

SolFood

Leitfaden zur Vorplanung solarer Prozesswärme

Machbarkeitsabschätzung und Vorauslegung
solarthermischer Prozesswärmeanlagen



S O L A R .
UNI-KASSEL.DE

Solarwärme für die
Ernährungsindustrie

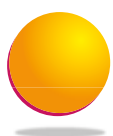


In der Innenseite des Rückumschlags finden Sie eine Checkliste zur Machbarkeitsabschätzung, die die Arbeit mit diesem Leitfaden vereinfacht.

SolFood

Leitfaden zur Vorplanung solarer Prozesswärme

Machbarkeitsabschätzung und Vorauslegung
solarthermischer Prozesswärmeanlagen



S O L A R .
UNI-KASSEL.DE

Solarwärme für die
Ernährungsindustrie



Über den Leitfaden

Der industrielle Sektor bietet mit seinem hohen und über das Jahr konstant anfallenden Wärmeverbrauch sehr gute Randbedingungen für solare Prozesswärme. Der Begriff solare Prozesswärme beschreibt die Nutzung von Solarwärme bei der Bereitstellung industriell und gewerblich genutzter Wärme. Gut 20 % des industriellen Wärmebedarfs werden unterhalb von 100 °C verbraucht, weitere 10 % zwischen 100 und 300 °C. Trotz des großen Potentials hat sich diese Technologie innerhalb der Industrie noch nicht etabliert. Dies liegt an der Komplexität der Industrie als Anwendungsgebiet für Solarwärme. Die Vielzahl von unterschiedlichen Wärmeverbrauchern erschwert die Identifikation geeigneter Integrationspunkte, die hydraulische Einbindung von Solarwärme sowie die Auslegung von Kollektorfläche und Speicher. Auf standardisierte Systeme wie im Bereich der Trinkwarmwasserbereitstellung oder Heizungsunterstützung kann dabei nicht zurückgegriffen werden.

Vor dem Bau einer solaren Prozesswärmanlage steht als erster Schritt meist eine Machbarkeitsabschätzung, welche bisher sehr viel Erfahrung voraussetzt und häufig auch einen großen Aufwand mit sich bringt. Dieser Schritt ist jedoch von elementarer Bedeutung, um eine Entscheidungsfindung des Unternehmens herbeizuführen und ein Projekt zur Bereitstellung solarer Prozesswärme überhaupt anzustoßen.

Der vorliegende Leitfaden soll daher die Grundlagen für eine solche Machbarkeitsabschätzung vermitteln und den Aufwand zu Projektbeginn deutlich reduzieren. Hierzu werden die wichtigsten Schritte erläutert, welche im Rahmen einer Machbarkeitsabschätzung zu durchlaufen sind. Der Leitfaden beinhaltet die Analyse eines Betriebes, die Identifikation relevanter Wärmeverbraucher und die Auswahl geeigneter Integrationspunkte für Solarwärme. Weiterhin wird eine Möglichkeit zur Vorauslegung von Kollektorfläche und Speicher vorgestellt und die Ertragsabschätzung erläutert. Mit den vorgestellten Randbedingungen zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung hat ein Anlagenplaner damit alle benötigten Informationen zur Ausarbeitung eines Konzeptes zur Bereitstellung solarer Prozesswärme. Zur besseren Verständlichkeit beinhaltet der Leitfaden ein Beispiel, das den Nutzer durch die einzelnen Kapitel begleitet.

Die Kapitel 5 und 6 zur Auslegung und Ertragsabschätzung gelten für Anwendungen bis 100 °C. Der restliche Inhalt des Leitfadens kann für jegliche Anwendungen unabhängig vom Temperaturniveau genutzt werden.

Kassel, im März 2015

Bastian Schmitt, Christoph Lauterbach, Klaus Vajen

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhalt

Kapitel	Seite	
1 Wichtige Randbedingungen	07	1
2 Erfassung Ist-Zustand	08	2
3 Identifikation relevanter Wärmeverbraucher	11	3
4 Auswahl geeigneter Integrationspunkte	15	4
5 Vorauslegung Kollektorfläche und Speicher	19	5
6 Ertragsabschätzung	24	6
7 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	27	7
8 (Detail-) Planung	28	8
9 Anhang	28	9
Impressum	63	
Checkliste	Einklappseite	

Beispiel

Zur besseren Nachvollziehbarkeit der einzelnen Schritte, wird in diesem Leitfaden eine fiktive Machbarkeitsabschätzung bei einem norddeutschen Schlachtbetrieb für Geflügel durchgeführt. Dieses Beispiel wird in jedem Kapitel aufgegriffen und soll verdeutlichen, wie die vorgestellten Schritte umgesetzt werden können.

Die gesamte Prozesswärme des Schlachtbetriebes fällt unter 100 °C an und wird mittels eines erdgasbetriebenen Dampfkessels bereitgestellt (10 bar Versorgungsdruck). Das mittelständische Unternehmen verfügt über ausreichend nutzbare Dachflächen, gibt als Obergrenze für mögliche Amortisationszeiten vier Jahre an und steht Contracting offen gegenüber.

1 Wichtige Randbedingungen

Bevor Sie die einzelnen Schritte dieses Leitfadens durchlaufen, sollte geprüft werden, ob es offensichtliche Gründe gibt, die **gegen die Nutzung thermischer Solarenergie** in dem betrachteten Unternehmen sprechen.

Werden die Fragen 1, 2 und 3 zu Dachflächen, Temperaturniveau oder Anfall des Wärmebedarfs mit Nein beantwortet, so ist die Realisierung einer solaren Prozesswärmanlage sehr unwahrscheinlich. Ebenso kann die **konventionelle Wärmebereitstellung** Hinweise auf die Chancen einer Umsetzung geben. Erfolgt die Wärmebereitstellung beispielsweise mittels Kraft-Wärme-Kopplung, Hackschnitzeln oder günstiger Nah- bzw. Fernwärme, so wird eine Solaranlage aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten nur schwer zu realisieren sein.

Zur Klärung der wirtschaftlichen Randbedingungen dient die letzte Frage. Unter Berücksichtigung der Investitionskosten und der erzielbaren Erträge ist es sehr schwer solare Prozesswärmanlagen zu realisieren, die **Amortisationszeiten** von unter 5 Jahren erzielen. Dies ist häufig jedoch die absolute

Obergrenze für viele, zumindest größere Unternehmen. Meist liegt der „Wohlfühlbereich“ sogar bei zwei bis drei Jahren. Sollte ein Unternehmen also keine höheren Amortisationszeiten akzeptieren, so bleibt als einzige Option für eine Umsetzung die Nutzung von **Contracting**. In diesem Falle wird die Solaranlage von einem Contractor errichtet und betrieben – das Unternehmen bezieht lediglich die Solarwärme zu einem vereinbarten Preis. Sollte auch diese Option für das Unternehmen nicht in Frage kommen, ist die Durchführung einer Machbarkeitsabschätzung zur Nutzung solarer Prozesswärme nur wenig sinnvoll.

Konnten auf Basis der rechts aufgelisteten Fragen keine Randbedingungen identifiziert werden, die zunächst gegen eine Nutzung thermischer Solarenergie sprechen, liegt der nächste Schritt in einer Erfassung des Ist-Zustandes.

Folgende Fragen sind vorab zu klären:

1. *Sind Dach- oder Freiflächen vorhanden, die unter Berücksichtigung von Statik, Ausrichtung und möglicher Verschattung eine Installation von Sonnenkollektoren ermöglichen?*
2. *Liegt ein nennenswerter Teil des Wärmebedarfs des betrachteten Unternehmens unterhalb von 150 °C, besser sogar unterhalb 100 °C?*
3. *Fällt der Wärmebedarf relativ gleichmäßig innerhalb der Woche und des Jahres oder sogar bevorzugt im Sommer an?*
4. *Wie erfolgt bisher die Wärmebereitstellung?*
5. *Sind Amortisationszeiten über 5 Jahre bei Investitionen in die energetische Infrastruktur akzeptabel? Stellt Contracting eine Option für die Geschäftsführung dar?*

1

2

3

4

5

6

7

8

9



www.solfood.de

2 Erfassung Ist-Zustand

Um geeignete Wärmeverbraucher innerhalb eines Unternehmens zu identifizieren und mögliche Integrationspunkte für Solarwärme auszuwählen, muss zunächst der energetische Ist-Zustand des Produktionsstandortes erfasst werden. Dies beinhaltet im Wesentlichen die Erzeugung, Verteilung und Nutzung von Wärme. Dabei gilt es mit Hilfe eines geeigneten Fragebogens und Telefonaten möglichst aufwandsarm die wichtigsten Informationen zu erheben.

Im Anhang findet sich der im Rahmen des Sol-Food Projekts verwendete **Fragebogen**, welcher als Hilfestellung genutzt werden kann. Die dort abgefragten Informationen beziehen sich zunächst auf die **Branche und Unternehmensgröße**. Damit können bei Bedarf allgemeine Informationen zu Prozessen und Energieverbrauchsbenchmarks sowie zu verfügbaren Fördermitteln recherchiert werden. Nachfolgend werden mit dem Fragebogen das **Produktspektrum** des Unternehmens sowie die täglichen, wöchentlichen und jährlichen **Produktionszeiten** abgefragt.

Bei stark saisongeprägten Branchen wie beispielsweise der Obst- und Gemüseverarbeitung gilt es darauf zu achten, dass neben den Sommermonaten auch in der Übergangszeit ausreichend Wärmebedarf vorhanden ist.

Daraufhin sollte erfasst werden, welche **Energieträger** in welchem Umfang bei dem Unternehmen verbraucht werden. In der Regel liegen diese Daten in monatlicher, manchmal sogar in wöchentlicher Aufschlüsselung vor. Mit den Angaben zu Kosten und der nachfolgend abgefragten **Anlagentechnik zur Wärmebereitstellung** kann der konventionelle Wärmepreis abgeschätzt werden. Dieser stellt den Vergleichswert für die später zu ermittelnden solaren Wärmegestehungskosten dar. Um potentielle Abwärmequellen auf niedrigem Temperaturniveau zu berücksichtigen, gilt es zumindest die **Anzahl und Leistung der installierten Kompressoren** zur Kälte- und Druckluftbereitstellung zu erfassen.

Nach den energetischen Randbedingungen sollten die wichtigsten Informationen zu den **Produktionsprozessen** erfasst werden, wobei lediglich Prozesse mit einem nennenswerten Wärmeverbrauch von Interesse sind. Neben der Prozesstemperatur ist es von Bedeutung, wie die Beheizung des jeweiligen Prozesses erfolgt (inkl. Vor- und Rücklauftemperaturen), und ob ggf. Kaltwasser in den Prozess eingebracht wird, welches aufgeheizt werden muss. Häufig ist es auch sinnvoll, Angaben zur Heizung von Verwaltungs- und Produktionsgebäuden oder Lagerhallen einzuholen, da dies möglicherweise einen großen Anteil am gesamten Wärmeverbrauch einnehmen kann. Neben der Heizperiode sind vor allem die benötigte Temperatur und die zur Beheizung verwendete Anlagentechnik relevant. Schließlich sollten auch die in Frage kommenden **Dach- und Freiflächen** hinreichend genau erfasst werden. Neben der Fläche, Ausrichtung und Neigung ist es wichtig die statische Belastbarkeit zu prüfen. Zudem ist eine Abschätzung des Abstands zwischen geeigneter Fläche und potentiellen Verbrauchern (Prozess, Kesselhaus oder Wärmenetz) sinnvoll.



Normalerweise sollten alle erläuterten Informationen ohne einen Vor-Ort-Termin einzuholen sein und ausreichen, um die nachfolgenden Schritte der Machbarkeitsabschätzung und Vorplanung zu durchlaufen. Handelt es

sich um einen sehr komplexen Betrieb mit einer Vielzahl von unterschiedlichen Wärmeverbrauchern, so kann die **Durchführung eines Audits** hilfreich sein.

Schlachthöfe gehören zur fleischverarbeitenden Industrie und verfügen in der Regel nur über wenige Prozesse mit Wärmebedarf. Durchschnittlich werden 60 % des Wärmebedarfs eines Geflügelschlachtbetriebes für das Brühen aufgewendet, 30 % zur Reinigung und Desinfektion und 10 % für die Gebäudeheizung.

Das betrachtete Unternehmen erfüllt hinsichtlich der Mitarbeiterzahl und des Umsatzes die KMU-Kriterien (weniger als 250 Mitarbeiter und Jahresumsatz maximal 50 Mio. Euro bzw. Jahresbilanzsumme maximal 43 Mio. Euro). Das Unternehmen verarbeitet ausschließlich Masthähnchen und produziert fünf Tage pro Woche in drei Schichten ohne nennenswerte Unterbrechungen im Jahresverlauf. Hinsichtlich der Einbindung von Solarwärme erscheint lediglich das Brühen der Schlachtkörper als aussichtsreich. Dies findet bei 50..60 °C statt, um das nachfolgende Entfernen der Federn zu vereinfachen. Das Warmwasser für die Reinigung wird größtenteils mit der Abwärme der Kältemaschinen bereitgestellt. Die Produktionshallen werden über dezentrale Lüftungssysteme beheizt, die über einen Dampfanschluss verfügen. Aufgrund von Dachaufbauten der Lüftungssysteme und Rückkühlern der Kältebereitstellung können von der gesamten Dachfläche der Produktions- und Lagerhallen etwa 1000 m² für eine Solaranlage genutzt werden. Die statische Belastbarkeit beträgt 80 kg/m².

Beispiel

1

2

3

4

5

6

7

8

9

Audit – Vorbereitung und Durchführung

Die **Vorbereitung eines Audits** umfasst zunächst die zuvor erläuterte Erfassung grundlegender Informationen zum Unternehmen unter Verwendung des vorgestellten Fragebogens. Mit Hilfe der enthaltenen Information kann eine tiefergehende Vorbereitung erfolgen. Dabei können in Abhängigkeit des gewünschten bzw. möglichen Aufwands die wichtigsten Informationen zur Branche, den Produktionsabläufen, relevanten Prozessen mit ihrer Anlagentechnik sowie typischen Maßnahmen zur Energieeffizienz und Wärmerückgewinnung eingeholt werden. Zusätzlich kann es sinnvoll sein, mögliche Erfahrungen bei der Einbindung regenerativer Energiequellen zu recherchieren. Neben branchenspezifischer Fachliteratur und der Dokumentation sogenannter BVTs (beste verfügbare Techniken) können hierfür auch Studien zur Effizienzsteigerung und Abwärmenutzung oder Berichte über durchgeführte Forschungsvorhaben und Fallstudien genutzt werden.

Während des **Vor-Ort-Termins** sind zunächst offene Fragen aus der Vorbereitung zu klären und die groben Produktionsabläufe und Energieverbrauchsdaten durchzusprechen. Anschließend sollte das zuständige Personal die wesentlichen Fakten zu Funktion und Betriebsweise (z. B. Temperaturniveau, Laufzeiten, etc.) der aus thermischer Sicht relevanten Prozesse erläutern. Zudem gilt es abzugleichen, welche der geforderten Daten im Vorhinein bereits durch das Unternehmen übermittelt wurden und welche wichtigen Daten noch ausstehen. Bei einer anschließenden Betriebsbegehung sollten die zuvor besprochenen Prozesse sowie die Nebeneinrichtungen (Wärme-, Kälte- und Druckluftbereitstellung) begutachtet werden.

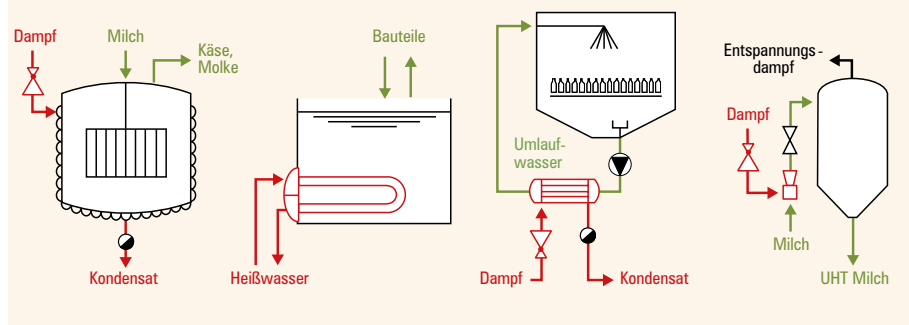
Mit den während der Vorbereitung, des Vor-Ort-Termins und ggf. im Anschluss daran gesammelten Daten kann eine **Bilanzierung des Produktionsstandortes** erfolgen. Aus der Bilanzierung muss hervorgehen, wie sich der Wärmeverbrauch auf einzelne Produktionsbereiche oder Prozesse verteilt. Hierbei sollte es jedoch nicht das Ziel sein, alle Verbraucher mit der genauen Höhe ihres Wärmeverbrauchs lückenlos zuzuordnen. Vielmehr müssen die relevanten Verbraucher ermittelt und deren Bedarf abgeschätzt werden. Da häufig keine detaillierten Verbrauchsdaten einzelner Prozesse vorliegen, können zusätzliche Wärmemengenummessungen nötig sein, um den Verbrauch auf einzelne Bereiche oder Prozesse herunterzubrechen. Aufgrund des Aufwands empfehlen sich solche Messungen jedoch nur, wenn auf Basis der bereits zur Verfügung stehenden Informationen eine Nutzung von Solarwärme sinnvoll erscheint. Hinsichtlich einer etwaigen Einbindung von Solarwärme muss bereits während der Bilanzierung gezielt auf die konventionelle Beheizungsart der Wärmeverbraucher geachtet werden. Schließlich sollten auch die nutzbaren Dach- und Freiflächen bezüglich ihrer Entfernung zu relevanten Prozessen, dem Kesselhaus oder anderen relevanten Wärmeverteilpunkten innerhalb des Unternehmens und zu möglicherweise nutzbaren Speichern untersucht werden.

3 Identifikation relevanter Wärmeverbraucher

Die industrielle Anlagentechnik zur Bereitstellung und Nutzung von Wärme unterscheidet sich maßgeblich von den aus Haushalten bekannten Technologien. Daher ist es für Akteure im Bereich solarer Prozesswärme von großer Bedeutung die relevantesten Technologien zu kennen. Aus diesem Grund beinhalten die folgenden Abschnitte zunächst einige Hintergrundinformationen zur industriellen Wärmebereitstellung und -nutzung.

In den meisten Industriebetrieben erfolgt die **Wärmeerzeugung und -verteilung** durch ein zentrales Kesselhaus. Dort wird hauptsächlich mit Dampf- oder Heißwasserkesseln, ggf. auch mit Blockheizkraftwerken, Wärme bereitgestellt. Als Energieträger wird häufig Erdgas verwendet, teilweise kommen auch Kohle, Fernwärme oder Heizöl zum Einsatz. In den meisten Fällen wird Dampf erzeugt, der über ein zentrales Verteilnetz den jeweiligen Wärmeverbrauchern zugeführt wird. Neben den Produktionsprozessen selbst sind dies oft auch die Gebäudeheizung und Warmwasserbereitstellung.

Beispiele zur Beheizung industrieller Prozesse



Die **Beheizung industrieller Prozesse** mit Dampf erfolgt häufig indirekt, also mit Hilfe eines Wärmeübertragers. Diese können in unterschiedlichen Bauarten als externes Element oder intern als Teil des Prozesses ausgeführt sein. Vor allem Bäder, Maschinen oder Tanks werden häufig mit internen Wärmeübertragern wie beispielsweise Rohrbündel und -schlangen oder Heizmänteln beheizt. Neben der Verwendung von Wärmeübertragern werden Prozesse auch direkt durch die Injektion von Dampf beheizt werden. Zusätzlich finden sich in der Industrie eine Vielzahl von Verdampfer- und Trocknerbauarten, welche mit unterschiedlichen internen oder externen Wärmeübertragern beheizt werden. Obenstehende Abbildung zeigt

einige Beispiele für die Beheizung industrieller Prozesse.

Bei der Verwendung eines dampfbeheizten Wärmeübertragers fällt Kondensat an, was zurück zum Kesselhaus geführt werden muss. In den meisten Fällen erfolgt die **Kondensatrückführung** bei Umgebungsdruck. Daher kommt das Kondensat in Kontakt mit der Atmosphäre und muss vor der erneuten Nutzung im Dampferzeuger entgast werden. Entstehende Kondensatverluste durch die atmosphärische Rückführung sowie die möglichen direkten Dampfverbraucher werden mittels Zusatzwasser ausgeglichen, welches zunächst entsalzt und anschließend genau wie das Kondensat entgast werden muss.

1

2

3

4

5

6

7

8

9

Welche der vielfältigen Wärmeverbraucher eines Unternehmens als relevant hinsichtlich einer möglichen Einbindung von Solarwärme eingestuft werden, hängt von verschiedenen Randbedingungen ab. Aus Unternehmenssicht ist der wichtigste Indikator meist die jeweilige **Höhe des Wärmebedarfs** sowie der Anteil am gesamten Wärmeverbrauch. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass aufgrund der meist unzureichenden Dachflächen der absolute Wärmebedarf eines Prozesses aus solarthermischer Sicht häufig eine untergeordnete Rolle spielt. Einzelne Prozesse können allerdings auch seitens des Unternehmens aus Marketingaspekten als besonders relevant eingestuft werden.

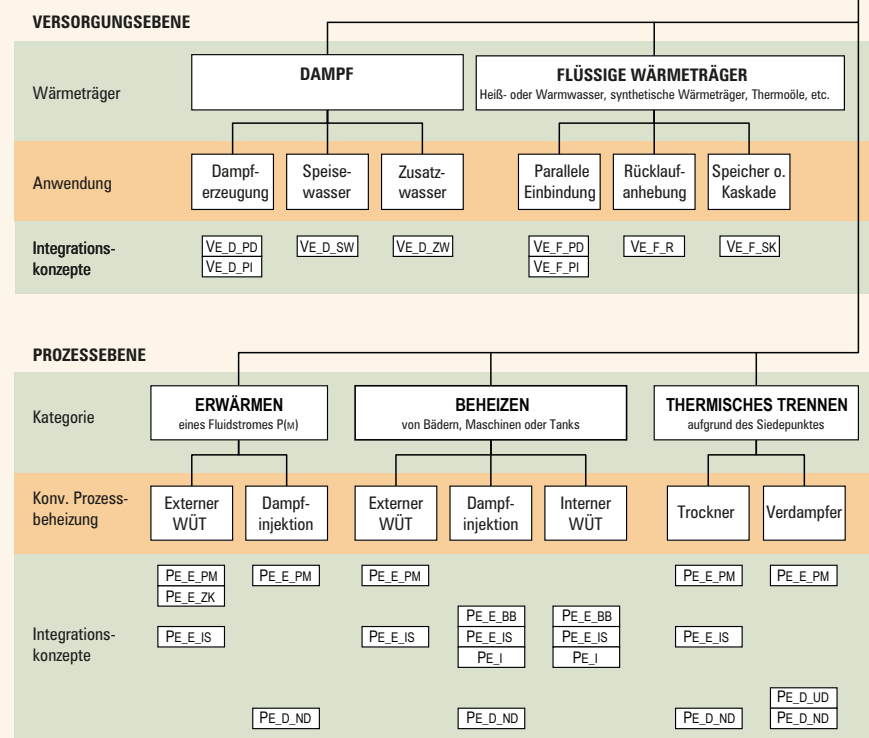
Eine weitere wichtige Randbedingung bei der Identifikation geeigneter Prozesse ist die **Effizienz der verwendeten Anlagentechnik**. Die Abschätzung des Effizienzstands kann wichtige Hinweise bezüglich einer mittelfristigen Erneuerung der Anlagentechnik geben, was unter Umständen signifikante Auswirkungen auf eine Solaranlage haben kann.

Die Berücksichtigung nutzbarer Abwärme ist von besonderer Bedeutung, da diese in direkter Konkurrenz zu einer thermischen Solaranlage steht. Neben prozessinterner Abwärme sollten auch die Nebeneinrichtungen geprüft werden, da hier oftmals ungenutzte Abwärme verloren geht (siehe hierzu Infobox auf Seite 13).

Im Rahmen einer Machbarkeitsabschätzung gilt es, einen **Überblick der vielfältigen Wärmeverbraucher** des betrachteten Betriebes zu bekommen, relevante Verbraucher zu identifizieren und diese anschließend hinsichtlich der Einbindung von Solarwärme zu bewerten. Um diese Schritte zu vereinfachen, kann die in der nachfolgenden Abbildung dargestellte Klassifizierung industrieller Wärmeverbraucher genutzt werden. In dieser Klassifizierung können alle industriellen Wärmeverbraucher verschiedenen Ebenen und Kategorien zugeordnet werden, die schließlich wichtige Hinweise für die eigentliche

Einbindung von Solarwärme geben. Gemäß der dargestellten Klassifizierung unterscheidet man bei der Integration von Solarwärme zwischen **Versorgungs- und Prozessebene**. Die Versorgungsebene beinhaltet die Wärmebereitstellung und -verteilung. Je nachdem welches konventionelle Wärmeträgermedium (Dampf oder Flüssigkeit) verwendet wird und ob die Solarwärme in den Vor- oder Rücklauf eingespeist werden soll, ergeben sich unterschiedliche Integrationskonzepte (hier mit Abkürzungen dargestellt und in Kapitel 4 erläutert).

Klassifizierung industrieller Wärmeverbraucher und Integrationsmöglichkeiten



Zur Vereinfachung der vielfältigen industriellen Prozesse werden zunächst die Wärmeverbraucher auf **Prozessebene**, entsprechend der vorangestellten Übersicht, unterschiedlichen Kategorien zugeordnet. Dabei stehen „Erwärmen eines Fluidstroms“, „Beheizen von Bädern, Maschinen oder Tanks“ und „Thermisches Trennen“ zur Auswahl. Anschließend erfolgt eine weitere Unterteilung anhand der konventionellen Beheizung des Prozesses.

Prozesse bei denen ein Fluidstrom aufgeheizt wird, werden typischerweise entweder mittels externen Wärmeübertragern oder

Dampfinjektion beheizt. Zum Beheizen von Bädern, Maschinen oder Tanks können darüber hinaus auch interne Wärmeübertrager verwendet werden. Die Bezeichnung „interne Wärmeübertrager“ umfasst an dieser Stelle Rohrbündel und -schlangen, elektrische Heizelemente, Heizmäntel, Platecoils und Dimple Plates sowie direkt befeuerte Prozesse. Die Kategorie „Thermisches Trennen“ unterscheidet zwischen Konvektions- und Kontaktrocknern sowie Verdampfern. Während die beiden Trocknertypen den Großteil aller thermischen Trocknungsverfahren umfassen, werden Verdampfer häufig auch zur

Destillation und Rektifikation benötigt und decken damit auch diese beiden Trennprozesse ab. Somit können alle thermischen Prozesse innerhalb der Industrie einer der drei Kategorien zugeordnet werden.

Wärmerückgewinnung der Nebeneinrichtungen

Grundsätzlich sollten vor der Einbindung einer thermischen Solaranlage oder anderer Wärmequellen zur Bereitstellung von Prozesswärme die **Möglichkeiten zur Wärmerückgewinnung** geprüft werden. Neben branchen- oder prozessspezifischen Wärmerückgewinnungsmaßnahmen gilt dies auch für die Nebeneinrichtungen. Bei der Bereitstellung von Wärme, Kälte und Druckluft finden sich branchenübergreifend immer wieder ungenutzte Abwärmeströme. Diese stellen mit einem Temperaturniveau von meist unter 60 °C eine direkte Konkurrenz zu Solarwärme dar und sind daher stets zu prüfen.

Heißwasser- und Dampfkessel sollten prinzipiell über einen **Economiser** (Abgaswärmeübertrager) verfügen, der das Speisewasser vor dem Eintritt in den Kessel erwärmt. Durch das Abkühlen des Abgases im Gegenstrom zum Speisewasser lassen sich Wirkungsgradgewinne von etwa 5 Prozentpunkten erzielen. Zusätzlich fällt nutzbare Abwärme bei der sogenannten **Absalzung** im Kessel sowie bei der **Entgasung** des Speisewassers an. Bei der Kälteerzeugung betragen die nutzbaren Temperaturen oft über 60 °C am Verdichter und etwa 25..30 °C am Kondensator. Bei der Bereitstellung von Druckluft kann unter optimalen Bedingungen bis zu 90 % der Kompressorleistung in Form von Abwärme rückgewonnen werden. Abhängig von der Kompressorbauart liegt das nutzbare Temperaturniveau bei 50..90 °C.

Für den Fall, dass bisher ungenutzte Abwärme anfällt, sollte die jeweilige Menge quantifiziert, Angaben zum zeitlichen Anfall gemacht und mögliche Abnehmer in unmittelbarer Nähe gesucht werden. Generell gilt, dass der Aufwand zur Auskopplung der Wärme und dem letztendlich nutzbaren Temperaturen maßgeblich von der installierten Anlagentechnik bestimmt wird. Zudem können auch die jeweiligen Platzverhältnisse die Möglichkeiten der Abwärmenutzung einschränken.

Beispiel

In unserem betrachteten Schlachtbetrieb konnten drei Wärmesenken identifiziert werden: Brühen, Reinigen und Hallenheizung. Die Hallenheizung scheint aufgrund der vielen dezentralen, mittels Dampf beheizten Einheiten als wenig aussichtsreich für die Einbindung von Solarwärme. Für die Reinigung könnte Solarwärme genutzt werden, wobei jedoch ein Großteil der benötigten Wärme bereits durch Wärmerückgewinnung gedeckt wird. Das Brühen erfolgt mit Wasser gefüllten Tanks, durch die das Geflügel kontinuierlich hindurchgezogen wird. Das Wasser der Brühltanks wird einmal wöchentlich ausgewechselt. Zudem wird während des Betriebes ein konstanter Wasserzulauf zum Ausgleich der Verschleppungsverluste benötigt. Der aus dem Verschleppungsverlust resultierende Wärmebedarf scheint am aussichtsreichsten für die Integration von Solarwärme. Die Beheizung des Brühbades erfolgt mittels Dampfinjektion. Eine Integration auf Versorgungsebene wird bei diesem Betrieb nicht in Betracht gezogen. Der Energiebedarf für die Zusatzwasseraufheizung des Dampfkessels wird über die kesselhausinterne Wärmerückgewinnung gedeckt und eine solare Dampferzeugung macht aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten in Deutschland nur wenig Sinn. Für die solare Dampferzeugung werden in der Regel konzentrierende Kollektoren benötigt, die ausschließlich direkte Solarstrahlung nutzen können. Da allerdings über die Hälfte der Einstrahlung in Deutschland diffus ist und damit von konzentrierenden Kollektoren nicht genutzt werden kann, kommen diese Systeme nur auf verhältnismäßig kurze Betriebszeiten.

4 Auswahl geeigneter Integrationspunkte

Wird eine geeignete Wärmesenke innerhalb eines Betriebes identifiziert kann diese der zuvor dargestellten Klassifizierung zugeordnet werden. Die Klassifizierung gibt eine oder mehrere **Möglichkeiten zur Integration von Solarwärme** vor (Kästchen mit Abkürzung). Stehen mehrere Integrationskonzepte zur Auswahl, lässt sich die Anzahl häufig durch die jeweiligen Randbedingungen vor Ort reduzieren. Wird beispielsweise ein Prozess für die Einbindung von Solarwärme ausgewählt, bei dem Wasser für Reinigungszwecke mittels Dampfinjektion erwärmt wird, gibt die Klassifizierung zwei mögliche Integrationskonzepte vor. Unter Berücksichtigung der gegebenen Randbedingung kann daraufhin geprüft werden, ob sich die Einbindung eines externen Wärmeübertragers (PE_E_PM) oder die Bereitstellung von Dampf mit Niederdruck (PE_D_ND) für eine Umsetzung besser eignet. Bei einer Einbindung von Solarwärme auf Versorgungsebene wird beispielsweise die Wahl zwischen dem Vor- oder Rücklauf meist durch die am Standort verfügbare Einstrahlung bestimmt. Bei Standorten mit viel direkter Sonneneinstrahlung kann Solarwärme in der Regel mit konzentrierenden Kollektoren auf

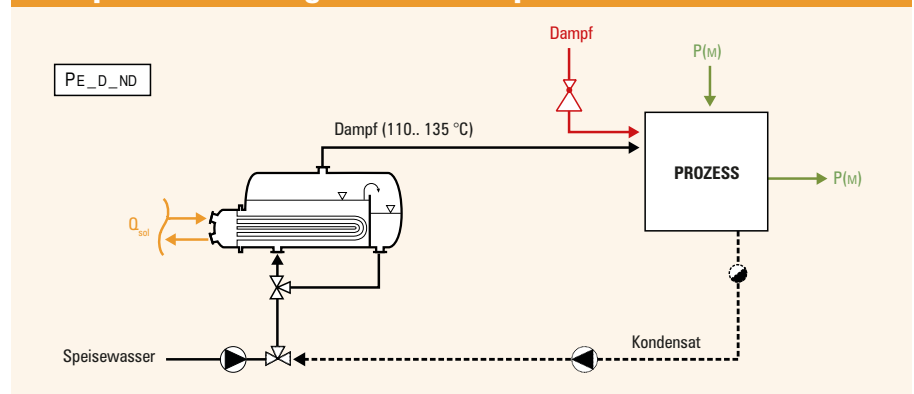
einem hohen Temperaturniveau in den Vorlauf der Versorgungsebene eingespeist werden. Auf Prozessebene gilt zu beachten, dass unter Umständen auch zwei Integrationskonzepte kombiniert werden können.

Die in der Klassifizierung aufgeführten Integrationskonzepte zeigen ein **Verfahrensfließbild zur Visualisierung der hydraulischen Einbindung**. Dabei ist die Schnittstelle dargestellt, an der die Solarwärme in die konventionelle Anlagentechnik eingebracht werden sollte. Beispielhaft zeigt untenstehende Abbildung das Integrationskonzept PE_D_ND . Dabei wird auf Prozessebene (PE) ein geeigneter Rohrbündelwärmeübertrager solar beheizt,

um Dampf ($_D$) auf einem niedrigen Druckniveau ($_ND$) bereitzustellen, der direkt für die Beheizung eines Prozesses genutzt werden kann. Das Fließbild deutet an, dass der Prozess konventionell mittels Dampfinjektion beheizt wird. Alle anderen in der Klassifizierung aufgelisteten Integrationskonzepte für potentielle Wärmesenken auf Versorgungs- und Prozessebene finden sich im Anhang.

Nach der Erfassung des Ist-Zustandes und der Identifikation relevanter Wärmeverbraucher finden sich an einem Produktionsstandort in der Regel mehrere Integrationspunkte, die sich für die Einbindung von Solarwärme eignen. Ebenso können für einen Integrations-

Beispiel eines Integrationskonzeptes



1

2

3

4

5

6

7

8

9

punkt (z.B. Beheizung eines Bades) mehrere Integrationsmöglichkeiten in Frage kommen. Für eine Entscheidungsfindung im Rahmen der Machbarkeitsabschätzung ist eine **Gegenüberstellung und Bewertung dieser Möglichkeiten** hilfreich. Dabei sollten für alle potentiellen Integrationspunkte das jeweilige Temperaturniveau, die Betriebszeit, besondere Eigenschaften in der Betriebsweise (Anfahrts- und Stillstandszeiten, Lastspitzen) sowie Angaben zur konventionellen Prozessbeheizung (Technik und Regelung) bekannt sein. Die Bewertung erfolgt anhand der Kriterien Temperaturniveau, Lastprofil und Aufwand zur Integration und wird nachfolgend erläutert.

1. Temperatur

Grundsätzlich sinkt der Wirkungsgrad eines Kollektors mit steigender mittlerer Kollektortemperatur, wodurch sich der Ertrag reduziert. Aus diesem Grund ist in Deutschland und Ländern mit vergleichbaren klimatischen Bedingungen das solar bereitzustellende **Temperaturniveau das wichtigste Kriterium** bei einer Entscheidung für einen Integrationspunkt. Infolgedessen sind für eine solare Unterstützung vornehmlich Anwendungen mit niedriger Prozesstemperatur oder Prozesse, bei denen eine Vorwärmung möglich ist, zu bevorzugen. Allerdings ist zu beachten, dass von der Temperatur eines Prozesses nicht automatisch auf die Temperatur geschlossen werden kann, die eine Solaranlage für eine Integration bereitstellen muss. Die solar bereitzustellende Temperatur variiert in Abhängigkeit der Art und Weise, wie die Solarwärme in den Prozess eingebracht wer-

den kann. Wird beispielsweise ein bei 60 °C betriebenes Reinigungsbad für Metallteile mit Hilfe eines zusätzlichen externen Wärmeübertragers solar beheizt, kann bereits eine solare Vorlauftemperatur genutzt werden, die 10 K über der Prozesstemperatur liegt. Würde die Solarwärme hingegen über eine Mantelheizung genutzt werden, müsste die solare Vorlauftemperatur deutlich höher als 70 °C sein.

Aus energetischer und damit meist auch aus wirtschaftlicher Sicht ist vor allem die Einbindung von Solarwärme auf einem niedrigen Temperaturniveau sinnvoll. Aus diesem Grund ist die **Prüfung nutzbarer Abwärme** besonders wichtig, da diese in direkte Konkurrenz zur Einbindung von Solarwärme tritt. Gerade in einem für Solarwärme attraktiven Temperaturbereich bis 60 °C findet sich häufig Abwärme, beispielsweise von Kompressoren (siehe Infobox am Ende von Kapitel 3, S. 13).

2. Lastprofil

Das zweite, wichtige Kriterium bei der Auswahl eines Integrationspunktes ist das Lastprofil. Grundsätzlich sollten Prozesse bevorzugt werden, die möglichst **lange und konstante Laufzeiten** aufweisen. Da die meisten Betriebe nur montags bis freitags oder ggf. samstags produzieren, sollte der Pufferspeicher einer Solaranlage derart ausgelegt werden, dass mindestens der solare Energieeintrag eines Tages gespeichert werden kann. In diesem Fall verfügt der Pufferspeicher über ausreichend Kapazität, um etwaige Schwankungen der Last innerhalb eines Tages zu kompensieren. Aus diesem

Grund ist das tägliche Lastprofil für die Auswahl eines geeigneten Integrationspunktes von untergeordnetem Stellenwert (außer bei Betrieben die an sieben Tagen pro Woche produzieren). Wichtiger ist hingegen die Laufzeit innerhalb einer Woche. Der ausgewählte Integrationspunkt sollte an möglichst allen Produktionstagen einen Wärmebedarf haben. Prinzipiell besteht jedoch auch die Möglichkeit, einen Prozess mit weniger Betriebstagen solar zu unterstützen. Einige Beispiele für relevante Lastprofile sind in der Infobox am Ende dieses Abschnittes gegeben.

Exakte Aussagen bezüglich einer erforderlichen **Mindestlaufzeit eines Prozesses innerhalb einer Woche** lässt sich allerdings nur schwer treffen. Ein Prozess, der jeden zweiten Tag betrieben wird, eignet sich z.B. wesentlich besser für die Einbindung von Solarwärme als ein Prozess, der zwar die gleiche Laufzeit innerhalb einer Woche hat, allerdings an direkt aufeinanderfolgenden Tagen betrieben wird. Dies ist in der bereits erläuterten Speicherdimensionierung begründet. Möglicherweise kann die Nutzung von Solarwärme für mehrere Prozesse vorteilhaft sein, wenn dies zu einer Vergleichmäßigung der Last führt. **Im Laufe eines Jahres** sollte der solarunterstützte Prozess zumindest in den Sommermonaten keine nennenswerten Unterbrechungen aufweisen. Eine zweiwöchige Produktionsunterbrechung in der einstrahlungsreichen Zeit kann zu Ertragseinbußen von gut 5% führen, was möglicherweise eine Umsetzung wirtschaftlich in Frage stellen könnte. Produktionsunterbrechungen im Winter haben hingegen keinen nennenswerten Einfluss auf den Jahresertrag einer Solaranlage.

Hinsichtlich des Lastprofils bietet vor allem die Einbindung von Solarwärme auf Versorgungsebene deutliche Vorteile gegenüber der Versorgung eines einzelnen Prozesses. Aufgrund der Vielzahl an Wärmeverbrauchern, die an das Netz angeschlossen sind, sollte sich in der Regel ein konstantes Lastprofil innerhalb der Produktionszeit ergeben. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, Solarwärme auch außerhalb der Produktionszeiten zu nutzen. So kann die eingespeiste Solarwärme beispielsweise an Wochenenden Stand-by-Verluste der Wärmebereitstellung kompensieren. Um Solarwärme auf einem für die Versorgungsebene geeigneten Temperaturniveau bereit-

stellen zu können, ist jedoch häufig ein hoher Anteil direkter Solarstrahlung erforderlich.

3. Integrationsaufwand

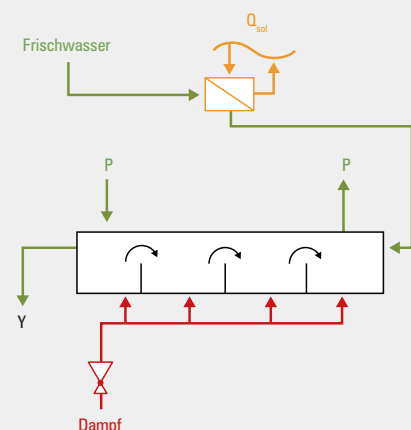
Das letzte, wichtige Kriterium bei der Auswahl eines geeigneten Integrationspunktes ist der Aufwand zur Einbindung der Solarwärme in das bestehende System. Dieser kann in Abhängigkeit des jeweiligen Prozesses stark variieren. Während beispielsweise bei der Warmwasserbereitstellung für Reinigungszwecke im besten Fall lediglich ein Wärmeübertrager zuzüglich Peripherie (Pumpe, Ventil, Rohrleitung, etc.) für die Einbindung benötigt werden, kann dies bei der Beheizung

von Bädern oder Maschinen unter Umständen deutlich komplizierter ausfallen. Möglicherweise muss hier eine aufwendige Nachrüstung mit speziellen internen Wärmeübertragern erfolgen. In den meisten Fällen ist die Integration bei Prozessen, welche mit externen Wärmeübertragern betrieben werden aufgrund der Zugänglichkeit und Möglichkeit einer seriellen Vorschaltung eines solarbeheizten Wärmeübertragers einfacher zu realisieren als bei Prozessen mit interner Beheizung. Neben den benötigten Komponenten zur Einbindung der Solarwärme kann sich allerdings auch die Regelung der zusätzlichen Wärmequelle als unterschiedlich komplex erweisen.

Beispiel

Der zuvor als geeigneter Integrationspunkt identifizierte Brühprozess fällt in der auf Seite 12 vorgestellten Klassifizierung unter die Kategorie „Beheizen von Bädern, Maschinen oder Tanks“. In Verbindung mit der konventionellen Beheizung mittels Dampfinjektion gibt die Klassifizierung vier prinzipiell mögliche Integrationskonzepte vor. Dies sind die externe Badbeheizung ($P_{E_E_BB}$), die Aufheizung eines Inputstromes ($P_{E_E_IS}$), die Einbindung eines zusätzlichen internen Wärmeübertragers (P_{E_I}) sowie die Bereitstellung von Dampf im Niederdruckbereich ($P_{E_D_ND}$). Die Integrationskonzepte finden sich im Anhang.

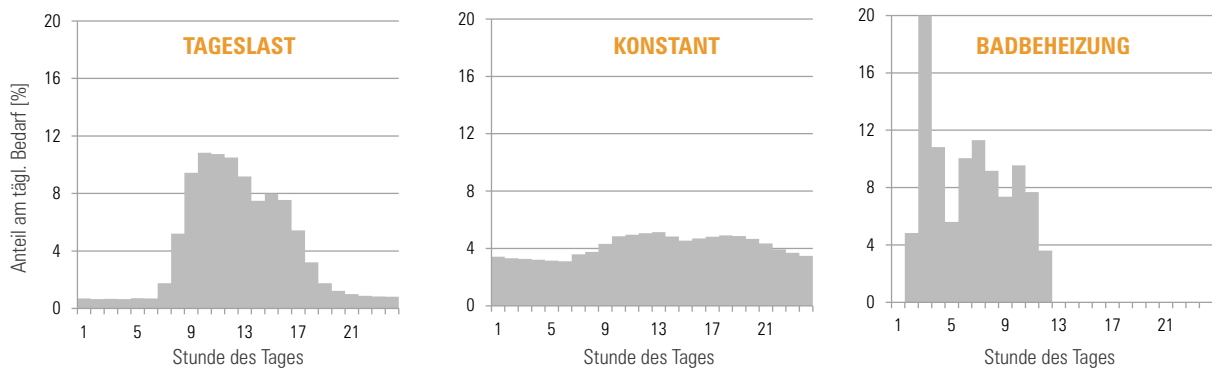
Unter Berücksichtigung der realen Randbedingungen wird deutlich, dass innerhalb der Brühtanks kein ausreichender Platz für zusätzliche Einbauten vorhanden ist, wodurch das Integrationskonzept P_{E_I} ausgeschlossen werden kann. Gegen die anderen drei Konzepte sprechen zunächst keine der erfassten Randbedingungen. Nach der Gegenüberstellung der drei zuvor erläuterten Kriterien Temperatur, Lastprofil und Integrationsaufwand fällt die Wahl auf das Integrationskonzept $P_{E_E_IS}$. Dabei wird der kontinuierlich eingespeiste Frischwasserstrom mittels Solarwärme vorgewärmt. Dies hat den Vorteil, dass die Solaranlage bereits mit niedrigen Temperaturen den Prozess bedienen kann. Das solar bereitzustellende Temperaturniveau ist damit deutlich niedriger als bei den anderen beiden Möglichkeiten (Badbeheizung mittels ext. WÜT oder Dampferzeugung mit Niederdruck). Zudem ist die Einbindung eines zusätzlichen externen Wärmeübertragers in den Frischwasserzulauf vergleichsweise einfach.



Lastprofile

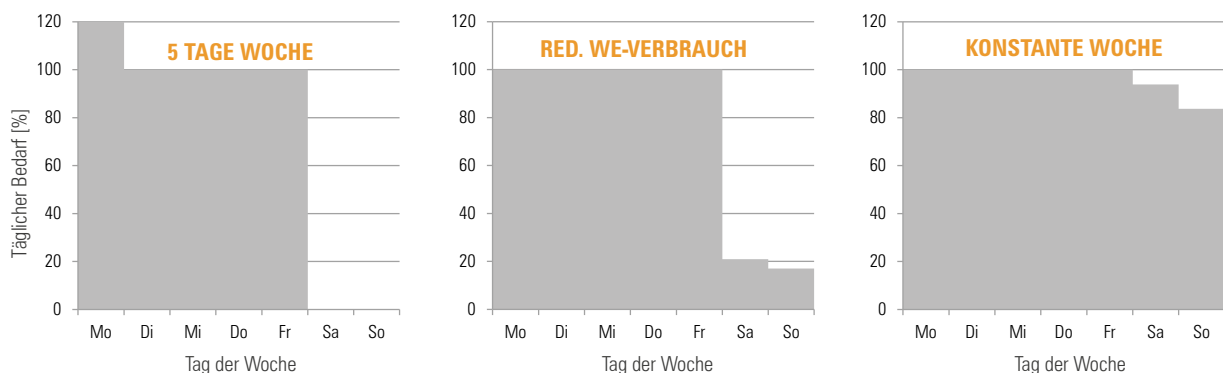
Bei der Nutzung solarer Prozesswärme gibt es unterschiedliche Typen von Lastprofilen, die bei der Auslegung berücksichtigt werden sollten. Während für die Dimensionierung von Kollektorfläche und Speichervolumen das tägliche und ggf. auch wöchentliche Lastprofil des ausgewählten Integrationspunktes eine wichtige Rolle spielt, ist bei der Ertragsabschätzung zusätzlich der Jahresverlauf der Last von Bedeutung.

Ausgewählte tägliche Lastprofile



Ein häufig anzutreffendes Profil für einschichtig arbeitende Betriebe ist „Tageslast“. Bei dieser Darstellung liegen die Produktionszeiten zwischen 8:00 und 18:00 Uhr, was sich je nach Unternehmen oder Produktionslinie auch verschieben kann. Das zweite Profil „Konstant“ repräsentiert einen dreischichtig arbeitenden Betrieb, das dritte Profil „Badbeheizung“ stellt einen eher unregelmäßigen Produktionsverlauf mit einem größeren Peak zu Produktionsbeginn dar. Auch hier können Start- und Endzeit variieren.

Ausgewählte wöchentliche Lastprofile



Auch bei den wöchentlichen Lastprofilen gibt es verschiedene Möglichkeiten. Oftmals produzieren Unternehmen nicht am Wochenende. Dadurch stellt sich samstags und sonntags kein oder nur ein sehr geringer Wärmebedarf ein, wie dies in den Profilen „5 Tagewoche“ und „Reduzierter Wochenendverbrauch“ dargestellt ist. Idealer für die Einbindung von Solarwärme wäre hingegen das Lastprofil „Konstante Woche“, da hier auch am Wochenende ein Wärmebedarf vorhanden ist.

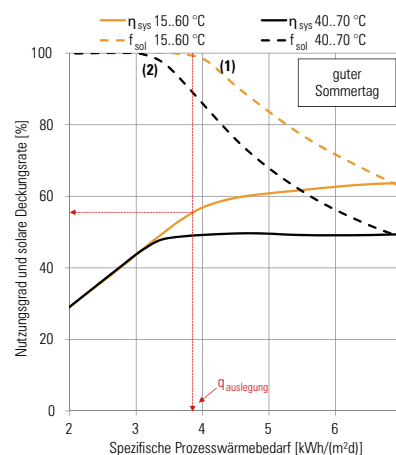
5 Vorauslegung Kollektorfläche und Speicher

Für die **Vorauslegung der Kollektorfläche** kann der Ansatz aus der VDI 6002 auf solare Prozesswärme übertragen werden.

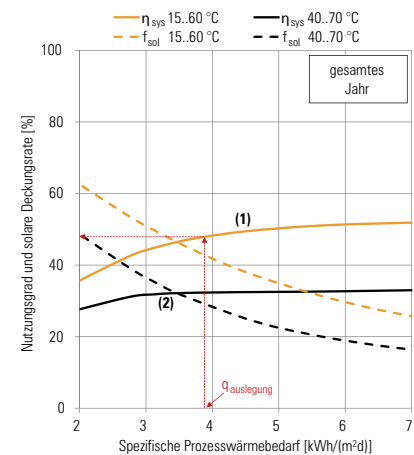
Dabei wird die Solaranlage auf einen guten Sommertag (tägliche Strahlungssumme über 7 kWh/m²) ausgelegt. Dies bedeutet, dass die Solaranlage an einem guten Sommertag den Prozesswärmebedarf des ausgewählten Integrationspunktes gerade decken kann, womit Überschüsse im Sommer vermieden werden. Dadurch können hohe spezifische Erträge erzielt werden, die für eine Wirtschaftlichkeit entscheidend sind. Allerdings sind die erzielbaren solaren Deckungsraten bei einer solchen Auslegung begrenzt, was im industriellen Sektor jedoch eine untergeordnete Rolle spielt. In vielen Industriebetrieben reichen die verfügbaren Dachflächen ohnehin nicht für eine hohe solare Deckungsrate, da das Verhältnis von Wärmeverbrauch zu verfügbarer Dachfläche wesentlich größer ist als beispielsweise bei Ein- oder Mehrfamilienhäusern. Entscheidender Vorteil dieses Ansatzes liegt in der einfachen Vergleichbarkeit eines guten Sommertages für verschiedene Standorte sowohl in Deutschland als auch in Europa. Des Weiteren lässt sich ein typischer

Wärmebedarf für einen Tag leichter abschätzen als für ein gesamtes Jahr.

Als Auslegungspunkt für die Solaranlage wird ein spezifischer Prozesswärmebedarf gewählt, der an einem guten Sommertag von genau einem Quadratmeter Kollektorfläche gedeckt werden kann. Dadurch produziert die Solaranlage keine Überschüsse und Stagnationszeiten werden minimiert. Demnach stellt sich bei dieser Art der Auslegung an einem guten Sommertag eine solare Deckungsrate (f_{sol}) von 100% ein.



Die Abbildung unten zeigt beispielhaft den Nutzungsgrad und die solare Deckungsrate einer Solaranlage an einem guten Sommertag (links) und über das Jahr (rechts) für zwei mögliche Integrationspunkte mit verschiedenen Temperaturanforderungen. Die dargestellten Temperaturbereiche beinhalten jeweils die minimale Rücklauf- und die maximal mögliche Vorlauftemperatur. In den nachfolgenden Ausführungen werden diese beiden Temperaturen zur Vereinfachung als Prozess-temperaturen bezeichnet. In Abhängigkeit dieser Temperaturen ergeben sich verschiede-



Nutzungsgrad (η_{sys}) und Deckungsrate (f_{sol}) an einem guten Sommertag (li.) und für ein Jahr (re.) für zwei mögliche Integrationspunkte mit den Prozesstemperaturen 15.60 °C (1) und 40.70 °C (2). Gültig für folgende Randbedingungen: verbesserter Flachkollektor, tägl. Lastprofil „Tageslast“, Wochenprofil „Konstante Woche“, Jahresprofil „Konstant“, Standort Würzburg.

1

2

3

4

5

6

7

8

9

dene Werte für den spezifischen Prozesswärmebedarf, welchen ein m² Kollektorfläche an dem guten Sommertag bereitstellen kann (Ziel: solare Deckungsrate knapp unter 100%). Dieser Auslegungswert ($q_{\text{auslegung}}$) gibt damit den kleinstmöglichen spezifischen Prozesswärmebedarf pro m² Kollektorfläche an und damit auch die maximal sinnvolle Kollektorfläche. Während ein kleinerer spezifischer Prozesswärmebedarf zu solaren Überschüssen an guten Sommertagen führt und damit nicht zu empfehlen ist, würde ein größerer spezifischer Prozesswärmebedarf in einer kleineren Solaranlage resultieren und damit prinzipiell umsetzbar sein.

Wie aus der Abbildung auf Seite 19 hervorgeht, liegt der Auslegungswert für einen Integrationspunkt mit den Temperaturen 15..60 °C bei 3,9 kWh/(m²d) und für die Temperaturen 40..70 °C entsprechend bei 3,3 kWh/(m²d). Das bedeutet, dass ein Quadratmeter Bruttofläche (im Fall eines verbesserten Flachkollektors) pro 3,9 bzw. 3,3 kWh Prozesswärmebedarf pro Tag installiert werden sollte. Liegt beispielsweise der typische tägliche Wärmebedarf eines Integrationspunktes mit den Temperaturen 40..70 °C bei etwa 1.000 kWh, so lässt sich die benötigte Bruttofläche einer Solaranlage wie folgt berechnen:

$$A_{\text{Koll}} = \frac{Q_{\text{Prozess, Tag}}}{q_{\text{auslegung}}} = \frac{1.000 \text{ kWh/d}}{3,3 \text{ kWh/(m}^2\text{*d)}} = 303 \text{ m}^2$$

Aus dem rechten Diagramm dieser Abbildung lässt sich der jährliche Nutzungsgrad einer Solaranlage ablesen. Unter dem jährlichen Nutzungsgrad ist das Verhältnis von einge-

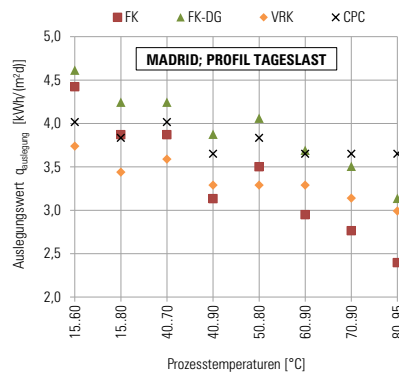
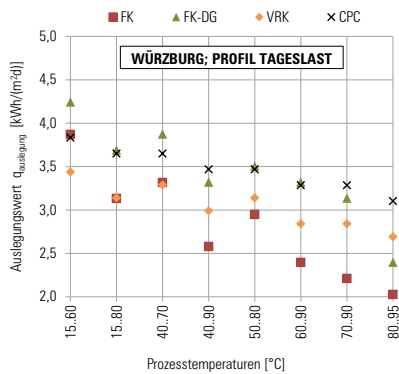
strahlter Energie zu an den Speicher abgegebener thermischer Energie zu verstehen. Für den Integrationspunkt mit den Prozesstemperaturen 15..60 °C (orangefarbene Kurve) kann demnach bei einem Auslegungswert von 3,9 kWh/(m²d) von einem jährlichen Nutzungsgrad von knapp 50 % ausgegangen werden. Man erkennt, dass für einen spezifischen Prozesswärmebedarf oberhalb dieses Auslegungswertes keine deutliche Steigerung des jährlichen Nutzungsgrades zu erwarten ist. Damit repräsentiert dieser Auslegungswert ($q_{\text{auslegung}}$) eine untere Grenze für eine wirtschaftliche Dimensionierung der Solaranlage. Ein höherer Wert, der eine kleinere Kollektorfläche zur Folge hätte, hat keinen negativen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit, solange die spezifischen Kosten der Solaranlage durch die reduzierte Größe nicht steigen. Kleinere Werte für $q_{\text{auslegung}}$ führen hingegen zu niedrigeren spezifischen Systemerträgen und verschlechtern damit die Wirtschaftlichkeit. Bei sehr guten Prozesswärmeanwendungen mit hohen Erträgen (sehr guter Standort, niedrige Prozesstemperaturen) kann eine Vergrößerung des Kollektorfelds trotzdem sinnvoll sein. Dies muss allerdings im Rahmen einer detaillierten Planung (am besten mittels Simulationen) untersucht werden.

Die **Abschätzung des täglichen Prozesswärmebedarfs** eines ausgewählten Integrationspunktes ist für die Auslegung von großer Bedeutung. Normalerweise sollte ein

typischer Produktionstag im Juli oder August gewählt werden, um häufige Stagnation und damit solare Überschüsse zu vermeiden. Es kann aber auch sinnvoll sein, einen typischen Produktionstag im Frühling oder Herbst für die Auslegung zu wählen, wenn der Prozesswärmebedarf zu diesen Zeiten üblicherweise gering ist, weil z. B. auch im April oder Oktober eine Reihe von Tagen mit hoher Solareinstrahlung auftreten können. Des Weiteren kann es sinnvoll sein, das Kollektorfeld so klein auszu-legen, dass das System ohne oder mit sehr kleinem Speicher auskommt. Dies gilt speziell für hohe Prozesstemperaturen, da sich die Wärmeverluste durch den Verzicht auf einen Speicher (bzw. sehr kleine Dimensionierung) reduzieren lassen.

Sinnvolle **Auslegungswerte** für verschiedene Prozesstemperaturen und Kollektortypen für die Standorte Würzburg (links) und Madrid (rechts) zeigt die Abbildung auf der folgenden Seite (Auslegungswerte für weitere Standorte und Lastprofile finden sich im Anhang auf Seite 45). Wie dargestellt, liegen die Auslegungswerte ($q_{\text{auslegung}}$) im Bereich von 2,0 bis 4,5 kWh/(m²d). Während bei niedrigen Prozesstemperaturen die Auslegungswerte für die unterschiedlichen Kollektortypen relativ nah beieinander liegen, werden die Abstände bei höheren Temperaturen deutlich größer.

Die **Wahl eines geeigneten Kollektors** spielt für die Planung einer solaren Prozesswärmeanlage eine wichtige Rolle. Grundsätzlich eignen sich verschiedene Kollektortypen für die Bereitstellung von Prozesswärme unter 100 °C. Dies sind neben Standard-Flach-



Auslegungswerte ($q_{\text{auslegung}}$) für verschiedene Prozesstemperaturen an den Standorten Würzburg und Madrid. Gültig für folgende Randbedingungen: Tägliches Lastprofil „Tageslast“, verbesserte Kollektoren, angenommene spezifische Speicherkapazität von 5 kWh/m^2 .

kollektoren (FK) auch Flachkollektoren mit einer zweiten Abdeckung (FK-DG), Vakuumröhrenkollektoren (VRK) und konzentrierende Vakuumröhrenkollektoren (CPC). Die Auswahl eines Kollektortyps und schließlich des Fabrikats kann abschließend nur durch

eine Betrachtung des spezifischen Ertrags für die konkrete Prozesswärmeanwendung und unter Berücksichtigung der Kosten des Kollektors erfolgen. Bei Prozesstemperaturen $< 50 \text{ °C}$ sind günstige Flachkollektoren in den meisten Fällen am besten geeignet,

wobei deren Ertrag bei höheren Prozesstemperaturen ($> 80 \text{ °C}$) stark sinkt und sie damit nicht mehr (oder nur an Standorten mit hoher Einstrahlung und hohen Außentemperaturen) geeignet sind.

Zur Auslegung der Kollektorfläche für den Schlachtbetrieb muss zunächst das tägliche Lastprofil ausgewählt werden, das den realen Produktionsabläufen am nächsten kommt. Im Falle des Geflügelschlachtbetriebes wäre dies das tägliche Lastprofil „Konstant“, da ein 3-Schicht-Betrieb zugrunde liegt.

Die nächste entscheidende Größe ist der Wärmebedarf des identifizierten Integrationspunktes. Laut technischer Leitung des Schlachtbetriebes werden dem Brühbad während des Betriebes durchschnittlich ca. 0,2 Liter Frischwasser pro Schlachtkörper zugeführt. Bei einer Auslastung der Anlage von 10.000 Hähnchen pro Stunde ergibt dies einen Frischwasserstrom von $2 \text{ m}^3/\text{h}$. Legt man eine 22 stündige Laufzeit pro Tag zugrunde, beläuft sich der tägliche Frischwasserbedarf auf 44 m^3 . Bei einer Zieltemperatur von 55 °C und einer Frischwassertemperatur von 10 °C resultiert ein täglicher Wärmebedarf von ca. 2.300 kWh .

Um den Auslegungswert $q_{\text{auslegung}}$ zu bestimmen, muss die geeignete Prozesstemperatur zugeordnet sowie der vorgesehene Kollektortyp ausgewählt werden. Hinsichtlich der vorgegebenen möglichen Prozesstemperaturen wird die Kombination $15..60 \text{ °C}$ gewählt, da diese der Aufheizung von Frischwasser von 10 auf 55 °C am nächsten kommt. Als Kollektortyp wird ein Flachkollektor gewählt.

Für diese Kombination geben die Tabellen im Anhang einen Auslegungswert von $q_{\text{auslegung}} = 3,9 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{d})$ vor. Damit errechnet sich eine maximale Kollektorfläche für diesen Integrationspunkt von ca. 590 m^2 .

Beispiel

1

2

3

4

5

6

7

8

9

Vorauslegung Speicher

Bei der Vorauslegung des Speichers ist zu beachten, dass für die Bereitstellung solarer Prozesswärme eine größere Bandbreite von Speicherkapazitäten berücksichtigt werden muss als bei Solaranlagen für andere An-

wendungen, da die Variabilität des Lastprofils größer ist (in der VDI 6002 werden 50 l/m² für große Trinkwasseranlagen empfohlen). Dabei hängt die verfügbare Speicherkapazität des Solarspeichers von der Rücklauftemperatur des versorgten Prozesses und der maximalen

Speichertemperatur ab. Nachfolgende Tabelle zeigt das spezifische Speichervolumen in l/m² für verschiedene spezifische Speicherkapazitäten in Abhängigkeit der Rücklauftemperatur des Prozesses.

*Spezifische Speichervolumina für verschiedene Prozesstemperaturen bei max. Speichertemperaturen von 95 °C; * das spezifische Speichervolumen wurde für max. Speichertemperaturen von 95/110 °C berechnet; **für Rücklauftemperaturen wurden Vorlauftemperaturen von 90/95 °C angenommen. Daher wurde eine max. Speichertemperatur von 110 °C angesetzt.*

Spez. Speicherkapazität [kWh/m ²]	Spezifisches Speichervolumen [l/m ²] für Rücklauftemperatur [°C]						
	15	30	40*	50	60**	70**	80**
1,0	11	13	16/12	19	17	21	29
3,0	32	40	47/37	57	52	64	86
5,0	54	66	78/61	96	86	107	143
7,0	75	93	109/86	134	120	150	201
9,0	97	119	141/111	172	155	193	258

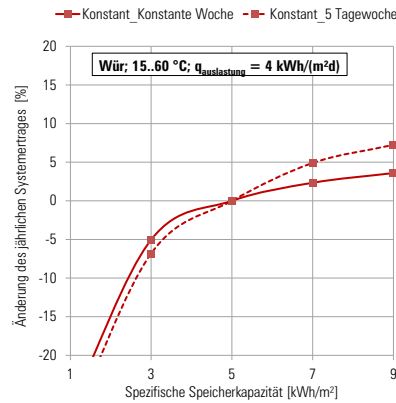
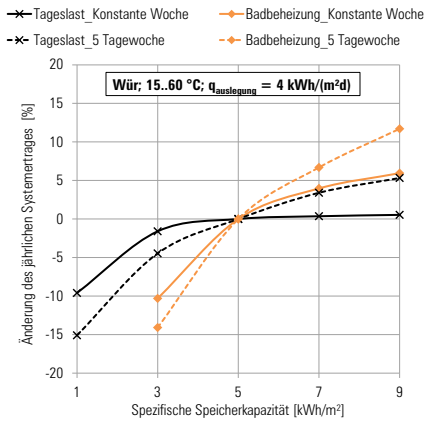
Die Dimensionierung des Kollektorfeldes bzw. Wahl der verfügbaren Last beeinflusst natürlich die Dimensionierung des Speichers. Für groß dimensionierte Kollektorflächen (niedrige verfügbare Last) ist normalerweise eine höhere spezifische Speicherkapazität notwendig, als für klein dimensionierte Kollektorflächen (hohe verfügbare Last). Wie zuvor erläutert, liegt die verfügbare Last im Bereich von 2..4,5 kWh/(m²d). Für viele Prozesstemperaturen liegt ein sinnvoller Wert für die verfügbare Last im Bereich von 4 kWh/(m²d).

Die Abbildung auf der nächsten Seite veranschaulicht daher exemplarisch die Änderung des jährlichen Systemertrags für verschiedene spezifische Speicherkapazitäten und Last-

profile für die Prozesstemperatur 15..60 °C und einer verfügbaren Last von 4 kWh/(m²d). Wie das linke Diagramm zeigt, führt eine Erhöhung der spezifischen Speicherkapazität über 5 kWh/m² hinaus (im Falle des täglichen Lastprofils „Tageslast“ in Kombination mit dem konstanten Wochenprofil) nicht zu einer wesentlichen Erhöhung des jährlichen Systemertrags. Eine Senkung der spezifischen Speicherkapazität auf 3 kWh/m² hat beim Wochenprofil „Konstante Woche“ lediglich eine Minderung des jährlichen Systemertrags um 2 %, im Falle des Wochenprofils „5 Tage-Woche mit Peak“ allerdings eine Reduktion um 5 % zur Folge. Die Erhöhung der spezifischen Speicherkapazität auf 7 bzw. 9 kWh/m² führt zu einer stärkeren, jedoch

nicht wesentlichen Steigerung des jährlichen Systemertrags als für ein konstantes Wochenprofil.

Für das tägliche Lastprofil „Badbeheizung“ reduziert sich der jährliche Systemertrag bei der Senkung der spezifischen Speicherkapazität erheblich. Analog führt eine Erhöhung des Speichervolumens (besonders bei Wärmebedarf an nur 5 Tagen pro Woche) zu einer signifikanten Steigerung des jährlichen Systemertrags. Auch für das tägliche Lastprofil „Konstant“ zeigt die Abbildung, dass eine Senkung der spezifischen Speicherkapazität den jährlichen Systemertrag deutlicher reduziert als beim Profil „Tageslast“ und sich auch eine Erhöhung stärker auswirkt.



Änderung des jährlichen Systemertrags für verschiedene spezifische Speicherkapazitäten, Tages- und Wochenprofile am Standort Würzburg für einen verbesserten Flachkollektor.

Im Rahmen einer **ersten Abschätzung** sollte mehr Speicherkapazität bei weniger Tagen mit Wärmebedarf angesetzt werden. In Abhängigkeit vom Wochenprofil können folgende Werte für die spezifische Speicherkapazität angesetzt werden:

- Tagesprofil „Tageslast“: 3..5 kWh/m²
- Tagesprofil „Konstant“: 5..7 kWh/m²
- Tagesprofil „Badbeheizung“: 7..9 kWh/m²

In einigen Fällen kann es möglich und sinnvoll sein, die spezifische Speicherkapazität auf 1 kWh/m² zu reduzieren. Dies gilt für ein konstantes Wochenprofil in Kombination mit einer verfügbaren Last >6 kWh/(m²d) beim täglichen Profil „Tageslast“ und >10 kWh/(m²d)

für ein tägliches Profil „Konstant“ und speziell bei höheren Prozesstemperaturen. Um Kosten zu sparen, können Solaranlagen mit derart klein dimensionierten Kollektorfeldern (große verfügbare Last) auch **ohne** oder mit sehr kleinen **Speichern** installiert werden, ohne dass dies zu einem verminderten jährlichen Systemertrag führt. Ein weiterer Vorteil solcher Systeme sind niedrigere Systemtemperaturen durch den wegfallenden Wärmeübertrager. Die Auslegung solcher Systeme bedarf jedoch genauerer Informationen zum Lastprofil, welche meist im Rahmen der Vorplanung noch nicht vorliegen. Daher sollten sie auf Basis detaillierterer Lastprofile mittels Simulation ausgelegt werden.

Für die **genauere Abschätzung** einer geeigneten Speicherkapazität sollten die Kosten eines größeren Speichers dem Nutzen gegenüber gestellt werden. Dazu können aus den Tabellen im Anhang, Seite 50–57 jährliche Systemerträge für verschiedene tägliche und wöchentliche Lastprofile, Prozesstemperaturen, Kollektortypen und spezifischen Speicherkapazitäten entnommen werden. Zusammen mit aktuellen Kosten für verschiedene Speichergrößen lässt sich damit ermitteln, ob eine Erhöhung oder Reduktion des Speichervolumens im konkreten Fall sinnvoll ist.

Gemäß den Ausführungen des vorangegangenen Abschnittes wird für das Tagesprofil „Konstant“, 5 Tagewoche ein spezifisches Speichervolumen von 5 bis 7 kWh/m² vorgeschlagen. Für die zuvor ermittelte Kollektorgröße von 590 m² resultiert dies in folgendem Speichervolumen:

Spez. Speicherkapazität	Spez. Speichervolumen	Speichervolumen
5 kWh/m ²	54 l/m ²	31.860 l = 32 m ³
7 kWh/m ²	75 l/m ²	44.250 l = 44 m ³

Welches Speichervolumen letztlich gewählt wird, muss im Rahmen eines Kosten-Nutzenvergleichs geklärt werden. Obenstehende Abbildung lässt bei einer Speicherkapazität von 7 kWh/m² eine Steigerung des jährlichen Systemertrages von 5% erwarten. Dieser Mehrertrag muss den Mehrkosten eines um 12 m³ größeren Speichers gegenübergestellt werden.

Beispiel

1

2

3

4

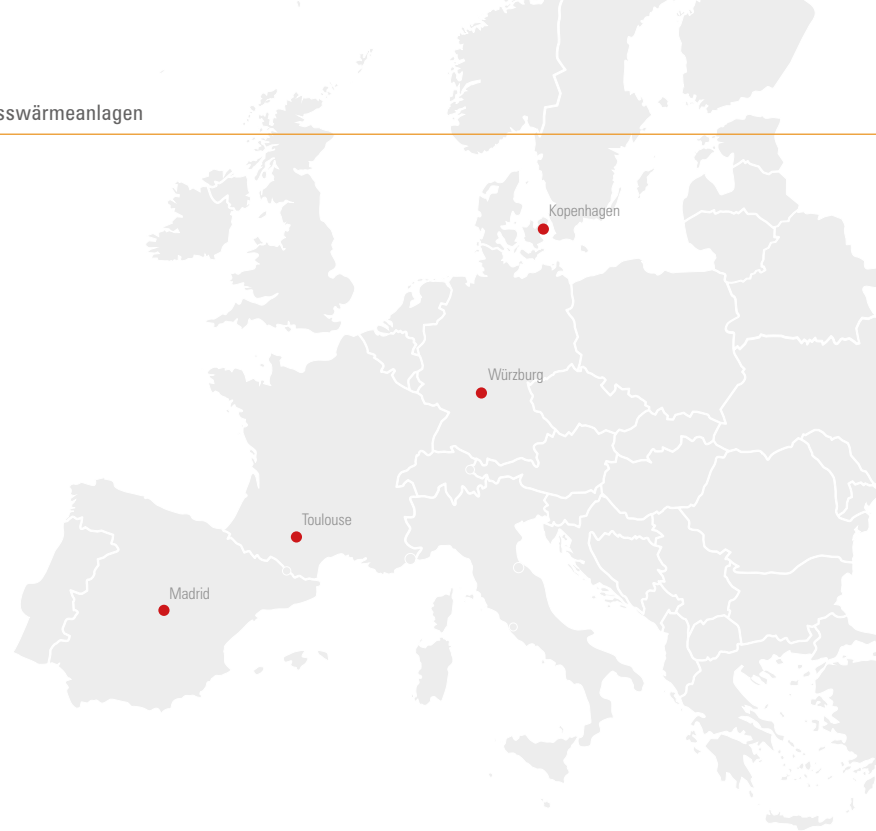
5

6

7

8

9



6 Ertragsabschätzung

Der jährliche Systemertrag ist neben den Systemkosten die wichtigste Größe bei der Entscheidung für oder gegen die Realisierung einer solaren Prozesswärmeanlage. Demnach ist die Abschätzung des Ertrages ein sehr wichtiger Schritt bei der Machbarkeitsabschätzung. Der jährliche Systemertrag wird von vielen Faktoren wie Prozesstemperatur, Lastprofil, Kollektor und Standort beeinflusst.

Die in diesem Abschnitt und im Anhang 9 aufgeführten Nutzungsgrade für verschiedene Prozesswärmeanwendungen können zur Abschätzung des Ertrages von solarthermischen Prozesswärmeanlagen auch an anderen als den vier genannten Standorten verwendet werden. Dies ist möglich, da die Nutzungsgrade für verschiedene Standorte sehr ähnlich sind. Damit ist dieses Verfahren wesentlich einfacher als die direkte Abschätzung

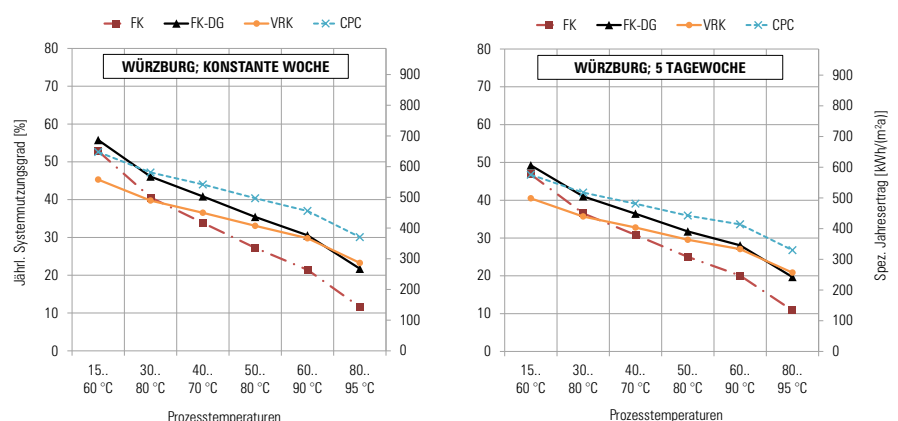
Jahresnutzungsgrad für verschiedene Prozesstemperaturen und verbesserte Kollektortypen, $q_{\text{Auslegung}} = 10 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{d})$, am Standort Würzburg; detaillierte Werte finden sich im Anhang.

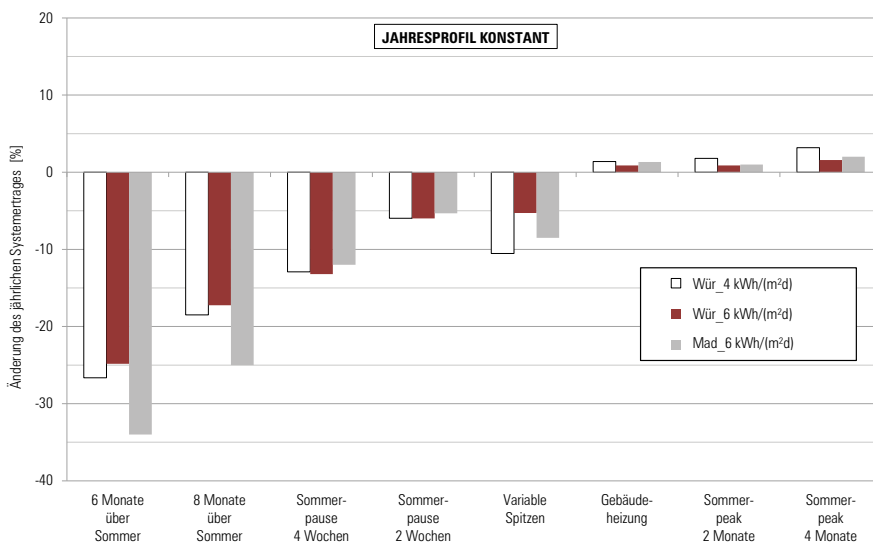
des jährlichen Systemertrags. Der Systemnutzungsgrad ist wie folgt definiert:

$$\eta_{\text{sys}} = \frac{\text{Jährlicher Systemertrag}}{\text{Jährliche Einstrahlung auf die Kollektorfläche (H}_t)}$$

Dabei wird für die (Brutto-)Kollektorfläche eine Neigung angenommen, die dem Breitengrad des Standorts minus 15° entspricht. Die Abbildung unten zeigt exemplarisch die Nutzungsgrade für verschiedene Prozesstemperaturen, Kollektortypen, zwei Wochenprofile und das Tagesprofil „Tageslast“ am Standort Würzburg (Breitengrad = 50°). Detaillierte Werte für weitere Standorte finden sich in Anhang 9. Die in der Abbildung gezeigten und im Anhang enthaltenen Werte basieren auf einem konstanten Jahresprofil. Um die Ertrags-

einbußen bei anderen Jahresprofilen zumindest abschätzen zu können, zeigt die folgende Abbildung auf der nächsten Seite die Änderung des jährlichen Systemertrags bei unterschiedlichen Jahresprofilen. Es zeigt sich, dass eine Produktionsunterbrechung von 2 Wochen im Sommer den Ertrag um ca. 5% reduziert. Besteht nur in sechs Sommermonaten ein Wärmebedarf, reduziert sich der jährliche Systemertrag um etwa 25% in Würzburg und ca. 33% in Madrid. Ein erhöhter Wärmebedarf (bei gleicher Kollektorfeldgröße) im Sommer bzw. für Heizung im Winter hat kaum Auswirkung auf den jährlichen Systemertrag. Dabei ist zu beachten, dass das Kollektorfeld bei einem erhöhten Wärmebedarf im Sommer ggf. größer dimensioniert werden kann.





Änderung des jährlichen Systemertrags für verschiedene Jahresprofile und unterschiedlichen Werte der verfügbaren Last. Zugrunde gelegte Prozesstemperatur 15..60 °C, Tagesprofil „Tageslast“, Wochenprofil „Konstante Woche“, spezifische Speicherkapazität von 3 kWh/m², verbesserter Flachkollektor an den Standorten Würzburg und Madrid.

Um abschließend die Ertragsabschätzung durchzuführen, muss der Jahresnutzungsgrad der geplanten Solaranlage ermittelt werden. Hierzu können die Tabellen im Anhang genutzt werden. Für einen Auslegungswert um 4 kWh/(m²d), dem wöchentlichen Profil „5 Tageswoche“ und dem täglichen Profil „Konstant“ gibt die Tabelle einen Nutzungsgrad von 39% für einen Flachkollektor an. Wie im vorherigen Abschnitt erläutert, steigt der Nutzungsgrad bei einer erhöhten Speicherkapazität von 7 kWh/m² um 5% und beträgt demnach etwa 41%.

Um den Ertrag zu ermitteln, müssen diese Nutzungsgrade nun mit der spezifischen Einstrahlung am Standort des untersuchten Unternehmens multipliziert werden. Gemäß Meteororm liegt diese bei ca. 1.246 kWh/(m²a) auf die geneigte Fläche. Damit ergeben sich folgende Erträge für die beiden vorgeschlagenen Anlagen.

- 590 m² und 32 m³: 485 kWh/(m²a)
- 590 m² und 44 m³: 510 kWh/(m²a)

Mit dem um 12 m³ vergrößertem Speichervolumen lässt sich demnach ein Mehrertrag von ca. 25 kWh/(m²a) erzielen.

Beispiel

1

2

3

4

5

6

7

8

9



K_{sol} :	solare Wärmegestehungskosten	
K_{inv} :	kumulierte Investitionskosten	
f_a :	Annuitätsfaktor	
K_{betr} :	betriebsgebundene Kosten	
Q_{sol} :	jährlicher solarer Energieertrag	
K_{verb} :	verbrauchsgebundene Kosten	
i_{bar} :	Kapitalmarktzins	
T_{anl} :	Anlagenbetriebsdauer	(20..25 Jahre)
K_{anl} :	Anlagenkosten	(Kosten der Solaranlage ohne Förderung)
f_{betr} :	jährliche Wartungskosten	(Kleinanlagen \approx 2 % / Großanlagen \approx 1%)
K_{strom} :	Stromkosten pro kWh _{el}	
a :	Anlagenarbeitszahl	(Kleinanlagen \approx 20 / Großanlagen \approx 50)

$$K_{sol} = \frac{K_{inv} \cdot f_a + K_{betr}}{Q_{sol}} + K_{verb}$$

$$f_a = \frac{(1 + i_{bar})^{T_{anl}} \cdot i_{bar}}{(1 + i_{bar})^{T_{anl}} - 1}$$

$$K_{betr} = K_{anl} \cdot f_{betr}$$

$$K_{verb} = \frac{K_{strom}}{a}$$

7 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Zur Betrachtung der Wirtschaftlichkeit einer Solaranlage können ein solarer Wärmepreis, die Amortisationszeit und die Rendite berechnet werden. Die Berechnung von Amortisationszeit und Rendite (z. B. nach VDI 6025) setzt einige Annahmen (z. B. Zinssatz) voraus, welche je nach Unternehmen unterschiedlich sein können. Daher wird an dieser Stelle nur auf die **Berechnung des solaren Wärmepreises** eingegangen. Nach VDI 6002 wird dieser mit der nebenstehenden Gleichung ermittelt.

Die **Systemkosten** einer solarthermischen Prozesswärmeanlage werden zur Einschätzung der notwendigen Investition und Wirtschaftlichkeitsberechnung benötigt. Diese

sind stark von der Anlagengröße, dem Kollektortyp und Systemanbieter abhängig. Als erste Näherung können folgende Werte verwendet werden: Spezifische Investitionskosten von Solaranlagen mit Flachkollektoren und einer nicht allzu komplexen Einbindung liegen bei mehreren hundert Quadratmetern im Bereich von 400..500 Euro/m². Bei guten VR- oder CPC-Kollektoren liegen die Systemkosten um 100..200 Euro/m² höher. Dies sind jedoch nur Richtwerte. Es bietet sich an, ein grobes Angebot von einem Systemanbieter einzuholen, welches Kollektortyp, Speichergröße und Einbindung berücksichtigt. Dabei spielen auch die Entfernungen zwischen Kollektorfläche, Speicher und Verbraucher eine Rolle.

Die ermittelten Systemkosten werden in der Regel im Rahmen einer Förderung bezuschusst. **Fördermöglichkeiten** sind unter www.bafa.de, www.kfw.de und ggf. bei den entsprechenden Stellen in den einzelnen Bundesländern zu finden. Die **Finanzierung durch Contracting** bietet die Möglichkeit der Installation einer solarthermischen Prozesswärmeanlage ohne eigene Investition des Industriebetriebs. Dabei übernimmt ein Anbieter die Investition, Installation und den Betrieb der Anlage und berechnet die bereitgestellte Wärme (ggf. zuzüglich eines Grundpreises). Dieser Contractor übernimmt somit das Investitionsrisiko.

Für die geplante Anlage liegt ein erstes Angebot mit Investitionskosten von 350 Euro/m² vor. Für die Variante mit dem größeren Speicher liegen die Kosten bei 360 Euro/m². So ergeben sich solare Wärmepreise von 3,7 bzw. 3,6 Eurocent/kWh. Damit fallen die Mehrkosten des größeren Speichers nicht so stark ins Gewicht wie die etwas höheren Systemkosten. Demnach wird dem Unternehmen die Variante 590 m² und 44 m³ vorgeschlagen.

Beispiel

1

2

3

4

5

6

7

8

9

8 (Detail-)Planung

Die vorangegangenen Abschnitte dieses Leitfadens sollen eine schnelle Machbarkeitsabschätzung, Konzeptentwicklung und Vorauslegung einer solarthermischen Prozesswärmeanlage ermöglichen, sodass ein Industriebetrieb (oder Investor z. B. Contractor) eine Entscheidung zur ernsthaften Entwicklung eines Projektes treffen kann. Fällt diese Entscheidung positiv aus, weil auf Basis der hier erläuterten Schritte eine Solaranlage machbar und wirtschaftlich sinnvoll erscheint, sind dies die folgenden weiteren Schritte im Rahmen der Planung:

- **Detaillierteres Audit:** Falls die Machbarkeitsuntersuchung und Vorplanung auf Abschätzungen zum Wärmebedarf der geeigneten Integrationspunkte basiert, ist ggf. eine genauere Untersuchung der relevanten Verbrauchsdaten des Integrationspunktes (Höhe und Profil des Wärmebedarfs) notwendig, um diese zu verifizieren. Dabei sind ggf. auch Messungen nötig, da die Höhe und das Profil des Wärmebedarfs den jährlichen Systemertrag der Solaranlage entscheidend beeinflussen.
- **Simulation:** Auf Basis der genaueren Verbrauchsdaten und eines Lastprofils der relevanten Integrationspunkte kann eine Simulation erfolgen, um den jährlichen Systemertrag der geplanten Solaranlage zu ermitteln, welcher für die Wirtschaftlichkeitsberechnung benötigt wird. Dabei können unterschiedliche Kollektortypen und -feldgrößen sowie Speichervolumina gegenübergestellt werden.
- **Detaillierte Kostenerfassung** bzw. **Ausschreibung** oder Einholung konkreter **Angebote:** Neben dem jährlichen Systemertrag werden die Kosten der geplanten Anlage für die Wirtschaftlichkeitsberechnung benötigt.
- Neue **Wirtschaftlichkeitsberechnung:** Mit den vorliegenden Daten zum Systemertrag und zu den Kosten wird eine Wirtschaftlichkeitsberechnung, wie im vorherigen Abschnitt erläutert, durchgeführt.
- **Antragstellung für Förderung:** Eine mögliche Förderung sollte zum einen bei der Wirtschaftlichkeitsberechnung berücksichtigt werden und muss zum anderen meist vor dem Bau der Anlage beim jeweiligen Fördermittelgeber beantragt werden.
- **Monitoring:** Zur Qualitätskontrolle und Identifikation möglicher Fehler bietet sich eine Erfassung und möglicherweise automatische Überwachung wichtiger Betriebsdaten der Solaranlage an.



9 Anhang

	Seite
Fragebogen zur Erfassung des Ist-Zustandes	32
Integrationskonzepte für solare Prozesswärme	34
Ausgewählte Lastprofile	42
Tabellen zur Vorauslegung von Kollektorfläche und Speicher	45
Tabellen zur Ertragsabschätzung	50
Ertragsabschätzung bei abweichenden Randbedingungen	58

1**2****3****4****5****6****7****8****9**



Eröd - Solarwärme für die Ernährungsindustrie Fragebogen



AM ...
 Mr. Müller
 Müller & Sohn AG
 Schmalzwerk ...
 150 ...

Kontakt
 Telefon:
 E-Mail:

2. Produkte und Produktionszeiten

KASTANNEKUGELN
 22.000 t
 24 ...

Produkt	Jan	Feb	März	Apr	Mai	Juni	Juli	Aug	Sept	Oktober	Nov	Dez
Ausstoß pro Jahr	7	7	10	8	8	9	9	9	8	9	8	9
Produktionszeiten												
Geschätzte Verteilung der Jahresproduktion (%)												

255
 255
 255
 255
 255
 255
 255
 255
 255
 255
 255
 255
 255

Industrie



Erweichwasserbedarf
 (t/Tag, t/Jahr)
 Ja
 Nein
 ...

3. Energieverbrauch

Erdgas
 Strom

Verbrauch (MWh, kWh, GJ, etc.)
 6,7 GWh/a
 2 GWh/a

4. Installierte Anlagentechnik zur Wärmebereitstellung

Gerätetyp (Boiler, Kessel, etc.):
 Brennstoff:
 Nennleistung (kW bzw. t/h):
 Erzeugtes Wärmeträgermedium (Dampf, Heißwasser, etc.):

3 Kessel
 Erdgas
 4 MW
 SATDAMPF 180°C

5. Bereitstellung von Kälte und Druckluft

Anzahl und Leistung ei. Kältemaschinen
 Anzahl und Leistung Druckluftkompressoren:

5 x 110 kW
 3 x 80 kW

9 Anhang

HINTERGRUND ZUM LEITFADEN

Der Leitfaden zur Machbarkeitsabschätzung solarer Prozesswärme soll die Identifikation eines Integrationspunktes für Solarwärme sowie die Vorauslegung und Ertragsabschätzung einer solaren Prozesswärmanlage ermöglichen, ohne umfangreiche Berechnungen oder Simulationen in diesem ersten Planungsschritt durchführen zu müssen. Alle Diagramme, Tabellen und Berechnungsbeispiele beziehen sich dabei auf die Brutto-

fläche des Kollektorfeldes. Um die notwendigen Auslegungsdaten zu generieren, wurde im Rahmen von (Lauterbach, 2014) eine umfangreiche Simulationsstudie durchgeführt, bei der sowohl verschiedene Kollektortypen als auch unterschiedliche Kollektorqualitäten (Standard-, verbesserter- und hocheffizienter Kollektor) zugrunde gelegt wurden. Nachfolgende Tabelle beinhaltet die technischen Daten der für die Simulationsstudie verwendeten

Kollektoren. Dadurch kann die Systematik auf jeglichen Kollektor angewendet werden. Hierzu kann aus untenstehender Tabelle derjenige Kollektor ausgewählt werden, dessen technische Daten dem real verwendeten Kollektor am nächsten kommen. Über das jeweilige Verhältnis von Apertur- zu Bruttofläche können die im Leitfaden dargestellten Auslegungsgrößen jederzeit auf die Aperturfläche übertragen werden.

	FLACHKOLLEKTOR (FK)		
	Standard	verbessert	hocheffizient
A_{ap} [m ²]	2,51	7,74	13,7
A_{bru} [m ²]	2,88	8,40	15,0
A_{ap}/A_{bru}	87 %	92 %	91 %
a_1 [W/(m ² K)]	3,342	3,520	3,016
a_2 [W/(m ² K ²)]	0,016	0,017	0,014
η_{a_0}	0,795	0,831	0,841

	FLACHKOLLEKTOR DOPPELT ABGEDECKT (FK-DG)		
	Standard	verbessert	hocheffizient
		12,52	1,05
	individuell	13,57	1,17
		92 %	90 %
	2,71	2,564	0,508
	0,01	0,005	0,007
	0,811	0,804	0,759

	VAKUUMRÖHRENKOLLEKTOR (VRK)		
	Standard	verbessert	hocheffizient
A_{ap} [m ²]		3,23	1,68
A_{bru} [m ²]		4,32	2,45
A_{ap}/A_{bru}		75 %	69 %
a_1 [W/(m ² K)]		1,240	1,360
a_2 [W/(m ² K ²)]		0,004	0,002
η_{a_0}		0,751	0,804

	CPC-KOLLEKTOR (CPC)		
	Standard	verbessert	hocheffizient
	3,31	4,50	4,50
	3,75	4,93	4,94
	88 %	91 %	91 %
	0,974	0,749	0,583
	0,005	0,005	0,003
	0,718	0,644	0,688

1

2

3

4

5



6

7

8

9

FRAGEBOGEN ZUR ERFASSUNG DES IST-ZUSTANDES

	SolFood – Solarwärme für die Ernährungsindustrie Fragebogen	
---	--	---

1. Allgemeine Informationen												
Unternehmensbezeichnung:												
Anschrift:												
Ansprechpartner, Position:												
E-Mail, Telefon:												
Branche:												
Mitarbeiter und Umsatz: <i>oder: KMU-Kriterien erfüllt (ja/nein)</i>												

KMU-Kriterien: weniger als 250 Mitarbeiter und Jahresumsatz maximal 50 Mio. € bzw. Jahresbilanzsumme maximal 43 Mio. €

2. Produkte und Produktionszeiten														
Produkt														
Ausstoß pro Jahr														
Produktionszeiten		<i>h/Tag</i>			<i>Tage/Woche</i>			<i>Tage/Jahr</i>			<i>Schichten</i>			
Geschätzte Verteilung der Jahresproduktion [%]	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez		

3. Energieverbrauch		
Energieträger	Verbrauch (<i>MWh/a, m³/a, l/a, t/a, etc.</i>)	Kosten

4. Installierte Anlagentechnik zur Wärmebereitstellung		
Gerätetyp (<i>Boiler, Kessel, etc.</i>):		
Brennstoff:		
Nennleistung (<i>kW bzw. t/h</i>):		
Erzeugtes Wärmeträgermedium (<i>Dampf, Heißwasser, etc.</i>):		

5. Bereitstellung von Kälte und Druckluft	
Anzahl und Leistung el. Kältemaschinen	
Anzahl und Leistung Druckluftkompressoren:	



6. Wärmeintensive Prozesse innerhalb der Produktion			
Nr.	Name/Beschreibung Prozess	Temperatur [°C]	Frischwasserbedarf* (Ja/Nein, Menge)
1			
2			
3			
4			
5			

* Nur Frischwasserbedarf angeben, der innerhalb des Prozesses aufgeheizt werden muss.

7. Energetische Versorgung der unter 6. gelisteten Prozesse				
Nr.	Wärmeträgermedium (Dampf, Heißwasser, etc.)	T_Vorlauf (°C)	T_Rücklauf (°C)	Druck (bar)
1				
2				
3				
4				
5				

8. Heizbedarf	
Werden die Produktions- und/oder Lagerhallen im Winter und in der Übergangszeit beheizt?	
Ungefähre Heizperiode:	
Wie erfolgt die Beheizung?	

9. Vorhandene Dach- bzw. Freiflächen				
Bezeichnung:				
Fläche (m²):				
Neigung:				
Ausrichtung (Süd, Ost, etc.):				
Angaben zur Statik vorhanden				

10. Energieberatung	
Wurde in jüngster Vergangenheit eine Effizienz- oder Energieberatung durchgeführt?	
Gibt es einen Bericht, den Sie uns zur Verfügung stellen können?	

1

2

3

4

5

6

7

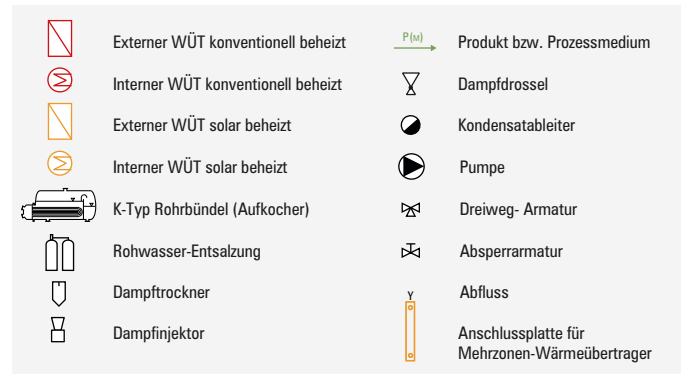
8

9

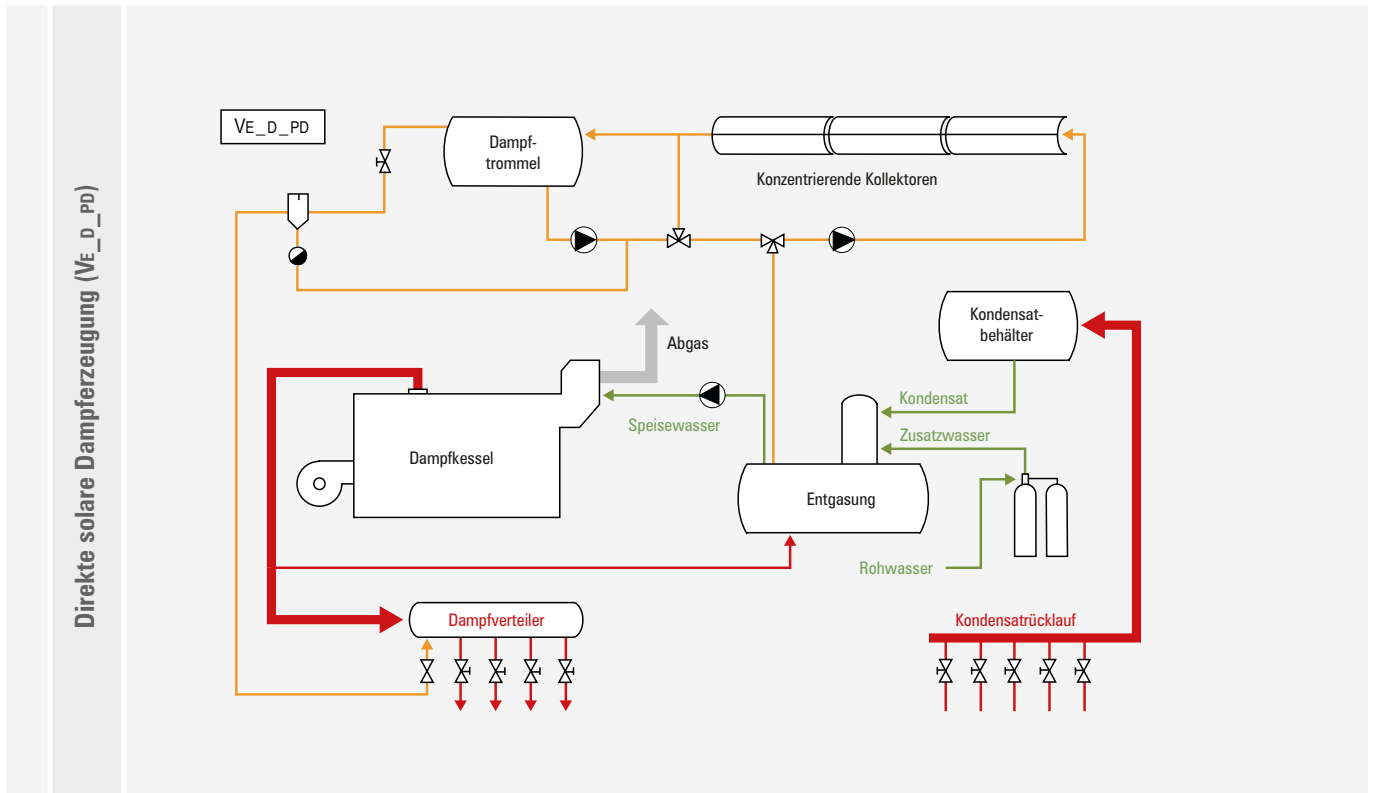
INTEGRATIONSKONZEPTE

Entsprechend der auf Seite 12 dargestellten Klassifizierung industrieller Wärmeverbraucher ergeben sich unterschiedliche Möglichkeiten zur Einbindung von Solarwärme, welche im Nachfolgenden Abschnitt dargestellt sind. Auf Versorgungsebene finden sich insgesamt sechs unterschiedliche Möglichkeiten zur Integration von Solarwärme, welche in Abhängigkeit des verwendeten Wärmeträgermediums variieren. Daraus resultieren jeweils drei Integrationskonzepte für dampfförmige und flüssige Wärmeträgermedien. Auf Prozessebene gibt es in Abhängigkeit der konventionellen Beheizung des Prozesses drei grundlegende Klassen zur Einbindung von Solarwärme. Dies sind die Einbindung eines externen Wärmeübertragers, einer zusätzlichen internen Wärmeübertragungsfläche in Bädern, Maschinen oder Tanks sowie die Bereitstellung von Dampf auf reduziertem Druckniveau.

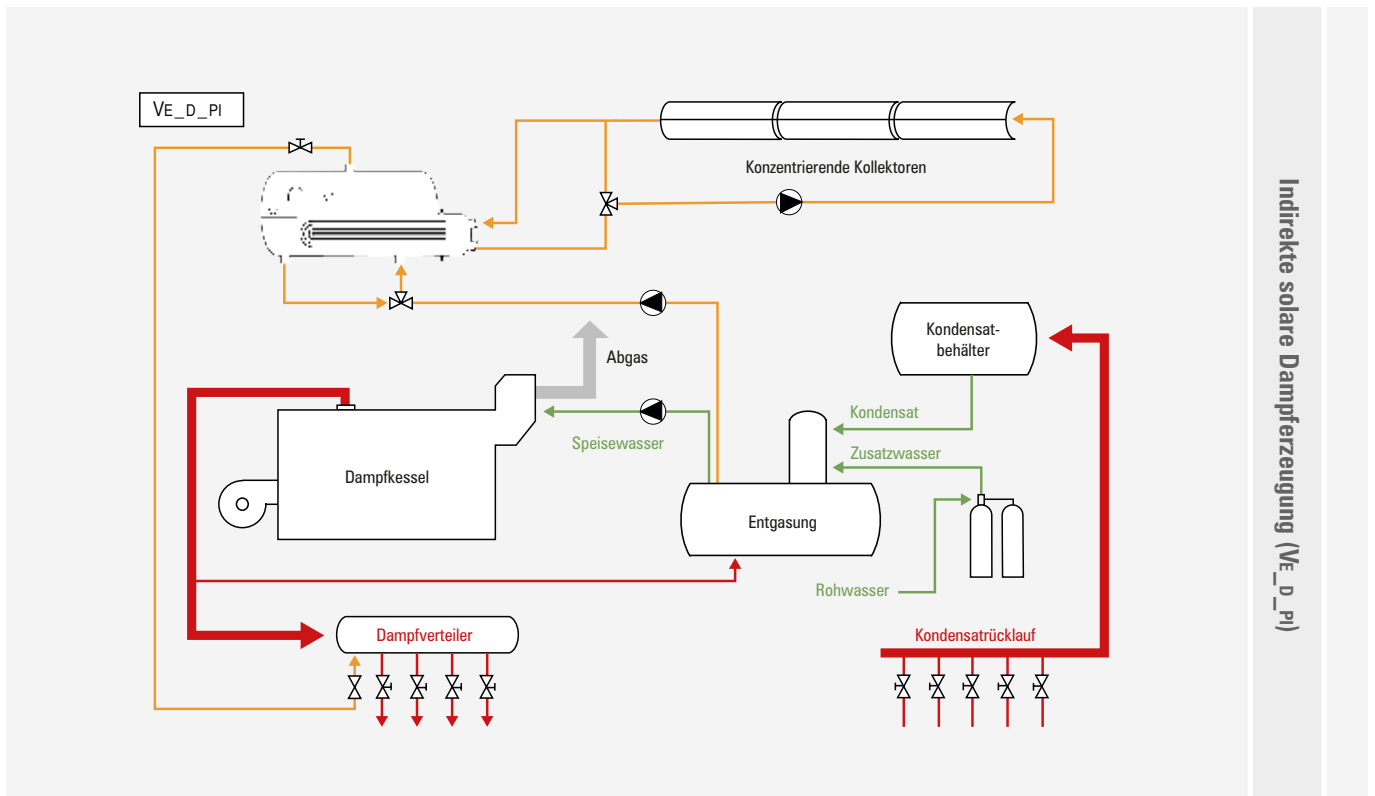
Die nachfolgend dargestellten Integrations schemata zeigen jeweils die Schnittstelle auf, an welcher Solarwärme in die konventionelle Anlagentechnik eingespeist werden kann. Die wichtigsten Symbole der Integrations schemata sind in der nachfolgenden Abbildung erläutert.



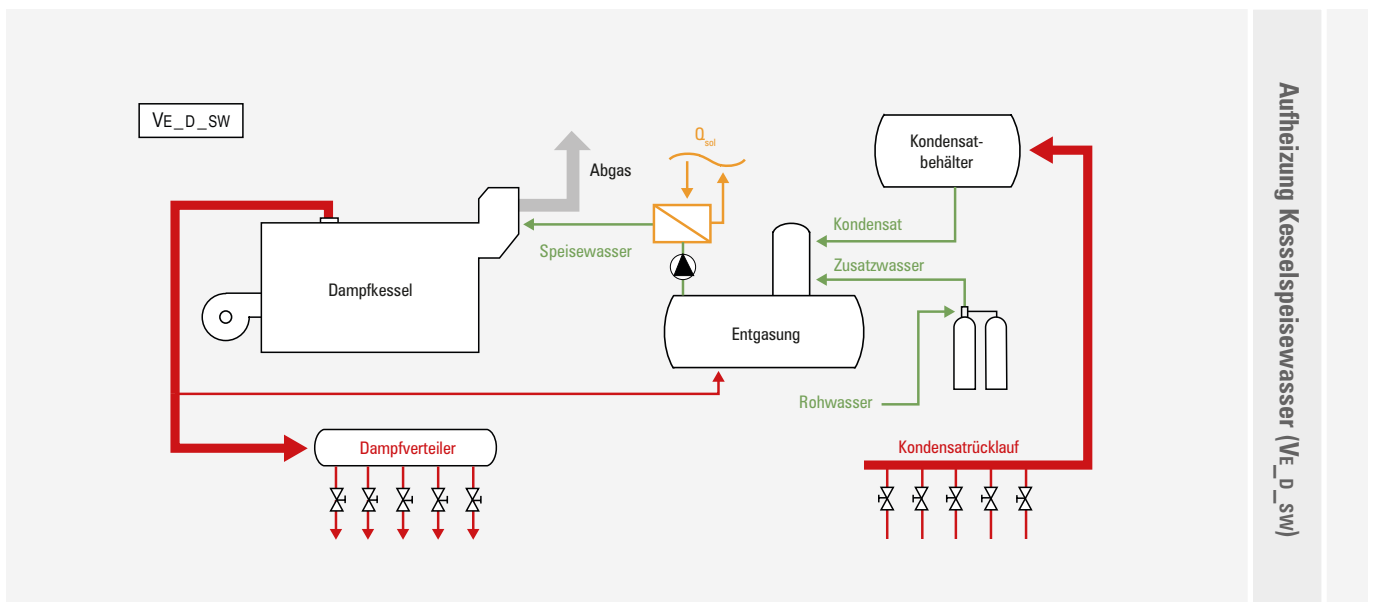
EINBINDUNG AUF VERSORGUNGSEBENE



Bei der direkten solaren Dampferzeugung wird neben einem geeigneten Kollektor eine Dampftrommel benötigt. Es wird Kesselspeisewasser durch den Kollektor geführt und teilweise verdampft. Das Wasser-Dampf-Gemisch wird anschließend in der Dampftrommel getrennt, verbleibendes Wasser wird erneut dem Kollektor zugeführt. Wenn der Dampf in der Dampftrommel das Druckniveau der konventionellen Dampfversorgung erreicht, wird er in das bestehende Dampfnetz eingespeist.



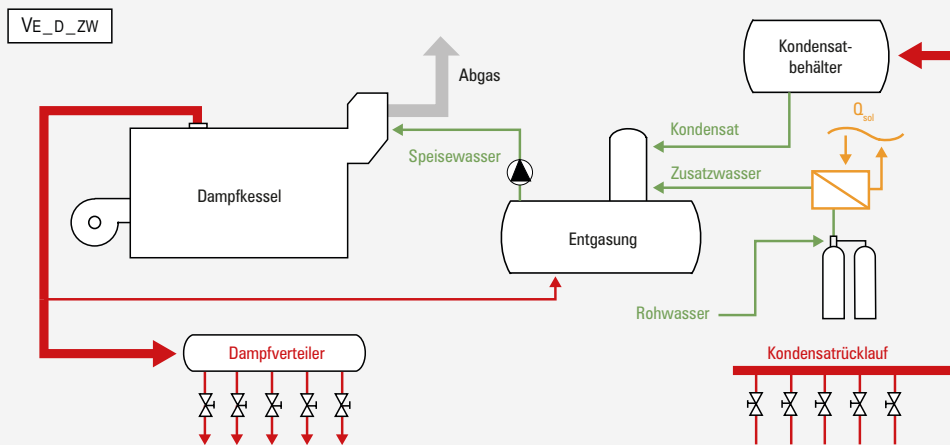
Dieses Integrationskonzept ähnelt der direkten Dampferzeugung. Der Unterschied liegt in der indirekten solaren Dampferzeugung. Die Kollektoren werden mit Druckwasser oder Thermoöl betrieben. Die Dampferzeugung erfolgt dann indirekt mit einem geeigneten Wärmeübertrager, der im selben Druckbereich wie das Dampfnetz betrieben wird, sodass der erzeugte Dampf direkt in das Netz eingespeist werden kann.



Bei dieser seriellen Einbindung wird das Kesselspeisewasser nach der Entgasung, die bei 105 °C (Vollentgasung) oder 95 °C (Teilentgasung) erfolgt, durch Solarwärme aufgeheizt. Die Zieltemperatur des Kesselspeisewassers hängt vom Dampfdruck des Kessels ab. Dieser liegt häufig im Bereich von 6..23 bar, was einer Temperatur von 160..220 °C entspricht. Der solarbeheizte Wärmeübertrager ist zwischen der Entgasung und dem Economiser installiert

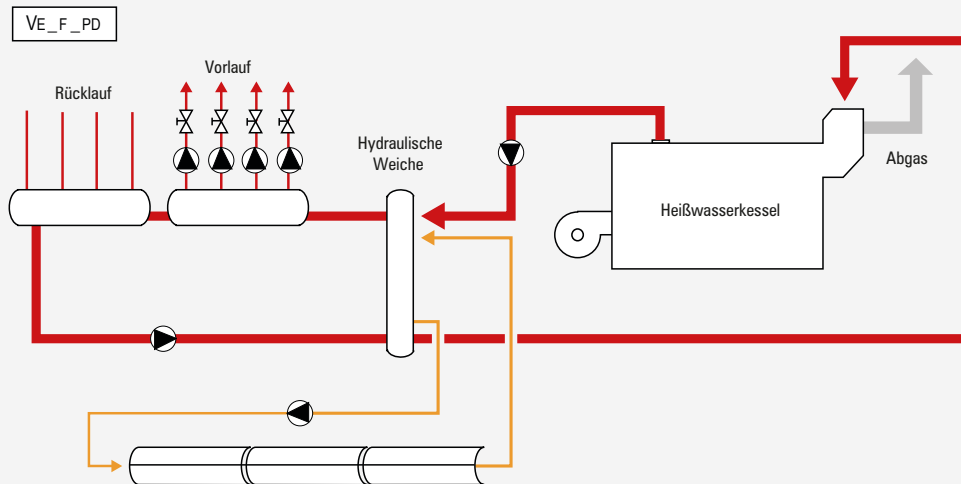
- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9

Vorwärmung Kesselzusatzwasser (VE_D_ZW)



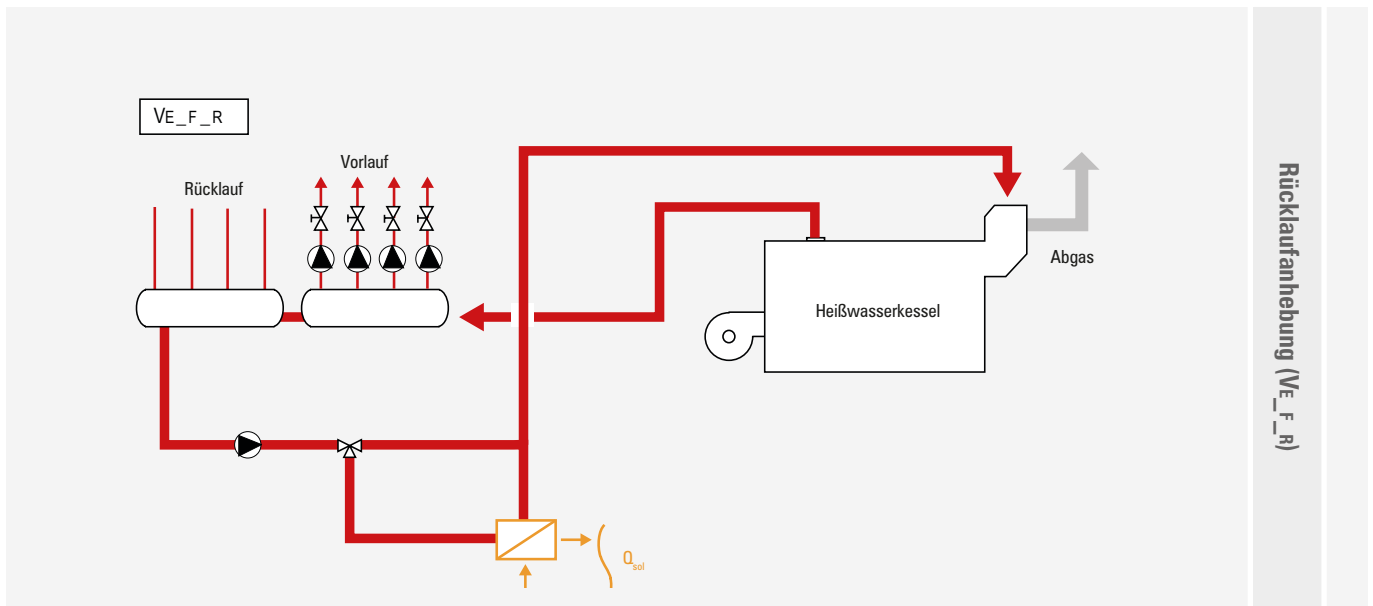
Bei dieser ebenfalls seriellen Einbindung wird das Kesselzusatzwasser solar beheizt. Es durchläuft zunächst eine Entsalzung und gelangt anschließend in die thermische Entgasung. Die Solaranlage wärmt das Zusatzwasser indirekt mittels WÜT nach der Entsalzung vor, bevor es in den Entgaser eingespeist wird.

Parallele Einbindung (VE_F_PD)



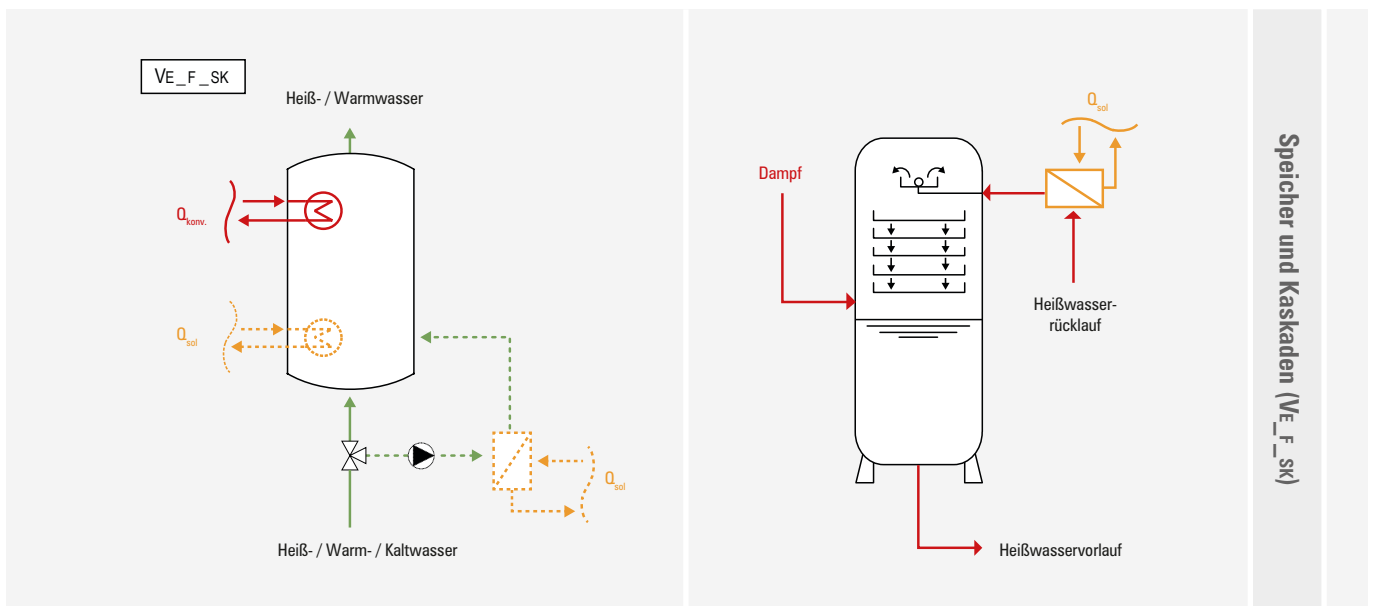
Bei der parallelen Einbindung von Solarwärme in ein Heißwassernetz wird der Rücklauf sowohl über den konventionellen Wärmeerzeuger als auch über die Solaranlage geführt, wobei zwischen direkter und indirekter Einbindung unterschieden werden kann. Die Regelung der Solaranlage muss gewährleisten, dass die Vorlauftemperatur erreicht wird. Bei der direkten Einbindung wird das Wasser des Heizkreises durch die Kollektoren geführt, wofür zumindest eine hydraulische Weiche benötigt wird (siehe Abbildung). Aus dieser wird ein Teil des Rücklaufs abgezogen und direkt durch die Kollektoren geführt. Je nach Solltemperatur können nicht-konzentrierende Kollektoren verwendet werden.

Für die indirekte Einbindung wird ein zusätzlicher WÜT benötigt (VE_F_PI). Dabei wird ein Teilstrom des Rücklaufs abgezweigt, über den solarbetriebenen Wärmeübertrager aufgeheizt und dem Vorlauf zugeführt. Sowohl die Primär- als auch die Sekundärseite müssen dabei geregelt werden.



Rücklaufanhebung (VE_F_R)

Die serielle Einbindung einer Solaranlage in ein Heißwassernetz ähnelt der Variante VE_F_PI mit dem Unterschied, dass der solarbeheizte Teil des Rücklaufs nicht auf Soltemperatur aufgeheizt werden muss und vor dem konventionellen Wärmeerzeuger mit dem restlichen Rücklauf vermischt wird. Bei Auslegung der Solaranlage (Peakleistung) muss die Modulationsfähigkeit des konventionellen Wärmeerzeugers berücksichtigt werden. Die Solaranlage kann direkt (ohne WÜT) oder indirekt eingebunden werden.



Speicher und Kaskaden (VE_F_SK)

Im Regelfall eignen sich auch Heiß- oder Warmwasserspeicher für die Einbindung von Solarwärme. Je nach Speicherkonfiguration können sich unterschiedliche Möglichkeiten zur Einbindung ergeben. In Abhängigkeit von Temperatur und Menge der Inputströme kann eine alleinige Aufheizung dieser Ströme sinnvoll sein. Dabei kann die Solarwärme wie links in der Abbildung dargestellt über einen internen Wärmeübertrager zur Beheizung oder einen externen Wärmeübertrager zur Aufheizung der Inputströme eingebunden werden. Auch bei den rechts in der Abbildung dargestellten Heißwasserkaskaden kann unter Umständen Solarwärme eingebunden werden.

1

2

3

4

5

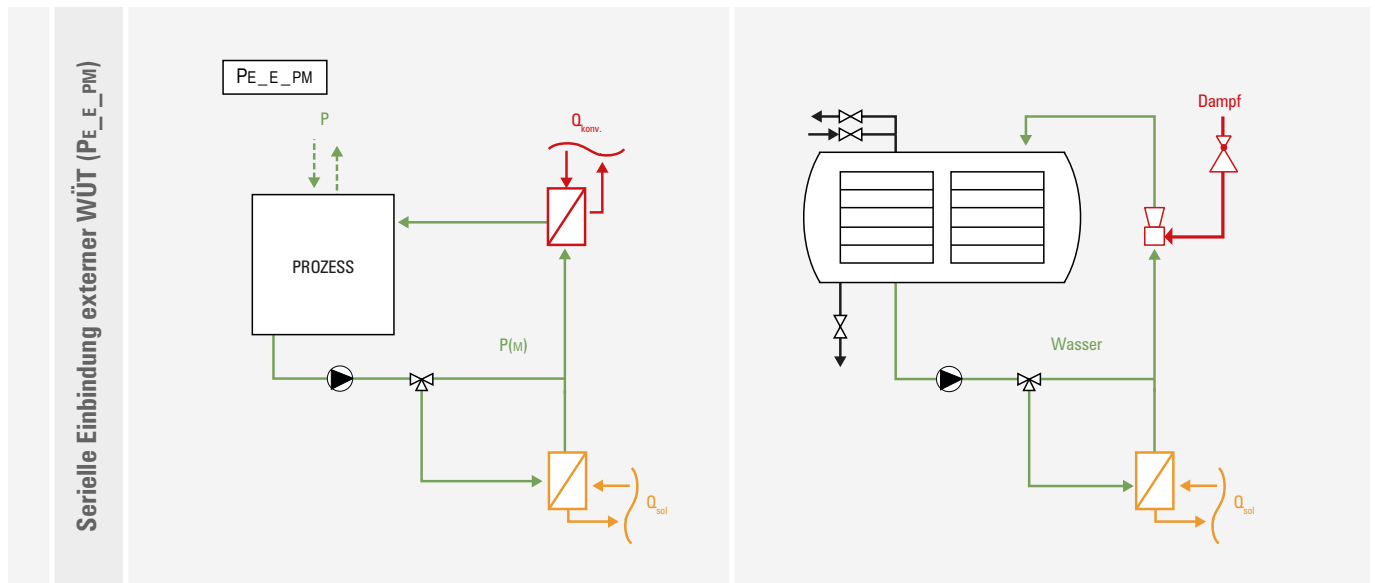
6

7

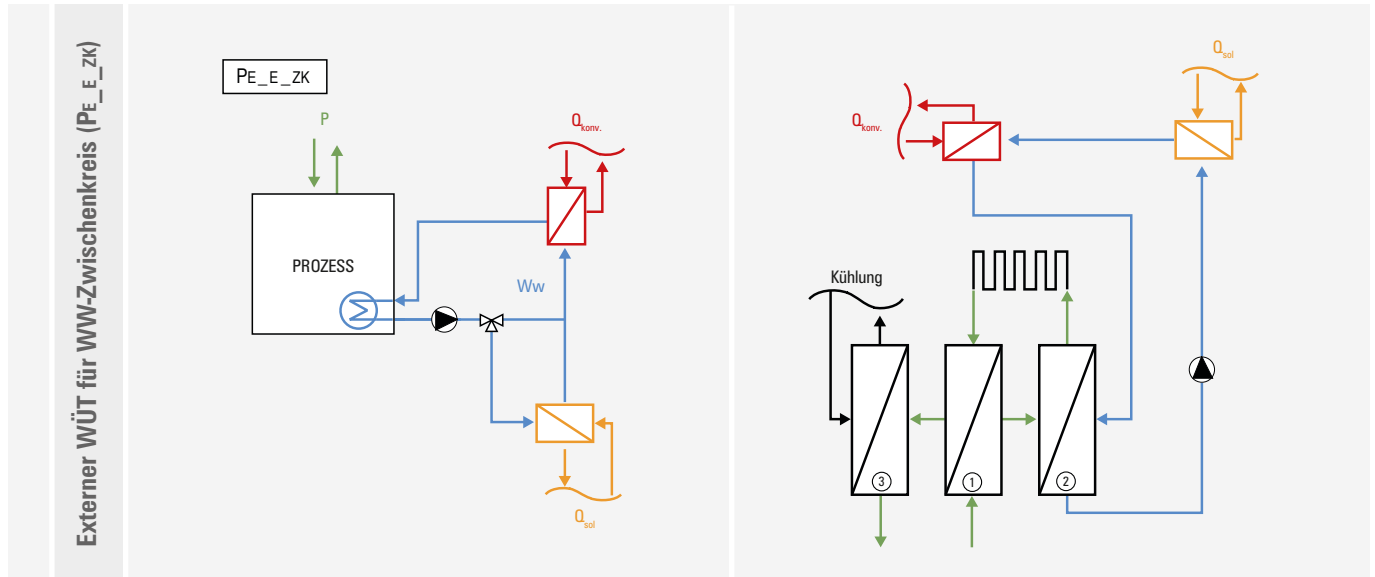
8

9

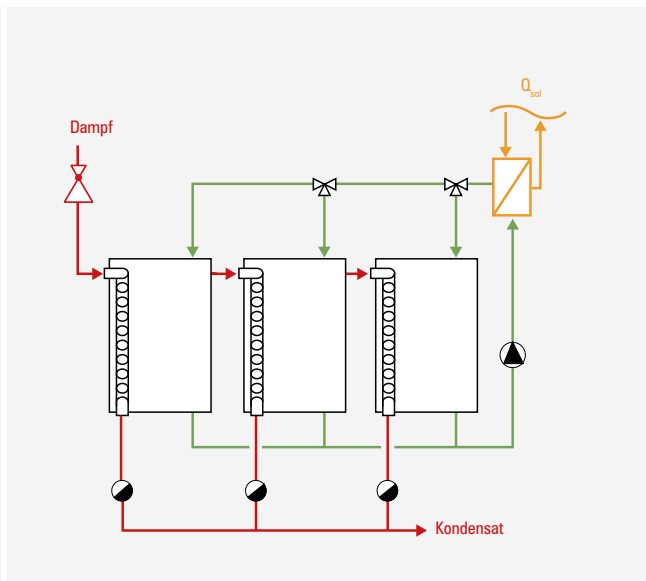
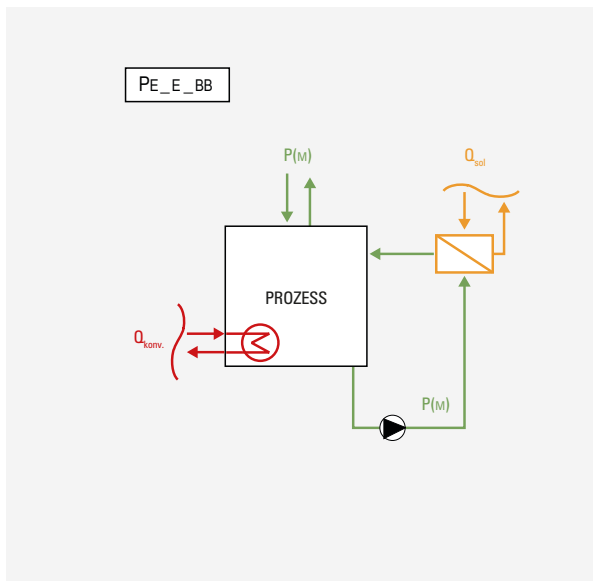
EINBINDUNG AUF PROZESSEBENE



Das Integrationskonzept PE_E_PM sieht vor, dass ein solarbeheizter Wärmeübertrager seriell vor dem konventionellen eingebunden wird, um das Produkt oder Prozessmedium solar vorzuwärmen. Hierbei wird die niedrige Rücklauftemperatur des aufzuheizenden Stroms genutzt, die in der Regel deutlich unterhalb der Rücklauftemperatur des konventionellen Wärmeträgermediums liegt. Wie dargestellt wird ein Teilstrom (oder der gesamte Strom) über den solarbeheizten Wärmeübertrager geführt. Im rechten Teil der Abbildung ist beispielhaft ein Sterilisationsprozess mittels Autoklaven dargestellt.



Vom Grundprinzip ähnelt das Integrationskonzept PE_E_ZK dem zuvor erläuterten. Allerdings wird hierbei nicht ein Produkt oder Prozessmedium aufgeheizt, sondern ein Warmwasserzweckstrom, der zur Produktschonung zwischen dem zu behandelnden Produkt (z.B. Milch) und dem primären Wärmeträgermedium (z.B. Dampf) installiert ist. Der Zwischenkreis wird mit einer Temperatur etwas oberhalb der zu erzielenden Produkttemperatur betrieben.

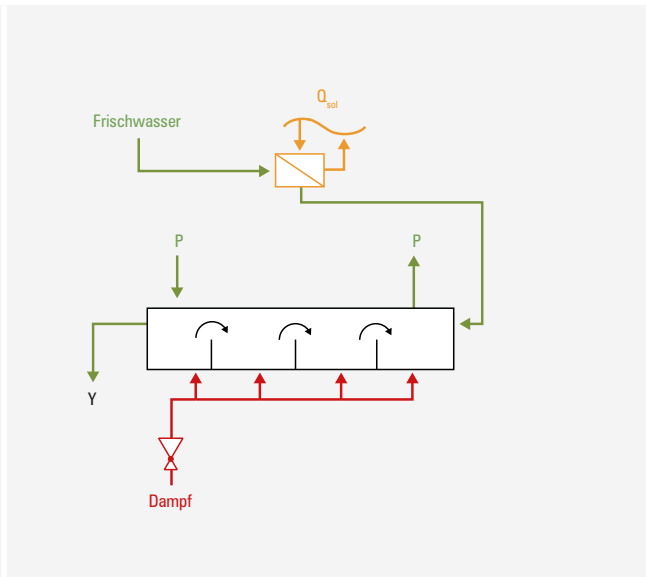
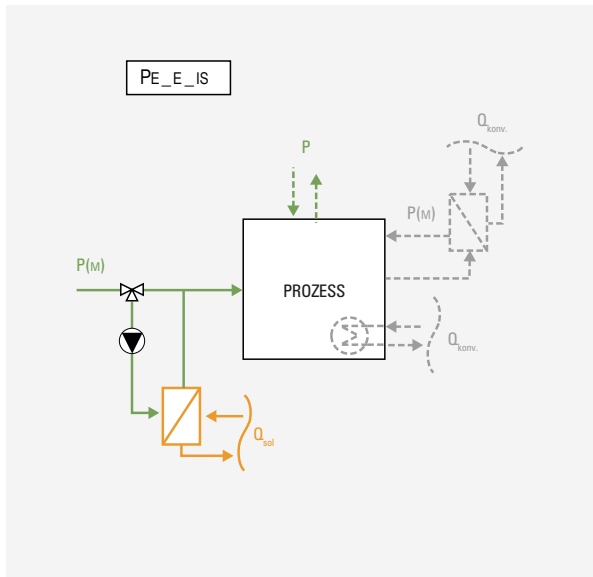


Externer WÜT für Bäder/Behälter (PE_E_BB)

Bei diesem Integrationskonzept wird ein externer Wärmeübertrager zur Beheizung von Produkt oder Prozessmedien von Bädern, Maschinen oder Tanks eingebunden. Hierzu wird das Produkt oder Prozessmedium aus dem Prozess abgezogen, solar erwärmt und anschließend wieder eingespeist. Eine Möglichkeit zeigt das Beispiel zur Beheizung von Galvanikbecken. Diese werden konventionell mittels dampfbeheizten internen Wärmeübertragern (Platecoil) auf Soltemperatur gebracht und gehalten.

1

2



Externer WÜT für Inputströme (PE_E_IS)

Die letzte Variante unter Verwendung eines externen Wärmeübertragers dient zur solaren Aufheizung von Inputströmen. Viele Prozesse werden kontinuierlich oder stoßweise mit einem Produkt- oder Prozessmedium gespeist. Je nach Prozess kann es sinnvoll sein, diese Inputströme wie dargestellt solar vorzuwärmen. Die gestrichelten Linien deuten die Möglichkeiten der konventionellen Beheizung an. Als Beispiel dient hierbei das Brühen von Geflügel während der Schlachtung.

3

4

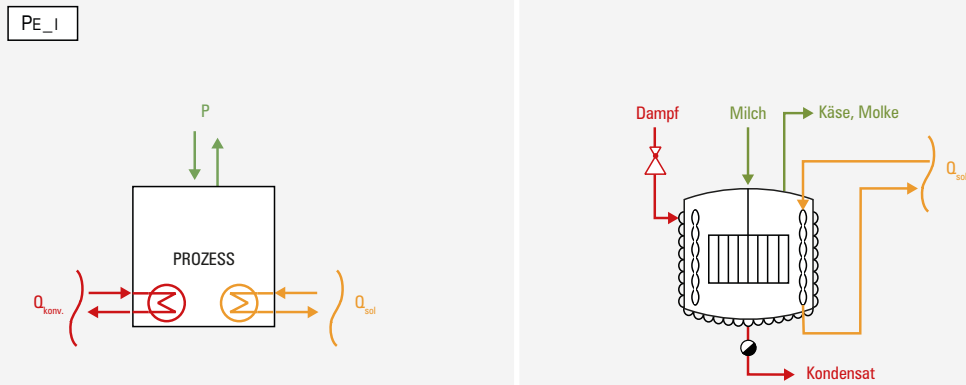
5

6

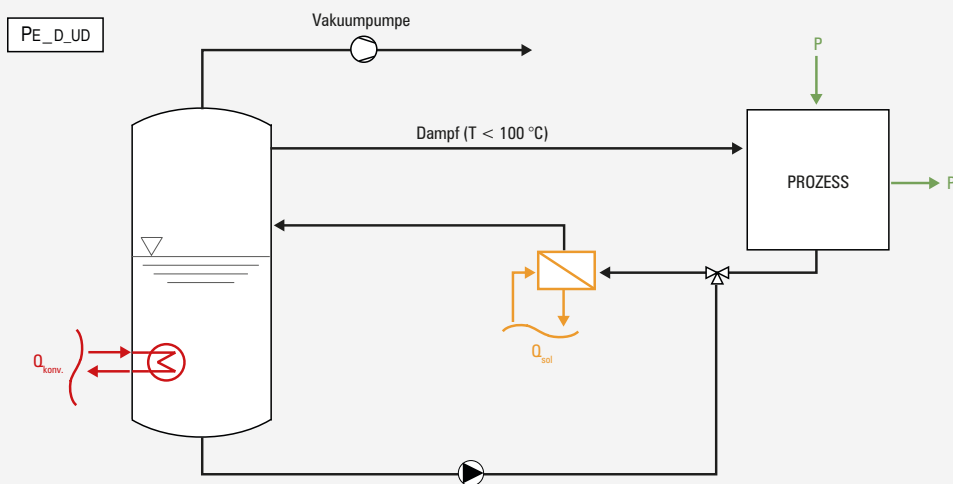
7

8

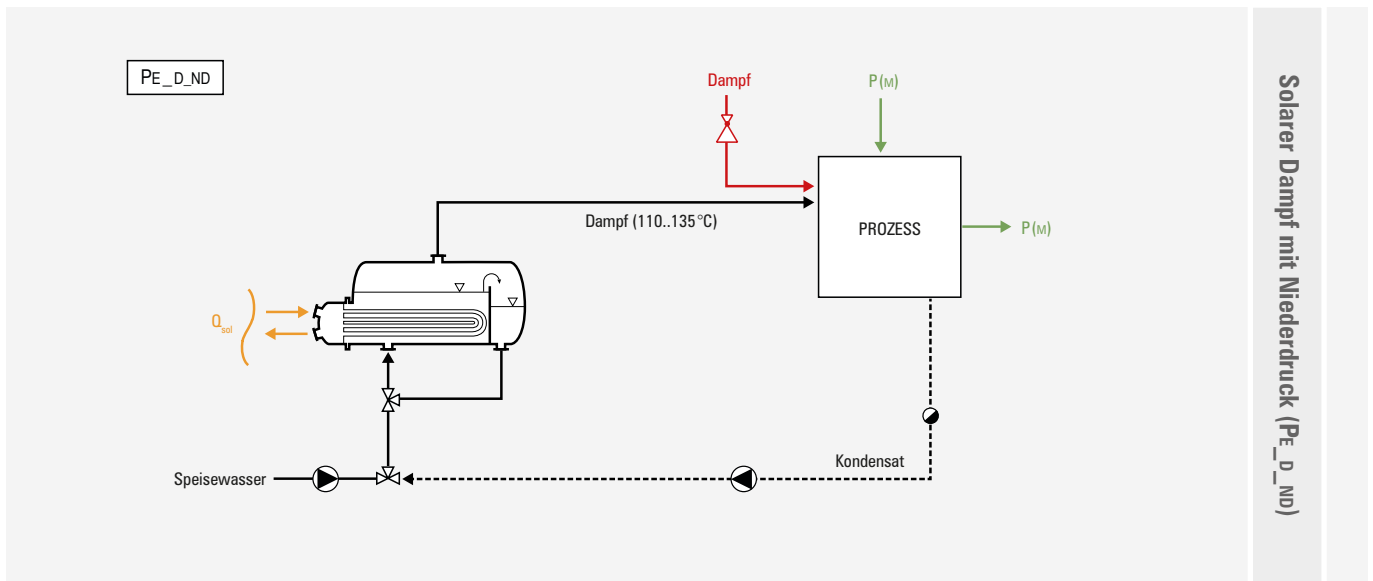
9

Interner WÜT für Bäder/Behälter (PE_{-I})

Die zweite Klasse zur Einbindung von Solarwärme auf Prozessebene ist die Integration eines internen Wärmeübertragers. Dies kann zur solaren Beheizung von Bädern, Maschinen oder Tanks genutzt werden. Dabei wird eine konventionell, mittels internen Wärmeübertrager oder direkter Dampfinjektion beheizte Anlage um einen solarbeheizten internen Wärmeübertrager erweitert. Das Beispiel zeigt einen Käsefertiger mit Mantelheizung, der um solar beheizte, interne Dimple Plates erweitert wurde.

Solarer Dampf mit Unterdruck (PE_{-D_UD})

Die letzte Klasse zur Einbindung von Solarwärme auf Prozessebene umfasst die solare Bereitstellung von Dampf auf reduziertem Druckniveau. Eine Möglichkeit ist die Dampferzeugung im Unterdruckbereich (unter 100 °C), welche beispielsweise für eine Vielzahl von Verdampfungsprozessen in der Lebensmittelindustrie genutzt wird (PE_{-D_UD}). Hierfür wird ein geeigneter Speicher benötigt, der über eine konventionelle Nachheizung verfügt. Das Volumen des Speichers muss so groß gewählt werden, dass er mehr Flüssigkeit aufnehmen kann, als sich im gesamten Kreislauf befindet, damit die angeschlossene Vakuumpumpe den Unterdruck aufbauen kann. Das aus dem Prozess kommende Kondensat wird dann über einen Solarwärmeübertrager aufgeheizt und in den evakuierten Speicher geführt. Der dort entstehende Dampf wird dann zum Prozess geführt und der Kreislauf startet erneut.



Bei der Bereitstellung von Dampf im Niederdruckbereich von 1,5..3 bar (entspricht etwa 110..135 °C) wird ein geeigneter Dampferzeuger mit Solarwärme betrieben, wie dies bereits bei dem Integrationskonzept VE_D_PI auf Versorgungsebene erläutert wurde. Dem Rohrbündelwärmeübertrager wird geeignetes Speisewasser zugeführt, das unter Zufuhr von Solarwärme auf dem geforderten Druckniveau verdampft wird. Für den Fall, dass in dem zu versorgenden Prozess wiederverwendbares Kondensat anfällt, kann dieses dem Wärmeübertrager erneut zugeführt werden.

1

2

3

4

5

6

7

8

9

LASTPROFILE

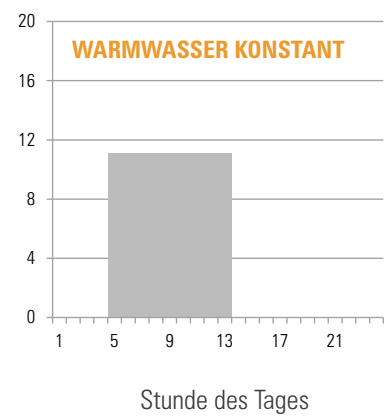
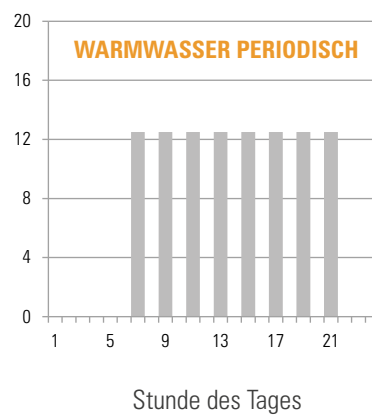
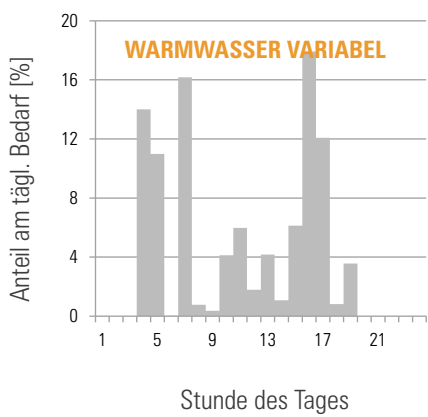
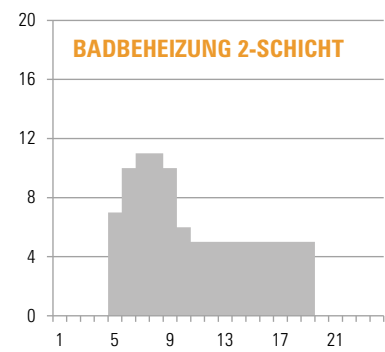
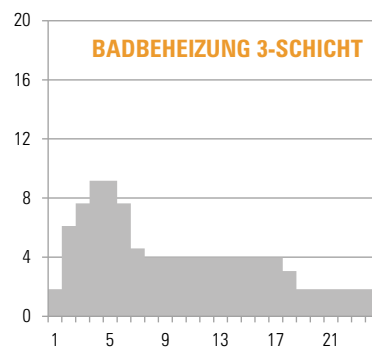
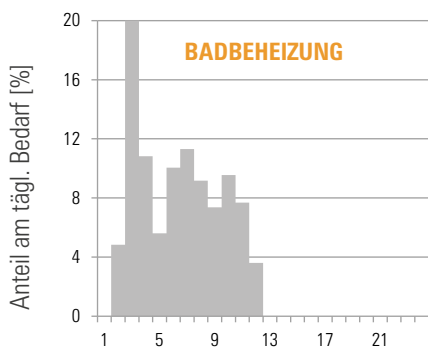
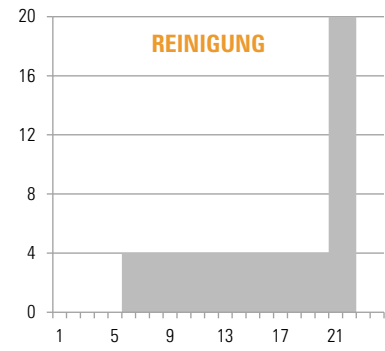
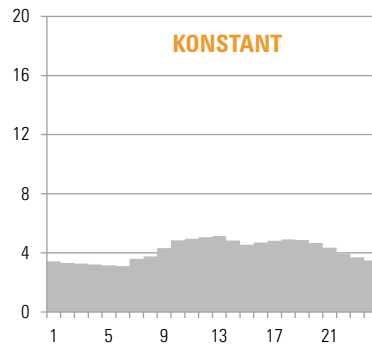
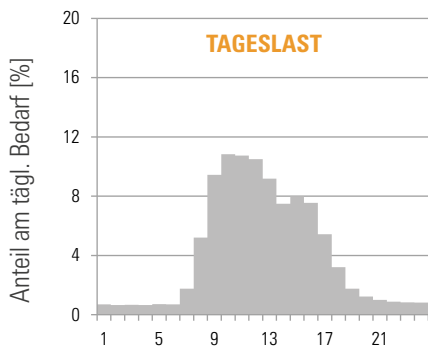
Wie in den vorangegangenen Kapiteln erläutert hat das den Berechnungen zugrunde gelegte Lastprofil einen maßgeblichen Einfluss auf die wirtschaftliche Integration solarer Prozesswärme. Dementsprechend werden nachfolgend die standardisierten Lastprofile veranschaulicht, welche für die Simulationen als Basis definiert wurden. Eine Unterteilung erfolgt dabei auf drei Ebenen: tägliches, wöchentliches und jährliches Lastprofil.

Das **tägliche Lastprofil** ist charakteristisch für den zugrunde gelegten Prozess im betrachteten Unternehmen. Dabei lassen sich grundsätzliche Abhängigkeiten wie bspw. bei dem Profil „Reinigung“ erkennen, wo zum Ende des Produktionstages ein überdurchschnittlicher Wärmebedarf auftritt. Für das Profil „Tageslast“ wurden reale elektrische Lastgänge deutscher Unternehmen herangezogen und die Annahme getroffen, dass zu den Betriebszeiten der elektrische dem thermischen Lastgang entspricht.

Bei der Dimensionierung der Speichergröße ist hingegen das **wöchentliche Lastprofil** entscheidender als das tägliche. Neben der Speicherdimensionierung kann das wöchentliche Lastprofil bei einer industriellen und gewerblichen Anwendung von Solarwärme mitunter bestimmend sein für den Solarertrag und damit für die Wirtschaftlichkeit einer entsprechenden Investition.

Nicht zuletzt wirkt sich das **jährliche Lastprofil** auf den Systemertrag aus, da die Einstrahlung über das Jahr variiert. Dieser Einfluss wird bspw. bei der Auslegung nach VDI 6002 beachtet. Dabei wird die Kollektorfläche nach der Last an einem guten Sommertag dimensioniert, um keine überschüssigen Erträge zu erzielen.

TÄGLICHE LASTPROFILE



1

2

3

4

5

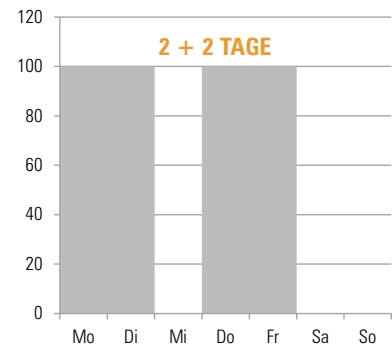
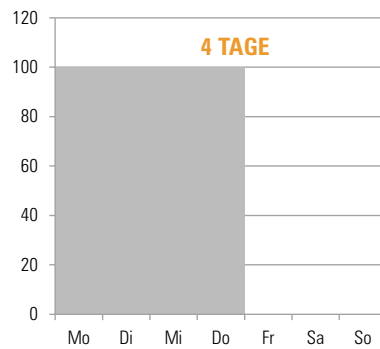
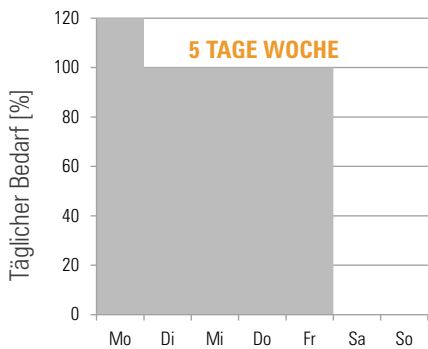
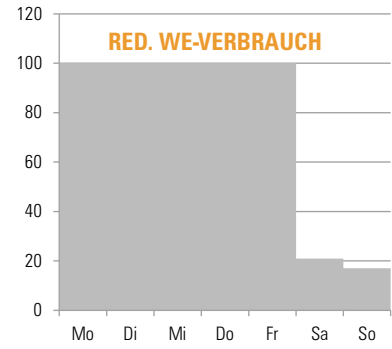
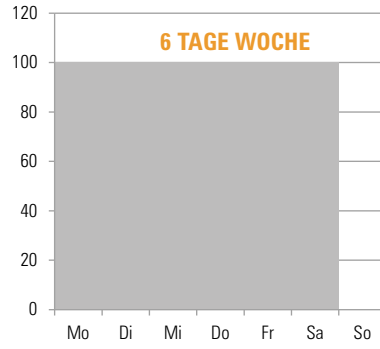
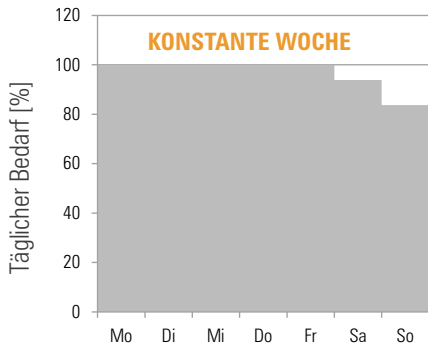
6

7

8

9

WÖCHENTLICHE LASTPROFILE

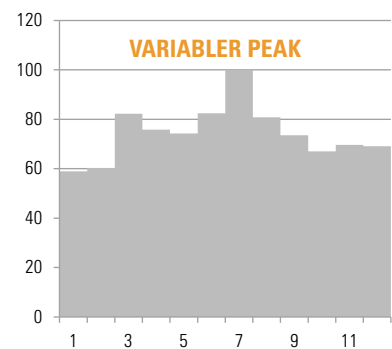
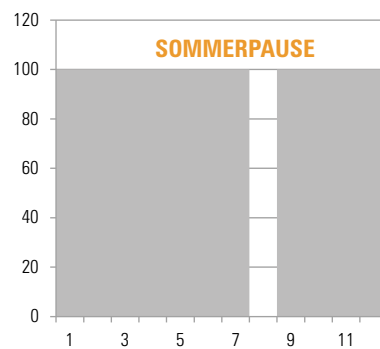
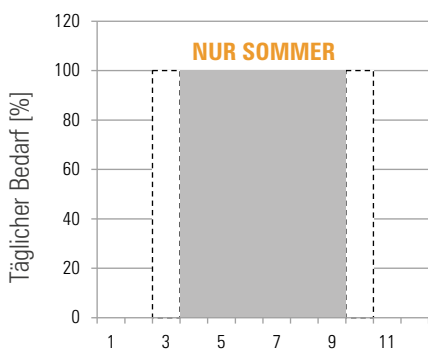
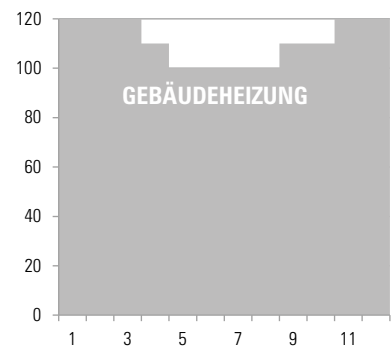
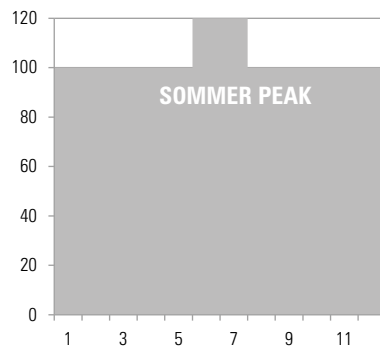
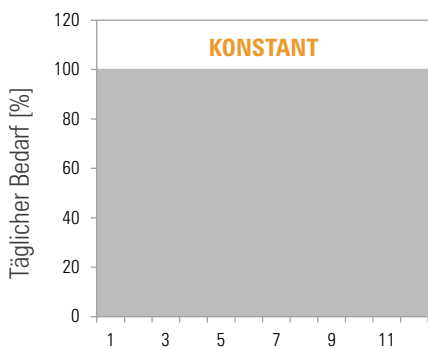


Tag der Woche

Tag der Woche

Tag der Woche

JÄHRLICHE LASTPROFILE



Monat

Monat

Monat

VORAUSSLEGUNG KOLLEKTORFLÄCHE

Die nachfolgende Tabelle beinhaltet Auslegungswerte für die Kollektorfläche ($q_{\text{auslegung}}$ in kWh/(m²d)). Dabei werden zehn Temperaturniveaus, drei verschiedene tägliche Lastprofile, die vier Kollektortypen (jeweils verbesserte Kollektoren) und vier Standorte unterschieden. Als spe-

zifische Speicherkapazität liegen den Tagesprofilen „Tageslast“ und „Konstant“ 5 kWh/m² und dem Tagesprofil „Badbeheizung“ 7 kWh/m² zugrunde. Je nach Randbedingung der auszulegenden Solaranlage kann ein geeigneter Auslegungswert $q_{\text{auslegung}}$ gewählt werden.

Temperatur	Kollektor	TAGESLAST				BADBEHEIZUNG				KONSTANT			
		Kop	Wür	Tou	Mad	Kop	Wür	Tou	Mad	Kop	Wür	Tou	Mad
15..60 °C	FK	3,9	3,9	4,4	4,4	3,7	3,7	4,0	4,0	3,7	3,7	4,0	4,2
	FK-DG	4,2	4,2	4,6	4,6	4,0	4,0	4,2	4,4	4,0	4,0	4,4	4,6
	VRK	3,5	3,5	3,8	3,8	3,3	3,3	3,6	3,6	3,5	3,5	3,8	3,8
	CPC	3,8	3,8	4,0	4,0	3,8	3,8	4,0	4,0	4,0	4,0	4,2	4,2
15..80 °C	FK	3,1	3,1	3,7	3,9	3,1	3,1	3,7	3,7	3,1	3,1	3,5	3,7
	FK-DG	3,7	3,7	4,2	4,2	3,7	3,9	4,0	4,0	3,7	3,7	4,0	4,0
	VRK	3,2	3,2	3,5	3,5	3,2	3,2	3,3	3,5	3,2	3,2	3,5	3,5
	CPC	3,6	3,6	3,8	3,8	3,6	3,6	3,8	3,8	3,6	3,6	4,0	4,0
30..60 °C	FK	3,7	3,9	4,2	4,2	3,7	3,7	4,0	4,2	3,7	3,7	4,2	4,2
	FK-DG	4,0	4,2	4,6	4,6	4,0	4,0	4,2	4,4	4,0	4,2	4,6	4,6
	VRK	3,5	3,5	3,8	3,8	3,3	3,5	3,6	3,6	3,5	3,5	3,8	3,8
	CPC	3,8	3,8	4,0	4,0	3,8	3,8	4,0	4,0	3,8	3,8	4,2	4,2
30..80 °C	FK	3,1	3,1	3,5	3,7	3,1	3,1	4,0	3,9	2,9	3,1	3,5	3,7
	FK-DG	3,7	3,7	4,0	4,0	3,7	3,7	3,7	4,2	3,7	3,7	4,0	4,2
	VRK	3,2	3,2	3,5	3,5	3,2	3,2	3,5	3,5	3,2	3,2	3,5	3,5
	CPC	3,6	3,6	3,8	3,8	3,6	3,6	3,8	3,8	3,6	3,6	4,0	4,0
40..70 °C	FK	3,3	3,3	3,9	3,9	3,3	3,3	3,7	3,9	3,3	3,3	3,9	3,9
	FK-DG	3,9	3,9	4,2	4,2	3,7	3,9	4,2	4,2	3,9	3,9	4,2	4,2
	VRK	3,0	3,3	3,6	3,6	3,2	3,3	3,5	3,5	3,3	3,3	3,6	3,6
	CPC	3,6	3,6	4,0	4,0	3,6	3,6	3,8	3,8	3,6	3,8	4,0	4,0
40..90 °C	FK	2,6	2,6	3,1	3,1	2,6	2,8	3,1	3,3	2,6	2,8	3,1	3,3
	FK-DG	3,1	3,3	3,9	3,9	3,3	3,5	3,9	3,9	3,3	3,5	3,9	3,9
	VRK	3,0	3,0	3,3	3,3	3,0	3,0	3,3	3,3	3,0	3,0	3,2	3,2
	CPC	3,5	3,5	3,6	3,6	3,5	3,5	3,6	3,6	3,5	3,5	3,8	3,8
50..80 °C	FK	2,8	2,9	3,3	3,5	2,8	2,9	3,3	3,5	2,8	2,9	3,3	3,5
	FK-DG	3,5	3,5	3,9	4,0	3,5	3,5	3,9	3,9	3,5	3,5	3,9	4,0
	VRK	3,0	3,2	3,3	3,3	3,0	3,0	3,3	3,3	3,0	3,2	3,5	3,5
	CPC	3,5	3,5	3,8	3,8	3,5	3,5	3,8	3,8	3,5	3,6	3,8	3,8
60..90 °C	FK	2,4	2,4	2,8	2,9	2,2	2,4	2,9	2,9	2,4	2,4	2,9	2,9
	FK-DG	3,1	3,3	3,7	3,7	3,1	3,1	3,5	3,9	3,1	3,3	3,7	3,7
	VRK	2,9	2,9	3,2	3,3	2,9	2,9	3,2	3,2	2,9	3,0	3,2	3,3
	CPC	3,3	3,3	3,6	3,6	3,3	3,3	3,6	3,6	3,3	3,5	3,6	3,6
70..90 °C	FK	2,2	2,2	2,6	2,8	2,0	2,2	2,6	2,8	2,2	2,2	2,6	2,8
	FK-DG	3,1	3,1	3,5	3,5	2,9	2,9	3,3	3,5	2,9	3,1	3,5	3,5
	VRK	2,9	2,9	3,2	3,2	2,7	2,7	3,0	3,0	2,9	2,9	3,2	3,2
	CPC	3,3	3,3	3,5	3,6	3,3	3,3	3,5	3,5	3,3	3,3	3,5	3,5
80..95 °C	FK	1,8	2,0	2,4	2,4	1,7	1,8	2,2	2,4	1,8	1,8	2,2	2,2
	FK-DG	2,4	2,4	3,1	3,1	2,4	2,4	3,1	3,1	2,6	2,8	3,1	3,1
	VRK	2,6	2,7	3,0	3,0	2,6	2,6	2,6	2,7	2,6	2,6	2,9	2,9
	CPC	3,1	3,1	3,5	3,6	3,1	3,1	3,1	3,3	3,1	3,3	3,5	3,5

1

2

3

4

5

6

7

8

9

VORAUSSLEGUNG SPEICHERVOLUMEN

Nachfolgende Tabellen beinhalten die notwendigen Auslegungswerte zur Berechnung des jährlichen Systemertrags. Dazu werden die Systemnutzungsgrade (in %) der Solaranlage für drei unterschiedliche Temperaturniveaus, drei tägliche und zwei wöchentliche Lastprofile

sowie die vier Kollektortypen (jeweils verbesserter Kollektor) an zwei Standorten angegeben. Die Systemnutzungsgrade werden für unterschiedliche spezifische Auslegungswerte ($q_{\text{auslegung}}$) und Speicherkapazitäten (q_{speicher}) angegeben.

WÜRZBURG		15..60 °C						40..70 °C				60..90 °C					
Wöchentl. Profil	Tägl. Profile	$q_{\text{auslegung}}$	q_{speicher}	FK	FK-DG	VRK	CPC	FK	FK-DG	VRK	CPC	FK	FK-DG	VRK	CPC		
Konstante Woche	Tageslast	4	1	42	44	37	44	32	36	33	40	21	29	28	35		
			3	46	49	41	48	33	40	36	42	21	30	29	35		
			5	47	51	42	48	33	40	36	42	20	30	29	35		
			7	47	51	43	48	33	39	36	41	20	29	29	34		
			9	47	51	43	48	32	39	36	41	20	29	29	34		
		6	1	50	53	44	50	33	40	37	43	21	31	30	36		
			3	51	54	45	50	33	40	37	42	21	30	30	36		
			5	51	54	45	50	33	40	36	42	21	30	29	35		
			7	51	54	45	50	33	40	36	42	20	30	29	35		
			9	51	54	45	50	33	40	36	42	20	29	29	35		
		10	1	52	55	45	51	34	41	37	43	22	31	31	37		
			3	53	56	46	51	34	41	37	43	21	31	30	36		
			5	53	56	46	51	34	41	37	43	21	30	30	36		
			7	53	56	46	51	34	41	37	42	21	30	30	35		
			9	53	56	46	51	33	40	37	42	21	30	29	35		
		Badbeheizung	4	3	37	40	34	41	27	33	30	36	18	26	26	32	
				5	42	46	39	46	30	37	34	40	19	28	28	33	
				7	44	48	41	47	30	38	35	40	19	28	28	33	
				9	45	49	41	47	30	38	35	40	19	27	28	33	
				6	3	39	42	36	42	28	33	30	37	18	26	26	32
					5	44	48	41	47	30	38	35	40	19	28	28	34
					7	47	50	42	48	31	38	35	41	19	28	28	34
					9	48	51	43	49	31	38	35	41	19	28	28	34
				10	3	39	43	36	43	29	34	31	38	18	27	27	33
	5				46	50	42	48	31	38	35	41	19	28	28	34	
	7				48	52	43	49	31	39	35	41	19	29	29	34	
	9				50	53	44	50	32	39	35	41	19	28	28	34	
	Konstant		4	1	33	34	28	35	24	26	23	29	17	22	21	26	
				3	44	47	40	47	32	39	35	42	21	30	29	35	
				5	47	50	42	49	33	40	36	42	21	30	29	35	
				7	48	51	43	49	33	40	36	42	21	30	29	35	
				9	48	52	43	49	33	40	36	42	20	29	29	35	
			6	1	41	41	34	42	30	33	29	36	20	27	25	32	
				3	49	53	44	50	34	41	37	43	21	31	30	36	
				5	51	54	45	51	34	41	37	43	21	30	30	36	
				7	52	55	45	51	34	41	37	43	21	30	30	35	
				9	53	55	45	51	34	41	37	42	21	30	29	35	
			10	1	51	54	45	51	35	41	38	43	22	31	31	37	
				3	54	56	46	52	34	41	37	43	22	31	30	36	
		5		54	57	46	52	34	41	37	43	21	31	30	36		
		7		54	57	46	52	34	41	37	43	21	30	30	36		
		9		54	57	46	52	34	41	37	43	21	30	30	35		



WÜRZBURG			15..60 °C				40..70 °C				60..90 °C				
Wöchentl. Profil	Tägl. Profile	q _{auslegung}	q _{speicher}	FK	FK-DG	VRK	CPC	FK	FK-DG	VRK	CPC	FK	FK-DG	VRK	CPC
5 Tagewoche	Tageslast	4	1	33	34	29	34	24	28	26	31	16	23	22	27
			3	37	40	33	38	27	32	29	34	18	24	22	28
			5	39	42	35	41	29	34	30	36	19	25	24	30
			7	41	43	36	42	30	35	31	37	19	27	26	32
		9	42	44	37	42	30	36	31	37	19	28	27	33	
		6	1	38	41	34	38	25	31	28	32	17	23	23	28
			3	42	44	36	42	28	34	30	36	19	26	25	31
			5	44	47	39	44	30	36	32	38	20	26	26	31
			7	46	49	40	46	31	37	34	39	20	28	27	33
		9	47	50	41	47	32	38	34	40	20	29	28	34	
		10	1	40	42	35	39	26	31	28	33	17	24	23	28
			3	44	46	38	43	29	34	31	36	19	27	26	31
	5		47	49	41	46	31	37	33	39	20	28	27	33	
	7		49	51	42	48	32	38	34	40	20	29	27	33	
	9	50	53	43	50	33	39	35	41	20	29	29	34		
	Badbeheizung	4	3	30	32	27	32	22	26	23	28	15	21	20	25
			5	35	38	32	38	25	30	28	33	17	24	23	29
			7	38	41	35	40	27	32	29	35	18	25	25	30
			9	40	43	36	42	28	33	30	36	18	26	25	31
		6	3	31	33	28	33	22	26	23	28	15	21	21	26
			5	37	40	34	39	26	30	28	33	17	24	24	29
			7	40	43	36	42	28	32	30	35	18	26	26	31
			9	43	46	38	44	29	34	31	37	18	27	27	32
		10	3	31	34	28	34	23	26	24	29	15	22	21	26
			5	38	41	34	40	26	31	28	33	18	25	24	29
			7	42	45	37	43	28	33	31	36	18	26	26	32
			9	45	48	40	46	30	35	32	38	19	27	27	33
	Konstant	4	1	27	28	23	28	20	22	19	24	14	18	17	22
			3	36	39	33	39	27	32	29	34	18	25	24	29
			5	39	42	36	42	29	34	31	36	19	26	25	31
			7	41	44	37	43	30	35	32	38	20	28	27	32
		9	42	45	38	44	31	36	32	39	20	28	27	33	
		6	1	32	33	28	34	23	26	24	29	16	22	20	26
			3	41	44	37	42	27	34	31	36	19	27	26	31
			5	44	47	39	45	29	37	33	38	20	28	26	32
			7	46	49	41	46	30	38	34	39	20	29	28	33
9		48	51	42	48	32	38	35	41	20	29	29	34		
10		1	39	42	35	39	26	32	28	33	17	24	24	28	
		3	45	47	38	44	29	35	31	36	19	27	26	32	
	5	48	50	41	47	31	37	33	39	20	29	28	33		
	7	50	52	43	49	32	38	34	40	21	30	29	34		
9	51	54	44	50	33	39	35	41	21	30	29	35			

1

2

3

4

5

6

7

8

9

MADRID			15..60 °C				40..70 °C				60..90 °C					
Wöchentl. Profil	Tägl. Profile	q _{auslegung}	q _{speicher}	FK	FK-DG	VRK	CPC	FK	FK-DG	VRK	CPC	FK	FK-DG	VRK	CPC	
Konstante Woche	Tageslast	4	1	38	39	32	39	35	36	31	38	27	32	28	35	
			3	48	50	41	48	40	44	38	44	29	38	34	40	
			5	49	51	42	49	41	45	39	45	29	38	34	40	
			7	50	52	43	49	40	46	39	45	29	38	35	40	
			9	50	52	43	49	40	46	39	45	28	37	35	40	
		6	1	52	54	44	51	41	46	40	46	29	38	35	41	
			3	55	58	47	52	42	48	41	47	29	39	36	41	
			5	56	58	47	52	42	48	42	47	29	39	36	41	
			7	56	59	47	52	42	48	41	47	29	38	36	41	
			9	56	58	47	52	42	48	41	47	29	38	35	41	
		10	1	56	59	47	53	42	48	41	47	30	39	36	42	
			3	57	59	48	53	42	48	42	47	30	39	36	41	
			5	58	60	48	53	42	48	42	47	30	39	36	41	
			7	58	60	48	53	42	48	42	47	29	38	36	41	
			9	58	60	48	53	42	48	41	47	29	38	35	41	
		Badbeheizung	4	3	36	37	31	37	31	34	30	36	24	31	28	34
				5	44	46	38	45	38	42	36	43	27	36	33	39
				7	47	50	41	48	39	44	38	45	27	36	34	39
				9	48	51	42	49	39	44	38	45	27	36	34	39
			6	3	37	39	33	39	30	31	27	35	25	32	29	35
	5			47	51	42	48	39	43	36	44	28	36	34	39	
	7			50	54	45	50	40	46	40	46	28	37	35	40	
	9			53	56	46	51	40	46	40	46	28	37	34	40	
	10		3	37	40	34	40	32	33	28	37	25	32	29	35	
			5	48	53	44	49	38	44	38	45	28	37	34	40	
			7	52	56	46	51	40	47	41	46	28	37	35	40	
			9	55	58	47	52	41	47	41	46	28	37	35	40	
	Konstant	4	1	28	29	24	30	24	25	21	26	20	23	20	25	
			3	45	46	39	47	39	42	36	44	29	37	34	40	
			5	49	51	42	49	41	45	39	46	30	38	35	41	
			7	50	52	43	50	41	46	39	46	29	38	35	41	
			9	51	53	43	50	41	46	39	46	29	38	35	40	
		6	1	35	37	30	37	30	31	27	33	27	29	25	32	
			3	53	56	46	52	42	48	41	47	30	39	36	42	
			5	56	59	48	53	43	49	42	47	30	39	36	42	
			7	57	59	48	53	43	49	42	47	30	39	36	41	
			9	57	60	48	53	43	48	42	47	30	39	36	41	
		10	1	55	55	45	53	43	48	41	48	31	40	37	43	
			3	59	61	49	54	43	49	42	48	31	40	37	42	
			5	60	62	49	54	43	49	42	48	30	39	36	42	
			7	60	62	49	54	43	49	42	47	30	39	36	42	
			9	60	62	49	54	43	49	42	47	30	39	36	41	



MADRID		15..60 °C						40..70 °C				60..90 °C			
Wöchentl. Profil	Tägl. Profile	q _{auslegung}	q _{speicher}	FK	FK-DG	VRK	CPC	FK	FK-DG	VRK	CPC	FK	FK-DG	VRK	CPC
5 Tagewoche	Tageslast	4	1	31	30	25	30	27	28	24	30	21	25	23	28
			3	38	39	32	37	32	35	30	35	24	30	27	32
			5	40	41	34	39	33	36	31	37	25	31	26	33
			7	40	42	34	40	34	37	32	38	25	32	29	34
			9	41	43	35	41	35	38	33	38	27	33	30	35
		6	1	40	41	34	38	31	35	30	35	22	29	27	31
			3	44	45	37	41	34	38	33	37	25	32	29	34
			5	46	48	39	44	36	40	35	40	27	33	30	36
			7	48	50	40	46	38	42	36	42	28	35	32	37
			9	49	51	41	47	38	43	37	43	28	36	33	38
		10	1	43	44	36	39	32	36	31	35	23	30	27	32
			3	46	48	38	43	35	39	33	38	26	33	30	35
	5		49	51	41	46	37	42	36	41	27	35	32	37	
	7		52	54	43	49	38	44	38	43	28	36	33	39	
	9		53	55	44	50	39	45	38	44	29	37	33	39	
	Badbeheizung	4	3	27	28	23	28	23	25	22	26	19	23	21	25
			5	35	36	30	35	29	33	28	33	22	29	26	31
			7	38	40	33	38	31	35	30	35	24	31	28	33
			9	40	41	34	40	33	37	31	37	25	31	28	34
		6	3	29	30	25	29	24	24	20	26	19	24	21	26
			5	37	39	32	37	30	33	28	34	23	29	27	31
			7	41	43	35	41	33	37	32	36	25	32	29	34
			9	44	46	38	44	35	38	33	39	26	33	31	36
		10	3	29	30	26	29	25	25	21	28	20	25	22	26
			5	38	40	33	38	30	34	29	34	23	30	27	32
			7	43	45	37	42	33	37	32	37	25	32	30	35
			9	47	49	40	46	35	39	34	39	27	34	31	37
	Konstant	4	1	25	24	19	24	20	20	17	21	17	19	16	20
			3	36	37	31	37	31	34	29	35	24	30	27	32
			5	39	41	34	40	34	37	31	37	25	32	26	34
			7	41	42	35	41	35	38	32	38	26	33	29	35
			9	42	43	36	42	36	39	33	39	27	34	30	36
		6	1	31	29	24	29	25	25	21	27	21	24	20	26
			3	43	45	37	42	35	39	33	38	26	33	30	35
			5	47	49	39	45	37	41	35	41	28	35	30	36
			7	49	51	41	47	38	43	37	43	28	36	32	37
9			50	52	43	48	39	44	38	43	29	36	33	38	
10		1	42	43	35	40	33	37	32	36	24	31	28	32	
		3	48	49	40	44	36	40	34	39	26	34	31	36	
		5	51	53	42	48	38	43	37	42	28	36	33	38	
		7	53	55	44	49	39	45	38	44	29	37	34	40	
		9	55	56	45	51	41	46	39	44	29	38	34	40	

1

2

3

4

5

6

7

8

9

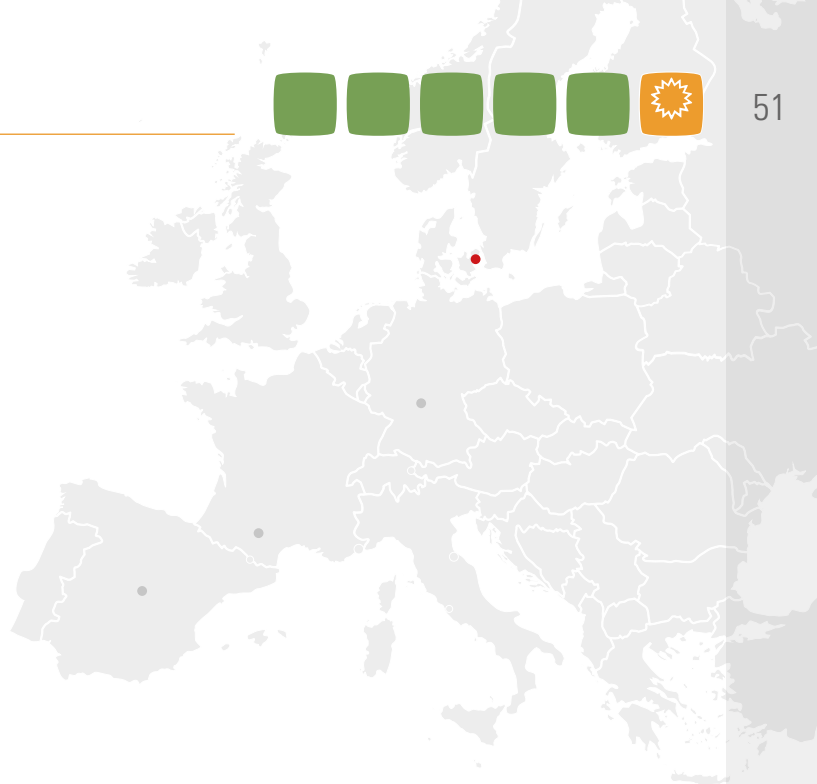
ERTRAGSABSCHÄTZUNG

Um bei einer Vorauslegung abschätzen zu können, ob ein eher kleiner oder größerer Auslegungswert ($q_{\text{Auslegung}}$) gewählt werden soll (kleine Auslegung führt zu größerer Anlage, großer Auslegungswert führt zu einer eher kleinen Anlage ohne solare Überschüsse im Sommer), beinhalten nachfolgende Tabellen die ermittelten Systemnutzungsgrade für drei unterschiedliche Auslegungswerte (4, 6 und 10 kWh/m²d).

Damit kann die Änderung des Systemnutzungsgrades und damit des Ertrags der Anlage bei veränderter Auslegung abgeschätzt werden. Wie auch zuvor berücksichtigen die Tabellen zwei wöchentliche und drei tägliche Lastprofile, sechs Temperaturniveaus, vier Standorte und jeweils zwei Kollektorqualitäten.

Kopenhagen (verbesserter Kollektor)

KOPENHAGEN																			
		KONSTANTE WOCHE									5 TAGEWOCHE								
Temp.	verbesserter Kollektor	Tageslast			Badbeheizung			Konstant			Tageslast			Badbeheizung			Konstant		
		4	6	10	4	6	10	4	6	10	4	6	10	4	6	10	4	6	10
15..60 °C	FK	45	49	51	43	45	47	45	50	53	40	44	47	38	40	42	40	45	48
	FK-DG	48	53	54	47	49	51	49	53	55	43	48	50	42	44	45	43	48	51
	VRK	41	44	45	40	41	42	42	44	45	36	39	41	36	37	38	37	40	42
	CPC	47	50	51	46	47	48	48	50	51	42	46	46	41	43	44	43	46	48
30..80 °C	FK	34	37	39	32	34	36	35	38	40	31	34	36	29	31	33	31	35	37
	FK-DG	40	43	45	38	40	42	41	43	45	36	39	41	34	37	38	36	39	42
	VRK	35	38	39	35	36	37	36	38	39	31	34	36	31	33	34	32	35	37
	CPC	42	44	45	41	42	43	42	44	45	36	40	42	37	38	40	38	41	42
40..70 °C	FK	31	31	32	28	29	30	31	32	32	29	29	30	26	27	28	28	30	30
	FK-DG	38	39	39	36	36	37	38	39	39	34	36	37	32	33	34	34	36	37
	VRK	35	35	36	33	34	34	35	36	36	30	32	33	30	31	31	31	33	33
	CPC	41	41	42	39	40	40	41	42	42	36	38	39	36	36	37	37	39	39
50..80 °C	FK	28	30	31	22	23	23	25	25	25	26	28	29	21	22	22	23	24	24
	FK-DG	35	38	39	29	31	31	33	33	34	31	34	36	26	28	29	29	31	32
	VRK	32	35	35	28	30	30	31	32	32	29	31	32	25	27	27	27	29	30
	CPC	39	41	42	35	36	37	37	38	38	34	36	38	31	33	33	34	35	36
60..90 °C	FK	19	19	19	17	17	17	19	19	20	17	18	18	16	17	17	18	19	19
	FK-DG	28	28	29	26	26	27	28	28	29	26	26	27	24	25	25	26	26	27
	VRK	28	29	29	26	27	27	28	29	29	26	26	26	25	25	26	26	26	27
	CPC	34	34	35	32	33	33	34	35	35	31	32	33	30	31	31	31	32	33
80..95 °C	FK	9	9	10	8	8	8	9	9	9	9	9	9	8	8	8	9	9	9
	FK-DG	19	20	20	17	17	17	19	19	19	17	18	18	17	17	17	18	18	18
	VRK	22	22	22	20	19	20	21	21	22	20	20	20	19	19	19	20	20	21
	CPC	28	28	28	25	25	25	27	27	27	25	25	25	24	24	24	25	26	26



Kopenhagen (hocheffizienter Kollektor)

KOPENHAGEN																			
		KONSTANTE WOCHE									5 TAGEWOCHE								
Temp.	hoch-effizienter Kollektor	Tageslast			Badbeheizung			Konstant			Tageslast			Badbeheizung			Konstant		
		4	6	10	4	6	10	4	6	10	4	6	10	4	6	10	4	6	10
15..60 °C	FK	48	52	54	45	48	50	48	52	55	42	47	49	40	43	44	42	47	50
	FK-DG	53	56	57	52	53	54	53	56	57	46	50	52	46	48	49	47	51	53
	VRK	42	45	46	41	43	44	42	45	46	36	39	42	36	38	39	36	40	42
	CPC	51	53	54	49	51	51	51	53	54	44	47	50	44	46	47	45	48	50
30..80 °C	FK	38	41	43	36	38	40	38	41	43	34	37	39	32	35	36	34	38	40
	FK-DG	48	50	52	46	48	50	48	51	52	40	45	47	40	43	45	42	45	48
	VRK	37	40	41	36	37	39	37	40	41	31	35	37	31	33	35	32	35	37
	CPC	46	48	49	45	46	47	46	48	49	40	42	45	39	42	43	41	44	46
40..70 °C	FK	35	36	36	32	33	34	35	36	36	32	33	34	30	31	31	32	34	34
	FK-DG	47	48	48	45	46	47	47	48	49	41	43	44	40	41	42	41	44	45
	VRK	36	37	38	35	36	36	36	38	38	31	33	34	31	32	32	32	34	35
	CPC	45	46	46	43	44	45	45	46	46	39	42	42	39	40	40	40	42	43
50..80 °C	FK	29	29	30	26	27	28	29	30	30	26	27	28	24	25	26	27	28	28
	FK-DG	41	44	45	37	40	41	41	43	44	36	40	41	33	35	36	36	39	41
	VRK	32	34	35	28	30	31	30	32	34	27	30	31	24	26	28	27	29	31
	CPC	41	42	43	38	40	41	41	43	43	36	38	40	33	36	37	37	39	40
60..90 °C	FK	23	23	24	21	22	22	23	24	24	21	22	23	20	21	21	22	22	23
	FK-DG	40	41	41	39	39	40	40	41	41	35	37	38	36	37	37	35	38	39
	VRK	31	31	32	29	30	30	31	32	32	27	29	29	27	28	28	27	29	30
	CPC	39	39	40	37	38	38	39	40	40	35	36	37	35	36	36	35	36	38
80..95 °C	FK	13	13	13	12	12	12	13	13	13	12	13	13	12	12	12	13	13	13
	FK-DG	32	32	32	29	29	30	33	33	32	29	30	30	28	28	28	29	30	31
	VRK	24	24	24	21	21	21	24	24	24	21	22	23	20	20	20	22	22	23
	CPC	33	33	33	31	31	31	33	33	33	29	30	30	29	29	29	30	30	31

1

2

3

4

5

6

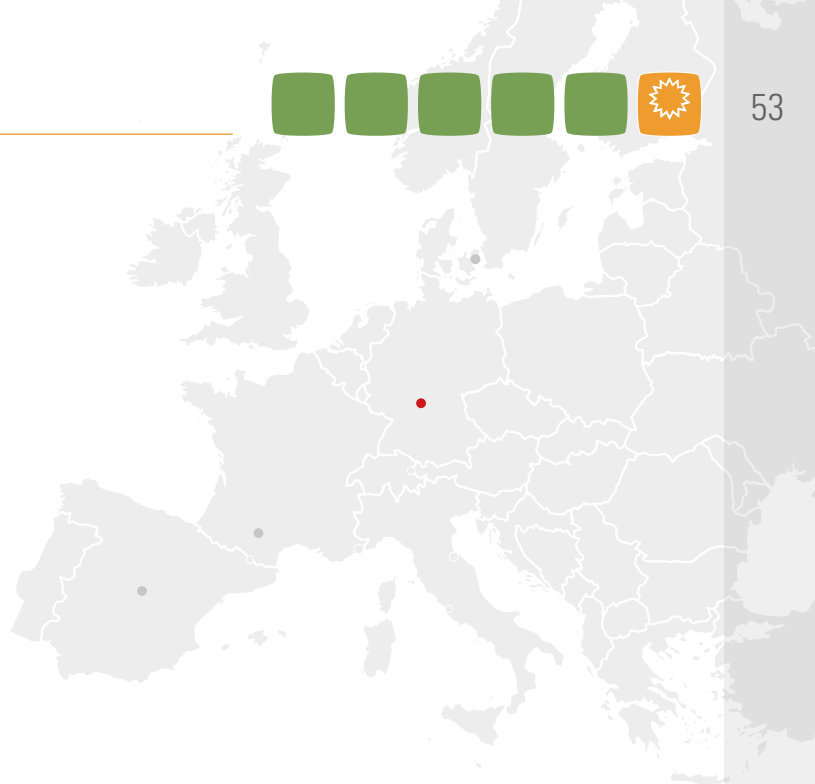
7

8

9

Würzburg (verbesserter Kollektor)

WÜRZBURG																			
		KONSTANTE WOCHE									5 TAGEWOCHE								
Temp.	verbesserter Kollektor	Tageslast			Badbeheizung			Konstant			Tageslast			Badbeheizung			Konstant		
		4	6	10	4	6	10	4	6	10	4	6	10	4	6	10	4	6	10
15..60 °C	FK	46	51	53	44	47	49	47	51	54	40	44	47	38	40	42	39	45	48
	FK-DG	49	54	56	48	50	52	50	54	57	42	47	50	41	43	45	42	47	50
	VRK	42	44	45	41	42	43	42	45	46	35	38	41	35	36	37	36	39	41
	CPC	48	50	51	47	48	49	49	51	52	41	45	46	40	42	43	42	45	47
30..80 °C	FK	36	39	41	34	36	38	37	40	42	31	35	37	29	32	34	31	35	37
	FK-DG	41	45	46	40	42	44	42	45	47	35	39	41	34	36	38	36	39	42
	VRK	36	39	40	36	37	38	37	39	41	31	34	36	30	32	33	31	34	37
	CPC	43	45	46	42	43	44	43	45	46	36	39	42	36	38	39	37	40	42
40..70 °C	FK	33	33	34	30	31	32	33	34	34	29	30	31	27	28	29	29	31	31
	FK-DG	40	40	41	38	38	39	40	41	41	34	36	37	32	33	34	34	37	37
	VRK	36	36	37	35	35	35	36	37	37	30	32	33	29	30	31	31	33	33
	CPC	42	42	43	40	41	41	42	43	43	36	38	38	35	36	36	36	38	39
50..80 °C	FK	30	32	33	24	25	25	27	27	28	27	29	30	22	22	23	24	25	25
	FK-DG	37	39	40	30	33	33	34	35	36	30	33	37	26	28	29	30	32	32
	VRK	33	35	36	28	30	32	32	33	33	28	30	32	24	26	27	27	29	30
	CPC	40	41	43	35	37	38	39	39	39	33	35	38	31	32	33	33	35	36
60..90 °C	FK	21	21	21	19	19	20	21	21	22	19	19	20	18	18	18	19	20	20
	FK-DG	30	30	31	28	28	29	30	30	31	26	27	29	25	26	26	26	28	29
	VRK	29	29	30	28	28	29	29	30	30	25	26	27	25	26	26	25	26	28
	CPC	35	36	36	33	34	34	35	36	36	30	31	33	30	31	32	30	32	33
80..95 °C	FK	11	11	12	10	10	10	11	11	11	10	11	11	9	10	10	11	11	11
	FK-DG	21	21	22	19	19	19	21	21	21	18	19	19	18	18	18	19	20	20
	VRK	23	23	23	21	21	22	23	23	23	20	20	21	19	19	20	20	21	21
	CPC	29	29	29	27	27	27	28	28	28	25	25	26	24	24	25	25	26	27



Würzburg (hocheffizienter Kollektor)

WÜRZBURG																			
		KONSTANTE WOCHE									5 TAGEWOCHE								
Temp.	hoch-effizienter Kollektor	Tageslast			Badbeheizung			Konstant			Tageslast			Badbeheizung			Konstant		
		4	6	10	4	6	10	4	6	10	4	6	10	4	6	10	4	6	10
15..60 °C	FK	50	54	56	47	49	51	49	54	57	41	46	49	40	42	44	41	47	50
	FK-DG	53	57	58	52	54	55	54	57	58	44	49	51	44	47	48	45	49	52
	VRK	42	46	47	41	43	44	42	46	47	35	39	41	35	37	38	35	39	42
	CPC	52	54	55	50	52	52	52	54	55	42	47	49	43	45	46	44	48	50
30..80 °C	FK	39	43	44	37	40	41	40	43	45	33	37	39	32	34	36	34	37	40
	FK-DG	48	52	53	47	50	51	49	52	53	40	44	46	39	42	44	41	44	47
	VRK	37	41	42	36	38	40	37	41	42	30	34	36	30	32	34	31	35	37
	CPC	47	49	50	46	47	48	47	49	50	39	42	45	38	41	42	39	43	46
40..70 °C	FK	37	37	38	34	35	36	37	38	38	31	33	34	30	31	31	32	34	34
	FK-DG	48	49	50	47	48	48	48	50	50	39	43	44	39	40	41	40	43	45
	VRK	37	39	39	36	36	38	37	39	39	30	33	34	30	31	31	31	34	35
	CPC	46	47	47	45	46	46	46	47	48	39	41	42	38	39	40	40	42	43
50..80 °C	FK	30	31	31	28	29	29	31	32	32	26	28	29	24	25	26	27	28	29
	FK-DG	41	46	46	37	40	42	41	44	46	34	39	40	31	34	35	35	38	41
	VRK	31	35	36	28	30	31	31	32	35	26	30	31	23	25	26	26	28	31
	CPC	43	44	44	38	41	43	43	44	44	36	38	39	32	34	36	36	39	40
60..90 °C	FK	25	25	26	23	23	24	25	26	26	22	23	24	22	22	22	22	24	24
	FK-DG	42	42	43	40	41	41	42	43	43	34	37	38	35	36	37	35	37	39
	VRK	32	33	33	31	31	32	32	33	33	26	28	29	27	28	28	26	28	30
	CPC	40	41	41	39	39	40	41	41	41	33	35	37	34	35	36	34	36	38
80..95 °C	FK	15	15	15	14	14	14	15	15	15	14	15	15	13	13	13	14	15	15
	FK-DG	34	34	35	30	30	30	35	35	35	29	29	31	27	27	27	29	30	31
	VRK	25	25	26	21	21	21	25	26	26	21	21	22	20	19	19	21	22	22
	CPC	34	34	35	33	33	33	35	35	35	29	30	31	29	29	29	29	30	32

1

2

3

4

5

6

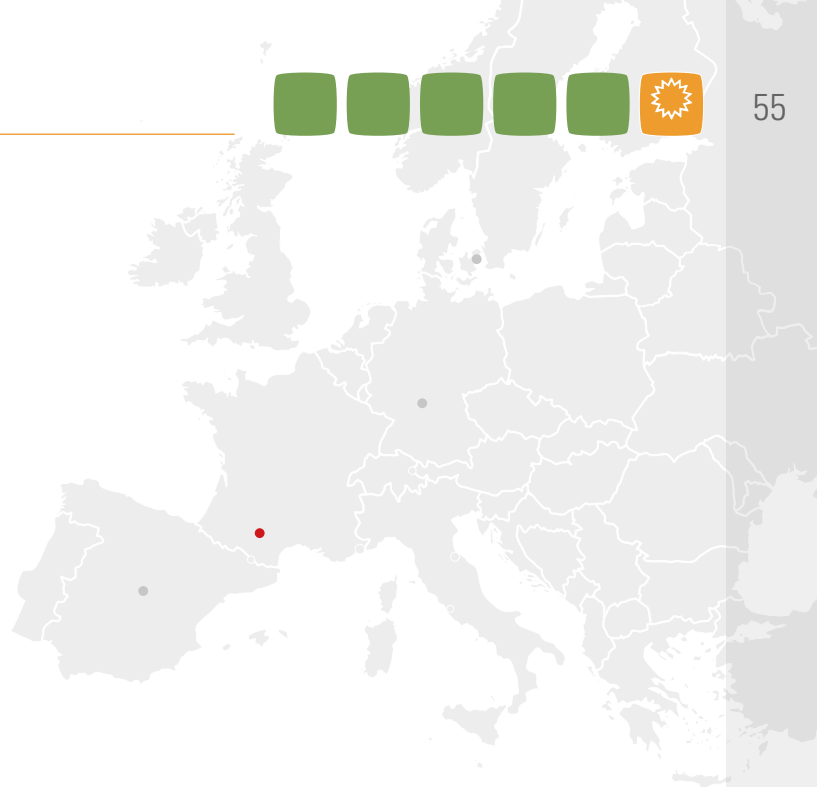
7

8

9

Toulouse (verbesserter Kollektor)

TOULOUSE																			
		KONSTANTE WOCHE									5 TAGEWOCHE								
Temp.	verbesserter Kollektor	Tageslast			Badbeheizung			Konstant			Tageslast			Badbeheizung			Konstant		
		4	6	10	4	6	10	4	6	10	4	6	10	4	6	10	4	6	10
15..60 °C	FK	48	54	56	47	50	52	49	55	58	41	46	49	39	42	43	40	46	50
	FK-DG	51	57	58	50	53	55	52	57	60	42	48	51	41	44	46	43	49	52
	VRK	42	46	47	42	44	45	43	47	48	35	39	41	34	37	38	36	40	42
	CPC	48	51	53	48	49	50	50	52	53	41	45	46	40	42	43	42	45	48
30..80 °C	FK	39	43	45	38	40	42	40	44	46	33	38	40	32	34	36	34	38	41
	FK-DG	43	48	50	43	46	48	45	49	51	37	41	43	35	38	40	37	41	45
	VRK	38	41	42	38	40	41	39	42	43	32	35	37	30	33	34	32	35	38
	CPC	44	46	48	44	45	47	45	47	49	36	40	43	36	38	40	37	41	43
40..70 °C	FK	37	38	39	35	36	37	38	39	39	32	34	35	30	31	32	32	35	35
	FK-DG	42	45	45	42	43	43	43	45	46	37	39	40	35	36	36	36	40	41
	VRK	38	39	39	37	38	38	38	40	40	32	34	35	30	32	32	32	35	35
	CPC	44	45	46	43	44	44	44	45	46	37	40	40	36	37	37	37	40	41
50..80 °C	FK	33	37	38	28	29	30	31	32	32	29	32	34	24	26	26	27	29	29
	FK-DG	40	43	44	32	35	36	37	39	40	32	36	40	27	29	30	31	34	36
	VRK	35	38	38	29	31	33	33	35	37	28	31	35	24	26	27	28	31	32
	CPC	41	44	45	36	39	41	41	42	42	33	36	41	30	33	34	34	37	38
60..90 °C	FK	25	25	31	23	24	24	25	26	26	22	23	24	21	22	22	22	24	24
	FK-DG	34	35	48	32	33	33	35	35	36	29	30	32	29	30	30	29	31	33
	VRK	32	32	33	31	32	32	33	33	34	26	28	30	27	28	28	26	29	31
	CPC	38	39	45	37	37	38	38	39	39	31	33	35	32	33	34	31	34	36
80..95 °C	FK	15	15	16	13	13	13	14	14	15	13	14	14	13	13	13	13	14	14
	FK-DG	26	26	27	24	24	24	26	25	26	22	23	24	22	22	22	22	23	24
	VRK	26	26	26	24	25	25	27	27	27	22	23	24	22	22	22	22	24	24
	CPC	33	33	33	31	31	31	32	32	32	26	28	30	27	27	28	27	29	30



Toulouse (hocheffizienter Kollektor)

TOULOUSE																			
		KONSTANTE WOCHE									5 TAGEWOCHE								
Temp.	hoch-effizienter Kollektor	Tageslast			Badbeheizung			Konstant			Tageslast			Badbeheizung			Konstant		
		4	6	10	4	6	10	4	6	10	4	6	10	4	6	10	4	6	10
15..60 °C	FK	51	57	59	49	52	54	51	57	60	42	48	51	40	43	45	42	48	52
	FK-DG	54	59	59	53	56	57	54	59	60	44	49	51	43	46	47	44	50	52
	VRK	43	47	48	42	45	46	42	47	49	35	39	41	34	36	38	35	40	42
	CPC	52	55	56	51	53	54	52	56	57	43	47	49	42	44	46	43	48	50
30..80 °C	FK	42	46	48	41	43	46	43	47	50	35	39	42	34	36	38	35	40	43
	FK-DG	49	54	55	48	51	54	49	54	56	39	44	48	39	42	44	40	45	48
	VRK	37	43	44	37	39	42	38	43	45	30	35	37	29	32	34	31	36	38
	CPC	48	51	52	47	49	51	49	52	53	39	43	46	38	41	42	40	44	46
40..70 °C	FK	41	42	42	39	40	40	41	43	43	34	37	37	32	34	34	34	37	38
	FK-DG	50	53	53	48	49	50	50	53	53	41	44	46	39	40	41	40	45	46
	VRK	38	41	41	36	37	38	38	42	42	31	35	35	29	30	31	31	35	36
	CPC	48	50	50	47	48	49	48	50	50	39	43	44	38	40	40	40	43	44
50..80 °C	FK	34	36	36	30	32	33	34	36	37	29	31	32	26	28	28	29	32	33
	FK-DG	42	47	50	37	40	42	41	44	47	35	40	42	30	33	34	35	38	41
	VRK	31	35	39	27	30	32	31	32	35	26	30	32	23	25	26	26	28	31
	CPC	44	47	47	38	41	43	43	46	47	36	40	41	31	34	35	36	40	42
60..90 °C	FK	29	30	30	27	28	29	30	31	31	25	27	28	25	26	26	26	28	29
	FK-DG	44	46	47	43	45	45	45	46	47	34	38	41	36	38	39	35	39	42
	VRK	34	36	36	33	35	35	34	36	36	26	29	32	28	30	30	27	30	33
	CPC	43	44	44	42	43	43	44	45	45	34	36	39	36	38	38	34	38	41
80..95 °C	FK	19	19	19	18	18	18	19	19	19	17	18	18	17	17	17	17	18	18
	FK-DG	35	35	35	31	31	31	36	36	36	30	30	32	28	28	28	30	32	32
	VRK	26	26	26	22	22	22	26	26	26	22	22	23	20	21	20	22	23	23
	CPC	37	37	38	35	35	35	38	38	38	30	31	34	31	31	31	31	33	34

1

2

3

4

5

6

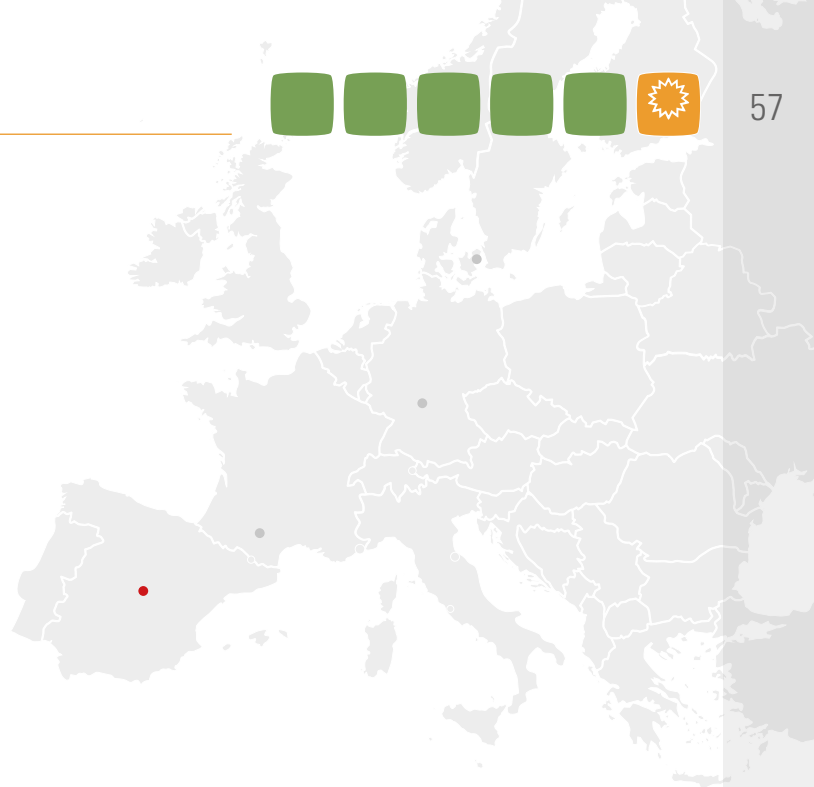
7

8

9

Madrid (verbesserter Kollektor)

MADRID																			
		KONSTANTE WOCHE									5 TAGEWOCHE								
Temp.	verbesserter Kollektor	Tageslast			Badbeheizung			Konstant			Tageslast			Badbeheizung			Konstant		
		4	6	10	4	6	10	4	6	10	4	6	10	4	6	10	4	6	10
15..60 °C	FK	48	55	57	47	51	53	49	56	60	40	46	50	38	41	43	39	47	51
	FK-DG	50	58	60	50	54	56	51	59	62	41	48	51	40	43	45	41	49	53
	VRK	42	46	47	41	45	46	42	48	49	34	38	41	33	35	37	34	39	42
	CPC	48	52	53	48	50	51	49	53	54	40	44	46	38	41	42	40	45	48
30..80 °C	FK	40	45	47	40	43	45	42	47	49	33	39	41	32	35	37	34	39	43
	FK-DG	43	51	52	44	48	50	46	51	54	37	41	44	35	38	40	37	42	46
	VRK	38	42	43	37	41	43	39	43	45	31	35	37	30	32	34	31	35	38
	CPC	45	48	49	44	47	48	46	49	50	35	40	43	35	37	39	37	40	44
40..70 °C	FK	40	41	42	39	40	40	41	43	43	34	36	37	31	33	33	34	37	38
	FK-DG	44	48	48	44	46	47	45	49	49	37	40	41	35	37	37	37	41	43
	VRK	39	41	41	38	40	41	39	42	42	32	35	36	30	32	32	31	35	37
	CPC	45	46	47	45	46	46	46	47	48	36	40	41	35	36	37	37	41	42
50..80 °C	FK	36	40	41	30	33	34	35	36	37	29	34	37	25	28	28	29	32	33
	FK-DG	41	46	47	32	35	37	37	41	43	32	38	41	25	28	30	31	36	39
	VRK	37	39	40	27	30	32	32	36	38	27	32	36	22	24	25	27	31	34
	CPC	42	46	46	35	39	42	42	44	45	32	37	42	28	32	34	34	38	40
60..90 °C	FK	29	29	29	27	28	28	30	30	30	25	27	28	24	25	25	25	28	28
	FK-DG	38	39	39	36	37	37	38	39	39	30	34	35	31	32	32	31	35	36
	VRK	35	35	35	34	35	35	35	36	36	26	29	32	28	29	30	26	30	33
	CPC	41	41	42	39	40	40	41	42	42	31	35	37	33	34	35	32	36	38
80..95 °C	FK	19	18	19	17	17	17	19	19	19	17	17	17	16	16	16	17	18	18
	FK-DG	30	30	30	28	28	28	30	30	30	25	27	27	24	25	25	25	27	27
	VRK	29	29	29	26	26	27	30	30	30	23	25	26	23	23	24	23	26	27
	CPC	35	35	35	34	34	34	35	35	36	28	31	32	29	29	29	28	31	32



Madrid (hocheffizienter Kollektor)

MADRID																			
		KONSTANTE WOCHE									5 TAGEWOCHE								
Temp.	hoch-effizienter Kollektor	Tageslast			Badbeheizung			Konstant			Tageslast			Badbeheizung			Konstant		
		4	6	10	4	6	10	4	6	10	4	6	10	4	6	10	4	6	10
15..60 °C	FK	51	58	60	49	52	54	50	58	62	40	48	51	40	43	45	40	48	53
	FK-DG	52	59	60	53	56	57	52	60	61	41	48	51	43	46	47	42	49	52
	VRK	40	48	49	42	45	46	41	48	50	32	38	41	34	36	38	32	39	42
	CPC	51	56	57	51	53	54	51	56	57	41	46	49	42	44	46	41	47	50
30..80 °C	FK	44	49	51	41	43	46	44	50	53	35	40	44	34	36	38	36	41	45
	FK-DG	47	55	57	48	51	54	48	56	57	37	44	47	39	42	44	38	45	49
	VRK	36	44	45	37	39	42	37	44	46	28	35	38	29	32	34	29	35	39
	CPC	47	52	53	47	49	51	48	53	54	37	42	46	38	41	42	38	43	47
40..70 °C	FK	43	46	46	39	40	40	43	47	47	35	39	40	32	34	34	35	40	41
	FK-DG	49	55	55	48	49	50	49	55	55	39	44	46	39	40	41	39	45	47
	VRK	37	43	43	36	37	38	37	43	44	30	35	36	29	30	31	30	35	37
	CPC	48	51	51	47	48	49	48	52	52	39	43	44	38	40	40	39	44	45
50..80 °C	FK	37	39	40	30	32	33	36	39	40	30	33	34	26	28	28	30	34	36
	FK-DG	39	46	52	37	40	42	39	41	46	33	38	42	30	33	34	32	36	41
	VRK	29	33	41	27	30	32	28	30	33	24	28	33	23	25	26	24	26	29
	CPC	44	48	49	38	41	43	42	47	49	35	40	41	31	34	35	34	40	43
60..90 °C	FK	34	34	34	27	28	29	34	35	35	27	30	31	25	26	26	28	31	32
	FK-DG	45	49	49	43	45	45	46	49	50	35	38	43	36	38	39	35	41	44
	VRK	35	38	39	33	35	35	35	39	39	27	30	33	28	30	30	27	32	34
	CPC	44	47	47	42	43	43	46	47	47	33	37	41	36	38	38	34	39	43
80..95 °C	FK	24	24	24	18	18	18	24	24	24	20	21	22	17	17	17	20	22	22
	FK-DG	35	32	33	31	31	31	36	36	36	28	29	31	28	28	28	29	30	31
	VRK	24	24	24	22	22	22	24	24	24	20	20	22	20	21	20	20	21	21
	CPC	40	40	40	35	35	35	41	41	41	31	33	36	31	31	31	31	36	36

1

2

3

4

5

6

7

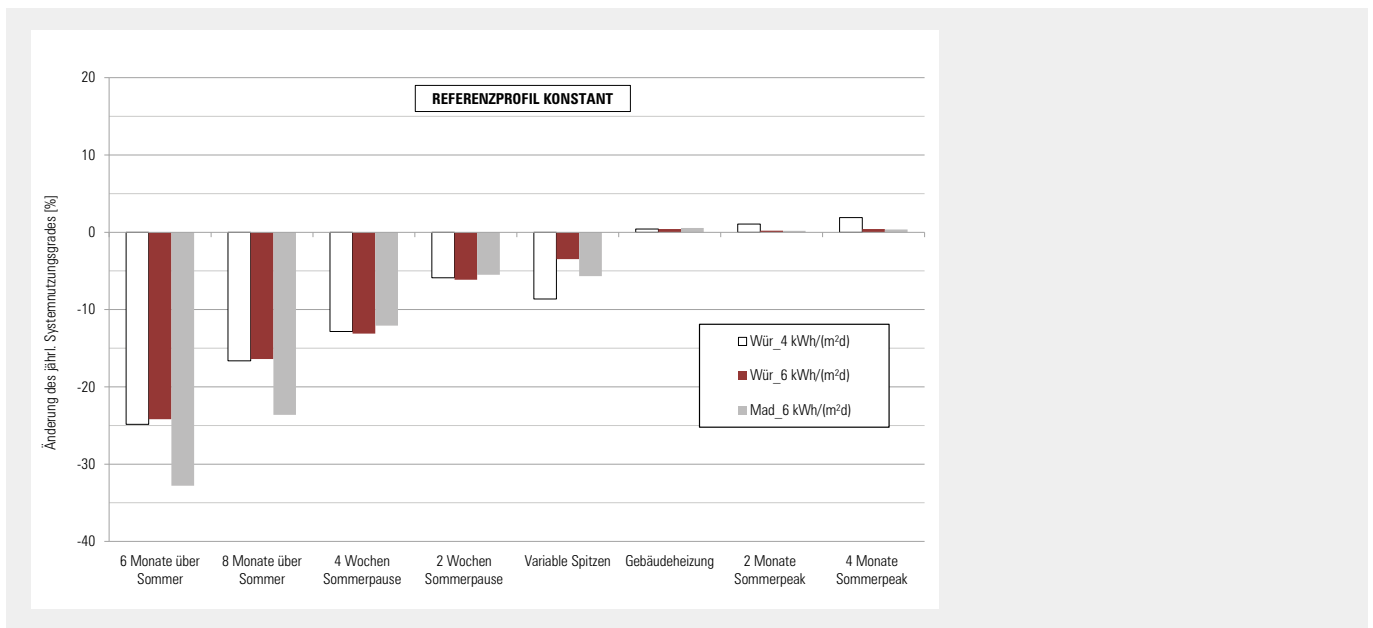
8

9

ABWEICHENDE RANDBEDINGUNGEN

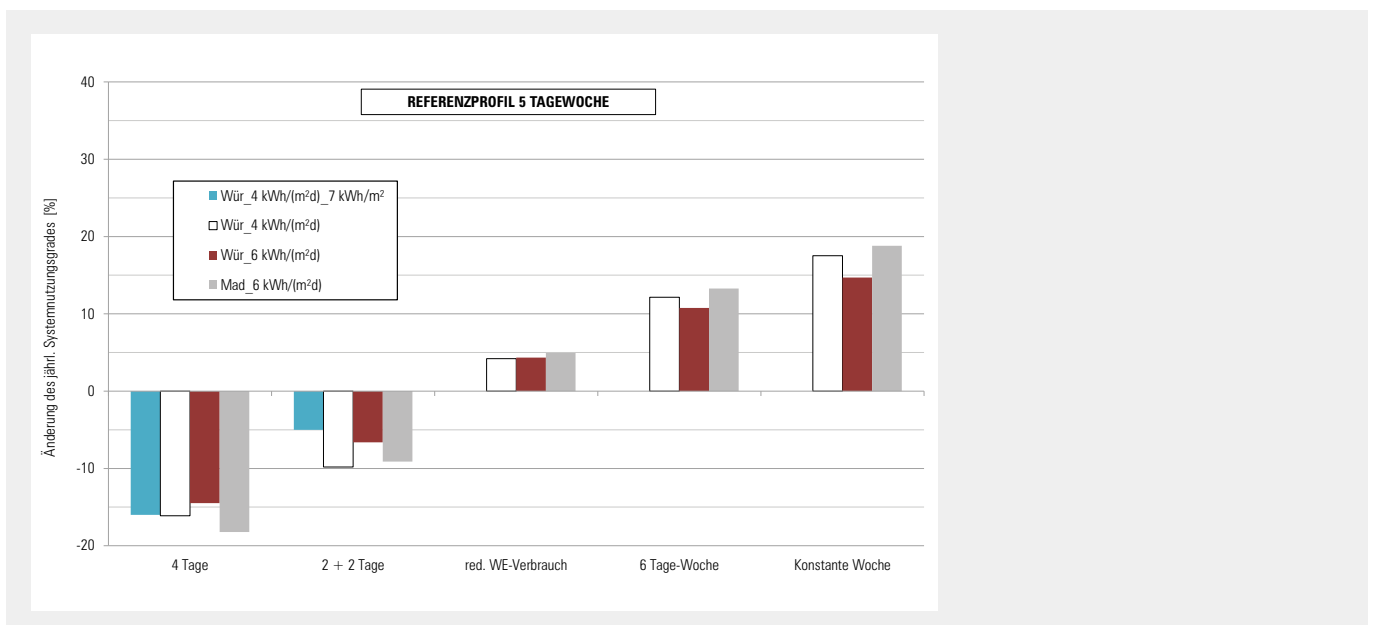
In den nachfolgenden Diagrammen sind die Änderungen des Systemnutzungsgrads für unterschiedliche Randbedingungen dargestellt. Wenn bei einer durchzuführenden Vorauslegung die Randbedingungen von den in den vorherigen Tabellen angegebenen abweichen (z. B. anderes Lastprofil), können diese Diagramme genutzt werden.

Dem nachfolgenden Diagramm kann die Veränderung des Systemnutzungsgrades entnommen werden, wenn anstelle des jährlichen Lastprofils „Konstant“ ein anderes vorliegt. Das Diagramm gilt für einen verbesserten Flachkollektor bei Prozesstemperaturen von 40..70 °C an den Standorten Würzburg und Madrid. Für Würzburg sind zwei verschiedene Auslegungswerte (4 und 6 kWh/(m²d)) abgebildet.

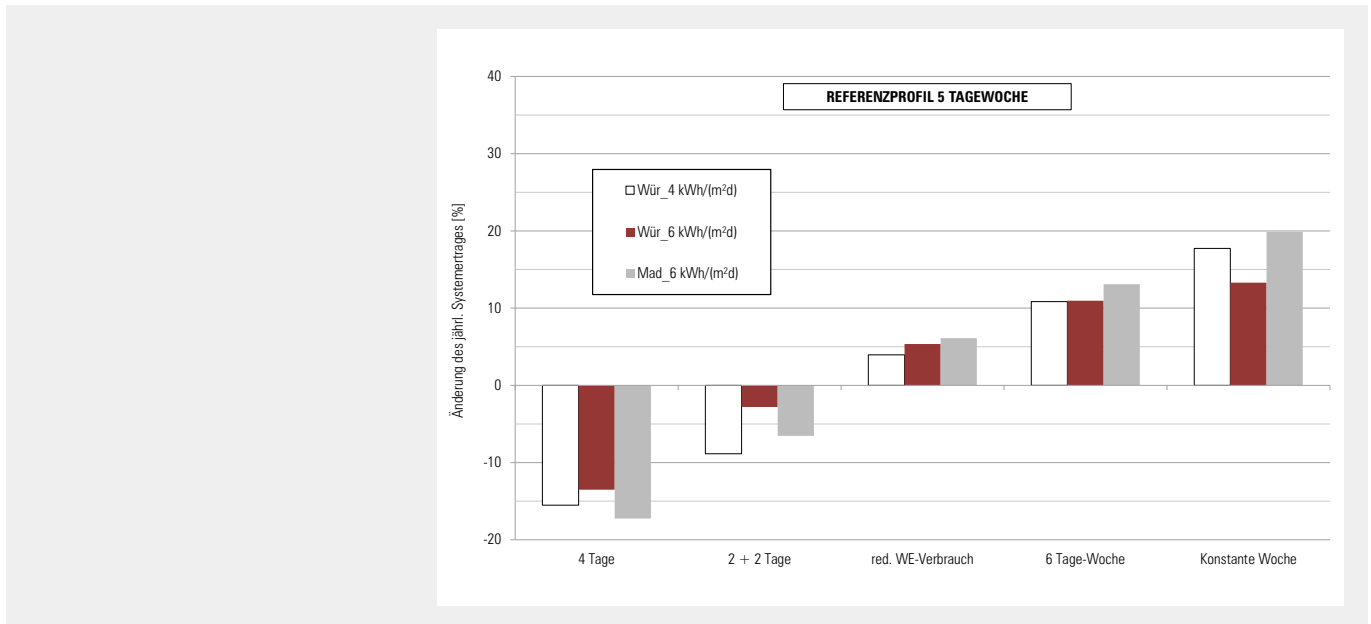


Bei Prozesstemperaturen von 15..60 °C und Beibehaltung sonstiger Randbedingungen ergeben sich die im nachfolgenden Diagramm aufgetragenen Änderungen in Abhängigkeit des wöchentlichen Pro-

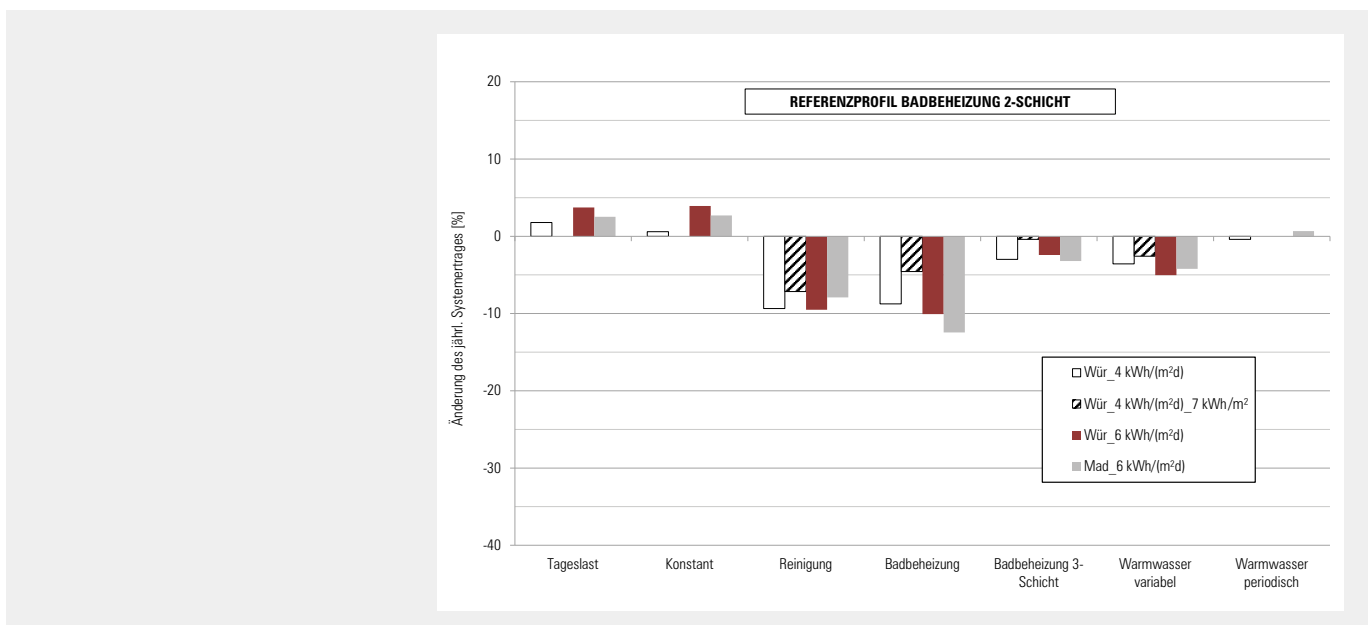
files zum Referenzprofil „5 Tage-Woche“. Der Auslegungswert von 4 kWh/(m²d) in Würzburg beinhaltet zusätzlich eine Variante mit einem spezifischen Speichervolumen von 7 kWh/m².



Bei einer im Gegensatz zum vorherigen Diagramm veränderten Prozess-temperatur von 40..70 °C, ergeben sich für einen Flachkollektor folgende Änderungen des Systemnutzungsgrads bei verschiedenen wöchentlichen Lastprofilen im Vergleich zur „5 Tage-Woche“.



Abschließend ist der Einfluss täglicher Profile zum Referenzprofil „Badbeheizung 2-Schicht“ für einen verbesserten Flachkollektor mit der Prozess-temperatur 15..60 °C dargestellt.



1

2

3

4

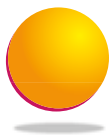
5

6

7

8

9



S O L A R .
UNI-KASSEL.DE

Das Fachgebiet Solar- und Anlagentechnik der Universität Kassel forscht unabhängig im Bereich effizienter und erneuerbarer Wärmebereitstellung. Mit unseren Forschungsergebnissen gestalten wir die Wärmeversorgung in Industrie und Gewerbe günstiger und umweltschonender und bringen damit die Wärmewende voran.

Zusätzlich unterstützen und beraten wir das BAFA bei der Förderung solarer Prozesswärme.



Weite Teile des Leitfadens zur Machbarkeitsabschätzung solarer Prozesswärme basieren auf den beiden Dissertationen von Bastian Schmitt und Christoph Lauterbach. Detaillierte Informationen und Hintergründe zur Integration von Solarwärme finden sich in (Schmitt, 2014). Die Methodik und detaillierten Hintergründe zur Vorauslegung und Ertragsabschätzung können (Lauterbach, 2014) entnommen werden.

Schmitt, B.: Integration thermischer Solaranlagen zur Bereitstellung von Prozesswärme in Industriebetrieben, Dissertation Universität Kassel, Shaker Verlag, Aachen, 2014.

Lauterbach, C.: Potential, system analysis, and preliminary design of low temperature solar process heat systems, Dissertation Universität Kassel, Kassel University Press. Kassel, 2014.



Impressum

Universität Kassel

Fachgebiet Solar- und Anlagentechnik

Kurt-Wolters-Str. 3

34125 Kassel

www.solar.uni-kassel.de

Erstellt im Rahmen des Projekts

SolFood – Solarwärme für die Ernährungsindustrie

www.solfood.de

Autoren

Dr.-Ing. Bastian Schmitt

Dr.-Ing. Christoph Lauterbach

Prof. Dr. Klaus Vajen

Dank

Vielen Dank für die Unterstützung bei der Fertigstellung

an Dominik Ritter, Markus Rusack, Martin Mützel,

Christoph Schmelzer und Lukas Wimmer.

Projekt-Ansprechpartner für SolFood

Dr.-Ing. Bastian Schmitt

Leiter Prozesswärme

Artwork

formkonfekt | konzept & gestaltung | Kassel

Karen Marschinke

Förderkennzeichen: 0325541A

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Schritt	Checkliste zur Durchführung einer Machbarkeitsabschätzung	Erläuterung ab
<p style="text-align: center;">1</p> 	<p style="text-align: center;">K.O. Kriterien abfragen</p> <p>Gibt es ausreichend vorhandene Flächen für eine Solaranlage? Wie ist der zeitliche Verlauf und das Temperaturniveau des Wärmebedarfs? Welche Wirtschaftlichkeitserwartungen hat das Unternehmen?</p>	<p style="text-align: center;">S. 07</p>
<p style="text-align: center;">2</p> 	<p style="text-align: center;">Ist-Zustand des Unternehmens erfassen</p> <p>Hierunter fallen Informationen zu Produktionszeiten und -prozessen, zu vorhandener Anlagentechnik für die Bereitstellung, Verteilung und Nutzung der Wärme sowie zu möglichen Abwärmequellen innerhalb des Unternehmens.</p>	<p style="text-align: center;">S. 08</p>
<p style="text-align: center;">3</p> 	<p style="text-align: center;">Identifikation relevanter Wärmeverbraucher</p> <p>Die wichtigsten Wärmeverbraucher auf Versorgungs- und Prozessebene auswählen. Erste Indikatoren sind der zeitliche Anfall und die Höhe des Wärmebedarfs. Anschließend die potentiellen Integrationspunkte der Klassifizierung (S. 12) zuordnen und Integrationskonzept auswählen (S.34..41).</p>	<p style="text-align: center;">S. 11</p>
<p style="text-align: center;">4</p> 	<p style="text-align: center;">Einen oder mehrere geeignete Integrationspunkte für Solarwärme auswählen</p> <p>Die in Schritt 3 identifizierten Integrationspunkte mit ihrem jeweiligen Integrationskonzept hinsichtlich der folgenden Kriterien vergleichen: Temperaturniveau, Lastprofil und Aufwand zur Einbindung der Solarwärme. Auswahl der aussichtsreich erscheinenden Integrationspunkte.</p>	<p style="text-align: center;">S. 15</p>
<p style="text-align: center;">5</p> 	<p style="text-align: center;">Vorauslegung Kollektorfläche</p> <p>Auslegungswert ($q_{\text{auslegung}}$) in Abhängigkeit von Standort, Lastprofil und Prozesstemperatur auswählen (Tabelle auf S. 45). Täglichen Wärmebedarf für den Integrationspunkt durch diesen Auslegungswert teilen, woraus sich die Kollektorfläche ergibt.</p>	<p style="text-align: center;">S. 19</p>
<p style="text-align: center;">6</p> 	<p style="text-align: center;">Vorauslegung Speichervolumen</p> <p>Für den Integrationspunkt eine gewünschte Speicherkapazität zwischen 1 und 9 kWh/m² auswählen. Als Indikator für die geeignete Kapazität dienen die Tabellen auf S. 46..49. Sie geben den Nutzungsgrad in Abhängigkeit der Speicherkapazität an. Mit der Tabelle auf S. 22 kann das Speichervolumen für unterschiedliche Kapazitäten und Rücklauftemperaturen des Integrationspunktes berechnet werden.</p>	<p style="text-align: center;">S. 22</p>
<p style="text-align: center;">7</p> 	<p style="text-align: center;">Abschätzung des zu erwartenden Solarertrags</p> <p>Jährlichen Systemnutzungsgrad in Abhängigkeit von Standort, Lastprofil und Prozesstemperatur den Tabellen auf S. 50..57 entnehmen. Systemnutzungsgrad mit der Einstrahlung auf die geeignete Fläche des untersuchten Standorts multiplizieren (Ausrichtung der vorgesehenen Fläche berücksichtigen).</p>	<p style="text-align: center;">S. 24</p>
<p style="text-align: center;">8</p> 	<p style="text-align: center;">Berechnung der Wirtschaftlichkeit</p> <p>Bestimmung des solaren Wärmepreises und je nach Anforderung des Unternehmens die Amortisationszeit oder Rendite berechnen. Wurde die Auslegung und Ertragsabschätzung für mehrere Integrationspunkte durchgeführt, hilft die Gegenüberstellung dieser Alternativen bei der Entscheidungsfindung.</p>	<p style="text-align: center;">S. 27</p>

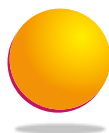


Design: formaniet, Kassel



Solarwärme für die
Ernährungsindustrie

www.solfood.de



S O L A R .
UNI-KASSEL.DE

www.solar.uni-kassel.de

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft und
Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

www.bmwi.de