

3.2 Solare Prozesswärme bei Lufttrocknungsprozessen in der Pharmaindustrie

Prof. Dipl.-Ing. Elmar Bollin
Clemens Bruder B. Sc.

Solar technologies applied for air dehumidification processes in pharmaceutical industries

Abstract

The following report informs about a specific treatment of process air in a pharmaceutical company. The air conditioning process is done with the help of an adsorption wheel. During the STAR1 pilot project, the air conditioning system has been extended to support the drying process of the adsorption wheel by using solar heat. A special vacuum-air-collector system has been installed and analyzed during a monitoring process.

Einleitung

Rund ein Drittel (2.529 PJ) der in Deutschland verwendeten Endenergie wird von der Industrie genutzt. [1]

Es gibt viele Industriebereiche in denen die Prozessluftaufbereitung eine wichtige Rolle spielt. Beispielhaft ist die Lebensmittel-, die Pharma- und die Halbleiterindustrie zu nennen. In all diesen Bereichen wird Luft mit bestimmten Konditionen benötigt, um Produkte präzise und unter Einhaltung aller Auflagen herstellen zu können. Die Luftaufbereitung ist meist mit einem großen Energieaufwand verbunden. Hierzu ist es erforderlich, Prozesswärme und/oder Prozesskälte zur Verfügung zu haben.

In Abbildung 3.2-1 ist die Aufteilung des Endenergieverbrauchs nach Anwendungsbereichen in der deutschen Industrie des Jahres 2008 dargestellt.

Im Jahr 2008 wurden in Deutschland rund 1.617 Petajoule (PJ) Endenergie für die Erzeugung von Prozesswärme benötigt. Dies sind rund 64 % des gesamten Endenergieverbrauchs in der Industrie.

Die Aufteilung der Energieträger zur Prozesswärmeerzeugung ist in Abbildung 3.2-2 dargestellt. Die Erzeugung der gesamten Prozesswärme erfolgte bisher nur zu 5 % (79,5 PJ) durch erneuerbare Energieträger. Der größte Anteil von rund 46 % (735,6 PJ) wurde bisher

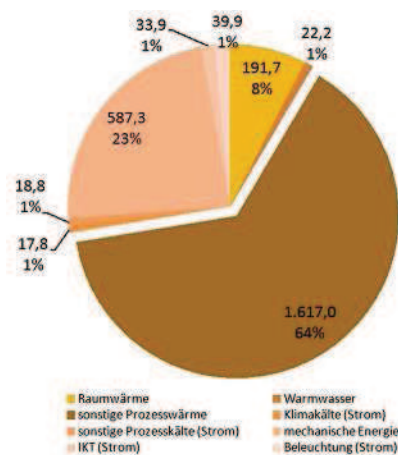


Abb. 3.2-1: Endenergieverbrauch in der deutschen Industrie (Jahr 2008). Aufteilung nach Anwendungsbereichen. Angaben in Petajoule (PJ) [1]

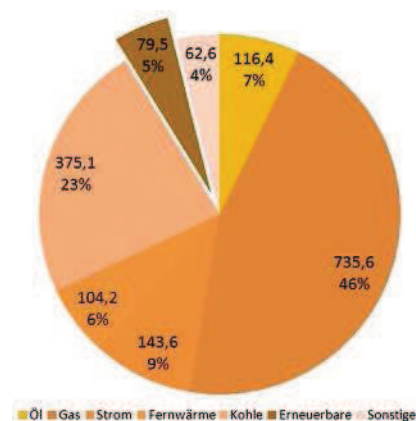


Abb. 3.2-2: Endenergieverbrauch in Deutschland (Jahr 2008) zur Erzeugung von Prozesswärme in der Industrie. Aufteilung nach Energieträgern. Angaben in Petajoule (PJ) [1]

durch den Energieträger Gas gedeckt. Um eine nachhaltige Energiewirtschaft zu betreiben, gilt es, sukzessive den erneuerbaren Anteil an Energieträgern auch bei der Erzeugung von Prozesswärme zu steigern. Um dieses Ziel zu erreichen, bedarf es neue Wege zu beschreiben. Meist beginnt dies mit der Erstellung von Pilotanlagen, die in einem betriebsbegleitenden Monitoringprozess analysiert und optimiert werden.

Prozessluftaufbereitung mit Adsorptionsrädern

Ein Adsorptionstrocknungsrad oder auch Sorptionsrad genannt, rotiert zwischen

zwei getrennten Luftkreisläufen. Dem Trocknungskreislauf (1) und dem Regenerationskreislauf (2). In Abbildung 3.2-3 ist das Prinzip des Adsorptionstrockners mit seinen Luftströmen dargestellt.

Mit Adsorptionsrädern kann die Prozessluft auf einen sehr niedrigen Wassergehalt von 1 g/kg tr. Luft entfeuchtet werden.

Trocknungskreislauf (Sorptions)

Die zu trocknende Prozessluft wird durch einen Ventilator in den Sorptions-trockner, bestehend aus einem Sorptionsrad, geleitet. Während des Durchströmens des Sorptionsrads gibt die

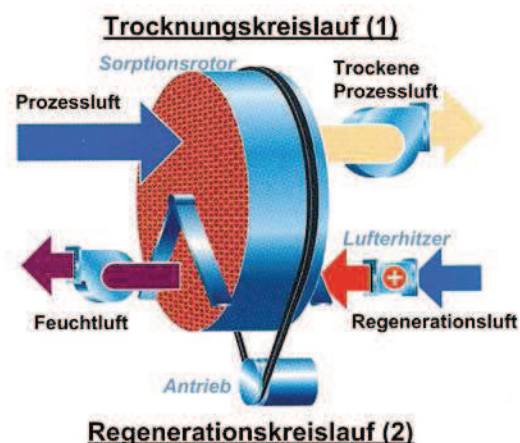


Abb. 3.2-3: Prinzip eines Sorptionstrockners. Grafik des Herstellers Munters [2]

Prozessluft ihre „Feuchtigkeit“ ab. Das Sorptionstrocknungsrad ist mit einer wabenförmigen Struktur aufgebaut. Es besteht aus zahlreichen axial verlaufenden Kanälen, durch die die Luft (Prozessluft und Regenerationsluft) strömen kann.

Als Sorptionsmedium wird häufig Silicagel oder Zeolith eingesetzt. Es befindet sich auf der wabenähnlichen Struktur. Durch den Strukturaufbau wird eine außerordentlich große Fläche für die Anlagerung (Adsorption) von Feuchtigkeit im Rotor erzeugt.

Das Sorptionsmedium zeigt seinen Vorteil in der großen chemischen Stabilität und dem großen hygroskopischen Verhalten. So wird erreicht, dass sich Wasser am Sorptionsmedium anreichern kann und zugleich sichergestellt, dass die Anreicherung von Wasser/Wasserdampf keine Zerstörung des Rotors zur Folge hat. Dabei ist die Beladung des Sorptionsmediums mit Wasser abhängig von der Wasserdampfkonzentration der Luft und der Temperatur.

Bei der Adsorption von Wasser wird Adsorptionswärme freigesetzt. Diese setzt sich aus der Kondensationswärme und der Bindungswärme zusammen. Diese Wärmeerzeugung hat zum Nachteil, dass sich die Temperatur der zu entfeuchtenden Prozessluft erhöht. Meist wird deshalb anschließend eine Kühleinheit zum Nachkühlen der Luft benötigt.

Durch die kontinuierliche Rotation des Rads wird das mit Wasser beladene Adsorptionsmedium auf die Regenerationsseite transportiert.

Regenerationskreislauf (Desorption)

Auf der Regenerationsseite wird heiße Luft mit einem Ventilator durch das mit Feuchtigkeit beladene Sorptionsrad geleitet. Die Temperatur der Regenerationsluft liegt je nach Anwendungsfall im Bereich zwischen 100 °C und 140 °C. Aufgrund der hohen Temperaturen findet

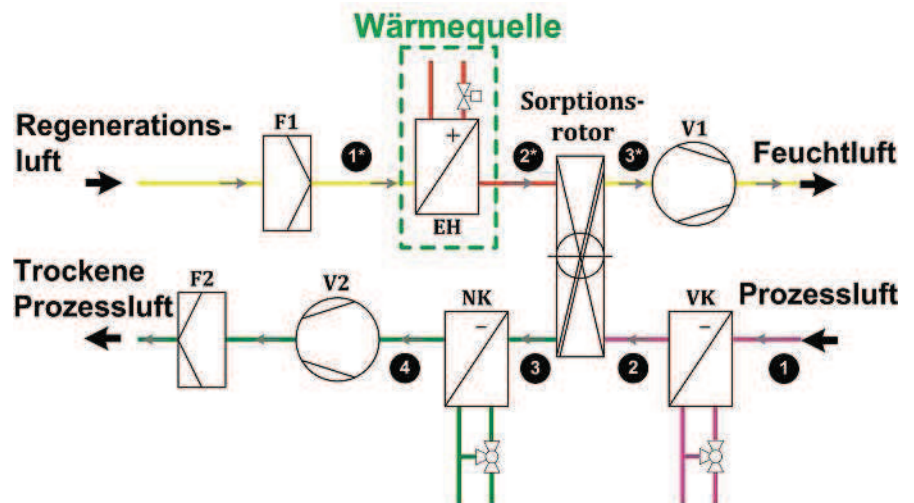


Abb. 3.2-4: Vereinfachtes Schema der Prozesslufttrocknung mit einem Adsorptionsrotor. Regenerationskreislauf oben, Trocknungskreislauf unten. Einsatz eines Dampferheizers (EH) zur Erwärmung der Regenerationsluft

eine Verdampfung des anhaftenden Wassers statt. Mit der Regenerationsluft wird der Wasserdampf aus dem Sorptionsrad abtransportiert. Das Sorptionsmedium ist nun wieder regeneriert und kann in einem weiteren Zyklus erneut Feuchtigkeit aus der Prozessluft aufnehmen.

Die hohen Regenerationslufttemperaturen verursachen eine starke Erwärmung des Sorptionsrads. Die kontinuierliche Rotation des Rades führt zu einem Wärmetransport auf die Prozessluftseite. Diese Art der Wärme wird in der Lüftungstechnik auch oft mit „Schleppwärme“ bezeichnet. Leider hat diese ungünstige Prozesslufte Erwärmung den Nachteil, dass meist eine Nachkühlleinheit (siehe Abbildung 3.2-4) benötigt wird.

Energiequelle für die Regenerationsluft

Für die Aufheizung der Regenerationsluft auf die hohe Regenerationstemperatur wird Wärme benötigt. In Abbildung 3.2-4 ist ein vereinfachtes Schema der Prozesslufttrocknung dargestellt. In dieser Abbildung ist die Wärmequelle zur Erhitzung der Regenerationsluft mit einer grünen Strichlinie hervorgehoben. Für die Wärmebereitstellung werden oft Elektro-

Dampf-, Heißwasser- oder Gaserhitzer eingesetzt. Die Wahl des Heizmediums hängt sehr von der Entfeuchtungsintensität und den Gegebenheiten vor Ort ab.

Bisher sind nur wenige Fälle bekannt, bei denen die Trocknungsenergie solar-gestützt erzeugt wird. Die Problematik liegt bei den Systemgrenzen. Für die Regeneration wird, wie bereits erwähnt, kontinuierlich eine hohe Regenerationslufttemperatur benötigt. Meist steht während der Betriebszeit nicht kontinuierlich Solarenergie zur Verfügung. So sind Systeme mit zwischengeschaltetem Speicher nötig. Die meisten solargestützten Systeme werden mit einem flüssigen Medium (Wasser Glykol) betrieben. Um letztlich die Regenerationsluft erhitzen zu können, wird ein Wärmeübertrager zwischen flüssigem Medium und Luft benötigt. Leider sind Systeme mit Speicher und Wärmeübertrager immer mit zusätzlichen Investitionen und thermischen Verlusten verbunden.

Mit einem direkten solarthermischen Luftsystem ist es möglich, ein speicherloses System aufzubauen und die thermischen Übertragungsverluste auf ein



Abb. 3.2-5: Vakuümrohrluftkollektorfeld der STAR1-Pilotanlage in Freiburg. Kollektoren des Typs Sun-Storm der Kollektorfabrik GmbH & Co. KG. Die Kollektoren sind horizontal (0°) auf dem Dach ausgerichtet. Die außenliegenden Luftkanäle sind isoliert

Minimum zu reduzieren. In Abbildung 3.2-5 ist das Kollektorfeld der STAR1-Anlage abgebildet. Zur Anwendung kommt ein Vakuumröhrenluftkollektorsystem.

Solare Luftherhitzung Vakuumröhrenluftkollektoren

Ein Kollektorfeld besteht aus einem zentralen gedämmten Aluminium-Profil (Abbildung 3.2-6).

In diesem befinden sich der Lufteinlass und ein durch eine Trennwand separierter Luftauslass. Die Vakuumröhren sind mit einem innenliegenden Aluminiumrohr durch das zentrale Aluminiumprofil miteinander verbunden. So besteht die Verbindung von der Einlassseite zur Auslassseite. Jede Vakuumröhre besteht aus zwei Borosilikatglasröhren mit hohen chemischen und schlagresistenten Eigenschaften. Die Außenseite der innenliegenden Glasröhre ist mit einer strahlungsabsorbierenden Beschichtung versehen. Zwischen Innenrohr und Außenrohr liegt ein Vakuum vor. Dieses Vakuum verhindert jeglichen Wärmeverlust (Wärmeleitung und Wärmekonvektion) vom inneren Rohr zum äußeren Rohr. Die Erwärmung der Luft geschieht folgendermaßen: Vom Lufteinlass strömt Luft in die erste Vakuumröhre und wird dort durch auftreffende Solarstrahlung erhitzt. Anschließend fließt die warme Luft durch das Aluminiumrohr auf die Auslassseite und wird dort zum zweiten Mal in der Vakuumröhre erhitzt. Die heiße Luft strömt danach zum Auslass. Vom Auslass strömt die heiße Luft auf direktem Weg zum Adsorptionsrad.

STAR1-Projekt

Im STAR1-Projekt wurde das bestehende Trocknungssystem mit einem Vakuumröhrensolarkollektorsystem erweitert. Der erste Schritt war die Durchführung einer Machbarkeitsanalyse. Aus der Bestandsaufnahme gingen die Systemgrenzen hervor. Für die Regeneration wird ein Regenerationsluftstrom von rund 1.500 m³/h benötigt. Die solar erzeugten Temperaturen müssen im Bereich von 120 °C liegen. Die benötigte thermische Leistung für die Regeneration beträgt 50 kW. Mit einer spezifischen Einstrahlung von $G = 1000 \text{ W/m}^2$ und einem Kollektorwirkungsgrad von rund 56 % ergibt sich eine benötigte Aperturfläche von rund 89 m².

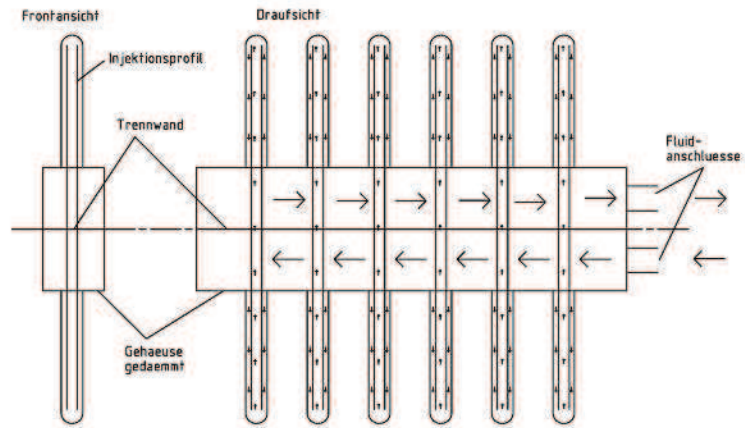


Abb. 3.2-6: Schema Vakuumröhrenluftkollektorfeld des Unternehmens Kollektorfabrik GmbH & Co. KG

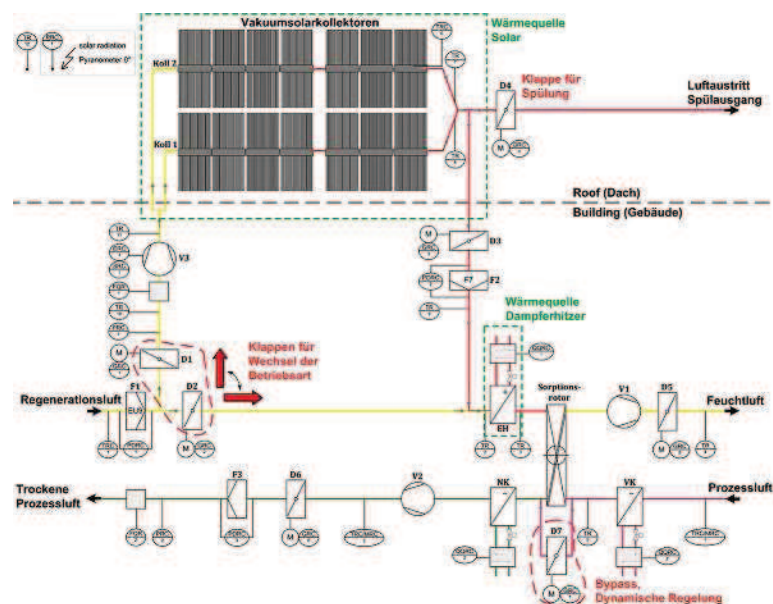


Abb. 3.2-7: Schema der STAR1-Pilotanlage zur solargestützten Prozesslufttrocknung. Schema enthält die Sensorik des Monitorings, die Sicherheitsvorrichtung „Spülausgang“, die Absorptionstrocknererweiterung Bypass und die Klappen zum Wechseln der Betriebsart

Aufgrund der örtlichen Gegebenheiten wurde das Kollektorsystem folgendermaßen dimensioniert:

- 14 Sun-Storm-Kollektoreinheiten (mit jeweils 50 Vakuumkollektorröhren)
- 2 parallele Stränge mit jeweils 7 Sun-Storm-Einheiten in Reihe
- Bruttokollektorfläche von 129 m²
- Aperturfläche von rund 77 m²
- Kollektorausrichtung horizontal

Das Kollektorsystem (Abbildung 3.2-5) besteht durch seine große Fläche und seine horizontal angeordneten Kollektoren. Das Arbeitsmedium Luft hat eine

geringere Wärmekapazität und Dichte als Wasser, sodass ein großer Luftvolumenstrom von 19,5 m³/h/m²-Kollektorfläche benötigt wird, um die Leistung abzuführen. Die Kollektortechnik ermöglicht eine einfache horizontale Installation und eine einfache Aufständigung der Kollektoren.

In Abbildung 3.2-7 ist das erweiterte Anlagenschema des Trocknungsprozesses dargestellt. Die Kollektoranlage wurde direkt in den Regenerationsluftstrom integriert. Aus dem Schema geht hervor, dass es ein direktes speicherloses System ohne separierten Solarkreislauf mit Wärmeübertrager ist. Für die Integration, Regelung, Sicherheit sowie das spätere betriebsbegleitende Anlagenmonitoring sind zusätzliche Sensoren (Temperatur, Volu-

menstrom, Druck, Strahlung) und motorisierte Klappen installiert worden. Das Messsystem ermöglichte es, ein detailliertes Prozessmonitoring durchzuführen.

Betriebsweise der Solaranlage

Das Kollektorsystem wird nur bei günstigen Konditionen dem Regenerationsbetrieb hinzugeschaltet. Das Startsignal wird über eine Hystereseabfrage mit Einbeziehung der Sensoren „TRC6“ (Kollektorausstrittstemperatur) und „TRC1“ (Eintrittstemperatur Regenerationsluft) generiert. Liegen aufgrund der Abfrage günstige Konditionen vor, beginnt aus Sicherheitsgründen eine 10-minütige Spülung des Kollektors. Luft wird über die Klappe D4 in die Umgebung abgegeben.

Anschließend erfolgt durch Klappenum-schaltung die Integration des Kollektorkreislaufs in den Regenerationsprozess des Adsorptionsrads.

Die Regenerationsluft wird primär über den Kollektorkreislauf erhitzt. Falls das benötigte Temperaturniveau noch nicht erreicht ist, wird zusätzlich über die sekundäre Wärmequelle Dampferhitzer nacherhitzt. So wird immer sichergestellt, dass die Mindesttemperatur zur Regeneration erreicht wird.

Typische Temperaturniveaus

Unter sehr guten Solarbedingungen werden bei dieser Anlage Lufttemperaturen am Kollektorausstritt von bis zu 150 °C erreicht. Die Messungen haben gezeigt, dass auch bei ungünstigen Bedingungen mit hohem diffusem Strahlungsanteil Kollektortemperaturen im Bereich von 80 °C bis 90 °C erzielt werden. Die zu erreichende Regenerationslufttemperaturen am Adsorptionsrad liegen bei dieser Anlage im Temperaturband von 100 °C bis 120 °C. Von Luftaustritt am Kollektor zu Lufteintritt am Adsorptionsrad liegt eine lange Luftkanalstrecke vor. Trotz isoliertem Kanal liegt aufgrund eines Wärmetransports an die Umgebung eine „ungewollte“ Abkühlung der solarerzeugten Lufttemperatur vor. Dennoch wird mit diesem System die benötigte Regenerationstemperatur am Adsorptionsrad erreicht.

Regelung der Prozessluftentfeuchtung

Die Solltemperatur der Prozessluft liegt bei 17 °C, die relative Sollfeuchte der Prozessluft liegt bei 15 %. Mit dem Dop-

pelsensor „TRC/MRC2“ wird der Ist-Zu-stand (rel. Feuchte und Temperatur) der getrockneten Prozessluft erfasst.

Die Regenerationstemperatur hat direkten Einfluss auf die Entfeuchtungsleistung des Adsorptionsrads. Bisherig wurde die Feuchte der Prozessluft dynamisch durch Reduktion oder Erhöhung der Wärmezufuhr am Dampferhitzer geregelt. Um eine Unterschreitung der Sollwertfeuchte und eine Überschreitung der Sollwerttemperatur (Schleppwärme) zu vermeiden, muss somit auf der Regenerationsseite eine sollwertabhängige Wärmemenge zur Desorption des Adsorptionsrads eingesetzt werden.

Mit der Systemerweiterung musste auch die Regelung verändert werden. Die zusätzliche solare Wärmequelle verändert aufgrund der Regelbarkeit und Regelstrecke die Dynamik des Systems stark. Die eingespeiste Wärmemenge der solaren Wärmequelle kann ohne weiteres nicht dynamisch reduziert werden. Deshalb wurde auf der Prozessluftseite eine Bypassklappe (siehe Abbildung 3.2-7) zur „Umgehung“ des Adsorptionsrads installiert. Ist nun die Prozessluft zu trocken oder die Prozesslufttemperatur zu hoch, wird die Bypassklappe geöffnet und feuchte, kühle Luft beigemischt, um den Sollwert der Prozessluft zu erreichen. Des Weiteren bestehen der alte Regelkreis zur Reduktion der eingespeisten Wärmemenge am Dampferhitzer und erstmals eine Regelung des Kollektorluftvolumenstroms. Diese Erweiterungen führen dazu, dass der Sollwert der Prozessluft jederzeit eingehalten werden kann.

Ziel des Monitorings

Das Hauptaugenmerk des sechsmonatigen Monitorings lag auf der Datener-

fassung und Optimierung des Kollektorbetriebs, um eine störungsfreie und energieeffiziente Prozesslufttrocknung leisten zu können. Die Pilotanlage wurde für den Kunden im Detail bewertet, so konnten die Vorteile und Nachteile festgehalten werden. Diese Erkenntnisse helfen bei weiteren vorgesehenen Vakuumkollektoranlagen, weitestgehend einen optimierten Systemaufbau zu erhalten. Um die Vermarktung solcher nachhaltiger Systeme voranzubringen, führt kein Weg an fundierten Messdaten vorbei. Denn ohne reale Messdaten kann die Bedeutsamkeit solcher Systeme nicht belegt werden.

Ausgewählte Monitoringergebnisse

Für die Bewertung des solaren Ertrags gilt es, die Betriebszeiten zu erwähnen. Die Adsorptionstrocknungsanlage ist täglich 16 Stunden in Betrieb (von 6:00 Uhr bis 22:00 Uhr).

In Abbildung 3.2-8 ist der Verlauf der Wärmeleistung des Solarsystems für den Monat Mai 2011 dargestellt. In der Spitze wurde eine thermische Leistung von rund 70 kW erzeugt. In Abbildung 3.2-9 ist das „negative Abbild“ der solaren Wärmeleistung, der Wärmeleistungsverlauf des Dampferhitzers dargestellt. Die Grafiken verdeutlichen, sobald unzureichend solare Trocknungsleistung vorhanden ist, wird der Dampferhitzer hinzugeschaltet.

In Abbildung 3.2-10 sind die gemessenen Energieflüsse des gesamten Monitoringzeitraums in einem Sankeydiagramm dargestellt. Über den Zeitraum von April bis einschließlich September 2011 lag eine eingestrahelte Solarenergie von 70176 kWh vor. Hiervon wurde mit dem Vakuumkollektorsystem eine Pro-

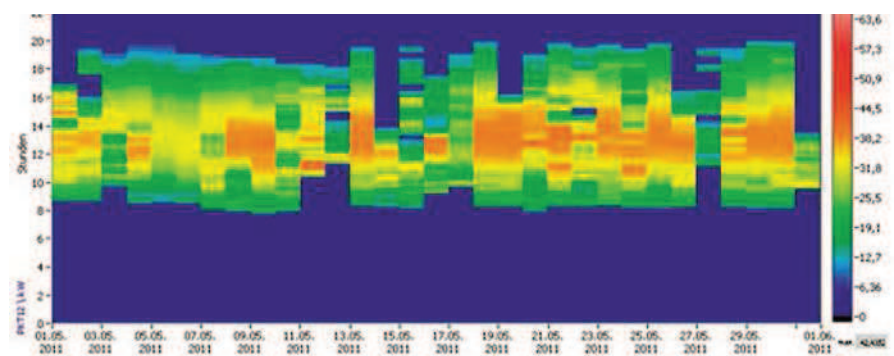


Abb. 3.2-8: Wärmeleistung des Solarsystems, Monat Mai 2011 (Carpet-Plot): Tag auf der x-Achse, Stunden auf der y-Achse, Leistungswerte farbig kodiert (0 kW blau, 70 kW rosa). Solarer Systemertrag im Mai 2011 bei 7.768 kWh

zesswärme von rund 45.853 kWh generiert. Abzüglich der Transportverluste wurde ein solarer Systemertrag von 39.632 kWh zur Regeneration des Adsorptionsrads erzielt. Dies entspricht einem beachtlichen solaren Nutzungsgrad von 56,5 % und einem spezifischen Solarertrag von 514 kWh/m² über den sechsmonatigen Monitoringzeitraum.

Mit dem Dampferhitzer wurde über den gesamten Monitoringzeitraum eine Wärmemenge von rund 50.944 kWh eingespeist. Insgesamt wurden 90.576 kWh thermische Energie zur Regeneration des Adsorptionsrads verwendet. Aus dem anteilsrelevanten solaren Systemertrag resultiert ein solarer Deckungsanteil von 43,8 %.

In Abbildung 3.2-11 sind die Energieflüsse der einzelnen Monate dargestellt. Im Jahr 2011 stach der Monat Mai mit seinen hervorragenden solaren Bedingungen hervor. Dort wurde ein solarer Deckungsanteil von 51 % erzielt. Im Monat September war ein größerer Anteil an diffuser Strahlung vorhanden. Die Messergebnisse zeigen dort einen überdurchschnittlich hohen solaren Nutzungsgrad von rund 64 %. Auch bei hohem diffusem Strahlungsanteil wird mit diesem Typ Kollektoren ein hoher solarer Systemertrag erzielt.

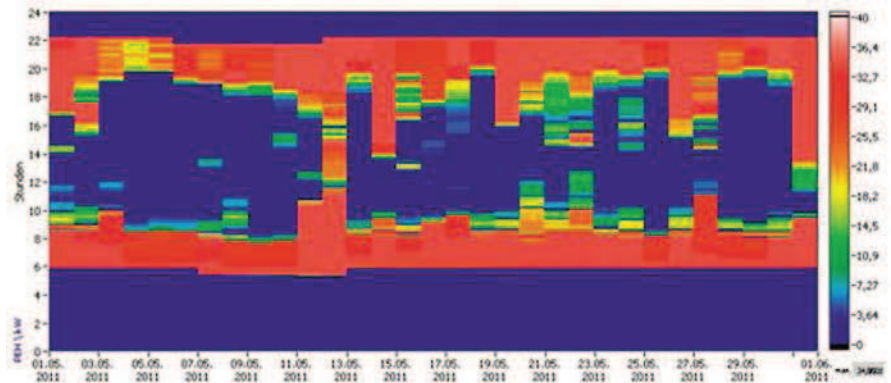


Abb. 3.2-9: Wärmeleistung des Dampferhitzers, Monat Mai 2011 (Carpet-Plot): Tag auf der x-Achse, Stunden auf der y-Achse, Leistungswerte farblich kodiert (0 kW blau, 40 kW rosa). Wärmeeintrag Dampferhitzer im Mai 2011 bei 7445 kWh

Zusammenfassung und Ausblick

Diese Pilotanlage hat gezeigt, dass es möglich ist, bestehende Trocknungssysteme mit verhältnismäßig wenigen Komponenten zu erweitern, um Prozesswärme solargestützt zu erzeugen und zugleich beachtliche regenerative Energieerträge zu erzielen. Aus dem betriebsbegleitenden Monitoring ging hervor, dass gerade die „Einfachheit“ des Systems zu einem zuverlässigen und störungsfreien Betrieb geführt hat.

Mit dieser Pilotanlage wurde somit der Grundstein gelegt, um weitere Lufttrocknungsanlagen in der Industrie auf solarer Basis zu erweitern oder gar Neubauten

von Lufttrocknungssystemen grundsätzlich mit Einbezug solcher solarer Systemkomponenten zu planen.

Bei Betrachtung des Standorts dieser Pilotanlage wird deutlich, dass diesem System in Ländern mit größerem solarem Einstrahlungspotenzial eine noch höhere Bedeutsamkeit zuteilwird.

Referenzen/References

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi): „Energiegewinnung und Energieverbrauch“, <http://www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Energie/Statistik-und-Prognosen/Energiedaten/energiegewinnung-energieverbrauch>. Zugriff: 16:10 Uhr 23.12.2011
- [2] Munters GmbH: „Das Munters-Prinzip-Grundversion“, <http://www.munters.de/upload/Case%20studies/Wurstreifung.pdf>. Zugriff: 16:20 Uhr 23.12.2011



Abb. 3.2-10: Energieflüsse der Pilotanlage im Sankeydiagramm. Energiedaten von April bis einschließlich September 2011

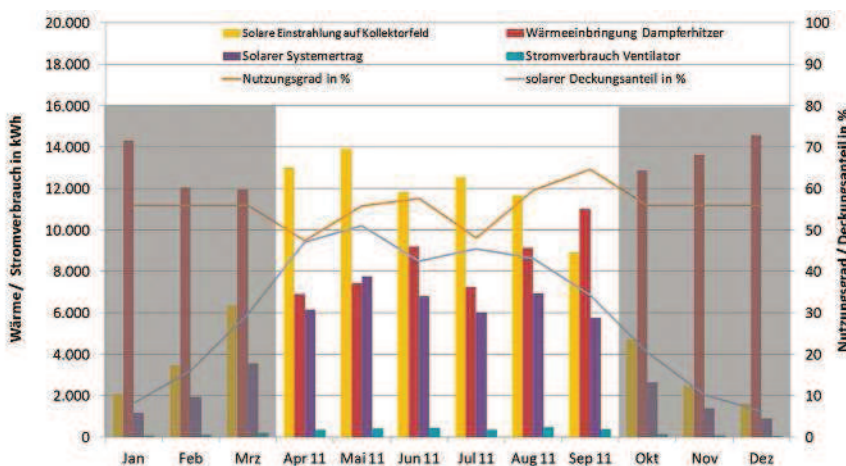


Abb. 3.2-11: Monitoring-Kennzahlen der STAR1-Pilotanlage 2011 (April bis September). Prognostizierte Werte grau hinterlegt. (Januar bis März und Oktober bis Dezember)
gelbe Säulen = solare Einstrahlung auf das Kollektorfeld,
dunkelblaue Säulen = Stromverbrauch,
hellblaue Säulen = Stromverbrauch des Ventilators,
rote Säulen = eingebrachte Wärmeenergie Dampferhitzer,
braune Kurve = Nutzungsgrad,
blaue Kurve = solarer Deckungsanteil