
Simulation solarer Kühlverfahren

Dr. Jürgen Schumacher¹, Prof. Dr. Ursula Eicker²

¹ Universität Oldenburg, Fachbereich Physik, Abteilung Energie- und Halbleiterforschung
Carl-von-Ossietzky-Straße 9-11, 26129 Oldenburg
Tel: 0441/798-3546, Fax: -3326, email: js@ehf.uni-oldenburg.de

² Fachhochschule Stuttgart - Hochschule für Technik, Fachbereich Bauphysik
Schellingstr. 24, 70174 Stuttgart
Tel: 0711/121-2831, Fax: -2698, email: eicker.fbp@fht-stuttgart.de

1 Einleitung

Solarthermisch betriebene Kühlverfahren sind durch die Abhängigkeit von den meteorologischen Randbedingungen charakterisiert. Die Berechnung des Energieertrags, des solaren Deckungsgrades sowie der Wirtschaftlichkeit der Anlagen erfordert daher notwendigerweise eine standortabhängige dynamische Simulation. Mit modernen statistischen Verfahren können heute mit sehr guter Genauigkeit langjährige Zeitreihen von Einstrahlung und Temperaturen erzeugt werden, so dass eine dynamische Systemsimulation prinzipiell sehr aussagekräftige Ergebnisse liefern und Auslegungsaustregeln ersetzen kann.

In dem verbreiteten thermischen Gebäudesimulationsprogramm TRNSYS sind einfache Modelle für sorptionsgestützte Klimaanlage und Absorptionskältemaschinen vorhanden, Anwendung und Erweiterung der Modelle beispielsweise für die Untersuchung von Regelstrategien oder für eine Kombination mit Datenerfassungen sind jedoch sehr aufwendig. Mathematisch anspruchsvollere Programme zur Lösung von regelungstechnischen Fragestellungen wie z.B. ColSim oder Smile bieten wesentlich stabilere Lösungsverfahren, sind aber (noch) nicht für eine nutzerfreundliche Bedienung optimiert. Daneben stehen kundenspezifisch programmierte Lösungen beispielsweise für sorptionsgestützte Klimaanlage zur Verfügung, die jedoch auf eine Anwendung beschränkt und nicht allgemein erweiterbar sind.

Gesucht ist demnach eine offene Simulationsumgebung, die eine anwenderfreundliche Nutzeroberfläche mit stabilen Lösungsalgorithmen bietet, weltweite meteorologische Daten zur Verfügung stellt und trotz Vorkonfigurierung von Anlagenkonzepten nicht auf die Erweiterbarkeit der Modelle verzichtet.

Die **Integrated Simulation Environment Language** INSEL mit der kommerziellen Visualisierungssoftware HP VEE stellt eine solche Simulationsumgebung zur Verfügung.

Die modular aufgebaute graphische Programmiersprache ermöglicht die einfache Erstellung komplexer Modelle aus Einzelblöcken, die in einem Blockschaltbild zum System zusammengefügt werden. Die Erweiterbarkeit für eigene Anwendungen ist einfach durch das Einbinden von Nutzerblöcken möglich.

Als eine Beispielwendung der Berechnung solarthermischer Kühlverfahren werden hier sorptionsgestützte Klimaanlage vorgestellt, die das Programmierungskonzept vorstellen, die Modelle anhand von Messdaten einer ausgeführten Anlage in Althengstett validieren sowie Planungsberechnungen für eine Anlage in Mataró/Spanien umfassen.

2 Simulation sorptionsgestützter Klimaanlage

Für die Simulation einer solar gestützten Sorptionsklimatisierung wird die Klimaanlage in die Einzelkomponenten Sorptionsrad, Wärmetauscher, Befeuchter, Ventilatoren, solarthermische Anlage (Luft- oder Wasserkollektoren) und Regler aufgeteilt und die physikalischen Modelle in den unterschiedlichen Blöcken implementiert. Jede einzelne Komponente kann somit einzeln validiert werden, ohne dass die Gesamtanlage berechnet werden muss. Die Blöcke für die Berechnung der standortabhängigen meteorologischen Randbedingungen werden zusätzlich in der Simulationsumgebung bereitgestellt.

Die Blöcke werden über Ein- und Ausgänge sowie Parameter konfiguriert. So benötigt beispielsweise das Sorptionsrad die Aussen- und Regenerationslufttemperaturen und -feuchten sowie die Drehzahl als Eingangsgrößen und gibt Temperatur und Feuchte der getrockneten Zuluft bzw. der Fortluft als Ausgangsgrößen weiter. Als Parameter für die Güte der Entfeuchtung wird der Entfeuchtungswirkungsgrad verwendet.

Als einfachstes Modell für die Entfeuchtung wird Zuluftfeuchte stationär auf die minimale relative Feuchte der Regenerationsluft reduziert und über den Entfeuchtungswirkungsgrad die reale Entfeuchtungsleistung berechnet. Der Temperaturanstieg der Zuluft bei der Entfeuchtung kann sowohl für eine isenthalpe Entfeuchtung als auch bei Enthalpiezunahme berechnet werden. Über die Eingangsgröße Drehzahl soll zu einem späteren Zeitpunkt auch instationär gerechnet werden. Aus den Messdaten der Sorptionsanlage in Althengstett mit einem LiCl Sorptionsrotor wurde zunächst das einfache Sorptionsmodell überprüft.

Für eine Woche im Juli 2001 bei kontinuierlichem Betrieb der Sorptionsanlage wird der Temperaturanstieg bei Entfeuchtung sehr gut durch die Simulation wiedergegeben.

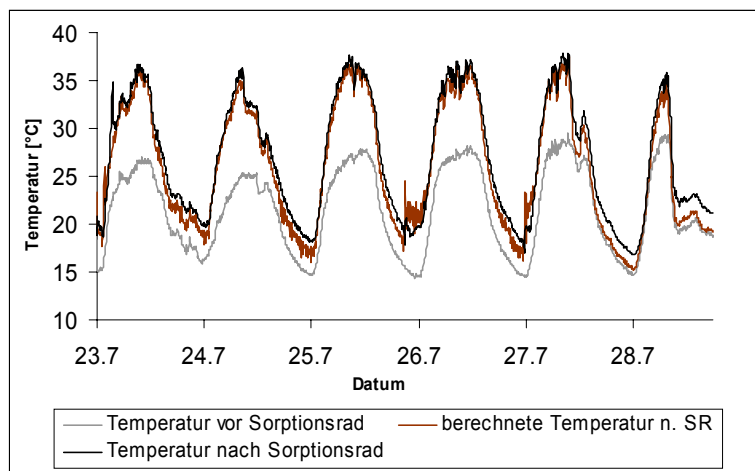


Abbildung 1: Temperaturanstieg der Zuluft bei Entfeuchtung (Berechnung isenthalp).

Weitaus problematischer ist die Validierung der Feuchtwerte, da punktuelle Feuchtemessungen in ausgeführten grossen Anlagen (hier 18.000m³/h Luftmenge) äusserst problematisch und fehlerträchtig sind. Neben den Herstellersensoren wurden eigene Sensoren eingesetzt, die bis zu 2g/kg unterschiedliche Absolutfeuchten anzeigen (20% Abweichungen). Die berechneten hohen Entfeuchtungsleistungen bei Regenerationstemperaturen zwischen 55 und 60°C wurden durch die Messung nicht reproduziert. Hier müssen genauere Prüfstandsmessungen durchgeführt werden.

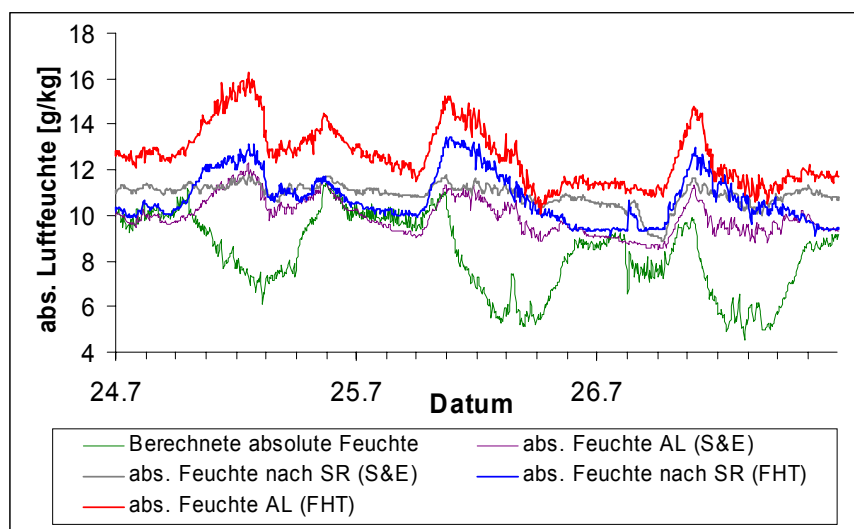


Abbildung 2: Gemessene und berechnete Zuluftfeuchten vor und nach dem Sorptionsrotor. Die gemessenen Feuchten wurden jeweils mit Herstellersensoren (S&E) sowie eigenen Sensoren (FHT) ermittelt.

Die weiteren Komponenten wie Wärmerückgewinnungsrotor und Befeuchter können bei den gegebenen konstanten Zu- und Abluftvolumenströmen mit konstantem Wir

kungsgrad berechnet werden. Die im folgenden dargestellten berechneten Temperaturen des Abluftbefeuchters wurden mit 85% Befeuchtungswirkungsgrad ermittelt.

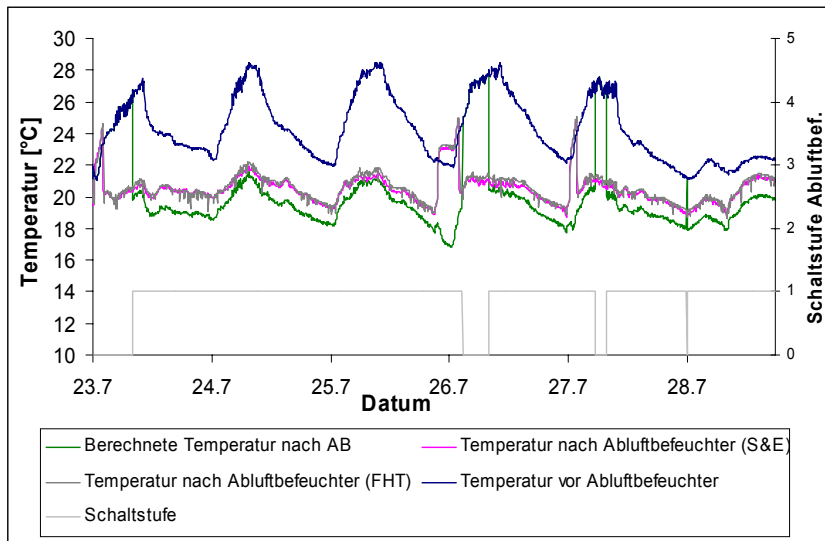


Abbildung 3: Temperaturen vor und nach der Abluftbefeuchtung bei einem Befeuchtungswirkungsgrad von 85%.

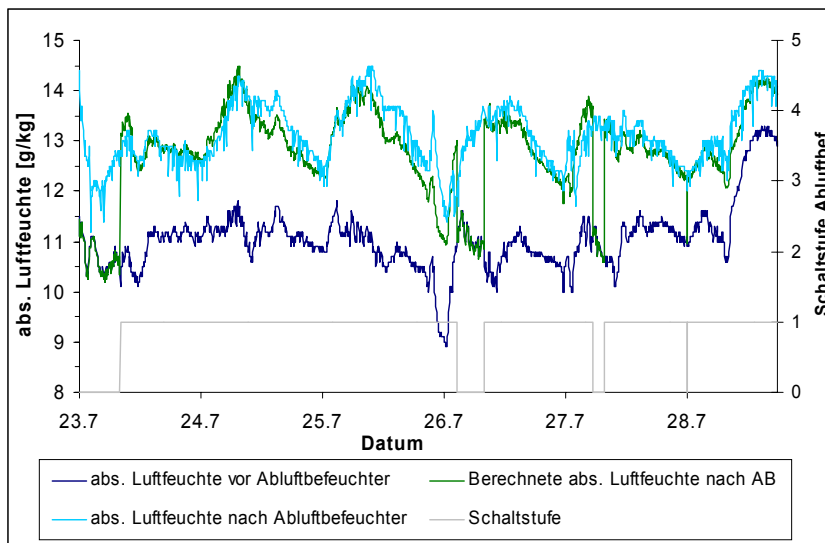


Abbildung 4: Absolute Feuchten vor und nach dem Abluftbefeucher.

Die Dynamik der Befeuchtung, die insbesondere bei dem dreistufigen Zuluftbefeucher zu beobachten ist, ist derzeit noch nicht im Modell berücksichtigt.

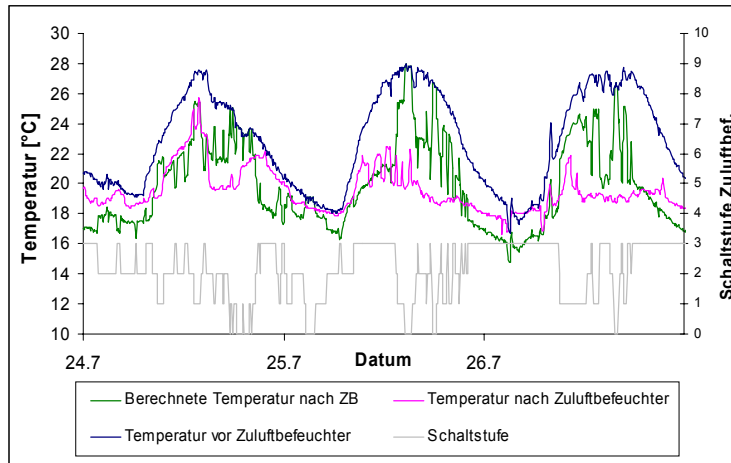


Abbildung 5: Temperaturen und Schaltzustände des dreistufigen Zuluftbefeuchters.

Das Wirkungsgradmodell des Luftkollektors mit Rippenabsorbemern ist gut validiert und kann bei der geringen Wärmekapazität des Kollektors stationär dargestellt werden.

3 Ertragsberechnungen

Mit den validierten Komponentenmodellen werden im folgenden Ertragsberechnungen für eine sorptionsgestützte Klimatisierungsanlage durchgeführt, die im Sommer 2002 in Mataró, Spanien in Betrieb geht.

Die komplette Anlage wird in der graphischen Oberfläche von HP VEE visualisiert.

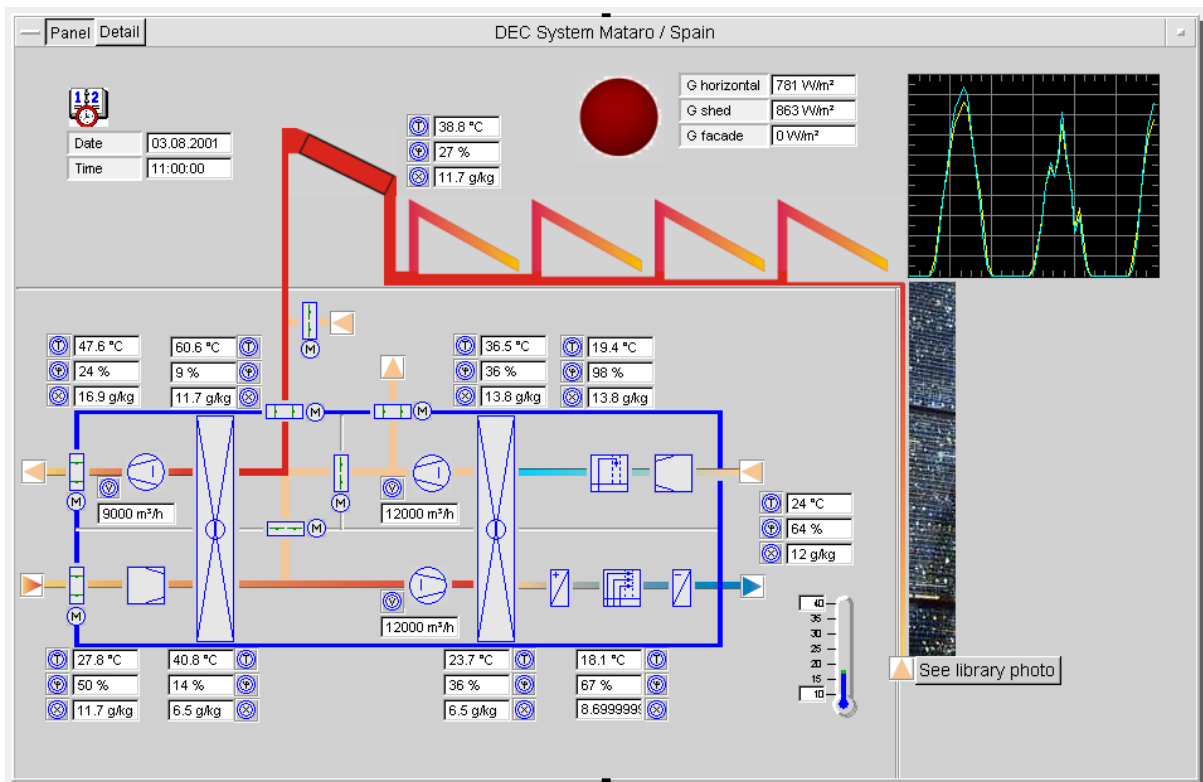


Abbildung 6: Visualisierung des Anlagenmodells in HP Vee.

Die Anlage mit 12.000m³/h Prozessluftstrom wird mit einer Vorheizung durch eine hinterlüftete Photovoltaikfassade und Dachsheds sowie einer Nachheizung durch ein 105m² Luftkollektorfeld regeneriert. Für die gebäudeintegrierte Photovoltaik wurde ein spezielles Komponentenmodell entworfen, welches zusätzlich zur Wärmeübertragung des Moduls an die Spaltluft auch die rückgewonnenen Wärmeverluste des Raumes berücksichtigt.

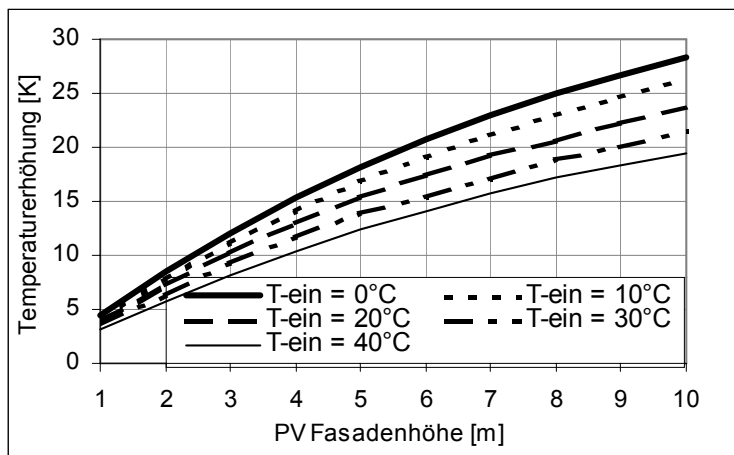


Abbildung 7: Temperaturerhöhung der hinterlüfteten Photovoltaikfassade als Funktion der Aussenlufttemperatur bei 800W/m² Einstrahlung. Bei geringen Aussentemperaturen wird Wärme aus dem Raum zurückgewonnen.

Der monatliche sommerliche Energieertrag der hinterlüfteten Photovoltaik sowie des Luftkollektorfeldes liegt zwischen 18-22.000 kWh pro Monat mit jeweils etwa 50% Anteil an der Gesamtenergieproduktion.

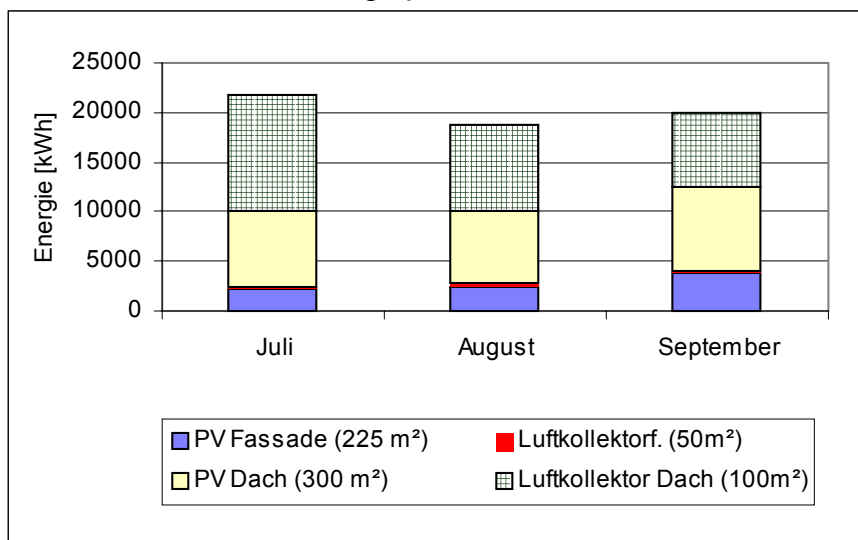


Abbildung 8: Monatlicher Energieertrag des solarthermischen Systems in Mataró.

Die Regenerationstemperaturen der thermischen Anlage erreichen bei einem Regenerationsluftvolumenstrom von 9000 m³/h etwa 60°C. Deutlich zu erkennen sind die

Stillstandstemperaturen bei Anlagenabschaltung am Wochenende und vor Betriebsbeginn.

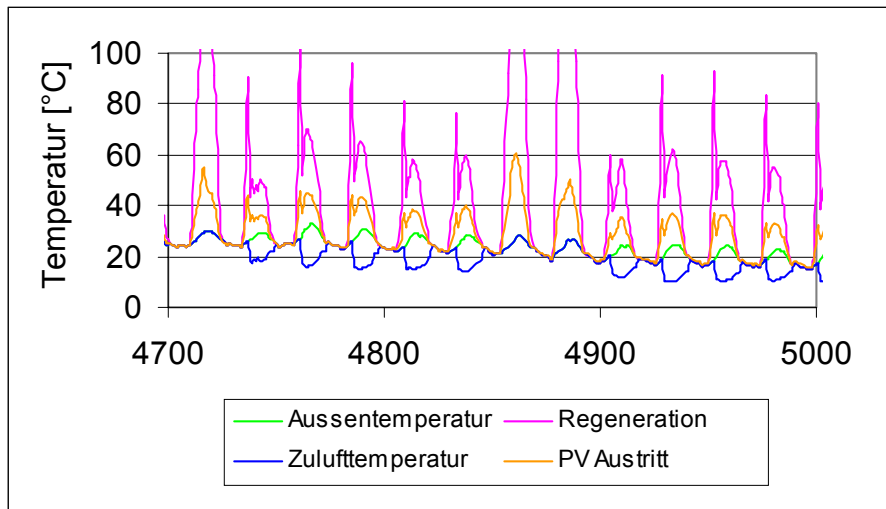


Abbildung 9: Stundenwerte der Temperaturen der Zuluft, Aussenluft, PV Sheds und Luftkollektoren (von unten nach oben) für den Monat Juli.

Bei den gegebenen Regenerationstemperaturen werden etwa 5-6g/kg entfeuchtet. Durch die direkte Zuluftbefeuchtung werden Zuluftfeuchten bis maximal 11.5g/kg in den Raum eingebracht.

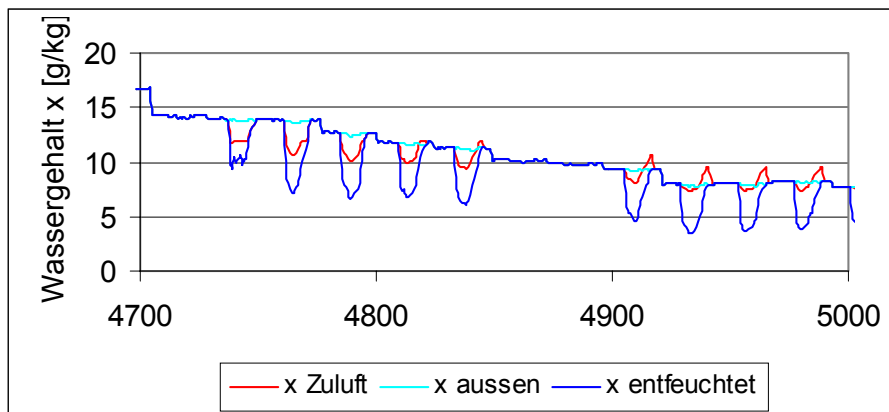


Abbildung 10: Stündlicher Wassergehalt der Aussenluft, der entfeuchteten Prozessluft und der Zuluft nach der direkten Verdunstungsbefeuchtung für den Monat Juli.

Für das Gebäude wird bei einem Kühlenergiebedarf von knapp 40.000 kWh insgesamt ein solarer Deckungsgrad von 84% erreicht. Die Hilfsenergie wird in Form von Nachkühlung mit einer vorhandenen Kompressionskältemaschine bereitgestellt.

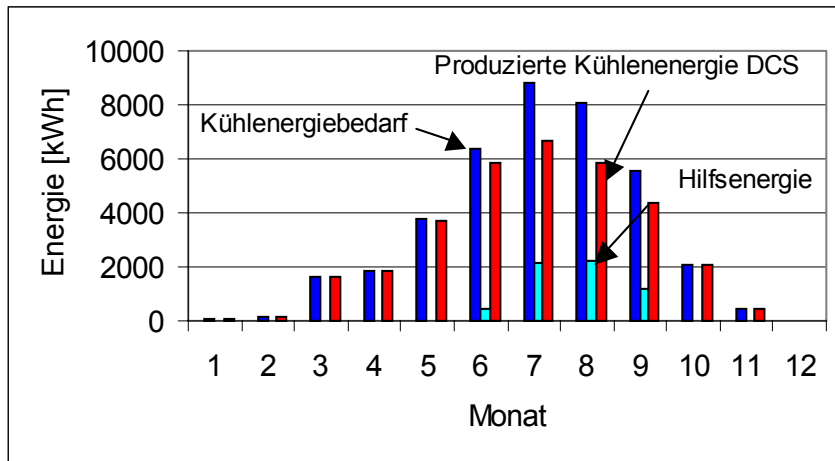


Abbildung 11: Monatlicher Energiebedarf für Kühlung und Deckung durch solarthermische Anlage sowie Hilfsenergiequellen.

Zusätzlich zu der sommerlich produzierten Kühlenergie wird durch die Photovoltaikanlage 55000kWh Strom jährlich ins Netz eingespeist und im Winter etwa 30.000 kWh Heizenergie zur Frischluftvorwärmung bereitgestellt.

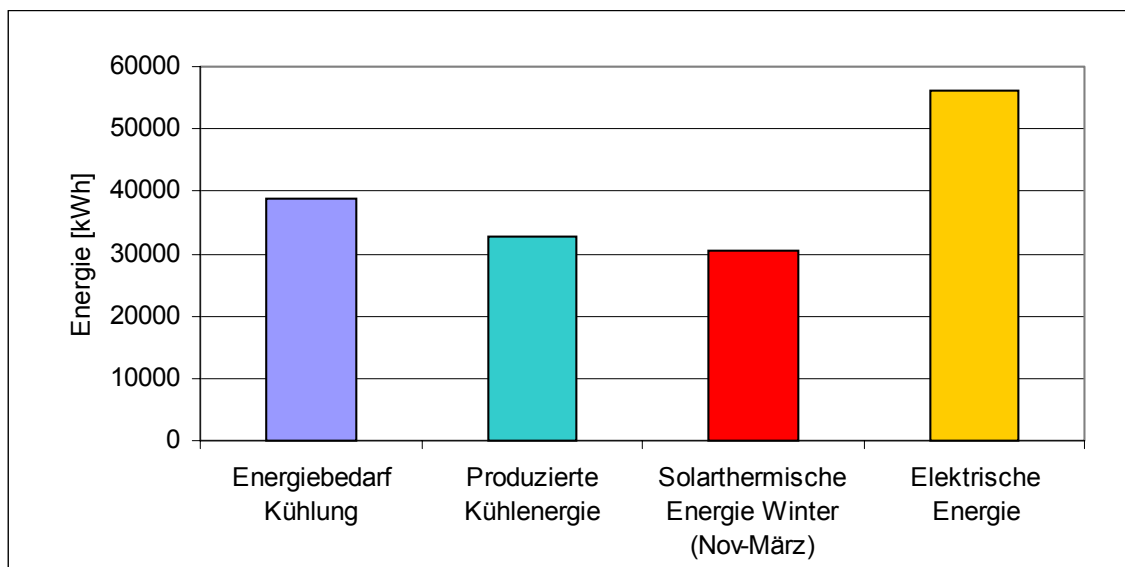


Abbildung 12: Jahresenergiebilanz des Gesamtsystems.