>CO<sub>2</sub>-Reduktion im Raum</b> | Bei geöffnetem Fenster je nach Temperatur gut   | Gut, je nach Luftmenge  | Gut, je nach Luftmenge  | Schlecht, CO <sub>2</sub> -Reduktion systembedingt nicht möglich  |
| <b>Schalldämpfung</b>                   | nur bei geschlossenem Fenster (keine Lüftung!)  | nur bei geschlossenem Fenster (keine Lüftung!)<br><br>Bei geschlossenem Fenster Querkontamination möglich               | durch raumorientierte Schalldämpfer gut   | nur bei raumorientierten Schalldämpfern gut<br><br>Schalldämpfer werden oft nicht berücksichtigt, dann schlecht         |
| <b>Brandschutz</b>                      | sehr gut, da keine zus. Brandlasten   | schlecht, da zus. Brandlasten durch Kunststoffe entstehen   | sehr gut bei zentralen Anlage<br>mittel bei dezentralen Anlagen<br><br>durch geringe Erhöhung der Brandlasten (Verwendung Metalle)        | mittel durch geringe Erhöhung der Brandlasten (Verwendung von Metallen)<br><br>schlecht bei Verwendung von Kunststoffen |

# WRG-Zustände während des Jahres

Beispiel Schule  
(Klassenraum)  
mit 1.200 m<sup>3</sup>/h  
LW = 5 (240 m<sup>3</sup>)  
40 m<sup>3</sup>/h/Person  
bei 30 Personen

| AL<br>°C | RL<br>°C | ETA<br>% | WRG<br>°C | ZL<br>°C | dT<br>°C | Q WRG<br>kW | Q zus.<br>kW | Q ext.<br>kW | Status |
|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|-------------|--------------|--------------|--------|
| -14,5    | 20,0     | 58,0     | 5,5       | 20,5     | 20,0     | 8,3         | 6,2          | 0,0          | V      |
| -13,5    | 20,0     | 59,7     | 6,5       | 20,5     | 20,0     | 8,3         | 5,8          | 0,0          | V      |
| -12,5    | 20,0     | 61,5     | 7,5       | 20,5     | 20,0     | 8,3         | 5,4          | 0,0          | V      |
| -11,5    | 20,0     | 63,5     | 8,5       | 20,5     | 20,0     | 8,3         | 5,0          | 0,0          | V      |
| -10,5    | 20,0     | 65,6     | 9,5       | 20,5     | 20,0     | 8,3         | 4,5          | 0,0          | V      |
| -9,5     | 20,0     | 67,8     | 10,5      | 20,5     | 20,0     | 8,3         | 4,1          | 0,0          | V      |
| -8,5     | 20,0     | 70,2     | 11,5      | 20,5     | 20,0     | 8,3         | 3,7          | 0,0          | V      |
| -7,5     | 20,0     | 72,7     | 12,5      | 20,5     | 20,0     | 8,3         | 3,3          | 0,0          | V      |
| -6,5     | 20,0     | 75,5     | 13,5      | 20,5     | 20,0     | 8,3         | 2,9          | 0,0          | V      |
| -5,5     | 20,0     | 78,4     | 14,5      | 20,5     | 20,0     | 8,3         | 2,5          | 0,0          | V      |
| -4,5     | 20,0     | 78,6     | 14,8      | 20,5     | 19,3     | 8,0         | 2,4          | 0,0          |        |
| -3,5     | 20,0     | 78,6     | 15,0      | 20,5     | 18,5     | 7,6         | 2,3          | 0,0          |        |
| -2,5     | 20,0     | 78,6     | 15,2      | 20,5     | 17,7     | 7,3         | 2,2          | 0,0          |        |
| -1,5     | 20,0     | 78,6     | 15,4      | 20,5     | 16,9     | 7,0         | 2,1          | 0,0          |        |
| -0,5     | 20,0     | 78,6     | 15,6      | 20,5     | 16,1     | 6,7         | 2,0          | 0,0          |        |
| 0,5      | 20,0     | 78,6     | 15,8      | 20,5     | 15,3     | 6,3         | 1,9          | 0,0          |        |
| 1,5      | 20,0     | 78,6     | 16,0      | 20,5     | 14,5     | 6,0         | 1,8          | 0,0          |        |
| 2,5      | 20,0     | 78,6     | 16,3      | 20,5     | 13,8     | 5,7         | 1,8          | 0,0          |        |
| 3,5      | 20,0     | 78,6     | 16,5      | 20,5     | 13,0     | 5,4         | 1,7          | 0,0          |        |
| 4,5      | 20,0     | 78,6     | 16,7      | 20,5     | 12,2     | 5,0         | 1,6          | 0,0          |        |
| 5,5      | 20,0     | 78,6     | 16,9      | 20,5     | 11,4     | 4,7         | 1,5          | 0,0          |        |
| 6,5      | 20,0     | 78,6     | 17,1      | 20,5     | 10,6     | 4,4         | 1,4          | 0,0          |        |
| 7,5      | 20,0     | 78,6     | 17,3      | 20,5     | 9,8      | 4,1         | 1,3          | 0,0          |        |
| 8,5      | 20,0     | 78,6     | 17,5      | 20,5     | 9,0      | 3,7         | 1,2          | 0,0          |        |
| 9,5      | 20,0     | 78,6     | 17,8      | 20,5     | 8,3      | 3,4         | 1,1          | 0,0          |        |
| 10,5     | 20,0     | 78,6     | 18,0      | 20,5     | 7,5      | 3,1         | 1,0          | 0,0          |        |
| 11,5     | 20,0     | 78,6     | 18,2      | 20,5     | 6,7      | 2,8         | 1,0          | 0,0          |        |
| 12,5     | 20,0     | 78,6     | 18,4      | 20,5     | 5,9      | 2,4         | 0,9          | 0,0          |        |
| 13,5     | 20,0     | 78,6     | 18,6      | 20,5     | 5,1      | 2,1         | 0,8          | 0,0          |        |
| 14,5     | 20,0     | 78,6     | 18,8      | 20,5     | 4,3      | 1,8         | 0,7          | 0,0          |        |
| 15,5     | 20,0     | 78,6     | 19,0      | 20,5     | 3,5      | 1,5         | 0,6          | 0,0          |        |
| 16,5     | 20,0     | 78,6     | 19,3      | 20,5     | 2,8      | 1,1         | 0,5          | 0,0          |        |
| 17,5     | 20,0     | 78,6     | 19,5      | 20,5     | 2,0      | 0,8         | 0,4          | 0,0          |        |
| 18,5     | 20,0     | 78,6     | 19,7      | 20,5     | 1,2      | 0,5         | 0,3          | 0,0          |        |
| 19,5     | 20,0     | 78,6     | 19,9      | 20,5     | 0,4      | 0,2         | 0,3          | 0,0          |        |
| 20,5     | 20,5     | 0,0      | 20,5      | 0,0      | 0,0      | 0,0         | 0,0          | 0,0          | AUS    |
| 21,5     | 21,5     | 0,0      | 21,5      | 21,5     | 0,0      | 0,0         | -0,6         | 0,0          | AUS    |
| 22,5     | 22,5     | 0,0      | 22,5      | 22,5     | 0,0      | 0,0         | -1,0         | 0,0          | AUS    |
| 23,5     | 23,5     | 0,0      | 23,5      | 23,5     | 0,0      | 0,0         | -1,4         | 0,0          | AUS    |
| 24,5     | 24,5     | 0,0      | 24,5      | 24,5     | 0,0      | 0,0         | -1,9         | 0,0          | AUS    |
| 25,5     | 25,5     | 0,0      | 25,5      | 25,5     | 0,0      | 0,0         | -2,3         | 0,0          | AUS    |
| 26,5     | 26,0     | 78,6     | 26,1      | 20,0     | -0,4     | -0,2        | -2,5         | 0,0          |        |
| 27,5     | 26,0     | 78,6     | 26,3      | 20,0     | -1,2     | -0,5        | -2,6         | 0,0          |        |
| 28,5     | 26,0     | 78,6     | 26,5      | 20,0     | -2,0     | -0,8        | -2,7         | 0,0          |        |
| 29,5     | 26,0     | 78,6     | 26,7      | 20,0     | -2,8     | -1,1        | -2,8         | 0,0          |        |

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 !

# WRG-Energien während des Jahres

Standort Kassel  
Stundenverteilung  
nach DIN 4710

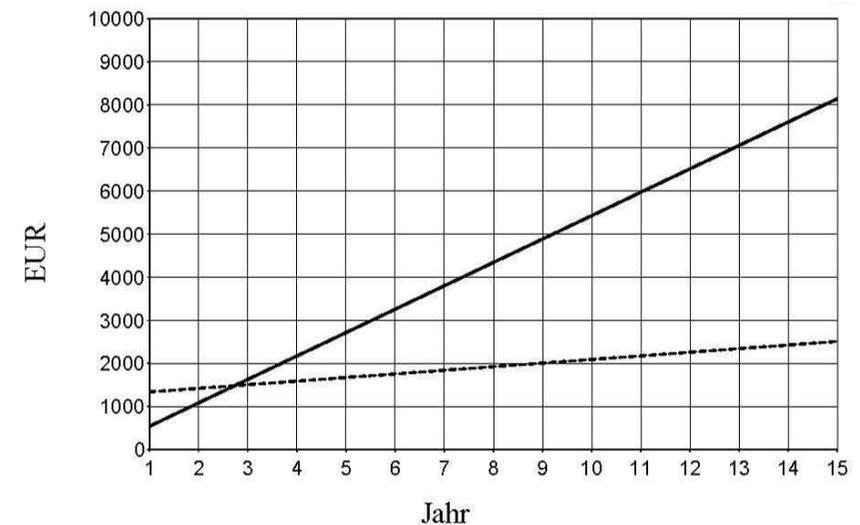
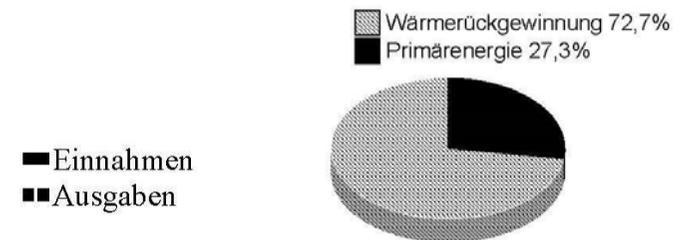
Primärenergie

6.222 kWh · 1,1  
- 245 kWh · 1,8  
= 6.403 kWh/a

| 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          |        |
| < -13,5                | 8,3   | 3            |         | 39           |            | 22           |           |                |              |        |
| -13,5                  | 8,3   | 1            |         | 15           |            | 9            |           |                |              |        |
| -12,5                  | 8,3   | 2            |         | 27           |            | 16           |           |                |              |        |
| -11,5                  | 8,3   | 3            |         | 36           |            | 22           |           |                |              |        |
| -10,5                  | 8,3   | 3            |         | 43           |            | 28           |           |                |              |        |
| -9,5                   | 8,3   | 5            |         | 65           |            | 44           |           |                |              |        |
| -8,5                   | 8,3   | 6            |         | 73           |            | 50           |           |                |              |        |
| -7,5                   | 8,3   | 8            |         | 87           |            | 62           |           |                |              |        |
| -6,5                   | 8,3   | 10           |         | 107          |            | 79           |           |                |              |        |
| -5,5                   | 8,3   | 13           |         | 134          |            | 104          |           |                |              |        |
| -4,5                   | 8,0   | 17           |         | 175          |            | 136          |           |                |              |        |
| -3,5                   | 7,6   | 22           |         | 216          |            | 166          |           |                |              |        |
| -2,5                   | 7,3   | 27           |         | 260          |            | 200          |           |                |              |        |
| -1,5                   | 7,0   | 37           |         | 333          |            | 256          |           |                |              |        |
| -0,5                   | 6,7   | 42           |         | 363          |            | 280          |           |                |              |        |
| 0,5                    | 6,3   | 64           |         | 532          |            | 404          |           |                |              |        |
| 1,5                    | 6,0   | 72           |         | 566          |            | 430          |           |                |              |        |
| 2,5                    | 5,7   | 76           |         | 562          |            | 433          |           |                |              |        |
| 3,5                    | 5,4   | 78           |         | 547          |            | 422          |           |                |              |        |
| 4,5                    | 5,0   | 77           |         | 510          |            | 386          |           |                |              |        |
| 5,5                    | 4,7   | 75           |         | 468          |            | 354          |           |                |              |        |
| 6,5                    | 4,4   | 77           |         | 448          |            | 340          |           |                |              |        |
| 7,5                    | 4,1   | 75           |         | 404          |            | 307          |           |                |              |        |
| 8,5                    | 3,7   | 72           |         | 359          |            | 266          |           |                |              |        |
| 9,5                    | 3,4   | 69           |         | 311          |            | 235          |           |                |              |        |
| 10,5                   | 3,1   | 73           |         | 297          |            | 225          |           |                |              |        |
| 11,5                   | 2,8   | 73           |         | 268          |            | 203          |           |                |              |        |
| 12,5                   | 2,4   | 76           |         | 252          |            | 183          |           |                |              |        |
| 13,5                   | 2,1   | 79           |         | 229          |            | 166          |           |                |              |        |
| 14,5                   | 1,8   | 75           |         | 187          |            | 135          |           |                |              |        |
| 15,5                   | 1,5   | 72           |         | 151          |            | 108          |           |                |              |        |
| 16,5                   | 1,1   | 71           |         | 121          |            | 78           |           |                |              |        |
| 17,5                   | 0,8   | 63           |         | 75           |            | 50           |           |                |              |        |
| 18,5                   | 0,5   | 57           |         | 45           |            | 28           |           |                |              |        |
| 19,5                   | 0,2   | 47           |         | 19           |            | 9            |           |                |              |        |
| 20,5                   | 0,0   | 41           |         |              |            |              |           |                |              |        |
| 21,5                   | 0,0   | 36           |         |              |            |              | 21        |                |              |        |
| 22,5                   | 0,0   | 30           |         |              |            |              | 30        |                |              |        |
| 23,5                   | 0,0   | 24           |         |              |            |              | 34        |                |              |        |
| 24,5                   | 0,0   | 20           |         |              |            |              | 38        |                |              |        |
| 25,5                   | 0,0   | 18           |         |              |            |              | 41        |                |              |        |
| 26,5                   | -0,2  | 13           |         |              |            |              | 36        |                | 3            |        |
| 27,5                   | -0,5  | 8            |         |              |            |              | 26        |                | 4            |        |
| 28,5                   | -0,8  | 7            |         |              |            |              | 24        |                | 5            |        |
| > 28,5                 | -1,1  | 11           |         |              |            |              | 44        |                | 12           |        |
| <b>Gesamt DIN 4710</b> |       | <b>1.826</b> |         | <b>8.308</b> | <b>287</b> | <b>6.222</b> | <b>23</b> |                |              |        |
| <b>Jahr 7-Kassel</b>   |       |              |         |              |            |              |           | <b>1.617 h</b> | <b>167 h</b> |        |

|   |                         |
|---|-------------------------|
| Energiekosten Wärme                       | 0,080 € / kWh           |
| Energiekosten Kälte                       | 0,080 € / kWh           |
| Energiekosten Elektro                     | 0,240 € / kWh           |
| Wasserkosten (inkl. Abwasser)             | 6,00 € / m <sup>3</sup> |
| Kalkulationszinsfuß                       | 2,00 %                  |
| Preissteigerungsrate                      | 2,00 %                  |
| Klimazone/ Standort                       | 7-Kassel                |
| Nutzungsdauer der Anlage                  | 15 a                    |
| Betriebstage pro Woche                    | 5 d / w                 |
| Betriebstunden pro Tag                    | 7 h / d                 |
| Betriebsstunden pro Nacht                 | 0 h / d                 |
| Volumenstrom am Tag                       | 100 % / V max           |
| Volumenstrom in der Nacht                 | 50 % / V max            |
| Investitionskosten der WRG                | 2.450 €                 |
| Mehr-/Minderinvestition für die WRG       | 0 € nur WRG             |
| Min.investition für Wärmeerzeugung        | -1.195 € / (144 € / kW) |
| Min.investition für Kälteerzeugung        | 0 € / (0 € / kW)        |
| Zusatzkosten je Jahr                      | 0 €                     |
| Rückgewinn der WRG Wärme                  | 498 € / a               |
| Rückgewinn der WRG Kälte                  | 2 € / a                 |
| Jährliche CO2 Einsparung                  | 43 € / a / (25 € / to.) |
| Elektroenergiekosten für die WRG          | 59 € / a                |
| Kapitalkosten für die WRG                 | 98 € / a                |
| Wartungs- und Unterhaltungskosten         | 25 € / a                |
| Jährliche Differenzkosten                 | 361 € / a               |
| Kapitalwert der Ersparnisse               | 5.630 €                 |
| Kalkulationszinsfuß                       | 39,0 %                  |
| Amortisation                              | 2,7 a                   |
| Jahresnutzungsgrad (bezogen auf Energien) | 72,7 %                  |
| Jahresarbeitszahl nach EN 13053           | 25,5                    |
| Leistungszahl nach EN 13053               | 47,0                    |
| Effektiver Jahreswirkungsgrad EN 13053    | 76,9 %                  |

## Nur WRG Betrachtung mit Einsparung Wärme- und Kälteerzeugung



# WRG-1D-Optimum ökonomisch

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

| Effizienz WRG | Bautiefe zur Auslegung | Nutzen €/a     | Aufwand €/a   | Ertrag €/a     |
|---------------|------------------------|----------------|---------------|----------------|
| 30,0 %        | 11,7 %                 | 208,4 €        | -3,5 €        | 211,9 €        |
| 35,0 %        | 14,7 %                 | 243,1 €        | -1,2 €        | 244,3 €        |
| 40,0 %        | 18,2 %                 | 277,8 €        | 2,5 €         | 275,3 €        |
| 45,0 %        | 22,3 %                 | 312,4 €        | 7,9 €         | 304,5 €        |
| 50,0 %        | 27,2 %                 | 347,0 €        | 15,6 €        | 331,4 €        |
| 55,0 %        | 33,3 %                 | 381,6 €        | 26,3 €        | 355,3 €        |
| 60,0 %        | 40,8 %                 | 416,0 €        | 41,1 €        | 374,9 €        |
| 65,0 %        | 50,6 %                 | 450,4 €        | 61,9 €        | 388,5 €        |
| <b>69,0 %</b> | <b>60,6 %</b>          | <b>477,8 €</b> | <b>84,7 €</b> | <b>393,1 €</b> |
| 70,0 %        | 63,5 %                 | 484,6 €        | 91,5 €        | 393,1 €        |
| 75,0 %        | 81,7 %                 | 518,6 €        | 135,4 €       | 383,2 €        |

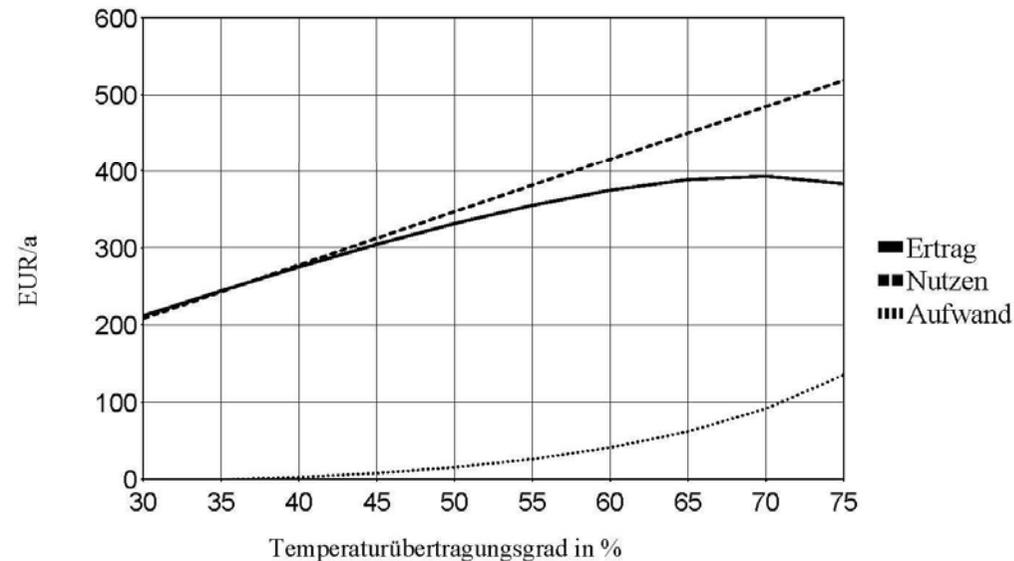
Kosten (Nutzen, Aufwand und Ertrag der WRG) pro Jahr

Auslegung mit einer Luftgeschwindigkeit im Zu- und Abluftgerätequerschnitt 0,80 m/s - 78,6 %

CO2 Einsparung im Optimum 1,6 t/a

## Optimale Rückwärmzahl der WRG **69 % ( 66 - 73 % )**

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



# WRG-3D-Optimum ökonomisch

## WRG-SYSTEME OPTIMIERUNG (ökonomisch / mehrdimensional)

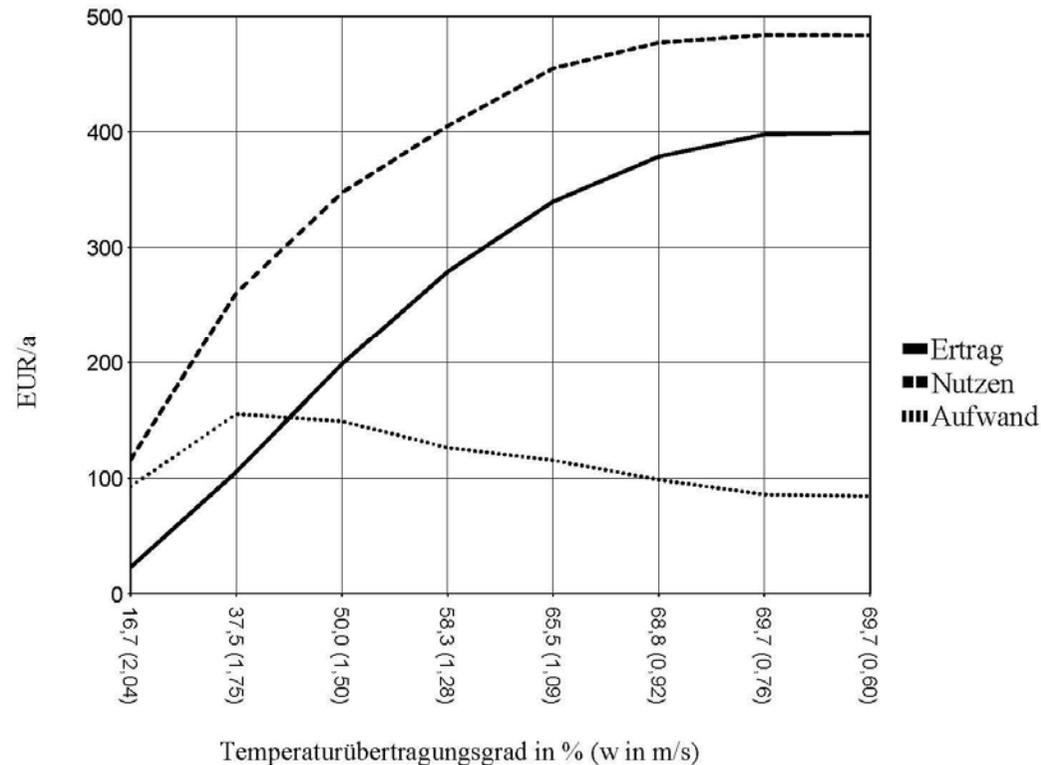
| Effizienz WRG       | Q.-Fläche bez. 2 m/s | w in m/s        | Bautiefe zur Auslegung | Nutzen €/a     | Aufwand €/a   | Ertrag €/a     |
|---------------------|----------------------|-----------------|------------------------|----------------|---------------|----------------|
| 16,7 %              | 97,8 %               | 2,04 m/s        | 9,6 %                  | 115,9 €        | 92,9 €        | 23,1 €         |
| 37,5 %              | 114,2 %              | 1,75 m/s        | 26,1 %                 | 260,8 €        | 155,4 €       | 105,4 €        |
| 50,0 %              | 133,2 %              | 1,50 m/s        | 39,7 %                 | 347,6 €        | 149,1 €       | 198,5 €        |
| 58,3 %              | 155,8 %              | 1,28 m/s        | 50,6 %                 | 405,4 €        | 126,3 €       | 279,2 €        |
| 65,5 %              | 183,3 %              | 1,09 m/s        | 62,3 %                 | 455,2 €        | 115,4 €       | 339,8 €        |
| 68,8 %              | 218,1 %              | 0,92 m/s        | 65,0 %                 | 477,4 €        | 98,6 €        | 378,8 €        |
| 69,7 %              | 264,6 %              | 0,76 m/s        | 60,5 %                 | 483,9 €        | 85,9 €        | 398,0 €        |
| <b>max.: 69,7 %</b> | <b>288,1 %</b>       | <b>0,69 m/s</b> | <b>57,5 %</b>          | <b>483,8 €</b> | <b>83,2 €</b> | <b>400,6 €</b> |
| 69,7 %              | 331,6 %              | 0,60 m/s        | 52,9 %                 | 483,7 €        | 84,3 €        | 399,4 €        |

Geometrie in % der Ursprungsfläche der Auslegung. Kosten (Nutzen, Aufwand und Ertrag der WRG) pro Jahr. Exponent zur Änderung des  $\Delta P$  1,6

Auslegung mit einer Luftgeschwindigkeit im Zu- und Abluftgeräteequerschnitt 0,80 m/s - 78,6 %

CO<sub>2</sub> Einsparung im Optimum 1,6 t/a

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



# WRG-1D-Optimum ökologisch

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

| Effizienz WRG | Bautiefe zur Auslegung | Nutzen kg CO2/a | Aufwand kg CO2/a | Reduktion kg CO2/a |
|---------------|------------------------|-----------------|------------------|--------------------|
| 30,0 %        | 11,7 %                 | 713             | 4                | 709                |
| 35,0 %        | 14,7 %                 | 832             | 7                | 826                |
| 40,0 %        | 18,2 %                 | 951             | 10               | 941                |
| 45,0 %        | 22,3 %                 | 1070            | 15               | 1055               |
| 50,0 %        | 27,2 %                 | 1189            | 21               | 1168               |
| 55,0 %        | 33,3 %                 | 1308            | 29               | 1279               |
| 60,0 %        | 40,8 %                 | 1427            | 40               | 1386               |
| 65,0 %        | 50,6 %                 | 1546            | 55               | 1490               |
| 70,0 %        | 63,5 %                 | 1665            | 77               | 1588               |
| 75,0 %        | 81,7 %                 | 1783            | 107              | 1676               |
| 80,0 %        | 108,9 %                | 1902            | 155              | 1747               |
| 85,0 %        | 154,3 %                | 2021            | 236              | 1785               |
| <b>86,0 %</b> | <b>167,2 %</b>         | <b>2045</b>     | <b>260</b>       | <b>1785</b>        |
| 90,0 %        | 245,0 %                | 2140            | 402              | 1738               |
| 95,0 %        | 517,3 %                | 2259            | 905              | 1354               |

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

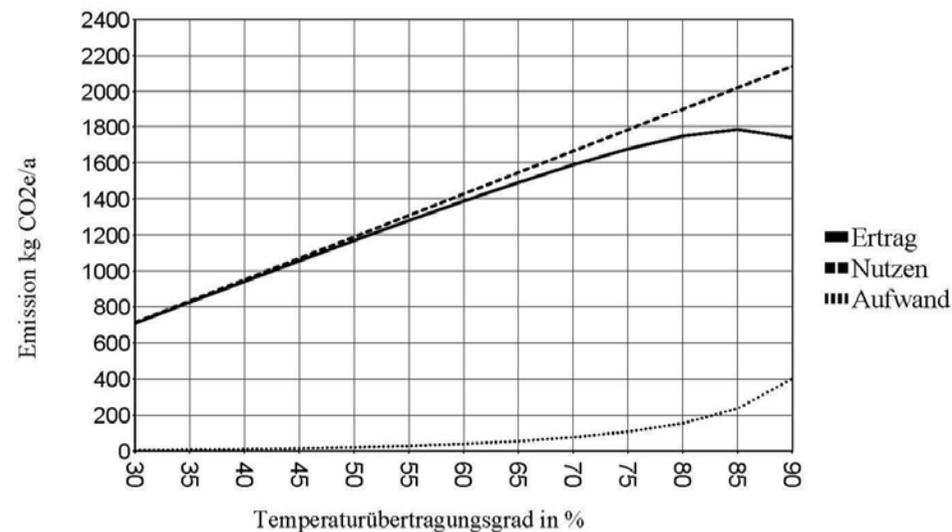
CO2e-Äquivalente pro Jahr berechnet mit 300 g/kWh Wärme, 370 g/kWh Strom, sowie 500 g/€ WRG Invest und sonstige Betriebskosten 220 g/€

Auslegung mit einer Luftgeschwindigkeit im Zu- und Abluftgerätequerschnitt 0,80 m/s - 78,6 %

Auslegung mit einer CO2 Einsparung von 1,7 t/a

### Optimale Rückwärmzahl der WRG **86 % ( 82 - 88 % )**

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



CO<sub>2</sub>-Einsparung

1,73 t./a Auslegung

1,79 t./a Optimierung

# WRG-3D-Optimum ökologisch

## WRG-SYSTEME OPTIMIERUNG (ökologisch / mehrdimensional)

| Effizienz WRG       | Q.-Fläche bez. 2 m/s | w in m/s        | Bautiefe zur Auslegung | Nutzen kg CO2/a | Aufwand kg CO2/a | Reduktion kg CO2/a |
|---------------------|----------------------|-----------------|------------------------|-----------------|------------------|--------------------|
| 23,1 %              | 70,7 %               | 2,83 m/s        | 28,9 %                 | 549             | 416              | 133                |
| 41,2 %              | 83,5 %               | 2,40 m/s        | 57,1 %                 | 979             | 572              | 407                |
| 54,5 %              | 97,8 %               | 2,04 m/s        | 83,5 %                 | 1297            | 593              | 704                |
| 63,0 %              | 114,2 %              | 1,75 m/s        | 101,3 %                | 1497            | 518              | 979                |
| 70,6 %              | 133,2 %              | 1,50 m/s        | 122,6 %                | 1679            | 458              | 1220               |
| 76,7 %              | 155,8 %              | 1,28 m/s        | 144,2 %                | 1825            | 403              | 1422               |
| 80,8 %              | 183,3 %              | 1,09 m/s        | 156,0 %                | 1921            | 335              | 1586               |
| 83,9 %              | 218,1 %              | 0,92 m/s        | 162,3 %                | 1994            | 284              | 1711               |
| 85,9 %              | 264,6 %              | 0,76 m/s        | 156,9 %                | 2043            | 246              | 1797               |
| 86,8 %              | 331,6 %              | 0,60 m/s        | 135,5 %                | 2065            | 222              | 1843               |
| <b>max.: 87,0 %</b> | <b>390,0 %</b>       | <b>0,51 m/s</b> | <b>116,9 %</b>         | <b>2069</b>     | <b>220</b>       | <b>1850</b>        |
| 86,8 %              | 442,4 %              | 0,45 m/s        | 101,5 %                | 2065            | 221              | 1845               |
| 85,3 %              | 688,8 %              | 0,29 m/s        | 57,3 %                 | 2028            | 246              | 1782               |

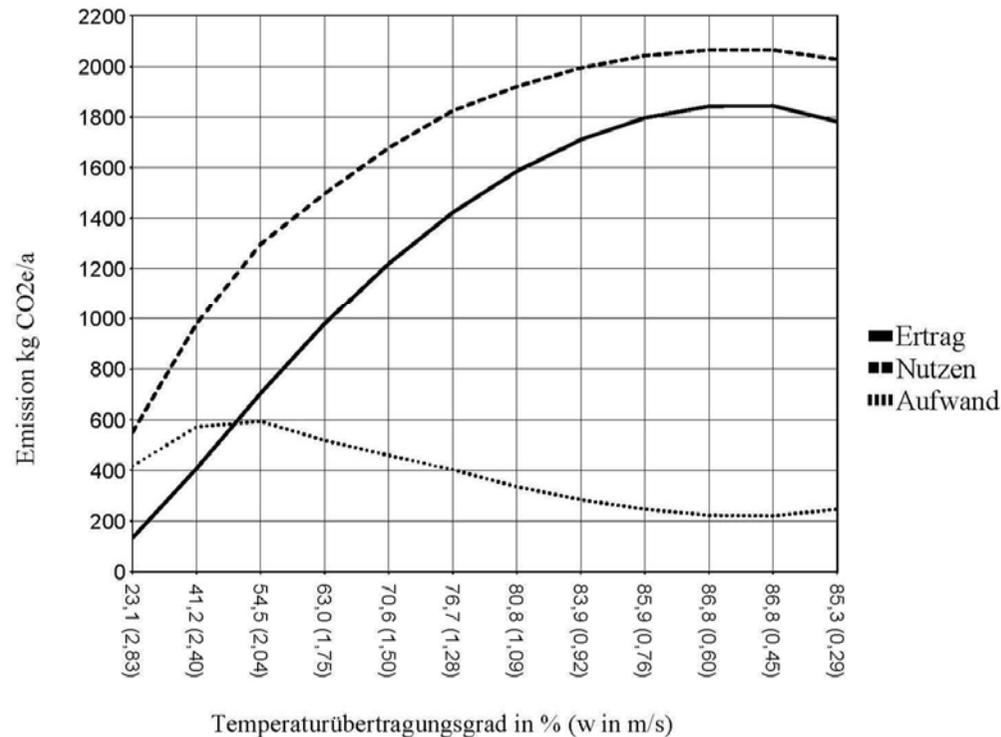
Geometrie in % der Ursprungsfläche der Auslegung. CO2e (Nutzen, Aufwand und Reduktion der WRG) pro Jahr. Exponent zur Änderung des dP 1,6

Auslegung mit einer Luftgeschwindigkeit im Zu- und Abluftgerätequerschnitt 0,80 m/s - 78,6 %  
Auslegung mit einer CO2 Einsparung von 1,7 to./a

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

## CO<sub>2</sub>-Einsparung

1,73 t. Auslegung  
1,85 t. Optimierung



|   |                         |
|---|-------------------------|
| Energiekosten Wärme                       | 0,080 € / kWh           |
| Energiekosten Kälte                       | 0,080 € / kWh           |
| Energiekosten Elektro                     | 0,240 € / kWh           |
| Wasserkosten (inkl. Abwasser)             | 6,00 € / m <sup>3</sup> |
| Kalkulationszinsfuß                       | 2,00 %                  |
| Preissteigerungsrate                      | 2,00 %                  |
| Klimazone/ Standort                       | 7-Kassel                |
| Nutzungsdauer der Anlage                  | 15 a                    |
| Betriebstage pro Woche                    | 5 d / w                 |
| Betriebstunden pro Tag                    | 7 h / d                 |
| Betriebsstunden pro Nacht                 | 0 h / d                 |
| Volumenstrom am Tag                       | 100 % / V max           |
| Volumenstrom in der Nacht                 | 50 % / V max            |
| Investitionskosten der WRG                | 2.450 €                 |
| Mehr-/Minderinvestition für die WRG       | 10.312 € Kompletgerät   |
| Min.investition für Wärmeerzeugung        | -1.195 € / (144 € / kW) |
| Min.investition für Kälteerzeugung        | 0 € / (0 € / kW)        |
| Zusatzkosten je Jahr                      | 0 €                     |
| Rückgewinn der WRG Wärme                  | 498 € / a               |
| Rückgewinn der WRG Kälte                  | 2 € / a                 |
| Jährliche CO <sub>2</sub> Einsparung      | 29 € / a / (25 € / to.) |
| Elektroenergiekosten für die WRG          | 129 € / a               |
| Kapitalkosten für die WRG                 | 900 € / a               |
| Wartungs- und Unterhaltungskosten         | 231 € / a               |
| Jährliche Differenzkosten                 | -731 € / a              |
| Kapitalwert der Ersparnisse               | -9.036 €                |
| Amortisation                              | > 15 a                  |
| Jahresnutzungsgrad (bezogen auf Energien) | 72,7 %                  |
| Jahresarbeitszahl nach EN 13053           | 11,6                    |
| Leistungszahl nach EN 13053               | 21,4                    |
| Effektiver Jahreswirkungsgrad EN 13053    | 74,9 %                  |

## RLT-WRG Betrachtung mit Einsparung Wärme- und Kälteerzeugung

### Mehrkosten RLT

### Primärenergie

$$6.222 \text{ kWh} \cdot 1,1$$

$$- 537 \text{ kWh} \cdot 1,8$$

$$= 5.877 \text{ kWh}$$

### CO<sub>2</sub>-Rucksack

$$+ 5.156 \text{ kg RLT-Gerät}$$

$$+ 1.225 \text{ kg WRG-System}$$

$$- 598 \text{ kg Wärmeerzeugung}$$

# RLT-1D-Optimum ökologisch

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

| Effizienz WRG | Bautiefe zur Auslegung | Nutzen kg CO2/a | Aufwand kg CO2/a | Reduktion kg CO2/a |
|---------------|------------------------|-----------------|------------------|--------------------|
| 30,0 %        | 11,7 %                 | 713             | 418              | 296                |
| 35,0 %        | 14,7 %                 | 832             | 424              | 409                |
| 40,0 %        | 18,2 %                 | 951             | 431              | 520                |
| 45,0 %        | 22,3 %                 | 1070            | 440              | 630                |
| 50,0 %        | 27,2 %                 | 1189            | 452              | 737                |
| 55,0 %        | 33,3 %                 | 1308            | 467              | 841                |
| 60,0 %        | 40,8 %                 | 1427            | 486              | 941                |
| 65,0 %        | 50,6 %                 | 1546            | 511              | 1034               |
| 70,0 %        | 63,5 %                 | 1665            | 547              | 1118               |
| 75,0 %        | 81,7 %                 | 1783            | 597              | 1186               |
| 80,0 %        | 108,9 %                | 1902            | 674              | 1228               |
| 82,0 %        | 124,0 %                | 1950            | 717              | 1233               |
| 85,0 %        | 154,3 %                | 2021            | 805              | 1217               |
| 90,0 %        | 245,0 %                | 2140            | 1068             | 1072               |

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

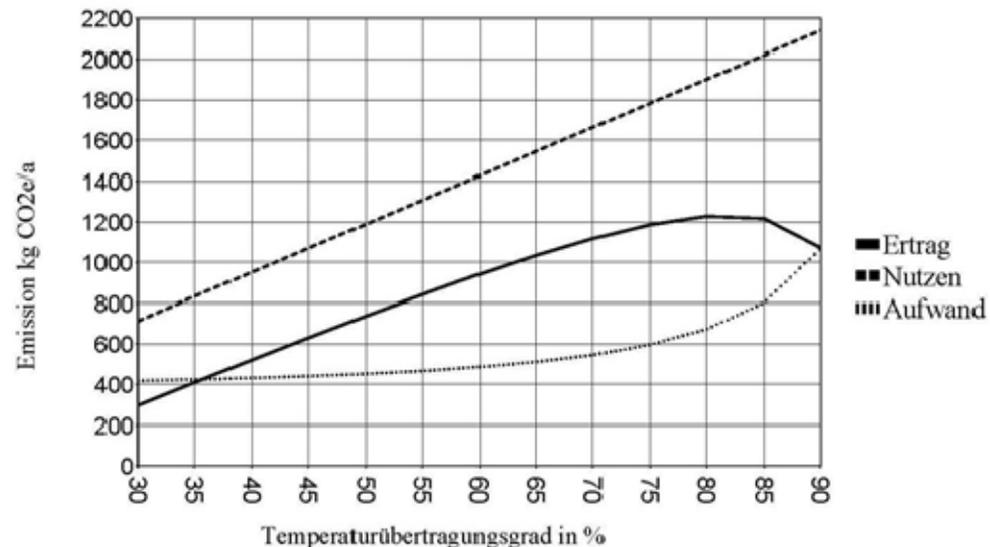
CO2e-Äquivalente pro Jahr berechnet mit 300 g/kWh Wärme, 370 g/kWh Strom, sowie 500 g/E WRG invest und sonstige Betriebskosten 220 g/E

Auslegung mit einer Luftgeschwindigkeit im Zu- und Abluftgeratequerschnitt 0,80 m/s - 78,6 %

Auslegung mit einer CO2 Einsparung von 1,2 t./a

**Optimale Rückwärmzahl der WRG 82 % (79 - 84 %)**

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



CO<sub>2</sub>-Einsparung

1,22 t./a Auslegung

1,23 t./a Optimierung

# RLT-3D-Optimum ökologisch

## WRG-SYSTEME OPTIMIERUNG (ökologisch / mehrdimensional)

| Effizienz WRG       | Q.-Fläche bez. 2 m/s | w in m/s        | Bautiefe zur Auslegung | Nutzen kg CO2/a | Aufwand kg CO2/a | Reduktion kg CO2/a |
|---------------------|----------------------|-----------------|------------------------|-----------------|------------------|--------------------|
| 33,3 %              | 97,8 %               | 2,04 m/s        | 34,8 %                 | 793             | 944              | -152               |
| 47,4 %              | 114,2 %              | 1,75 m/s        | 53,6 %                 | 1126            | 1002             | 124                |
| 58,3 %              | 133,2 %              | 1,50 m/s        | 71,5 %                 | 1387            | 982              | 405                |
| 66,7 %              | 155,8 %              | 1,28 m/s        | 87,4 %                 | 1585            | 922              | 663                |
| 73,0 %              | 183,3 %              | 1,09 m/s        | 100,3 %                | 1735            | 849              | 887                |
| 77,8 %              | 218,1 %              | 0,92 m/s        | 109,2 %                | 1849            | 780              | 1069               |
| 81,1 %              | 264,6 %              | 0,76 m/s        | 110,6 %                | 1929            | 723              | 1206               |
| 83,3 %              | 331,6 %              | 0,60 m/s        | 102,6 %                | 1982            | 690              | 1291               |
| <b>max.: 83,9 %</b> | <b>414,4 %</b>       | <b>0,48 m/s</b> | <b>85,4 %</b>          | <b>1994</b>     | <b>678</b>       | <b>1316</b>        |
| 83,9 %              | 442,4 %              | 0,45 m/s        | 80,0 %                 | 1994            | 679              | 1316               |
| 82,1 %              | 688,8 %              | 0,29 m/s        | 45,5 %                 | 1953            | 699              | 1255               |

Geometrie in % der Ursprungsfläche der Auslegung. CO2e (Nutzen, Aufwand und Reduktion der WRG) pro Jahr. Exponent zur Änderung des dP 1,6

Auslegung mit einer Luftgeschwindigkeit im Zu- und Abluftgerätequerschnitt 0,80 m/s - 78,6 %

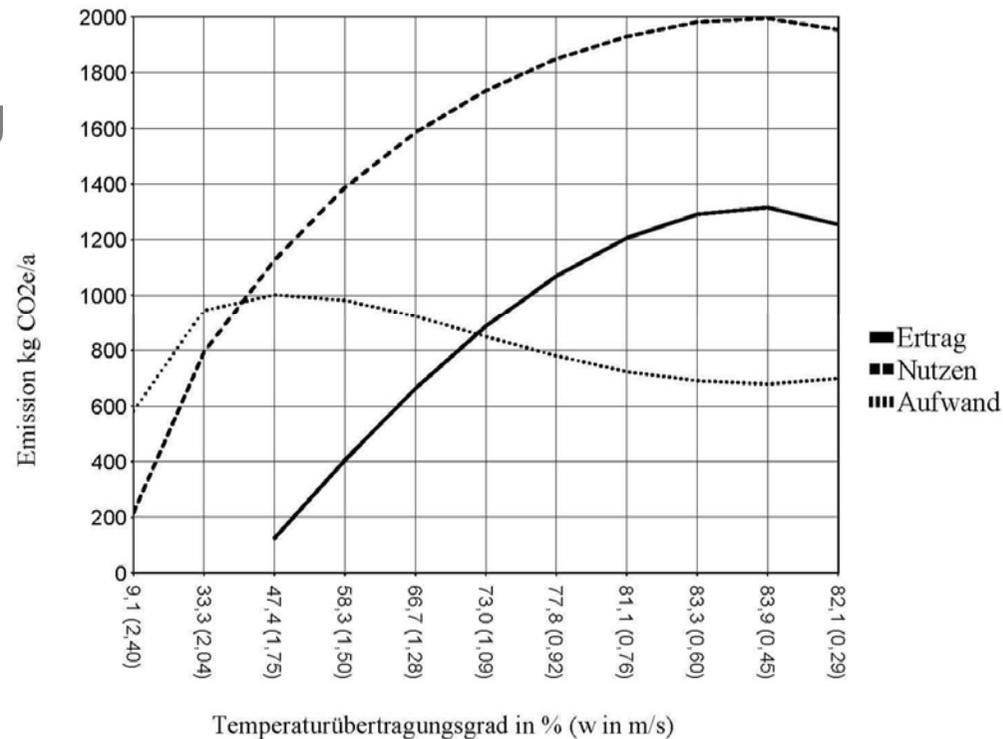
Auslegung mit einer CO2 Einsparung von 1,2 t./a

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

## CO<sub>2</sub>-Einsparung

1,22 t./a Auslegung

1,32 t./a Optimierung



## Wärmerückgewinnung ist wirtschaftlich

### Raumluftechnik kostet Geld

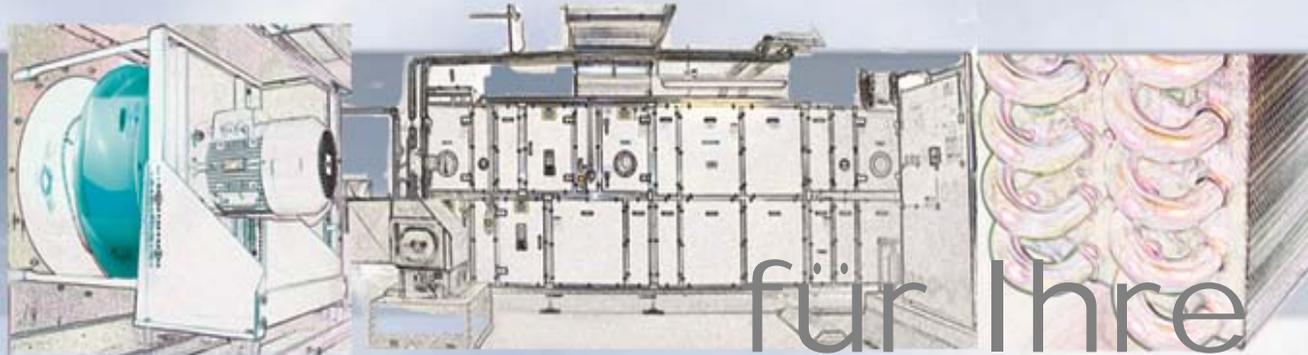
- Die WRG kann nicht die gesamte Anlage „refinanzieren“
- Bereitet Luft auf (Filtern, Heizen, Kühlen, Be- und Entfeuchten) - Komfort durch ambiente Lüftung

- Führt Luft kontrolliert dem Raum zu

### RLT mit WRG spart CO<sub>2</sub>-Emissionen

- Pro Klassenraum rund 1 t. CO<sub>2</sub> pro Jahr (1.000 m<sup>3</sup>/h) – trotz CO<sub>2</sub>-Rucksack der Anlage

# Herzlichen Dank



# Aufmerksamkeit

## Bessere Raumluftqualität durch Raumlüftung

Wie im Vergleich zur Fensterlüftung Raumluft-  
technische Anlagen mit WRG Aerosole und CO<sub>2</sub>-  
Belastungen in Räumen verringern.

Prof. Dr.-Ing. **Christoph Kaup**  
c.kaup@umwelt-campus.de



Umwelt-Campus  
Birkenfeld

H O C H  
S C H U L E  
T R I E R