

# Ergebnisse des IEE-Projekts SO-PRO: Auslegung von Solaranlagen für vier ausgewählte industrielle Prozesse

Stefan Heß, Axel Oliva, Annabell Helmke, Gerhard Stryi-Hipp, Werner Platzer  
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE  
Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg, E-Mail: [stefan.hess@ise.fraunhofer.de](mailto:stefan.hess@ise.fraunhofer.de)  
Tel.: +49 (0)761 4588-5739, Fax: +49 (0)761 4588-9000

## Abstract

Im Intelligent Energy Europe (IEE) Projekt „Solar Process Heat“ ([www.solar-process-heat.eu](http://www.solar-process-heat.eu)) wurde Expertenwissen aus den Bereichen industrielle Prozesse, solarthermische Systeme und regionale Marktentwicklung miteinander vernetzt. Übergeordnetes Ziel war es, die Marktentwicklung für solare Prozesswärme in sechs europäischen Regionen durch eine gezielte Kampagne anzustoßen.

Unter anderem wurden dazu industrielle Entscheidungsträger informiert, Schulungen durchgeführt, Contracting-Konzepte vorgestellt und 91 Firmen hinsichtlich der Möglichkeit zur Integration von Solarwärme untersucht (sog. „Energy Screenings“). Zur Unterstützung dieses Prozesses wurden Checklisten erarbeitet. Einem branchenübergreifenden Ansatz folgend wurden basierend auf den Screenings häufige und für die Integration von Solarwärme vielversprechende Anwendungen (sog. „Priority Applications“) identifiziert.

Es wurde ein Planungsleitfaden erarbeitet, der neben beispielhaften Systemkonzepten, Lastprofilen und Auslegungsnomogrammen für diese Anwendungen auch einen integralen Planungsansatz, für Priority Applications typische Beispielanlagen sowie weiterführende Informationen zu solarer Prozesswärme enthält. Die Projektaktivitäten führten in den sechs unterstützten Regionen bis Projektende bisher zu 9 Pilotprojekten. Schwerpunkt des Projekts lag auf Prozessen mit Temperaturen unter 100 °C, weil die wirtschaftlich vielversprechendsten Anwendungen identifiziert und die Pilotprojekte zeitnah mit konventioneller Solartechnik realisiert werden sollten.

Der vorliegende Beitrag fasst die wesentlichen Projektergebnisse zusammen. Einleitend wird das Potential und die derzeitige Situation solarer Prozesswärmeerzeugung in Europa diskutiert. Der Planungsleitfaden wird vorgestellt und spezifische Kenngrößen und Charakteristika industrieller Prozesse werden erläutert. Die Hilfsmittel im Planungsleitfaden werden anhand des Beispiels „Solare Beheizung eines Galvanik-Bades“ vorgestellt und im Folgekapitel hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit für ähnliche Planungsaufgaben kritisch diskutiert. Der Beitrag schließt mit konkreten Handlungsempfehlungen, die sich aus So-Pro ableiten lassen.

Direkter Link zum Planungsleitfaden: [www.solar-process-heat.eu/guide](http://www.solar-process-heat.eu/guide)

Direkter Link zum Abschlussbericht: [www.solar-process-heat.eu/report](http://www.solar-process-heat.eu/report)

# 1. Potential, Hemmnisse und Perspektiven

## 1.1 Potential

Der Endenergieverbrauch der Europäischen Union (13.609 TWh im Jahr 2006) lässt sich in Elektrizität und Transport (51 %), Hochtemperaturwärme über 250 °C (15 %) und Niedertemperaturwärme unter 250 °C (34 %) unterteilen (Weiß und Biermayr, 2009). Dabei entfällt 44 % des gesamten Wärmebedarfs auf industrielle Prozesse (2.934 TWh/a). Beinahe der gesamte Hochtemperatur-Wärmebedarf ist Prozesswärme, weil 68 % des industriellen Wärmebedarfs bei Temperaturen über 250 °C bereitgestellt werden muss (Sanner et al., 2011). Aber auch am insgesamt deutlich größeren Wärmebedarf unter 250 °C beträgt der Anteil von Industrieprozessen noch immer 19,5 % oder 905 TWh/a (Weiß und Biermayr, 2009).

Eine Studie im Rahmen des IEA- Task 33/IV „Solar Heat for Industrial Processes“ ergab, dass Solaranlagen in Europa das technische Potential haben, ca. 3,8 % des gesamten industriellen Wärmebedarfs zu decken (Vannoni et al., 2008). Dies entspricht vor dem Hintergrund des oben beschriebenen, für die EU 27 im Jahr 2006 identifizierten Prozesswärmebedarfs von 2.934 TWh/a einem technischen Potential von ca. 111 TWh/a oder ca. 250 Mio. m<sup>2</sup> (Solarerträge analog zu Vannoni et al. mit 450 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) abgeschätzt) (Hess et al., 2011). Im Vergleich mit der bis Ende 2009 in der EU 27 installierten Kollektorfläche von 46 Mio. m<sup>2</sup> (Weiß und Mauthner, 2011) wird deutlich, dass die Ausschöpfung des Prozesswärme-Potentials unter 250 °C in Europa in etwa eine Verfünffachung der insgesamt installierten Kollektorfläche bedeuten würde.

Für Deutschland wird von einem technischen Potential von 3,1 % des gesamten industriellen Wärmebedarfs ausgegangen (Lauterbach et al., 2011), was ca. 10 % des Wärmebedarfs unter 250 °C entspricht. Quantitativ entspricht dies 15,6 TWh/a bzw. analog zu obiger Abschätzung einer Kollektorfläche von ca. 35 Mio. m<sup>2</sup>.

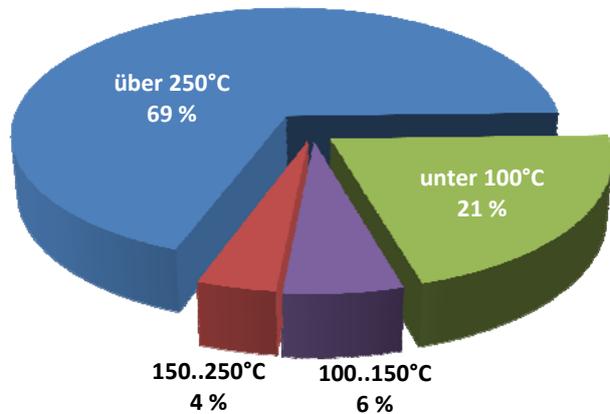


Abb. 1: Industrieller Wärmebedarf in Deutschland nach Temperaturniveau für das Jahr 2007 (Lauterbach et al., 2011)

## 1.2 Hemmnisse und Perspektiven

Im Gegensatz zu dem ermittelten hohen Potential sind bislang aber weltweit erst einige hundert Solarsysteme zur Erzeugung industrieller Prozesswärme installiert. Dies hat technische und betriebswirtschaftliche Gründe.

In der Regel ist der Planungsaufwand bei Prozesswärme-Solarsystemen erheblich höher als bei Standard-Solaranlagen im Wohnungssektor. Die Systemintegration ist im industriellen Bereich meist technisch erheblich komplexer, weil die bereits

installierte thermische Systemtechnik selbst innerhalb einer Branche sehr unterschiedlich sein kann. Auch müssen jeweils das thermische Lastprofil des Betriebes und mögliche Wechselwirkungen zwischen Solaranlage und bestehender Wärmeversorgung berücksichtigt werden. Oft besteht auch bei den Prozessen selbst hinsichtlich Prozessführung und Wärmerückgewinnung erhebliches Optimierungspotential, das im Vorfeld der Integration einer Solaranlage erschlossen werden sollte. Planern fehlen hier gegenwärtig sowohl branchenspezifische Kenntnisse und Konzepte zur Einbindung von Solarwärme, als auch leicht einsetzbare, spezifische Softwaretools. Das kann schon bei der Planung zu erheblichen Unsicherheiten bezüglich des tatsächlich zu erwartenden Ertrags einer Prozesswärme-Solaranlage führen. Hinzu kommt noch ein weiterer, entscheidender Punkt. Der tatsächliche Ertrag und abhängig von der solaren Anlagentechnik auch die Lebensdauer einer Prozesswärme-Solaranlage können bei Änderungen des Wärmebedarfs der unterstützten Prozesse erheblich variieren, wenn sich an den Integrationsstellen Lastprofil, Massenströme oder Temperaturniveaus ändern. Die Bewertung möglicher Langzeit-Änderungen des Wärmebedarfs eines potentiell zu unterstützenden Prozesses ist neben der technischen Integration selbst ein weiterer Punkt, der umfassendes Branchen-Know-how notwendig macht.

Betriebswirtschaftlich stellt die solare Erzeugung industrieller Prozesswärme ebenfalls eine große Herausforderung dar. In der Industrie wird in der Regel die Amortisationszeit einer Investition als wichtigste Bewertungsgröße angewandt. Hier werden oft Zeiträume von unter fünf Jahren erwartet, so dass für die erfolgreiche Umsetzung eines Projekts sowohl Planung und Installation als auch die eingesetzten Komponenten möglichst kostengünstig bzw. optimiert sein müssen. Um das zu erreichen ist wie oben beschrieben detailliertes branchenspezifisches Know-how wichtig, das Solarplanern heute in der Regel nicht zugänglich ist.

Wegen der hohen finanziellen Anforderungen ist es zudem essentiell, dass einmal installierte Anlagen auch tatsächlich die berechneten oder simulierten Erträge generieren und diese über den gesamten, der finanziellen Bewertung zu Grunde liegenden Betriebszeitraum gewährleisten sind. Deshalb sind auch Langlebigkeit und qualifizierte Wartung bei Solaranlagen zur Prozesswärme-Erzeugung von besonderer Bedeutung.

Korrekt geplante und realisierte Systeme können im industriellen Bereich allerdings unter günstigen Rahmenbedingungen (niedrige Temperaturniveaus, konstantes thermisches Lastprofil) bis zu doppelt so hohe Erträge pro  $m^2$  erzielen wie im Wohnungssektor (Hess und Oliva, 2010). Je nach veranschlagter Lebensdauer sind also vergleichsweise niedrige Wärmegegestehungskosten möglich. Dies ist eine gute Voraussetzung für Contracting. In So-Pro wurden verschiedene Contracting-Konzepte vorgestellt, mit deren Hilfe sich zukünftig womöglich gleichzeitig sowohl die Hürde der hohen Anfangsinvestition für die Firmen, als auch Einschränkungen durch geforderte kurze Amortisationszeiten überwinden lassen.

## 2. Projektpartner in So-Pro

Das IEE-Projekt So-Pro wurde von Mag. Christiane Egger vom Oberösterreichischen Energiesparverband koordiniert. Die Firma GERTEC war wissenschaftlicher Partner für industrielle Prozesse, das Fraunhofer ISE für solarthermische Anlagen. So-Pro startete im Juni 2009 und endete im September 2011.

	Partner	Region
	Koordinator: O.Ö. Energiesparverband (ESV, Mag. Christiane Egger)	Oberösterreich (Österreich)
	ESCAN	Regionen Kastilien u. Madrid (Spanien)
	Energy Centre České Budejovice (ECCB)	Südböhmen (Tschechien)
	GERTEC	Nordrhein-Westfalen (Deutschland)
	Sächsische Energieagentur (SAENA)	Sachsen (Deutschland)
	Energy agency of Podravje (Energap)	Podravje-Region (Slowenien)
	Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung (FHG-ISE)	(Deutschland)

Abb. 2: So-Pro Projektpartner und -regionen

## 3. Analyse der Rahmenbedingungen

Zu Beginn des Projekts wurden für jede teilnehmende Region die vorhandenen Rahmenbedingungen für solare Prozesswärme analysiert. Die aus dieser Analyse hervorgegangenen Publikationen

- “Regional Inventory”
- “Regional Report” zu “Energy Screenings” und Auswahl “Priority Applications”
- “Needs and Requirements of Successful Solar Thermal Contracting”

sind auf Englisch und in der jeweiligen Regionalsprache unter [www.solar-process-heat.eu/publications/reports](http://www.solar-process-heat.eu/publications/reports) verfügbar.

### 3.1 Regionale Bestandsaufnahmen

In jeder der teilnehmenden Regionen wurde zu Beginn ein sog. „Regional Inventory“ durchgeführt und in einem Bericht dokumentiert. Die Berichte enthalten z.B. jeweils Primärenergiepreise, typische Techniken der Wärmeerzeugung und der Stand der Technik im Bereich Solarthermie. Wichtige Marktteilnehmer und Interessengruppen für solare Prozesswärme werden für jede Region aufgeführt. Bestehende Prozesswärme-Solaranlagen werden beschrieben und regionale Förderprogramme für solare Prozesswärme und besonders interessante Branchen werden genannt.

### 3.2 Energy Screenings

Die regionalen Partner haben auch sog. „Energy Screenings“ innerhalb ihrer Regionen durchgeführt. Dabei wurden sehr einfach zu handhabende Checklisten, die in So-Pro entwickelt wurden, verwendet. Die wesentlichen Ziele der Screenings waren, potentielle Kandidaten für solare Prozesswärme-Installationen zu identifizieren und für alle Regionen einen Überblick über vielversprechende Industriezweige und Prozesse zu bekommen.

Auf Basis der Screenings wurden die sog. „Priority Applications“, also Anwendungen mit hohem Potential zur Integration von Solarwärme, definiert. Die regionalen Auswahlkriterien und Ergebnisse sowie die Energy Screenings selbst sind in den sog. „Regional Reports“ dokumentiert.

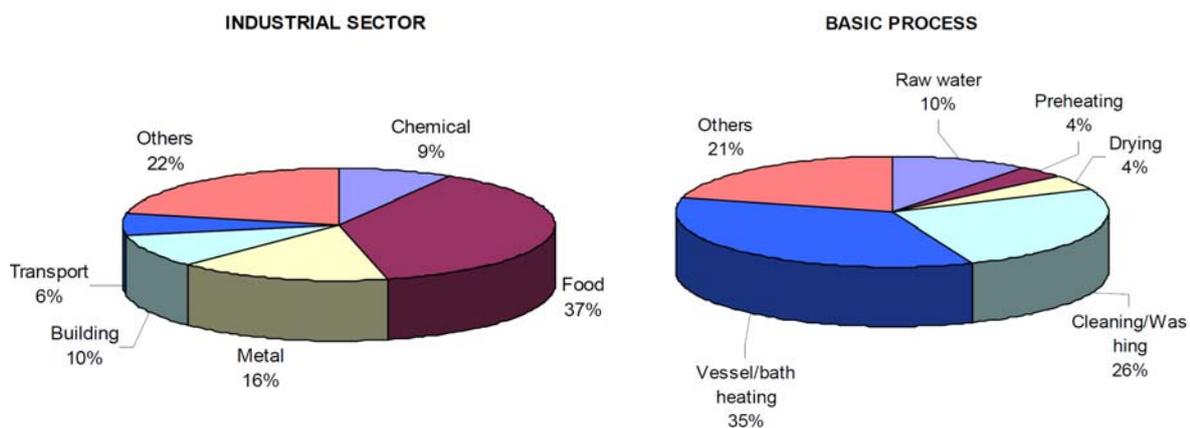


Abb. 3: Übersicht über die Ergebnisse der „Energy Screenings“ für die untersuchten Firmen aller teilnehmenden Regionen. Sie sind unterteilt nach Industrie-Sektoren (links) und grundlegenden Prozessen (rechts) (Quelle: „Report on 90 energy screenings“, [www.solar-process-heat.eu/publications/reports](http://www.solar-process-heat.eu/publications/reports))

Die in Abb. 3 und innerhalb dieses Kapitels genannten Anteile beziehen sich alle auf die Anzahl der untersuchten Firmen. Sie repräsentieren also nicht die Anteile der Wärmebedarfe der untersuchten Sektoren oder Prozesse.

Die potentiell zu ersetzenden konventionellen Energiequellen waren hauptsächlich Erdgas (55 %) und Heizöl (39 %). Fernwärme (5 %) und Elektrizität (1 %) spielten nur eine geringe Rolle. Die Temperaturen der untersuchten Prozesse an den potentiell zur Integration von Solarwärme geeigneten Stellen waren wie folgt verteilt: 5 % unter 30 °C, 38 % zwischen 30 °C und 60 °C, 20 % zwischen 60 °C und 75 °C und 37 % über 75 °C. Die Primärenergiekosten pro kWh variierten zwischen 2 und 12 Eurocent; durchschnittlich betrugen sie 4,7 Eurocent pro kWh.

Basierend auf den regionalen Bestandsaufnahmen und den Screenings wurde entschieden, im Projekt einen branchenübergreifenden Ansatz zu verfolgen (nicht limitiert auf bestimmte Sektoren oder Prozesse). Im Folgenden Kapitel werden die vier Priority Applications, auf die im Projekt fokussiert wurde, erläutert.

## 4. Der So-Pro Design Guide

### 4.1 Ziele und Inhalt des Leitfadens

The SO-PRO Design Guide (Hess und Oliva, 2010; Englische Version unter <http://www.solar-process-heat.eu/guide>) wurde im Projekt So-Pro erstellt und orientiert sich an der Darstellung der Ergebnisse des PROCESOL II - Projekts (Aidonis et al., 2002).

Der Leitfaden ist praxisorientiert und zielt darauf ab, die fehlenden Verknüpfungen zwischen dem Know-how von Solarfirmen, Prozessplanern und Energieberatern für die Industrie für vier verfahrenstechnische Grundoperationen bei Anwendungen mit hohem Potential bereitzustellen:

- Erwärmen von Fluiden (Wasser für Wasch- und Reinigungsprozesse)
- Vorwärmen (von Kessel-Zusatzwasser für offene Dampfnetze)
- Beheizen (von Bädern und Behältern)
- Konvektive Trocknung mit heißer Luft

Der Design Guide richtet sich entsprechend dieses übergeordneten Ziels an einen breiten Nutzerkreis. Deshalb werden nicht technische Details, sondern für jede der vier Anwendungen jeweils die relevantesten Charakteristika diskutiert. Dies gilt für die vier ausgewählten industriellen Prozesse wie für die dafür vorgeschlagenen solarthermischen Systemkonzepte. So soll sichergestellt werden, dass sowohl Solarfirmen, als auch Planer industrieller Prozesse und Energieberater schnellen und übersichtlichen Zugang zu den Informationen bekommen, die nicht Bestandteil ihrer täglichen Arbeit sind.

Für jede der vier priorisierten Anwendungen enthält der Design Guide beispielhafte thermische Lastprofile, solare Systemkonzepte und simulierte Auslegungs-Nomogramme. Anhand der Lastprofile werden für die jeweilige Anwendung häufig vorkommende Prozesscharakteristika erläutert, auf die bei der Voranalyse geachtet werden sollte. Die beispielhaften Systemkonzepte sind stark vereinfacht und sollen mögliche Lösungen zur Erzeugung der Solarwärme und ihre Einbindung in die jeweiligen Prozesse aufzeigen.

Der Design Guide wurde an die verschiedenen Regionen angepasst (z.B. wurden die Auslegungs-Nomogramme mit einer für die Region repräsentativen Stadt simuliert). Es sind also regionale Versionen in der jeweiligen Landessprache verfügbar.

Wesentliche Aussagen des Guides werden im Folgenden kurz zusammengefasst und die Handhabung wird an einem Beispiel vorgestellt. Ein ausführlicheres Beispiel mit Variationen zur Auslegung einer Solaranlage für einen Waschprozess mit den Standorten Würzburg und Madrid findet sich in Hess et al., 2011.

## **4.2 Integraler Planungsansatz**

Im Leitfaden wird ein integraler Planungsansatz mit vier verschiedenen, aufeinander aufbauenden Schritten vorgestellt. Diese Schritte sollten im Vorfeld der Installation einer solarthermischen Anlage durchgeführt werden, weil nur so die korrekte Dimensionierung der Anlage und gleichbleibend hohe Erträge über die Lebensdauer sichergestellt werden können.

Erster Schritt ist die Vor-Analyse des Gebäudes und der Rahmenbedingungen. Auch die Gründe, aus denen sich der Industriebetrieb mit solarer Prozesswärme auseinandersetzt, Zukunftspläne zur Modernisierung und die Häufigkeit verfahrenstechnischer Änderungen in der jeweiligen Branche sollten an diesem Punkt diskutiert werden. Ist diese Vor-Analyse positiv, müssen in einer Detail-Analyse das vorhandene Wärmenetz und die einzelnen thermischen Prozesse des Betriebs untersucht werden (ggf. mit Hilfe von Messtechnik). Im dritten Schritt sind Optimierungsmaßnahmen wie Wärmerückgewinnung und Prozessoptimierung zu prüfen und ggf. umzusetzen. Erst auf dieser Basis können solar unterstützende Prozesse ausgewählt und zuverlässige thermische Lastprofile erstellt werden. Dimensionierung und Detailplanung der Solaranlage stellen also erst den vierten Schritt im Planungsprozess einer Anlage zur Erzeugung solarer Prozesswärme dar.

## **4.3 Kennzahlen und Charakteristika**

Einige wichtige Kennzahlen und Charakteristika thermischer Industrieprozesse werden im Folgenden genannt:

- Thermische Last: Wärmebedarf innerhalb eines bestimmten Zeitraums (typischerweise Jahresbedarf)
- Thermisches Lastprofil: Variation der benötigten thermischen Leistung im Tages-, Wochen- und Jahresverlauf
- Integrationstemperatur: Temperaturniveau einer Einbindungsstelle für Solarwärme (z.B. am Eintritt des Wärmetauschers)
- Offene oder geschlossene Prozesse: Die Prozessführung ist offen, wenn das zu erwärmende Medium nicht zirkuliert. Vorteil offener Prozesse ist oft eine vergleichsweise niedrige Integrationstemperatur.
- Direkte oder indirekte Integration: Übertragung der Solarwärme an Prozesse über Wärmetauscher ist indirekt. Die Integration ist direkt, wenn der Wärmeträger stofflich vom Prozess verbraucht wird (z.B. Dampf in offenen Dampfnetzen).
- Integration auf Prozess- oder Versorgungsebene: Auf Prozessebene wird die Solarwärme unmittelbar an ausgewählte thermische Prozesse eines Betriebes übertragen; bei Integration auf Versorgungsebene wird sie an das industrielle Wärmenetz übertragen. Hier werden also mittelbar alle thermischen Prozesse des Betriebs solar unterstützt, die an das Versorgungsnetz angeschlossen sind.

#### 4.5 Beispiel: Beheizen von Bädern und Behältern

Bei der Anbindung an geschlossene Prozesse wie die Erwärmung von Bädern in Abb. 4 sind die Erträge meist deutlich niedriger als bei offenen Prozessen (vgl. Beispiele zu offenen Prozessen in Hess et al., 2011). Sie hängen stark von der jeweiligen Badtemperatur ab. Zusätzlich sind die solarthermischen Systemkonzepte, die Wärmeübertragung an den Prozess und die Wechselwirkungen mit der konventionellen Heiztechnik hier meist erheblich komplexer.

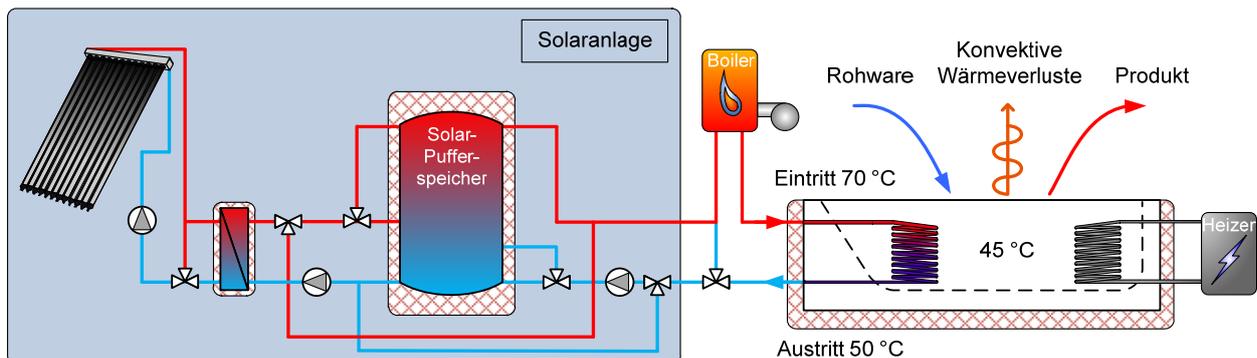


Abb. 4: Beispiel eines vereinfachten Systemkonzepts zur Beheizung eines Galvanikbades

Im Beispiel beträgt das Integrations-Temperaturniveau 50 °C. Beim Systemkonzept in Abb. 4 muss je nach Temperaturniveau des Bades besonders auf die korrekte Rücklauf-Einschichtung vom Prozess geachtet werden, damit in Zeiten nicht vollständiger Ladung des Pufferspeichers der untere Speicherteil nicht durch den Rücklauf des Bades aufgewärmt wird. Der Einsatz eines Speicherbypass sollte für solche Anwendungen ebenfalls geprüft werden. In diesem Fall muss die Ladepumpe des Pufferspeichers zusätzlich die Wärmeübertragung vom Solarwärmetauscher an das Bad übernehmen können. Dies stellt je nach notwendiger Temperaturstabilität im Bad hohe Anforderungen an die Regelung und die konventionelle Heiztechnik.

Setzt der Prozess einen regelmäßigen Austausch des Mediums im Bad voraus oder werden die Bäder z.B. am Wochenende abgekühlt, kann das aufgrund der zeitweise niedrigeren Integrationstemperatur ein Vorteil für das solarthermische System sein.

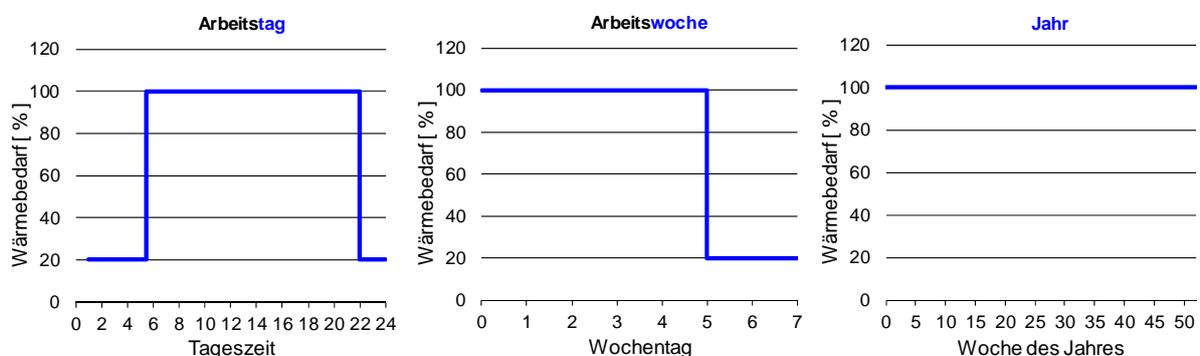


Abb. 5: Beispiel für das thermische Lastprofil eines kleinen Galvanik-Betriebes (Zwei-Schicht-Betrieb, Wochenenden frei, keine Betriebsferien, Energiebedarf auch nach Produktionsschluss weil das Medium im Galvanikbad auf Temperatur bleiben muss).

Der in Abb. 5 erkennbare Wärmebedarf am Wochenende kann den Jahresertrag eines Solarsystems steigern, weil Solarwärme dazu benutzt werden kann, diesen Wärmebedarf zu decken. So kann beispielsweise Strom für den Ausgleich der Wärmeverluste des Bades eingespart werden oder vermieden werden, dass der Brenner des Kessels in ineffizientem Teillastbetrieb läuft.

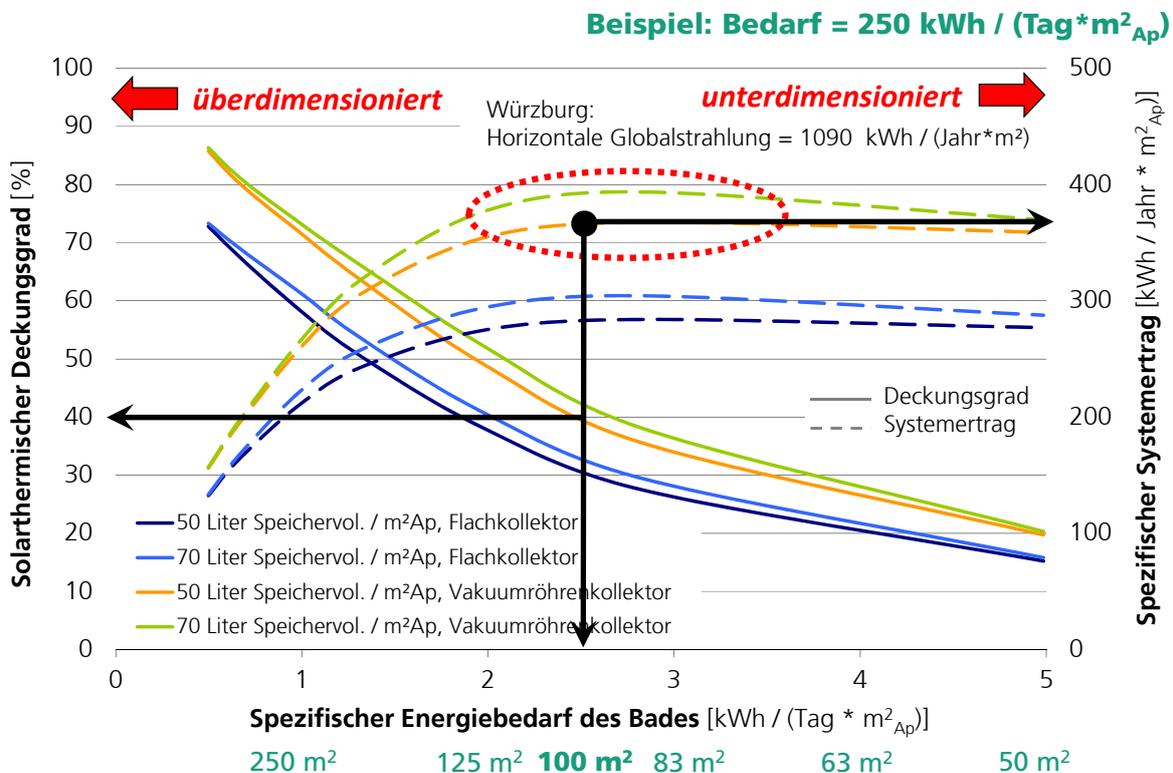


Abb. 6: Auslegungsnomogramm auf Basis von Parametervariationen bei der Simulation des Systems in Abb. 4 mit dem Lastprofil aus Abb. 5 für Würzburg. Kollektorneigung 35°, Schichtspeicher. Rot eingekreist ist der empfohlene Designraum.

Nomogramme werden mit Hilfe von Systemsimulationen erstellt. Die Darstellung von Simulationsergebnissen in dieser Form kann visualisieren, wie hoch die solarthermischen Systemerträge und der solare Deckungsgrad für einen untersuchten Prozess sein können, welches ein sinnvolles Verhältnis zwischen Prozesswärmebedarf und Kollektorfläche ist und welchen Einfluss verschiedene Speichervolumina auf den Systemertrag haben. Diese Nomogramme können zur Dimensionierung der Solarsysteme, für die Diskussion verschiedener Varianten mit Technikern und Geschäftsführern der Industriebetriebe oder zu Schulungszwecken eingesetzt werden.

In den Systemsimulationen zur Generierung eines Nomogramms wie in Abb. 6 werden nur zwei Parameter variiert:

- Verhältnis zwischen thermischer Last und installierter Kollektor-Aperturfläche
- Spezifisches Speichervolumen, d.h. das Speichervolumen pro m<sup>2</sup> Aperturfläche

Alle anderen individuellen Rahmenbedingungen wie Ort der Produktionsstätte, Lastprofil und Integrationstemperatur des unterstützten Prozesses, das solarthermische Systemkonzept, Art und Neigung der Kollektoren etc., bleiben während der Parametervariation konstant. In Abb. 6 wurde für zwei spezifische Speichervolumen und Kollektortypen die Entwicklung des solaren Deckungsgrades bei verschiedenen Auslastungen (hier der spezifische Energiebedarf des Bades) als durchgehende Linien dargestellt. Der solare Deckungsgrad bezieht sich auf die zur Interpretation des Nomogramms konstant zu haltende thermische Last, die das Solarsystem decken soll. Auf der linken Seite des Nomogramms befinden sich überdimensionierte Systeme im Vergleich zur Last (hoher Deckungsgrad), die rechte Seite zeigt eher unterdimensionierte Systeme (geringer Deckungsgrad).

Im Bereich großer Systeme gegenläufig ist die Entwicklung des solaren Systemertrags, der als unterbrochene Linien dargestellt ist. Es wurden spezifische Größen verwendet, damit das Nomogramm skalierbar ist. D.h. es wird davon ausgegangen, dass sich bei gleichem Verhältnis von Kollektorfläche und Energiebedarf des Bades die Erträge jeweils direkt proportional ändern. Die schwarzen Pfeile zeigen eine mögliche Auslegung mit einem solaren Deckungsgrad von 40 %.

Die Verwendung des Nomogramms ist in Abb. 6 anhand des grünen Beispiels illustriert. Wird für einen mittelständischen Galvanik-Betrieb in Würzburg z.B. im Jahresdurchschnitt ein täglicher Wärmebedarf von 250 kWh ermittelt, würden entsprechend der schwarz eingezeichneten Auslegung Vakuumröhrenkollektoren mit  $100 \text{ m}^2_{\text{Ap}}$  und ein Speicher mit  $5 \text{ m}^3$  installiert. Der solare Systemertrag wäre dann bei einem spezifischen Ertrag von ca.  $365 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{Ap}} \cdot \text{Jahr})$  circa 36,5 MWh/Jahr.

Die Erhöhung des spezifischen Speichervolumens auf  $70 \text{ l}/\text{m}^2_{\text{Ap}}$  könnte die spezifischen Erträge noch auf fast  $400 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{Ap}} \cdot \text{Jahr})$  steigern; in diesem Fall könnte z.B. auch das Kollektorfeld auf  $83 \text{ m}^2_{\text{Ap}}$  reduziert und mit dann  $5,8 \text{ m}^3$  Speicher kombiniert werden. Damit würde noch ein Deckungsgrad von ca. 37 % erreicht. Die Installation von mehr als  $125 \text{ m}^2_{\text{Ap}}$  (Auslastung kleiner  $2 \text{ kWh}/(\text{Tag} \cdot \text{m}^2_{\text{Ap}})$ ) erscheint in diesem Beispiel nicht sinnvoll, weil dann durch Stagnationsphasen im Sommer die ohnehin nicht sehr hohen Systemerträge noch weiter sinken würden.

## 5. Diskussion der Hilfsmittel im Leitfaden

Um das Nomogramm in Abb. 6 zu generieren wurden Systeme für sieben verschiedene Auslastungen mit zwei Kollektortypen und zwei spezifischen Speichervolumen in TRNSYS 16 simuliert. Zur Erzeugung jedes Nomogramms im Design Guide waren also 28 verschiedene Jahressimulationen notwendig.

Für die Darstellung der Ergebnisse wurden bewusst nur spezifische Größen verwendet, so dass die Nomogramme komplett skalierbar und damit unabhängig von der absoluten thermischen Last des Prozesses sind. Bei dieser Darstellungsvariante besteht für den Planer die Möglichkeit abzuschätzen, wie sich der in Abb. 6 mittig eingezeichnete Designpunkt verschiebt, wenn sich die thermische Last ändert (z.B.

weil die reale thermische Last des Prozesses von der zur Planung verwendeten abweicht oder weil sich der Wärmebedarf des Prozesses während der Lebensdauer der Solaranlage ändert). So wird direkt aus der Grafik eine Abschätzung der Varianz der spezifischen Systemerträge möglich, was z.B. zur Kalkulation und Risikobewertung von Contracting wichtig sein kann.

Die Simulationsergebnisse für Bäder und Behälter zeigen, dass die spezifischen Systemerträge bei klein dimensionierten Systemen wieder fallen, dass also ein Ertragsmaximum existiert. Dies hat mehrere Ursachen. Wenn die Kollektorfeldgrößen und damit die absoluten Speichervolumen kleiner werden vergrößert sich das Verhältnis von Speicher Oberfläche zu Speichervolumen. Damit steigen bei den in diesem System häufig vorkommenden hohen Temperaturen im Speicher die thermischen Verluste, auch weil die Anzahl der Speicheranschlüsse und damit deren thermischen Verluste gleich bleiben. Ebenso steigt auch der Einfluss der thermischen Verluste und der Kapazitäten der hydraulischen Leitungen vom Kollektorfeld zum Speicher und vom Speicher an den Prozess, weil diese nicht direkt proportional zur Kollektorfeldgröße abnehmen sondern als konstant angenommen wurden. Aus diesen Überlegungen wird klar, dass auch die Skalierbarkeit der Nomogramme an sich eine vereinfachende Annahme ist.

Die Nomogramme im Design Guide dienen der Darstellung der Methodik und als Orientierung zu möglichen Erträgen. Aufgrund der Vielzahl der den Solarertrag beeinflussenden Parameter werden die meisten zu planenden Anlagen in erheblichem Maß von den Rahmenbedingungen abweichen, die für die Simulationen im Design Guide angenommen wurden. Planer müssen zur Auslegung realer Anlagen also selbst Auslegungs-Nomogramme mit Hilfe von Simulationen erstellen um individuelle Standorte, Systemkonzepte, Lastprofile, Integrationstemperaturen etc. zu berücksichtigen. Auslegung und Planung von solarthermischen Prozesswärme-Systemen muss aber auch viele Faktoren berücksichtigen, die aus simulierten Nomogrammen nicht direkt ersichtlich sind. Einer dieser Punkte ist Stagnation. Aus Nomogrammen lässt sich für großzügig dimensionierte Systeme nicht erkennen, welcher Anteil an den geringeren spezifischen Erträgen auf gestiegene thermische Verluste und welcher auf Stagnation zurückzuführen ist. Nur erfahrene Planer können Stagnationszeiten im System abschätzen und das Risiko negativer Folgen für Anlagentechnik und Wärmeträgerfluid realistisch bewerten.

## **6. Reflektion und Handlungsempfehlungen**

Die Realisierung der Pilotanlagen war aufgrund der schwierigen wirtschaftlichen Situation eine der größten Herausforderungen im Projekt. Die „optimale“ Auslegung der Solaranlage (z.B. die realisierte Kollektorfeldgröße) wurde oft nicht vorrangig durch technische Rahmenbedingungen, sondern durch die Motivation, aus der heraus sich Industriebetriebe für solare Prozesswärme entschieden, bestimmt. Keine

der Pilotanlagen wurde über Contracting realisiert. Zu den generellen Anforderungen für Solarthermie-Contracting kommen im Prozesswärmebereich noch besondere Risiken durch zu wenige Referenzprojekte und Änderungen der Wärmebedarfe der Prozesse hinzu. Trotzdem erscheint Contracting nach wie vor als vielversprechende Option zur Überwindung der finanziellen Hürden.

Für die Entwicklung der Planungshilfen hat sich der prozessspezifische Ansatz von So-Pro bewährt. Für die weitere Markterschließung erscheint allerdings ein paralleler, branchenspezifischer Ansatz sinnvoll, weil so vielversprechende Integrationsstellen und auch positive Erfahrungen mit Referenzprojekten innerhalb von Branchennetzwerken kommuniziert werden können. Die öffentliche Förderung von Referenzprojekten sollte erhöht werden, damit zeitnah eine kritische Masse von Leuchtturmprojekten erreicht werden kann. Diese sollten von Experten geplant, dokumentiert und über Monitoring analysiert werden. Nur so entstehen Referenzprojekte, die Investoren ansprechen und die Risikobewertung, auch bei Contracting, positiv beeinflussen. Solarfirmen, Planer und Installateure müssen in der zuverlässigen Realisierung solcher Anlagen geschult werden. Einige dieser Themen werden im neuen **IEA-SHC Task 49: "Solar Process Heat for Production and Advanced Applications"** adressiert, der Anfang 2012 offiziell begonnen hat.

## Literatur

- Aidonis**, A., Drosou, V., Mueller T., Staudacher, L., Fernandez-Llebrez, F., Oikonomou, A., Spencer, S., 2002. PROCESOL II - Solar thermal plants in industrial processes. Design and Maintenance Guidelines. CRES, Pikermi. URL: [www.energytech.at/pdf/procesol\\_2\\_english.pdf](http://www.energytech.at/pdf/procesol_2_english.pdf)
- Egger**, Ch., et al., 2011. Solar Process Heat So-Pro. Publishable, result-orientated report. Final report des IEE-projekts So-Pro (IEE/08/425/SI2.528532). URL: [www.solar-process-heat.eu/report](http://www.solar-process-heat.eu/report)
- Eisenmann**, W., Hess, S., Klemke, M., Kramp, G., 2011. Entwicklung eines leistungsgesteigerten Flachkollektors mit Reflektoren für die Gewinnung von Prozesswärme bis 150 °C. Abschlussbericht (FK BMU 0329 280 C). URL: <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb11/668455144.pdf>
- Hess**, S., Oliva, A., 2010. Guide to Solar Thermal System Design for Selected Industrial Processes. O.Ö. Energiesparverband, Linz. URL: [www.solar-process-heat.eu/guide](http://www.solar-process-heat.eu/guide)
- Hess**, S., Oliva, A., Hermann, M., Stryi-Hipp, G., Hanby, V., 2011. Solar Process Heat – System Design for Selected low-temperature Applications in the Industry. ISES Solar World Congress, Kassel
- Lauterbach**, C., Schmitt, B., Vajen, K., 2011. Das Potential solarer Prozesswärme in Deutschland. Teil 1 des Abschlussberichts zum Forschungsvorhaben SOPREN, Solare Prozesswärme und Energieeffizienz (FK BMU 0329601T).
- Weiss**, W., Mauthner, F., 2011. Solar Heat Worldwide Edition 2011: Markets and Contribution to the Energy Supply 2009. AEE INTEC, Gleisdorf. URL: <http://www.aee-intec.at/0uploads/dateien757.pdf>
- Sanner**, B., Kalf, R., Land, A., Mutka, K., Papillon, P., Stryi-Hipp, G., Weiss, W., 2011. 2020-2030-2050 - Common Vision for the Renewable Heating & Cooling sector in Europe. European Technology Platform on Renewable Heating and Cooling, Brussels. URL: [http://www.rhc-platform.org/cms/fileadmin/Documents/RHC\\_BROCHURE\\_140311\\_web.pdf](http://www.rhc-platform.org/cms/fileadmin/Documents/RHC_BROCHURE_140311_web.pdf)
- Vannoni**, C., Battisti, R., Drigo, S., 2008. Potential for Solar Heat in Industrial Processes. CIEMAT, Madrid. URL: [www.iea-shc.org/task33/publications](http://www.iea-shc.org/task33/publications)
- Weiss**, W., Biermayr, P., 2009. Potential of Solar Thermal in Europe. European Solar Thermal Industry Federation (ESTIF), Brussels. URL: <http://www.aee-intec.at/0uploads/dateien758.pdf>