

---

# Exergieanalyse der solaren Kühlung

---



Hans-Martin Henning

Fraunhofer-Institut für  
Solare Energiesysteme ISE

LowEx-Symposium zum deutschen  
Projektverbund des BMWi

Kassel, 28/29. Oktober 2009

# Übersicht

- Motivation und Einführung
- Anwendungsbeispiele
  - Absorptionskältemaschine
  - Desiccant Cooling Anlage
  - ECOS-Verfahren
- Ausblick

- **Motivation und Einführung**
- Anwendungsbeispiele
  - Absorptionskältemaschine
  - Desiccant Cooling Anlage
  - ECOS-Verfahren
- Ausblick

# Motivation

- Arbeitsgruppe innerhalb von TASK 38 „Solar Air-Conditioning and Refrigeration“ des IEA Solar Heating & Cooling Programme
- Exergie-Ansatz wird verwendet, um eine gemeinsame Basis für einen Vergleich unterschiedlicher Verfahren zu ermöglichen
  - Kaltwassererzeuger (Absorptionskältemaschine, Adsorptionskältemaschine)
  - Offene Sorptionsverfahren (Sorptionsrotor, Flüssigsorption)
- Ergebnis-Bericht
  - Grundlagen: Exergiegehalt solarer Strahlung, Referenzpunkt, Definitionen
  - Anwendungsbeispiele

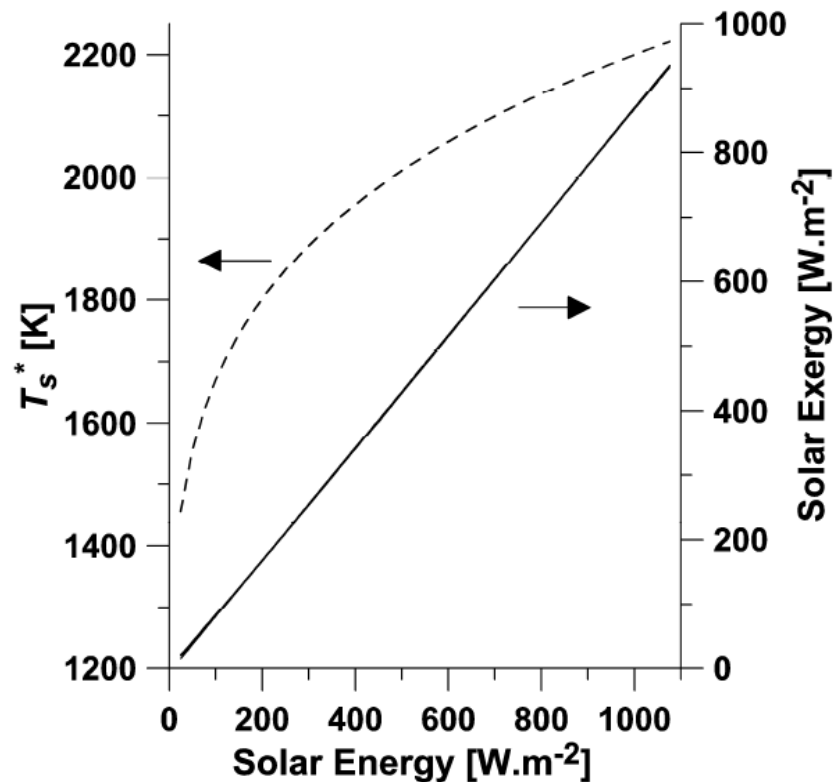
# Exergiegehalt solarer Strahlung

- Exergiegehalt liegt im Mittel (angenommener Direktstrahlungsanteil 75 %) bei rund 86 %
- Maximale Ausnutzung erfordert maximale Konzentration der Direktstrahlung
- Geometrie-bedingte Verluste realer Systeme
  - Konzentrierende Systeme (Parabolrinnen, Fresnel-Kollektoren): die Diffusstrahlung wird nicht genutzt
  - Flache Systeme ohne Strahlungskonzentration (Flachkollektor, Photovoltaik): die Exergie der Direktstrahlung wird nicht vollständig genutzt (Nichtnutzung der „Gerichtet-heit“ der Strahlung → Entropieerzeugung)
- Für flache Systeme liegt theoretische Obergrenze bei rund 73 %

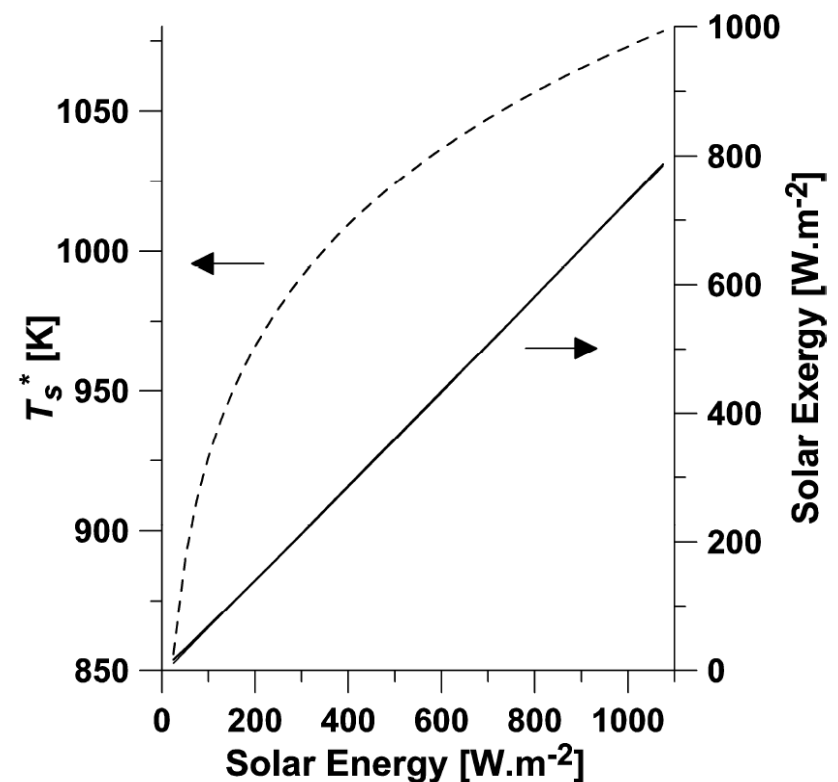


# Exergiegehalt der Solarstrahlung

Maximum (bei 75 % Anteil  
Direktstrahlung)

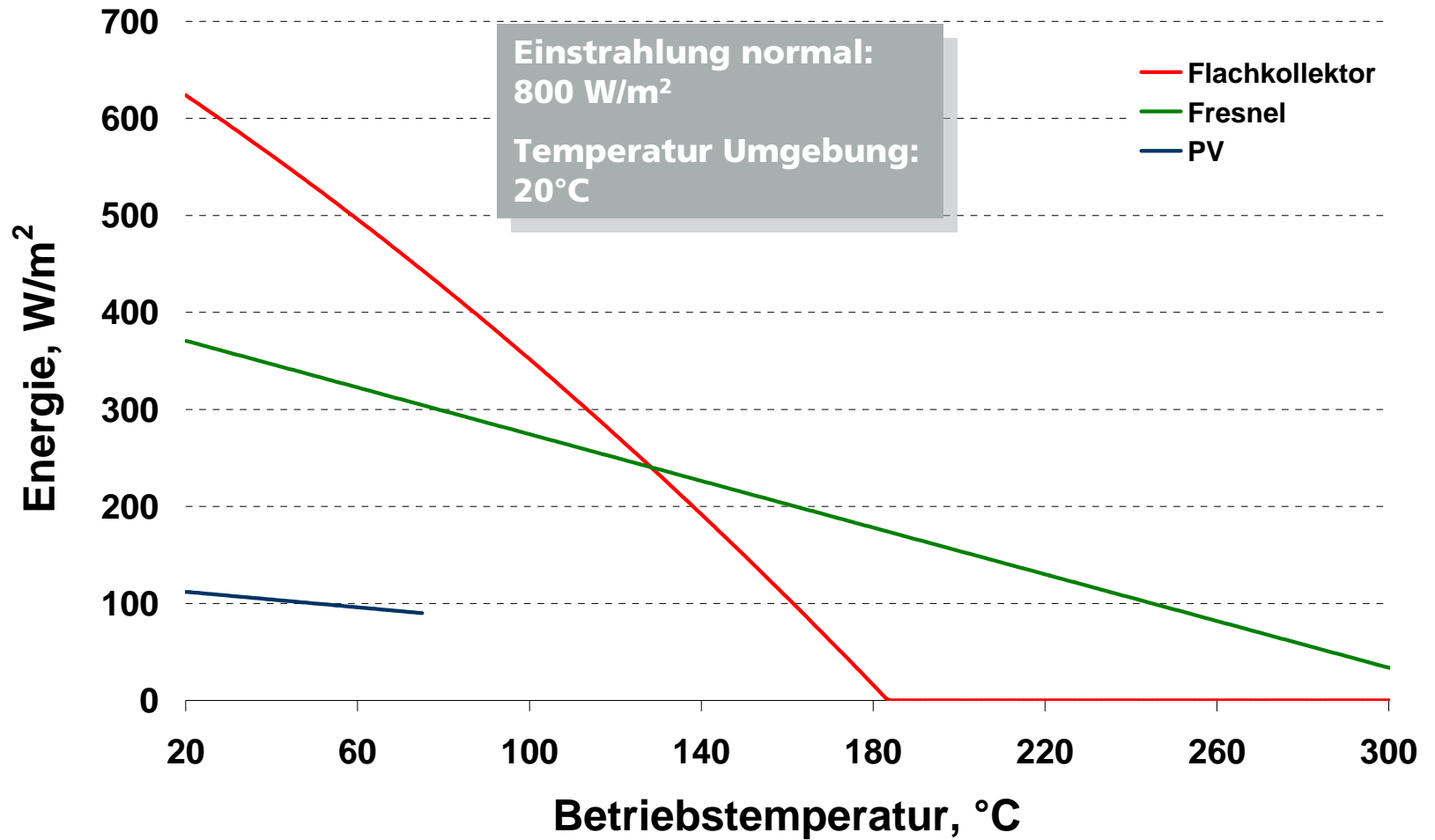


Flache, nicht  
konzentrierende Systeme

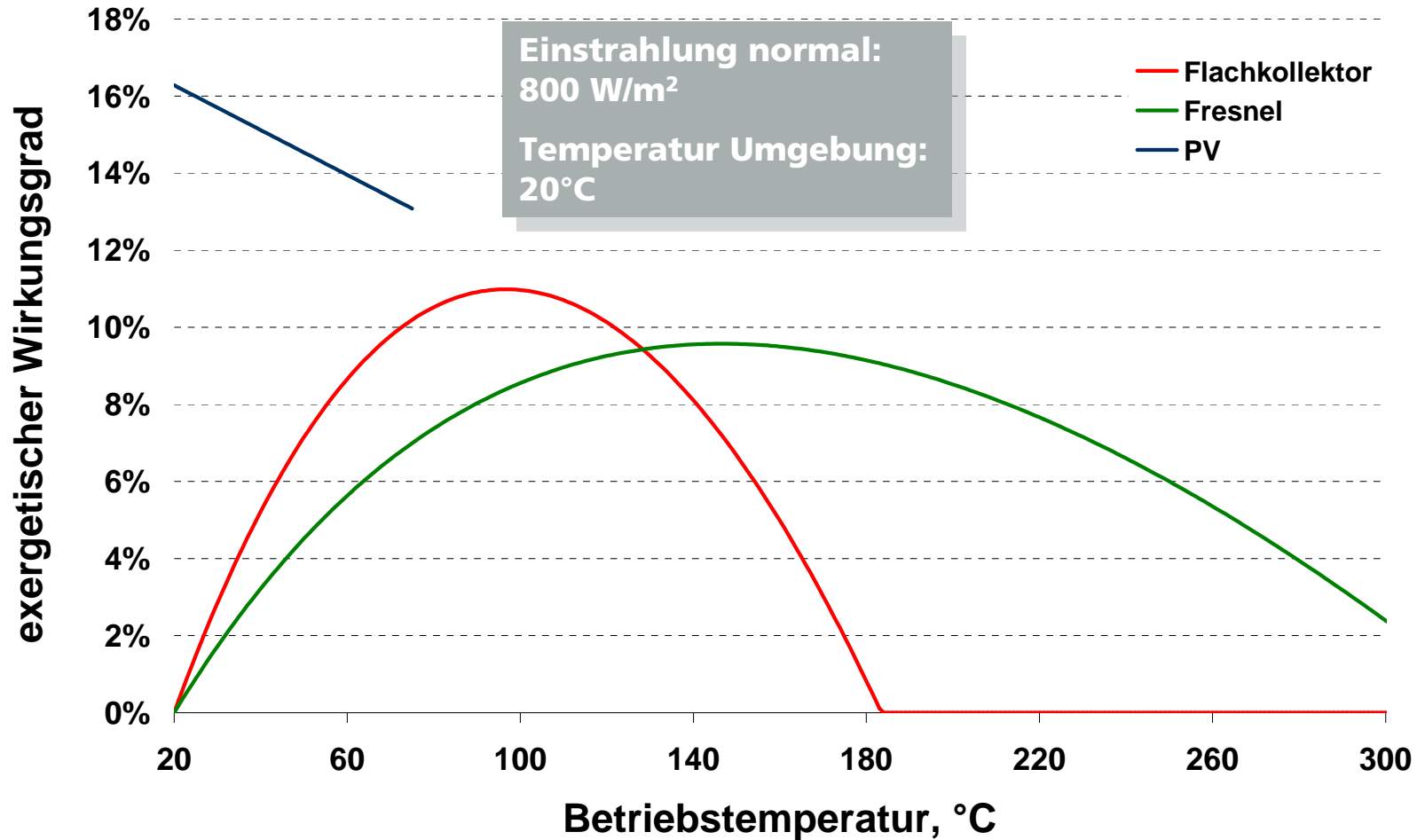


Quelle: Pons, M.: Bases for second law analyses of solar-powered systems, Part 1: the exergy of solar radiation. Proc. ECOS-2008 21st Int. Conf. on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation & Environmental Impact of Energy Systems, Cracow-Gliwice, Poland, 24-27 June 2008, A. Ziebik, Z. Kolenda & W. Stanek Ed., Pub. AGH Univ. Sci. Technol., Vol. 1, pp. 139-146, 2008

# Vergleich von Solarwandlern - Energie



# Vergleich von Solarwandlern - Exergie



- Motivation und Einführung
- **Anwendungsbeispiele**
  - **Absorptionskältemaschine**
  - **Desiccant Cooling Anlage**
  - **ECOS-Verfahren**
- Ausblick

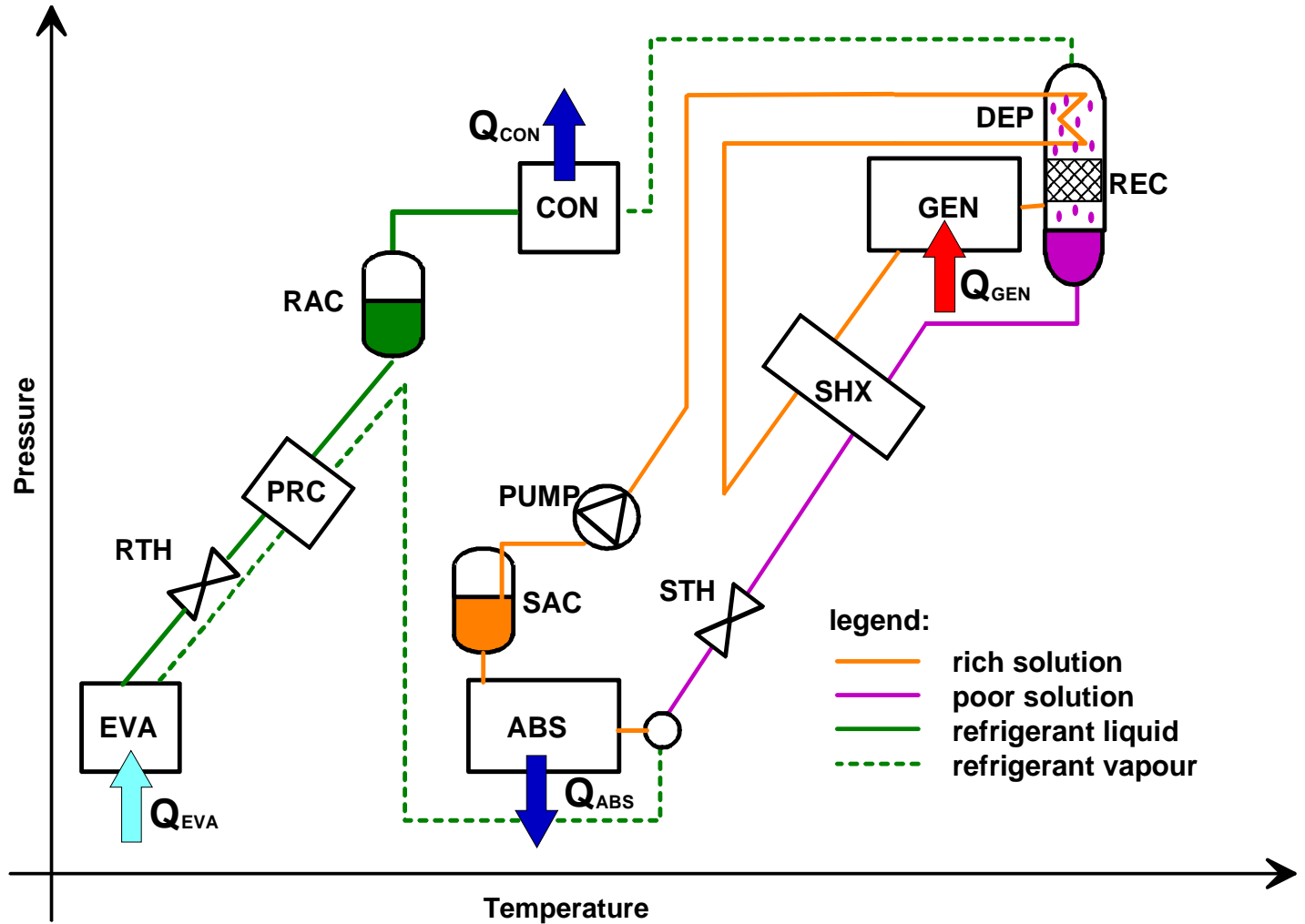
# Ammoniak-Wasser-Absorptionswärmepumpe (TU Graz)

- Prototyp
  - Wärmepumpe für Heizung und Kühlung
  - Leistung 15 kW
  - einstufiger Prozess
- Designvergleich auf Exergiebasis
  - Vergleich Gegenstrom- / Gleichstromwärmeübertrager

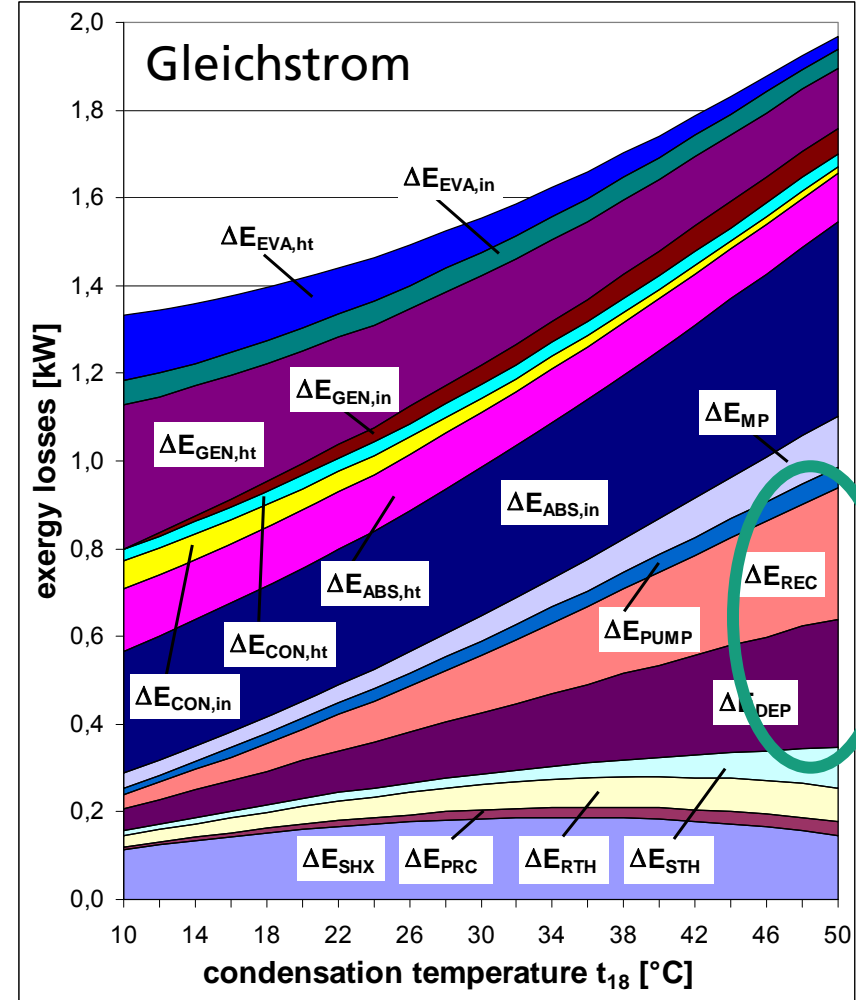
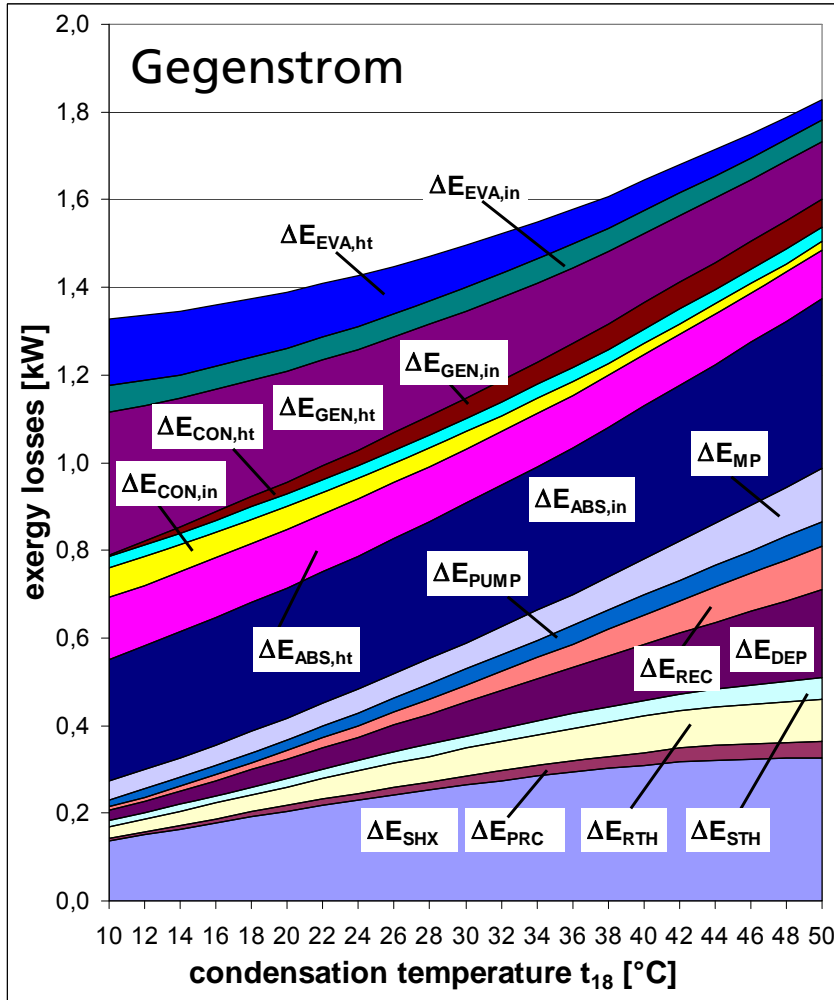


(Quelle: H. Moser, TU Graz)

# Schema Absorptionswärmepumpe



# Absorptionswärmepumpe - Designvergleich

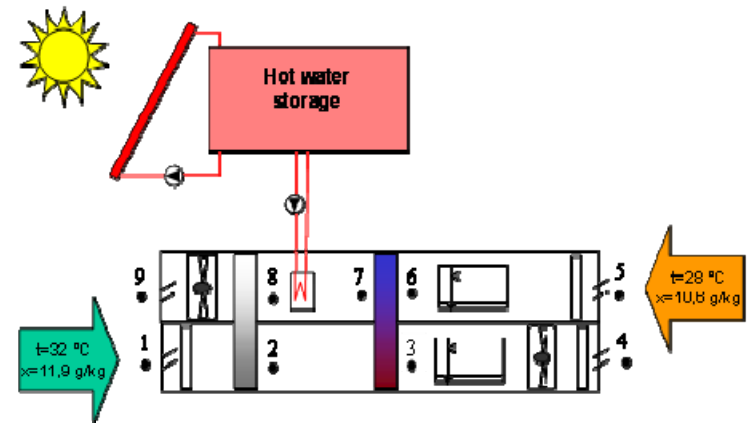


# Ergebnisse des WP-Designvergleichs

- Geringerer Exergieverlust bei Gegenstrom-Generator-Design
  - Allerdings mit Standard-Plattenwärmeübertrager nicht realisierbar
  - Exergieverluste bei Gleichstrom-Design höher, bedingt durch Rektifikation und Dephlegmator
- Im Absorber bis zu 30% der Gesamtexergieverluste, von denen nur ein kleiner Anteil durch Wärmeübertragung verursacht wird (Mischungsentropie)
- Im Generator bis zu 30% der Gesamtexergieverluste, welche hauptsächlich durch Wärmeübertragung verursacht werden

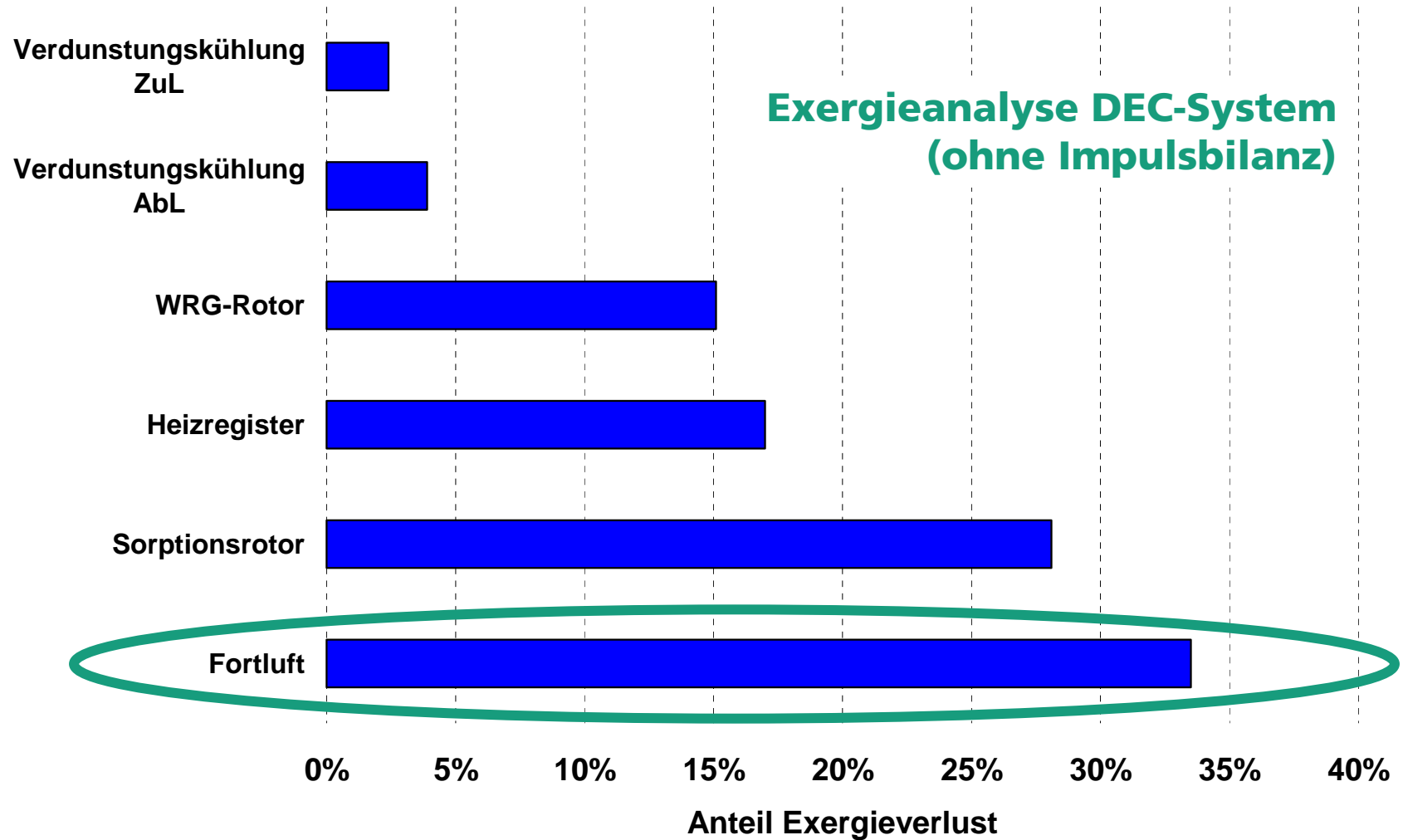
# ENERGYbase – Solar unterstütztes DEC-System (AIT, Wien)

- DEC-System mit 2 x 8.240 m<sup>3</sup>/h
- Solar autonomer Betrieb im Sommer
- Systemnutzung im Winter für Wärme- und Feuchterückgewinnung
- Solarsystem mit 15 m<sup>3</sup> Warmwasserspeicher für Regeneration des DEC-Systems im Sommer und Wärmepumpenbetrieb im Winter



(Quelle: A. Preisler, AIT)

# ENERGYbase – Exergieanalyse



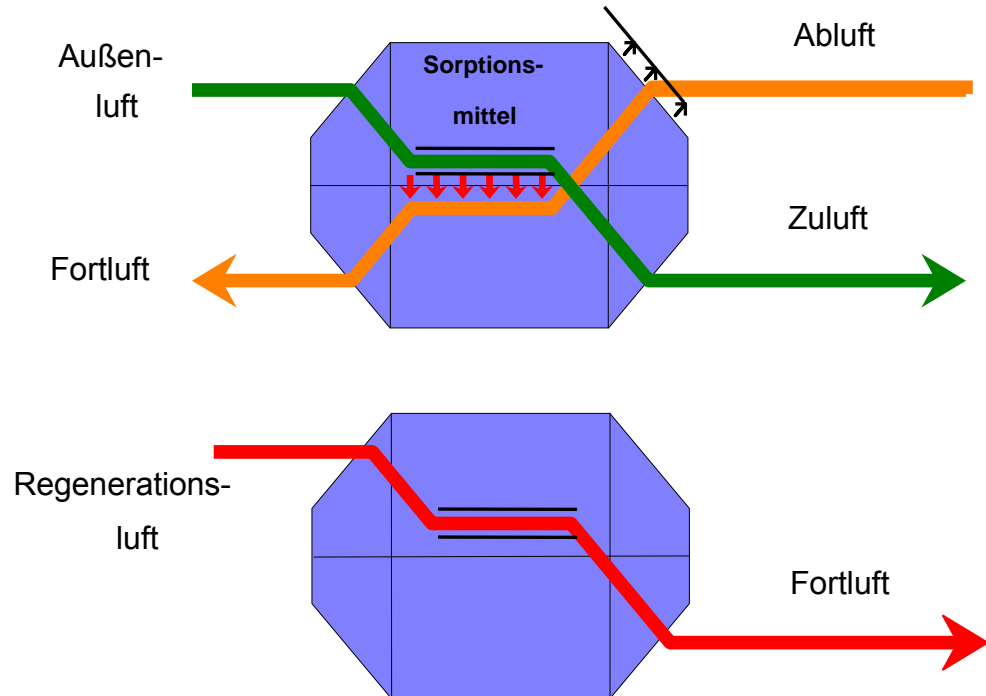
# Entwicklung eines neuartigen Verfahrens zur sorptiven Luftentfeuchtung, speziell für hohe Aussenluftfeuchte

## Projektpartner

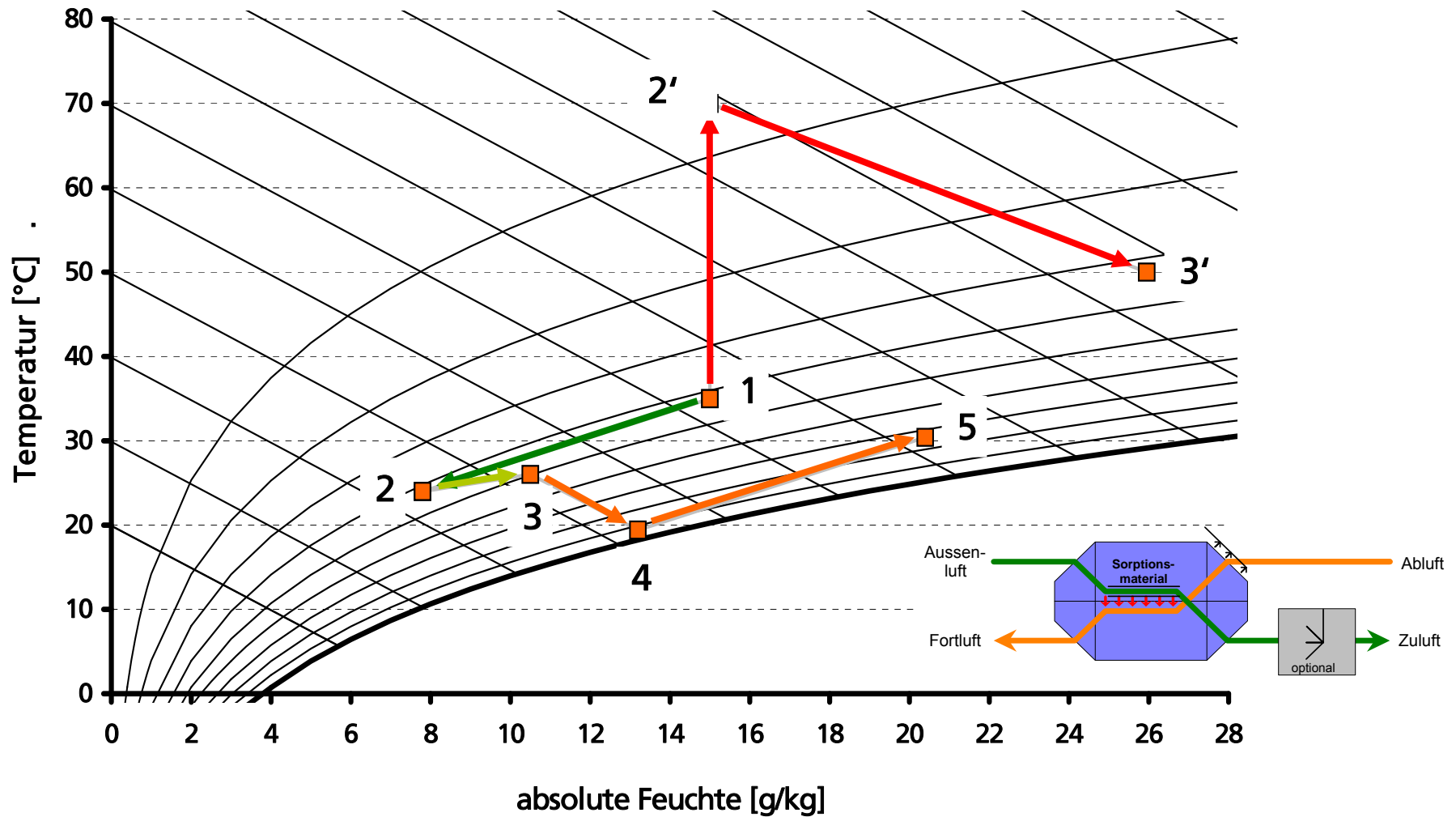
- Robert Bosch GmbH
  - Entwicklung und Bau Prototypgerät
  - Gerätetechnische Details (Klappen, Steuerung, Konstruktion usw.)
- Fraunhofer ISE
  - Material- und Beschichtungsauswahl
  - Bau Prototypen Sorptionswärmeübertrager
  - Test Gerät
  - Modellentwicklung und Simulation

# ECOS Konzept

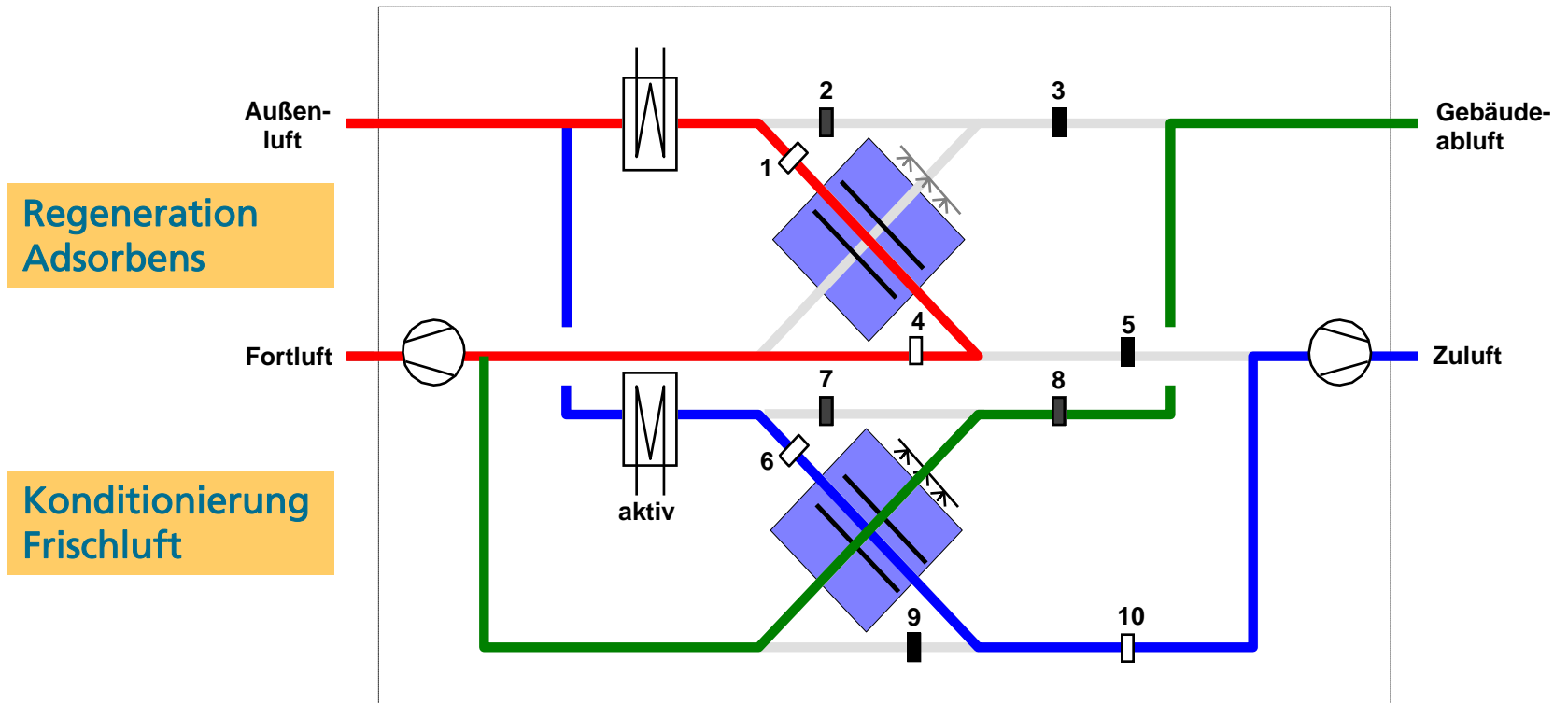
- ECOS: Evaporatively COoled Sorptive Heat Exchanger
- Indirekte Verdunstungskühlung und sorptive Entfeuchtung in einer Komponente
- Kühlung des Sorptionsprozesses während der Adsorption
- bessere Ausnutzung der Sorptionskapazität



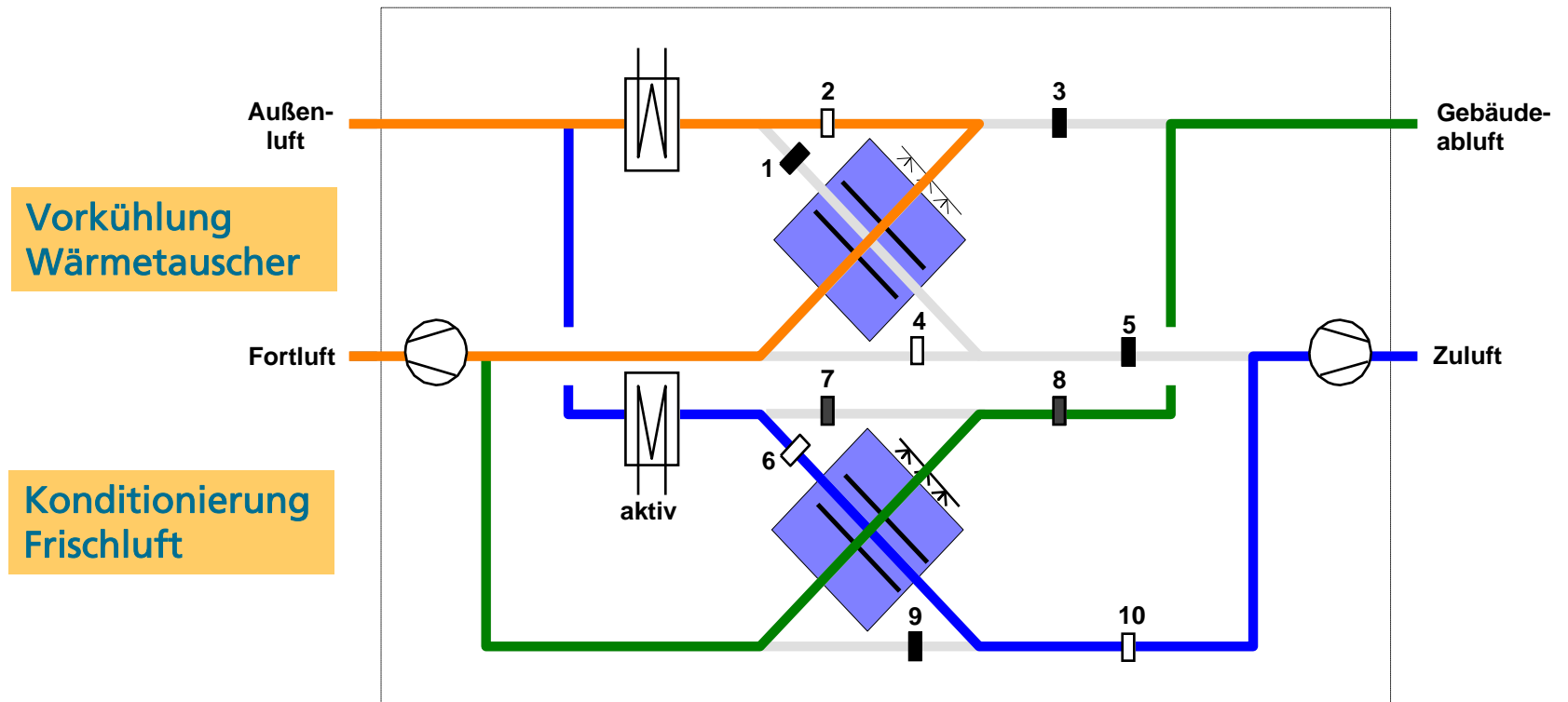
# Zyklus im T-x-Diagramm feuchter Luft



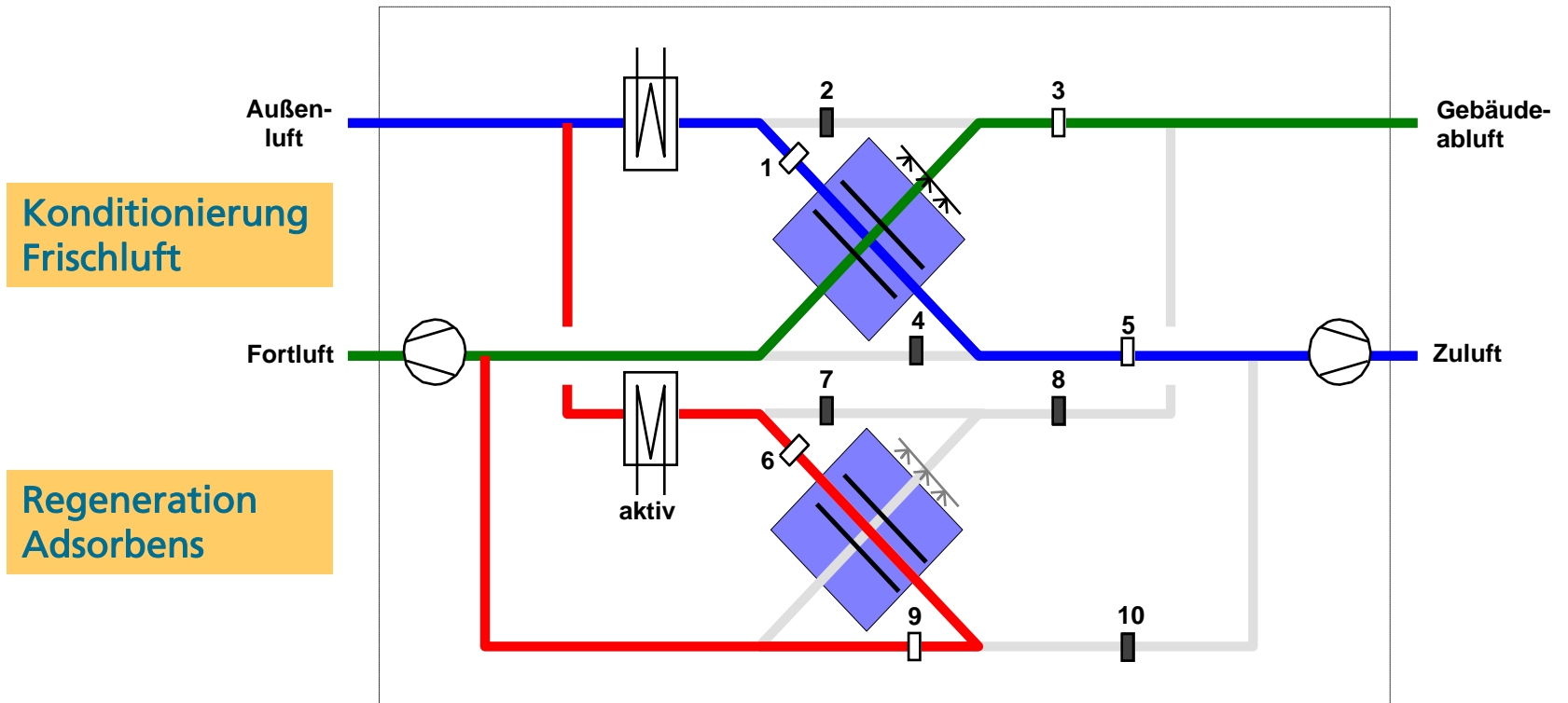
# ECOS Konzept: Geräteerschaltung Kreuzstrom



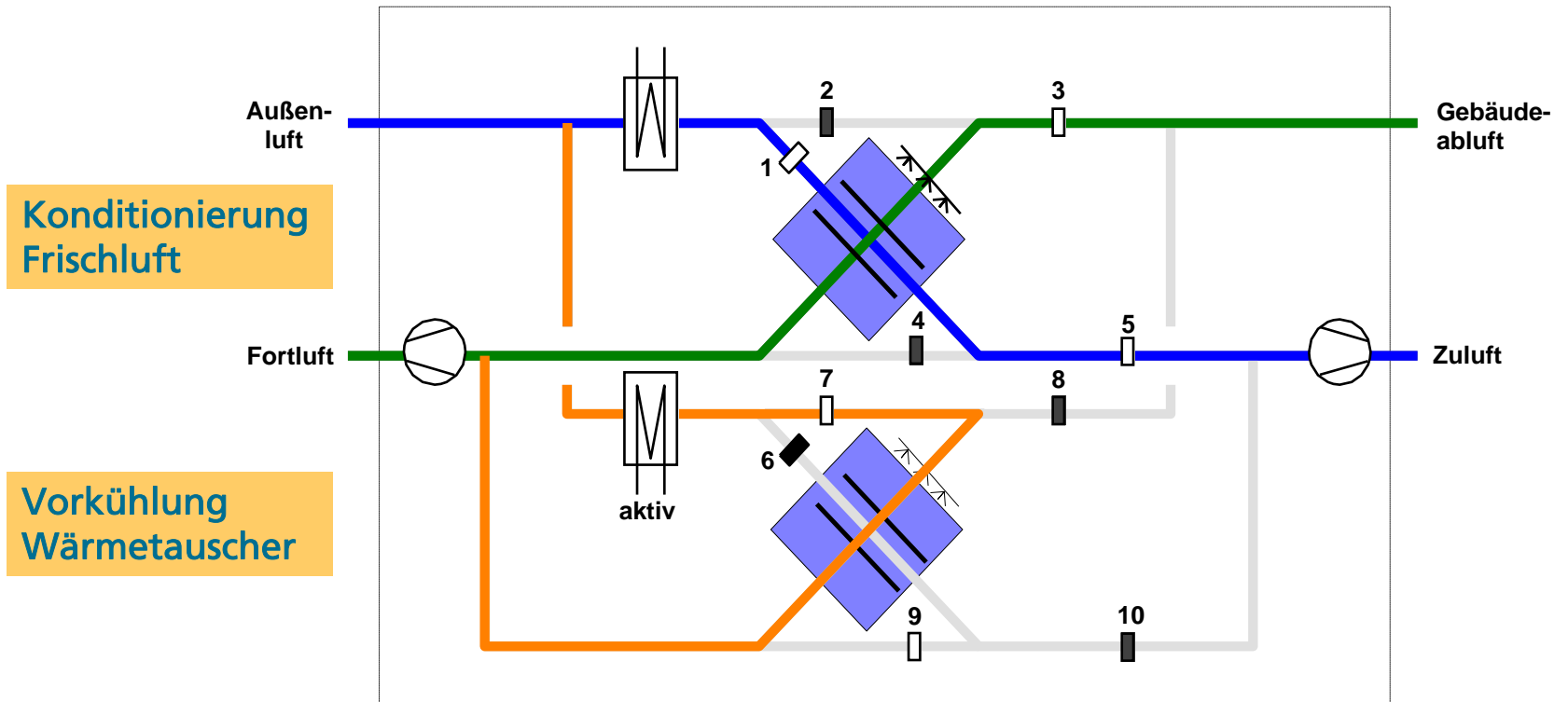
# ECOS Konzept: Geräteerschaltung Kreuzstrom



# ECOS Konzept: Geräteerschaltung Kreuzstrom

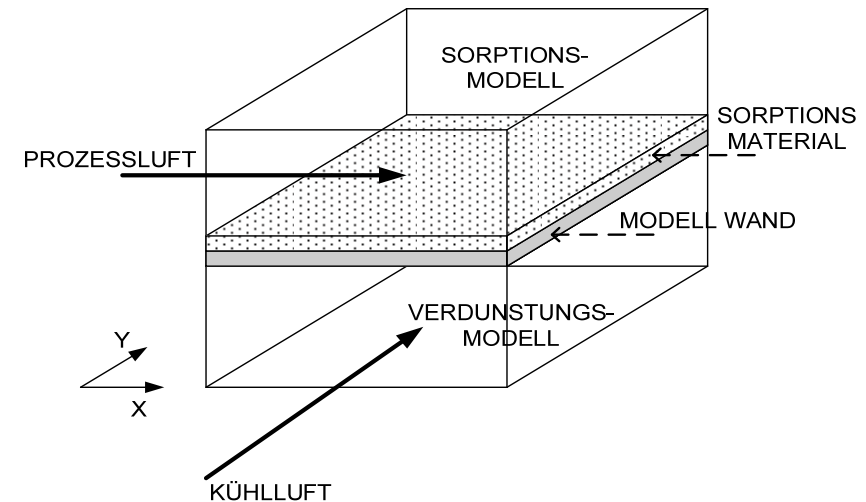


# ECOS Konzept: Geräteerschaltung Kreuzstrom



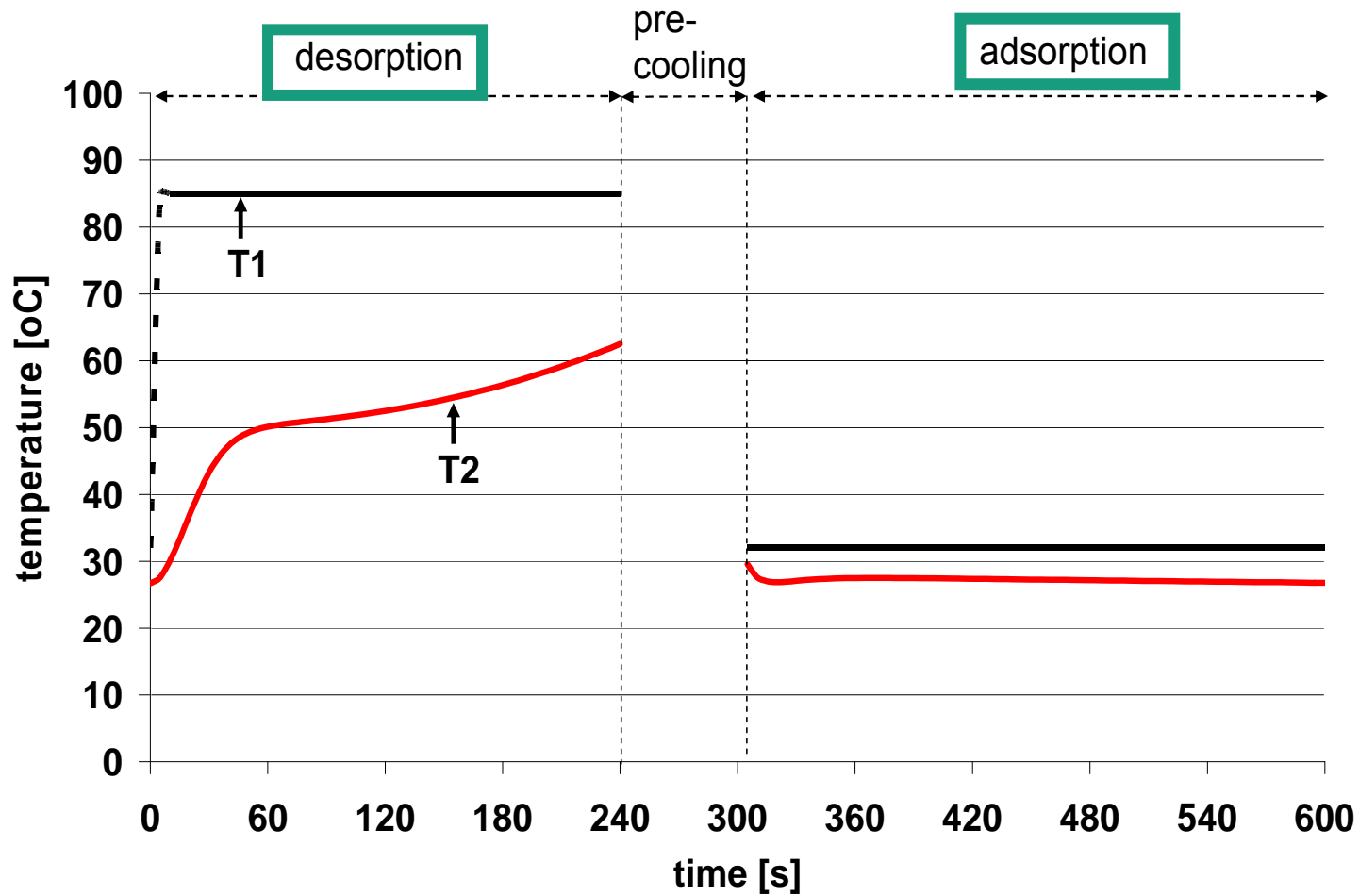
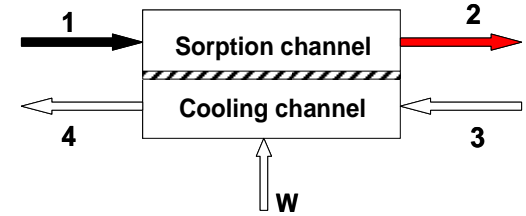
# Exergieanalyse anhand des ECOS-Wärmeübertrager-Modells

- Dynamisches Simulationsmodell in Modelica
- Gegen- und Kreuzstrom-Konfigurationen
- Modellierung eines Kanalpaares aufgrund von Symmetriebetrachtung
- Globale, konstante Wärme- und Stoffübergangskoeffizienten
- Exergie feuchter Luft

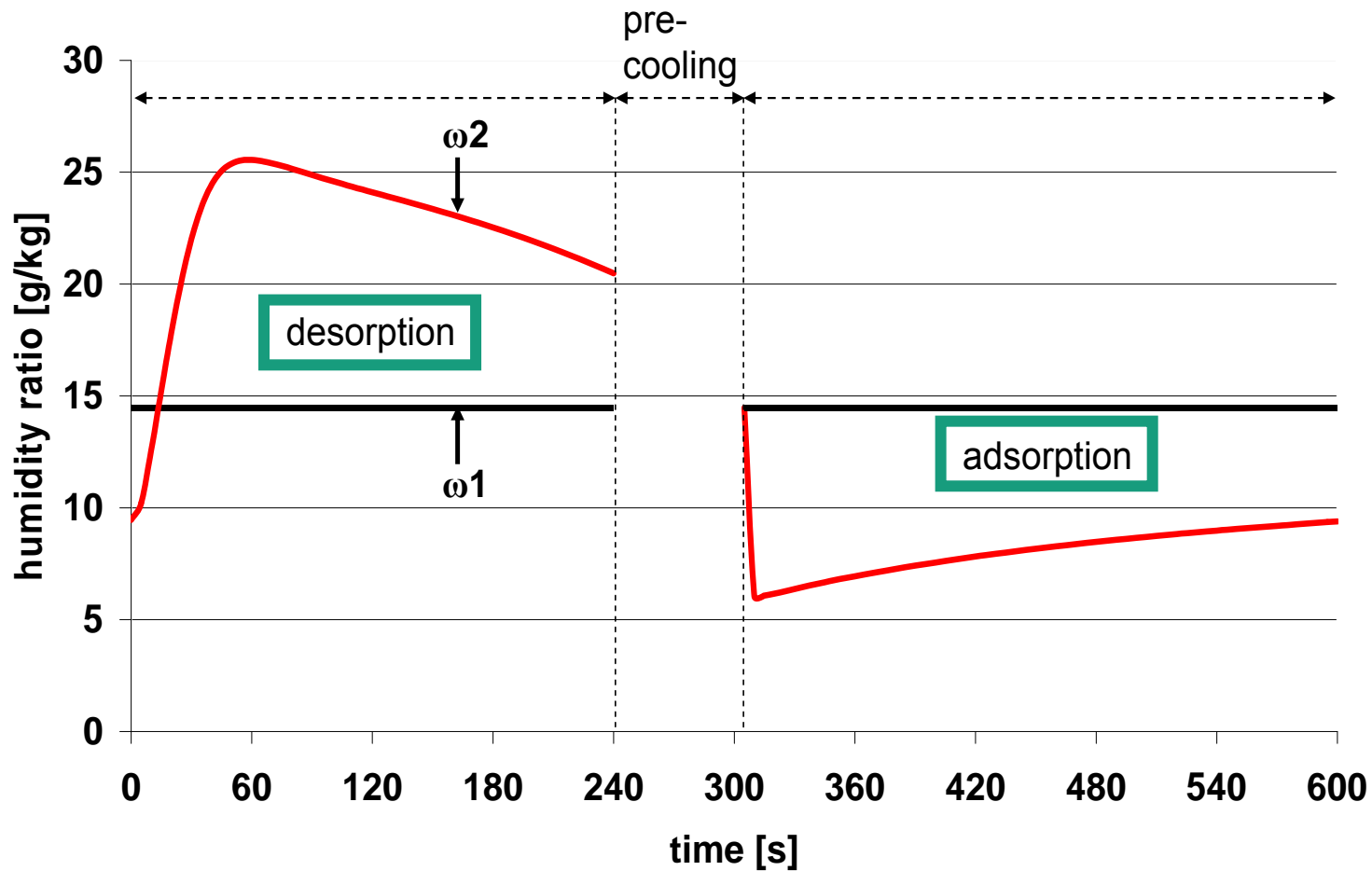
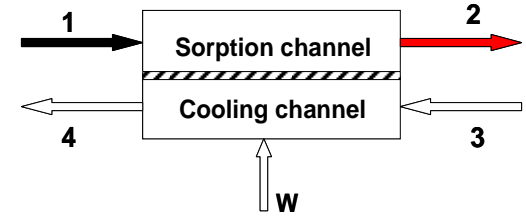


$$e_a = \underbrace{(c_{p,da} + \omega \cdot c_{p,v}) \left( T - T_0 - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \right)}_{\text{Anteil Wärme (thermisch)}} + \underbrace{(1 + \tilde{\omega}) R_a T_0 \ln \frac{p}{p_0}}_{\text{Anteil Druck (mechanisch)}} + \underbrace{R_a T_0 \left[ (1 + \tilde{\omega}) \ln \frac{(1 + \tilde{\omega}_0)}{(1 + \tilde{\omega})} + \tilde{\omega} \ln \frac{\tilde{\omega}}{\tilde{\omega}_0} \right]}_{\text{Anteil Feuchte (chemisch)}}$$

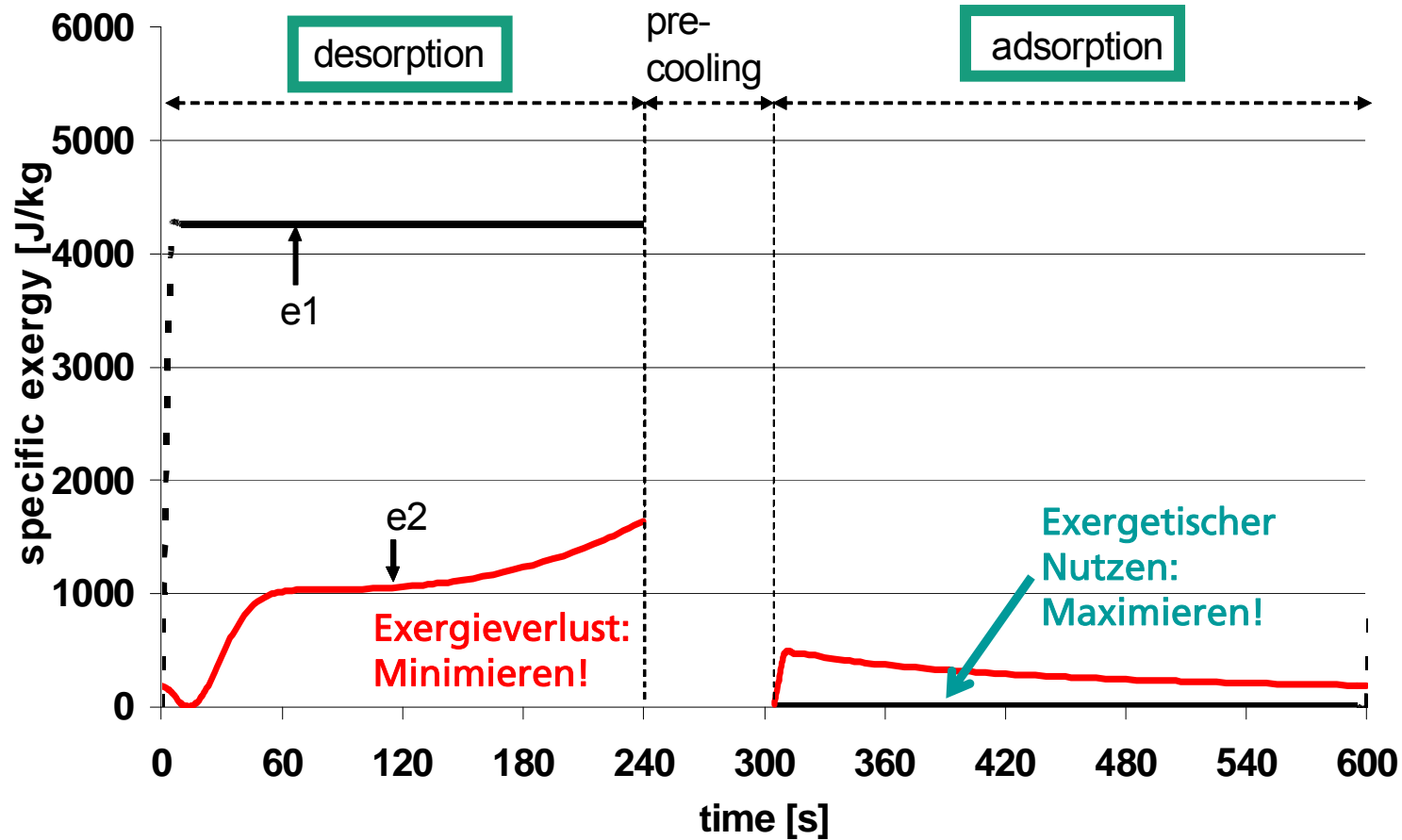
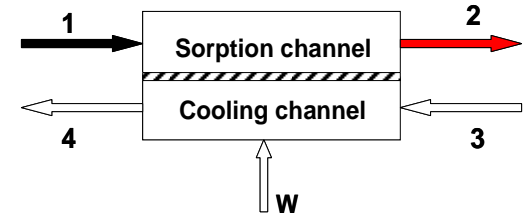
# Simulierter Temperaturverlauf



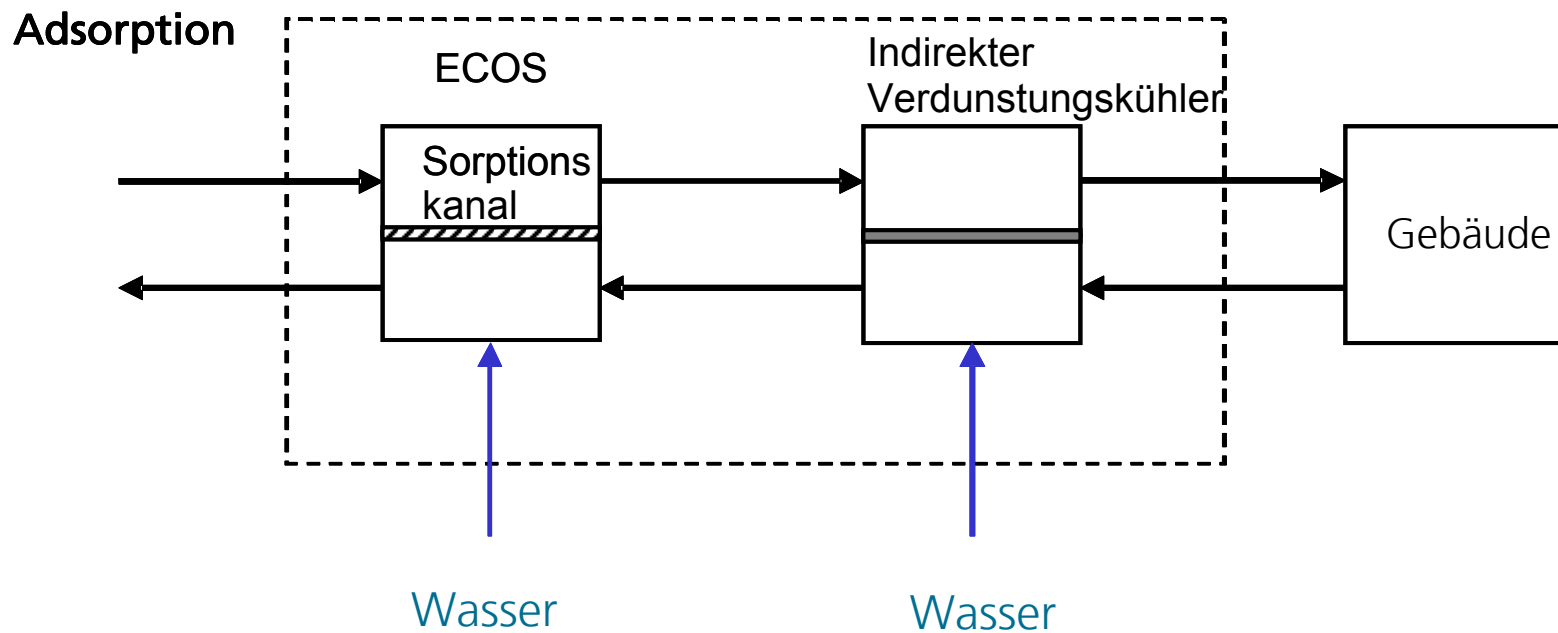
# Simulierter Feuchteverlauf



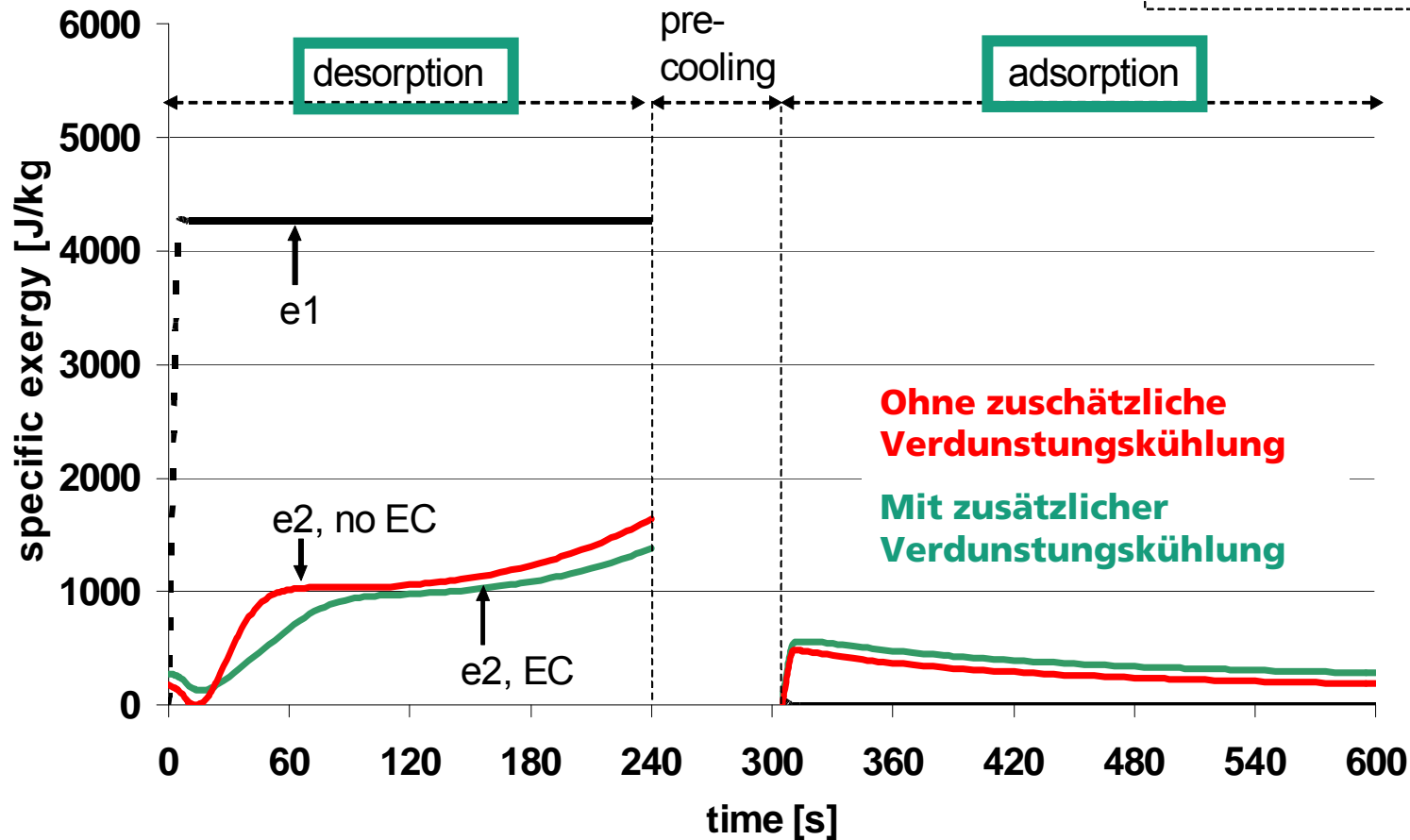
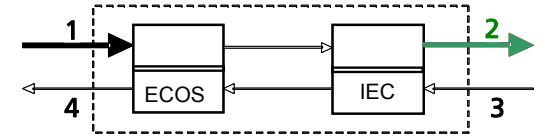
# Spezifische Exergie: Prozessluft



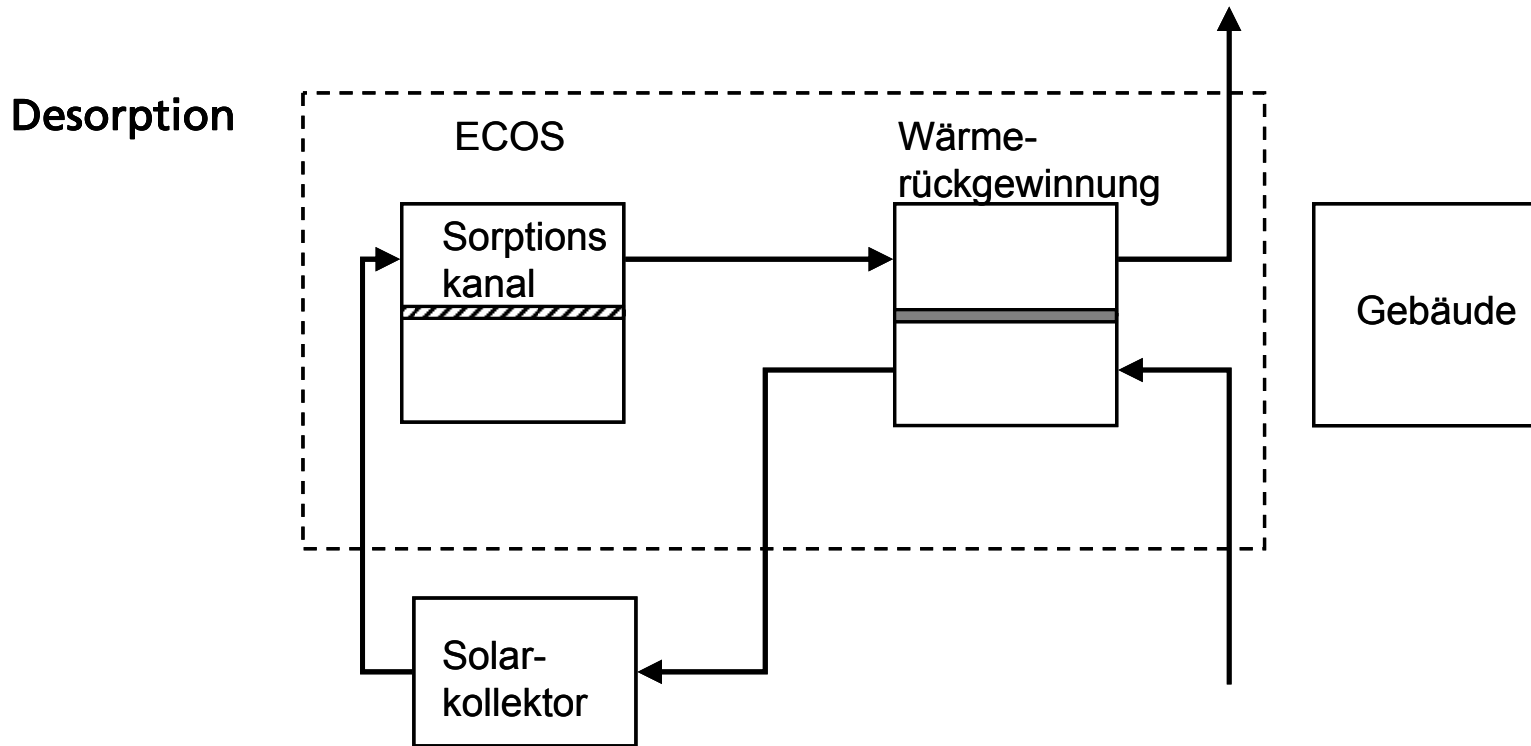
# Erweiterte Systemkonfiguration: Nachgeschaltete indirekte Verdunstungskühlung



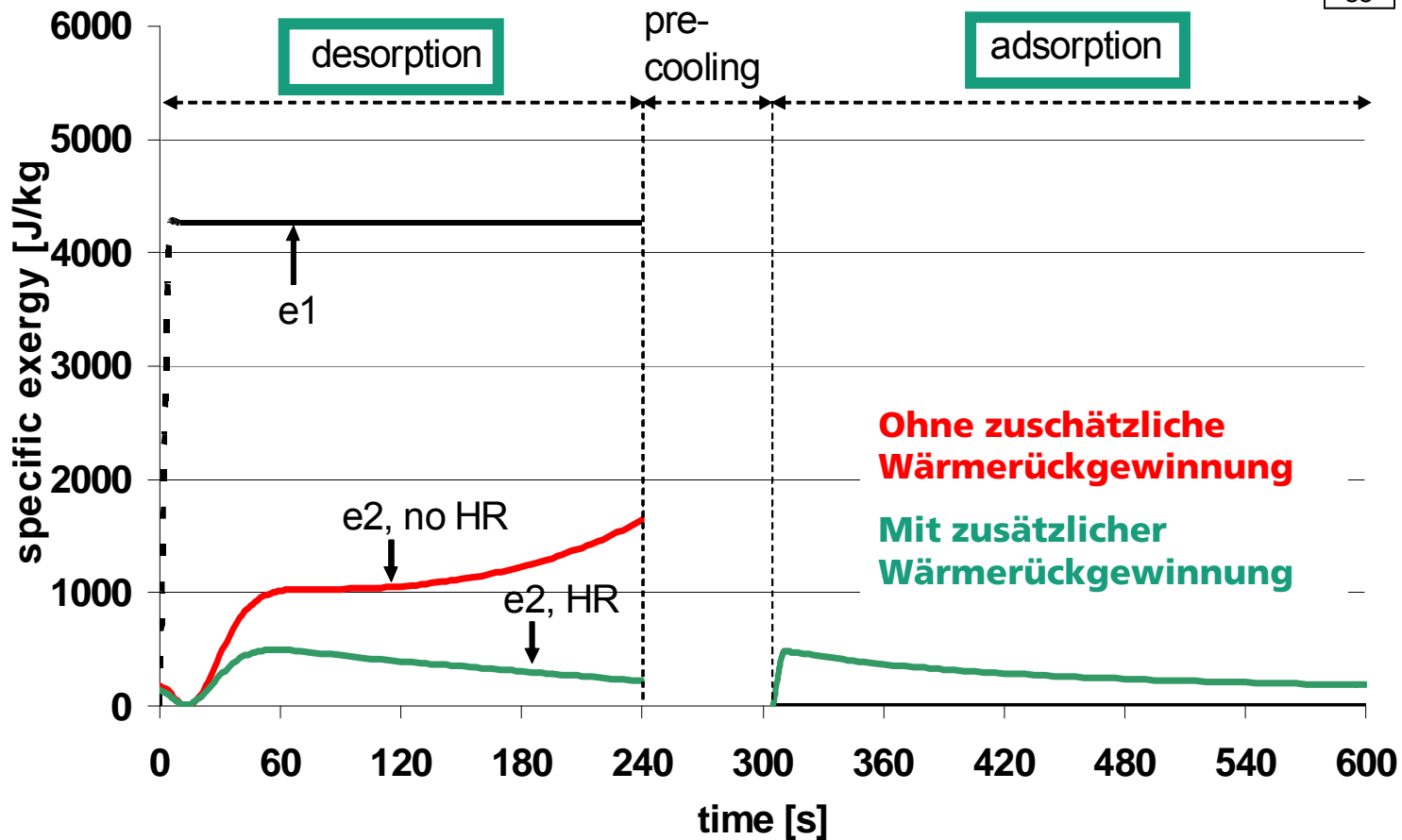
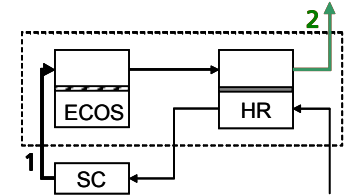
# Nachgeschaltete indirekte Verdunstungskühlung



# Erweiterte Systemkonfiguration: Wärmerückgewinnung



# Wärmerückgewinnung: Spezifische Exergie



# Sensitivitätsanalyse

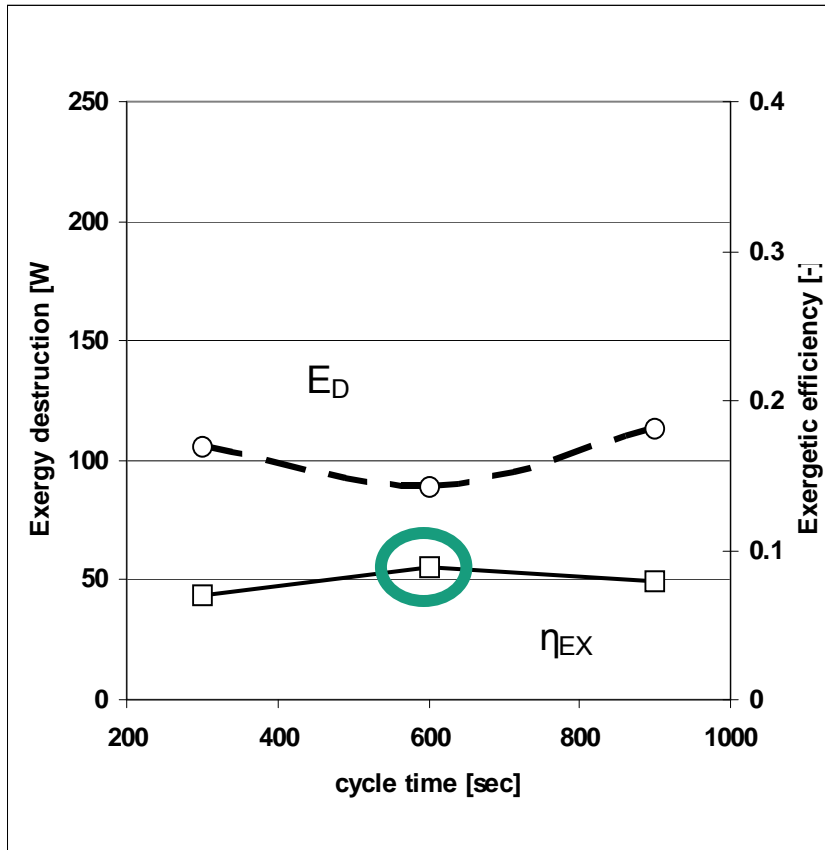
- Sensitivität auf wichtige Betriebsparameter
  - Regenerationstemperatur
  - Zykluszeit

Grundlagen der Berechnungen des ECOS-Wärmeübertragers:

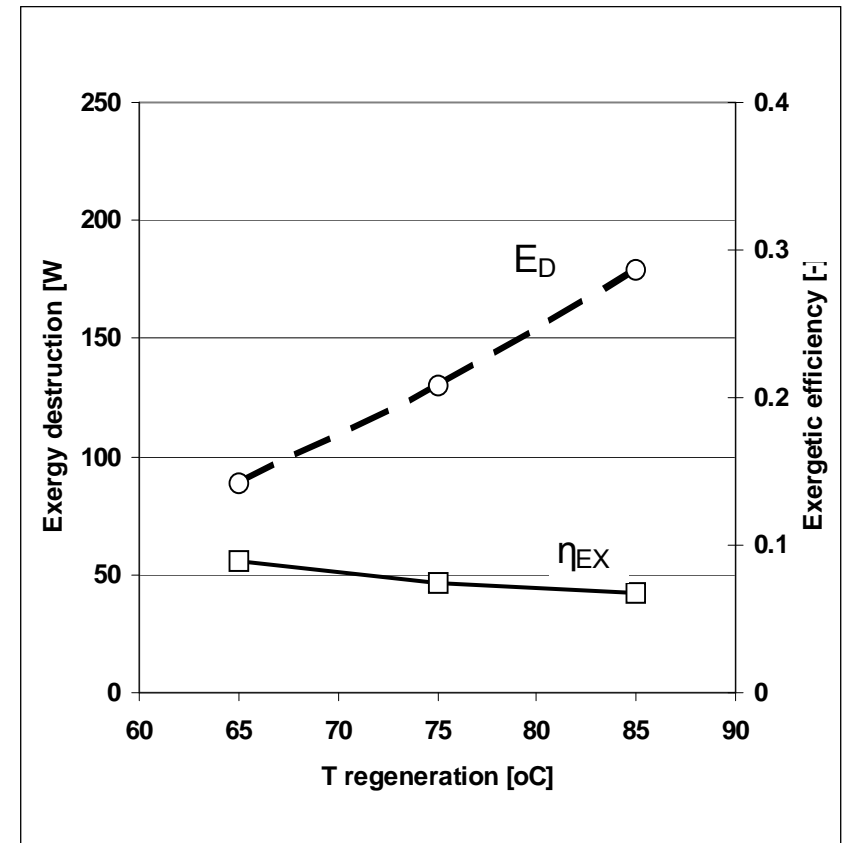
- Geometrie: Kantenlänge =>  $0.4 \times 0.4 \text{ m}^2$ , 60 Kanäle =>  $19.2 \text{ m}^2$
- Basiszykluszeit: 600 Sekunden (Adsorption+Desorption+Vorkühlung)
- Volumenstrom beidseitig:  $400 \text{ m}^3/\text{h}$
- Außenluftzustand:  $32^\circ\text{C}$ ,  $15 \text{ g/kg}$  / Gebäudeabluftzustand:  $26^\circ\text{C}$ ,  $12 \text{ g/kg}$

# Sensitivitätsuntersuchung

## Zykluszeit



## Regenerationstemperatur



# Ergebnisse ECOS

- Systemkonfiguration
  - Nachgeschaltete Wärmerückgewinnung minimiert Exergieverluste
  - Nachgeschaltete Verdunstungskühlung erhöht die Exergie der Prozessluft nur gering, dahingegen erhöht sich die Irreversibilität durch Verdunstung
- Betriebsbedingungen
  - Irreversibilität nimmt zu mit steigender Regenerationstemperatur
  - Irreversibilität hat ein Minimum bei der optimalen Zykluszeit

- Motivation und Einführung
- Anwendungsbeispiele
  - Absorptionskältemaschine
  - Desiccant Cooling Anlage
  - ECOS-Verfahren
- **Ausblick**

# Ausblick

- Exergieanalyse gutes Werkzeug bei der Entwicklung von Verfahren zur Identifikation derjenigen Prozessschritte, die größte irreversible Verluste bedingen
- Komplexer zur Analyse von Klimatisierungsverfahren wegen Berücksichtigung Feuchte
- Festlegung des Referenzpunktes kritisch
  - Überschaubar verwendbar bei Vergleich verschiedener Verfahren bei fest gelegtem Referenzpunkt
  - Nicht trivial bei wanderndem Referenzpunkt
- In der Regel erlaubt erst Kombination mit weiterer Größe Optimierung (z.B. Kosten)