

# Betriebserfahrungen und Untersuchungen von DEC-Anlagen: Regelungsoptimierung und Energieanalysen

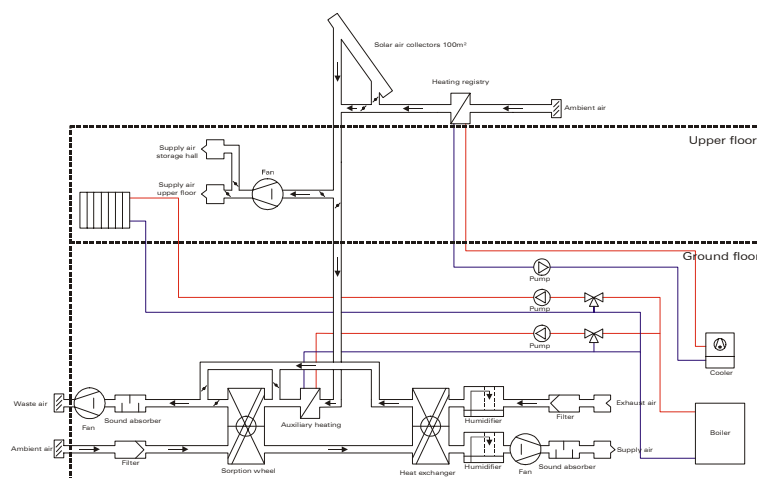
Ursula Eicker, Uwe Schürger, Jürgen Schumacher  
Forschungszentrum nachhaltige Energietechnik za fh.net, Hochschule für Technik Stuttgart, Schellingstr. 24, 70174 Stuttgart, email: uwe.schuerger@hft-stuttgart.de

## 1. Einleitung

In offenen sorptionsgestützten Anlagen für die Gebäudeklimatisierung wird die Außenluft getrocknet, mit befeuchteter Abluft vorgekühlt und anschließend über Verdunstungsbefeuchtung auf Zulufttemperaturen zwischen 16 und 20°C gekühlt. Wenn bei diesen Anlagen die erforderliche Regenerationswärme solarthermisch bereitgestellt wird, können solche Anlagen mit sehr geringem Primärenergieaufwand Kälte erzeugen. Eine kostengünstige Möglichkeit dazu stellen Luftkollektoren dar, die ohne weitere Wärmetauscher direkt in den Prozess eingebunden werden können. Die durch die Luftkollektoren auf ein Temperaturniveau zwischen 60 und 70°C erhitze Außen- oder Raumabluft kann dann zur effektiven Regeneration des eingesetzten Sorptionsmaterials genutzt werden. Dabei ist eine wesentliche Fragestellung, inwieweit solare Energieerzeugung und Wärmebedarf für die Sorptionstrocknung zeitlich übereinstimmen und welchen Einfluss Speichermöglichkeiten auf den solaren Deckungsbeitrag haben. Anhand der Messergebnisse zweier sorptionsgestützter Klimaanlage in Deutschland und Spanien mit jeweils 100 m<sup>2</sup> Luftkollektorfläche werden die Erträge und Wirkungsgrade aller Systemkomponenten analysiert. Insbesondere wird der Einfluss der Regelungsstrategie auf die solare Energienutzung diskutiert.

## 2. Anlagenbeschreibung und Regelungsstrategie

Die Anlage in Althengstett mit einem konstanten Gesamtvolumenstrom von 18.000



**Abb. 1:** Systemskizze der Anlage in Althengstett



differenz zwischen Raumzuluft und Außenluft) bzw. eine Kühlleistung von bis zu 35 kW (Enthalpiedifferenz zwischen Raumabluft und Außenluft) erreicht. Wenn die Anlage nachmittags in Betrieb geht, ist die anfangs zur Verfügung stehende Wärmeleistung sehr hoch, da das Kollektorfeld Stillstandstemperatur aufweist. Die Leistungszahl ist daher zu Beginn dementsprechend niedrig und stabilisiert sich dann auf einem Wert von ca. 0,6. Während der Entfeuchtungswirkungsgrad des Sorptionsrotors 80 % beträgt, liegt der Wirkungsgrad des Rotationswärmetauschers durchschnittlich bei nur 68 %. Der Ab- und der Zuluftbefeuchter arbeiteten zufriedenstellend mit Befeuchtungswirkungsgraden von 85 %. Höhere Leistungszahlen bis ca. 1,0 werden mit niedrigeren Regenerationstemperaturen um ca. 50°C erreicht. Niedrigere Regenerationstemperaturen sind daher im Hinblick auf eine gute Energieeffizienz anzustreben, wenn die Entfeuchtungsleistung dabei ausreichend hoch ist.

Messdaten aus Althengstett sind über eine gesamte Sommerperiode von März bis September 2002 verfügbar. Der ermittelte Wirkungsgrad des Rotationswärmetauschers beträgt auch hier nur 62 % (Herstellerangabe für diese Betriebsbedingungen: 73 %). Für die Kontakt-Befeuchter wurde ein Befeuchtungswirkungsgrad von 85 % ermittelt, im Vergleich zu 92,4 % nach Herstellerangabe. Um die effektive Entfeuchtungsleistung des Sorptionsrotors zu bestimmen, konnte gezeigt werden, dass Temperaturmessungen, kombiniert mit aus Prüfstandsmessungen ermittelten üblichen Enthalpieänderungen, zu deutlich zuverlässigeren Ergebnissen führen als die Bestimmung aus Messwerten der relativen Feuchtigkeit. Der so ermittelte Entfeuchtungswirkungsgrad, der definiert ist als das Verhältnis der tatsächlichen Entfeuchtungsleistung zur maximal möglichen Entfeuchtung bis runter zur relativen Feuchtigkeit der Regenerationsluft, beträgt 80 % bei einem Volumenstromverhältnis von Regenerations- zu Prozessluft von 0,66.

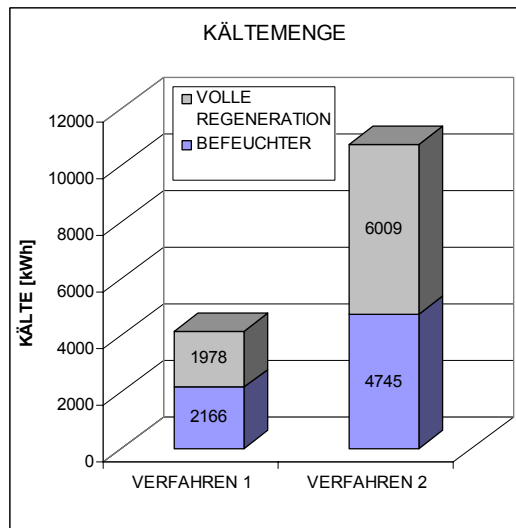
### **3.2 Vergleich verschiedener Auswertungsansätze am Bsp. Althengstett**

Aufgrund der Vielzahl von Sensoren und Messpunkten ergeben sich für die Auswertung der Messdaten oftmals verschiedene Möglichkeiten bezüglich der Beurteilung des Betriebszustandes und der Wahl der Fühler, die für diese Beurteilung herangezogen werden. Der Einfluss dieser Wahlmöglichkeiten auf die Ergebnisse wird im Folgenden beispielhaft anhand der energetischen Auswertung im Monat Juli 2002 dargestellt.

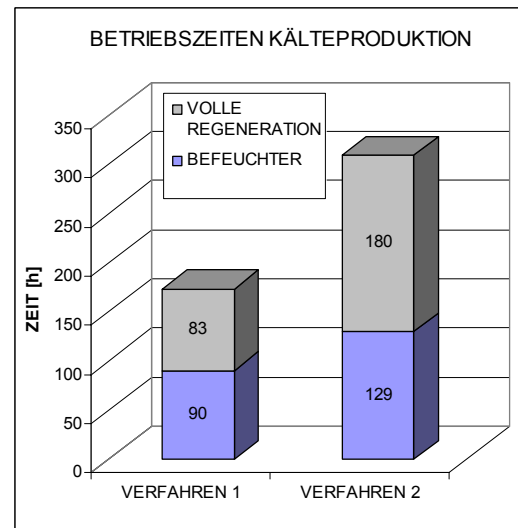
Verfahren 1: Zum Einen wurde die Auswertung basierend auf der Bestimmung des tatsächlichen Betriebszustandes von Einzelkomponenten durchgeführt. Somit wurde der Betriebszustand "Kühlen" z.B. dann angenommen, wenn zumindest ein Befeuchter in Betrieb war, d.h. eine effektive Temperaturreduzierung zwischen Eintritts- und Austrittstemperatur vorlag. Regenerationsbetrieb liegt vor, wenn mindestens ein Befeuchter in Betrieb ist und das Sorptionsrad mit Regenerationsluftdurchströmt wird.

Verfahren 2: Weiter wurde eine Auswertung durchgeführt, bei welcher lediglich die Außenluft- mit der Zulufttemperatur verglichen wurde, um Kühlbetrieb zu bestimmen. Der Betriebszustand der Einzelkomponenten war dabei unerheblich. Zur Bestimmung, ob Regenerationsbetrieb vorliegt, wurde ein Signal der Anlagensteuerung (Bypass-Klappe Sorptionsrad) verwendet.

Diese Verfahren, die beide nachvollziehbar sind, führen zu enormen Abweichungen bei der Ermittlung der produzierten Kältemenge. So ergab sich für den Juli 2002 nach Verfahren 1 eine Kältemenge von 4.144 kWh im Vergleich zu 10.754 kWh nach Verfahren 2. Das heißt, dass die nach Verfahren 1 ermittelte Kältemenge gerade mal 39 % der nach Verfahren 2 ermittelten Kältemenge entspricht. Aber auch die der Auswertung zugrunde liegenden Betriebszeiten weichen erheblich voneinander ab. Die gesamte Betriebsdauer, in der Kälte produziert wurde ergibt sich nach Verfahren 1 zu 173 h im Vergleich zu 309 h nach Verfahren 2.

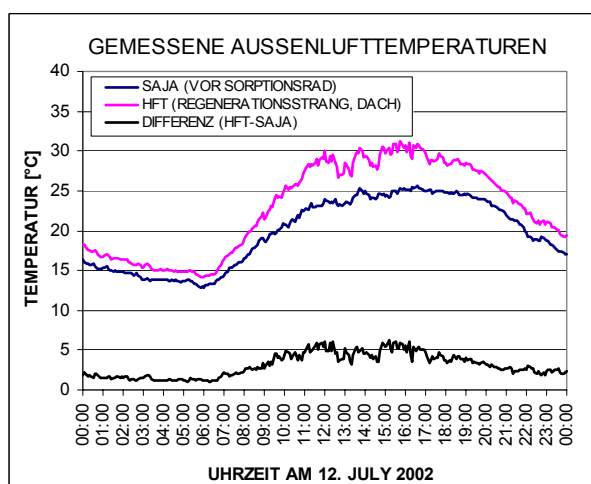


**Abb. 3:** Vergleich der produzierten Kältemenge, bestimmt durch unterschiedliche Verfahren



**Abb. 4:** Vergleich der Betriebszeiten mit Kälteproduktion, bestimmt durch unterschiedliche Verfahren

Zur Ermittlung der Ursachen für diese Abweichungen wurden die Messwerte genauer untersucht. Das Hauptproblem schien dabei die Wahl der unterschiedlichen Messfühler für die Außenlufttemperatur zu sein. Für das Verfahren 1 wurden die Werte eines Messfühlers der Anlagensteuerung (Saja) herangezogen. Dieser Fühler sitzt im Prozessluftvolumenstrom direkt vor dem Sorptionsrad. Für das Verfahren 2 hingegen wurde ein Fühler verwendet, der von der Fachhochschule Stuttgart im Rahmen der Projektarbeit eingebaut wurde (HfT). Dieser Fühler befindet sich im Regenerationsluftstrang auf dem Dach vor dem Wärmetauscher zur Nutzung von Abwärme. Vergleicht man die Werte dieser beiden Fühler, die ja eigentlich beide die Außenlufttemperatur wiedergeben sollten, stellt man fest, dass es erhebliche Abweichungen von zeitweise bis zu 6 K gibt. Am 12. Juli 2002 z.B. lagen die Zulufttemperaturen zwischen 12:00 und 18:00 Uhr bei ca. 18°C. Die Außenlufttemperaturen gemessen auf dem Dach (HfT) lagen durchschnittlich bei ca. 29°C, die vor dem Sorptionsrad gemessenen (Saja) bei ca. 24°C. Bei einem Prozessluftvolumenstrom von 18.000 m<sup>3</sup>/h ergeben sich damit Kühlleistungen von 61 kW (HfT) bzw. 33 kW (Saja).



**Abb. 5:** Vergleich der gemessenen "Außenlufttemperaturen" am Bsp. des 12. Juli 2002

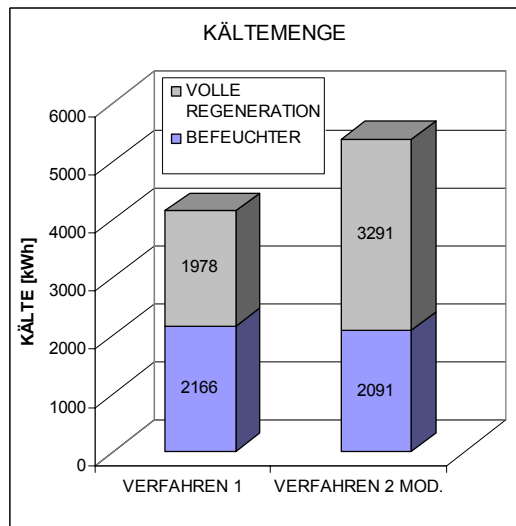
Um die Ursachen für diese Abweichungen zu ermitteln mussten die aufgezeichneten Messwerte sehr detailliert analysiert werden. Dabei stellte sich heraus, dass der Messwert des Saja-Fühlers eine systematische Abhängigkeit von der Hallentemperatur aufweist. Dies ist damit zu erklären, dass die Prozessluft, bevor sie in die SGK-Anlage eintritt, durch einen ungedämmten Lüftungskanal quer durch die klimatisierte Halle geführt wird. Dabei konnte festgestellt werden, dass bei einer Temperaturdifferenz von 10 K zwischen Außenluft- und Hallentemperatur die Temperaturänderung der Prozessluft von Außenluftansaugung bis zum Sorptionsrad bis zu 2 K beträgt. Weiter konnte festgestellt werden, dass die gemessene Außenlufttemperatur auf dem Dach durch Sonneneinstrahlung beeinflusst wird. Der Einfluss der Sonneneinstrahlung konnte bei einer Einstrahlung von  $1.000 \text{ W/m}^2$  auf ca. 2,5 K bestimmt werden. Dabei ist jedoch zu beachten, dass aufgrund der Einbausituation des Fühlers ein direkter Einfluss der Sonnenstrahlung ausgeschlossen werden kann, vielmehr führt die Einstrahlung zu einer Erwärmung des gesamten Hallendaches und in der Folge zu einer höheren Lufttemperatur an der Einsaugung auf dem Dach.

Trotz dieser Feststellungen bleibt jedoch auch eine mittlere Abweichung der beiden Fühler von 2-3 K bestehen, die eigentlich nur durch systematische Fehler (Einbauposition, Kalibrierung, Messkette etc.) erklärt werden können.

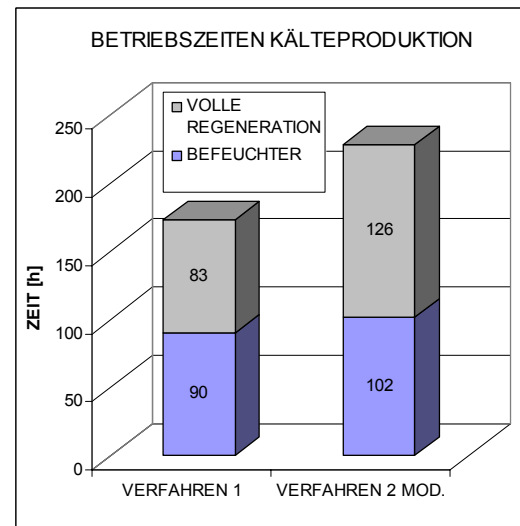
Nun stellt sich natürlich die Frage, welche der beiden Temperaturen entspricht eher der tatsächlichen Außenlufttemperatur, bzw. welche der Temperaturen ist für die Auswertung besser geeignet. Zuerst einmal ist festzustellen, dass keine der beiden gemessenen Temperaturen aufgrund der oben genannten Abhängigkeiten genau der tatsächlichen Außenlufttemperatur entspricht. Für die Bewertung der SGK-Anlage erscheint jedoch die Saja-Temperatur besser geeignet zu sein, da für die reine Bewertung der Anlage die unmittelbare Lufteintrittstemperatur heranzuziehen ist, unabhängig davon, ob die Prozessluft vorkonditioniert wurde oder nicht. Ein weiterer Punkt, der für die Verwendung des Saja-Fühlers spricht, ist, dass die Zulufttemperatur ebenfalls von einem Saja-Fühler gemessen wird. Wenn man davon ausgeht, dass die Übereinstimmung von zwei baugleichen Sensoren besser ist als die zwischen Fühlern unterschiedlicher Hersteller, so sollte die für die Auswertung maßgebliche Differenzmessung mit gleichen Sensoren weniger fehlerbehaftet sein als die Messung mit unterschiedlichen Sensoren. Um dies zu überprüfen wurde die

mittlere Abweichung der Temperatur vor dem Sorptionsrad (Saja) mit der Raumzulufttemperatur (Saja) während dem Betriebszustand "freie Lüftung" ermittelt. Diese Überprüfung ergab eine mittlere Abweichung von 1,3 K über 178 h, was aufgrund der im vorliegenden Fall möglichen Einflüsse bei der Messwerterfassung als durchaus akzeptabel erscheint.

Aufgrund dieser Feststellungen wurde die Auswertung nach Verfahren 2 nochmals unter Verwendung des Saja-Fühlers für die Außenlufttemperatur durchgeführt (Verfahren 2 Mod.).



**Abb. 6:** Vergleich der produzierten Kältemenge, bestimmt durch unterschiedliche Verfahren



**Abb. 7:** Vergleich der Betriebszeiten mit Kälteproduktion, bestimmt durch unterschiedliche Verfahren

Die Ergebnisse zeigen jetzt schon eine wesentlich bessere Übereinstimmung bezüglich Kältemenge und Betriebszeiten. So ergibt sich nach dem Verfahren 2 Mod. jetzt eine produzierte Kältemenge von 5.382 kWh im Gegensatz zu 10754 kWh. Die nach Verfahren 1 bestimmte Kältemenge (4.144 kWh) entspricht nun 77 % der Kältemenge nach Verfahren 2 Mod. Auch die Betriebszeiten der Kälteproduktion stimmen besser überein. Die gesamte Betriebszeit mit Kühlung beträgt nun 228 h anstelle von 309 h.

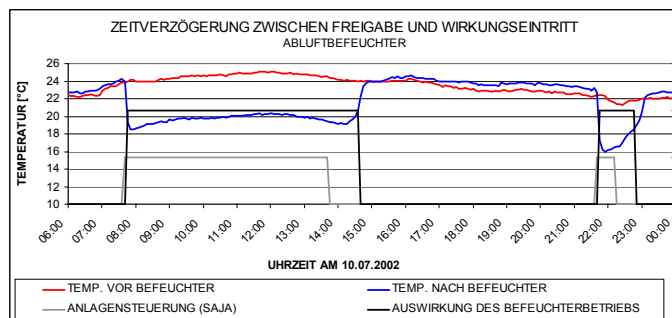
Die jetzt noch bestehenden Abweichungen können durch die verschiedenen Ansätze bei der Beurteilung erklärt werden. Für das Verfahren 1 sind wesentlich mehr Daten erforderlich als für das Verfahren 2, da bei Verfahren 1 jeweils alle Einzelkomponenten beurteilt werden müssen. Die Wahrscheinlichkeit, dass für die Auswertung benötigte Werte aufgrund von Fehlfunktionen der Messwerterfassung nicht vorhanden sind, ist demzufolge bei Verfahren 1 deutlich höher. Dies resultiert in einer insgesamt kürzeren Zeit, in der eine Auswertung möglich ist. So können zum Beispiel im Juli nach Verfahren 2 insgesamt 528 h Betriebszeit beurteilt werden, wohingegen nach Verfahren 1 lediglich 413 h ausgewertet werden können. Wird aus den oben dargestellten Werten die durchschnittliche Kälteleistung ermittelt, so ergeben sich nach Verfahren 1 ca. 24,0 kW Kälteleistung und nach Verfahren 2 Mod. ca. 23,6 kW, was als gute Übereinstimmung zu beurteilen ist.

Dieser Vergleich zeigt auf beeindruckende Weise, wie sensibel die Ermittlung von Leistungszahlen aus Messwerten sein kann, vor allem wenn sie von kommerziellen

Anlagen stammen, bei denen prüfstandsähnliche Messbedingungen praktisch nicht realisierbar sind. Es erscheint daher durchaus ratsam, durch Messungen ermittelte Leistungszahlen kritisch zu hinterfragen wobei auch die Art und Weise der Ermittlung zu berücksichtigen ist.

### 3.3 Einfluss von Komponentenverhalten auf die Steuerung/Regelung

Bei jeder Komponente gibt es eine Zeitverzögerung zwischen der Freigabe durch die Anlagen-Steuerung und der tatsächlichen Auswirkung auf den Betriebszustand. Die Befeuchter benötigen nach Anlauf zum Beispiel ca. 5-10 Minuten bis die Temperatur merklich gesenkt wird. Nach Abschalten der Befeuchter dauert es sogar mind. 45 Minuten, bis die Temperatur nicht mehr maßgeblich reduziert wird.



**Abb. 8:** Zeitverzögerung zwischen Freigabe und Wirkungseintritt ( $\Delta\theta > 3\text{ K}$ ) des Abluftbefeuchters

Diese dynamische und zum Teil sehr träge Reaktion einzelner Komponenten wird bei der eingesetzten Anlagensteuerung nicht im erforderlichen Ausmaß berücksichtigt.

So wird z. B. der Rotationswärmetauscher immer gleichzeitig mit dem Abluftbefeuchter eingeschaltet. Da jedoch der Abluftbefeuchter ca. 10-15 Minuten benötigt, bis eine merkliche Temperaturreduzierung erfolgt, wird trotz Kälteanforderung erst einmal Wärme aus der Abluft an die Zuluft übertragen. Ähnliches passiert auf der Zuluftseite. Wird Trocknung/Regeneration gefordert, so wird zuerst das Sorptionsrad in Betrieb genommen und dann 10-15 Minuten später der Zuluftbefeuchter freigegeben. So steigt jedes mal, wenn die Anlage in Regenerationsbetrieb geht, zuerst die Zulufttemperatur um bis zu 6 K an, bevor sie dann unter die Außenlufttemperatur absinkt.

Bei relativ niedrigen Außentemperaturen von 22°C führt die Kombination von Abluftbefeuchter und dreistufigem Zuluftbefeuchter oftmals innerhalb von weniger als 30 Minuten zu einer Absenkung der Zulufttemperatur unter die zulässigen 17 °C.

Diese Steuerungsprobleme könnten vermieden werden, wenn die Reaktionszeiten der einzelnen Komponenten aufeinander abgestimmt werden würden. So sollte der Rotationswärmetauscher erst ca. 15 Minuten nach dem Abluftbefeuchter in Betrieb genommen werden und eine entsprechende Wartezeit für die Zu-/Abschaltung der nächsten Befeuchterstufe müsste eingefügt bzw. angepasst werden.

### 3.4 Energetische Auswertung am Beispiel Althengstett

Für die folgenden energetischen Auswertungen wurde die im vorigen Kapitel als Verfahren 2 bezeichnete Auswertung herangezogen, da damit aufgrund der längeren Auswerteziten (gegenüber Verfahren 1) zutreffendere Aussagen über die Gesamtenergiemengen erzielt werden können. Dabei werden sowohl die Werte angegeben, die unter Verwendung des HfT-Fühlers auf dem Dach ermittelt wurden

(Verfahren 2) als auch die Werte die sich unter Verwendung des Saja-Fühlers ergeben haben (Verfahren 2 Mod.). Die unter der Verwendung des HfT-Fühlers ermittelten Kälteleistungen sind aufgrund des festgestellten Strahlungseinflusses vermutlich höher als die tatsächlich erzeugte Kälteleistung der SGK-Anlage. Dahingegen wird bei der Auswertung mit dem Saja-Fühler die Kälteleistung für die "Vorkühlung" der Außenluft, die ja indirekt auch von der SGK-Anlage erbracht wird, nicht berücksichtigt. Die bei dieser Auswertung ermittelte Kälteleistung liegt daher vermutlich unter der tatsächlich erreichten Kälteleistung. Weiter besteht noch die systematische Abweichung von 2-3 K zwischen den beiden Fühlern. Mangels eines Referenzwertes kann jedoch nicht bestimmt werden, welcher Fühler zu welchem Anteil diese Abweichung verursacht. Geht man aber vom Mittelwert als dem wahrscheinlichsten Wert aus, so ist die mit dem HfT-Fühler ermittelte Kälteleistung wiederum als zu hoch und die mit dem Saja-Fühler ermittelte als zu niedrig anzusehen. Unter Berücksichtigung dieser Aspekte liegen die Mittelwerte der beiden Auswertungen wohl am nächsten an der tatsächlichen Kälteleistung.

In den sieben Monaten März bis September wurden insgesamt 25.160 kWh (Saja: 15.610 kWh / HfT: 34.710 kWh) Kälte produziert. Die dafür eingesetzte Heizenergie betrug 36.460 kWh. Daraus ergibt sich eine durchschnittliche Leistungszahl von 0,69. Ein großer Vorteil einer sorptionsgestützten Klimaanlage ist, dass Wärmeenergie nur bei vollem Regenerationsbetrieb erforderlich ist, aber nicht im reinen Verdunstungskühlungs-Betrieb. Wird die Heizenergie daher nur auf den Regenerationsbetrieb bezogen, beträgt die durchschnittliche Leistungszahl 0,37.

Volle Regeneration wird hauptsächlich in den Sommermonaten benötigt, in denen Kühlung durch reine Befeuchtung nicht ausreichend ist. In den warmen Monaten, in denen die Anlage überwiegend im Regenerationsbetrieb arbeitet, sind demnach die Gesamtleistungszahlen niedriger als in den kühleren Monaten, in denen überwiegend reine Verdunstungskühlung ausreichend ist. So waren zum Beispiel die Leistungszahlen im März (1,7) April (2,0), Mai (1,5) und im September (3,3), in denen überwiegend Verdunstungskühlung ausreichend war, deutlich höher als im Juni (0,4), Juli (0,7) und August (0,3).

Die niedrige Leistungszahl im Juni von 0,4 liegt jedoch hauptsächlich an einer Fehlfunktion des Abluft-Befeuchters. Dadurch konnte die geforderte Kältemenge nur unzureichend erzeugt werden und die Anlagensteuerung forderte über lange Zeit maximale Regenerationstemperaturen, was zu einem hohen Energieverbrauch führte. Im Juli waren die Probleme mit dem Abluftbefeuchter behoben und die Anlage funktionierte planmäßig. Im August war die Anlage aufgrund von Betriebsferien nur wenige Tage in Betrieb, und dann überwiegend in vollem Regenerationsbetrieb. Im September ist die durchschnittliche Leistungszahl mit 3,3 sehr hoch, auch bezogen auf vollen Regenerationsbetrieb liegt die Leistungszahl noch bei 1,1. Das ist allerdings darauf zurückzuführen, dass zu dieser Zeit die Nachheizung vom Betreiber der Anlage abgeschaltet wurde, mit dem Ergebnis, dass die produzierte Kälteleistung dennoch ausreichend war. Dies lässt vermuten, dass insbesondere bei "moderaten" Außenlufttemperaturen durch eine Reduzierung der Regenerationstemperatur große Mengen Energie eingespart werden können.

Während der gesamten sieben Monate wurde mehr als die Hälfte der Kälteenergie mit vollem Regenerationsbetrieb erzeugt, für den Rest war reine Verdunstungskühlung ausreichend. Von der insgesamt erforderlichen Wärmeenergie von 36.460

kWh wurden nur 6.996 kWh durch die Luftkollektoren gedeckt, weitere 9.557 kWh wurden durch die Abwärmenutzung von Produktionsmaschinen bereitgestellt und mehr als die Hälfte der erforderlichen Heizenergie wurde durch eine Nachheizung erzeugt. Ein großer Anteil an Solarenergie wurde für die Luftheizung einer alten Halle genutzt. Der gesamte genutzte Kollektorertrag von März bis September betrug 24.637 kWh.

Dabei ist ein interessanter Aspekt, dass ca. 15 % der Nachheizenergie bereits bei Außentemperaturen unter 20°C und ca. 42 % der Nachheizenergie bei Außentemperaturen zwischen 20 und 25°C angefallen sind. Obwohl die erforderliche Temperaturreduzierung bei diesen Außentemperaturen relativ gering ist, erfordert der Entfeuchtungsprozess dabei eine große Menge Energie. Für diese Bedingungen wäre eine konventionelle Nachkühlung deutlich effektiver. Ist eine Nachkühlung nicht möglich, so müsste zumindest die Anforderung der Regenerationstemperatur von der Anlagensteuerung auf ein Minimum reduziert werden (z.B. 50 °C).

#### 4. Optimierungspotential am Beispiel Althengstett

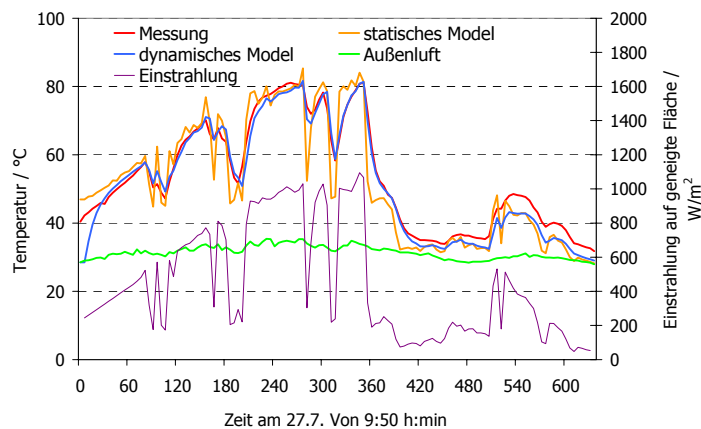
Die sorptionsgestützte Klimaanlage in der Fabrikhalle Althengstett ist in einem vollständigen Simulationsmodell abgebildet, so dass eine energetische Bewertung unterschiedlicher Regelungsstrategien und Kollektorfelddimensionierungen möglich ist. Durch die Simulationsrechnungen werden Wege zur Erhöhung des solaren Energieertrages aufgezeigt.

Die sorptionsgestützte Klimaanlage wurde für die energetische Auswertung mittels statischen Modellen für alle Komponenten außer dem Luftkollektor simuliert. Die verwendeten Wirkungsgrade der Komponenten wurden experimentell bestimmt und sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

	Mataró	Althengstett
Entfeuchtungswirkungsgrad	80	80
Befeuchtungswirkungsgrad	86	85
Wärmerückgewinnungsgrad	68	62

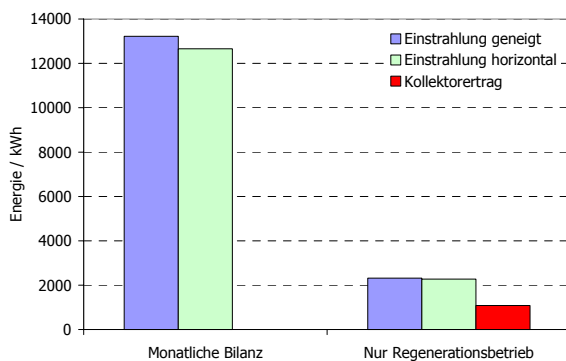
**Tab. 1:** Zusammenstellung der experimentell ermittelten Wirkungsgrade

Das dynamische Luft-Kollektor-Modell verwendet Nusselt-Korrelationen für die Beschreibung der laminaren oder turbulenten Strömungsverhältnisse. Weiter wird die Wärmekapazität der Kollektoren berücksichtigt. An einem sonnigen Tag mit schnell ziehenden Wolken kann die Genauigkeit des dynamischen Modells demonstriert werden. Der Kollektorstrom pro Feld beträgt 3.000 m<sup>3</sup>/h. Bei einer maximalen Einstrahlung von 1.000 W/m<sup>2</sup> werden Temperaturen von 80°C bzw. eine Temperaturerhöhung von 47 K erreicht. Wo das frühere statische Modell (ohne Berücksichtigung der Wärmekapazität) noch zu sehr hohen Temperaturgradienten bei wechselnder solarer Einstrahlung führte, kann das dynamische Modell die Reaktion des Kollektors sehr genau wiedergeben. Die Reaktionszeit für Temperaturänderungen liegt dabei bei ungefähr 15 Minuten.



**Abb. 9:** Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Luftkollektor-Temperaturen an einem Tag mit schnell ziehenden Wolken und hohen Strahlungsgradienten.

Der niedrige Kollektorertrag der Luftkollektoren von ungefähr 70 kWh/m<sup>2</sup>a wurde anhand des Monats Juli genauer analysiert, für welchen zu 83 % der Zeit Messdaten verfügbar sind. Von insgesamt 421 Betriebsstunden lief die Anlage 83 Stunden in vollem Regenerationsbetrieb, während 90 Stunden war eine reine Verdunstungskühlung ausreichend. Der dominante Betriebszustand war auch im Juli die freie Kühlung mit insgesamt 178 Betriebsstunden. Von den 83 Betriebstunden im vollen Regenerationsbetrieb, lieferten die Luftkollektoren während 53 Betriebsstunden, das

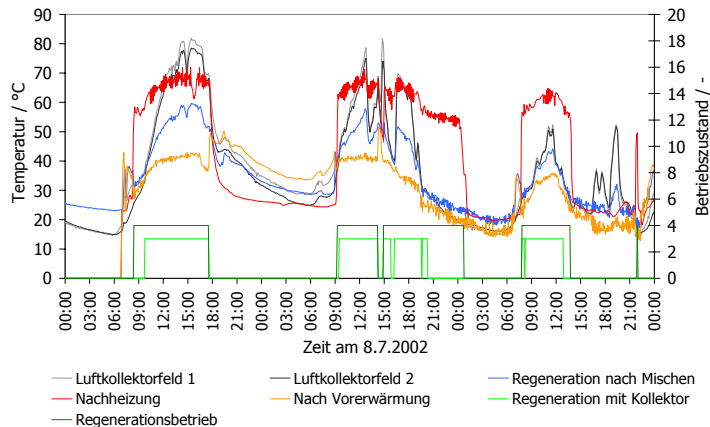


**Abb. 10:** Einstrahlung auf die Kollektorfläche und auf die horizontale Fläche im Juli und Energieertrag der Kollektoren während Regenerationsbetrieb

sind 64% der vollen Regenerationszeit, insgesamt 11 kWh/m<sup>2</sup> Wärme, was ungefähr der gleichen Wärmemenge entspricht, welche die Abwärmenutzung der Produktionsmaschinen liefert. In der übrigen Zeit war die Solarstrahlung nicht ausreichend, um die erforderliche Temperaturerhöhung von > 6 K zwischen Kollektoreintritts- und Kollektoroberflächentemperatur zu erreichen. Der mittlere Kollektorwirkungsgrad während des Kollektorbetriebs im Juli beträgt 48 %, was als gut zu beurteilen ist.

Bei näherer Betrachtung der Regelungsstrategie und der Zeiten mit Regenerationsbedarf, ist die zeitliche Reihenfolge und die Phasenverschiebung zwischen Regenerationsbetrieb und Verfügbarkeit solarthermischer Energie deutlich zu erkennen. Während dem Regenerationsbetrieb variieren die Regenerations Temperaturen typischerweise zwischen 60 und 70°C. Die zwei parallel geschalteten Kollektorfelder können diese Temperaturen an einem sonnigen Tag über nahezu 7 Stunden liefern. Da die Kollektoren aufgrund ihrer geringen Fläche jedoch nur von 55% des gesamten Regenerationsvolumenstroms durchströmt werden und die Abwärmenutzung von den Produktionsmaschinen nur Temperaturen von ca. 40°C liefert, erreicht der komplette Regenerationsvolumenstrom von 11.000 m<sup>3</sup>/h maximal

Temperaturen von knapp 60°C, wodurch fast immer Bedarf zur Nachheizung besteht.

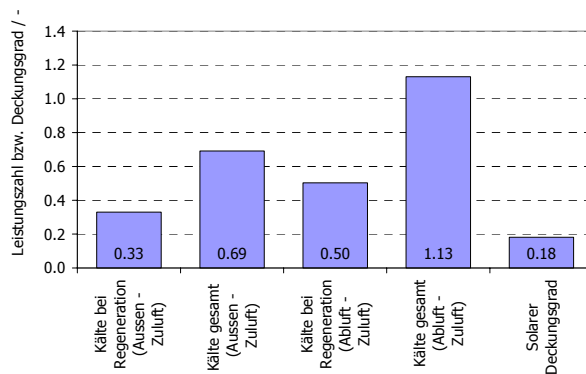


**Abb. 11:** Temperaturen im Regenerationsstrang nach Vorheizung mit Abwärme, Heizung durch Kollektoren, Mischung der zwei Volumensströme und Nachheizung. Weiter werden die Betriebsstunden mit Regeneration und Regeneration mit Kollektorbetrieb gezeigt

Durch die Vergrößerung des Kollektorfeldes könnte daher der Nachheizbedarf gesenkt werden. Ein weiterer Punkt ist der frühe Betriebsbeginn der Anlage, wenn die Luftkollektoren mangels Strahlung noch nicht die erforderlichen Temperaturen liefern können. Mit luftbasierten Systemen ohne Wärmespeichermöglichkeiten sind solche Probleme jedoch kaum zu verhindern. Eine Möglichkeit bestünde darin, dass zeitweilig ein Anstieg der Raumluftfeuchte akzeptiert wird, der später, wenn ausreichend Solarenergie zur Verfügung steht, wieder durch Regenerationsbetrieb reduziert wird. Um die solare Kälteenergie auch für spätere Betriebsstunden bis gegen Mitternacht zu nutzen, müsste die Speichermasse des Gebäudes selbst herangezogen werden.

Wird die vorhandene Kühllast bereits vorwiegend durch reine Verdunstungskühlung gedeckt, so werden die möglichen solaren Erträge in dieser Zeit nicht genutzt. Als Alternative dazu könnte bei vorhandener solarer Wärmeleistung immer eine Lufttrocknung durchgeführt werden und Feuchtelasten des Raumes im Vorhinein abgeführt werden. Die Feuchtespeicher des Raumes würden somit entladen, so dass anschließend, bei fehlender solarer Einstrahlung, zusätzliche Befeuchtungspotentiale entstehen.

Der solare Deckungsgrad für den Monat Juli ist mit 18% sehr niedrig. Die Leistungszahl für vollen Regenerationsbetrieb liegt bei 0,33, wenn die Kälteleistung aus der Enthalphiedifferenz zwischen Außenluft und Raumzuluft berechnet wird. Bezogen auf die Enthalphiedifferenz zwischen Raumabluft und -zuluft (Kühlleistung) steigt die Leistungszahl für Regenerationsbetrieb auf 0,50. Die Heizenergie bezogen auf die gesamte Raumkühlenenergie ergibt eine Leistungszahl von 1,13.



**Abb. 12:** Leistungszahlen für reinen Regenerationsbetrieb und für kompletten Kühlbetrieb, berechnet aus der Enthalpiedifferenz zu Außenluft und Raumabluft. Weiter ist der solare Deckungsgrad an der Gesamtheizleistung dargestellt.

## 5. Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden zwei sorptionsgestützte Klimaanlage mit solaren Luftkollektoren untersucht. Neben einer kurzen Anlagenbeschreibung wird die Regelungsstrategie der beiden Anlagen kurz erläutert.

Die maßgeblichen Funktionen der Anlagen werden dargestellt und die Kenngrößen sowohl der Einzelkomponenten als auch der Gesamtanlagen werden anhand der vorliegenden Messwerte bestimmt. Anhand der Auswertung der Messdaten aus Althengstett im Juli 2002 werden verschiedene Auswertungsansätze aufgezeigt und deren Einfluss auf die Ergebnisse diskutiert. Anhand dieses Beispiels wird auch gezeigt, wie „sensibel“ die Ermittlung von Leistungszahlen oder sonstigen Energiekenngrößen aus Messwerten sein kann.

Für die Anlage in Althengstett ergibt sich für die Kühlperiode 2002 eine produzierte Kältemenge von 25.160 kWh bei einer durchschnittlichen Leistungszahl von 0,69. In beiden Systemen erreichen die solaren Luftkollektoren gute Wirkungsgrade von bis zu 50 %, der sommerliche Energieertrag ist jedoch niedriger als ursprünglich erwartet. Dieses ist im Wesentlichen auf die geringen Regenerationszeiten zurückzuführen.

Weiter konnten durch die Simulation der Schaltzustände aller Anlagenkomponenten Optimierungsvorschläge der Regelung aufgezeigt werden, die zu einer Reduzierung des Hilfsenergieverbrauches von ca. 40 % führen würden. Der solare Deckungsanteil könnte durch Verdopplung der Kollektorfeldgröße um etwa 50 % gesteigert werden, die Kosten einer solchen Maßnahme wären jedoch aufgrund der relativ niedrigen Regenerationszeiten nicht wirtschaftlich. Zusammenfassend kann solare sorptionsgestützte Klimatisierung vor allem bei hohen Regenerationszeiten, d.h. Zuständen mit Zulufttrocknungsbedarf, wirtschaftlich betrieben werden. Nachheizsysteme führen jedoch oft zu unverträglich hohen Hilfsenergiemengen mit sehr niedrigen Leistungszahlen, vor allem bei relativ niedrigen Außentemperaturen. Eine Nachkühlung der Zuluft wäre hier deutlich energieeffizienter.

---

---

## Experience in operation and investigations of DEC plants: Optimisation of control strategies and energy analysis

Ursula Eicker, Uwe Schürger, Jürgen Schumacher  
Forschungszentrum nachhaltige Energietechnik zafh.net, Hochschule für Technik  
Stuttgart, Schellingstr.24, 70174 Stuttgart, email: ursula.eicker@hft-stuttgart.de

### Abstract

In this paper two adsorption cooling systems with solar air collectors are investigated. Beside a short description of the plants there are also short explanations of the control strategies.

The substantial functions of the plants are shown and the performance figures of the single components and the whole plants are determined by the monitored values. By the evaluation of the measured data in July 2002 two different evaluation procedures were shown and their influence on the outcomes are discussed. By this example it is also shown, that the determination of performance figures from measured data is very sensitive to deviations in measured data.

The plant in Althengstett produced in the cooling period 2002 altogether 25.160 kWh of cold with an average COP of 0,69. In both systems the solar air collectors reach good efficiencies up to 50 %, however, the solar fraction for regeneration in summer was less than originally expected. This is mainly caused by the short times with regeneration.

By the simulation of the operation modes of all components, optimisations of the control strategy can be suggested which will lead to a reduction of auxiliary energy of about 40 %. The solar fraction could be increased about 50 % by the doubling of the collector surface. However the costs for this proceeding won't be economic because of the short regeneration times.

Summarized solar powered adsorption cooling systems can operate economically, especially with long times of regeneration, i.e. with high demand of desiccation. Auxiliary heating often leads to high energy consumption even by low cooling demand. Therefore at low cooling demand an additional conventional cooling of the supply air would be much more energy efficient.

