

# – Vergleichsprozesse der Klimatechnik – Bedienanleitung für das Rechenprogramm "Klimaanlage\_Optimierung"

Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Glück, 2015

---

## **Inhaltsverzeichnis**

|                                         |    |
|-----------------------------------------|----|
| <b>Zielstellung und Grundlagen</b>      | 2  |
| <b>1 Hinweise zum Rechenprogramm</b>    | 3  |
| 1.1 Laden und Start des Rechenprogramms | 3  |
| 1.2 Bearbeitung des Programmlistings    | 4  |
| 1.3 Beispielabarbeitung                 | 4  |
| <b>2 Ein- und Ausgabedaten</b>          | 6  |
| <b>3 Beispiel_1</b>                     | 9  |
| <b>4 Beispiel_2</b>                     | 18 |
| <b>5 Beispiel_3</b>                     | 27 |

---

Alle in diesem Bericht und dem zugehörigen Rechenprogramm enthaltenen Angaben, Daten, Berechnungsverfahren usw. wurden vom Autor mit bestem Wissen erstellt und sorgfältig geprüft. Dennoch sind inhaltliche Fehler nicht vollständig auszuschließen, deshalb erfolgen alle Angaben usw. ohne jegliche Verpflichtung und Garantie des Autors. Er übernimmt keinerlei Verantwortung und Haftung für etwaige inhaltliche Unrichtigkeiten. Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Autors unzulässig. Dies gilt für Anwendungen, die über die Eigennutzung hinausgehen.

Das vorgestellte Berechnungsmodell ist als **Testfassung** zu verstehen, die trotz vielfältiger Plausibilitätsprüfungen eine fachkompetente Nutzung erfordert. Es wird die Funktionstüchtigkeit des Algorithmus mit **einfachsten** Aggregatmodellierungen demonstriert. Da diese in der Regel nur für **ungesättigte Luft** gelten, werden programmintern Zustände im Nebelgebiet ausgeschlossen.

Eine Weiterentwicklung des Programms sollte eine **feinere Diskretisierung** – vor allen hinsichtlich des Feuchtegehaltes  $x$  – beinhalten. Die jetzt vorhandene stößt vielfach an ihre Grenzen.

Alle Interessierten sind eingeladen, an der Weiterentwicklung mitzuwirken.

Viel Erfolg bei der Anwendung!

## **Literatur:**

- [1] Glück, B.: Vergleichsprozesse der Klimatechnik.  
Heidelberg: C. F. Müller Verlag 1998, ISBN 3-7880-7643-7  
<http://berndglueck.de/Klimaprozess>
  
- [2] Glück, B.: Zustands- und Stoffwerte; Verbrennungsrechnung (Reihe: Bausteine der Heizungstechnik). Berlin: VEB Verlag für Bauwesen 1986, ISBN 3-345-00228-0; Berlin: Marhold-Verlag 1986  
2. überarbeitete und erweiterte Auflage  
Berlin: Verlag für Bauwesen 1991, ISBN 3-345-00487-9  
<http://berndglueck.de/Stoffwerte>

## Zielstellung und Grundlagen

- Zielstellung des Rechenprogramms ist die Simulation eines **optimal geführten Klimaprozesses** ohne jegliche Beeinflussung durch eine Regelungsstrategie. Die Qualität angebotener Regelungen können dann anhand des optimalen Prozesses bezüglich ihrer Eignung bewertet werden.
- Der optimal geführte Klimaprozess stellt somit einen **Vergleichsprozess** dar. Letztere sind in der Thermodynamik vor allem für typische Kreisprozesse bekannt. Diese Idee bildete die Grundlage zur Entwicklung eines Vergleichsprozesses für die Luftaufbereitung in einer Klimaanlage einschließlich der Luftzustandsänderungen im Raum und im Abluftweg mit eventueller Rückkopplung durch Wärmerückgewinner, Mischkammern und Abluft-Wäschern.
- Im Gegensatz zu den Kreisprozessen in den Wärmekraftanlagen – z. B. dem JOULE-Prozess für Gasturbinenanlagen – sind die **Klimaprozesse variantenreicher** durch variierende **Aggregatteeinsätze** (Erhitzer, Wäscher, Kühler usw.) und **Betriebsbedingungen** (Winter-, Sommerfall).
- Zudem können die **Zielstellungen** stark unterschiedlich sein. Im vorgestellten Rechenprogramm wird der **minimale Betriebskostenaufwand** gesucht. Es könnte aber auch der **minimale Primärenergieaufwand** interessieren. Die Grundsatzstrategie des Rechenprogramms bliebe dabei unverändert, lediglich die aggregatespezifischen Unterprogramme wären zu überarbeiten.
- Alle Fundamentalüberlegungen, das Finden des optimalen climatechnischen Prozesses mit der **Methode der dynamischen Optimierung** und die mögliche regelungs- und steuerungstechnische Realisierung sind in [1] beschrieben. (Detaillierungen zur Optimierung siehe auch Beispiel\_1.)
- Die dynamische Optimierung setzt eine **Diskretisierung des Lösungsbereichs** voraus. Klimaingenieure stellen die Luftaufbereitungsprozesse vorzugsweise im Mollier-h,x-Diagramm dar, weshalb die Lösungsbereiche in Temperaturschritte von **1 K** und die absolute Luftfeuchte in Schritte von **1 g<sub>Wasser</sub>/kg<sub>trockene Luft</sub>** unterteilt wurden. Diese Lösungsbereiche sind nach jedem Aggregat in den sogenannten Etappenfeldern  $ee = 1 \dots eeR$  (Raum) veranschaulicht.
- Mit der relativ **groben Diskretisierung** ergeben sich kurze Rechenzeiten und übersichtliche Luftzustandsverläufe. Mit einer feineren Unterteilung wäre die Genauigkeit zu verbessern.
- Der in [1] vorgestellte Algorithmus wurde um einen **Abluft-Wäscher** erweitert. Seine Betriebskosten und die des Lüfters in der Abluftstrecke werden zu den minimalen Kosten im Feld  $eeR$  addiert und bilden die Gesamtkosten. Bei vorhandenem Abluft-Wäscher werden nacheinander die zulässigen Befeuchtungsgrade untersucht und die kostengünstigste Variante ermittelt. Der **Wärmerückgewinnerbetrieb** ist jetzt in Stufen bis zum maximalen Gütegrad anpassbar.
- Der Mischer- oder Wärmerückgewinnerbetrieb bewirkt eine **"Rückkopplung"** zum Lufteintritt, sodass Iterationen erforderlich sind. Die früheren Iterationsschranken wurden verändert, wodurch die Ergebnisse der Beispielrechnungen von den Werten in [1] abweichen können.
- Im jetzigen Rechenprogramm wurde eine **Diagrammdarstellung** ergänzt, die den Verlauf des Klimaprozesses im h,x-Diagramm visualisiert. Infolge der groben Diskretisierung (1 K und 1 g<sub>Wasser</sub>/kg<sub>trockene Luft</sub>) und den damit verbundenen Rundungen können **Unschönheiten im Zustandsverlauf** auftreten, was sich z. B. bei der Lage der Mischpunkte, der Form der Mischgeraden usw. bemerkbar macht. Bei einer feineren Feldunterteilung wäre dies vermeidbar.

## 1 Hinweise zum Rechenprogramm

Bisher wurde für die auf der Website <http://berndglueck.de> vorgestellten Rechenprogramme die Programmierungsumgebung **VISUALBASIC.NET STANDARD** verwendet. Leider war diese für das Betriebssystem Windows 8.1 nicht mehr verfügbar. Deshalb kam für die seit 2014 erarbeiteten Rechenprogramme "Heizwassernetz" und "Klimaanlage" die neue Programmierungsumgebung **MICROSOFT Visual Basic 2010 Express**, die aus dem Internet kostenlos downloadbar ist, zum Einsatz.

Selbstverständlich kann das Rechenprogramm als **Klimaanlage\_Optimierung.exe** abgearbeitet werden. Erfolgt die Programmabarbeitung aber in der Programmierungsumgebung, sind mögliche Fehlbedienungen und/oder noch vorhandene Programmfehler durch Nutzung des Debuggers relativ leicht auffindbar.

Auf jegliche Spezialsoftware, die einige wesentliche Programmiererleichterungen – beispielsweise bei der Erzeugung von Ausgabetafeln – bewirkt hätten, wurde bewusst verzichtet. Es werden lediglich Verbindungen zu **MICROSOFT WORD** hergestellt.

Allgemeine **Grundlagen für die Programmanwendung** finden sich [hier](#).

### 1.1 Laden und Start des Rechenprogramms

Die unter <http://berndglueck.de/Klimaprozess> stehende komprimierte Datei "**Klimaprozess.zip**" ist nach dem Download zu extrahieren und in ein eigenes Verzeichnis (Ordner) – beispielsweise "**Klimaprozess**" – auf die Festplatte zu kopieren. Im genannten Ordner befinden sich dann:

- **Beispiel\_1** (Beispiel\_1 als Unterordner)  
bis
- **Beispiel\_3** (Beispiel\_3\_Sommer\_Variante2 als Unterordner)
- **Klimaanlage\_Optimierung** (Rechenprogramm als Unterordner mit allen Entwicklungsdateien)
- **Klimaanlage\_Optimierung.exe** (Rechenprogramm als Datei zur sofortigen Nutzung)
- **Klimaanlage\_Optimierung.sin** (Rechenprogramm als Datei zur Verwendung in der Programmierungsumgebung Visual Basic 2010 Express; Unterordner **Klimaanlage\_Optimierung** muss verfügbar sein!).

#### Hinweis zur Bildschirmeinstellung

Eine gut lesbare Darstellung erreicht man mit der Auflösung 1920 × 1080 Pixel und der Skalierungsstufe 125 %. Weg zur Einstellung bei WINDOWS 8.1:

SYSTEMSTEUERUNG ⇒ DARSTELLUNG UND ANPASSUNG ⇒ ANZEIGE  
⇒ HÄKCHEN BEI MANUELLE SKALIERUNGSSTUFE ⇒ 125 % ⇒ ÜBERNEHMEN.

- Die Programmabarbeitung erfolgt in der Regel ohne Entwicklungsumgebung:

Ordner "**Klimaprozess**" öffnen ⇒ Datei "**Klimaanlage\_Optimierung.exe**" mit Doppelklick starten

Zu Beginn wird in einem Fenster ein Pfad für das zu bearbeitende Beispiel angegeben. Dieser Vorschlag ist in der Regel mit dem selbst gewählten Pfad zu überschreiben! Ist das Beispiel noch nicht vorhanden, so muss der Ordner – beispielsweise Beispiel\_xy – dafür **vorher** angelegt werden. In diesem wird dann automatisch die Datei **Objektdaten.dat** angelegt.

## 1.2 Bearbeitung des Programmlistings

Im Ordner "Klimaprozess" ist – wie oben bereits mitgeteilt – auch der Quellcode "Klimaanlage\_Optimierung.sin" enthalten. Um diesen anzuzeigen, ist die Entwicklungsumgebung Visual Basic 2010 Express zu laden und beispielsweise "Klimaanlage\_Optimierung.sin" mit Doppelklick zu starten.

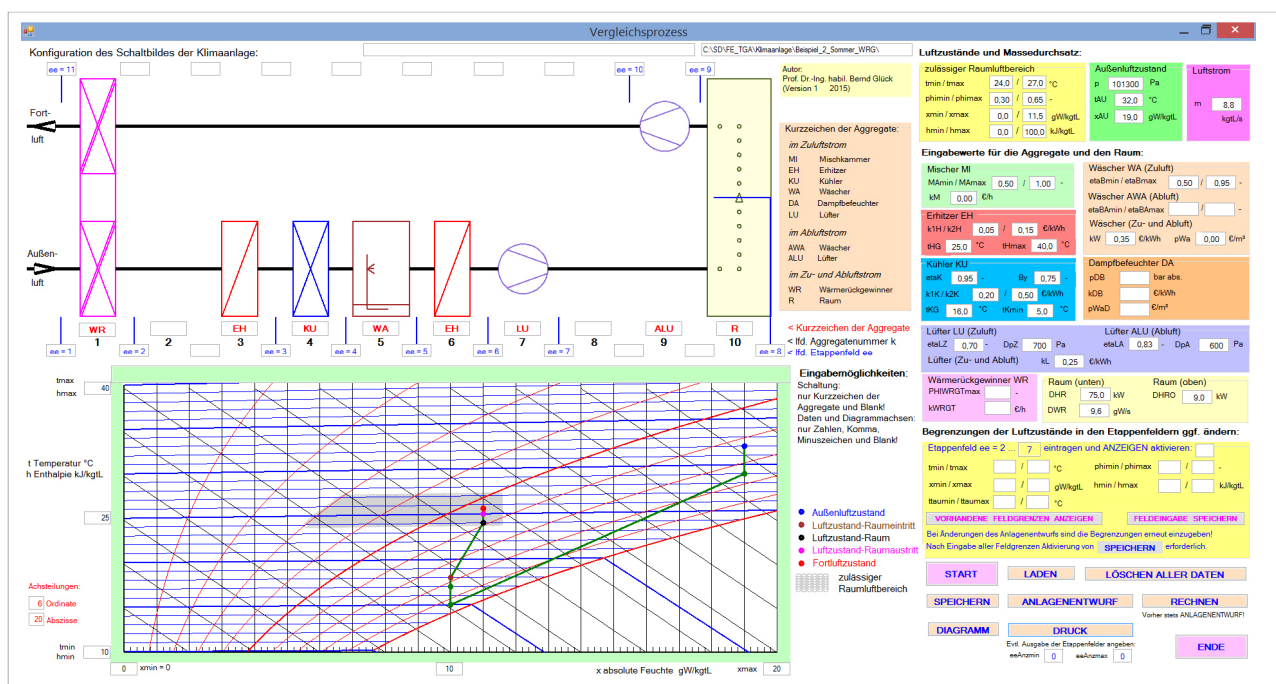
Über "Ansicht" und "Projektmappen-Explorer" findet man unter Klimaanlage\_Optimierung.vb die Form1. In ihr sind die Algorithmen für die Eingabe, die Berechnung, die Diagrammerstellung und den Ausgabedruck enthalten. Aus den Programmlistings sind alle inhaltlichen Details – gut strukturiert und mit zahlreichen Kommentaren versehen – ersichtlich.

- Der Algorithmus kann nach den entsprechenden Programmierregeln geändert werden.
- Die Programmabarbeitung in der Entwicklungsumgebung ist mit und ohne spezieller Verfolgungsstrategie möglich:

⇒ Menüleiste "Debuggen" Einfachklick ⇒ "Debugging starten" Einfachklick

## 1.3 Beispiellabarbeitung

Bild 1.1 zeigt eine Bildschirmoberfläche (Maske) mit einem voll ausgefüllten Beispiel nach erfolgter Berechnung und mit Diagrammanzeige.



**Bild 1.1** Bedienoberfläche des Rechenprogramms "Klimaanlage\_Optimierung" (Vergleichsprozess)

1. **START** drücken und Beispiel mit Pfad und Ordner eingeben bzw. überschreiben.
2. Eventuell vorhandenes Beispiel **LADEN** oder **LÖSCHEN ALLER DATEN** vornehmen. Neue Zahleneingaben sind gemäß Beschreibung auf der Bedienoberfläche (Maske) einzutragen.
3. Konfiguration der Schaltung entwerfen oder korrigieren:



Kurzzeichen der Aggregate zur Luftaufbereitung, für den Raum (der Raum ist auch als Aggregat definiert) und für die Aggregate des Abluftweges eingeben (nur Großbuchstaben gemäß Bedienoberfläche zugelassen). Maximal sind zehn Aggregatenummern k belegbar. Dabei dürfen Aggregatenummern k übersprungen werden (Belegung mit BLANK sicherstellen, keine LEERZEICHEN). Einzelheiten finden sich in der Beschreibung der Eingabedaten (Abschnitt 2).

**SPEICHERN** aktivieren!

**ANLAGENENTWURF** aktivieren!

Beim Zeichnen des Schaltbildes werden die Eingaben auf grobe Unstimmigkeiten kontrolliert, eventuell eine Ausschrift im oberen Textfeld angezeigt und ein akustisches Signal (BEEP) gegeben. Gegebenenfalls sind Ergänzungen und/oder Änderungen erforderlich!

Die Besonderheiten bei Wärmerückgewinnern, Mischkammern und dem Raum werden selbsttätig berücksichtigt und die für die Algorithmusabarbeitung wichtigen Etappenfelder ee automatisch eingetragen (d. h., die blauen Angaben ee sind nicht überschreibbar).

Bitte kontrollieren Sie das gezeichnete Schaltbild auf Richtigkeit. Eventuell nehmen Sie eine Änderung der Kurzzeichen der Aggregate vor.

4. Dateneingabe für den zulässigen Raumluftbereich, den Außenluftzustand und den Luftstrom: Einzelheiten finden sich in der Beschreibung der Eingabedaten (Abschnitt 2).

**SPEICHERN** aktivieren!

5. Dateneingabe für alle in der Schaltung verwendeten Aggregate und den Raum (Raumlaster): Einzelheiten finden sich in der Beschreibung der Eingabedaten (Abschnitt 2).

**SPEICHERN** aktivieren!

6. Eventuelle Dateneingabe für die Begrenzungen der Luftzustände in den Etappenfeldern ee: Einzelheiten finden sich in der Beschreibung der Eingabedaten (Abschnitt 2).

Nach Eingabe des **jeweils** zu betrachtenden Etappenfeldes ee und Aktivierung **VORHANDENE FELDGRENZEN ANZEIGEN** erfolgt die Anzeige der für das Etappenfeld ee vorhandenen Werte.

Sie können überschrieben und durch Aktivierung von **FELDEINGABE SPEICHERN** zwischengespeichert werden. Dabei erfolgt eine Grobprüfung der Feldbegrenzungen. Bei Unstimmigkeiten wird eine Ausschrift im oberen Textfeld angezeigt und ein akustisches Signal (BEEP) gegeben. Gegebenenfalls sind Ergänzungen und/oder Änderungen erforderlich.

**SPEICHERN** aktivieren schreibt die Feldgrenzen endgültig in die Datei **Objektdaten.dat**.

7. **RECHNEN** drücken bewirkt programmintern zunächst die Überprüfung der Raum- und Aggregatdaten auf Vollständigkeit und Sinnhaftigkeit.

Grobe Eingabefehler werden vor Rechnungsbeginn im oberen Textfeld angezeigt und ein akustisches Signal (BEEP) gegeben. Notwendige Ergänzungen und/oder Änderungen sind vorzunehmen und durch Aktivieren von **SPEICHERN** abzuschließen.

Sind alle Beanstandungen beseitigt, wird die Berechnung durchgeführt. Spezielle Hinweise zur Abarbeitung finden sich im Abschnitt 3.

Nach Abschluss der Berechnung wird dies im oberen Textfeld mit der Ausschrift "**Rechnung beendet!**" und akustischem Signal (BEEP) angezeigt.

8. Aktivieren von **DIAGRAMM** liefert eine visuelle Darstellung des simulierten, optimalen Verlaufs der Luftzustände.

Die automatisch eingetragenen Achsgrenzwerte  $x_{\max}$ ,  $t_{\min}$ ,  $t_{\max}$  sowie die Achsteilungen für die Abszisse und Ordinate können überschrieben werden, sodass nach erneutem Drücken von **DIAGRAMM** ein veränderter Diagrammausschnitt entsteht. Die Wahl der Achsenwerte ist so vorzunehmen, dass ein gut ablesbares Mollier-h.x-Diagramm gezeigt wird.

Der Außenluft- sowie der Fortluftzustand und die markanten Raumlufzustände werden besonders hervorgehoben. Der zulässige Raumlufzustand gemäß Eingabe ist als Bereich grau markiert.

9. Das Aktivieren von **DRUCK** liefert einen kompletten Ausdruck der Eingabewerte und der berechneten Größen längs des optimalen Weges als WORD-Datei. Diese kann in bekannter Weise gespeichert, gedruckt und bearbeitet werden.

Sonderfall: Besteht Interesse am jeweils technisch möglichen Luftzustandsbereich in den Etappenfeldern, so sind die Etappenfelder eeAnzmin und eeAnzmax vor dem Aktivieren von Druck auszufüllen. Wollte man beispielsweise gemäß Bild 1.1 den technisch möglichen Raumlufzustand betrachten, so müsste eeAnzmin = eeAnzmax = 8 eingegeben werden.

10. **ENDE** drücken schließt das Rechenprogramm.

## 2 Ein- und Ausgabedaten

Anschließend werde die Gesamtheit aller Eingaben vorgestellt. Bild 1.1 zeigt alle Eingabefelder. Mindestens die im jeweiligen Beispiel eingesetzten Aggregate sind mit Daten zu füllen.

### **Konfiguration der Schaltung**

Über den Aggregatenummern  $k = 1 \dots 10$  sind die Kurzzeichen der Aggregate in Großbuchstaben einzugeben. Dabei sind auch die Aggregate in der Abluftstrecke und der Raum an entsprechender Stelle zu beachten. Es dürfen Leerplätze vorhanden sein. Dies ist von Vorteil, wenn Variantenuntersuchungen mit unterschiedlicher Aggregatebestückung vorgenommen werden sollen.

| <i>Aggregate in der Zuluftstrecke</i> |                                                                              |
|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| MI                                    | Mischer (Mischkammer mit Abluftentnahme aus darüber liegender Abluftstrecke) |
| EH                                    | Erhitzer (Vorwärmer bzw. Nachwärmer)                                         |
| WA                                    | Wäscher (Sprühkammer mit Wassereinspritzung)                                 |
| DA                                    | Dampfbefeuchter (Düsenstock mit Sattdampfeinspritzung)                       |
| KU                                    | Kühler (Oberflächenkühler mit Wasserbeaufschlagung)                          |
| LU                                    | Zulüfter (Lüfter in der Zuluftstrecke)                                       |
| <i>Aggregate in der Abluftstrecke</i> |                                                                              |
| ALU                                   | Ablüfter (Lüfter in der Abluftstrecke)                                       |
| AWA                                   | Abluft-Wäscher (Sprühkammer mit Wassereinspritzung)                          |

| <i>Aggregate in der Zu- und Abluftstrecke</i> |                                                                                                |
|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| WR                                            | Wärmerückgewinner (thermischer WRG z. B. nach dem Kreislaufverbundsystem arbeitend)            |
| R                                             | Raum (intern erfolgt eine Unterteilung in RU Raum_unten {Aufenthaltsbereich} und RO Raum_oben) |

Drücken von **ANLAGENENTWURF** zeichnet die Schaltung!

### **Luftzustände und Massedurchsatz**

| <i>Zulässiger Raumlufbereich</i> <sup>1</sup>                                                                                                                                                    |         |                                                                                                                                |                                               |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Der real zulässige Raumlufbereich kann durch unterschiedliche Begrenzungen gestaltet werden, wobei die "engsten" Restriktionen zur Anwendung kommen. Alle Eingaben sind zu füllen!               |         |                                                                                                                                |                                               |
| tmin / tmax                                                                                                                                                                                      | °C      | minimal und maximal zulässige Raumlufttemperatur (z. B. 20 /24 °C)                                                             |                                               |
| phimin / phimax                                                                                                                                                                                  | -       | minimal und maximal zulässige relative Raumluftfeuchte ϕ<br>(z. B. 0,30 / 0,65)                                                |                                               |
| xmin / xmax                                                                                                                                                                                      | gW/kgTL | minimal und maximal zulässige absolute Raumluftfeuchte<br>(z. B. 0,0 / 11,5 g <sub>Wasser</sub> /kg <sub>trockene Luft</sub> ) |                                               |
| hmin / hmax                                                                                                                                                                                      | kJ/kgTL | minimal und maximal zulässige Raumluftenthalpie<br>(z. B. 0,0 / 55 kJ/kg <sub>trockene Luft</sub> )                            |                                               |
| <sup>1</sup> Versorgt die Klimaanlage eine Luftverteiltzentrale, so ist für den zulässigen Raumlufbereich der gewünschte Bereich am Austritt der Klimaanlage einzugeben (siehe auch Beispiel_1). |         |                                                                                                                                |                                               |
| <i>Außenluftzustand</i>                                                                                                                                                                          |         |                                                                                                                                |                                               |
| p                                                                                                                                                                                                | Pa      | Luftdruck (p wird vereinfacht auch für die Luftzustände in der Anlage und im Raum angenommen, z. B. 100000 Pa {≡ 1 bar})       |                                               |
| tAu                                                                                                                                                                                              | °C      | Außenlufttemperatur (z. B. -5 °C)                                                                                              | tAU, xAU muss im ungesättigten Gebiet liegen! |
| xAu                                                                                                                                                                                              | gW/kgTL | absolute Außenluftfeuchte (z. B. 2,0 g <sub>Wasser</sub> /kg <sub>trockene Luft</sub> )                                        |                                               |
| <i>Luftstrom</i>                                                                                                                                                                                 |         |                                                                                                                                |                                               |
| m                                                                                                                                                                                                | kgTL/s  | Massestrom durch die Klimaanlage (Raum) (z. B. 8,0 kg <sub>trockene Luft</sub> /s)                                             |                                               |

### **Eingabewerte für die Aggregate und den Raum**

Die detaillierte Modellierung der Aggregate findet sich in [1, Abschnitte 3.4.6 und 3.4.7].

| <i>Mischer MI</i>                                                                           |       |                                                                                                                                                                                                                                     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| MAmin / MAmax                                                                               | -     | minimaler und maximaler Außenluftanteil (z. B. 0,50 / 1)                                                                                                                                                                            |
| kM                                                                                          | €/h   | stündliche Kosten (in der Regel 0 €/h)                                                                                                                                                                                              |
| <i>Erhitzer EH (Temperaturgrenzwerte beziehen sich auf die Luftaustrittsteperatur)</i>      |       |                                                                                                                                                                                                                                     |
| k1H / k2H                                                                                   | €/kWh | spezifische Kosten für die Wärme unter / über einer Grenztemperatur tHG (hiermit kann die Qualität der Wärmeenergie berücksichtigt werden, so beispielsweise Abwärme unter tHG = 25 °C), (z. B. 0,05 / 0,15 €/kWh)                  |
| tHG                                                                                         | °C    | Grenztemperatur bis zu der hinauf k1H gilt ( $\leq 40$ °C; z. B. 25 °C)                                                                                                                                                             |
| tHmax                                                                                       | °C    | maximal erreichbare Luftaustrittsteperatur ( $\leq 40$ °C; z. B. 40 °C)                                                                                                                                                             |
| <i>Kühler KU (Temperaturgrenzwerte beziehen sich auf die mittlere Kaltwassertemperatur)</i> |       |                                                                                                                                                                                                                                     |
| etaK                                                                                        | -     | Übertragungsfaktor (er stellt den Zusammenhang zwischen Kaltwassertemperatur und Oberflächenteperatur her; bei etaK = 1 sind der innere Wärmeübergangswiderstand und der Wärmeleitwiderstand im Material 0; realer Wert z. B. 0,80) |

|                                                               |                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|---------------------------------------------------------------|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| By                                                            | -                | Bypassfaktor (er stellt das Verhältnis der tatsächlichen zur maximal möglichen Entfeuchtung dar; z. B. 0,75)                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| k1H /k2H                                                      | €/kWh            | spezifische Kosten für die Kälte über / unter einer Grenztemperatur tKG (hiermit kann die Qualität der Kälteenergie berücksichtigt werden, so beispielsweise Kälte aus Rückkühlwerken über tKG = 16 °C), (z. B. 0,20 / 0,50 €/kWh)                                                                                                                                                                    |
| tKG                                                           | °C               | Grenztemperatur bis zu der herunter k1H gilt (> 0°C; z. B. 16 °C)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| tKmin                                                         | °C               | minimal verfügbare Kaltwassertemperatur im Kühler (> 0°C; z. B. 5 °C)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <i>Wäscher WA (Zuluft)</i>                                    |                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| etaBmin / etaBmax                                             | -                | minimaler und maximaler Befeuchtungsgrad, der unter den zutreffenden Betriebsbedingungen erreichbar ist (z. B. 0,50 / 0,95)                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| <i>Wäscher AWA (Abluft)</i>                                   |                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| etaBAmin / etaBAmax                                           | -                | minimaler und maximaler Befeuchtungsgrad, der unter den zutreffenden Betriebsbedingungen erreichbar ist (z. B. 0,50 / 0,95)<br>In einer <i>äußeren Iterationsschleife</i> werden nacheinander <i>alle</i> Klimaprozesse für $\eta_{BA} = 0$ und $\eta_{BA} = \eta_{BA,min} \dots \eta_{BA,max}$ (Schritte 0,1) untersucht. Die kostengünstigste Variante wird programmintern ermittelt und angezeigt. |
| <i>Wäscher WA (Zuluft) und Wäscher AWA (Abluft)</i>           |                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| kW                                                            | €/kWh            | spezifische Kosten für Elektroenergie geteilt durch Pumpen- und Motorwirkungsgrad (z. B. 0,35 €/kWh)                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| pWa                                                           | €/m <sup>3</sup> | spezifischer Wasserpreis (z. B. 2 €/m <sup>3</sup> , bei eigenem Brunnen z. B. 0 €/m <sup>3</sup> )                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <i>Dampfbefeuchter DA</i>                                     |                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| pDA                                                           | bar              | Dampfdruck in bar <sub>absolut</sub> (z. B. 4 bar)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| kDB                                                           | €/kWh            | spezifische Kosten für Elektroenergie geteilt durch Dampferzeugerwirkungsgrad (z. B. 0,40 €/kWh)                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| pWaD                                                          | €/m <sup>3</sup> | spezifischer Wasserpreis (z. B. 4 €/m <sup>3</sup> ) {kann sich von pWa wegen unterschiedlicher Wasseraufbereitung unterscheiden}                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| <i>Wärmerückgewinner WR (thermisch; nur Wärmeübertragung)</i> |                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| PHIWRGTmax                                                    | -                | maximaler Gütegrad $\Phi_{max}$ ( $\equiv$ maximaler Wärmerückgewinnungsgrad)<br>(Interne Variation des Gütegrades: $\Phi = 0 \dots \Phi_{max}$ in Schritten von 0,1)                                                                                                                                                                                                                                 |
| kWRGT                                                         | €/h              | stündliche Kosten im Betriebsfall (z. B. 0,45 €/h)<br>(Diese Eingabe wurde gegenüber [1] geändert!)                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <i>Lüfter LU (Zuluft)</i>                                     |                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| etaLZ                                                         | -                | Wirkungsgrad (z. B. 0,7)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| DpZ                                                           | Pa               | Förderdruck (z. B. 700 Pa)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| <i>Lüfter ALU (Abluft)</i>                                    |                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| etaLA                                                         | -                | Wirkungsgrad (z. B. 0,8)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| DpA                                                           | Pa               | Förderdruck (z. B. 600 Pa)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| <i>Lüfter LU (Zuluft) und Lüfter ALU (Abluft)</i>             |                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| kL                                                            | €/kWh            | spezifische Kosten für Elektroenergie geteilt durch Motorwirkungsgrad (z. B. 0,25 €/kWh)                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |

| Raum R (Eingabe trennt zwischen Raum_unten {Aufenthaltsbereich} und Raum_oben)                                           |      |                                                                                                                                                                              |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| DHR <sup>1</sup>                                                                                                         | kW   | Enthalpiestrom im Aufenthaltsbereich (z. B. 75 kW)                                                                                                                           |
| DWR <sup>1</sup>                                                                                                         | gW/s | Feuchtestrom im Aufenthaltsbereich (z. B. 9,6 g <sub>Wasser</sub> /s)                                                                                                        |
|                                                                                                                          |      | Aus DHR / DWR wird programmintern die charakteristische "Raumzustandsänderung" dh/dm <sub>Wasser</sub> in kJ/kg <sub>Wasser</sub> gebildet.                                  |
| DHRO <sup>1</sup>                                                                                                        | kW   | Enthalpiestrom in den oberen Raumbereich (z. B. 9 kW)<br>Es handelt sich hierbei nur um trockene Wärme (z. B. Transmissionswärme durch die Decke, von der Beleuchtung usw.). |
| <sup>1</sup> Versorgt die Klimaanlage eine Luftverteilzentrale, so gelten DHR = 0, DWR = 0, DHRO = 0 (siehe Beispiel_1). |      |                                                                                                                                                                              |

### Begrenzungen der Luftzustände in den Etappenfeldern

Diese Werte sind generell vordefiniert und bedürfen in der Regel keiner zusätzlichen Eingabe. Sie finden nur in den Etappenfeldern ee = 2 bis ee = eeR (Raum) Beachtung. Es gelten:

|                                   |                                                                                               |                                                           |
|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Temperaturbereich                 | tmin(ee) = -19 °C, tmax(ee) = 40 °C                                                           | Grenzwerte sind bei jetziger Programmversion einzuhalten! |
| Bereich der relative Feuchte      | phimin(ee) = 0, phimax(ee) = 1                                                                |                                                           |
| Bereich der absolute Feuchte      | xmin(ee) = 0, xmax(ee) = 25 g <sub>Wasser</sub> /kg <sub>trockene Luft</sub>                  |                                                           |
| Bereich der spezifische Enthalpie | hmin(ee) = -20 kJ/kg <sub>trockene Luft</sub> , hmax(ee) = 100 kJ/kg <sub>trockene Luft</sub> |                                                           |
| Bereich der Taupunkttemperatur    | ttaumin(ee) = -50 °C, ttaumax(ee) = 35 °C                                                     |                                                           |

Falls ein veränderter Luftzustandsbereich beispielsweise aus Gründen der technischen Leistungsbegrenzung der Aggregate, des Korrosionsschutzes (relativ trockene Luft in den Bauteilen) usw. gewünscht wird, sollten die vorhandenen Grenzen enger gezogen werden.

Kleinere zulässige Bereiche beschleunigen die Berechnung, können allerdings auch zu einem veränderten "optimalen Weg" der Luftzustandsänderungen führen und somit erhöhte Kosten bewirken.

Alle Eingabedaten werden durch Aktivierung von **DRUCK** ausgegeben und sind somit in übersichtlicher Weise kontrollierbar.

Die **Ausgabedaten** werden anhand der Beispiele erläutert. Sie sind weitestgehend selbsterklärend.

### 3 Beispiel\_1 (entspricht Beispiel 1 in [1])

Das Beispiel\_1 sollte zur Überprüfung der richtigen Installation stets abgearbeitet werden!

Eine sehr einfach gestaltete Teilklimaanlage soll im "Winterfall" mehrere Räume versorgen, weshalb anstelle des zulässigen Raumlufbereiches der Luftzustandsbereich am Austritt der Klimaanlage vorgegeben wird. Eine direkte oder energetische Nutzung der Abluft ist nicht vorgesehen, d. h. es existieren kein Mischer und auch kein Wärmerückgewinner. Weiterhin ist auch der Lüfter weggelassen, um nur die markanten Luftzustandsänderungen zu zeigen.

- "Klimaanlage\_Optimierung.exe" mit Doppelklick starten (auf Seite 3 beschrieben)

Nötigenfalls Vollbild durch Klick auf Symbol herstellen!

- **START** drücken

**Wichtige Eingabe:**

Bitte den Pfad mit Ordner eingeben!  
Nicht die Datei benennen!

**Vorschlag entsprechend ändern!**

C:\SD\FE\_TGA\Klimaanlage\Beispiel\_2\

OK    Abbreche

**Wichtige Eingabe:**

Bitte den Pfad mit Ordner eingeben!  
Nicht die Datei benennen!

C:\SD\FE\_TGA\Klimaanlage\Beispiel\_1\

OK    Abbreche

- **OK** drücken
- **Eingaben** vornehmen

**Vergleichsprozess**

Konfiguration des Schaltbildes der Klimaanlage: C:\SD\FE\_TGA\Klimaanlage\Beispiel\_1\

Fort-luft

Außen-luft

1 Temperatur °C  
h Enthalpie kJ/kgL

12 Ordinate  
25 Abszisse

0 xmin = 0    x absolute Feuchte gW/kgL    xmax = 25

**Kurzzeichen der Aggregate:**

- im Zuflussstrom: MI Mischkammer, EH Erhitzer, KU Kühler, WA Wäscher, DA Dampfbefeuchter, LU Lüfter
- im Abflussstrom: AWA Wäscher, ALU Lüfter
- im Zu- und Abflussstrom: WR Wärmerückgewinner, R Raum

**Eingabemöglichkeiten:**  
Schaltung: nur Kurzzeichen der Aggregate und Blank!  
Daten und Diagramm machen: nur Zahlen, Komma, Minuszeichen und Blank!

**Luftzustände und Massedurchsatz:**

|                            |                   |                    |                  |     |            |           |   |          |
|----------------------------|-------------------|--------------------|------------------|-----|------------|-----------|---|----------|
| zulässiger Raumluftbereich | immin / tmax      | 20.0 / 24.0 °C     | Außenluftzustand | p   | 101320 Pa  | Luftstrom | m | 8.8 kg/s |
|                            | phiimin / phiimax | 0.30 / 0.65        |                  | tAU | -14.0 °C   |           |   |          |
|                            | xmin / xmax       | 0.0 / 11.5 gW/kgL  |                  | sAU | 1.0 gW/kgL |           |   |          |
|                            | hmin / hmax       | 0.0 / 100.0 kJ/kgL |                  |     |            |           |   |          |

**Eingabewerte für die Aggregate und den Raum:**

|                         |               |                  |                          |                   |             |
|-------------------------|---------------|------------------|--------------------------|-------------------|-------------|
| Mischer MI              | MÄmin / MÄmax | /                | Wäscher WA (Zuluft)      | etaBmin / etaBmax | 0.50 / 0.95 |
| kM                      | h             | h                | Wäscher AWA (Abluft)     | etaBmin / etaBmax | /           |
| Erhitzer EH             | kH / kZ       | 0.05 / 0.15 kW/h | Wäscher (Zu- und Abluft) | kW                | 0.35 kW/h   |
| EHG                     | 25.0 °C       | tmax             | 40.0 °C                  | pWA               | 0.00 Cmf    |
| Kühler KU               | etaK          | /                | Dampfbefeuchter DA       | pDB               | bar abs.    |
| k1K / k2K               | /             | gW/h             | kDB                      | gW/h              |             |
| tKG                     | °C            | tKmin            | °C                       | pWA               | Cmf         |
| Lüfter LU (Zuluft)      | etaLZ         | /                | Lüfter ALU (Abluft)      | etaLA             | /           |
| Lüfter (Zu- und Abluft) | etaL          | /                | Lüfter (Zu- und Abluft)  | etaA              | /           |
| Wärmerückgewinner WR    | PHWRGTmax     | /                | Raum (unten)             | DHR               | 0.0 kW      |
| kWRGT                   | h             | h                | Raum (oben)              | DHRO              | 0.0 kW      |

**Begrenzungen der Luftzustände in den Etappenfeldern ggf. ändern:**

Etappenfeld ee = 2 ... eintragen und ANZEIGEN aktivieren:

|             |   |        |                   |   |        |
|-------------|---|--------|-------------------|---|--------|
| tmin / tmax | / | °C     | phiimin / phiimax | / |        |
| xmin / xmax | / | gW/kgL | hmin / hmax       | / | kJ/kgL |
| tmin / tmax | / | °C     |                   |   |        |

**VORHANDENE FELDEINGABEN ANZEIGEN    FELDEINGABE SPEICHERN**

Bei Änderungen des Anlagenentwurfs sind die Begrenzungen erneut einzugeben!  
Nach Eingabe aller Feldeingaben Aktivierung von **SPEICHERN** erforderlich.

**START    LADEN    LÖSCHEN ALLER DATEN**

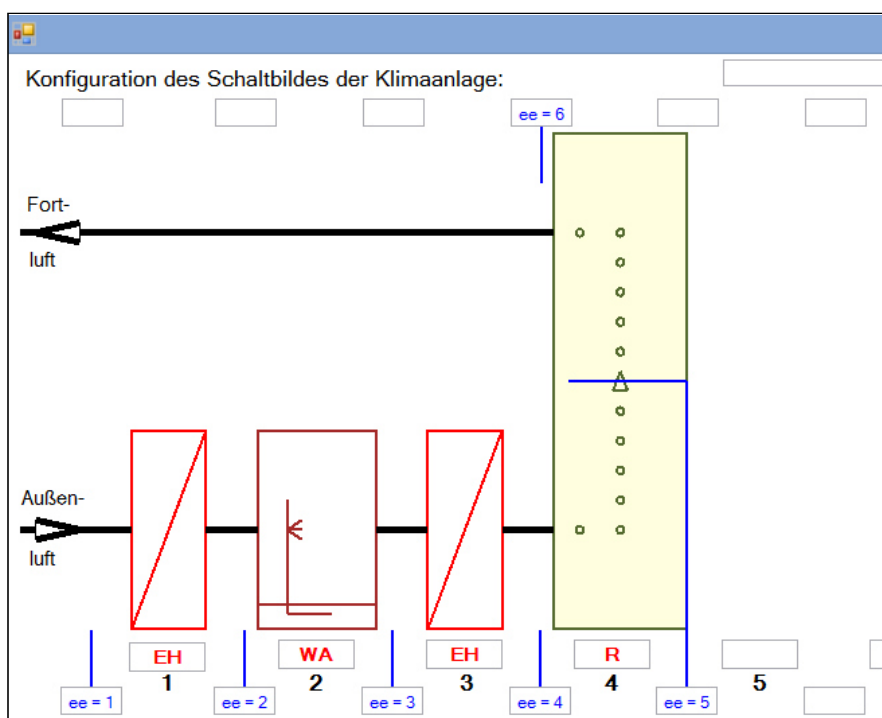
**SPEICHERN    ANLAGENENTWURF    RECHNEN**

**DIAGRAMM    DRUCK**

Evt. Ausgabe der Etappenfelder eingeben: ee1min    ee1max

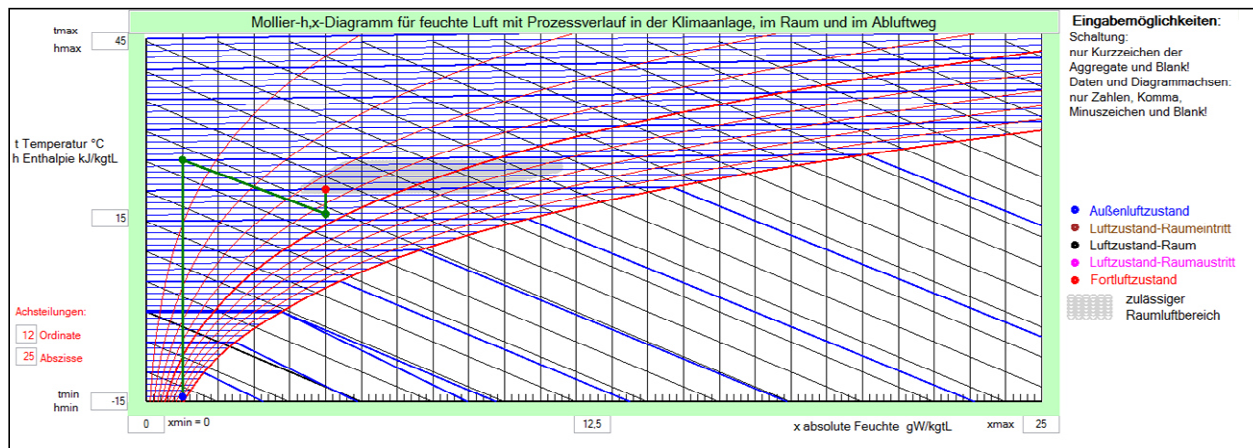
**ENDE**

- **ANLAGENENTWURF** drücken

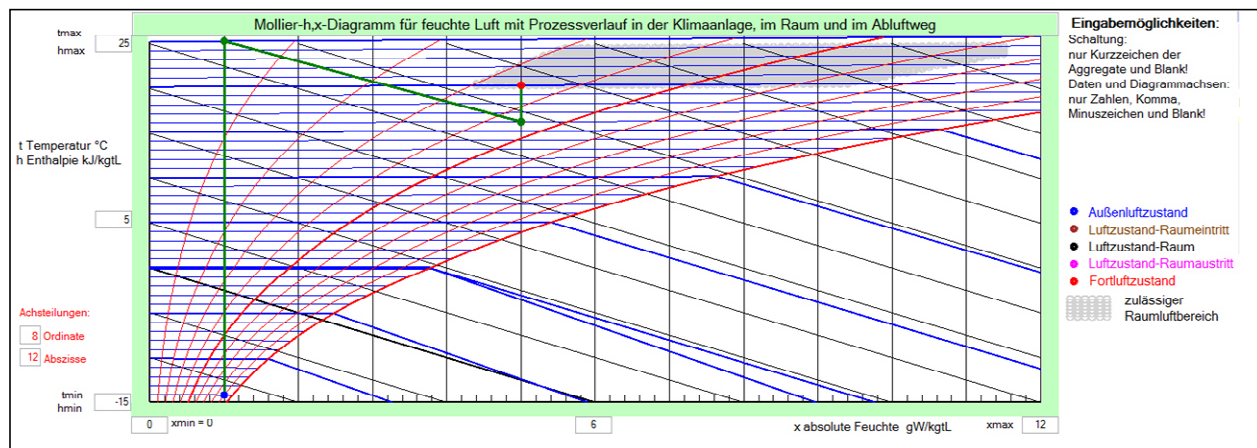




- Nach Kontrolle **RECHNEN** drücken
- Nach Anzeige Rechnung beendet! **DIAGRAMM** drücken



- Achsbeschriftungen und Achsteilungen so ändern, dass das h,x-Schaubild gut lesbar wird.
- **DIAGRAMM** drücken



- Feststellungen:**
- Luftzustände am Raumeintritt, im Raum und am Raumaustritt ( $\equiv$  Fortluftzustand) liegen aufeinander, da keinerlei Raumlasten vorhanden sind und keine Luftbehandlung der Abluft erfolgt.
  - Zulässiger Raumluftbereich wird richtig dargestellt.
  - Lufttemperatur von 25 °C wird nicht überschritten, da darüber höhere Kosten für die Wärmebereitstellung gelten.

- **DRUCK** aktivieren

Objektbezeichnung: C:\SD\FE\_TGA\Klimaanlage\Beispiel\_1\

### Eingabedaten:

Eingesetzte Aggregate in der Zu- und Abluftstrecke:

Erhitzer Wäscher Erhitzer >>>|Raum|

|Raum|>>>

Aggregatedaten:

k = 1  
Erhitzer: k1H = 0,05 €/kWh tHG = 25,0 °C k2H = 0,15 €/kWh  
Maximal zulässige Lufttemperatur tHmax = 40,0 °C

k = 2  
Wäscher: etaBmin = 0,50 etaBmax = 0,95 kW = 0,35 €/kWh pWa = 0,00 €/m³

k = 3  
 Erhitzer: k1H = 0,05 €/kWh tHG = 25,0 °C k2H = 0,15 €/kWh  
 Maximal zulässige Lufttemperatur tHmax = 40,0 °C

k = 4  
 Raum: DHR = 0,0 kW DHRO = 0,0 kW DWR = 0,0 gW/s

Der Raumluftbereich ist durch verschiedene Grenzwerte darstellbar:  
 tmin = 20,0 °C tmax = 24,0 °C phimin = 0,30 phimax = 0,65  
 xmin = 0,0 gW/kgTL xmax = 11,5 gW/kgTL hmin = 0,0 kJ/kgTL hmax = 100,0 kJ/kgTL

Außenluftzustand und Luftmassenstrom durch die Anlage:  
 p = 101300 Pa tAU = -14,0 °C xAU = 1,00 gW/kgTL m = 8,8 kgTL/s

Für die Untersuchungsbereiche der Etappenfelder ee = 1 ... eeR gelten die Grenzwerte:

| ee | tmin<br>°C | tmax<br>°C | phimin<br>- | phimax<br>- | xmin<br>gW/kgTL | xmax<br>gW/kgTL | hmin<br>kJ/kgTL | hmax<br>kJ/kgTL | ttaumin<br>°C | ttamax<br>°C |
|----|------------|------------|-------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|--------------|
| 1  | -20,0      | 40,0       | 0,00        | 1,00        | 0,0             | 25,0            | -20,0           | 100,0           | -50,0         | 35,0         |
| 2  | -20,0      | 40,0       | 0,00        | 1,10        | 0,0             | 25,0            | -20,0           | 100,0           | -50,0         | 35,0         |
| 3  | -20,0      | 40,0       | 0,00        | 1,00        | 0,0             | 25,0            | -20,0           | 100,0           | -50,0         | 35,0         |
| 4  | -20,0      | 40,0       | 0,00        | 1,00        | 0,0             | 25,0            | -20,0           | 100,0           | -50,0         | 35,0         |
| 5  | -20,0      | 40,0       | 0,00        | 1,00        | 0,0             | 25,0            | -20,0           | 100,0           | -50,0         | 35,0         |

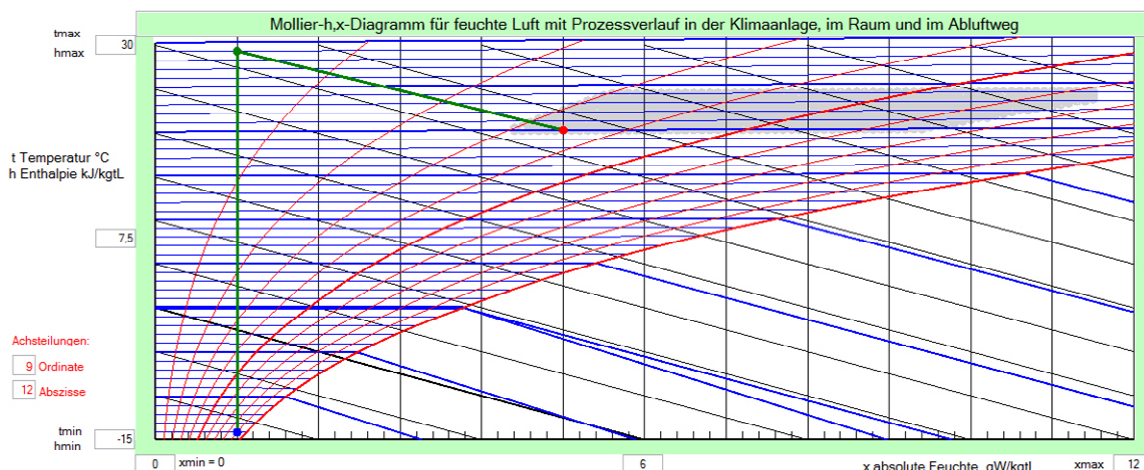
### Ergebnisse: Etappenfelder, zwischenliegende Aggregattypen, optimale Betriebszustände

| ee | Aggregattyp | topt<br>°C | xopt<br>gW/kgTL | Kopt<br>€/h | Aktion                                        |
|----|-------------|------------|-----------------|-------------|-----------------------------------------------|
| 1  | Erhitzer    | -14,0      | 1,0             | 0,00        | Außenluftzustand                              |
| 2  | Wäscher     | 25,0       | 1,0             | 17,36       | 347,3 kW (Leistung)                           |
| 3  | Erhitzer    | 16,0       | 5,0             | 17,50       | 0,6 (Befeuchtungsgrad)                        |
| 4  | Raum-unten  | 20,0       | 5,0             | 19,30       | 35,9 kW (Leistung)                            |
| 5  | Raum-oben   | 20,0       | 5,0             | 19,30       | unendl kJ/kgW (dh/dx Raumluft)                |
| 6  |             | 20,0       | 5,0             | 19,30       | 0,0 K (Temperaturerhöhung)<br>Fortluftzustand |

### Minimalwert der Zielfunktion:

KSUM = 19,30 €/h bei einem Luftmassenstrom m = 8,80 kgTL/s Anzahl der Iterationen: 0

- Feststellungen:**
- Der optimale Weg – verkörpert durch  $t_{opt}$  und  $x_{opt}$  – stimmt mit dem Diagramm überein.
  - Im Raum erfolgen keine Temperaturerhöhung und keine Feuchtezunahme, da alle Raumlasten null sind.
  - Die Lufterwärmung ist auf die zwei Erhitzer aufgeteilt, sodass die Lufttemperatur von 25 °C nicht überschritten wird. Würde tHG = 40 °C gelten, ergäbe sich beispielsweise nachfolgender Verlauf bei gleichen Kosten.



Will man die Details der Luftzustandsänderung verfolgen, so sind ausgewählte Etappenfelder ee zu betrachten. Alle Luftzustände (gekennzeichnet durch t,x), die unter den gegebenen technischen Möglichkeiten und den getroffenen Restriktionen erreicht werden können, sind mit den bis zu diesem Zustandspunkt erforderlichen Kosten in €/h belegt. Im vorliegenden Sonderfall werden alle ee = 1 ... 6 ausgegeben.

[DIAGRAMM](#)
[DRUCK](#)

Evtl. Ausgabe der Etappenfelder angeben:

eeAnzmin

1

eeAnzmax

6

- [DRUCK](#) aktivieren

## Ergebnisse: Kosten pro Betriebsstunde - Eintragungen in die Etappenfelder

(Werte sind auf ganze € gerundet)

|      |                                  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|------|----------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| ee = | 1                                |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| t    | x in g Wasser / kg trockene Luft |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| °C   | 0                                | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 |
| 40   | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 39   | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 38   | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 37   | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 36   | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 35   | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 34   | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 33   | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 32   | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 31   | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 30   | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 29   | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 28   | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 27   | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 26   | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 25   | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 24   | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 23   | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 22   | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 21   | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 20   | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 19   | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 18   | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 17   | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 16   | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 15   | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 14   | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 13   | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 12   | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 11   | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 10   | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 9    | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 8    | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 7    | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 6    | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 5    | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 4    | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 3    | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 2    | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 1    | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 0    | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -1   | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -2   | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -3   | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -4   | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -5   | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -6   | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -7   | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -8   | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -9   | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -10  | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -11  | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -12  | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -13  | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -14  | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -15  | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -16  | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -17  | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -18  | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -19  | .                                | . | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |

Feststellungen: ■ Außenluft steht kostenlos zur Verfügung.  
■ Bitte nicht dem Finanzminister mitteilen.

ee = 2

| t   | x in g Wasser / kg trockene Luft |    |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|-----|----------------------------------|----|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| °C  | 0                                | 1  | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 |
| 40  | .                                | 72 | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 39  | .                                | 71 | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 38  | .                                | 69 | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 37  | .                                | 68 | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 36  | .                                | 67 | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 35  | .                                | 65 | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 34  | .                                | 64 | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 33  | .                                | 63 | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 32  | .                                | 61 | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 31  | .                                | 60 | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 30  | .                                | 59 | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 29  | .                                | 57 | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 28  | .                                | 56 | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 27  | .                                | 55 | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 26  | .                                | 53 | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 25  | .                                | 17 | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 24  | .                                | 17 | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 23  | .                                | 16 | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 22  | .                                | 16 | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 21  | .                                | 16 | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 20  | .                                | 15 | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 19  | .                                | 15 | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 18  | .                                | 14 | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 17  | .                                | 14 | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 16  | .                                | 13 | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 15  | .                                | 13 | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 14  | .                                | 12 | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 13  | .                                | 12 | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 12  | .                                | 12 | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 11  | .                                | 11 | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 10  | .                                | 11 | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 9   | .                                | 10 | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 8   | .                                | 10 | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 7   | .                                | 9  | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 6   | .                                | 9  | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 5   | .                                | 8  | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 4   | .                                | 8  | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 3   | .                                | 8  | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 2   | .                                | 7  | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 1   | .                                | 7  | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 0   | .                                | 6  | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -1  | .                                | 6  | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -2  | .                                | 5  | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -3  | .                                | 5  | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -4  | .                                | 4  | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -5  | .                                | 4  | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -6  | .                                | 4  | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -7  | .                                | 3  | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -8  | .                                | 3  | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -9  | .                                | 2  | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -10 | .                                | 2  | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -11 | .                                | 1  | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -12 | .                                | 1  | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -13 | .                                | 0  | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -14 | .                                | 0  | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -15 | .                                | .  | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -16 | .                                | .  | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -17 | .                                | .  | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -18 | .                                | .  | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -19 | .                                | .  | . | . | . | . | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |

- Feststellungen:
- Nach dem Erhitzer (Vorwärmer) ee = 2 ergeben sich technisch mögliche Luftzustände auf der Isohygren ( $x = 1 \text{ g}_{\text{Wasser}}/\text{kg}_{\text{trockene Luft}}$ ) bis zur Temperatur  $t_{\text{Hmax}} = 40 \text{ °C}$  (Begrenzung gemäß Eingabe).
  - Bei  $-13 \text{ °C}$  werden infolge der Rundung auf ganze € die Betriebskosten noch mit  $0 \text{ €/h}$  angezeigt.
  - Oberhalb der Lufttemperatur  $25 \text{ °C}$  erfolgt ein Kostensprung, da die Wärmebereitstellungskosten gemäß Eingabe dann bedeutend höher sind. Dabei ist zu beachten, dass die **gesamte** Wärme vom Wärmeträger (Wasser) höherer Temperatur zugeführt wird.

ee = 3

| t   | x in g Wasser / kg trockene Luft |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|-----|----------------------------------|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| °C  | 0                                | 1 | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 |
| 40  | . 72                             | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 39  | . 71                             | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 38  | . 69                             | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 37  | . 68                             | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 36  | . 67                             | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 35  | . 65                             | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 34  | . 64                             | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 33  | . 63                             | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 32  | . 61                             | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 31  | . 60                             | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 30  | . 59                             | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 29  | . 57                             | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 28  | . 56                             | . | .  | .  | .  | .  | 72 | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 27  | . 55                             | . | .  | .  | .  | .  | 71 | 72 | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 26  | . 53                             | . | .  | .  | .  | .  | 68 | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 25  | . 17                             | . | .  | .  | .  | 67 | 68 | 71 | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 24  | . 17                             | . | .  | .  | .  | 64 | 67 | 70 | 72 | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 23  | . 16                             | . | .  | .  | .  | 63 | 64 | 68 | 72 | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 22  | . 16                             | . | .  | .  | .  | 60 | 63 | 67 | 70 | 72 | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 21  | . 16                             | . | .  | .  | .  | 59 | 63 | 64 | 70 | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 20  | . 15                             | . | .  | .  | .  | 58 | 60 | 66 | 67 | 71 | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 19  | . 15                             | . | .  | .  | .  | 56 | 59 | 63 | 66 | 70 | 72 | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 18  | . 14                             | . | .  | .  | .  | 55 | 59 | 62 | 66 | 68 | 71 | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 17  | . 14                             | . | .  | .  | .  | 54 | 56 | 60 | 63 | 67 | 70 | 73 | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 16  | . 13                             | . | .  | .  | 17 | 18 | 56 | 59 | 63 | 66 | 69 | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 15  | . 13                             | . | .  | .  | 17 | 17 | 54 | 58 | 60 | 64 | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 14  | . 12                             | . | .  | .  | 15 | 17 | 54 | 56 | 60 | 63 | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 13  | . 12                             | . | .  | .  | 15 | 16 | 17 | 55 | 58 | 62 | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 12  | . 12                             | . | 14 | .  | 15 | 16 | 17 | 54 | 57 | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 11  | . 11                             | . | 13 | .  | 14 | 15 | 16 | 18 | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 10  | . 11                             | . | 13 | .  | 14 | 15 | 16 | 17 | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 9   | . 10                             | . | 13 | .  | 13 | 13 | 14 | 16 | 17 | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 8   | . 10                             | . | 12 | .  | 13 | 14 | 15 | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 7   | . 9                              | . | 11 | .  | 12 | 14 | 15 | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 6   | . 9                              | . | 11 | .  | 12 | 13 | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 5   | . 8                              | . | 10 | .  | 11 | 13 | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 4   | . 8                              | . | 10 | .  | 11 | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 3   | . 8                              | . | 9  | .  | 10 | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 2   | . 7                              | 9 | 9  | .  | 10 | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 1   | . 7                              | 8 | 9  | 10 | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 0   | . 6                              | 7 | 8  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -1  | . 6                              | 7 | 8  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -2  | . 5                              | 6 | 7  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -3  | . 5                              | 6 | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -4  | . 4                              | 5 | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -5  | . 4                              | 5 | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -6  | . 4                              | 4 | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -7  | . 3                              | 4 | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -8  | . 3                              | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -9  | . 2                              | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -10 | . 2                              | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -11 | . 1                              | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -12 | . 1                              | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -13 | . 0                              | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -14 | . 0                              | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -15 | .                                | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -16 | .                                | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -17 | .                                | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -18 | .                                | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| -19 | .                                | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |

- Feststellungen:
- Die physikalisch-technisch möglichen Luftzustandsänderungen im unbeheizten Wäscher verlaufen längs der Feuchtkugeltemperatur des Ausgangszustandes.
  - Ausgehend von allen denkbaren Luftzuständen nach dem Vorwärmer ee = 2 sind die Luftzustände nach dem Wäscher ee = 3 ermittelt, die dem Regelbereich gemäß Eingabe ( $\eta_B = 0,5 \dots 0,95$ ) entsprechen.
  - Die Kostensprünge setzen sich entsprechend der Ausgangswerte fort.
  - Das auch noch die Luftzustände von ee = 2 enthalten sind, ist logisch, denn sie gelten für den stillstehendem Wäscher, was selbstverständlich auch noch eine Option beim Betrieb der Klimaanlage ist.

| ee = 4 |                                  |    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |  |
|--------|----------------------------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|--|
| t      | x in g Wasser / kg trockene Luft |    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |  |
| °C     | 0                                | 1  | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18  | 19  | 20  | 21  | 22  | 23  | 24  | 25  |     |  |  |
| 40     | .                                | 37 | 59  | 52  | 49  | 50  | 54  | 57  | 94  | 97  | 101 | 104 | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |  |  |
| 39     | .                                | 36 | 58  | 51  | 48  | 48  | 52  | 56  | 93  | 95  | 100 | 103 | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |  |  |
| 38     | .                                | 35 | 57  | 49  | 47  | 47  | 51  | 54  | 91  | 94  | 98  | 101 | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |  |  |
| 37     | .                                | 33 | 55  | 48  | 45  | 46  | 49  | 53  | 90  | 93  | 97  | 100 | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |  |  |
| 36     | .                                | 32 | 54  | 47  | 44  | 44  | 48  | 51  | 89  | 91  | 95  | 98  | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |  |  |
| 35     | .                                | 31 | 53  | 45  | 43  | 43  | 47  | 50  | 87  | 90  | 94  | 97  | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |  |  |
| 34     | .                                | 29 | 51  | 44  | 41  | 42  | 45  | 49  | 86  | 89  | 93  | 96  | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |  |  |
| 33     | .                                | 28 | 50  | 43  | 40  | 40  | 44  | 47  | 84  | 87  | 91  | 94  | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |  |  |
| 32     | .                                | 27 | 49  | 41  | 39  | 39  | 43  | 46  | 83  | 86  | 90  | 93  | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |  |  |
| 31     | .                                | 25 | 47  | 40  | 37  | 38  | 41  | 45  | 82  | 85  | 89  | 92  | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |  |  |
| 30     | .                                | 24 | 46  | 38  | 36  | 36  | 40  | 43  | 80  | 83  | 87  | 90  | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |  |  |
| 29     | .                                | 23 | 45  | 37  | 35  | 35  | 39  | 42  | 79  | 82  | 86  | 89  | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |  |  |
| 28     | .                                | 21 | 43  | 36  | 33  | 34  | 37  | 41  | 78  | 80  | 85  | 88  | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |  |  |
| 27     | .                                | 20 | 42  | 34  | 32  | 32  | 36  | 39  | 76  | 79  | 83  | 86  | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |  |  |
| 26     | .                                | 19 | 41  | 33  | 30  | 31  | 35  | 38  | 75  | 78  | 82  | 85  | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |  |  |
| 25     | .                                | 17 | 18  | 19  | 20  | 22  | 23  | 24  | 62  | 67  | 73  | 76  | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |  |  |
| 24     | .                                | 17 | 17  | 19  | 20  | 21  | 22  | 24  | 62  | 67  | 72  | 76  | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |  |  |
| 23     | .                                | 16 | 17  | 18  | 19  | 21  | 22  | 23  | 62  | 66  | 72  | 75  | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |  |  |
| 22     | .                                | 16 | 17  | 18  | 19  | 20  | 21  | 23  | 61  | 66  | 71  | 75  | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |  |  |
| 21     | .                                | 16 | 16  | 17  | 18  | 20  | 21  | 22  | 61  | 66  | 71  | 74  | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |  |  |
| 20     | .                                | 15 | 16  | 17  | 18  | 19  | 20  | 22  | 60  | 65  | 70  | 74  | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |  |  |
| 19     | .                                | 15 | 15  | 17  | 17  | 19  | 20  | 21  | 60  | 65  | 70  | 73  | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |  |  |
| 18     | .                                | 14 | 15  | 16  | 17  | 18  | 19  | 21  | 59  | 64  | 69  | 73  | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |  |  |
| 17     | .                                | 14 | 14  | 16  | 17  | 18  | 19  | 20  | 59  | 64  | 69  | 73  | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |  |  |
| 16     | .                                | 13 | 14  | 15  | 16  | 18  | 18  | 20  | 58  | 63  | 69  | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |  |  |
| 15     | .                                | 13 | 13  | 15  | 16  | 17  | 18  | 20  | 58  | 63  | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |  |  |
| 14     | .                                | 12 | 13  | 14  | 15  | 17  | 18  | 19  | 57  | 62  | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |  |  |
| 13     | .                                | 12 | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | 19  | 57  | 62  | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |  |  |
| 12     | .                                | 12 | 12  | 13  | 14  | 16  | 17  | 18  | 57  | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |  |  |
| 11     | .                                | 11 | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  | 18  | .   | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |  |  |
| 10     | .                                | 11 | 11  | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |  |  |
| 9      | .                                | 10 | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 17  | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |  |  |
| 8      | .                                | 10 | 10  | 12  | 13  | 14  | 15  | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |  |  |
| 7      | .                                | 9  | 10  | 11  | 12  | 14  | 15  | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |  |  |
| 6      | .                                | 9  | 9   | 11  | 12  | 13  | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |  |  |
| 5      | .                                | 8  | 9   | 10  | 11  | 13  | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |  |  |
| 4      | .                                | 8  | 9   | 10  | 11  | .   | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |  |  |
| 3      | .                                | 8  | 8   | 9   | 10  | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |  |  |
| 2      | .                                | 7  | 8   | 9   | 10  | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |  |  |
| 1      | .                                | 7  | 7   | 9   | 10  | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |  |  |
| 0      | .                                | 6  | 7   | 8   | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |  |  |
| -1     | .                                | 6  | 6   | 8   | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |  |  |
| -2     | .                                | 5  | 6   | 7   | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |  |  |
| -3     | .                                | 5  | 5   | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |  |  |
| -4     | .                                | 4  | 5   | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |  |  |
| -5     | .                                | 4  | 5   | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |  |  |
| -6     | .                                | 4  | 4   | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |  |  |
| -7     | .                                | 3  | 4   | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |  |  |
| -8     | .                                | 3  | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |  |  |
| -9     | .                                | 2  | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |  |  |
| -10    | .                                | 2  | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |  |  |
| -11    | .                                | 1  | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |  |  |
| -12    | .                                | 1  | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |  |  |
| -13    | .                                | 0  | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |  |  |
| -14    | .                                | 0  | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |  |  |
| -15    | .                                | .  | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |  |  |

- Feststellungen:
- Alle Luftzustände des Etappenfeldes ee = 3 können Ausgangszustände beim Betrieb des Nachwärmers sein, wobei sich die Endpunkte der Zustandsänderungen auf einer Isohygren ( $x = \text{const}$ ) befinden.
  - Die Prozesskosten bei  $t = 40\text{ °C}$ ,  $x = 1\text{ g}_{\text{Wasser}}/\text{kg}_{\text{trockene Luft}}$  betragen 37 €/h während im Etappenfeld ee = 2 (nach dem Vorwärmer) bereits 72 €/h galten. Das Paradoxon zeigt die "Intelligenz des Algorithmus". Der Vorwärmer erreichte diesen Zustandspunkt durch Einsatz der hohen Wärmequalität, die mit Kosten von 0,15 €/kWh belegt ist  $(1,01 \cdot (40 - (-14)) \cdot 8,8 \cdot 0,15 = 72)$ . Jetzt erfolgt eine zweistufige Lufterwärmung. Von -14 °C bis 25 °C wird im Vorwärmer z. B. Abfallwärme mit Kosten von 0,05 €/kWh und im Nachwärmer von 25 °C bis auf 40 °C die teure Wärme eingesetzt  $(1,01 \cdot (25 - (-14)) \cdot 8,8 \cdot 0,05 + 1,01 \cdot (40 - 25) \cdot 8,8 \cdot 0,15 = 37)$ .



ee = 5

| t   | x in g Wasser / kg trockene Luft |   |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----|----------------------------------|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| °C  | 0                                | 1 | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18  | 19  | 20  | 21  | 22  | 23  | 24  | 25  |
| 40  | .                                | . | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |
| 39  | .                                | . | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |
| 26  | .                                | . | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |
| 25  | .                                | . | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |
| 24  | .                                | . | .   | .   | .   | .   | 22  | 24  | 62  | 67  | 72  | 76  | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |
| 23  | .                                | . | .   | .   | .   | .   | 22  | 23  | 62  | 66  | 72  | 75  | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |
| 22  | .                                | . | .   | .   | .   | 20  | 21  | 23  | 61  | 66  | 71  | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |
| 21  | .                                | . | .   | .   | .   | 20  | 21  | 22  | 61  | 66  | 71  | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |
| 20  | .                                | . | .   | .   | .   | 19  | 20  | 22  | 60  | 65  | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |
| 19  | .                                | . | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |
| 18  | .                                | . | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |
| 17  | .                                | . | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |
| 16  | .                                | . | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |
| 15  | .                                | . | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |
| 14  | .                                | . | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |
| 13  | .                                | . | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |
| 12  | .                                | . | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |
| 11  | .                                | . | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |
| 10  | .                                | . | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |
| 9   | .                                | . | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |
| 8   | .                                | . | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |
| 7   | .                                | . | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |
| 6   | .                                | . | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |
| 5   | .                                | . | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |
| 4   | .                                | . | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |
| 3   | .                                | . | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |
| 2   | .                                | . | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |
| 1   | .                                | . | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |
| 0   | .                                | . | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   | .   |
| -14 | .                                | 0 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| -15 | .                                | . | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |

- Feststellungen:
- Der zulässige Raumluftzustandsbereich schränkt die noch im Etappenfeld  $ee = 4$  vorhandene Lösungsvielfalt beträchtlich ein.
  - Das Betriebskostenminimum liegt bei 19 €/h, nach Ergebnistabelle auf Seite 12 bei genau 19,30 €/h.
  - Ausgehend vom Luftzustand bei Kostenminimum lassen sich die zugehörigen Vorgänger-Luftzustände ermitteln, denn programmintern wurde zu jedem Punkt im Etappenfeld  $ee$  ein Hinweis zum vorhergehenden Luftzustand im Feld  $ee-1$  vermerkt ("quasi ein **Faden zur Rückverfolgung** gelegt").
  - Die Luftzustände des optimalen Weges sind in den vorangegangenen Etappenfeldern gelb hinterlegt ( $\equiv$  Diagramm S. 11 und Tabelle S. 12).

Nach dem Raum-Etappenfeld  $ee = eeR = 5$ , d. h., im Abluftweg (ab Raum\_oben) sind die Betriebskosten der dort installierten Aggregate "fest determiniert"<sup>1</sup>, sodass nur noch der optimale Weg bis zum Fortluftaustritt variantenfrei verfolgt wird<sup>2</sup>. Somit ist in den Etappenfeldern  $ee > eeR$  nur noch ein Zustand mit Kosten belegt.

ee = 6

| t  | x in g Wasser / kg trockene Luft |   |   |   |   |    |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|----|----------------------------------|---|---|---|---|----|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| °C | 0                                | 1 | 2 | 3 | 4 | 5  | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 |
| 40 | .                                | . | . | . | . | .  | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 39 | .                                | . | . | . | . | .  | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 22 | .                                | . | . | . | . | .  | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 21 | .                                | . | . | . | . | .  | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 20 | .                                | . | . | . | . | 19 | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 19 | .                                | . | . | . | . | .  | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |
| 18 | .                                | . | . | . | . | .  | . | . | . | . | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  | .  |

Das einfache Demonstrationsbeispiel verdeutlichte die Arbeitsweise des Algorithmus.

#### Allgemeine Hinweise:

<sup>1</sup>Ein eventuell vorhandener Abluft-Wäscher wird in den Grenzen der vorgegebenen Befeuchtungsgrade  $\eta_{BAmin}$  ...  $\eta_{BAmax}$  schrittweise in Form von Variantenvergleichen mit je einem determinierten  $\eta_{BA}$  betrachtet. Dieser liegt dann der gesamten Prozessoptimierung zugrunde. Erst nach Bestimmung aller Prozesse wird das Kostenminimum bestimmt und der wirtschaftlichste Klimaprozess ausgewählt und angezeigt.

<sup>2</sup>Die optimalen Luftzustände  $t_{opt}$  und  $x_{opt}$  unterliegen nach dem Raum ( $ee > eeR$ ) nicht mehr der Diskretisierung.

#### 4 Beispiel\_2 (angelehnt an Beispiel 2 in [1])

Es ist der optimale Prozessverlauf für eine Hörsaal-Klimatisierung in je einem Winter- und Sommerfall zu ermitteln, wobei unterschiedliche Aggregate zur energetischen Verbesserung eingesetzt werden:

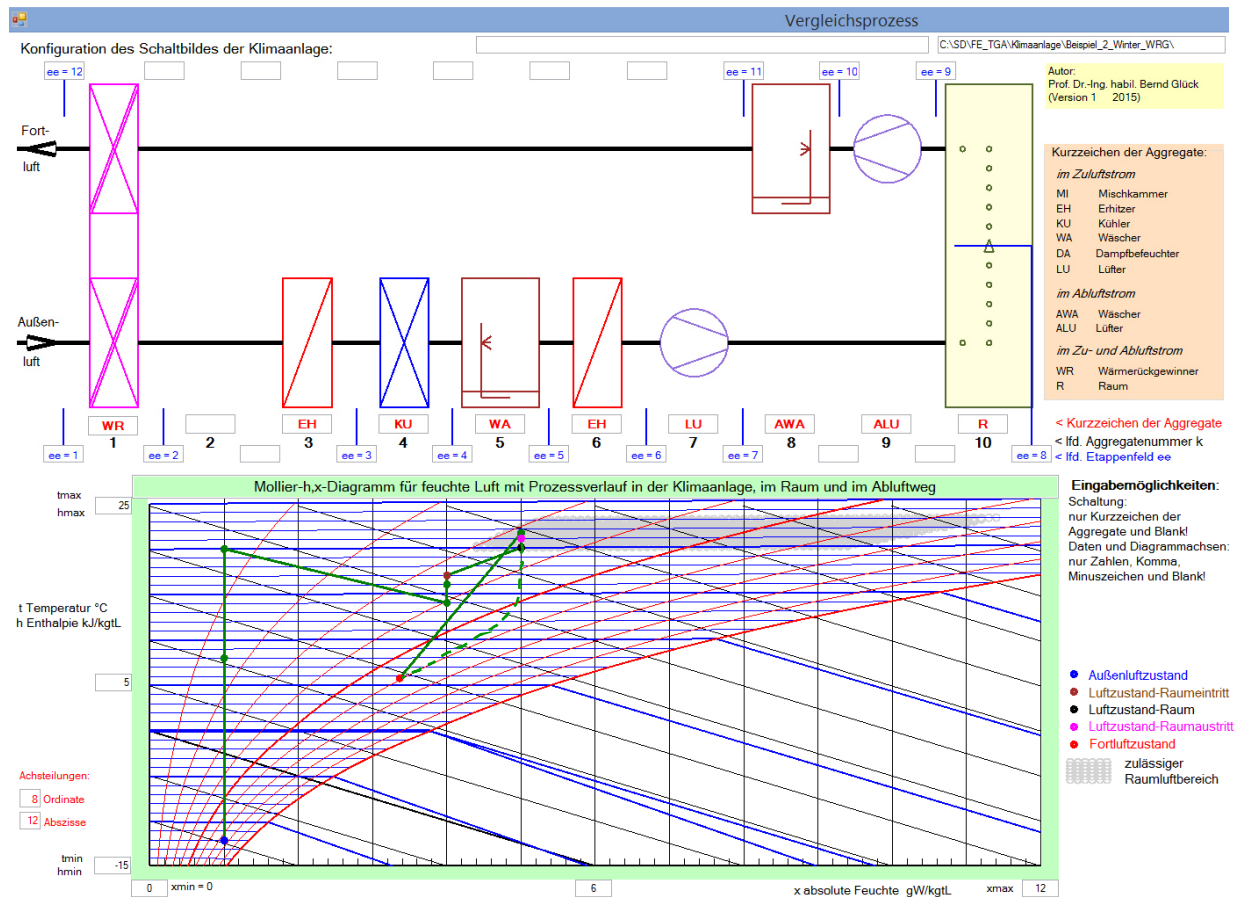
1. Wärmerückgewinner
2. Mischer
3. Wärmerückgewinner plus Mischer
4. Wärmerückgewinner plus Abluft-Wäscher.

Für die Eingaben gelten:

| Winter                                                                                                                                                               |  | Sommer                                                                                                                                                                                              |  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| <b>Luftzustände und Massedurchsatz:</b>                                                                                                                              |  | <b>Luftzustände und Massedurchsatz:</b>                                                                                                                                                             |  |
| <b>zulässiger Raumlufbereich</b><br>tmin / tmax 20,0 / 23,0 °C<br>phimin / phimax 0,30 / 0,65 -<br>xmin / xmax 0,0 / 11,5 gW/kgTL<br>hmin / hmax 0,0 / 100,0 kJ/kgTL |  | <b>Außenluftzustand</b><br>p 101300 Pa<br>tAU -12,0 °C<br>xAU 1,0 gW/kgTL                                                                                                                           |  |
| <b>Raum (unten)</b><br>DHR 38,0 kW<br>DWR 5,5 gW/s                                                                                                                   |  | <b>Raum (oben)</b><br>DHRO 9,0 kW                                                                                                                                                                   |  |
|                                                                                                                                                                      |  | <b>Raum (unten)</b><br>DHR 75,0 kW<br>DWR 9,6 gW/s                                                                                                                                                  |  |
|                                                                                                                                                                      |  | <b>Raum (oben)</b><br>DHRO 9,0 kW                                                                                                                                                                   |  |
| Winter und Sommer                                                                                                                                                    |  |                                                                                                                                                                                                     |  |
| <b>Eingabewerte für die Aggregate und den Raum:</b>                                                                                                                  |  |                                                                                                                                                                                                     |  |
| <b>Mischer MI</b><br>MAmin / MAmax 0,50 / 1,00 -<br>kM 0,00 €/h                                                                                                      |  | <b>Wäscher WA (Zuluft)</b><br>etaBmin / etaBmax 0,50 / 0,95 -<br><b>Wäscher AWA (Abluft)</b><br>etaBAmin / etaBAmax 0,50 / 0,95 -<br><b>Wäscher (Zu- und Abluft)</b><br>kW 0,35 €/kWh pWa 0,00 €/m³ |  |
| <b>Erhitzer EH</b><br>k1H / k2H 0,05 / 0,15 €/kWh<br>tHG 25,0 °C tHmax 40,0 °C                                                                                       |  | <b>Dampfbefeuchter DA</b><br>pDB bar abs.<br>kDB €/kWh<br>pWaD €/m³                                                                                                                                 |  |
| <b>Kühler KU</b><br>etaK 0,80 - By 0,75 -<br>k1K / k2K 0,20 / 0,50 €/kWh<br>tKG 16,0 °C tKmin 5,0 °C                                                                 |  | <b>Lüfter LU (Zuluft)</b><br>etaLZ 0,70 - DpZ 700 Pa<br><b>Lüfter ALU (Abluft)</b><br>etaLA 0,83 - DpA 600 Pa<br><b>Lüfter (Zu- und Abluft)</b><br>kL 0,25 €/kWh                                    |  |
| <b>Wärmerückgewinner WR</b><br>PHIWRGTmax 0,60 -<br>kWRG 0,00 €/h                                                                                                    |  | <b>Luftstrom</b><br>m 8,8 kgTL/s                                                                                                                                                                    |  |

*Hinweis:* Gegenüber [1], Beispiel 2 wurde die Außenlufttemperatur auf 36 °C erhöht, um das Zusammenwirken des Wärmerückgewinners und des Abluft-Wäschers deutlich zu demonstrieren. Beide sind in Leistungsstufen (Wärmerückgewinnungsgrad bzw. Befeuchtungsgrad) verstellbar.

## Winter mit Wärmerückgewinner (Beispiel\_2\_Winter\_WRG)



### Ergebnisse: Etappenfelder, zwischliegende Aggregattypen, optimale Betriebszustände

| ee | Aggregattyp              | topt<br>°C | xopt<br>gW/kgL | Kopt<br>€/h | Aktion                                          |
|----|--------------------------|------------|----------------|-------------|-------------------------------------------------|
| 1  | Wärmerückgewinner        | -12,0      | 1,0            | 0,00        | Außenluftzustand<br>0,6 (realisierter Gütegrad) |
| 2  | Erhitzer                 | 8,0        | 1,0            | 0,00        | 106,9 kW (Leistung)                             |
| 3  | Kühler                   | 20,0       | 1,0            | 5,34        | 0,0 kW (Leistung)                               |
| 4  | Wäscher                  | 20,0       | 1,0            | 5,34        | 0,5 (Befeuchtungsgrad)                          |
| 5  | Erhitzer                 | 14,0       | 4,0            | 5,45        | 17,9 kW (Leistung)                              |
| 6  | Zulüfter                 | 16,0       | 4,0            | 6,34        | 0,8 K (Temperaturerhöhung)                      |
| 7  | Raum-unten               | 17,0       | 4,0            | 8,16        | 6909 kJ/kgW (dh/dx Raumluft)                    |
| 8  | Raum-oben                | 20,0       | 5,0            | 8,16        | 1,0 K (Temperaturerhöhung)                      |
| 9  | Ablüfter                 | 21,0       | 5,0            | 8,16        | 0,6 K (Temperaturerhöhung)                      |
| 10 | Wäscher-Abluft           | 21,6       | 5,0            | 9,50        | 0,0 (Befeuchtungsgrad)                          |
| 11 | Wärmerückgewinner-Abluft | 21,6       | 5,0            | 9,50        | 0,6 (realisierter Gütegrad)                     |
| 12 |                          | 5,8        | 3,4            | 9,50        | Fortluftzustand                                 |

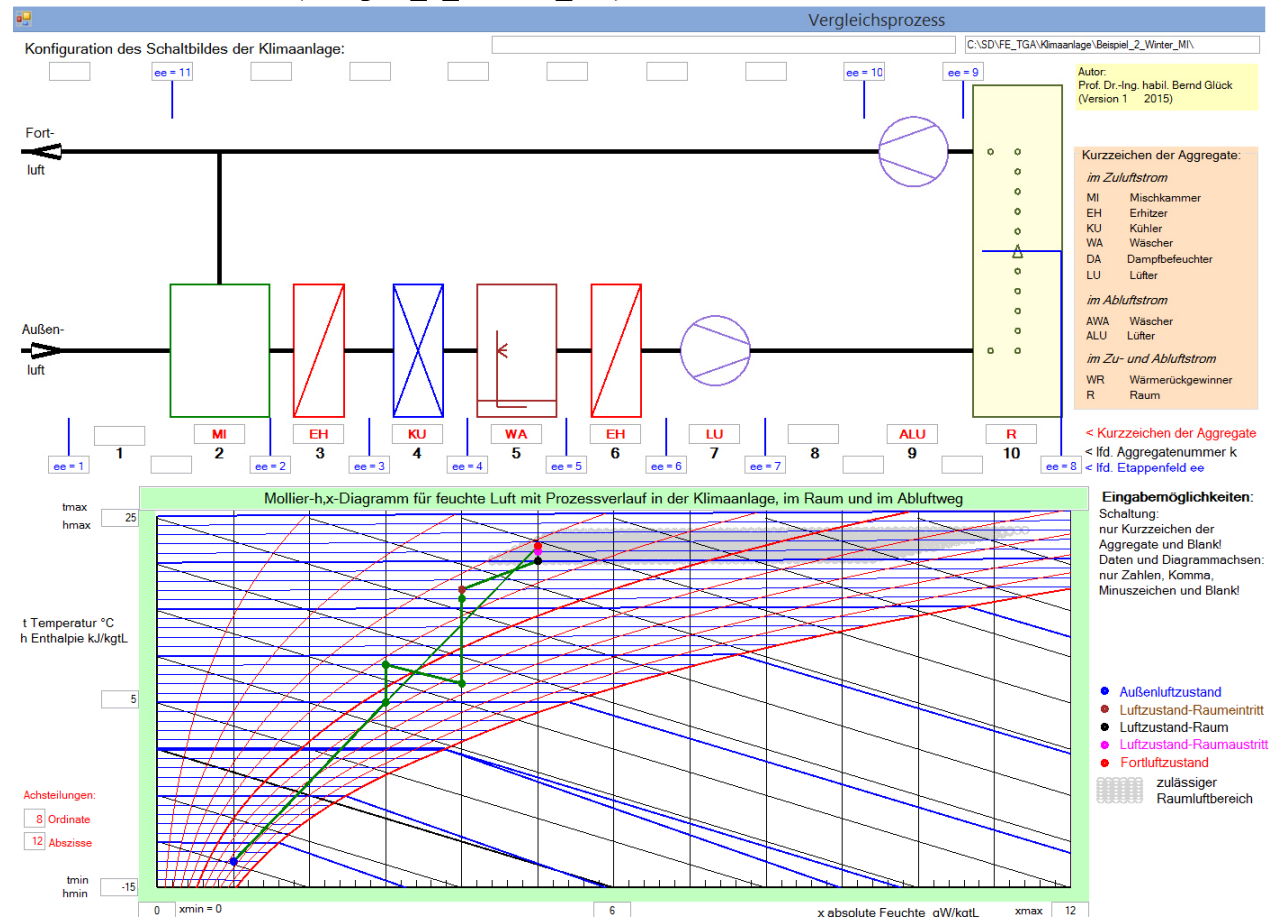
Diskretisierungsvorschrift nicht mehr gültig!

### Minimalwert der Zielfunktion:

KSUM = 9,50 €/h bei einem Luftmassenstrom m = 8,80 kgL/s Anzahl der Iterationen: 2

- Das Diagramm ist aus den jeweiligen Luftzuständen generiert, die in den Etappenfeldern vermerkt sind. Der Verlauf in den Aggregaten selbst ist unbekannt. In der Realität verläuft die Luftabkühlung im Wärmerückgewinner nicht linear. Eine mögliche Variante ist gestrichelt eingetragen. Weitere Erläuterungen finden sich in [1], Seite 42.

## Winter mit Mischer (Beispiel\_2\_Winter\_MI)



## Ergebnisse: Etappenfelder, zwischenliegende Aggregattypen, optimale Betriebszustände

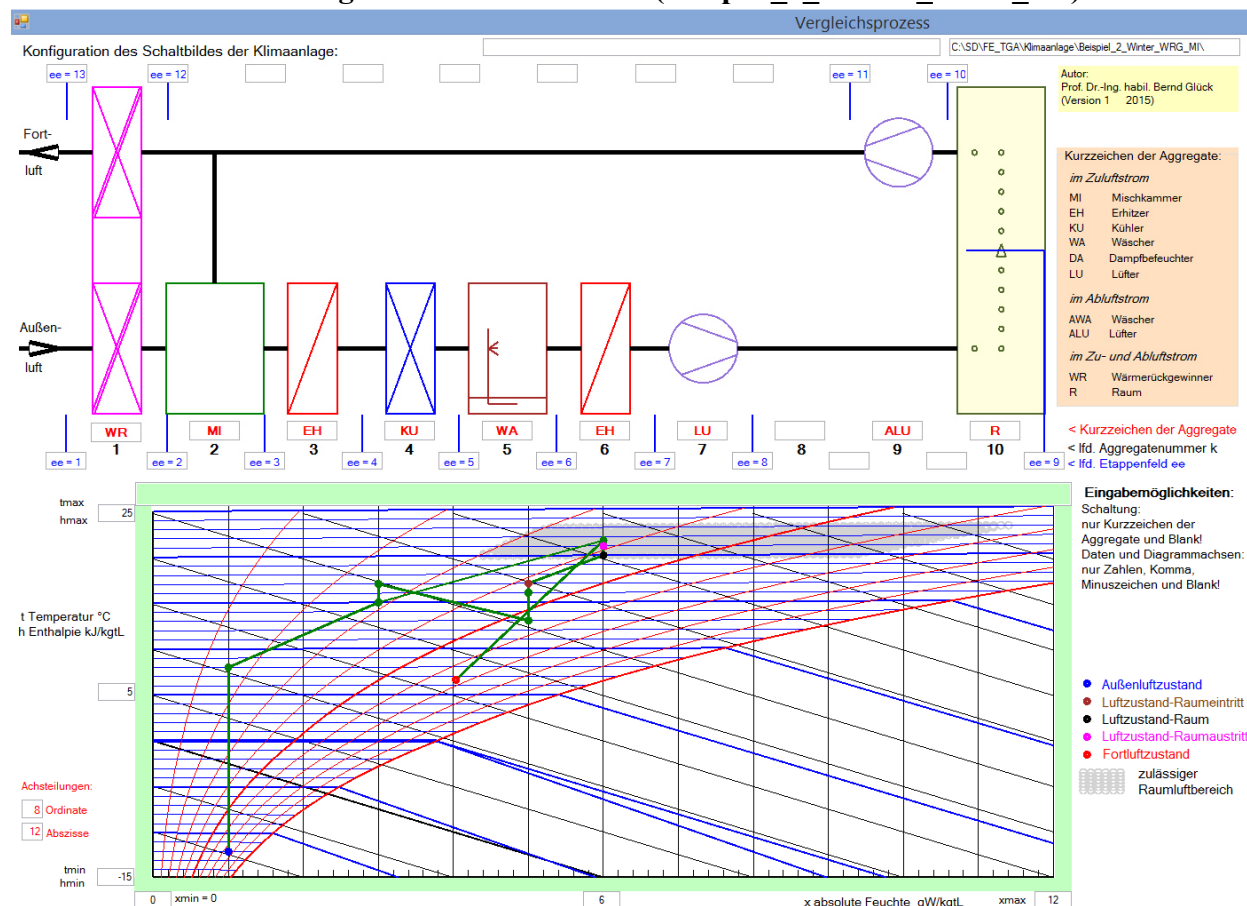
| ee | Aggregattyp                 | topt<br>°C | xopt<br>gW/kgT | Kopt<br>€/h | Aktion                                    |
|----|-----------------------------|------------|----------------|-------------|-------------------------------------------|
| 1  | Mischer -----               | -12,0      | 1,0            | 0,00        | Außenluftzustand<br>0,5 (Außenluftanteil) |
| 2  | Erhitzer -----              | 5,0        | 3,0            | 0,00        | 35,7 kW (Leistung)                        |
| 3  | Kühler -----                | 9,0        | 3,0            | 1,79        | 0,0 kW (Leistung)                         |
| 4  | Wäscher -----               | 9,0        | 3,0            | 1,79        | 0,5 (Befeuchtungsgrad)                    |
| 5  | Erhitzer -----              | 7,0        | 4,0            | 1,89        | 80,6 kW (Leistung)                        |
| 6  | Zulüfter -----              | 16,0       | 4,0            | 5,92        | 0,8 K (Temperaturerhöhung)                |
| 7  | Raum-unten -----            | 17,0       | 4,0            | 7,74        | 6909 kJ/kgW (dh/dx Raumluft)              |
| 8  | Raum-oben -----             | 20,0       | 5,0            | 7,74        | 1,0 K (Temperaturerhöhung)                |
| 9  | Ablüfter -----              | 21,0       | 5,0            | 7,74        | 0,6 K (Temperaturerhöhung)                |
| 10 | Mischer-Abluftabzweig ----- | 21,6       | 5,0            | 9,07        | 0,0 (Parameteränderung)                   |
| 11 |                             | 21,6       | 5,0            | 9,07        | Fortluftzustand                           |

## Minimalwert der Zielfunktion:

KSUM = 9,07 €/h bei einem Luftmassenstrom m = 8,80 kgT/s

Anzahl der Iterationen: 12

## Winter mit Wärmerückgewinner und Mischer (Beispiel\_2\_Winter\_WRG\_MI)



## Ergebnisse: Etappenfelder, zwischengeschaltete Aggregattypen, optimale Betriebszustände

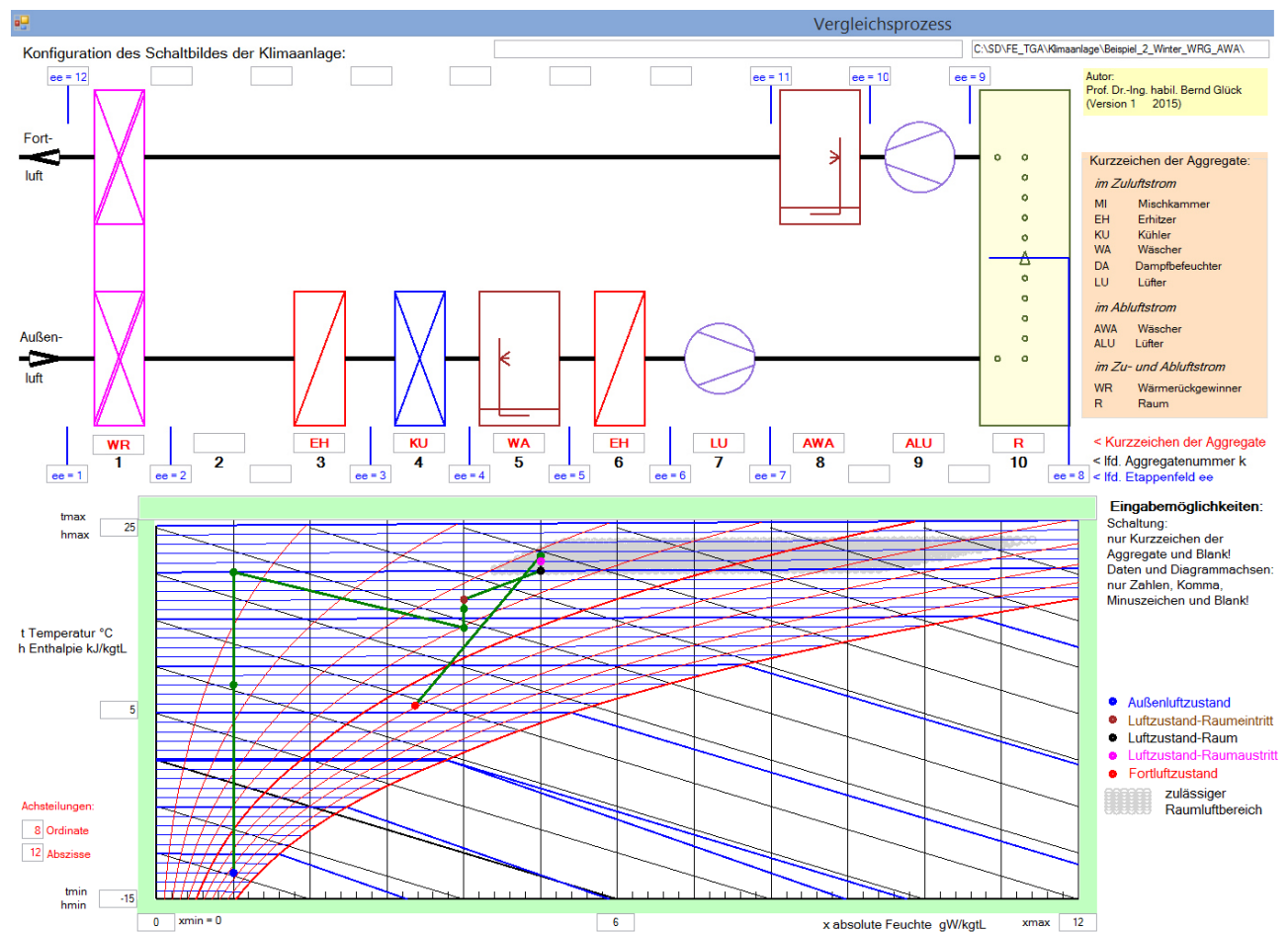
| ee | Aggregattyp              | topt<br>°C | xopt<br>gW/kgL | Kopt<br>€/h | Aktion                                         |
|----|--------------------------|------------|----------------|-------------|------------------------------------------------|
| 1  | Wärmerückgewinner        | -12,0      | 1,0            | 0,00        | Außenluftzustand                               |
| 2  | Mischer                  | 8,0        | 1,0            | 0,00        | 0,6 (realisierter Gütegrad)                    |
| 3  | Erhitzer                 | 15,0       | 3,0            | 0,00        | 0,5 (Außenluftanteil)                          |
| 4  | Kühler                   | 17,0       | 3,0            | 0,89        | 17,9 kW (Leistung)                             |
| 5  | Wäscher                  | 17,0       | 3,0            | 0,89        | 0,0 kW (Leistung)                              |
| 6  | Erhitzer                 | 13,0       | 5,0            | 1,00        | 0,5 (Befeuchtungsgrad)                         |
| 7  | Zulüfter                 | 16,0       | 5,0            | 2,35        | 26,9 kW (Leistung)                             |
| 8  | Raum-unten               | 17,0       | 5,0            | 4,16        | 0,8 K (Temperaturerhöhung)                     |
| 9  | Raum-oben                | 20,0       | 6,0            | 4,16        | 6909 kJ/kgW (dh/dx Raumluft)                   |
| 10 | Ablüfter                 | 21,0       | 6,0            | 4,16        | 1,0 K (Temperaturerhöhung)                     |
| 11 | Mischer-Abluftabzweig    | 21,6       | 6,0            | 5,50        | 0,6 K (Temperaturerhöhung)                     |
| 12 | Wärmerückgewinner-Abluft | 21,6       | 6,0            | 5,50        | 0,0 (Parameteränderung)                        |
| 13 |                          | 6,6        | 4,0            | 5,50        | 0,6 (realisierter Gütegrad)<br>Fortluftzustand |

## Minimalwert der Zielfunktion:

KSUM = 5,50 €/h bei einem Luftmassenstrom m = 8,80 kgT/s Anzahl der Iterationen: 0

- Aufgrund der groben Diskretisierung von 1 K und 1 g<sub>Wasser</sub>/kg<sub>trockene Luft</sub> wird der Mischpunkt um ca. 0,5 g<sub>Wasser</sub>/kg<sub>trockene Luft</sub> verschoben dargestellt (siehe auch Seite 2, unten).

## Winter mit Wärmerückgewinner (Beispiel\_2\_Winter\_WRG\_AWA)



### Ergebnisse: Etappenfelder, zwischliegende Aggregattypen, optimale Betriebszustände

| ee | Aggregattyp              | topt<br>°C | xopt<br>gW/kgTL | Kopt<br>€/h | Aktion                       |
|----|--------------------------|------------|-----------------|-------------|------------------------------|
| 1  | Wärmerückgewinner        | -12,0      | 1,0             | 0,00        | Außenluftzustand             |
| 2  | Erhitzer                 | 8,0        | 1,0             | 0,00        | 0,6 (realisierter Gütegrad)  |
| 3  | Kühler                   | 20,0       | 1,0             | 5,34        | 106,9 kW (Leistung)          |
| 4  | Wäscher                  | 20,0       | 1,0             | 5,34        | 0,0 kW (Leistung)            |
| 5  | Erhitzer                 | 14,0       | 4,0             | 5,45        | 0,5 (Befeuchtungsgrad)       |
| 6  | Zulüfter                 | 16,0       | 4,0             | 6,34        | 17,9 kW (Leistung)           |
| 7  | Raum-unten               | 17,0       | 4,0             | 8,16        | 0,8 K (Temperaturerhöhung)   |
| 8  | Raum-oben                | 20,0       | 5,0             | 8,16        | 6909 kJ/kgW (dh/dx Raumluft) |
| 9  | Ablüfter                 | 21,0       | 5,0             | 8,16        | 1,0 K (Temperaturerhöhung)   |
| 10 | Wäscher-Abluft           | 21,6       | 5,0             | 9,50        | 0,6 K (Temperaturerhöhung)   |
| 11 | Wärmerückgewinner-Abluft | 21,6       | 5,0             | 9,50        | 0,0 (Befeuchtungsgrad)       |
| 12 |                          | 5,8        | 3,4             | 9,50        | 0,6 (realisierter Gütegrad)  |
|    |                          |            |                 |             | Fortluftzustand              |

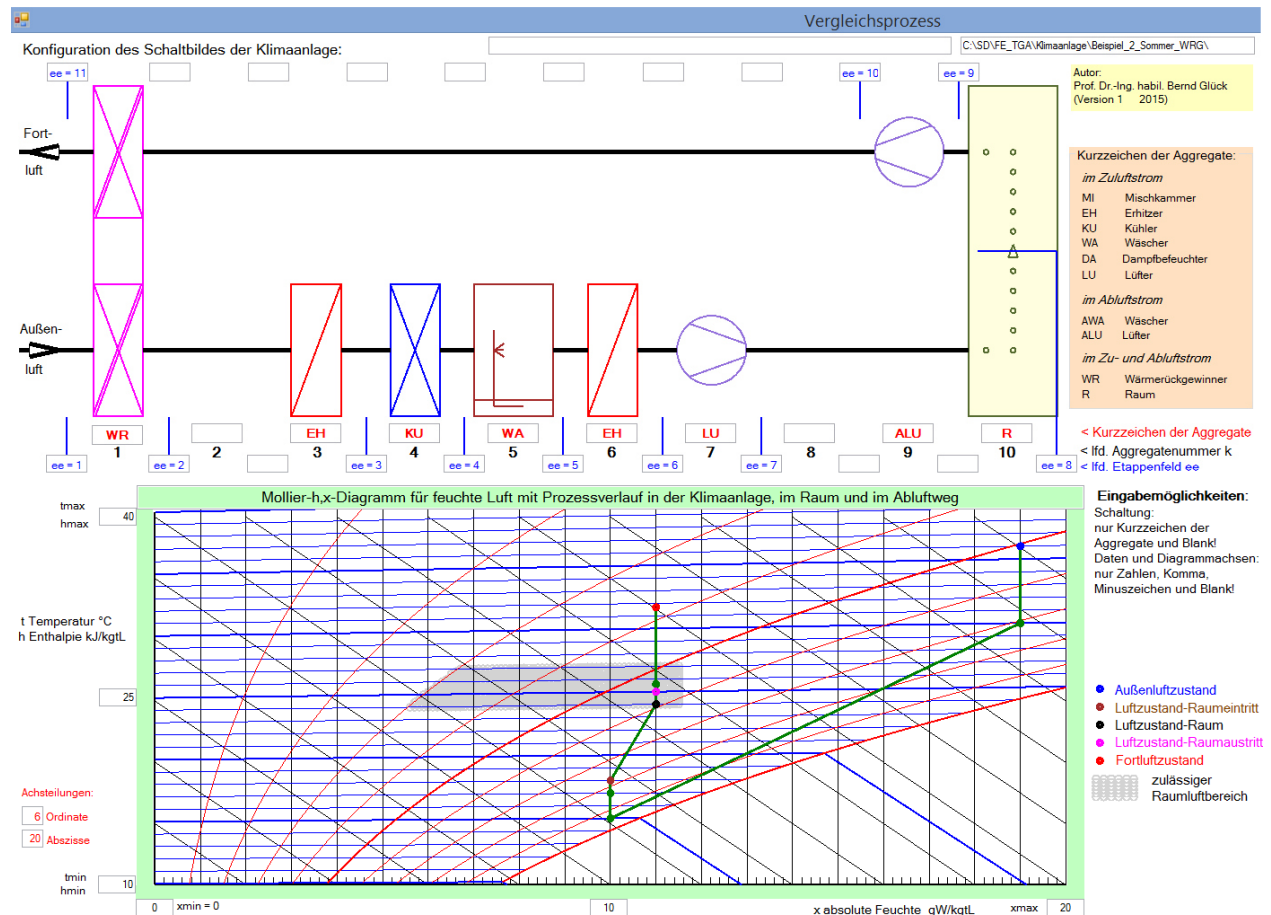
### Minimalwert der Zielfunktion:

KSUM = 9,50 €/h bei einem Luftmassenstrom m = 8,80 kgtL/s Anzahl der Iterationen: 2

- Beim untersuchten Winterbetrieb wird der Abluft-Wäscher nicht betrieben, sodass identische Ergebnisse wie bei der Variante Beispiel\_2\_Winter\_WRG (siehe Seite 19) folgen.

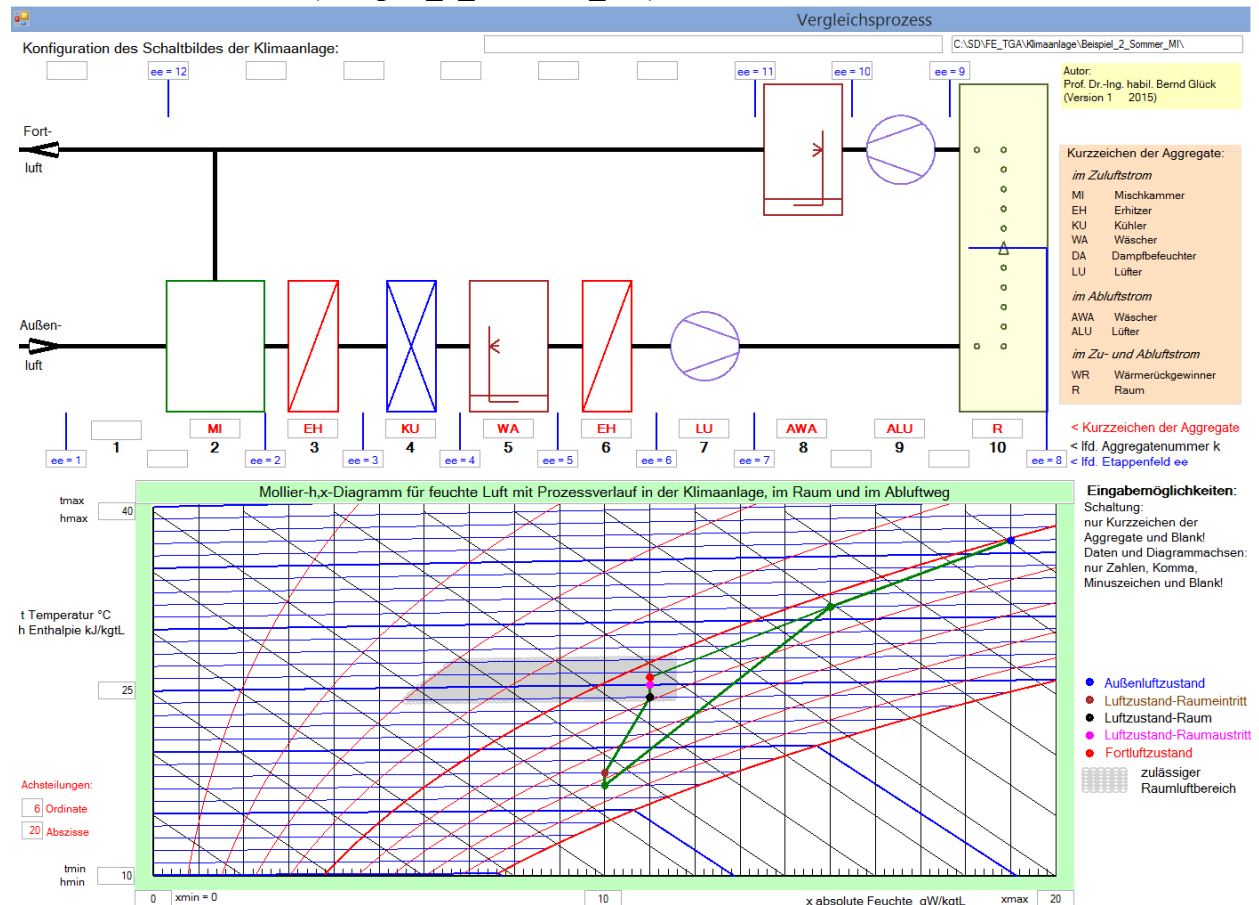


## Sommer mit Wärmerückgewinner (Beispiel\_2\_Sommer\_WRG)





## Sommer mit Mischer (Beispiel\_2\_Sommer\_MI)



## Ergebnisse: Etappenfelder, zwischliegende Aggregattypen, optimale Betriebszustände

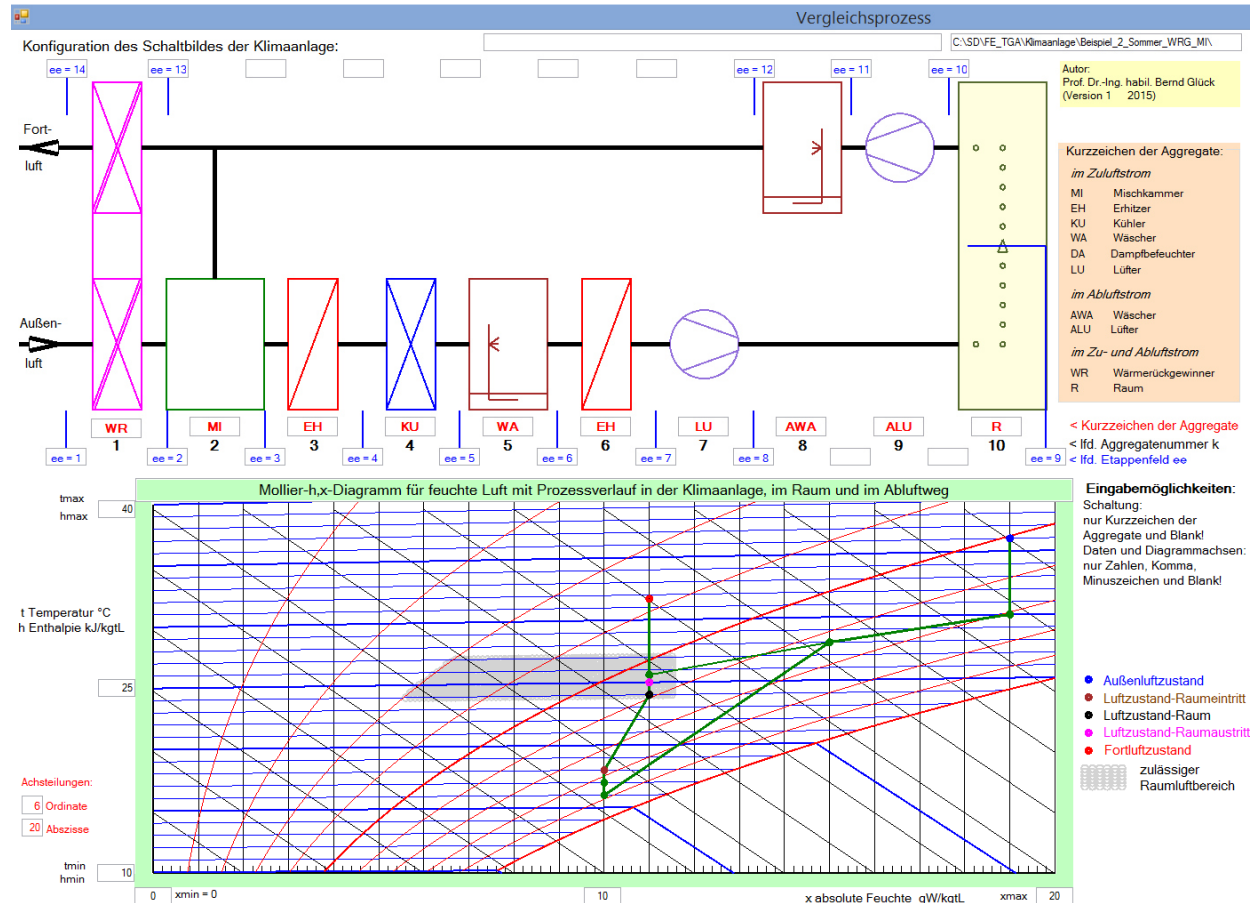
| ee | Aggregattyp           | topt<br>°C | xopt<br>gW/kgL | Kopt<br>€/h | Aktion                       |
|----|-----------------------|------------|----------------|-------------|------------------------------|
| 1  | Mischer               | 36,0       | 19,0           | 0,00        | Außenluftzustand             |
| 2  | Erhitzer              | 31,0       | 15,0           | 0,00        | 0,5 (Außenluftanteil)        |
| 3  | Kühler                | 31,0       | 15,0           | 0,00        | 0,0 kW (Leistung)            |
| 4  | Wäscher               | 17,0       | 10,0           | 118,94      | 237,9 kW (Leistung)          |
| 5  | Erhitzer              | 17,0       | 10,0           | 118,94      | 0,0 (Befeuchtungsgrad)       |
| 6  | Zulüfter              | 17,0       | 10,0           | 118,94      | 0,0 kW (Leistung)            |
| 7  | Raum-unten            | 18,0       | 10,0           | 120,78      | 0,8 K (Temperaturerhöhung)   |
| 8  | Raum-oben             | 24,0       | 11,0           | 120,78      | 7813 kJ/kgW (dh/dx Raumluft) |
| 9  | Ablüfter              | 25,0       | 11,0           | 120,78      | 1,0 K (Temperaturerhöhung)   |
| 10 | Wäscher-Abluft        | 25,6       | 11,0           | 122,15      | 0,6 K (Temperaturerhöhung)   |
| 11 | Mischer-Abluftabzweig | 25,6       | 11,0           | 122,15      | 0,0 (Befeuchtungsgrad)       |
| 12 |                       | 25,6       | 11,0           | 122,15      | 0,0 (Parameteränderung)      |
|    |                       |            |                |             | Fortluftzustand              |

## Minimalwert der Zielfunktion:

KSUM = 122,15 €/h bei einem Luftmassenstrom m = 8,80 kgL/s Anzahl der Iterationen: 11

- Es spielt keine Rolle, ob ein Abluft-Wäscher optional vorhanden ist, denn er steht bei optimalem Anlagenbetrieb still.

## Sommer mit Wärmerückgewinner und Mischer (Beispiel\_2\_Sommer\_WRG\_MI)



## Ergebnisse: Etappenfelder, zwischliegende Aggregattypen, optimale Betriebszustände

| ee | Aggregattyp              | topt<br>°C | xopt<br>gW/kgTL | Kopt<br>€/h | Aktion                                         |
|----|--------------------------|------------|-----------------|-------------|------------------------------------------------|
| 1  | Wärmerückgewinner        | 36,0       | 19,0            | 0,00        | Außenluftzustand                               |
| 2  | Mischer                  | 30,0       | 19,0            | 0,00        | 0,6 (realisierter Gütegrad)                    |
| 3  | Erhitzer                 | 28,0       | 15,0            | 0,00        | 0,5 (Außenluftanteil)                          |
| 4  | Kühler                   | 28,0       | 15,0            | 0,00        | 0,0 kW (Leistung)                              |
| 5  | Wäscher                  | 16,0       | 10,0            | 107,03      | 214,1 kW (Leistung)                            |
| 6  | Erhitzer                 | 16,0       | 10,0            | 107,03      | 0,0 (Befeuchtungsgrad)                         |
| 7  | Zulüfter                 | 17,0       | 10,0            | 107,48      | 9,1 kW (Leistung)                              |
| 8  | Raum-unten               | 18,0       | 10,0            | 109,32      | 0,8 K (Temperaturerhöhung)                     |
| 9  | Raum-oben                | 24,0       | 11,0            | 109,32      | 7813 kJ/kgW (dh/dx Raumluft)                   |
| 10 | Ablüfter                 | 25,0       | 11,0            | 109,32      | 1,0 K (Temperaturerhöhung)                     |
| 11 | Wäscher-Abluft           | 25,6       | 11,0            | 110,68      | 0,6 K (Temperaturerhöhung)                     |
| 12 | Mischer-Abluftabzweig    | 25,6       | 11,0            | 110,68      | 0,0 (Befeuchtungsgrad)                         |
| 13 | Wärmerückgewinner-Abluft | 25,6       | 11,0            | 110,68      | 0,0 (Parameteränderung)                        |
| 14 |                          | 31,7       | 11,0            | 110,68      | 0,6 (realisierter Gütegrad)<br>Fortluftzustand |

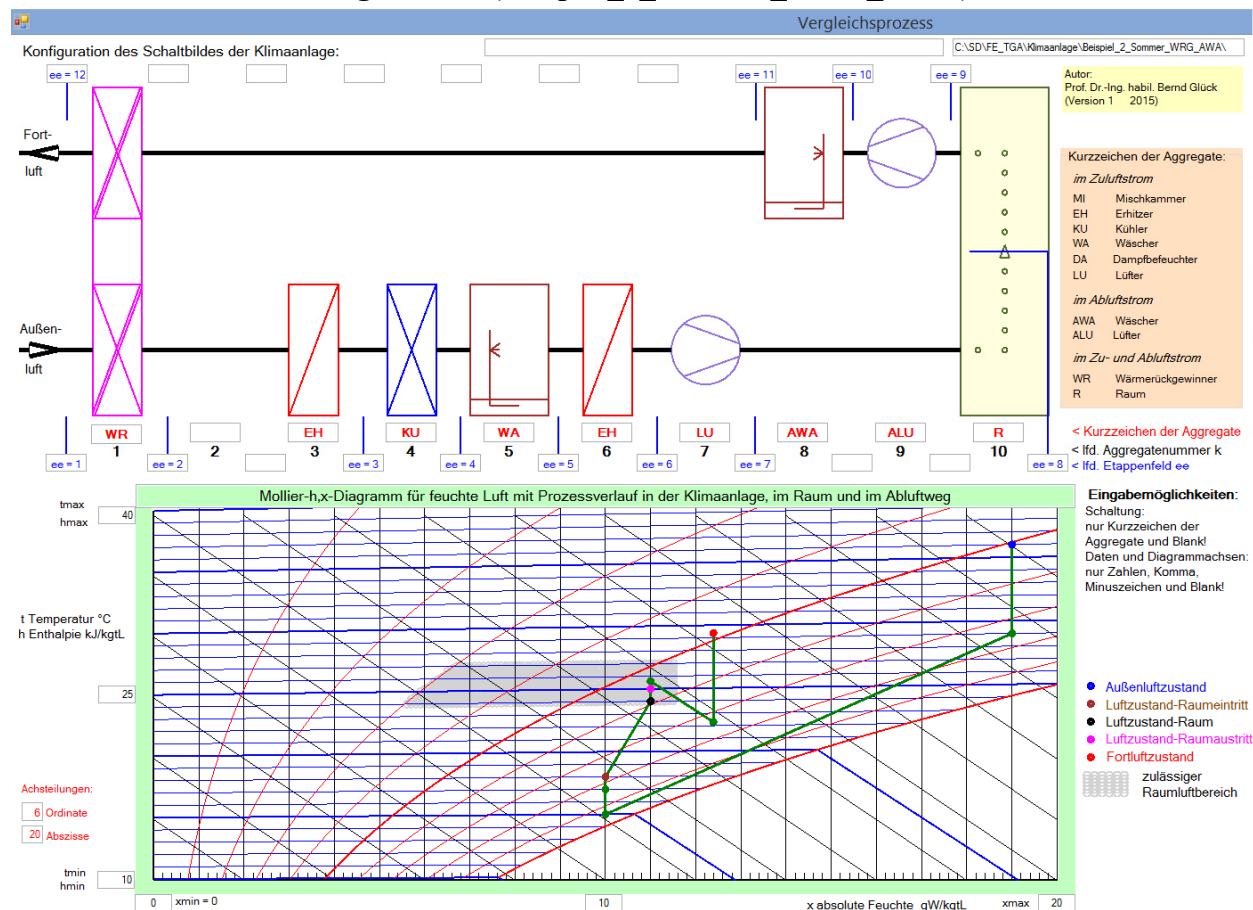
## Minimalwert der Zielfunktion:

KSUM = 110,68 €/h bei einem Luftmassenstrom m = 8,80 kgTL/s

Anzahl der Iterationen: 15

- Es spielt keine Rolle, ob ein Abluft-Wäscher optional vorhanden ist, denn er steht bei optimalem Anlagenbetrieb still.

## Sommer mit Wärmerückgewinner (Beispiel\_2\_Sommer\_WRG\_AWA)



## Ergebnisse: Etappenfelder, zwischenliegende Aggregattypen, optimale Betriebszustände

| ee | Aggregattyp              | topt<br>°C | xopt<br>gW/kgdL | Kopt<br>€/h | Aktion                                          |
|----|--------------------------|------------|-----------------|-------------|-------------------------------------------------|
| 1  | Wärmerückgewinner        | 36,0       | 19,0            | 0,00        | Außenluftzustand<br>0,5 (realisierter Gütegrad) |
| 2  | Erhitzer                 | 29,0       | 19,0            | 0,00        | 0,0 kW (Leistung)                               |
| 3  | Kühler                   | 29,0       | 19,0            | 0,00        | 323,2 kW (Leistung)                             |
| 4  | Wäscher                  | 15,0       | 10,0            | 161,62      | 0,0 (Befeuchtungsgrad)                          |
| 5  | Erhitzer                 | 15,0       | 10,0            | 161,62      | 18,1 kW (Leistung)                              |
| 6  | Zulüfter                 | 17,0       | 10,0            | 162,53      | 0,8 K (Temperaturerhöhung)                      |
| 7  | Raum-unten               | 18,0       | 10,0            | 164,37      | 7813 kJ/kgW (dh/dx Raumluft)                    |
| 8  | Raum-oben                | 24,0       | 11,0            | 164,37      | 1,0 K (Temperaturerhöhung)                      |
| 9  | Ablüfter                 | 25,0       | 11,0            | 164,37      | 0,6 K (Temperaturerhöhung)                      |
| 10 | Wäscher-Abluft           | 25,6       | 11,0            | 165,74      | 0,5 (Befeuchtungsgrad)                          |
| 11 | Wärmerückgewinner-Abluft | 22,3       | 12,4            | 165,84      | 0,5 (realisierter Gütegrad)                     |
| 12 |                          | 29,4       | 12,4            | 165,84      | Fortluftzustand                                 |

## Minimalwert der Zielfunktion:

KSUM = 165,84 €/h bei einem Luftmassenstrom m = 8,80 kgtL/s Anzahl der Iterationen: 5

- Beim untersuchten Sommerbetrieb wird der Abluft-Wäscher betrieben, wodurch sich die Betriebskosten gegenüber Variante Beispiel\_2\_Sommer\_WRG (siehe Seite 23) etwas verringern.

Zusammengefasst ergeben sich die nachfolgenden Betriebskosten in €/h:

|               | Wärmerück-<br>gewinner | Mischer             | Wärmerück-<br>gewinner<br>+ Mischer | Wärmerück-<br>gewinner<br>+ Abluft-Wäscher |
|---------------|------------------------|---------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------|
| Winterbetrieb | 9,50                   | 9,07                | 5,50                                | 9,50 <sup>1</sup>                          |
| Sommerbetrieb | 167,65                 | 122,15 <sup>2</sup> | 110,68 <sup>2</sup>                 | 165,84 <sup>3</sup>                        |

<sup>1</sup>Abluft-Wäscher steht still

<sup>2</sup>optional installierter Abluft-Wäscher steht still

<sup>3</sup>Wärmerückgewinner und Abluft-Wäscher arbeiten bei Teillast (Gütegrad: 0,5; Befeuchtungsgrad: 0,5)

Damit bewirkt in allen untersuchten Betriebsfällen der gleichzeitige Einsatz des Wärmerückgewinners und des Mixers ein Kostenminimum.

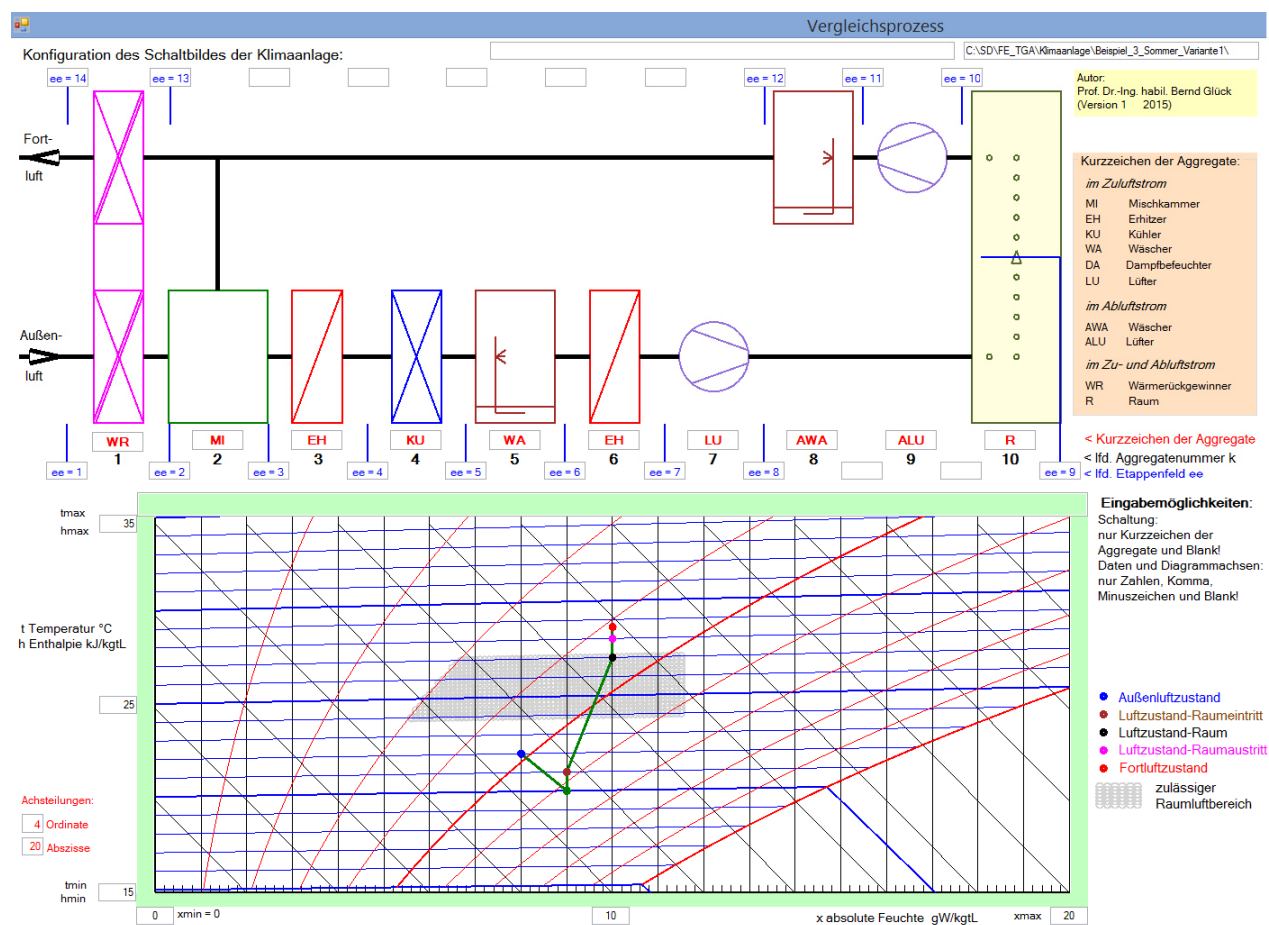
### 5 Beispiel\_3 (angelehnt an Beispiel 3 in [1], sowie an Beispiel\_2, Sommerfall, siehe Seite 18)

Die Lastanpassung des Wärmerückgewinners ergibt einen flexiblen Anlagenbetrieb. Eine weitere Verbesserung ist durch einen größeren Regelbereich des Wäschers möglich (siehe Seite 28).

#### Variante1 mit Wärmerückgewinner, Mischer und Abluft-Wäscher

$t_{Au} = 22\text{ °C}$ ,  $x_{AU} = 8\text{ gWasser/kgtrockene Luft}$

(Beispiel\_3\_Sommer\_Variante1)



Objektbezeichnung: C:\SD\FE\_TGA\Klimaanlage\Beispiel\_3\_Sommer\_Variante1\

#### Eingabedaten:

Eingesetzte Aggregate in der Zu- und Abluftstrecke:

Wärmerückgewinner Mischer Erhitzer Kühler Wäscher Erhitzer Lüfter >>>|Raum|

|Raum|>>> Lüfter (Abluft) Wäscher (Abluft) Mischerabzweig (Abluft) Wärmerückgewinner (Abluft)

## Aggregatedaten:

|                                                                    |                                                       |             |           |              |                      |
|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------|-----------|--------------|----------------------|
| k = 1                                                              |                                                       |             |           |              |                      |
| Wärmerückgewinner:                                                 | PHIWRGTmax =                                          | 0,60        | kWRGT =   | 0,00 €/h     |                      |
| k = 2                                                              |                                                       |             |           |              |                      |
| Mischer:                                                           | MAmin =                                               | 0,50        | MAmax =   | 1,00         | kM = 0,00 €/h/kg s   |
| k = 3                                                              |                                                       |             |           |              |                      |
| Erhitzer:                                                          | k1H =                                                 | 0,05 €/kWh  | tHG =     | 25,0 °C      | k2H = 0,15 €/kWh     |
|                                                                    | Maximal zulässige Lufttemperatur tHmax = 40,0 °C      |             |           |              |                      |
| k = 4                                                              |                                                       |             |           |              |                      |
| Kühler:                                                            | etaK =                                                | 0,80        | By =      | 0,75         | k2K = 0,50 €/kWh     |
|                                                                    | Minimal zulässige Kaltwassertemperatur tKmin = 5,0 °C |             |           |              |                      |
| k = 5                                                              |                                                       |             |           |              |                      |
| Wäscher:                                                           | etaBmin =                                             | 0,30        | etaBmax = | 0,95         | kW = 0,35 €/kWh      |
|                                                                    | pWa = 0,00 €/m³                                       |             |           |              |                      |
| k = 6                                                              |                                                       |             |           |              |                      |
| Erhitzer:                                                          | k1H =                                                 | 0,05 €/kWh  | tHG =     | 25,0 °C      | k2H = 0,15 €/kWh     |
|                                                                    | Maximal zulässige Lufttemperatur tHmax = 40,0 °C      |             |           |              |                      |
| k = 7                                                              |                                                       |             |           |              |                      |
| Lüfter:                                                            | etaLZ =                                               | 0,70        | DpZ =     | 700 Pa       | kL = 0,25 €/kWh      |
| k = 8                                                              |                                                       |             |           |              |                      |
| Wäscher (Abluft):                                                  | etaBAmin =                                            | 0,50        | etaBAmx = | 0,95         | kW = 0,35 €/kWh      |
|                                                                    | pWa = 0,00 €/m³                                       |             |           |              |                      |
| k = 9                                                              |                                                       |             |           |              |                      |
| Lüfter (Abluft):                                                   | etaLA =                                               | 0,83        | DpA =     | 600 Pa       | kL = 0,25 €/kWh      |
| k = 10                                                             |                                                       |             |           |              |                      |
| Raum:                                                              | DHR =                                                 | 75,0 kW     | DHRO =    | 9,0 kW       | DWR = 9,6 gW/s       |
| Der Raumluftbereich ist durch verschiedene Grenzwerte darstellbar: |                                                       |             |           |              |                      |
|                                                                    | tmin =                                                | 24,0 °C     | tmax =    | 27,0 °C      | phimin = 0,30        |
|                                                                    |                                                       |             |           |              | phimax = 0,65        |
|                                                                    | xmin =                                                | 0,0 gW/kgTL | xmax =    | 11,5 gW/kgTL | hmin = 0,0 kJ/kgTL   |
|                                                                    |                                                       |             |           |              | hmax = 100,0 kJ/kgTL |
| Außenluftzustand und Luftmassenstrom durch die Anlage:             |                                                       |             |           |              |                      |
|                                                                    | p =                                                   | 101300 Pa   | tAU =     | 22,0 °C      | xAU = 8,00 gW/kgTL   |
|                                                                    |                                                       |             |           |              | m = 8,8 kgTL/s       |

Für die Untersuchungsbereiche der Etappenfelder ee = 1 ... eeR gelten die Grenzwerte:

| ee | tmin  | tmax | phimin | phimax | xmin    | xmax    | hmin    | hmax    | ttaumin | ttaumax |
|----|-------|------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| -  | °C    | °C   | -      | -      | gW/kgTL | gW/kgTL | kJ/kgTL | kJ/kgTL | °C      | °C      |
| 1  | -20,0 | 40,0 | 0,00   | 1,00   | 0,0     | 25,0    | -20,0   | 100,0   | -50,0   | 35,0    |
| 9  | -20,0 | 40,0 | 0,00   | 1,00   | 0,0     | 25,0    | -20,0   | 100,0   | -50,0   | 35,0    |

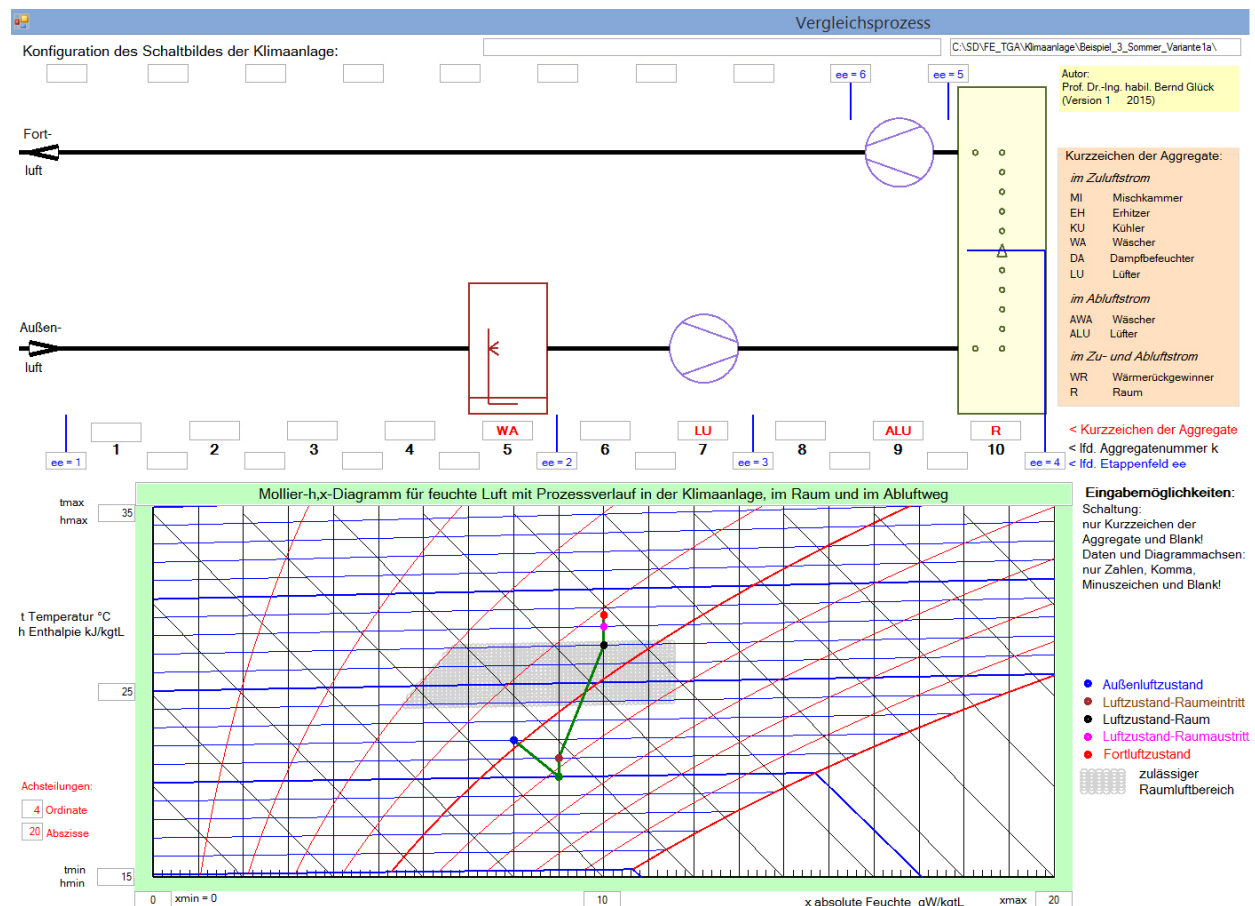
## Ergebnisse: Etappenfelder, zwischenliegende Aggregattypen, optimale Betriebszustände

| ee | Aggregattyp              | topt<br>°C | xopt<br>gW/kgTL | Kopt<br>€/h | Aktion                       |
|----|--------------------------|------------|-----------------|-------------|------------------------------|
| 1  | Wärmerückgewinner        | 22,0       | 8,0             | 0,00        | Außenluftzustand             |
| 2  | Mischer                  | 22,0       | 8,0             | 0,00        | 0,0 (realisierter Gütegrad)  |
| 3  | Erhitzer                 | 22,0       | 8,0             | 0,00        | 1,0 (Außenluftanteil)        |
| 4  | Kühler                   | 22,0       | 8,0             | 0,00        | 0,0 kW (Leistung)            |
| 5  | Wäscher                  | 22,0       | 8,0             | 0,00        | 0,0 kW (Leistung)            |
| 6  | Erhitzer                 | 20,0       | 9,0             | 0,07        | 0,3 (Befeuchtungsgrad)       |
| 7  | Zulüfter                 | 20,0       | 9,0             | 0,07        | 0,0 kW (Leistung)            |
| 8  | Raum-unten               | 21,0       | 9,0             | 1,92        | 0,8 K (Temperaturerhöhung)   |
| 9  | Raum-oben                | 27,0       | 10,0            | 1,92        | 7813 kJ/kgW (dh/dx Raumluft) |
| 10 | Ablüfter                 | 28,0       | 10,0            | 1,92        | 1,0 K (Temperaturerhöhung)   |
| 11 | Wäscher-Abluft           | 28,6       | 10,0            | 3,30        | 0,6 K (Temperaturerhöhung)   |
| 12 | Mischer-Abluftabzweig    | 28,6       | 10,0            | 3,30        | 0,0 (Befeuchtungsgrad)       |
| 13 | Wärmerückgewinner-Abluft | 28,6       | 10,0            | 3,30        | 0,0 (Parameteränderung)      |
| 14 |                          | 28,6       | 10,0            | 3,30        | 0,0 (realisierter Gütegrad)  |
|    |                          |            |                 |             | Fortluftzustand              |

**Minimalwert der Zielfunktion:**

KSUM = 3,30 €/h bei einem Luftmassenstrom  $m = 8,80 \text{ kg/L/s}$  Anzahl der Iterationen: 15

- Obwohl alle Aggregate optional vorhanden sind und eingesetzt werden könnten, arbeiten im optimalen Betriebsfall nur der Wäscher und die beiden Lüfter (Mischer mit 100 % Außenluft).
- Richtigerweise erhält man das gleiche Ergebnis für das nachfolgende Schaltbild, wobei die rechnerinternen Iterationen entfallen, da Mischer, Wärmerückgewinner und Abluft-Wäscher nicht existieren.

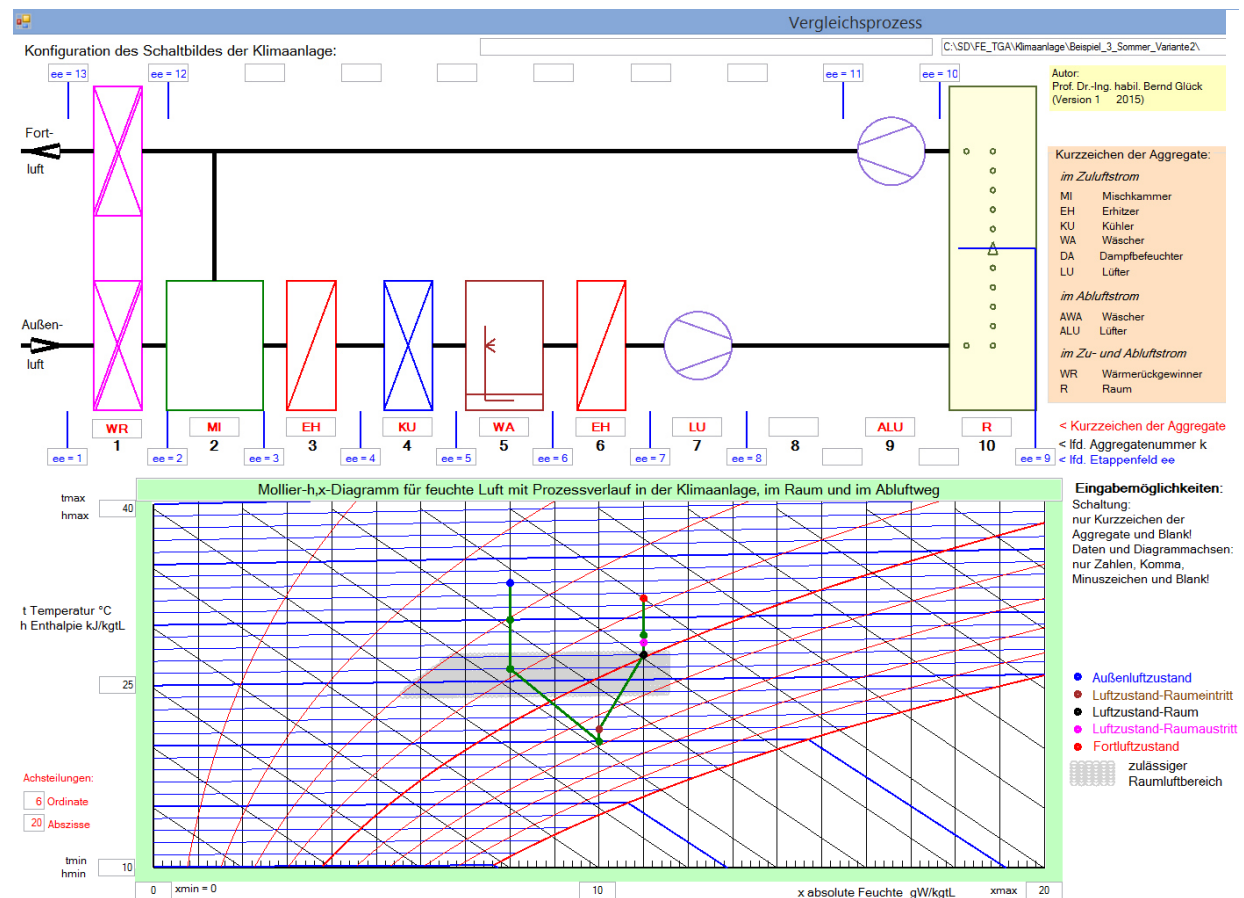
**Ergebnisse: Etappenfelder, zwischenliegende Aggregattypen, optimale Betriebszustände**

| ee | Aggregattyp | topt<br>°C | xopt<br>gW/kgL | Kopt<br>€/h | Aktion                       |
|----|-------------|------------|----------------|-------------|------------------------------|
| 1  | Wäscher     | 22,0       | 8,0            | 0,00        | Außenluftzustand             |
| 2  | Zulüfter    | 20,0       | 9,0            | 0,07        | 0,3 (Befeuchtungsgrad)       |
| 3  | Raum-unten  | 21,0       | 9,0            | 1,92        | 0,8 K (Temperaturerhöhung)   |
| 4  | Raum-oben   | 27,0       | 10,0           | 1,92        | 7813 kJ/kgW (dh/dx Raumluft) |
| 5  | Ablüfter    | 28,0       | 10,0           | 1,92        | 1,0 K (Temperaturerhöhung)   |
| 6  |             | 28,6       | 10,0           | 3,30        | 0,6 K (Temperaturerhöhung)   |
|    |             |            |                |             | Fortluftzustand              |

**Minimalwert der Zielfunktion:**

KSUM = 3,30 €/h bei einem Luftmassenstrom  $m = 8,80 \text{ kg/L/s}$  Anzahl der Iterationen: 0



**Variante2 mit Wärmerückgewinner und Mischer** $t_{Au} = 33\text{ °C}$ ,  $x_{AU} = 8\text{ gWasser/kgtrockene Luft}$ **(Beispiel\_3\_Sommer\_Variante2)****Ergebnisse: Etappenfelder, zwischenliegende Aggregattypen, optimale Betriebszustände**

| ee | Aggregattyp              | topt<br>°C | xopt<br>gW/kgTL | Kopt<br>€/h | Aktion                                         |
|----|--------------------------|------------|-----------------|-------------|------------------------------------------------|
| 1  | Wärmerückgewinner        | 33,0       | 8,0             | 0,00        | Außenluftzustand                               |
| 2  | Mischer                  | 30,0       | 8,0             | 0,00        | 0,6 (realisierter Gütegrad)                    |
| 3  | Erhitzer                 | 30,0       | 8,0             | 0,00        | 1,0 (Außenluftanteil)                          |
| 4  | Kühler                   | 30,0       | 8,0             | 0,00        | 0,0 kW (Leistung)                              |
| 5  | Wäscher                  | 26,0       | 8,0             | 6,49        | 32,5 kW (Leistung)                             |
| 6  | Erhitzer                 | 20,0       | 10,0            | 6,63        | 0,6 (Befeuchtungsgrad)                         |
| 7  | Zulüfter                 | 20,0       | 10,0            | 6,63        | 0,0 kW (Leistung)                              |
| 8  | Raum-unten               | 21,0       | 10,0            | 8,49        | 0,8 K (Temperaturerhöhung)                     |
| 9  | Raum-oben                | 27,0       | 11,0            | 8,49        | 7813 kJ/kgW (dh/dx Raumluft)                   |
| 10 | Ablüfter                 | 28,0       | 11,0            | 8,49        | 1,0 K (Temperaturerhöhung)                     |
| 11 | Mischer-Abluftabzweig    | 28,6       | 11,0            | 9,87        | 0,6 K (Temperaturerhöhung)                     |
| 12 | Wärmerückgewinner-Abluft | 28,6       | 11,0            | 9,87        | 0,0 (Parameteränderung)                        |
| 13 |                          | 31,6       | 11,0            | 9,87        | 0,6 (realisierter Gütegrad)<br>Fortluftzustand |

**Minimalwert der Zielfunktion:**

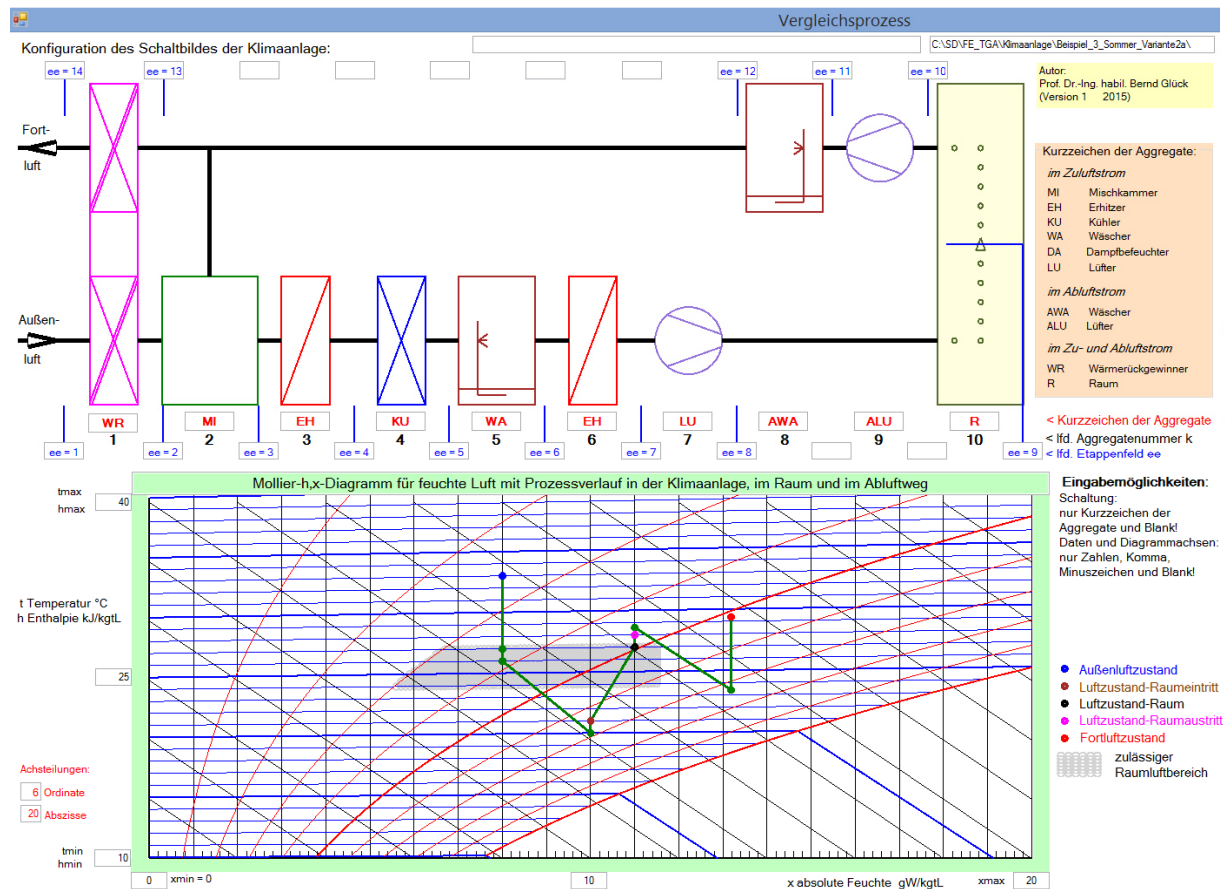
KSUM = 9,87 €/h bei einem Luftmassenstrom m = 8,80 kgtL/s

Anzahl der Iterationen: 15

- Vor- und Nachwärmer kommen nicht zum Einsatz, der Mischer arbeitet mit 100 % Außenluft.



- Durch Zuschalten eines Abluft-Wäschers wird die Kühlleistung drastisch verringert, siehe Variante2a ↓.



### Ergebnisse: Etappenfelder, zwischliegende Aggregattypen, optimale Betriebszustände

| ee | Aggregattyp              | topt<br>°C | xopt<br>gW/kgdL | Kopt<br>€/h | Aktion                                         |
|----|--------------------------|------------|-----------------|-------------|------------------------------------------------|
| 1  | Wärmerückgewinner        | 33,0       | 8,0             | 0,00        | Außenluftzustand                               |
| 2  | Mischer                  | 27,0       | 8,0             | 0,00        | 0,6 (realisierter Gütegrad)                    |
| 3  | Erhitzer                 | 27,0       | 8,0             | 0,00        | 1,0 (Außenluftanteil)                          |
| 4  | Kühler                   | 27,0       | 8,0             | 0,00        | 0,0 kW (Leistung)                              |
| 5  | Wäscher                  | 26,0       | 8,0             | 1,08        | 5,4 kW (Leistung)                              |
| 6  | Erhitzer                 | 20,0       | 10,0            | 1,22        | 0,6 (Befeuchtungsgrad)                         |
| 7  | Zulüfter                 | 20,0       | 10,0            | 1,22        | 0,0 kW (Leistung)                              |
| 8  | Raum-unten               | 21,0       | 10,0            | 3,08        | 0,8 K (Temperaturerhöhung)                     |
| 9  | Raum-oben                | 27,0       | 11,0            | 3,08        | 7813 kJ/kgW (dh/dx Raumluft)                   |
| 10 | Ablüfter                 | 28,0       | 11,0            | 3,08        | 1,0 K (Temperaturerhöhung)                     |
| 11 | Wäscher-Abluft           | 28,6       | 11,0            | 4,46        | 0,6 K (Temperaturerhöhung)                     |
| 12 | Mischer-Abluftabzweig    | 23,4       | 13,2            | 4,60        | 0,6 (Befeuchtungsgrad)                         |
| 13 | Wärmerückgewinner-Abluft | 23,4       | 13,2            | 4,60        | 0,0 (Parameteränderung)                        |
| 14 |                          | 29,3       | 13,2            | 4,60        | 0,6 (realisierter Gütegrad)<br>Fortluftzustand |

### Minimalwert der Zielfunktion:

KSUM = 4,60 €/h bei einem Luftmassenstrom m = 8,80 kgdL/s

Anzahl der Iterationen: 15