

SOLARE PROZESSWÄRME

Planungshilfe für die
solarthermische Prozesswärmeerzeugung



Solare Prozesswärme

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
Zweck und Gebrauch dieser Broschüre	1
Beispiele umgesetzter Projekte	2
Vorbereitende Maßnahmen	3
Rahmenbedingungen	3
Prozesscharakteristik	4
Standortentwicklung	5
Prozessoptimierung	5
Auslegung einer Solaranlage	6
Das Temperaturniveau	6
Das Wärmelastprofil	7
Vordimensionierung zum Simulationsstart	8
Die Systemsimulation	8
Nomogramme als Hilfsmittel der Systemauslegung	8
Das Anlagenkonzept	10
Vorwärmung von Warm- oder Heißwasser	10
Vorwärmung von Kesselzusatzwasser	12
Erwärmung industrieller Bäder	14
Konvektive Trocknung mit Heißluft	16
Betrieb und Wartung	18
Prozessanbindung	18
Stillstand	19
Betrieb eines solarthermischen Systems	19
Anlagenkosten und Fördermittel	20
Typische Systemkosten	20
Förderprogramme	20

Literaturhinweise und weitere Informationen

Impressum: 1. Auflage Dezember 2010
Gertec GmbH Ingenieurgesellschaft
Martin-Kremmer-Str. 12
45327 Essen
info@gertec.de · www.gertec.de

Autoren: Stefan Heß, Fraunhofer ISE, Freiburg (Europäische Version)
Axel Oliva, Fraunhofer ISE, Freiburg (Europäische Version)
Klaus-M. Kottsieper, Gertec GmbH, Essen (Regionale Version)

Diese Publikation basiert auf der Europäischen Version „Solar Process Heat Generation: Guide on Solar Thermal System Design for Selected Industrial Processes“, die vom Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE erstellt wurde. Die europäische Version ist verfügbar unter:
www.solar-process-heat.eu

Die alleinige Verantwortung für den Inhalt dieser Publikation liegt bei den Autoren. Sie gibt nicht unbedingt die Meinung der Europäischen Gemeinschaft wieder. Die Europäische Kommission übernimmt keine Verantwortung für jegliche Verwendung der darin enthaltenen Informationen. Das Projekt Solar Process Heat (SO-PRO) ist von der Europäischen Union im Rahmen des Programms „Intelligent Energy Europe“ zur Förderung der Etablierung von Solarthermienutzung in industriellen Prozessen aufgelegt worden. Das Energieministerium NRW unterstützt das Projekt in Nordrhein-Westfalen als Co-Finanzierer.



Einleitung

Während der europäische Markt für solarthermische Anlagen in privaten Haushalten und öffentlichen Einrichtungen stetig wächst, befindet sich die solare Prozesswärme noch in ihrem Anfangsstadium. Dabei ist das Potenzial enorm.

In Europa werden etwa 27% des Gesamtenergiebedarfs als Wärme in der Industrie verbraucht. Davon liegen rund 30% des Wärmebedarfs unter einem Temperaturniveau von 100°C und weitere 27% zwischen 100°C und 400°C [1]. Ein beträchtlicher Teil dieser Wärme kann mit solarthermischen Anlagen erzeugt werden.

Der Einsatz erneuerbarer Energien im industriellen und gewerblichen Sektor rückt immer stärker in den Fokus der Unternehmen. Die Energiepreisentwicklung, ein ge-

steigertes Umweltbewusstsein der Kunden und gesetzliche Vorgaben zur Energieeinsparung und CO₂-Reduktion zwingen die Unternehmen zum Umgang mit der Thematik. Die solare Prozesswärme kann dabei ein Baustein in einem unternehmensweiten Gesamtkonzept zur Steigerung der Energieeffizienz, zur Reduzierung der CO₂-Emissionen und zur nachhaltigen Senkung der Energiekosten sein. Viel versprechende Branchen sind die Getränke-, Textil- und Metallindustrie, der Bereich Oberflächenbehandlung aber auch die Papier- und Chemieindustrie [2]. Entscheidend für den Einsatz von Solaranlagen für Prozesswärme ist jedoch weniger die Branche als die individuellen Gegebenheiten in jedem einzelnen Unternehmen.

Zweck und Gebrauch dieser Broschüre

Diese Broschüre richtet sich vornehmlich an Planer, Installateure und Solarfirmen. Die Planungshilfen für die Einbindung solarthermischer Anlagen wurden für vier industrielle Prozessanwendungen ausgearbeitet:

- Erhitzen von Frischwasser für Reinigungsprozesse
- Vorwärmung von Kesselzusatzwasser für Dampfnetze
- Beheizen industrieller Bäder
- Konvektives Trocknen mit Heißluft in offenen Systemen

Diese Anwendungen wurden ausgewählt, da sie häufig in unterschiedlichen Industriesektoren vorkommen und ein großes Potenzial für solare Prozesswärme besitzen.

Dieser Leitfaden ist ein praxisorientiertes Dokument, das Informationen zur Einbindung von Solaranlagen für die oben genannten Anwendungen zur Verfügung stellt. Das Hauptziel ist, die Bereiche Prozesstechnik und Solartechnik zu verbinden – und nicht umfassende Planungsgrundlagen bereitzustellen.

Diese Broschüre bietet einen übersichtlichen Einblick in die ausgewählten Prozessanwendungen sowie in die Grundlagen der Solartechnik und erläutert in wenigen Schritten einen strukturierten Planungsansatz. Weiterführende Informationsquellen sind im letzten Kapitel (Literaturhinweise) aufgeführt.

Es gilt zu beachten, dass die beschriebenen Systemkonzepte und die simulierten Solarerträge nur für die vier speziellen Anwendungen gelten. Obwohl die ausgewählten Beispiele repräsentativ für die betrachteten Hauptanwendungsgebiete sind, unterscheidet sich der optimale Systementwurf durch die große Vielfalt von industriellen Prozessen und meteorologischen Standortbedingungen oft von diesen Beispielen.

Solare Prozesswärme

Beispiele umgesetzter Projekte

Schiffer GmbH & Co KG, Menden

Galvanische Oberflächenveredlung

Anwendung Warmwasser: galvanische Bäder
Temperaturniveau: 30 - 70 °C
Anlagentyp: Vakuumröhrenkollektoren
Kollektorfeld: 100 m²
Speichervolumen: 750 Liter
Solarer Deckungsgrad: 38% des Gesamtwärmebedarfs



Foto © SOTEC-SOLAR

Krimmer, Pulling

Produktion von Wildblumensamen

Anwendung Warmwasser: Trocknung von Blumensamen
Temperaturniveau: bis 35 °C
Anlagentyp: Flachkollektoren
Kollektorfeld: 150 m²
Speichervolumen: 42.000 Liter
Solarer Deckungsgrad: 95% des Gesamtwärmebedarfs



Foto © ZAE Bayern

Steinbach und Vollmann GmbH & Co. KG, Heiligenhaus

Schloss- und Beschlägeherstellung

Anwendung Warmwasser: Galvanische Bäder
Temperaturniveau: bis 80 °C
Anlagentyp: Vakuumröhrenkollektor
Kollektorfeld: 400 m²
Speichervolumen: direkte Wärmeabgabe an die Galvanikbäder
Solarer Deckungsgrad: 35% des Gesamtwärmebedarfs



Foto © Steinbach und Vollmann GmbH & Co. KG

Edmund Merl GmbH & Co. KG, Brühl

Feinkostherstellung

Anwendung Warmwasser: Spülung und Reinigung der Abfüllanlage
Temperaturniveau: bis 60 °C
Anlagentyp: Flachkollektor
Kollektorfeld: 568 m²
Speichervolumen: 30.000 Liter
Solarer Deckungsgrad: 40% des Gesamtwärmebedarfs



Foto © Priogo AG



Vorbereitende Maßnahmen

Vor der Auslegung einer solarthermischen Anlage sollten die folgenden Punkte analysiert werden:

- Örtliche Rahmenbedingungen
- Prozesscharakteristik und Wärmesystem
- Standortentwicklung (Umbau oder Erweiterung)
- Potenziale zur Effizienzsteigerung und Prozessoptimierung

Eine umfangliche Analyse der energetischen IST-Situation des Unternehmens ist entscheidend für den technischen und wirtschaftlichen Erfolg einer solaren Prozesswärmanlage.

Die Entscheidung für eine thermische Solaranlage sollte immer auf Grundlage eines umfassenden Energiekonzeptes getroffen werden.

Rahmenbedingungen

Als erster Schritt zur Prüfung der örtlichen Rahmenbedingungen kann die 'Checkliste für Unternehmen' [3] ausgefüllt werden. Die Checkliste ermöglicht eine erste Einschätzung, ob auf Grund von räumlichen und technischen Rahmenbedingungen eine solarthermische Anlage überhaupt in Frage kommt.

Fällt die Bewertung anhand der Checkliste positiv aus, wird als nächster Schritt eine Begehung der Anlage oder des Standortes durchgeführt. An dieser Begehung sollte ein erfahrener Techniker oder Ingenieur teilnehmen, der die Produktionsprozesse und die Liegenschaft kennt.



Foto © Priogo AG

Es werden folgende Schritte empfohlen:

- Anfertigung einer Skizze des/der Gebäude(s) mit den Grunddaten, wie z.B. Abmaße der verfügbaren, unverschatteten und zugänglichen Dachflächen und ihre Orientierung, Neigung und Zugänglichkeit für Kräne, Informationen über die Statik (falls vorhanden), etc.
- Grobberechnung der zugänglichen und unverschatteten Dachfläche für das Kollektorfeld, der verfügbaren Fläche für Pufferspeicher und andere Installationen sowie der Distanz vom Pufferspeicher zum Kollektorfeld und zu den unterstützten Prozessen sowie Übertragung dieser Daten in die Skizze bzw. in einen Lageplan.
- Abstimmung mit dem Auftraggeber hinsichtlich gesetzlicher Anforderungen und Bestimmungen für die Errichtung einer Solaranlage (z.B. Bewilligungs-/ Anzeigepflichten).

Solare Prozesswärme

Prozesscharakteristik

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus der Ortsbegehung werden die thermischen Prozesse in offene und geschlossene sowie kontinuierliche und diskontinuierliche Prozesse unterteilt. Besonderes Augenmerk gilt den offenen Prozessen, die keine Wärmerückgewinnung besitzen, aber kontinuierlich betrieben werden. Diese Prozesse haben häufig das größte Potenzial für die Integration einer Solaranlage.

Ein entscheidender Erfolgsfaktor für die Integration einer Solaranlage liegt in den vorherrschenden Temperaturen im System. Benötigt werden möglichst niedrige Temperaturniveaus innerhalb der Prozesse, um Solarenergie effektiv einzubinden. Solare Prozesswärme kann dabei den Prozessen direkt oder über das bestehende Wärmeverteilnetz zugeführt werden. Die nachstehenden Schritte sollten im Zuge einer Voruntersuchung Beachtung finden:

- Erstellung eines Überblicks über alle thermischen Prozesse im Unternehmen, um die Möglichkeit einer Kopplung mit einer solarthermischen Anlage zu überprüfen. Prozess-Schemata sind sehr hilfreich, um die Massen- und Energieflüsse besser zu verstehen. Der Gesamtwärmebedarf des Unternehmens sollte auf die einzelnen Prozesse aufgeteilt werden.
- Sammlung verfügbarer Daten über den Wärmebedarf der relevanten Prozesse. Die wichtigste Information sind die Temperaturniveaus der Prozesse (mittlere Ein- und Austrittstemperaturen), die einen signifikanten Anteil der Wärme benötigen. Zu beachten sind insbesondere Prozesse mit sehr geringen Temperaturniveaus. Über thermische Lastprofile der Prozesse, die zumindest auf einer jahreszeitlichen Basis vorliegen sollten, lässt sich die jährliche Menge benötigter Wärmeenergie feststellen. Vorzuziehen ist jedoch die Erstellung eines Lastprofils auf Grundlage von Messungen oder kontinuierlichen Zählerablesungen.
- Weitere Informationen sind die Art des Heizsystems, die derzeit verwendeten Energieträger (Gas, Öl, Strom, etc.), der Energiepreis und eine grobe Einschätzung des Wirkungsgrads des vorhandenen Heizsystems.

Standortentwicklung

Im Zuge der Untersuchung sollte mit den Verantwortlichen die zukünftige Entwicklung des Standortes oder der Prozessanlagen erörtert werden.

Neue oder veränderte Prozessabläufe, eine Erweiterung der Produktion oder ein Umbau der gesamten Liegenschaft können signifikanten Einfluss auf die Effizienz und damit auf die Wirtschaftlichkeit der solaren Prozesswärmeanlagen haben. Darüber hinaus können die Kosten für eine Solaranlage deutlich reduziert werden, wenn die Installation gemeinsam mit anderen Umbaumaßnahmen erfolgt.





Prozessoptimierung

Die Prozessoptimierung in Form einer Reduzierung des Wärmebedarfs hat in vielen industriellen Bereichen ein hohes wirtschaftliches Potenzial. Die Umsetzung solcher Maßnahmen ist jedoch besonders komplex, da diese auch Auswirkungen auf den Produktionsprozess haben können. Wird eine Modernisierung der Produktionsanlagen, ein Austausch alter Wärmeerzeuger oder eine thermische Prozessoptimierung in Betracht gezogen, müssen diese Maßnahmen bei der Planung einer solarthermischen Anlage berücksichtigt werden.

Ein besonderer Aspekt der Prozessoptimierung ist die Wärmerückgewinnung. Im Zuge einer ersten Untersuchung sollten die folgenden Fragen beantwortet werden:

- Gibt es bereits Wärmerückgewinnungsmaßnahmen und was ist diesbezüglich geplant?
- Gibt es Heißwasser oder ein anderes Prozessmedium, das als 'Abfallprodukt' anfällt?
- Wenn Dampf als Transportmedium genutzt wird, gibt es bestehende Kreisläufe mit Kondensatrücklauf?
Falls ja, gibt es Maschinen, die einen Teil des Dampfes direkt nutzen?
- Gibt es Prozesse, bei denen Wärmerückgewinnung technisch und wirtschaftlich ausgeschlossen werden kann?

Leistung, Wirtschaftlichkeit und Zuverlässigkeit der Solaranlage hängen sehr stark von einer ausführlichen Analyse der Prozesscharakteristik und einer fundierten Überprüfung der Optimierungsmaßnahmen ab. Eine sorgfältige Ausführung der oben angeführten Vorbereitungsmaßnahmen stellt eine gute Basis für den wirtschaftlich sinnvollen Einsatz solarthermischer Anlagen zur Prozesswärmeerzeugung dar.

Weiterführende Informationen zu Methoden, mögliche Energieeffizienzmaßnahmen auch in Verbindung mit Solarthermie zu bewerten, finden sich in [4] und [5].



Foto © Priogo AG

Solare Prozesswärme

Auslegung einer Solaranlage

Im vorangegangenen Kapitel wurden allgemein die notwendigen Schritte erläutert, um bei der Planung einer Solaranlage die individuellen Charakteristika und Anforderungen des Industriebetriebs und der thermisch unterstützten Prozesse angemessen zu berücksichtigen.

Im Zug der Konzeptentwicklung sind nach der Analyse und Darstellung des Ist-Zustandes die thermischen Prozesse und das Wärmenetz auf mögliche Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz zu prüfen. Dies beinhaltet sowohl die energetische Optimierung der thermischen Prozesse, als auch die Nutzung von Abwärme.

Wenn die Umsetzung dieser Maßnahmen realisiert oder zumindest sorgfältig geprüft wurde, können auf Basis der dann vorliegenden Temperaturniveaus und Massenströme geeignete Stellen zur Einbindung der Solarthermie (Integrationsstellen) ermittelt werden.

Das Temperaturniveau

Wichtig für die Einbindung der Solaranlage ist das Temperaturniveau; es sollte so gering wie möglich sein. Die Eintrittstemperatur für den Wärmetauscher sollte immer unter 90°C liegen, wirtschaftlich optimal sind Temperaturen unter 50°C. Die Planung einer Solaranlage sollte bei dem niedrigsten Temperaturniveau ansetzen und einen hohen Temperaturhub zum Ziel haben. Je geringer die solar bereitzustellende Temperatur und damit die mittlere Temperatur im Solarkreis, desto höher ist der solare Ertrag der Kollektoren.

Das Wärmelastprofil

Neben dem Temperaturniveau spielen vor allem der zeitliche Anfall und die Höhe des Wärmebedarfs (Lastprofil) eine entscheidende Rolle bei der Bewertung einer möglichen Integrationsstelle. Es wird empfohlen, die genauen thermischen Lasten an den in Frage kommenden Integrationsstellen frühzeitig messtechnisch zu ermitteln. Für die weitere Planung sollte ein Tages-, Monats- und Jahresprofil für die thermischen Lasten der zu unterstützenden Prozesse erstellt werden.

Vordimensionierung zum Simulationsstart

Bei Solarkollektoren wird zwischen der Brutto-Kollektorfläche und der Aperturfläche unterschieden. Die Brutto-Kollektorfläche ist das Produkt der Außenabmessungen des Kollektors (Länge x Breite). Die Aperturfläche (Index: A_{Ap}) ist die Fläche, durch welche die solare Einstrahlung in den Kollektor und auf den Absorber trifft. In der Regel beziehen sich alle spezifischen Kollektorwerte auf die Aperturfläche. Für eine erste Abschätzung der erforderlichen Kollektorfläche (A_{Ap}) können die folgenden beiden Ansätze herangezogen werden:

- Ist die zur Verfügung stehende Dach- bzw. Aufstellfläche begrenzt, so wird die mögliche Kollektorfläche mit 500 kWh/m² multipliziert und das Ergebnis durch den thermischen Energiebedarf geteilt. Der dadurch ermittelte solare Deckungsgrad sollte weniger als 60 % betragen.
- Stehen mehr Flächen als benötigt zur Verfügung, werden ca. 40 % des jährlichen Wärmebedarfs durch 500 kWh/m² geteilt und damit die mögliche Kollektorfläche ermittelt.

Bei der Auslegung sollte von einem Kollektorneigungswinkel von 30° - 35° ausgegangen werden. Bei Installation auf einem Flachdach ist auf Grund der gegenseitigen Verschattung der Kollektoren die zur Verfügung stehende Dachfläche durch 2,5 zu teilen, um die mögliche Kollektorfläche zu ermitteln. Eine Abweichung aus der Süd-Richtung von weniger als 20° hat in der Regel keinen signifikanten Einfluss auf die Kollektorleistung.

Für eine erste Auslegung kann ein benötigtes Speichervolumen mit ca. 50 l/m² Kollektorfläche zu Grunde gelegt werden. Das optimale Speichervolumen hängt stark von der Korrelation zwischen den solaren Gewinnen und dem thermischen Belastungsprofil des Prozesses ab. Bei Unternehmen, die am Wochenende nicht arbeiten, sollte der Speicher in der Lage sein, die solaren Gewinne des Wochenendes zu puffern. Zu kleine Speichervolumen führen teilweise zu ineffizient hohen Kollektortemperaturen und zum Stillstand der Anlage.



Praxisbeispiel für die Vordimensionierung

Bei dem nachfolgenden Beispiel handelt es sich um eine in zwei Schichten arbeitende Firma aus der Lebensmittelbranche mit diskontinuierlichem Lastprofil des Warmwasserbedarfs. An einem Arbeitstag herrscht ab 5.30 Uhr ein gewisser konstanter Bedarf an Warmwasser, da um diese Zeit eine Produktionsstraße anläuft, in der automatisiert Behälter gereinigt werden.

Vor Arbeitsende, also zwischen 20 und 22 Uhr, findet eine manuelle Generalreinigung der Produktionsstraße und der umgebenden Produktionshalle statt, so dass hier größere Mengen Warmwasser benötigt werden. An Wochenenden, während der letzten und der ersten Jahreswoche sowie im August wird nicht gearbeitet.

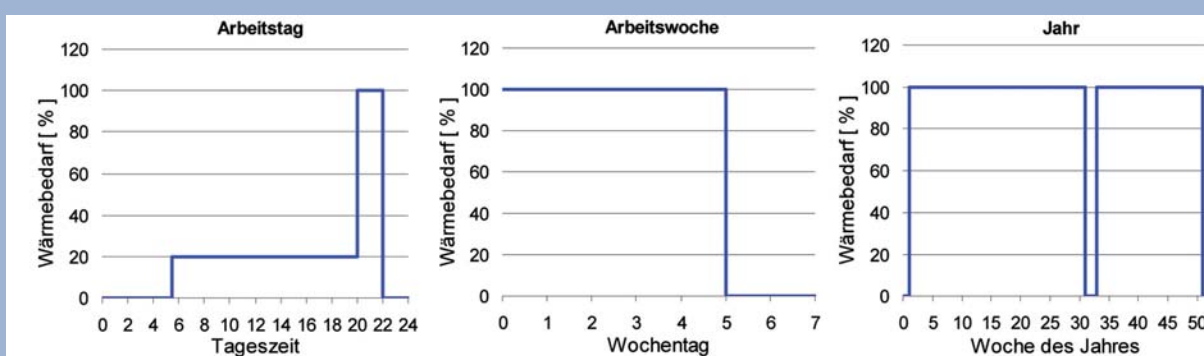


Abbildung 1: Diskontinuierliches Lastprofil des Bedarfs an Warmwasser zu Reinigungszwecken

Bei einem gemessenen Bedarf von täglich 10 m^3 Warmwasser mit einer Temperatur von 60°C und einer konstanten Kaltwassertemperatur von 15°C berechnet sich

der Energiebedarf für die Erwärmung des Wassers ohne Verluste und ohne exakte Berücksichtigung der Wasserdichte wie folgt:

$$Q_{\text{Tag}} = m_{\text{Tag}} \cdot \bar{c}_p \cdot \Delta T \approx (10.000 \text{ kg} \cdot 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 45\text{K}) / 3.600 \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}} = 522,5 \text{ kWh}$$

Q_{Tag} = thermischer Energiebedarf zur Erzeugung des Warmwassers pro Arbeitstag

m_{Tag} = Masse des pro Tag erwärmten Wassers

\bar{c}_p = mittlere spezifische Wärmekapazität des Warmwassers

ΔT = Differenz zwischen Kaltwasser- und Warmwassertemperatur

Der Gesamtbedarf von 10 m^3 ist wie folgt über den Tag verteilt: Zwischen 5.30 Uhr und 20 Uhr = 14,5 Stunden treten nur 20 % der Maximallast auf. Das bedeutet, dass für gewöhnlich ca. 408 l/h mit 60°C (oder $21,3 \text{ kWh/h}$) während der Produktion verbraucht werden. Zwischen 20 Uhr und 22 Uhr werden 2.040 l/h (oder $106,5 \text{ kWh/h}$)

benötigt. Unter Berücksichtigung der Wochenenden und der Ferien errechnet sich ein thermischer Energiebedarf dieses Reinigungsprozesses von $122,8 \text{ MWh/Jahr}$ sowie ein durchschnittlicher Tagesbedarf von ca. $6,44 \text{ m}^3$ Wasser. Für die Abschätzung der Kollektorfläche und des Speichervolumens gilt folglich:

$$A_{\text{Ap}} = (Q_{\text{Jahr}} \cdot 0,4) / 500 \cdot \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2_{\text{Ap}}} = (122,8 \text{ MWh} \cdot 0,4) / 500 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2_{\text{Ap}}} \approx 100 \text{ m}^2_{\text{Ap}}$$

$$V_{\text{Sto}} = A_{\text{Ap}} \cdot 50 \frac{\text{l}}{\text{m}^2_{\text{Ap}}} = 100 \text{ m}^2_{\text{Ap}} \cdot 50 \frac{\text{l}}{\text{m}^2_{\text{Ap}}} \approx 5 \text{ m}^3$$

A_{Ap} = Kollektor-Aperturfläche für den Simulationsstart

V_{Sto} = Speichervolumen für den Simulationsstart

Solare Prozesswärme

Die Systemsimulation

Die bisher beschriebenen Methoden dienen einer ersten groben Anlagenauslegung, die teilweise schon während eines ersten Ortstermins durchgeführt werden kann. Die auf diese Weise errechneten Werte sind der Ausgangspunkt für eine detaillierte Simulation des Anlagenkonzeptes. Die Durchführung einer Simulation mit einer

geeigneten Software wird empfohlen, um das Zusammenwirken der vielfältigen Einflussfaktoren angemessen zu berücksichtigen. Die Kollektorart, die Kollektorgroße, das Pufferspeichervolumen und die Einbindung in ein bestehendes System sind einige Aspekte, die im Zuge einer Simulation berücksichtigt werden müssen.

Nomogramme als Hilfsmittel zur Systemauslegung

Jedes der in den folgenden Kapiteln gezeigten Auslegungs-Nomogramme stellt Simulationsergebnisse für eine Fülle unterschiedlicher Varianten eines Solarsystems zur Unterstützung eines bestimmten Prozesses dar. Dabei werden nur Kollektorfläche und Speichervolumen des Solarsystems variiert, das Systemkonzept und die individuellen Rahmenbedingungen des Prozesses wie Standort, Lastprofil und Temperaturhub bleiben konstant.

Weil ausschließlich spezifische Kennwerte dargestellt werden, sind die Nomogramme komplett skalierbar. Dies bedeutet, dass solarer Deckungsgrad und spezifischer Systemertrag für bestimmte Verhältnisse von

thermischer Last zu Kollektorfläche und Speichervolumen dargestellt werden können, da sie von den absoluten Werten dieser Parameter unabhängig sind.

Die dargestellten Nomogramme sind für individuelle Anwendungsfälle erstellt worden. Sie reichen nicht aus, um generell Solarsysteme für diese Anwendungen auszulegen. Sie können aber ein gutes Hilfsmittel sein, um bei ähnlichen Anwendungen und Rahmenbedingungen Tendenzen aufzuzeigen, Startpunkte für die Simulationen zur Dimensionierung von Kollektorfläche und Speichervolumen zu finden und die Anzahl der simulierten Varianten zu reduzieren. Abb. 2 zeigt ein solches Auslegungs-Nomogramm für den beschriebenen Reinigungsprozess.

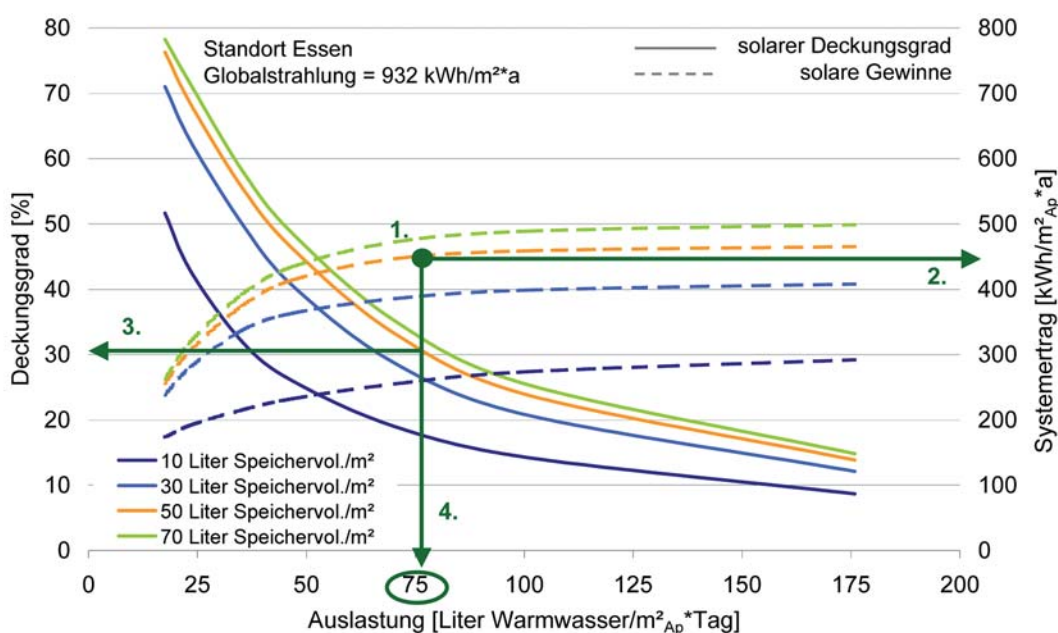


Abbildung 2: Nomogramm zur Auslegung eines Solarsystems zur Erwärmung von Warmwasser; diskontinuierliches Lastprofil, Temperaturhub von 15°C auf 60°C, Flachkollektor mit 35° Neigung



Anwendung der Nomogramme

Die Nomogramme können auf verschiedene Arten angewendet werden. Im Folgenden wird eine mögliche Vorgehensweise mit den Werten aus dem Praxisbeispiel von Seite 7 beschrieben:

- Ausgehend von einem spezifischen Speichervolumen von $50 \text{ l/m}^2_{\text{Ap}}$ wird ein Punkt auf der gestrichelten Kurve gewählt (1), an dem hohe solare Systemgewinne ($2:450 \text{ kWh/m}^2\text{*a}$) und auf der durchgezogenen Linie ein signifikanter solarer Deckungsgrad ($3:31\%$) ausgewiesen wird.
- Ausgehend vom gemittelten Tagesbedarf errechnet sich die notwendige Kollektor-Aperturfläche mit Hilfe der Auslastung ($4:75 \text{ l/m}^2_{\text{Ap}}\text{*Tag}$).
$$\text{Aperturfläche} = (6.440 \text{ l/Tag}) / (75 \text{ l/m}^2_{\text{Ap}}\text{*Tag}) = 86 \text{ m}^2_{\text{Ap}}$$
- Für das vorgenannte Beispiel berechnet sich das notwendige Speichervolumen wie folgt:
$$\text{Speichervolumen} = 50 \text{ l/m}^2_{\text{Ap}} * 86 \text{ m}^2_{\text{Ap}} = 4.300 \text{ l}$$
- Der Energiegewinn der Solaranlage lässt sich entweder ausgehend vom spezifischen Solarertrag oder vom solarer Deckungsgrad errechnen.
$$\text{Jahresertrag} = 450 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{Ap}}\text{*a}) * 86 \text{ m}^2_{\text{Ap}} = 38,7 \text{ MWh/a}$$
$$\text{Jahresertrag} = 122,8 \text{ MWh/a} * 31\% = 38,1 \text{ MWh/a}$$
- Durch die Variation der Parameter kann das Anlagenkonzept entsprechend den Prioritäten des Kunden angepasst und optimiert werden:

Wenn z.B. 64 m^2 Kollektorfläche (Auslastung $100 \text{ l/m}^2_{\text{Ap}}\text{*Tag}$) mit $50 \text{ l/m}^2_{\text{Ap}}$ Speichervolumen installiert werden, kann der solare Gewinn auf $460 \text{ kWh/m}^2_{\text{Ap}}\text{*a}$ steigen. Der solare Deckungsgrad sinkt jedoch auf 25% .

Wenn bei einer Kollektorfläche von $86 \text{ m}^2_{\text{Ap}}$ das Speichervolumen auf $70 \text{ l/m}^2_{\text{Ap}}$ erhöht wird, steigt sowohl der solare Gewinn auf $480 \text{ kWh/m}^2_{\text{Ap}}\text{*a}$ als auch der solare Deckungsgrad auf 33% an.

Interpretation der Nomogramme

Aus dem Nomogramm ergeben sich einige grundlegende Schlussfolgerungen:

- Größere solarthermische Anlagen haben geringere Nutzungsgrade. Der solare Deckungsanteil für diese Systeme ist sehr hoch, die spezifischen solaren Gewinne pro m^2 sind jedoch gering, was die Wirtschaftlichkeit dieser Systeme verringert. Außerdem besteht bei großen Solaranlagen die Gefahr von Stillstandszeiten an Wochenenden oder zu Zeiten mit geringem Wärmebedarf.
- Kleinere solarthermische Anlagen weisen hohe Nutzungsgrade auf. Die spezifischen solaren Gewinne sind hoch, da der Wärmebedarf immer viel höher als die Leistung der Solaranlage ist.

Andererseits ist hier der solare Deckungsanteil gering. Dies kann ebenfalls die Wirtschaftlichkeit verringern, falls der Planungsaufwand und die Prozessanalyse einen bedeutenden Anteil an den Kosten der solarthermischen Anlage hat. Geringe solare Deckungsanteile helfen nur bedingt die Energiekosten des Unternehmens zu verringern und das herkömmliche Heizsystem zu entlasten.

- Bei kleinen, spezifischen Speichervolumen besteht die Gefahr von längeren Stillstandszeiten und hohen Arbeitstemperaturen im Kollektorkreislauf. Dadurch reduziert sich der Wirkungsgrad des Kollektors. Sie sollten nur angewendet werden, wenn der solare Deckungsanteil vergleichsweise gering und das Lastprofil ziemlich kontinuierlich (z.B. Wärmebedarf auch an den Wochenenden, kein Betriebsurlaub) ist.
- Hohe spezifische Speichervolumen führen zu höheren solaren Gewinnen und besseren solaren Deckungsanteilen. Häufig ist ein Speichervolumen von mehr als $50 \text{ l/m}^2_{\text{Ap}}$ nicht notwendig, besonders da durch den Pufferspeicher die Kosten und der Platzbedarf steigen. Zu große Pufferspeicher haben ein zu geringes Temperaturniveau, um den Prozess zu unterstützen, so dass in manchen Fällen der Nacherhitzer öfter in einem ineffizienten Teillastbereich betrieben wird als bei Systemen mit einem kleineren Speicher.

Solare Prozesswärme

Das Anlagenkonzept

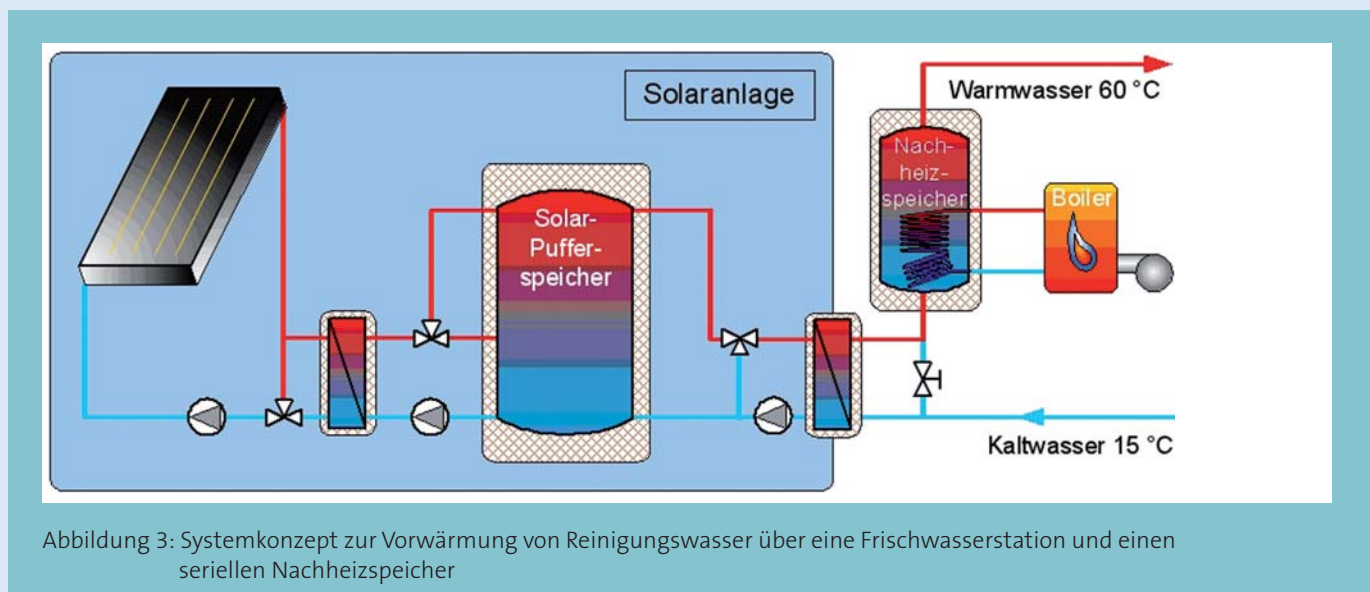
Die zuvor beschriebenen Arbeitsschritte zur Erstellung eines aussagekräftigen Konzeptes sind für die folgenden vier Prozessanwendungen exemplarisch durchgeführt worden und dokumentiert:

- Erhitzen von Frischwasser für Reinigungsprozesse
- Vorwärmung von Kesselzusatzwasser für Dampfnetze
- Beheizen industrieller Bäder
- Konvektives Trocknen mit Heißluft in offenen Systemen

Die Ausgangsdaten der jeweiligen Anwendungen wurden aus der Praxis abgeleitet. Dazu zählen die Lastprofile, der notwendige Temperaturhub und die Grundzüge der Systemanbindung. Für diese Systemkonzepte wurden Simulationen in TRNSYS durchgeführt und in Form von Nomogrammen dargestellt. Die empfohlenen Systemkonzepte und die simulierten Energieerträge wurden für die vier vorgestellten spezifischen Anwendungen berechnet und optimiert. Obwohl die ausgewählten Beispiele für die betrachteten Anwendungsfälle repräsentativ sind, kann aufgrund der Vielzahl industrieller Prozesse das optimale Solarsystemdesign von den Beispielen abweichen.

Das heißt, dass die Ergebnisse, die in der Broschüre präsentiert werden, individuell angepasst werden müssen.

Erhitzen von Frischwasser für Reinigungsprozesse



Im dargestellten Systemkonzept wird die Solaranlage über eine Frischwasserstation in den Prozess integriert. Wann immer Warmwasser benötigt wird, kann es vom Solarsystem vorgewärmt werden, bevor es in den Nachheizspeicher gelangt. Der Nachheizspeicher ist notwendig, um bei Wasch- oder Reinigungsprozessen den hohen Schüttleistungen gerecht zu werden.

Ein Kaltwasser-Bypass auf der Entnahmeseite des SolarSpeichers verhindert zu hohe Temperaturen des Warmwassers, die durch hohe Temperaturen im Pufferspeicher auftreten können. Der Solarwärmetauscher kann im Solar-Kreislauf mit einem 3-Wege-Ventil umgangen werden, um das Solarfluid im Kollektorkreis zirkulieren zu lassen, bis

eine bestimmte Temperaturdifferenz zwischen der unteren Speichertemperatur und dem Kollektorkreislauf für den Wärmetauscher verfügbar ist. Ansonsten könnte Wärme aus dem Speicher im Kollektorkreis verloren gehen, mit dem Risiko, dass der Wärmetauscher im Winter einfriert. Wird der Speicher beladen, steuern 3-Wege-Ventile die Eintrittshöhe des Durchflusses so, dass eine optimale Schichtung des Speichers erreicht wird.

Das kontinuierliche Lastprofil gilt für große Unternehmen mit drei Arbeitsschichten, sieben Arbeitstagen in der Woche und ganzjährigem Betrieb. Hier ist das Waschen Teil des Produktionsprozesses mit einem konstanten Bedarf. Abweichend vom dargestellten Systemkonzept kann unter

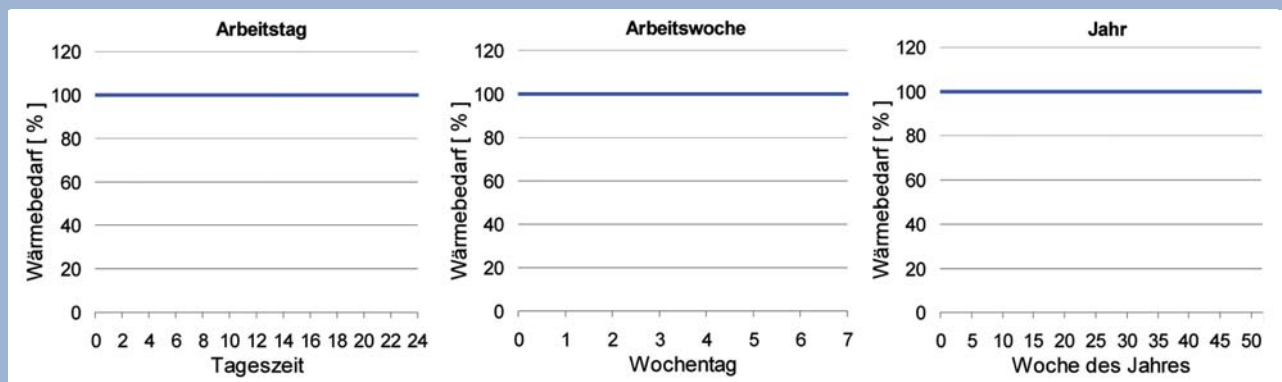


Abbildung 4: Kontinuierliches Lastprofil des Bedarfs an Warmwasser zu Reinigungszwecken

Umständen auf Warmwasserspeicher verzichtet werden. Die Simulation wurde sowohl für einen kontinuierlichen als auch für einen diskontinuierlichen Lastfall durchgeführt. Die Ergebnisse für das diskontinuierliche Lastprofil dienen auf Seite 8 als Beispiel. Verglichen mit dem Nomogramm für das diskontinuierliche Lastprofil zeigt die Abbildung einen erheblich höheren solaren Systemgewinn und solaren Deckungsgrad, da keine Energie in den dreiwöchigen Sommerferien verloren geht.

Der solare Deckungsgrad sollte nicht zu hoch gewählt werden (~40%), um Stagnationsprobleme in den Sommermona-

ten zu vermeiden. Auf Grund des kontinuierlichen Lastprofils kann das Speichervolumen auf max. 50 l/m²_{Ap} beschränkt werden.

Bei diskontinuierlichen Wochenprofilen sollte das Speichervolumen so dimensioniert werden, dass die Solarerträge der Wochenenden gepuffert werden können, ohne dass ein Erreichen der Maximaltemperatur Stagnation auslöst. Bei Prozessen mit einem hohen Bedarf an Reinigungswasser kann das Vorwärmen des Frischwassers mit geringen solaren Deckungsanteilen aufgrund der geringen Frischwassertemperatur sehr wirtschaftlich sein.

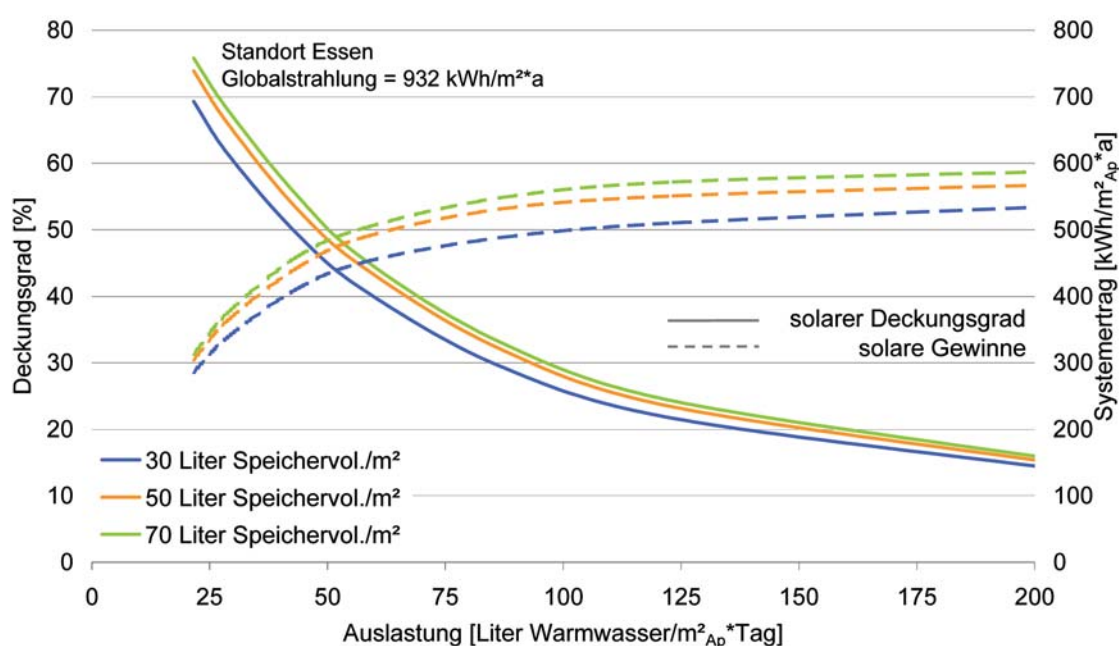


Abbildung 5: Nomogramm zur Auslegung eines Solarsystems zur Erwärmung von Warmwasser; kontinuierliches Lastprofil, Temperaturhub von 15° auf 60°C, Flachkollektor mit 35° Neigung

Solare Prozesswärme

Vorwärmung von Kesselzusatzwasser

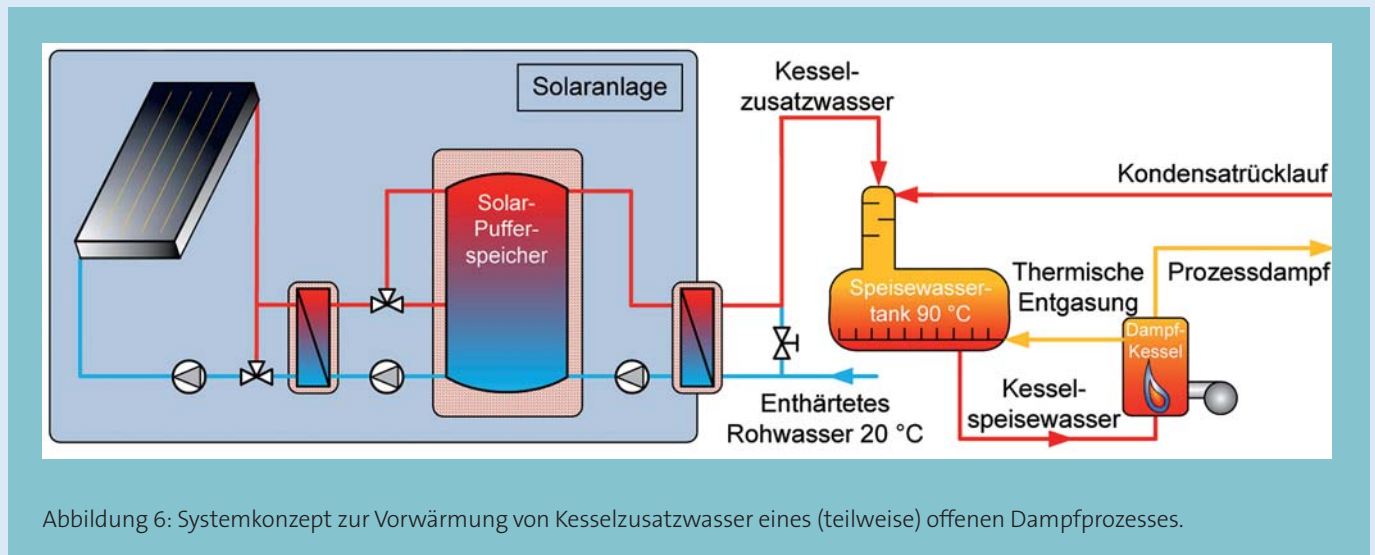


Abbildung 6: Systemkonzept zur Vorwärmung von Kesselzusatzwasser eines (teilweise) offenen Dampfprozesses.

Die solare Unterstützung der Prozessdampferzeugung ist möglich, sofern ein nennenswerter Teil des verwendeten Dampfs im Prozess verbraucht wird und die Kondensatrücklaufquote gering ist. Die solarthermische Anlage zur Vorwärmung des zusätzlichen, entsalzten Frischwassers (Kesselzusatzwasser) kann wirtschaftlich interessant sein, da das Frischwasser bei Temperaturen unter 20°C zur Verfügung steht und der mögliche Temperaturhub und die Effizienz einer Solaranlage folglich hoch sind.

Demgegenüber ist das Erhitzen des Kondensats oder des Kesselspeisewassers auf Grund der hohen Temperaturen ineffizient und unwirtschaftlich. Bei Anlagen auf dem heutigen Stand der Technik wird das Speisewasser in der Regel durch einen Economizer (Abgaswärmetauscher des Dampfkessels) vorgewärmt.

In (teilweise) offenen Dampfnetzen wird das entmineralisierte Kaltwasser häufig mit dem zurückkommenden Kondensat gemischt und muss entgast werden, bevor es in den Dampfkessel eintreten kann. Diese Entgasung wird normalerweise thermisch mit dem Dampf aus dem Kessel durchgeführt. Dabei muss das Speisewasser im Tank auf bis zu 90°C erhitzt werden.

Es besteht die Möglichkeit, das notwendige Kesselzusatzwasser solar vorzuwärmen, bevor es mit dem Kondensat vermischt und bevor das Mischwasser entgast wird. Auf diese Art wird für die Entgasung weniger Dampf benötigt und da Dampf viele unterschiedliche Prozesse im Unternehmen versorgt, kann die Solaranlage einen beträchtlichen Teil des gesamten Wärmebedarfs durch die Installation von nur einem Wärmetauscher decken.

Das Lastprofil auf Seite 13 beschreibt den Speisewasserverbrauch eines (teilweise) offenen Dampfnetzes in einer Wäscherei im Zweischichtbetrieb ohne Betriebsferien. Die Füllstandskontrolle des Speisewassertanks reguliert den konstanten Zufluss in Intervallen von je 30 Minuten.

Die erzielbaren solaren Gewinne sind etwas geringer als bei den Anlagen für Reinigungszwecke. Das liegt an der höheren Temperatur des Kaltwassers von 20°C (vgl. 15°C beim Waschen/Reinigen), da sich das Wasser bereits beim Entmineralisieren erwärmt. Auch die erreichbaren solaren Deckungsgrade sind geringer, da das Wasser auf bis zu 90°C erhitzt werden muss. Es ist zu erkennen, dass die Auslastung nicht über $75 \text{ l/m}^2_{\text{Ap}} \cdot \text{Tag}$ gewählt werden sollte, da sich der Systemertrag nicht mehr erhöht und der solare Deckungsgrad weiter deutlich abfällt.

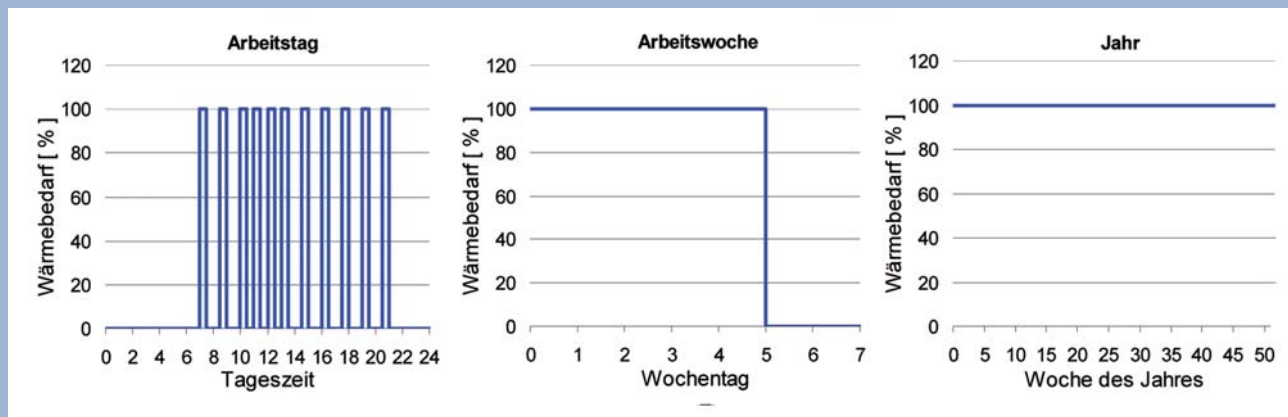


Abbildung 7: Lastprofil des Kesselzusatzwassers in einem Dampfnetz

Beim Betrieb von Dampfkesseln und Dampfnetzen besteht oftmals die Möglichkeit, Abwärmepotenziale wirtschaftlich zu erschließen.

Bevor man eine Solaranlage plant, sollte dieser Aspekt im Detail betrachtet werden. In manchen Fällen kann die

Mindesttemperatur des Kesselzusatzwassers nach Wärmerückgewinnungsmaßnahmen auf bis zu 60°C ansteigen, wodurch der Wirkungsgrad einer Solaranlage sinkt. Das sollte für jede betrachtete Anlage individuell überprüft werden.

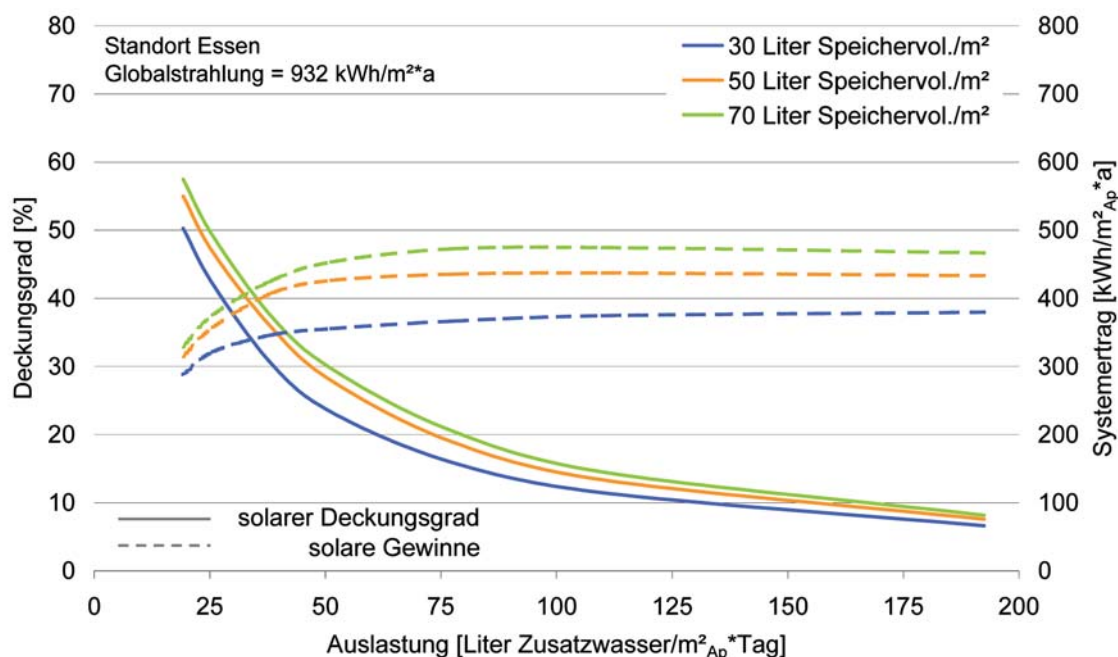


Abbildung 8: Nomogramm zur Vorwärmung von Kesselzusatzwasser; diskontinuierliches Lastprofil, Temperaturhub von 20° auf max. 90°C, Flachkollektor mit Neigung 35°

Solare Prozesswärme

Beheizen industrieller Bäder

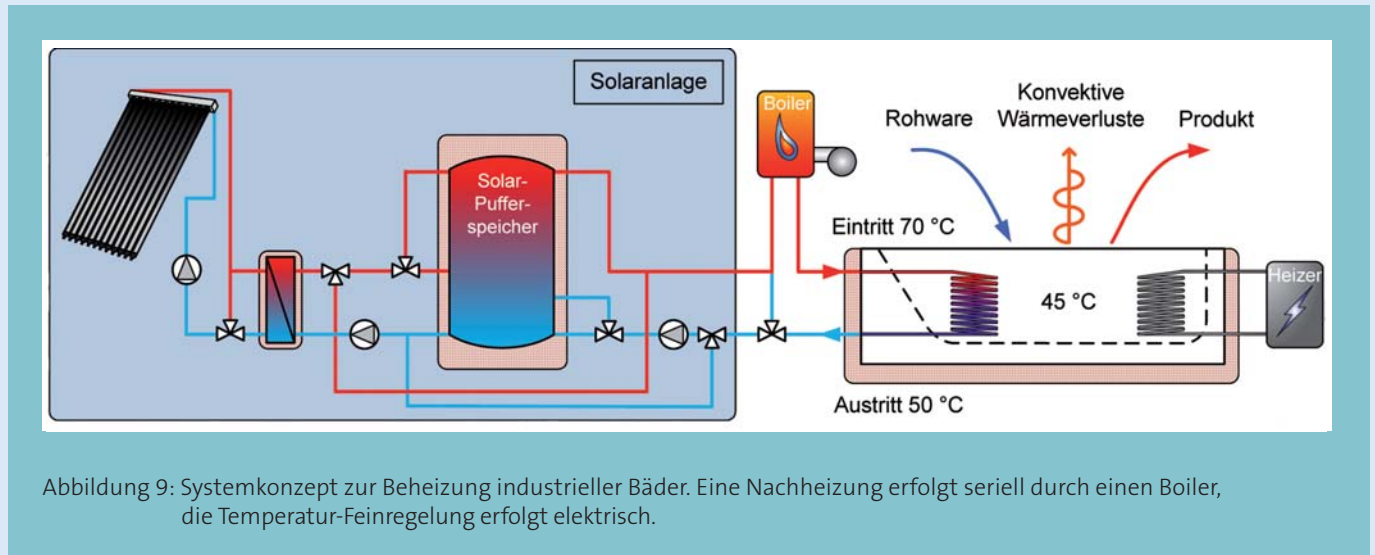


Abbildung 9: Systemkonzept zur Beheizung industrieller Bäder. Eine Nachheizung erfolgt seriell durch einen Boiler, die Temperatur-Feinregelung erfolgt elektrisch.

Eine viel versprechende Anwendungsmöglichkeit der Solarthermie in gewerblichen und industriellen Prozessen ist die Erwärmung von Becken, Speichern und Bädern. Zur Vor- und Nachbehandlung bei der Oberflächenbearbeitung und -veredelung, in der Galvanik oder zur Vorwärmung von Produktionsgrundstoffen kann eine solarthermische Prozesserwärmung zur Anwendung kommen.

Im Beispiel werden Werkstücke in einem Bad bei 45 °C behandelt. Es müssen nicht nur die konvektiven Wärmeverluste des Bades ausgeglichen werden, sondern die Werkstücke selbst entziehen dem Bad durch ihre Kapazität ebenfalls Wärme. Das solar erwärmte Heiß-

wasser wird bei Bedarf durch einen Boiler seriell nachgeheizt. Weil die Temperatur des Rücklaufs in den Speicher bei geringer Beladung höher sein kann als die untere Speichertemperatur, ist eine Einschichtung des Rücklaufs möglich. Die Solaranlage ist so aufgebaut, dass das Bad auch direkt beheizt werden kann, so dass durch den Speicher entstehende Wärme- und Mischungsverluste vermieden werden.

Die Grafik beschreibt das Lastprofil eines Zweischichtbetriebes bei einer Fünf-Tage-Woche ohne Betriebsferien. Außerhalb der Betriebszeiten sinkt der Bedarf auf 20 % zur Sicherstellung einer Mindesttemperatur von 45 °C. Das Bad wird in diesem Beispiel niemals nachgefüllt.

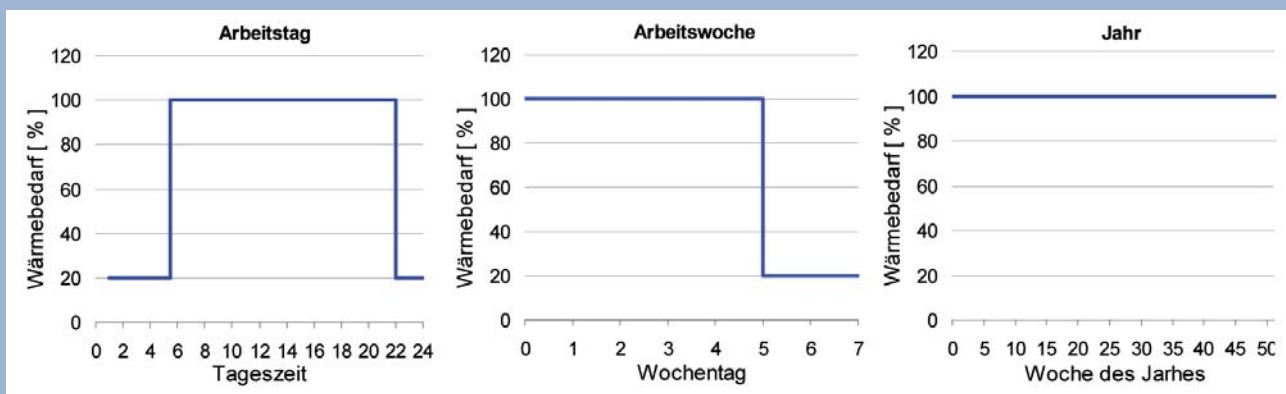


Abbildung 10: Lastprofil zur Beheizung eines industriellen Bades

In der Praxis können die solaren Erträge im dargestellten Prozess noch erheblich steigen, wenn das Bad regelmäßig neu befüllt wird und dabei solar aufgeheizt werden kann. Je nach Temperatur des Bades kommt es auch zu einer gewissen Verdunstung von Wasser, so dass über eine Füllstandsregelung wieder Wasser

zugegeben werden muss. Auch dieses Wasser kann solar erwärmt werden, bevor es beigemischt wird.

In den Simulationsergebnissen wurden diese beiden Punkte nicht berücksichtigt.

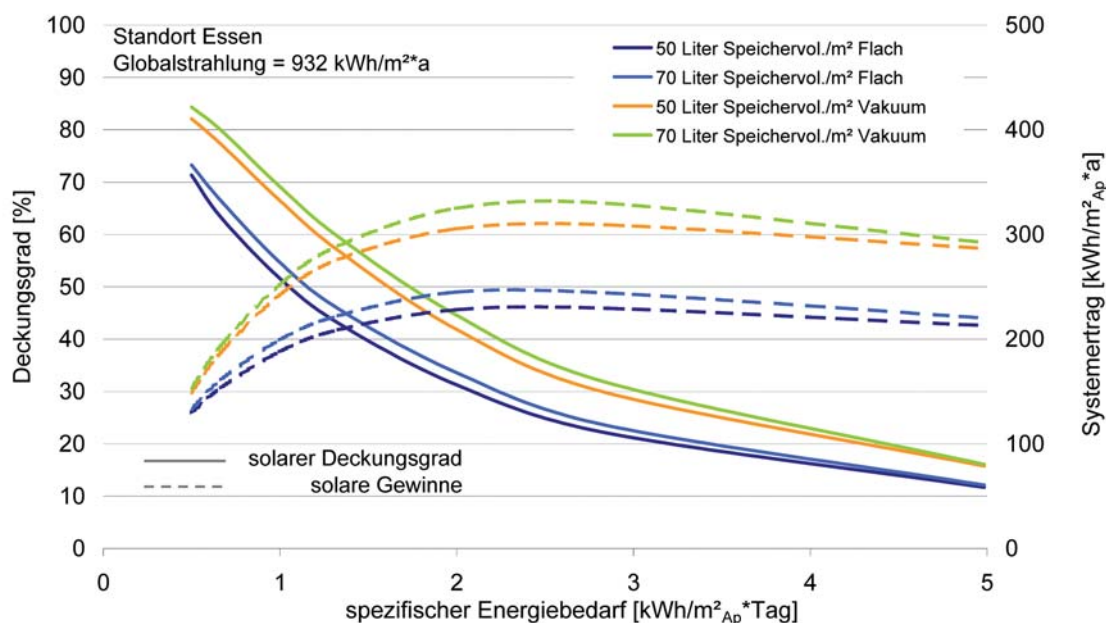


Abbildung 11: Nomogramm zur Beheizung eines industriellen Bades; diskontinuierliches Lastprofil, Temperaturhub von 50°C auf 70°C, Flach- und Vakuumröhrenkollektoren mit Neigung 35°

Solare Prozesswärme

Konvektive Trocknung mit Heißluft

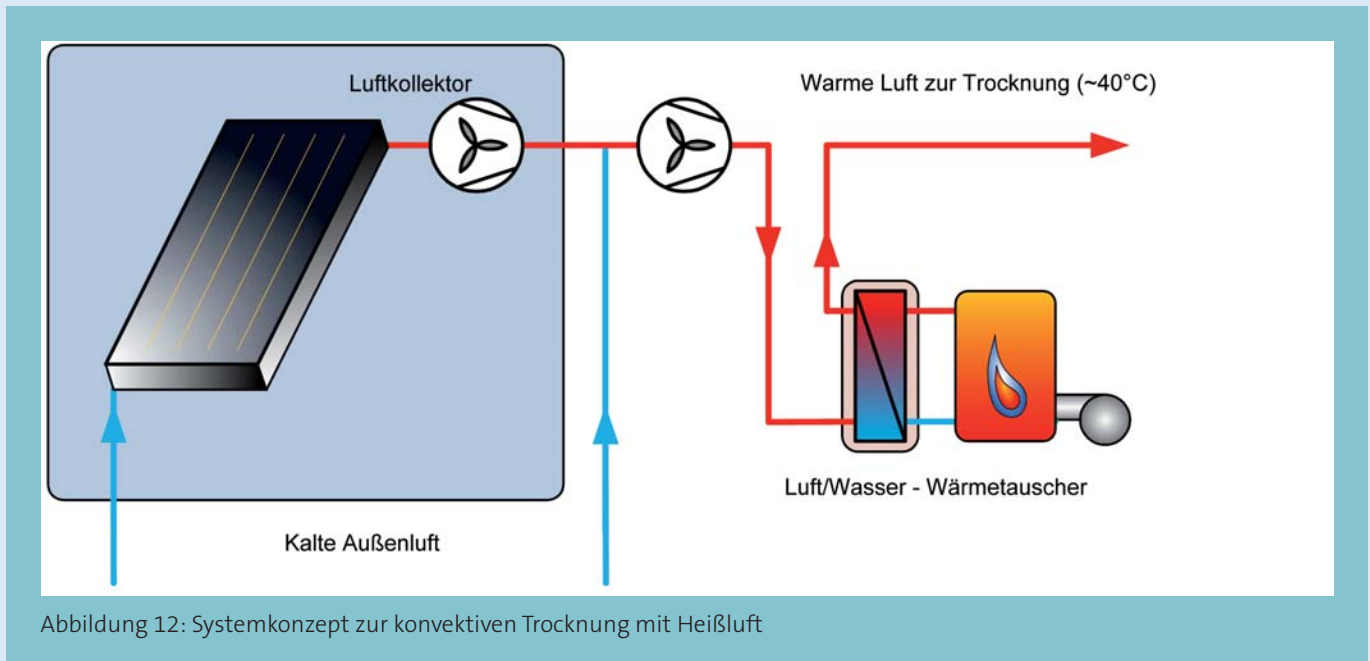


Abbildung 12: Systemkonzept zur konvektiven Trocknung mit Heißluft

Das System beschreibt einen offenen Trocknungsprozess ohne Wärmerückgewinnung. Üblicherweise wird die Luft bis zu 40°C durch einen Luft/Wasser-Wärmetauscher mittels fossiler Energieträger erwärmt. Das solare Luftkollektorsystem ist installiert, um die Außenluft vorzuwärmen. Aufgrund eines günstigen Lastprofils ist kein Speicher installiert. Der Ventilator ist auf der heißen Seite des Luftkollektors angebracht, um zu vermeiden, dass Leckage-Luftströme vom Kollektor verloren gehen.

Im Vergleich zu Solarkollektoren mit Wärmeträgermedium (Wasser/Glykol) sinkt die Effizienz von Luftkollektoren deutlich, wenn sich die Massenströme reduzieren. So hat z. B. ein Kollektor 70% Effizienz bei einem Massenstrom von $100 \text{ kgLuft/h} \cdot \text{m}^2_{\text{Ap}}$ und nur 45% Effizienz bei einem Massenstrom von $20 \text{ kgLuft/h} \cdot \text{m}^2_{\text{Ap}}$ (wenn die Kollektor-Eintrittstemperatur der Umgebungstemperatur entspricht). Andererseits ist der Druckverlust bei einem hohen Massenstrom 5-6 mal höher als bei einem niedrigen Massenstrom.

Sobald Heißluft für die Trocknung benötigt wird, erzeugt der konventionelle Lüfter den notwendigen Massenstrom, um sämtliche Druckverluste im System auszugleichen und eine sichere Versorgung des Prozesses zu gewährleisten. Wenn die Sonne nicht scheint, wird der Solarlüfter nicht aktiv und die Umgebungsluft wird durch den Wärmetauscher direkt erwärmt. Sobald die Absorbtemperatur über ein bestimmtes Niveau ansteigt, geht der Solarlüfter in Betrieb und erzeugt den maximalen Massenstrom.

Für diesen Massenstrom ist der Temperaturhub der Solaranlage zwar gering, die Effizienz aber hoch. Abhängig von der solaren Einstrahlung wird die verbleibende Temperaturdifferenz durch den Wärmetauscher übernommen. Wenn die Temperatur 40°C übersteigt, wird die Drehzahl des Solarlüfters reduziert. Der Massenstrom durch das Solarfeld wird geringer, die Effizienz sinkt und (mehr) kalte Außenluft wird beigemischt. Die fossile Wärmequelle kann abgeschaltet werden.

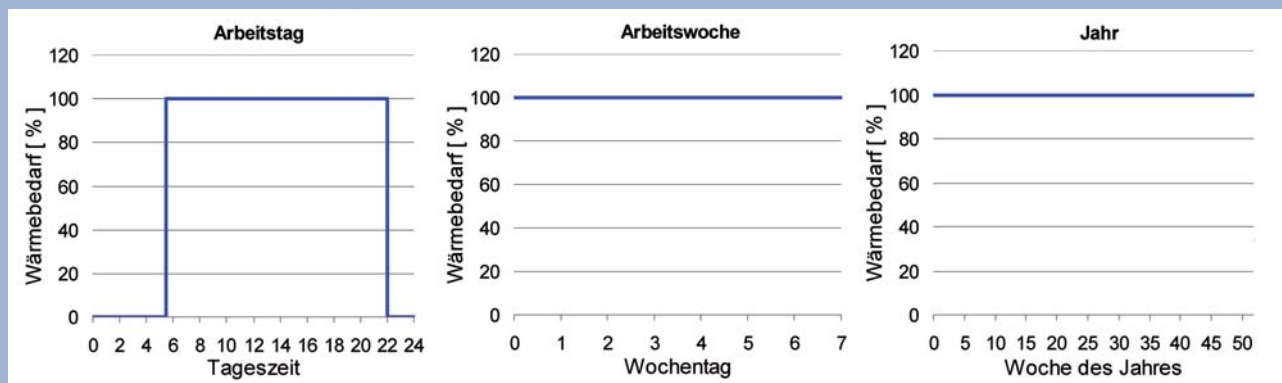


Abbildung 13: Lastprofil für einen Trocknungsprozess

Zur weiteren Reduzierung der Druckverluste und zur Steigerung der Gesamteffizienz kann an sehr sonnigen Tagen der Wärmetauscher mit einem Bypass komplett umgangen werden.

Für hohe spezifische Energiebedarfe (kleine Kollektorfelder) kann das Kollektorfeld üblicherweise mit hohen Massenströmen (hohe Effizienz) betrieben werden, da die Austrittstemperatur von 40°C in der Regel nicht er-

reicht wird. Auf der anderen Seite ist der solare Deckungsanteil sehr gering und die Nacherhitzung läuft oftmals im ineffizienten Teillastbereich. Bei großen Kollektorflächen gehen die spezifischen Systemgewinne zurück, da der Massenstrom des Feldes häufig reduziert werden muss und somit die Effizienz an sehr sonnigen Tagen verringert wird. Mit dem beschriebenen System und Lastprofil können in Mitteleuropa solare Deckungsgrade von 15 bis 20 %, in Südeuropa von 25 bis 35 % erreicht werden.

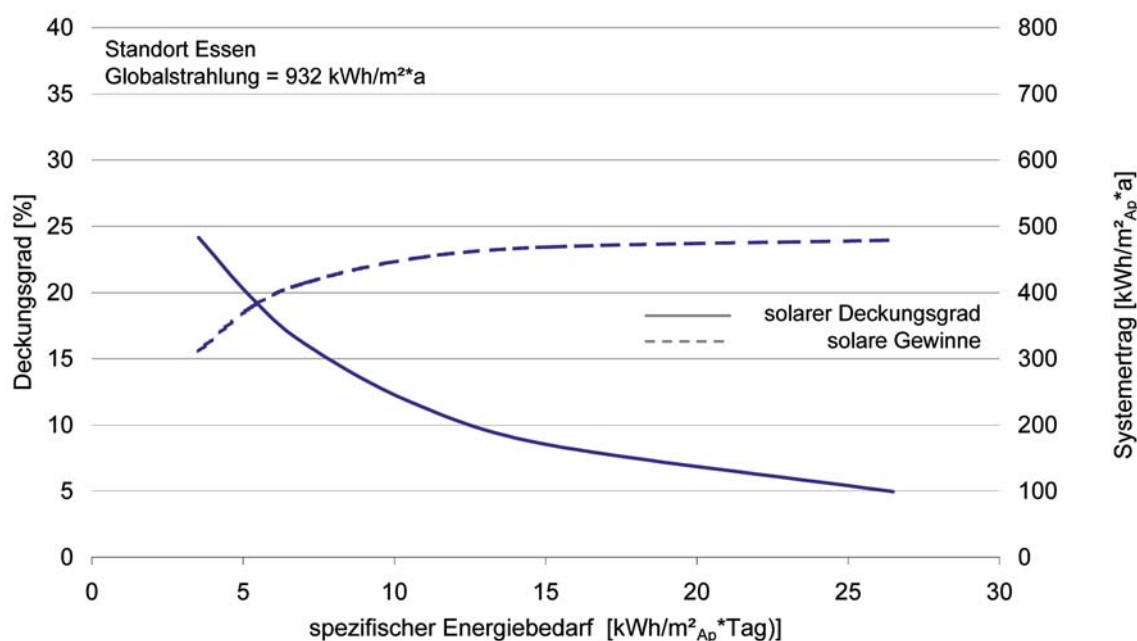


Abbildung 14: Nomogramm zur konvektiven Trocknung mittels Luftkollektoren; automatischer Massenstrom, kein Speicher

Solare Prozesswärme

Betrieb und Wartung

In diesem Kapitel werden Entwurfs- und Wartungsaspekte von Anlagen solarer Prozesswärme diskutiert, welche sich von konventionellen großen Solarthermieanlagen unterscheiden. Umfangreiche Informationen zur Planung, Dimensionierung und Installation solarthermischer Systeme können den Dokumenten entnommen werden, die im Literaturverzeichnis aufgeführt sind (vgl. [6], [7] und [8]).

Prozessanbindung

Bei offenen Prozessen zu Wasch- und Reinigungszwecken muss der Solar-Pufferspeicher über Wärmetauscher an das konventionelle Heizsystem angeschlossen sein. Dies ist auf folgende Aspekte zurückzuführen:

- Legionellen: Wenn Trinkwasser in einem Speicher mit einem Volumen über 400 l gespeichert wird, muss die Temperatur beim Eintritt in das Wärmeverteilsystem mindestens 60°C betragen. Die Minimaltemperatur darf 55°C nicht unterschreiten, eine thermische Desinfektion mit mindestens 70°C muss möglich sein.
- Verkalkung: Bei der Erwärmung von Frischwasser auf über 60°C kommt es häufig zum Ausfall von Kalk (in Speichern, Wärmetauschern, usw.). Dies behindert die Wärmeübertragung und reduziert den Durchfluss.
- Korrosion: Wenn Stahltanks oder Kupferrohre regelmäßig im Kontakt mit Frischwasser stehen, führt der hohe Sauerstoffgehalt zu vermehrter Korrosion in den Anlagenteilen.
- Systemtrennung: Der Solarkreislauf ist mit Frostschutz gefüllt, um im Winter nicht einzufrieren. Da dieses Medium teurer ist als Wasser und einem Alterungsprozess unterliegt, wird sein Einsatz so klein wie möglich gehalten.

Eine direkte Beheizung des Prozesswassers im Solar-Pufferspeicher ist nur im Falle geschlossener Systeme zu empfehlen. Dies ist bei der Versorgung eines Standortes über ein geschlossenes Heißwassernetz der Fall. Hier können jedoch die auftretenden Rücklauftemperaturen für den Einsatz von Solarthermie unwirtschaftlich hoch sein.

Stillstand (Stagnation)

Bei überdimensionierten solarthermischen Anlagen übersteigt im Sommer häufig das Angebot an Solarwärme den Bedarf - die Anlagen gehen 'in Stillstand' (Stagnation). Als Stagnation bezeichnet man jenen Zustand einer thermischen Solaranlage, bei dem es durch hohe Sonneneinstrahlung und gleichzeitig ausgeschalteter Pumpe zur Verdampfung des Wärmeträgers im Kollektor kommen kann und die Kollektoren sich bis zur Stillstandstemperatur aufheizen. Unter Stillstandstemperatur versteht man die Temperatur, bei der die thermischen Verluste der gewonnenen Wärme entsprechen. Je nach Kollektortyp und Verrohrung kann diese Temperatur bei über 250°C liegen.

Die Phasen der Stagnation können folgendermaßen beschrieben werden: Scheint die Sonne und ist die Pumpe ausgeschaltet, so dehnt sich zuerst die Flüssigkeit in den Kollektoren aus. Es bilden sich Dampfblasen, wenn die Verdampfungstemperatur der Flüssigkeit erreicht ist (abhängig vom Systemdruck). Der Druck im Solarkreis steigt rapide an.

Abhängig von der Verrohrung der Kollektoren und des Kollektorfeldes kann die Flüssigkeit durch die Dampfblasen aus den Kollektoren gedrückt werden. Dampf kann somit in die Verbindungsrohre der Solaranlage gelangen und von dort die anderen Komponenten im Solarkreislauf erreichen. Die verbleibende Flüssigkeit im Kollektor verdampft bei einer höheren Temperatur, da der Systemdruck gestiegen ist. Der Dampf in den Kollektoren überhitzt, dadurch kann die Anlage in diesem Zustand nicht mehr in Betrieb gesetzt werden. Sinkt die Temperatur wieder, wird die Kollektorfläche durch das Ausdehnungsgefäß neu mit Flüssigkeit aufgefüllt und kann erneut den Betrieb aufnehmen.

Die Graphik auf der folgenden Seite zeigt den Vergleich zweier Konzepte. Wenn Kollektoren und Kollektorfelder sich gut entleeren (umgekehrte U-Konfiguration), sind Kraft und Reichweite des Dampfes gering (linkes Beispiel). Beim rechten Beispiel wird die gesamte Flüssigkeit in den Kollektoren verdampfen und kann thermal geschädigt werden.

Gründe für Stagnation mit Dampfbildung:

- Die Maximaltemperatur der Speicher ist erreicht und die Pumpe stoppt.
- Fehler in der Mess- und Regelungstechnik, Ausfall von Sensoren oder Pumpen, Stromausfall.
- Leckagen im Solarkreislauf und Reduzierung des Systemdrucks.

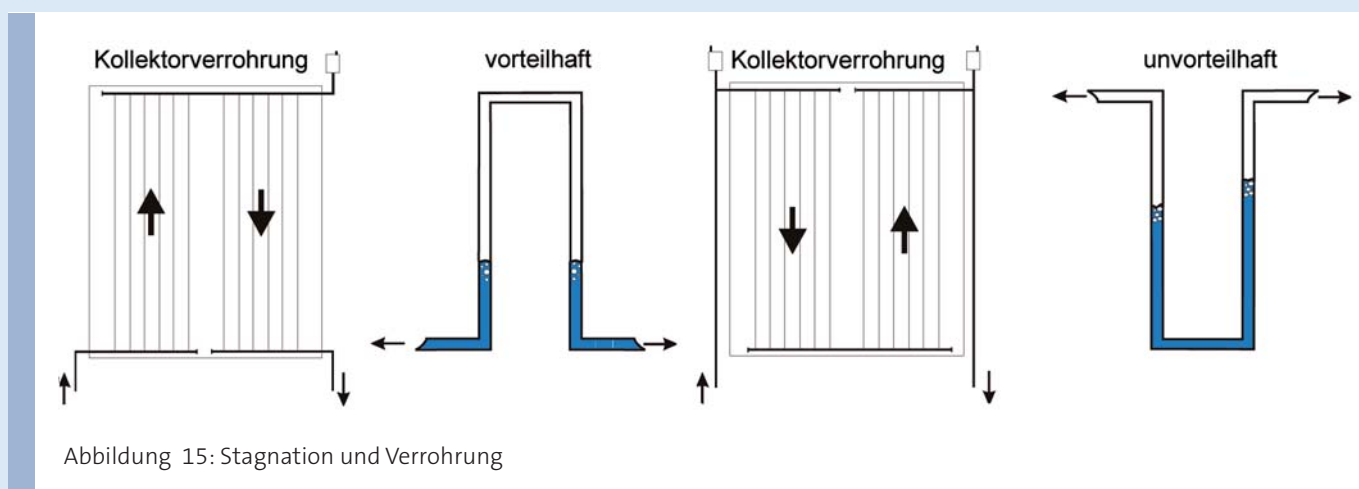


Abbildung 15: Stagnation und Verrohrung

Folgen der Stagnation:

Die Wärmeträgerflüssigkeit (Wasser/Glykol) kann schneller altern oder sogar zerstört werden. Glykol kann thermisch (Langzeit-Temperaturen $> 160^{\circ}\text{C}$) oder durch Sauerstoff (Leckagen) beschädigt werden. Wenn Glykol bei sehr hohen Temperaturen zerstört wird, kann es die Absorberrohre der Kollektoren verstopfen. Die Komponenten des Solarkreislaufs können thermisch geschädigt werden, vor allem die Membran des Ausdehnungsgefäßes, die Ventile, die Entlüfter, die Pumpen und Dichtungen. Wenn Ausdehnungsgefäß oder Sicherheitsventil falsch dimensioniert sind, besteht die Möglichkeit einer Entleerung des Kollektorkreislaufes. Abseits der technischen Probleme kann die eingestrahlte Energie im Falle der Stagnation nicht durch die Solaranlage genutzt werden, was die Wirtschaftlichkeit verschlechtert.

Maßnahmen zur Vermeidung von Stillstandsproblemen:

- Bei kleinen Anlagen sind die Speicher groß genug auszulegen, um die Gesamtstrahlungsmenge an Wochenenden ohne Abnahme zu puffern. Dies vermeidet Stillstand und vergrößert die Wirtschaftlichkeit des Systems.
- Installation der Kollektoren und Kollektorfelder mit gutem Entleerungsverhalten (umgekehrte U-Konfiguration), aber unter Gewährleistung einer guten Entlüftung.
- Korrekte Dimensionierung des Ausdehnungsgefäßes. Es sollte in der Lage sein, das gesamte Volumen des Kollektorkreislaufes aufzunehmen. Schutz des Ausdehnungsgefäßes vor Dampf.
- Keine Installation von Rückschlagventilen zwischen Kollektorfeld und Ausdehnungsgefäß. Die Rückschlagventile bestimmen die Richtung des eindringenden Dampfes.

- Korrekte Dimensionierung des Sicherheitsventils um dem Stillstandsdruck zu widerstehen (üblicherweise 6 bar).
- Auswahl von dampf- und temperaturresistenten Komponenten, sofern diese von Dampf erreicht werden können; Wahl eines Glykoltyps, der bei hohen Temperaturen eingesetzt werden kann.
- Insbesondere bei Vakuumröhren-Kollektoren, bei denen eine umgekehrte U-Konfiguration der Verrohrung nicht möglich ist, sollte der Umfang der Dampfentstehung bekannt sein. Das ist ein wichtiges Planungskriterium z.B. für das Ausdehnungsgefäß.
- Ein Anlaufen der Pumpen muss regelungstechnisch verhindert werden, solange Dampf in den Kollektoren ist.
- Ein niedriger Systemdruck reduziert die thermische Belastung der in den Kollektoren verbleibenden Flüssigkeit, hat jedoch eine größere Dampfentstehung zur Folge.
- Anwendung von passiver und aktiver Kühlung. Bei Flachkollektoren kann in der Nacht Wärme über die Kollektoren abgeführt werden. Auch aktive Wasser-/Lufttauscher können zur Kühlung eingesetzt werden, wenn eine bestimmte Temperatur überschritten wird. Dies sind jedoch Maßnahmen für den Ausnahmefall und nicht für den üblichen Betriebszustand der Anlage.

Probleme durch Stagnation müssen in der Planungsphase berücksichtigt werden, da Stillstand einen normalen Betriebszustand darstellen kann (z.B. während der Betriebsferien oder an Wochenenden).

Weitere Informationen zu den Aspekten der Stagnation sind in der unter [9] angegebenen Quelle zu finden.

Solare Prozesswärme

Betrieb eines solarthermischen Systems

Eine korrekter Systementwurf sowie die fachmännische Planung und Installation einer solaren Prozesswärmeanlage minimieren den Wartungsaufwand über die Lebensdauer der Anlage. Die Verantwortung für die periodische Wartung und Inspektion der Anlage muss einem fachlich geeigneten Mitarbeiter des Unternehmens oder einem qualifizierten Fachbetrieb übertragen werden. Eine umfangreiche Dokumentation ist Grundlage für die ordnungsgemäße Wartung und Inspektion sowie den störungsfreien Betrieb der Anlage.

Nach Inbetriebnahme sollte eine Überprüfung und ggf. Anpassung der Regelparameter im Abgleich mit den Prozessanforderungen erfolgen, um eine maximale Effizienz des Systems sicher zu stellen. Darüber hinaus ist die Installation eines geeigneten Überwachungssystems (Monitoring) anzuraten, um einen optimalen Betrieb über die gesamte Lebensdauer der Anlage zu gewährleisten.

Anlagenkosten und Fördermittel

Typische Systemkosten

Die Kosten solarthermischer Prozesswärmeanlagen in Europa reichen von 180 Euro bis 600 Euro/m²_{Ap} und teilweise darüber hinaus. Entscheidend für die Höhe der Kosten sind das Systemkonzept, die Anlagengröße, die gewählten Komponenten (z.B. die Wahl des Kollektortyps) und länderspezifische Faktoren, wie z.B. Löhne.

Ein weiterer, schwer abzuschätzender Kostenfaktor liegt in den Aufwendungen, die notwendig sind, um die Solaranlagen in die bestehende Infrastruktur einzubinden. Die nebenstehende Graphik stellt exemplarisch die Verteilung von Installationskosten für größere solarthermische Systeme in Deutschland dar.



Förderprogramme

In fast allen europäischen Ländern existieren Programme zur Förderung solarthermischer Anlagen im privaten und gewerblichen Sektor. Da diese Förderprogramme politischen Veränderungen unterliegen, wird auf eine Auflistung derzeitiger Programme verzichtet.

Für die Bundesrepublik Deutschland und das Land Nordrhein-Westfalen geben die folgenden Quellen Überblick über die aktuellen Förderprogramme:

- BAFA – Bundesamt für Ausfuhr und Wirtschaftskontrolle
- KfW – Bankengruppe
- Bezirksregierung Arnsberg
- EnergieAgentur.NRW



Literaturhinweise und weitere Informationen

- [1] S. Werner (2007): The European Heat Market, ECOHEATCOOL - Work Package 1. Final Report, IEE ALTENER Project, Euroheat & Power, Belgium
 - [2] C. Vannoni, R. Battisti, S. Drigo (2008): Potential for Solar Heat in Industrial Processes. IEA Task 33/IV: Solar Heat for Industrial Processes. Ciemat, Madrid www.iea-shc.org/task33/publications
 - [3] Checkliste für Unternehmen (2010), erstellt im Rahmen des SO-PRO- Projektes, erhältlich bei den Projektpartnern oder als Download: www.solar-process-heat.eu/work-packages/
 - [4] C. Brunner, B. Slawitsch et al. (2008): Industrial process indicators and heat integration in industries. IEA Task 33/IV: Solar Heat for Industrial Processes. AEE IN-TEC, Gleisdorf. www.energytech.at/pdf/ieatask33_4_ipi.pdf
 - [5] EINSTEIN: Expert system for an Intelligent Supply of Thermal Energy in Industry. <http://iee-einstein.org/>
 - [6] Bernd-Rainer Kasper, Bernhard Weyres-Borchert: Leitfaden Solarthermische Anlagen. Für Installateure, Fachplaner, Architekten, Bauherren und Weiterbildungsinstitute. Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e.V., 2008, 8. Ausgabe, ISBN 978-3-00-025562-5
 - [7] VDI 6002 Blatt 1: Solar heating for domestic water - General principles, system technology and use in residential building, Verein Deutscher Ingenieure (VDI), September 2004, German/English. Available from www.vdi.de.
 - [8] A. Aidonis, V. Drosou et al. (2002): PROCESOL II: Solar thermal plants in industrial processes - Design and Maintenance Guidelines. Centre for Renewable Energy Sources, Pikermi. www.energytech.at/pdf/procesol_2_english.pdf
 - [9] StagSim: Verbundprojekt zu Systemuntersuchungen großer solarthermischer Kombianlagen. www.solarkombianlagen-xl.info
 - [10] F. Peuser (2002): Große Solaranlagen zur Trinkwassererwärmung. BINE Themen Info III/2002. www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Themen-Infos/III_2002/themen0302internetx.pdf
- T. Müller, W. Weiss et al. (2004): PROMISE: Produzieren mit Solarenergie. Final report. www.nachhaltigwirtschaften.at/nw_pdf/0401_promise.pdf
- H. Schweiger et al. (2001): POSHIP: Potential of Solar Heat in Industrial Processes. Final report. www.solarpaces.org/Library/docs/POSHIP_Final_Report.pdf
- W. Weiss, M. Rommel (2008): Process Heat Collectors. IEA Task 33/IV: Solar Heat for Industrial Processes. AEE INTEC, Gleisdorf. www.iea-shc.org/task33/publications

Das Projekt 'Solare Prozesswärme' des EU-Programms Intelligente Energie Europa (IEE) hat zum Ziel, die Marktentwicklung für solare Prozesswärme in sechs Regionen zu beleben und zu unterstützen. Das Projekt wird in enger Kooperation zwischen den Partnerregionen Oberösterreich, Zentralspanien, Südböhmen, der Region Maribor, Sachsen und Nordrhein-Westfalen durchgeführt. Wissenschaftlicher Partner des Projektes ist das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme in Freiburg.

Die Projektaktivitäten beinhalten unter anderem die Information von Entscheidungsträgern, die Fortbildung von Fachpersonal, die Erarbeitung von Checklisten und Planungshilfen, die Begleitung von Pilotprojekten sowie den Aufbau eines Netzwerkes engagierter Marktteilnehmer.

www.solar-process-heat.eu



SO-PRO



Kontakt:

Gertec GmbH Ingenieurgesellschaft
Martin-Kremmer-Str. 12
45327 Essen
Tel: +49 [0] 2 01/2 45 64 -0
info@gertec.de · www.gertec.de

Internationale Partner des SO-PRO-Projektes:

- O.Ö. Energiesparverband (ESV), Oberösterreich, Österreich
- ESCAN, Region Kastilien und Madrid, Spanien
- Energiezentrum České Budějovice (ECCB), Südböhmen, Tschechische Republik
- Gertec GmbH Ingenieurgesellschaft, Nordrhein-Westfalen, Deutschland
- Sächsische Energieagentur (SAENA), Sachsen, Deutschland
- Energieagentur von Podravje (Energap), Region Podravje, Slowenien
- Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE), Freiburg, Deutschland