

PLANUNGSLEITFADEN

EnPro – Erneuerbare Prozesswärme

Integration von Solarthermie und Wärmepumpen in industrielle Prozesse
Erstellt im Auftrag des Klima- und Energiefonds



Impressum

Herausgeber

Klima- und Energiefonds der österreichischen Bundesregierung
Gumpendorfer Straße 5 | 1060 Wien
E-Mail: office@klimafonds.gv.at | Internet: www.klimafonds.gv.at

Projektbetreuung

Elvira Lutter, Programmmanagement, Klima- und Energiefonds

AutorInnen

Veronika Wilk, Bernd Windholz, Michael Hartl, Thomas Fleckl

AIT Austrian Institute of Technology GmbH, www.ait.ac.at

Jürgen Fluch, Anna Grubbauer, Christoph Brunner

AEE – Institut für Nachhaltige Technologien, www.aee-intec.at

Daniel Lange, Dietrich Wertz, Karl Ponweiser

TU Wien, Institut für Energietechnik und Thermodynamik, www.iet.tuwien.ac.at

Der vorliegende Planungsleitfaden ist im Auftrag des Klima- und Energiefonds im Rahmen der FuE-Dienstleistung „EnPro – Erneuerbare Prozesswärme“ entstanden. Die Erstellung erfolgte durch das AIT Austrian Institute of Technology in Kooperation mit AEE – Institut für Nachhaltige Technologien und Technische Universität Wien, Institut für Energietechnik und Thermodynamik.

Grafik

Industriemagazin Verlag
Titelfoto © Fleischwaren Berger
Herstellungsort Wien, Juni 2017

Die hier dargestellten Inhalte spiegeln nicht notwendigerweise die Meinung des Klima- und Energiefonds wider. Weder der Klima- und Energiefonds noch das Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (bmvit) oder die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) übernehmen Verantwortung für jegliche Verwendung der in dieser Publikation enthaltenen Informationen.



Inhalt

1	Grundlagen	5
	1.1 Wärmepumpen	5
	1.1.1 Funktionsweise	5
	1.1.2 Komponenten	5
	1.1.3 Einsatzbereiche	7
	1.1.4 Kennzahlen	7
	1.2 Solarthermie	8
	1.2.1 Funktionsweise	8
	1.2.2 Komponenten	8
	1.2.3 Kennzahlen	10
2	Betriebsdatenerfassung und Ist-Stand-Analyse	12
3	Optimierungsmaßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz	14
	3.1 Prozessoptimierung	14
	3.2 Systemoptimierung	15
	3.2.1 Optimierungsmaßnahmen	15
	3.2.2 Pinchanalyse	15
4	Integration von Wärmepumpen, Solarthermie und Kombisystemen	18
	4.1 Entscheidungsfindung	18
	4.2 Integrationskonzepte	18
	4.2.1 Module in den Integrationskonzepten	19
	4.2.2 Arten der Einbindung	19
	4.2.3 Monovalente Integrationen	20
	4.2.4 Kombinationen von Solarthermie und Wärmepumpen	20
	4.3 Anwendung der Integrationskonzepte	22
5	Ideen zur Integration	24
	5.1 Parallele Kombination	25
	5.2 Serielle Kombination 1	26
	5.3 Serielle Kombination 2	26
	5.4 Serielle Kombination 3	27
6	Techno-ökonomische Bewertung	28
7	Förderprogramme für Solarthermie und Wärmepumpen	30

EXZERPT

Integration von Solarthermie und Wärmepumpen in industrielle Prozesse

Wärmepumpen und Solarthermie zählen zu den Schlüsseltechnologien zur Bereitstellung erneuerbarer thermischer Energie und können einen wichtigen Beitrag zur Umsetzung der Klimaziele leisten. In industriellen Prozessen werden diese Technologien allerdings erst vereinzelt zur Wärmeversorgung eingesetzt. Dieser Leitfaden soll zur weiteren Verbreitung von Wärmepumpen und Solarthermie in der Industrie dienen. Er richtet sich an interessierte, potentielle Anwender, die mehr erneuerbare Prozesswärme in ihren Betrieb bringen möchten, sowie an Planer, Industrieanlagenbauer und Hersteller von Solarthermieanlagen und Wärmepumpen. Der Leitfaden gibt eine Anleitung, wie Solarthermie und Wärmepumpen in Industrieprozesse integriert werden können, und zeigt, welche Kriterien und Parameter bei der Identifikation und Bewertung von Integrationskonzepten wichtig sind. Das EnPro-Tool, mit dem der individuelle Nutzen der hier vorgestellten Maßnahmen und Konzepte abgeschätzt werden kann, ergänzt den Leitfaden. Zunächst werden die technischen Grundlagen von Wärmepumpen und Solarthermie behandelt. Es werden die wichtigsten technischen Begriffe vorgestellt sowie der Stand der Technik, die Einsatzmöglichkeiten und die Grenzen der Technologien. Der erste Schritt hin zur erneuerbaren Prozesswärme ist die Analyse der energetischen Ausgangssituation des Betriebes. Dabei soll geklärt werden, wie Energie bereitgestellt und wofür Energie eingesetzt wird. Aufbauend auf dem Ist-Stand kann der Energieeinsatz auf Prozessebene so weit wie technisch und ökonomisch

sinnvoll reduziert werden. Mögliche Ansätze sind die Anpassung von Prozessparametern und die geeignete Auswahl von energieeffizienten Prozesstechnologien nach dem Stand der Technik. Der nächste Schritt ist die Evaluierung der Systemoptimierung. Dabei geht es vor allem um die Wärmeintegration. Es werden potentielle Wärmequellen (Prozessabwärme, Anlagenabwärme) mit Wärmesenken über Wärmetauscher verknüpft. Dann kann nun der optimierte Energiebedarf mit erneuerbarer Prozesswärme abgedeckt werden. Es werden hier sechs Integrationskonzepte vorgestellt, die beschreiben, wie Solarthermie, Wärmepumpen und deren Kombinationen in einen Betrieb integriert werden können, um erneuerbare Prozesswärme bereitzustellen. Zur Entscheidungsfindung, welche Technologie und welches Konzept für einen Betrieb besonders gut geeignet sind, dienen ein Kriterienkatalog und ein Entscheidungsbaum, sowie Beispiele. Alle im Leitfaden vorgestellten Arbeitsschritte können mit dem EnPro-Tool durchgeführt werden. Damit kann der individuelle Nutzen dieser Maßnahmen und Konzepte abgeschätzt und nach techno-ökonomischen Kriterien bewertet werden.

INFO

WikiWeb und EnPro-Tool:
wiki.zero-emissions.at/index.php?title=EnPro_Wiki bzw
<http://bit.ly/EnPro>

1. GRUNDLAGEN

Das folgende Kapitel bietet einen Überblick über die technischen Grundlagen von Wärmepumpen und Solarthermie. Es werden die wichtigsten technischen Begriffe vorgestellt sowie der Stand der Technik, die Einsatzmöglichkeiten und die Grenzen der Technologien.

1.1 Wärmepumpen

1.1.1 Funktionsweise

In Europa stellen elektrisch angetriebene Kompressions-Wärmepumpen den am meisten eingesetzten und verbreiteten Wärmepumpentyp dar. Aufgrund der gegebenen Marktrelevanz behandelt dieser Leitfaden ausschließlich diesen Wärmepumpentyp, der Begriff „Wärmepumpe“ wird synonym für elektrisch angetriebene Kompressions-Wärmepumpen verwendet. Wärmepumpen nutzen Wärmeströme auf niedrigem Temperaturniveau, um unter Einsatz von elektrischem Strom Wärme mit höherer Temperatur zur Verfügung zu stellen. Eine Wärmepumpenanlage besteht aus mehreren Anlagenteilen: der Wärmequellenanlage, der Wärmepumpe selbst und der Wärmenutzungsanlage. Mit der Wärmequellenanlage wird Wärme aus der Wärmequelle entzogen und mit einem Wärmeträger zur kalten Seite der Wärmepumpe transportiert. Die Wärmepumpe liefert durch Aufnahme von elektrischem Strom Wärme auf dem geforderten höheren Temperaturniveau der Wärmenutzung. Die Wärmenutzungsanlage (Wärmesenke) transportiert die Wärme von der heißen Seite der Wärmepumpe zu den Verbrauchern. Im Gebäudebereich werden Wärmepumpen zur Heizung und Warmwassererzeugung eingesetzt. Dabei dient beispielsweise die Umgebungsluft, das Grundwasser oder das Erdreich als Wärmequelle. In industriellen Prozessen fallen Abwärmeströme an, die aufgrund des geringen Temperaturniveaus nicht mehr sinnvoll im Produktionsprozess bzw. für dessen Versorgung genutzt werden können und meist mit zusätzlichem Kühlaufwand an die Um-

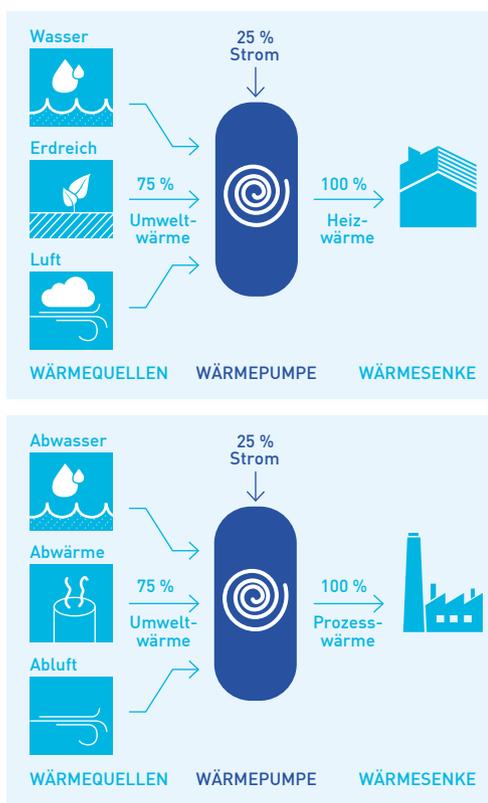


Abb. 1: Wärmepumpen im Haushalt und in der Industrie (Zahlenwerte exemplarisch)

gebung abgegeben werden. Mit Hilfe einer Wärmepumpe können diese Abwärmeströme auf ein nutzbares Temperaturniveau angehoben und wieder in den Produktionsprozess integriert werden (Abbildung 1).

1.1.2 Komponenten

Die wichtigsten Komponenten einer Wärmepumpe sind schematisch in Abbildung 2 dargestellt. Eine Wärmepumpe besteht im einfachsten Fall aus zwei Wärmetauschern – dem Verdampfer und dem Kondensator – einem Verdichter und einem Expansionsventil und einem geschlossenen Kältemittelkreislauf. Im Verdampfer verdampft das Kältemittel bei niedriger

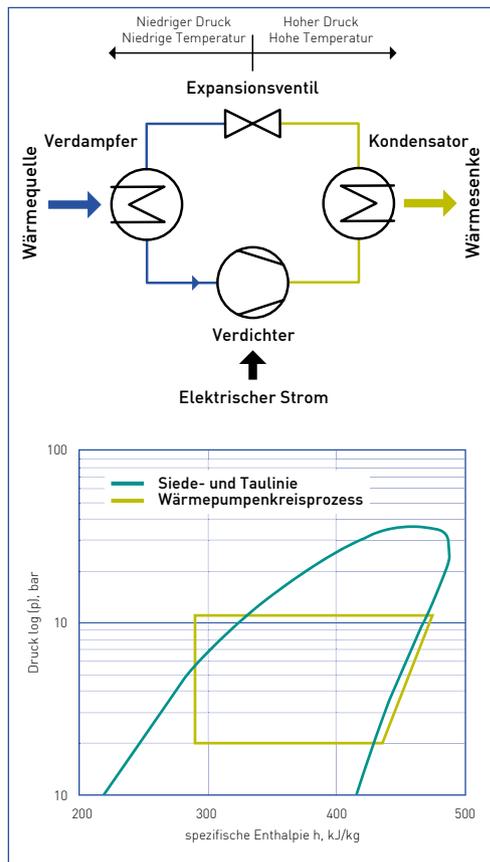


Abb. 2:
Aufbau einer
Wärmepumpe (oben)
und Zustandsdiagramm
(unten)

Temperatur und niedrigem Druck und nimmt Energie aus der Wärmequelle auf. Der Verdichter komprimiert den Kältemitteldampf, durch die Druckerhöhung steigt die Temperatur des Kältemittels. Nach der Verdichtung liegt das Kältemittel bei hoher Temperatur und hohem Druck vor. Im Kondensator überträgt das Kältemittel Energie an die Wärmesenke und kondensiert. Danach ist das Kältemittel bei hohem Druck und niedriger Temperatur flüssig. Im Expansionsventil wird das Kältemittel wieder auf den Ausgangsdruck entspannt, dabei kühlt es weiter ab. Das Zustandsdiagramm ist ein Druck-Enthalpie-Diagramm und zeigt die Siede- und Taulinie des Kältemittels sowie den Kreisprozess der Wärmepumpe.

Verdampfer und Kondensator

Es handelt sich dabei um zwei Wärmetauscher, die Wärme von der Wärmequelle an das Kältemittel übertragen und vom Kältemittel an die Wärmesenke abgeben. Die Bauart der Wärmetauscher richtet sich nach den Anforderungen der Wärmequelle

und der Wärmesenke. Bei flüssigen, wenig verschmutzten Medien werden zumeist Plattenwärmetauscher eingesetzt.

Verdichter

Der Verdichter fördert und komprimiert das Kältemittel. Er wird mit einem Elektromotor angetrieben und verfügt je nach Ausführung über eine Leistungsregelung. In Wärmepumpen werden hauptsächlich folgende Verdichter eingesetzt:

- Rollkolbenverdichter
- Scrollverdichter
- Hubkolbenverdichter
- Schraubenverdichter
- Turboverdichter

Rollkolbenverdichter werden tendenziell eher im kleinen Leistungsbereich, Scrollverdichter im kleinen bis mittleren und Schraubenverdichter im großen Leistungsbereich verwendet. Turboverdichter decken einen weiten Leistungsbereich ab.

Expansionsventil

Das Expansionsventil (Drossel) entspannt das flüssige Kältemittel nach der Wärmeabgabe im Kondensator auf einen niedrigeren Druck. Es werden üblicherweise elektronisch geregelte Expansionsventile verwendet.

Kältemittel

Das Kältemittel ist das Arbeitsmedium der Wärmepumpe. Die Wahl des Kältemittels richtet sich in erster Linie nach den Temperaturniveaus des Prozesses. Die Eigenschaften des Kältemittels sollen optimal an die Prozessanforderungen angepasst werden, um eine hohe Effizienz zu ermöglichen. Dabei gibt es zahlreiche Anforderungen an das Kältemittel: Es muss chemisch stabil sein und soll eine hohe volumetrische Kälteleistung aufweisen, damit die Kältemittelfüllmenge gering sein kann und die Komponenten kompakt gebaut werden können. Außerdem soll das Kältemittel unbedenklich für die Umwelt sein und möglichst wenig Treibhauspotential aufweisen (GWP = global warming potential). Das Kältemittel kann beim Befüllen der Wärmepumpe durch etwaige Undichtigkeiten und beim Entsorgen der Wärmepumpe in die Atmosphäre gelangen, wo es zum Treibhauseffekt beitragen kann.

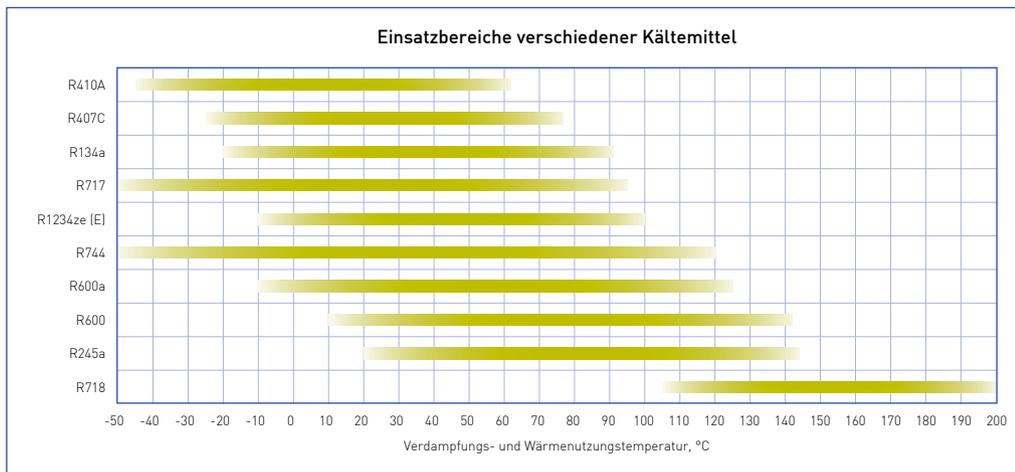


Abb. 3: Überblick über gebräuchliche Kältemittel

Heute werden typischerweise Hydrofluorkohlenwasserstoffe wie Pentafluorpropan R245fa, Tetrafluorethan R134a und Tetrafluorpropan R1234ze oder Mischungen aus Kohlenwasserstoffen wie R410a und R407c als Kältemittel verwendet. Ihr Treibhauspotential ist vergleichsweise hoch. Es werden auch natürliche Kältemittel wie Ammoniak R717, Isobutan R600a, n-Butan R600, CO₂ R744 oder Wasser R718 eingesetzt, die sehr geringes oder gar kein Treibhauspotential haben. Einige sind allerdings brennbar, giftig oder explosiv, daher sind spezielle Sicherheitsvorschriften zu beachten. Abbildung 3 gibt einen Überblick über den Einsatzbereich verschiedener Kältemittel. Es werden die minimalen Verdampfungstemperaturen und die maximalen Wärmenutzungstemperaturen dargestellt.

1.1.3 Einsatzbereiche

Wärmepumpen werden in einem weiten Leistungsbereich eingesetzt. Die Heizleistung marktverfügbarer Anlagen reicht von rund 10 kW für Heizungsanwendungen bis in den MW-Bereich. Das Temperaturniveau der Wärmeabgabe marktverfügbarer Wärmepumpen liegt bereits im Bereich von 90 bis 125 °C. Seit einigen Jahren wird an der Entwicklung von Hochtemperaturwärmepumpen mit Wärmenutzungstemperaturen von bis zu 160 °C gearbeitet. Diese hohen Temperaturen sind in experimentellen Wärmepumpenanlagen bereits möglich und man kann davon ausgehen, dass solche Anlagen in den nächsten Jahren Marktreife erlangen werden.

1.1.4 Kennzahlen

Zur Beurteilung von Wärmepumpen werden Kennzahlen verwendet, die sich aus der Energiebilanz ableiten. Die Heizleistung der Wärmepumpe entspricht im einfachsten Fall der Summe der der Quelle entzogenen Wärme und der elektrischen Leistung des Verdichters (ohne Berücksichtigung von Verlusten).

Die Leistungszahl (coefficient of performance, COP) wird als Verhältnis von Nutzen zu Aufwand berechnet. Der COP für den Heizbetrieb ist dementsprechend das Verhältnis von Heizleistung und elektrischer Leistung und beschreibt die Effizienz der Wärmepumpe in einem bestimmten Heizbetriebspunkt.

$$\text{COP}_{\text{Heiz}} = \frac{\dot{Q}_{\text{Heiz}}}{P_{\text{el}}}$$

Der Nutzen ist individuell zu bewerten und kann außer der Heizleistung auch bereitgestellte Kühlleistung oder die Summe aus Heiz- und Kühlleistung sein.

Die Jahresarbeitszahl JAZ ist das Verhältnis von Nutzenergie zu Antriebsenergie in einem Jahr. Daher werden in der JAZ die veränderlichen Betriebspunkte, die sich durch Temperaturänderungen von Quelle und Senke ergeben, berücksichtigt. Je konstanter der Betrieb der Wärmepumpe ist, desto weniger unterscheidet sich die JAZ vom COP. Ist die Heizenergie Q_{Heiz} der alleinige Nutzen, gilt:

$$\text{JAZ}_{\text{Heiz}} = \int \frac{\dot{Q}_{\text{Heiz}}}{P_{\text{el}}} = \frac{Q_{\text{Heiz}}}{E_{\text{el}}}$$

INFO

Best-Practice-Beispiele zur Integration von Wärmepumpen findet man online auf

<http://heatpumpingtechnologies.org/publications/application-of-industrial-heat-pumps-part-1/> und

<http://heatpumpingtechnologies.org/publications/application-of-industrial-heat-pumps-part-2/>

1.2 Solarthermie

1.2.1 Funktionsweise

Solarthermische Systeme wandeln die auf einen solarthermischen Kollektor eingestrahlte Sonnenenergie in Wärme um. Diese Wärme wird über ein Wärmeträgermedium (meist Wasser-Frostschutz-Gemisch) über Rohrleitungen an einen thermischen Speicher transportiert oder direkt über Wärmetauscher an ein Wärmeverteilnetz übertragen und kann somit für die Versorgung industrieller Prozesse genutzt werden.

1.2.2 Komponenten

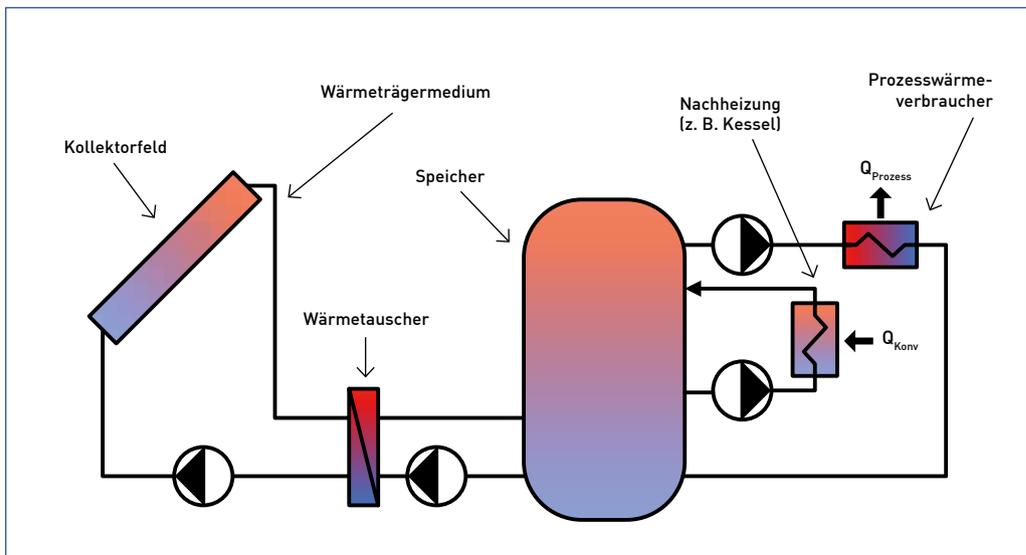
In Abbildung 4 ist ein einfaches Hydraulikschema einer solarthermischen Warmwasserbereitungsanlage dargestellt und anhand dessen werden die Komponenten einer solarthermischen Anlage erläutert.

Kollektor

Je nach gefordertem Temperaturniveau können unterschiedliche Kollektoren für die Bereitstellung solarer Prozesswärme genutzt werden.

Der **Flachkollektor** besteht im Wesentlichen aus einem metallischen Absorber, der zwischen einer transparenten Abdeckung (spezielles Solarglas) und einer Wärmedämmung in einem Gehäuse positioniert wird. Die von der Abdeckung durchgelassene kurzwellige Strahlung wird vom Absorber aufgenommen. Dieser absorbiert die Strahlung, wandelt sie in Wärme um und gibt sie durch Wärmeleitung an das Absorberblech weiter. Selektive Beschichtungen, die neben einem hohen Absorptionsgrad einen niedrigen Emissionsgrad aufweisen, reduzieren die Abstrahlungsverluste und erhöhen die Effizienz. In Abhängigkeit der Bauart können Nutzttemperaturen bis 100 °C effizient bereitgestellt werden. Flachkollektoren mit Vakuumwärmedämmung können Einsatztemperaturen von ca. 180 °C erreichen. Das Größenspektrum von Flachkollektormodulen reicht von kompakten Kollektormodulen mit ca. 2 m² bis hin zu Großflächenkollektoren mit bis zu 12 m². So wie bei Vakuumflachkollektoren können bei **Vakuumröhrenkollektoren** die Wärmeverluste durch Konvektion und Wärmeleitung deutlich reduziert werden. Sie erzielen dadurch auch bei höheren Betriebstemperaturen hohe

Abb. 4: Hydraulikschema einer solarthermischen Anlage



Erträge. Durch den Einsatz zusätzlicher Spiegel auf der Rückseite (CPC-Kollektor = compound parabolic concentrator) des Kollektors liegt der Einsatzbereich von Vakuumröhrenkollektoren bei bis zu 130 °C und mehr.

Bei **konzentrierenden Kollektoren** wird die direkte Solarstrahlung mittels Spiegeln auf einen Absorber konzentriert, um dadurch Dampf für industrielle Prozesse zu erzeugen. Parabolrinnenkollektoren sind am weitesten verbreitet und werden bereits seit den 80er Jahren erfolgreich in solarthermischen Kraftwerken eingesetzt. Mit direktverdampfenden linearen Fresnelkollektoren werden beispielsweise Temperaturen bis zu 500 °C erreicht. An dieser Stelle ist anzumerken, dass es sich in Österreich bei ca. 60 % der auf die Erde treffenden Strahlung um diffuse Strahlung handelt und konzentrierende Systeme in unseren Breiten kaum Anwendung finden.

Luftkollektoren werden hauptsächlich zur solaren Trocknung eingesetzt. Im Unterschied zu flüssigkeitsgeführten Systemen wird Luft als Wärmeträgermedium verwendet. Luftkollektoren sind als Flachkollektoren oder auch als Röhrenkollektoren erhältlich.

Ausdehnungsgefäß

Ein wichtiges Element der solarthermischen Anlage bildet das Membranausdehnungsgefäß (kurz MAG). Dieses wird in jedem geschlossenen, mit Flüssigkeit gefüllten System benötigt, da sich Flüssigkeiten bei Temperaturzunahme ausdehnen beziehungsweise bei Temperaturabnahme zusammenziehen. Bei der Dimensionierung ist nicht nur die Flüssigkeitsdehnung zu berücksichtigen, sondern auch die Volumsänderung durch Dampfbildung (Stagnation) im Kollektor. Das Ausdehnungsgefäß muss in der Lage sein, die aus dem Kollektor und aus den Rohrleitungen verdrängte Flüssigkeit (Dampfvolumen) aufzunehmen, um den Druckanstieg so gering wie möglich zu halten.

Sicherheitsventil

Das Sicherheitsventil bildet eine Absicherung gegen den Druckanstieg im Primär-Solarkreislauf, falls es zu einer Störung (z.B.: defektes MAG) kommen sollte.

Der Ansprechdruck liegt üblicherweise zwischen 3 und 6 bar. Steigt der Druck im System auf den Ansprechdruck, entweicht das anstehende Wärmeträgermedium über eine Abblase-Leitung, wodurch sich der Druck reduziert.

Wärmeträgermedium

Der Wärmeträger (z.B.: Wasser-Propylenglykol-Gemisch) transportiert die aufgenommene Wärme vom Absorber zum Wärmetauscher. Ein Wärmeträger kann durch seine spezifische Wärmekapazität, Dichte, Zähigkeit, Wärmeleitfähigkeit sowie durch die Temperatur des Gefrierpunktes bestimmt werden. Des Weiteren sollte der Wärmeträger möglichst günstig in der Anschaffung und Entsorgung sein, lebensmittelecht, langzeitbeständig (länger als 10 Jahre), temperaturbeständig (höher als 130 °C), unbrennbar sowie eine korrosionshemmende Wirkung auf Bauteile haben.

Wärmetauscher

In frostgefährdeten Gebieten wird meist ein Wasser-Frostschutz-Gemisch im primären Solarkreislauf als Wärmeträger verwendet. Mit einem Wärmetauscher wird die Energie aus dem Primärkreis an den Sekundärkreis übertragen. Die Wärmeübertragung kann entweder durch schwerkraftbedingte freie Konvektion (z.B.: innenliegender Rohrwärmetauscher) oder durch erzwungene Konvektion (z.B.: externer Plattenwärmetauscher) erfolgen. Plattenwärmetauscher weisen gegenüber Rohrwärmetauschern einen deutlich größeren Wärmeübergangskoeffizienten auf und sind wesentlich kompakter, jedoch wird eine zusätzliche Pumpe auf der Sekundärseite benötigt. Unter Umständen können solarthermische Anlagen auch direkt – ohne Wärmetauscher – an den Speicher angebunden werden. Diese Integration erfordert in der Regel aktive Frostschutzmaßnahmen, da oft Wasser als Wärmeträgermedium eingesetzt wird und durch den Kollektor fließt.

Speicher

Ein wesentliches Element einer solarthermischen Anlage ist der Speicher. Dieser speichert die solar erzeugte Wärme über

einen gewissen Zeitraum, da das Solarangebot bei Prozesswärmanlagen nicht immer mit dem Wärmebedarf zeitlich übereinstimmt (Produktions-Schwachphasen, Wochenende). Üblicherweise werden hierfür Wasserspeicher verwendet, die drucklos bis 95 °C oder druckbehaftet bis zu 150 °C beladen werden können.

Stagnationskühlung

Ein wichtiger Bestandteil für die Bereitstellung solarer Prozesswärme ist die Stagnationskühlung. Um eine Verdampfung des Wärmeträgermediums im Solar-Kreislauf zu vermeiden, können aktive und passive Überhitzungsschutzmaßnahmen verfolgt werden. Aktive Strategien basieren darauf, die maximale Temperatur des Wärmeträgermediums bei dem gegebenen Systemdruck unter der Siedetemperatur zu halten. Beispiele für eine aktive Strategie sind die Nachtkühlung und die aktive Kühlung des Primärkreislaufes. Passive Strategien wie beispielsweise selbstentleerende Systeme verhindern Dampf-bildung durch die Entleerung des Kollektorfeldes, wenn eine bestimmte Temperatur erreicht wird.

1.2.3 Kennzahlen

Nachfolgend werden die wichtigsten Kennzahlen für die Beurteilung der Effizienz einer solarthermischen Anlage beschrieben.

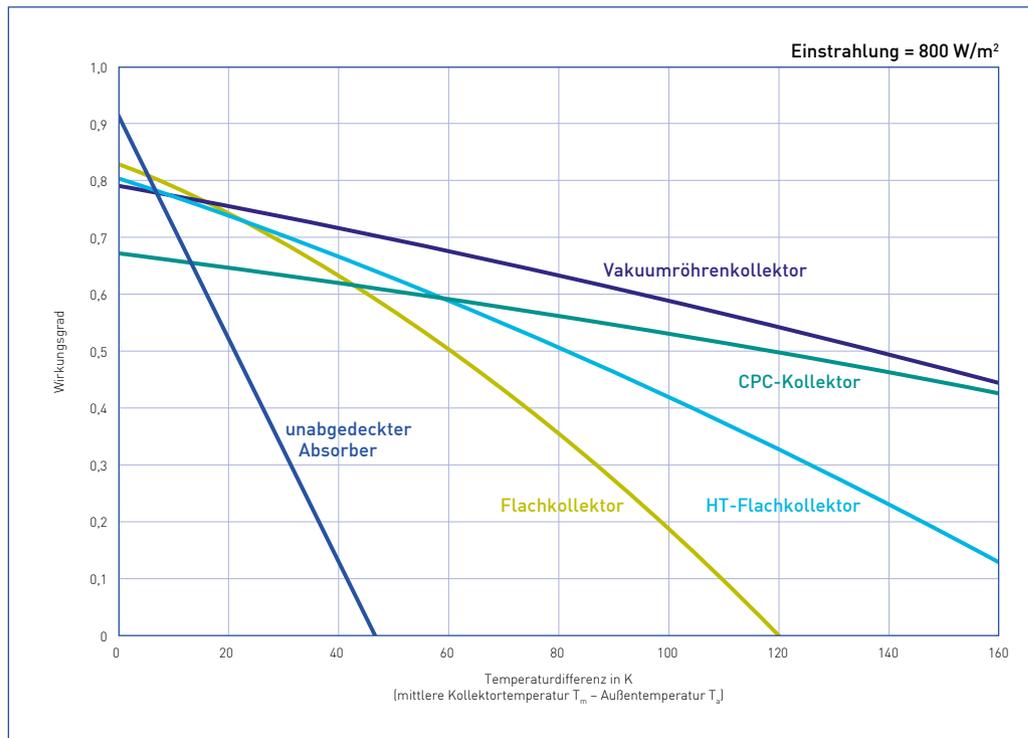
Wirkungsgrad

Nach Definition der Nutzleistung eines Flachkollektors ist der Wirkungsgrad die wichtigste Kenngröße eines Kollektors. Dieser beschreibt das Verhältnis von abtransportierter Wärmeenergie zu eingestrahelter Sonnenenergie. Für jeden Kollektor kann eine sogenannte Kollektorkennlinie grafisch dargestellt werden. In Abbildung 5 sind typische Wirkungsgrade unterschiedlicher Kollektortechnologien in Abhängigkeit der Temperatur dargestellt.

Solarer Deckungsgrad SF

Eine der wichtigsten und gebräuchlichsten Kennzahlen zur Beurteilung eines solarthermischen Systems ist der solare Deckungsgrad. Dieser beschreibt den solaren Anteil an der Energiebereitstellung einer beliebigen Anwendung. Für die Definition des solaren Deckungsgrades

Abb. 5:
Vergleich von Wirkungsgradkennlinien unterschiedlicher Kollektortechnologien



© <http://www.solare-prozesswaerme.info>



© Brauerei Göss - Brau Union Österreich AG

gibt es je nach Zuweisung der Systemverluste mehrere Möglichkeiten. Geht man von der Solarenergie Q_{Solar} aus, die an den Speicher geliefert wird, wird der solare Deckungsgrad anhand der nachfolgenden Gleichung berechnet. Q_{Nutz} ist die Nutzenergie der betrachteten Anwendung. Die thermischen Verluste werden hierbei nicht berücksichtigt:

$$SF_1 = \frac{Q_{\text{Solar}}}{Q_{\text{Nutz}}}$$

Eine weitere Möglichkeit ist es, den solaren Deckungsgrad wie folgt zu definieren. Bei dieser Deckungsgraddefinition werden alle auftretenden Systemverluste Q_{Verlust} (Speicher, Rohrleitungen usw.) der Solaranlage zugeschrieben. Diese Betrachtungsweise ist damit die ungünstigste für Solaranlagen.

$$SF_2 = \frac{Q_{\text{Solar}} - Q_{\text{Verlust}}}{Q_{\text{Nutz}}}$$

Auslastung

Die Auslastung beschreibt, mit welchem Verbrauch (Q_{Gesamt} in kWh/a) ein Quadratmeter Kollektorfläche (A in m^2) im Jahr beaufschlagt wird. Hohe Auslastungen bedeuten geringe solare Deckungsgrade.

$$\text{Auslastung} = \frac{Q_{\text{Gesamt}}}{A}$$

Spezifischer Solarertrag SE

Beim spezifischen Solarertrag handelt es sich um die an den Speicher pro Jahr abgegebene Energiemenge Q_{Solar} (in kWh/a) bezogen auf die Kollektorfläche A (in m^2 , üblicherweise Bruttokollektorfläche). Der spezifische Solarertrag ergibt sich aus folgender Gleichung:

$$SE = \frac{Q_{\text{Solar}}}{A}$$

Der spezifische Ertrag verhält sich gegenläufig zum solaren Deckungsgrad. Dies bedeutet, dass sich bei sinkender Auslastung ein höherer solarer Deckungsgrad und ein niedriger spezifischer Solarertrag einstellt und umgekehrt. So liegen beispielsweise spezifische Solarerträge je nach Anwendungen mit herkömmlichen Flachkollektoren bei 300 bis 450 kWh pro Quadratmeter und Jahr.

INFO

Best-Practice-Beispiele zur Integration von Solarthermie findet man online auf

http://task49.iea-shc.org/data/sites/1/publications/IEA_Task49_Deliverable_C4_Best%20Practice-final-160528.pdf

2. BETRIEBSDATENERFASSUNG UND IST-STAND-ANALYSE

Die Analyse der energetischen Ausgangssituation des Betriebes stellt den ersten Schritt zu einer möglichen Integration von Solarthermie und Wärmepumpen dar.



Dabei sollen zwei zentrale Fragen geklärt werden.

- Wie wird Energie bereitgestellt?
- Wofür wird Energie eingesetzt?

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Daten, die zur Beschreibung des Ist-Zustands üblicherweise benötigt werden. Der Fokus der Analyse liegt auf der Wärmebereitstellung und den wesentlichen Verbrauchern.

Wärmebereitstellung

Prozesswärme kann zentral oder dezentral bereitgestellt werden. Beispiele für zentrale Wärmebereitstellung sind Feuerungsanlagen für Erdgas, Biomasse oder Ähnliches, die Dampf oder Heißwasser liefern. Es können auch andere Wärmeträger, wie Thermoöl, erhitzt werden. Die Verbraucher werden über ein Verteilnetz mit Dampf, Heißwasser oder Thermoöl versorgt. Wird Wärme dezentral bereitgestellt, handelt es sich beispielsweise um Öfen, direkt befeuerte Trockner und Ähnliches. Hilfreiche Informationen zur Beschreibung der Wärmebereitstellung liefern z.B. Abrechnungen des Energieversorgers sowie Datenblätter und Prüfprotokolle der Kessel und Brenner.

Wärmeverbraucher

Dabei sollen die wichtigsten Informationen zu den Produktionsprozessen

erhoben werden, wie die erforderlichen Prozesstemperaturen (tageszeitlich, aber auch saisonal), die benötigte Energiemenge, die Art der Beheizung, ob auch gekühlt wird, etc. Ziel ist es, die relevanten Wärmeverbraucher energetisch vollständig beschreiben zu können.

Für eine aussagekräftige Analyse werden außerdem die Kosten für die eingesetzten Energieträger benötigt, um wirtschaftliche Vergleiche anstellen zu können. Die Produktionszeiten des Unternehmens haben einen großen Einfluss darauf, wann wie viel Energie benötigt wird. Die Bandbreite reicht von kontinuierlichen Prozessen in Betrieben mit Schichtbetrieb, die das ganze Jahr bis auf kurze Stillstandszeiten produzieren, bis hin zu Kampagnenbetrieben, die nur saisonal auftreten.

Toolbox

Im EnPro-Tool kann eine einfache Energiebilanz des Unternehmens erstellt werden. Es können verschiedene Wärme- und Kälteversorgungsanlagen anhand ihrer energetischen Eckdaten definiert werden. Außerdem können die Prozesse, die Energie verbrauchen, eingegeben werden. Versorgung und Verbraucher werden in Diagrammen und Tabellen gegenübergestellt.

Allgemein	Betriebsstunden, Schichten Heiz- und Kühlperioden
Energieverbrauch	Eingesetzte Brennstoffe und Brennstoffpreise Jährlicher Stromverbrauch und Stromkosten
Heiz- und Kühlsysteme	Nennleistungen Brennstoffe Betriebsstunden Temperaturniveaus (Vor- und Rücklauf, Medium, tageszeitlich/saisonal) Fließschema
Prozesse	Prozesstyp (kontinuierlich/diskontinuierlich) Art der Versorgung (Dampf, Heißwasser etc.) Temperaturniveaus der Prozessmedien (tageszeitlich/saisonal) Abwärme Fließschema
Gebäude	Fläche Dachfläche, Art des Daches, Dachausrichtung Freiflächen
Unterlagen	Abrechnungen des Energieversorgers Kessel-Prüfprotokolle Datenblätter Zugang zum Visualisierungsprogramm

Tab. 1:
Daten zur
Beschreibung des
Ist-Zustands

3. OPTIMIERUNG ZUR STEIGERUNG DER ENERGIEEFFIZIENZ

Aufbauend auf dem Ist-Stand wird zuerst der Energieeinsatz auf Prozessebene soweit wie technisch und ökonomisch sinnvoll reduziert. Mögliche Ansätze sind die Anpassung von Prozessparametern und die geeignete Auswahl von energieeffizienten Prozesstechnologien nach dem Stand der Technik. In weiterer Folge können Technologiesprünge eingesetzt werden, die heute unter den Schlagworten Prozessintensivierung und „emerging technologies“ beschrieben werden. Der methodische Ansatz der Optimierung folgt der Methodik der Energieaudits, die in der Norm EN 16247 zu finden ist.



3.1 Prozessoptimierung

Die Maßnahmen zur Prozessoptimierung sind so vielfältig wie die Prozesse selbst. Daher werden hier die wichtigsten Handlungsfelder beschrieben, wo man mit der Prozessoptimierung ansetzen kann. Für zahlreiche Branchen sind außerdem BAT- Dokumente vorhanden (best available techniques reference documents), die den Stand der Technik beschreiben und detaillierte Informationen zu Optimierungsmaßnahmen liefern.

Direkt beheizte Prozesse

- Optimierung des Aufheizvorgangs
- Wärmerückgewinnung im Prozess
- Optimierung der Brennereinstellungen
- Wärmedämmung heißer Anlagenteile

Indirekt beheizte Prozesse

- Abstimmung von Wärmezufuhr und Wärmebedarf
- Nutzung des Kondensats

- Wärmerückgewinnung im Prozess
- Kaskadische Nutzung der Wärmeträger
- Wärmedämmung heißer Anlagenteile

Betriebsführung

- Optimierung der Auslastung der Prozesse
- Reduktion der Stillstandszeiten
- Geregelttes Öffnen und Schließen von beheizten Räumen
- Umstellen von Batchprozessen auf kontinuierliche Prozesse, wenn möglich
- Energetisch sinnvolle Anordnung warmer und kalter Produktionszonen

Toolbox

Das EnPro-Tool enthält Hinweise zur Prozessoptimierung und führt zum WikiWeb, einer Online-Informationsplattform, die detaillierte Informationen zu den verschiedensten Branchen bietet.
<http://bit.ly/EnPro>

INFO

Metallverarbeitung und Galvanik:

- Abdeckung der Bäder
- Membrandestillation
- Prozessauslastung
- Trennung von Heiz- und Kühlprozessen
- Reduktion der Badtemperaturen

Papierindustrie:

- Brüdenverdichter
- Wärmerückgewinnung aus Abluft und Abwasser
- Laugenverbrennung

Wäschereien:

- Absenkung der Waschttemperaturen
- Umluftbetrieb in den Trocknern
- Genaue Endpunktbestimmung beim Trocknen
- Wärmerückgewinnung aus Abluft und Abwasser

Lebensmittelindustrie:

- Auslastung von Anlagen wie Backöfen und Schockfroster
- Optimierung des Aufheizens von Öfen
- Reduktion der Ofen-Stillstandszeiten
- Wärmerückgewinnung im Ofen
- Effizienz der Kälteanlagen
- Umstellung von Batchprozessen auf kontinuierliche Prozesse
- Mitarbeiterschulungen

Chemische Industrie:

- Wärmerückgewinnung aus Abluft und Abwasser
- Prozessintensivierung
- Energiemanagementsysteme
- Nutzung von Hocheffizienzboilern und Wärmetauschern

3.2 Systemoptimierung

Der nächste Schritt ist die Evaluierung der Systemoptimierung. Dabei geht es vor allem um die Wärmeintegration. Es werden potentielle Wärmequellen (Prozessabwärme, Anlagenabwärme) mit Wärmesenken über Wärmetauscher verknüpft.

3.2.1 Optimierungsmaßnahmen

Auf der Systemebene gibt es ebenso verschiedene Handlungsfelder für energetische Optimierungsmaßnahmen.

Wärmebereitstellung

- Optimierung des Verbrennungsvorgangs
- Nutzung der Wärme der Abgase bis hin zur Rauchgaskondensation
- Nutzung des Kondensats
- Wärmerückgewinnung bei der thermischen Entgasung
- Vorwärmung des Kesselspeisewassers
- Einsatz von Dampf- oder Heißwasserspeichern bei zu geringer Last
- Wärmedämmung aller Anlagen und Verteilsysteme

Kälteanlagen

- Nutzung der Kondensatorabwärme
- Einsatz von Kältespeichern bei zu geringer Last

Druckluft

- Wärmerückgewinnung

Raumwärme und -kälte

- Umstellung auf Heizungssysteme, die mit niedrigerer Temperatur betrieben werden können (Fußboden-, Wand- bzw. Deckenheizung)
- Geregelttes Öffnen und Schließen der Türen
- Optimierung der Lüftung

Abwasser

- Nutzung der Abwärme
- Kaskadische Nutzung von Abwasserströmen

Betriebsführung

- Optimierung der Auslastung der Anlagen
- Effiziente Regelung der Wärme- und Kälteversorgung
- Optimiertes Energiekonzept in Abstimmung auf den tatsächlichen Bedarf

3.2.2 Pinchanalyse

Die Pinchanalyse ist eine Methode, um den Wärme- und Kühlbedarf der einzelnen Prozessströme übersichtlich darzustellen und dient der Optimierung des Wärmetauschernetzwerkes zur Wärmerückgewinnung.

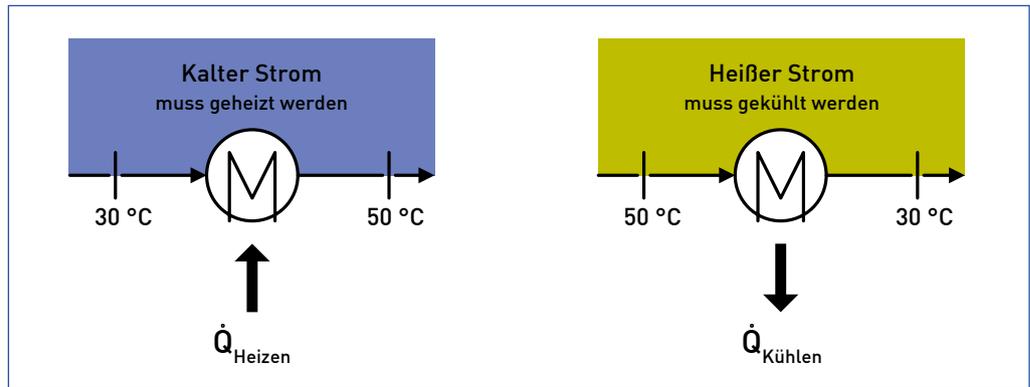
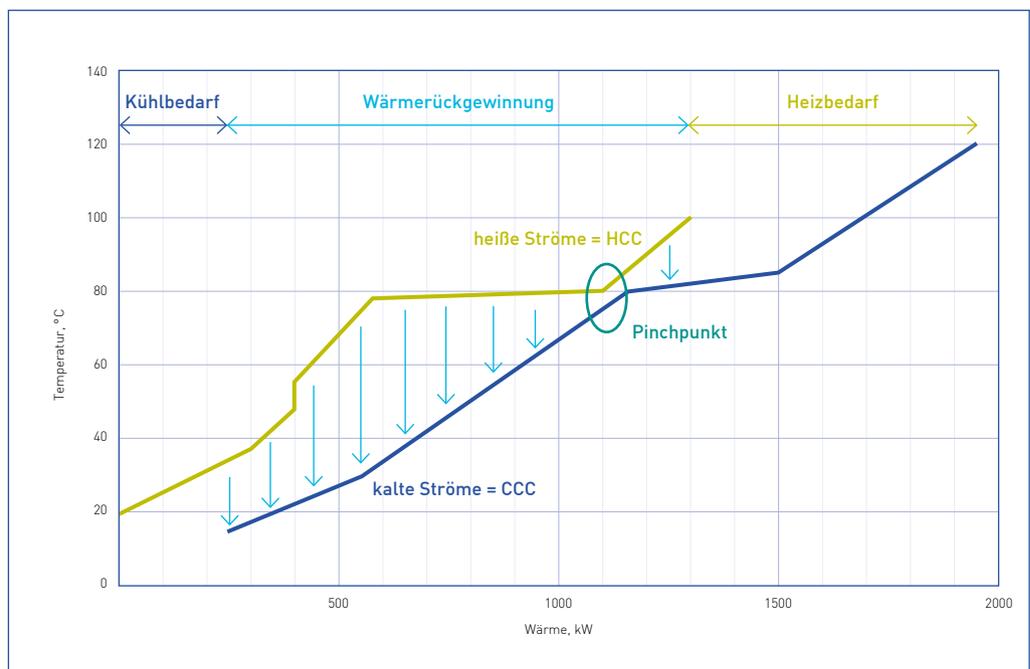


Abb. 6:
Heiße und kalte
Ströme für die
Pinchanalyse

Zunächst werden alle relevanten Prozessströme nach ihrem Prozesswärmebedarf kategorisiert und zusammengefasst. Sie werden in kalte Ströme, die erwärmt werden müssen, und heiße Ströme, die gekühlt werden müssen, eingeteilt (Abbildung 6). Die Ströme werden durch die Anfangs- und Endtemperaturen, den Massenstrom und die spezifischen Wärmekapazitäten bzw. die Leistungen beschreiben. Die kalten und die heißen Ströme werden addiert und zu einer heißen und einer kalten Composite-Curve zusammengefasst und im Temperatur-Energiefluss-Diagramm (Pinchdiagramm) wie in Abbildung 7 dargestellt. Das Pinchdiagramm zeigt den kumulierten Prozess-

wärme- und den Prozesskältebedarf der jeweiligen Temperaturniveaus. Abwärmeströme, die gekühlt werden können, werden zu den heißen Strömen gezählt, um eine mögliche Abwärmenutzung sichtbar zu machen. Durch eine horizontale Verschiebung der beiden Kurven zueinander lässt sich das theoretische Potential für eine Wärmerückgewinnung ermitteln. Das Optimum ist dann erreicht, wenn der minimale Vertikalabstand der Kurven einem Wert ΔT_{min} entspricht. ΔT_{min} ist die minimal akzeptierte Temperaturdifferenz eines im System verbauten Wärmetauschers. An dieser Stelle – dem „Pinch“ – kann das System in zwei Bereiche geteilt werden. Oberhalb

Abb. 7:
Pinchdiagramm





© Fotolia

INFO

ΔT_{\min} für Plattenwärmetauscher = 2 K

ΔT_{\min} für einen

Rohrbündelwärmetauscher = 5 K

der Pinchtemperatur wird Prozesswärme benötigt, unterhalb der Pinchtemperatur ist ein Wärmeüberschuss vorhanden.

Der Bereich, in dem sich die Hot-Composite-Curve und die Cold-Composite-Curve horizontal überdecken, entspricht der Wärmemenge, die theoretisch systemintern über Wärmetauscher rückgewonnen werden kann. Der verbleibende Prozesswärmebedarf auf der Cold-Composite-Curve muss durch Betriebsmittel (Utilities), zum Beispiel Dampf, bereitgestellt werden. Die verbleibende Prozesswärme auf der Hot-Composite-Curve stellt ungenützte Abwärme dar, die mitunter durch Betriebsmittel gekühlt werden muss (beispielsweise im Falle von zu heißem Abwasser).

Grundsätzlich werden in der Pinchanalyse nur Prozesse erfasst, jedoch Ströme von Erzeugungsanlagen (Utilities z.B. Kessel, Kälteanlagen) nicht inkludiert, da diese stark vom optimierten Energiebedarf der Prozesse abhängen. Abwärmeströme (Prozessmedium, Wasser etc.) aus Prozessen, die keinen direkten Kühlbedarf haben und daher nicht zwingend gekühlt werden müssen, müssen jedoch berücksichtigt werden, da mit ihrer Energie potentiell ein Wärmebedarf gedeckt werden kann.

Toolbox

Die Prozesse, die im EnPro-Tool definiert wurden, sind die Grundlage für die Pinchanalyse. Das EnPro-Tool zeichnet das Pinchdiagramm, berechnet den Pinchpunkt, das theoretische Wärmerückgewinnungspotential und liefert Vorschläge, wie man das Wärmetauschernetzwerk optimal aufbauen kann.

4. INTEGRATION VON WÄRME- PUMPEN, SOLARTHERMIE UND KOMBISYSTEMEN

Aufbauend auf den vorhergehenden Schritten der Optimierung auf Prozessebene (technologische Innovation) und Systemebene (Nutzung von Abwärme, Reststoffnutzung) kann nun der optimierte Energiebedarf mit erneuerbarer Prozesswärme abgedeckt werden.



4.1 Entscheidungsfindung

Die folgenden Kriterien dienen dazu, festzustellen, ob sich ein Unternehmen gut für die Integration von Solarthermie und Wärmepumpen eignet. Je mehr dieser Kriterien zutreffen, desto größer ist das Potential für diese erneuerbaren Technologien.

Solarthermie:

Örtliche Situation

- Freie Dach- oder Bodenflächen für die Installation einer Solarthermieanlage vorhanden
- Ausrichtung der Dachschrägen nach Süden/Südosten/Südwesten
- Platz für die Installation eines Pufferspeichers vorhanden

Wärmebedarf

- Prozesswärmebedarf in nennenswertem Ausmaß gegeben
- Erforderliche Wärmenutzungstemperatur < 90 °C

Kosten

- Energiekosten sind ein wichtiger Kostenfaktor für das Unternehmen

Wärmepumpen:

Wärmebedarf

- Prozesswärmebedarf in nennenswertem Ausmaß gegeben

- Erforderliche Wärmenutzungstemperatur < 125 °C

Wärmequellen

- Prozesse vorhanden, die neben Heiz- auch Kühlbedarf haben
- Abwärme von Kältemaschinen und Kompressoren vorhanden
- Warme Abwasser- und Abluftströme vorhanden, die nicht mehr genutzt werden können

Kosten

- Energiekosten sind ein wichtiger Kostenfaktor für das Unternehmen

Toolbox

Das EnPro-Tool beginnt mit einem Fragebogen, der zur Bewertung des Potentials für Solarthermie und Wärmepumpen dient.

4.2 Integrationskonzepte

Die Integrationskonzepte beschreiben, wie Solarthermie, Wärmepumpen und deren Kombination in einen Betrieb integriert werden können, um erneuerbare Prozesswärme bereitzustellen. Die Integrationskonzepte sind modular aufgebaut.

4.2.1 Module in den Integrationskonzepten

Jedes Integrationskonzept verfügt über mindestens ein Basismodul, das sind Solarthermieranlagen und Wärmepumpen (Abbildung 8). Sie liefern die erneuerbare Prozesswärme. Die Basismodule werden mit den Nachbarmodulen verbunden, die Verbindung kann je nach Aufgabe und Position im Integrationskonzept verändert werden. Auf die Besonderheiten der jeweiligen Verschaltung wird in den Kapiteln 4.2.3 und 4.2.4 eingegangen.

Neben den Basismodulen gibt es eine Vielzahl von Hilfsmodulen. Hilfsmodule ermöglichen es, die von den Basismodulen bereitgestellte erneuerbare Prozesswärme sinnvoll zu integrieren und das Konzept an die spezifischen Anforderungen des jeweiligen Betriebes anzupassen. So können zum Beispiel zeitlich verschobene thermische Angebots- und Nachfrageverläufe mit thermischen Speichern ausgeglichen werden. Eine einzelne Wärmepumpe kann im einfachsten Fall direkt eingebunden werden. Sind mehrere Kreisläufe vorhanden, wird meist ein separates Integrationsmodul benötigt. Verschiedenste Varianten können durch eine Kombination von Basis- und Hilfsmodulen abgebildet werden. Die grundlegenden Hilfsmodule zeigt Abbildung 9. Je nach Anwendungsfall kann es auch zu Variationen innerhalb der Hilfsmodule kommen. Ein Beispiel hierfür ist das Laden eines Speichers mit Solarthermie. In diesem Fall verfügt das Hilfsmodul „Laden“ über einen separaten Wärmetauscher.

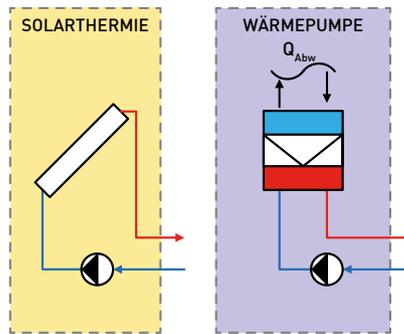


Abb. 8: Basismodule als Bausteine innerhalb der Integrationskonzepte

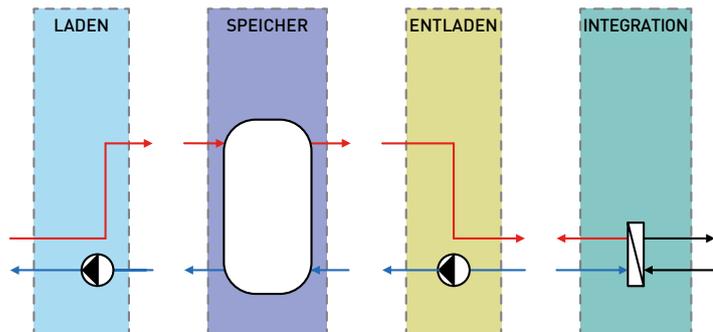


Abb. 9: Hilfsmodule als Bausteine zur Darstellung von Pumpen, Speichern und Wärmetauschern

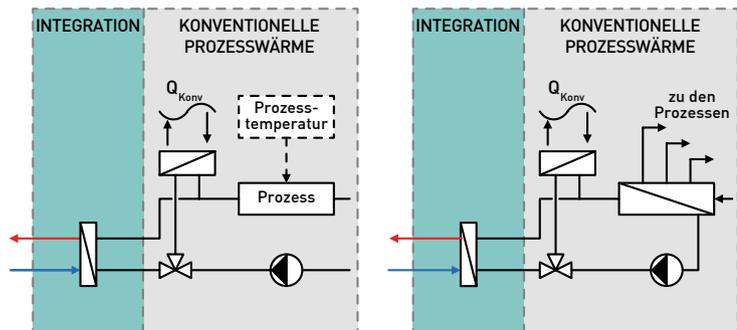


Abb. 10: Integration auf Prozess- oder auf Systemebene (Prinzipschema)

4.2.2 Arten der Einbindung

Solarthermie und Wärmepumpen können entweder auf System- oder auf Prozessebene eingebunden werden. Abbildung 10 zeigt den Unterschied. Bei der Einbindung auf Prozessebene liefern die erneuerbaren Technologien Wärme mit der nötigen Prozesstemperatur, die im jeweiligen Prozess direkt verwendet wird. Bei der Integration auf Systemebene ergänzen oder ersetzen die erneuerbaren Technologien die bestehende konventionelle Energieversorgung. Wärme wird zentral bereitgestellt und mit bestehender Infrastruktur auf verschiedene Prozesse mit unterschiedlichen Anforderungen verteilt.

Beide Integrationsmöglichkeiten berücksichtigen außerdem die Möglichkeit der konventionellen Wärmebereitstellung, wenn die erneuerbare Prozesswärme den Bedarf nicht vollständig decken kann.

Wie Solarthermie und Wärmepumpen eingebunden werden können, wird in den Kapiteln 4.2.3 und 4.2.4 behandelt. Der Übersichtlichkeit halber zeigen diese Kapitel nur die Einbindung auf Prozessebene. Alle gezeigten Integrationskonzepte können jedoch auch für die Bereitstellung erneuerbarer Prozesswärme auf Systemebene eingesetzt werden.

4.2.3 Monovalente Integrationen

Bei den monovalenten Integrationen wird entweder eine Solarthermie- oder eine Wärmepumpenanlage eingesetzt. Die monovalente Integration von Solarthermie (ST) ist besonders gut geeignet, wenn:

- geeignete Flächen für die Installation einer Solarthermieanlage vorhanden sind
- ausreichend viel solare Strahlung zur Verfügung steht
- die erforderliche Temperatur der Wärmenutzung weniger als 90 °C beträgt

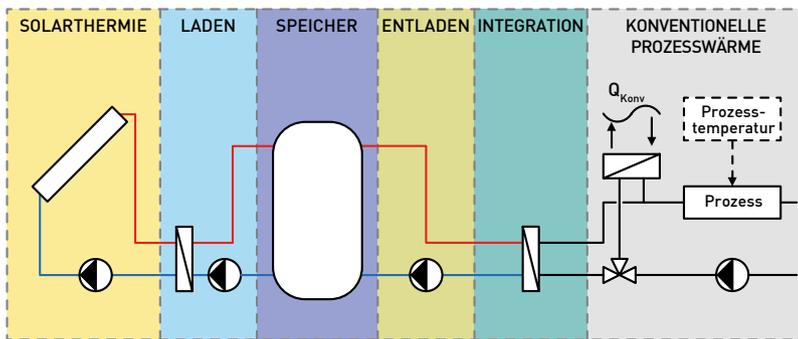
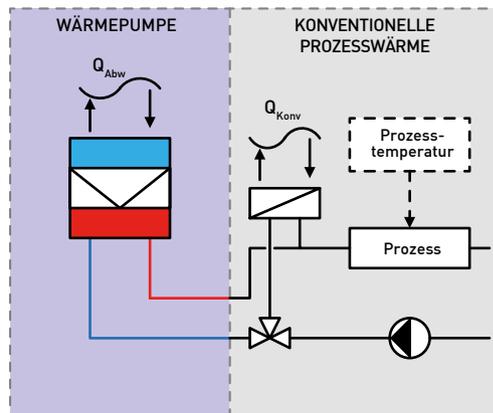


Abb. 11: Monovalente Integration von Solarthermie (Prinzipschema)

Die monovalente Integration einer Wärmepumpe (WP) ist besonders gut geeignet, wenn:

- Abwärme oder andere nutzbare Wärmequellen zur Verfügung stehen
- die verfügbare Leistung der Wärmequelle in etwa dieselbe Größenordnung aufweist wie der Wärmebedarf
- die erforderliche Temperatur der Wärmenutzung weniger als 125 °C beträgt
- für hohe Wärmenutzungstemperaturen ausreichend warme Quellen zur Verfügung stehen, um die Wärmepumpe effizient zu betreiben

Abb. 12: Monovalente Integration einer Wärmepumpe (Prinzipschema)



4.2.4 Kombinationen von Solarthermie und Wärmepumpen

Parallele Verschaltung (P)

Die Grundvoraussetzung für die parallele Verschaltung von Solarthermie und Wärmepumpen ist, dass die minimalen Anforderungen der jeweiligen Technologie erfüllt werden. So benötigt zum Beispiel eine Solarthermieanlage immer eine geeignete Fläche und eine Wärmepumpe immer eine Wärmequelle. Im Idealfall handelt es sich bei der Wärmequelle um einen Kühlprozess, was die Effizienz des gesamten Integrationskonzepts erhöht. Für den optimalen Einsatz müssen beide erneuerbare Technologien unabhängig voneinander das erforderliche Temperaturniveau erreichen. Liefert die Wärmepumpe die benötigte Prozess-temperatur und stimmen der zeitliche Verlauf der Wärmebereitstellung und des Prozessbedarfs überein, wird kein Speicher benötigt.

Diese Kombination ist besonders gut geeignet, wenn:

- sowohl Potential für Solarthermie als auch für die Wärmepumpe vorhanden ist
- eine Technologie alleine nicht ausreicht, um den Prozesswärmebedarf im gewünschten Ausmaß zu decken
- zu wenig Fläche für eine vollständige Deckung mit einer Solarthermieanlage vorhanden ist
- die Wärmequelle für eine vollständige Deckung mit der Wärmepumpe nicht ausreicht

INFO

Die Schaltschemen sollen den grundlegenden Gedanken des jeweiligen Integrationskonzepts darstellen.

Serielle Verschaltung 1 (S1)

Dieses Konzept sieht vor, dass das Wärmeträgermedium zuerst mit der Solarthermieanlage vorgewärmt wird, danach mit der Wärmepumpe. Dazu muss eine Wärmequelle vorhanden sein, die idealerweise aus einem Kühlprozess stammt. Die Wärmepumpe soll die erforderliche

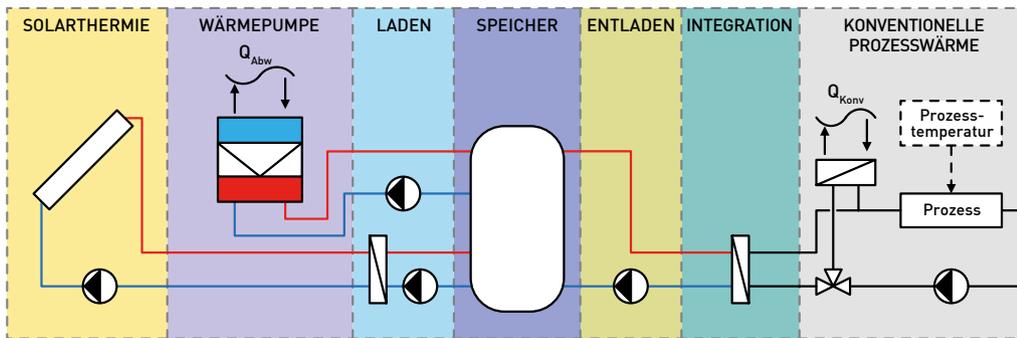


Abb. 13:
Parallele Kombination
(Prinzipschema)

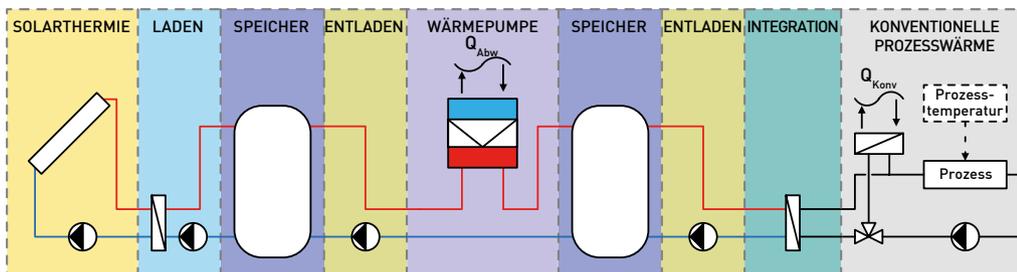


Abb. 14:
Serielle Kombination 1
(S1, Prinzipschema)

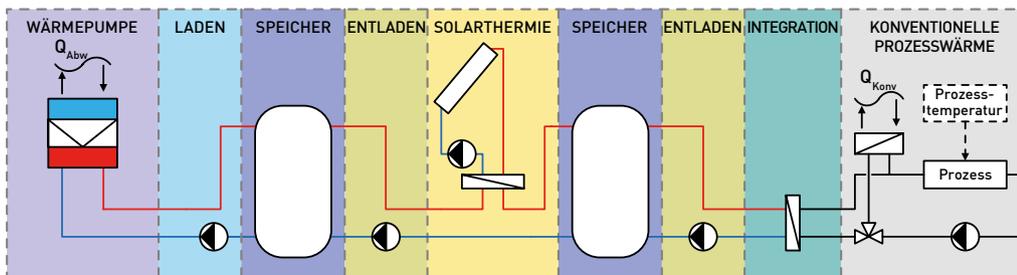


Abb. 15:
Serielle Kombination 2
(S2, Prinzipschema)

Prozesstemperatur erreichen, um eine direkte Integration in den Prozess ohne konventionelle Nachheizung zu ermöglichen.

Diese Kombination ist besonders gut geeignet, wenn:

- Prozesswärme auf einem Temperaturniveau benötigt wird, das mit der Solarthermieanlage nicht mehr ausreichend effizient bereitgestellt werden kann ($> 90 \text{ °C}$)
- eine relativ warme Wärmequelle vorhanden ist ($> 50 \text{ °C}$), damit der Temperaturhub der Wärmepumpe nicht zu groß wird

INFO

Ein Speicher zwischen dem Wärmepumpen- und dem Integrationsmodul wird nur dann benötigt, wenn Wärmequelle und Wärmebedarf zeitlich versetzt sind.

Serielle Verschaltung 2 (S2)

Sind eine verhältnismäßig kühle Wärmequelle und ein grundsätzliches Potential für Solarthermie gegeben, kann die Solarthermieanlage nach der Wärmepumpe angeordnet werden. In diesem Fall wird eine erste Temperaturerhöhung des Wärmeträgermediums durch die Wärmepumpe realisiert und dann durch die Solarthermieanlage. Die Solarthermieanlage soll die erforderliche Temperatur erreichen. Auch hier gilt, dass dieses Konzept wesentlich wirtschaftlicher ist, wenn die Wärmequelle ein Kühlprozess ist.

Diese Kombination ist besonders gut geeignet, wenn:

- nur relativ kalte Wärmequellen für die Wärmepumpe zur Verfügung stehen ($< 30 \text{ °C}$)
- sich durch die Kombination mit der Solarthermieanlage der Temperaturhub der Wärmepumpe auf ein wirtschaftlich günstiges Niveau reduzieren lässt

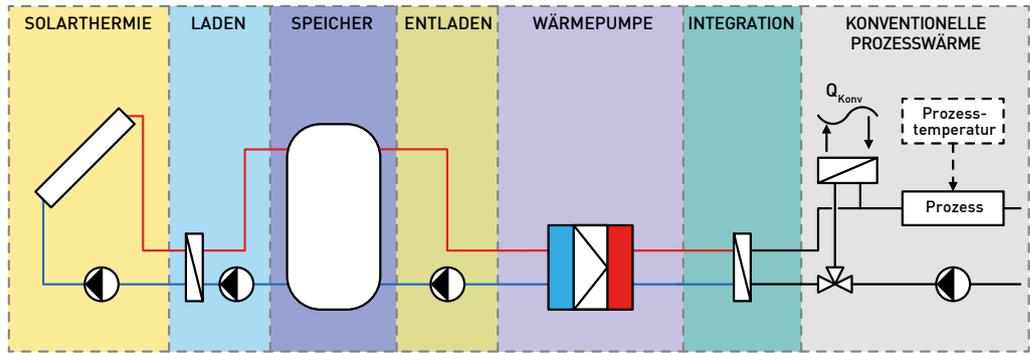


Abb. 16: Serielle Kombination 3 (S3, Prinzipschema)

Serielle Verschaltung 3 (S3)

Jede Wärmepumpe benötigt eine Wärmequelle. Gibt es in dem betrachteten Unternehmen keine Wärmequellen oder reicht die Umgebungswärme für den wirtschaftlichen Betrieb einer Wärmepumpe nicht aus, kann die Solarthermieanlage als Wärmequelle für die Wärmepumpe dienen. Die Wärmepumpe soll die erforderliche Temperatur erreichen. Durch richtige Speicherdimensionierung wird gewährleistet, dass die Wärmepumpe durchgehend im Betrieb sein kann, wenn es für den Prozess erforderlich ist. Diese Kombination ist besonders gut geeignet, wenn:

- keine Wärmequelle zur Verfügung steht
- das Temperaturniveau der Umgebung für die wirtschaftliche Integration einer Wärmepumpe zu gering ist

INFO

Monovalente Solarthermieanlagen können durch das Integrationskonzept Serielle 3 einfach erweitert werden.

4.3 Anwendung der Integrationskonzepte

Der Entscheidungsbaum in Abbildung 17 liefert Ideen, welche Integrationskonzepte für welche Unternehmen geeignet sein können und weiter betrachtet werden sollen. Als anschauliches Beispiel soll ein Galvanikbetrieb dienen. Der Betrieb möchte seine Energieversorgung umweltschonender und effizienter gestalten,

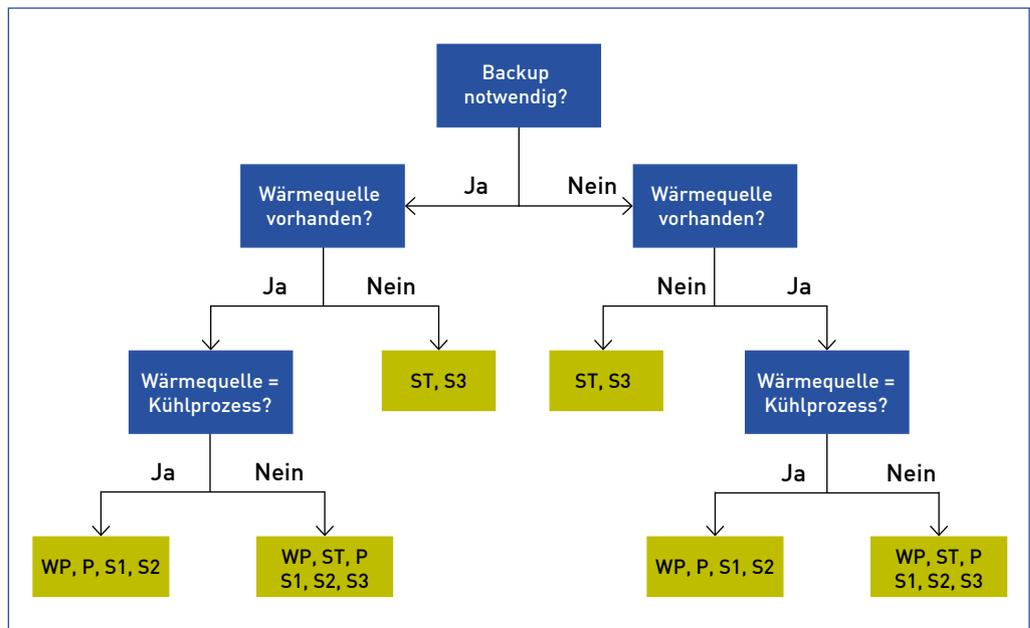


Abb. 17: Entscheidungsbaum für Integrationskonzepte

Energiekosten sind ein großer Teil der Betriebskosten, das Investitionsbudget ist aber limitiert.

Da es nicht das vorrangige Ziel des Unternehmens ist, vollständig auf erneuerbare Energien umzustellen, ist ein konventionelles Backup notwendig. Solarthermie und Wärmepumpen sollen die bestehende Energiebereitstellung ergänzen und zur Effizienz beitragen.

In diesem Betrieb werden die Betriebshallen und Gebäude mit erdgasbefeuerten Warmwasserkesseln beheizt, die Produktionsprozesse mit erdölgefeuerten Dampfkesseln. Es gibt eine Kältemaschine, die sowohl für die Prozesse als auch für die Raumkühlung im Sommer eingesetzt wird. Die Galvanikbäder werden je nach Art des Prozesses entweder mit Dampf beheizt oder mit Kaltwasser gekühlt. Es stehen daher Wärmequellen zur Verfügung, die zum Teil Kühlprozesse sind.



© AEE INTEC

Abbildung 18 zeigt den Pfad durch den Ergebnisbaum. Anhand dieser ersten Einschätzung kommen folgende Konzepte in Frage:

- Monovalente Integration einer Wärmepumpe (WP)
- Parallele Kombination (P)
- Serielle Kombination 1 (S1)
- Serielle Kombination 2 (S2)

Toolbox

Mit dem EnPro-Tool kann der individuelle Nutzen aller hier vorgestellten Integrationsvarianten abgeschätzt und anschließend gegenübergestellt werden. Dazu werden die Prozess- und Systemdaten, die zuvor eingegeben wurden, verwendet. Es können Parameterstudien mit unterschiedlichen Einbindungsvarianten durchgeführt werden.

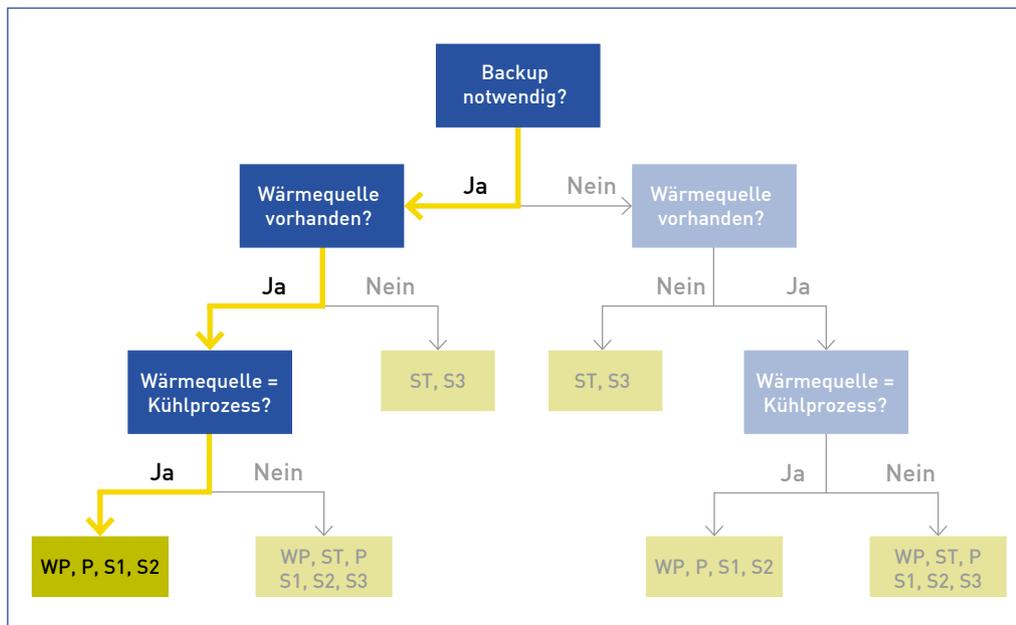


Abb. 18: Ergebnis des Entscheidungsbaums für einen Galvanikbetrieb als Beispiel

5. IDEEN ZUR INTEGRATION

Die folgenden Beispiele sollen als Inspiration dienen und beschreiben vor allem die Kombinationen von Solarthermie und Wärmepumpen näher. Für die monovalente Integration von Solarthermie oder Wärmepumpen gibt es zahlreiche Möglichkeiten, sowohl auf Prozessebene als auch auf Systemebene.

Auf Prozessebene gibt es beispielsweise Bedarf an Warmwasser für Reinigungszwecke in Bäckereien, was generell auf Betriebe der Lebensmittelbranche zutrifft. Auch in Wäschereien wird Warmwasser für den Waschprozess benötigt. Dieser Bedarf kann gut durch Solarthermie oder Wärmepumpen gedeckt werden. Beispielsweise eignen sich Flachkollektoren ausgezeichnet für die Bereitstellung von Wasser mit 60 °C (typisch für Reinigungsprozesse), da Flachkollektoren in diesem Temperaturbereich bei hohem Wirkungsgrad arbeiten, siehe auch Kapitel 1.2.3. Gegebenenfalls bereits vorhandene Speicher begünstigen die Integration dieser Technologie.

Wärmepumpen eignen sich ebenfalls ausgezeichnet für die Bereitstellung von Warmwasser. Durch die Wärmepumpe können Prozessschritte energetisch miteinander verbunden werden, die bislang getrennt waren. Dabei sind gegenseitige Wechselwirkungen und die Einsatzzeiten von Quellen und Senken zu beachten. Die Integration im gleichen Prozess ist daher am einfachsten. Beispiele sind Prozesse, die sowohl beheizt als auch gekühlt werden, wie Eindampfanlagen oder andere chemische Reaktoren. Die Wärmepumpe kann den Prozess kühlen und Prozesswärme liefern. Die Abwärme von Kältemaschinen wie in der Lebensmittelindustrie ist eine besonders interessante Wärmequelle, da die Wärmepumpe durch gleichzeitiges Heizen und Kühlen sehr effizient betrieben werden kann. Durch den zusätzlichen Nutzen des Kühlens steigt der Gesamt-COP. Ebenfalls großes Potential bieten feuchte Abluftströme, da durch die Wärmepumpe ein Teil der Kondensationsenergie des Wassers rückgewonnen werden kann. Der-

INFO

Wärmequellen für Wärmepumpen in Industrieprozessen:

- Abwasser: 20–45 °C, zumeist verunreinigt
- Abluft aus Trocknungsprozessen: 50–90 °C, hoher Feuchtegehalt, zumeist verunreinigt
- Abwärme aus Kälteanlagen: ca. 30 °C
- Abwärme aus Prozesskühlung (Kühlwasser): ca. 50 °C
- Abwärme der Druckluftkompressoren: ca. 70 °C

artige Abluftströme treten zum Beispiel in industriellen Trocknungsprozessen, wie in Papierfabriken oder Wäschereien, auf. Sowohl Solarthermie als auch Wärmepumpen können dabei direkt auf Prozessebene zur Abdeckung des Bedarfs eingesetzt werden oder in bestehende Kessel auf Versorgungsebene integriert werden. Besonders interessant sind dabei offene Dampfprozesse, bei denen verbrauchter Dampf durch Frischwasser ersetzt werden muss. Mit Solarthermie und/oder Wärmepumpen kann dabei das Kesselspeisewasser vorgewärmt oder direkt Dampf produziert werden. Typische Dampftemperaturen reichen je nach Prozess von ca. 105 bis über 180 °C. Bei der Dampfproduktion sind folgende Einschränkungen gegeben: (1) Die derzeit verfügbaren Wärmepumpen können nur Wärmenutzungstemperaturen von rund 125 °C liefern. An der Entwicklung von Wärmepumpen mit höheren Wärmenutzungstemperaturen wird bereits gearbeitet. Die Marktreife von Anlagen, die Tempera-

turen von bis zu 160 °C liefern können, wird in den nächsten Jahren erwartet. [2] Für konzentrierende Solarthermieanlagen, mit denen Dampf produziert werden kann, muss ausreichend Direktstrahlung vorhanden sein. Die Effizienz der Anlagen hängt stark vom Standort und der damit verbundenen Einstrahlung ab. In Österreich sind dafür nur wenige Regionen geeignet.

INFO

Detaillierte Integration Guidelines für Solarthermie findet man online auf http://task49.iea-shc.org/data/sites/1/publications/150218_IEA%20Task%2049_D_B2_Integration_Guideline-final1.pdf

5.1 Parallele Kombination

Die parallele Kombination wird beispielhaft für ein Unternehmen aus der chemischen Industrie angewandt, das große Mengen an Waschwasser benötigt. Die Temperaturanforderungen an dieses Prozessmedium variieren dabei zwischen 60 und 75 °C. Würden die für eine Wärmepumpe geeigneten Abwärmeströme vollständig genutzt, bliebe weiterhin ein großer thermischer Energiebedarf in diesem Bereich. Die Dachflächen eignen sich nicht für die Nachrüstung einer Solarthermieanlage, es sind jedoch Freiflächen für die Installation von Kollektoren vorhanden. Bei vollständiger Ausnutzung der Freiflächen durch eine Solarthermieanlage ist es nicht möglich, den thermischen Energiebedarf zur Waschwassererwärmung abzudecken. Da die Produktionsanlage im

3-Schicht-Prinzip arbeitet und der Waschwasserbedarf kontinuierlich anfällt, ist für die Integration von Solarthermie kein Speicher notwendig, was die Systemkosten deutlich verringert.

Zur weiteren Erhöhung des mit erneuerbaren Energien abdeckbaren Energiebedarfs wird parallel zur Solarthermieanlage eine Wärmepumpe installiert. Als kontinuierliche Abwärmequelle steht Niederdruckdampf aus verschiedenen Eindampfanlagen bei 35 °C zur Verfügung, welcher bisher mit Kühlwasser kondensiert wurde. Der aktive Kühlbedarf erhöht den Gesamtwirkungsgrad der Wärmepumpe im Sommer maßgeblich. Im Winter hat dieser Effekt nur eine sehr geringe Auswirkung, da das Unternehmen an einem Fluss angesiedelt ist und das Flusswasser im Winter zur Bereitstellung von Kühlwasser genutzt werden darf. Die Wärmepumpe arbeitet zwischen 35 °C und 75 °C in einem wirtschaftlich günstigen Bereich, da der Anteil der Verdichterleistung an der Heizleistung relativ gering ausfällt. Die Wärmequelle ist immer dann verfügbar, wenn auch ein Bedarf an Waschwasser besteht. Daher sind etwaige Speicher nicht nötig.

Das reale Integrationskonzept weicht von der prinzipiellen Darstellung aus Abbildung 19 in einigen Punkten ab, da zum Beispiel kein Speicher benötigt wird. Weiters ist eine konventionelle Nachheizung der erneuerbar bereitgestellten thermischen Energie nicht notwendig, da sowohl die Solarthermieanlage als auch die Wärmepumpe das geforderte Temperaturniveau des Prozesses erreichen. Die bestehende konventionelle Wärmebereitstellung in Form von Dampf ist daher der erneuerbaren Wärmebereitstellung parallel geschaltet.

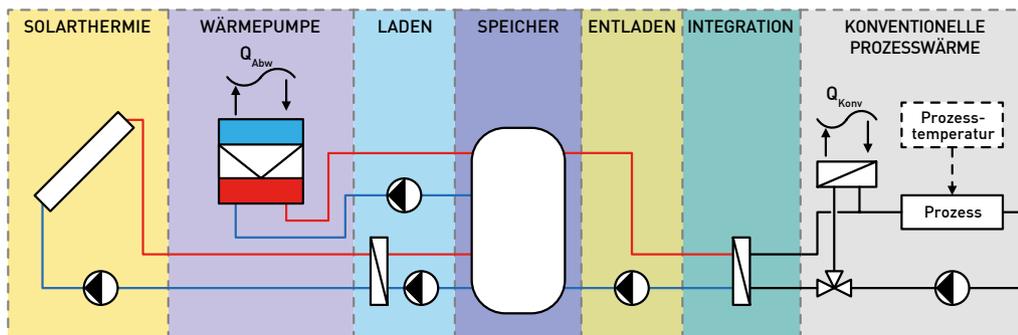


Abb. 19: Parallele Verschaltung in einem Unternehmen der chemischen Industrie (Prinzipschema)

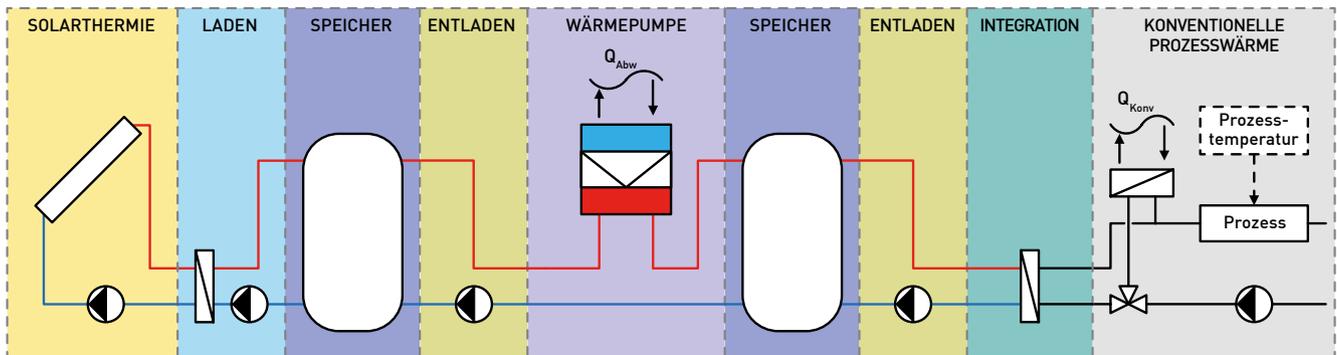


Abb. 20:
Serielle Kombination 1
in einer Wäscherei
(Prinzipschema)

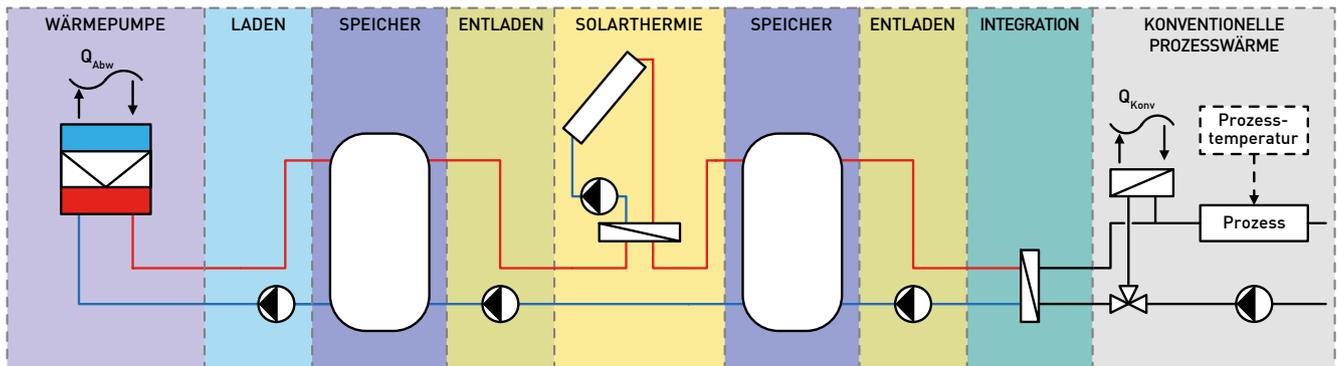
5.2 Serielle Kombination 1

Die serielle Kombination 1 wird in den Trockner einer Wäscherei integriert. Für die Wäschetrocknung wird Luft mit einem Dampfheizregister auf die erforderliche Trocknungstemperatur gebracht. Diese Temperatur liegt je nach Art der zu trocknenden Wäsche zwischen 80 und 160 °C. Dieses Dampfheizregister kann durch die serielle Kombination von Wärmepumpen und Solarthermie ergänzt oder ersetzt werden. Die Solarthermieanlage erwärmt die Luft, die aus der Umgebung angesaugt wird, auf rund 40 °C. In diesem Temperaturbereich ist die Solarthermieanlage sehr effizient. Die Wärmepumpe nutzt die feuchte Abluft des Trockners als Wärmequelle und erhitzt die Luft weiter. Da der Wasserdampf aus der Abluft beim Abkühlen teilweise auskondensiert, liefert die Wärmequelle Wärme auf einem verhältnismäßig hohen Temperaturniveau, was sich positiv auf den Betrieb der Wärmepumpe auswirkt. Bis zu einer erforderlichen Lufttemperatur von 125 °C ist keine weitere Erhitzung mit dem Dampfregister nötig.

Abb. 21:
Serielle Kombination 2
in einem Galvanikbetrieb
(Prinzipschema)

5.3 Serielle Kombination 2

Diese serielle Kombination kann für die Beheizung von Galvanikbädern in der metallverarbeitenden Industrie bzw. Prozessbädern in anderen Industriebranchen eingesetzt werden. Das Temperaturniveau der Prozesse beträgt je nach Anwendungsfall (Vor-/Haupt- oder Nachbehandlung) bis zu 90 °C. In Galvanikbetrieben müssen Prozessbäder sowohl beheizt als auch gekühlt werden. Die Wärmepumpe nutzt die Abwärme direkt aus der Kühlung eines Galvanikbades (ca. 25 °C) und heizt Warmwasser auf eine Temperatur von rund 60 °C auf. Der erreichbare COP der Wärmepumpe ist aufgrund des geringen Temperaturunterschiedes sehr gut. Gleichzeitig kann eine Kühlung des Galvanikbades erzielt werden. Das (zwischen gespeichertes) Warmwasser wird anschließend durch die von der Solarthermie bereitgestellte solare Prozesswärme auf 90 °C erhitzt und versorgt damit das Galvanikbad mit Prozesswärme.





© AIT/Lukas Ilgner

5.4 Serielle Kombination 3

Die serielle Kombination 3 kann beispielsweise in Bäckereien sinnvoll eingesetzt werden. In Bäckereien fällt Abwärme teilweise bei hohen Temperaturen ($> 80\text{ °C}$) und wird damit in Wärmetauschern zur direkten Wärmerückgewinnung eingesetzt. In Großbäckereien besteht nach Ausnutzung aller vorhandenen Abwärmequellen und direkten Wärmerückgewinnungsmaßnahmen oftmals nach wie vor Bedarf an Prozesswärme. Hier kann die Integration der seriellen

Kombination 3 erfolgen und die Solaranlage anstelle von Abwärme als Wärmequelle für die Wärmepumpe dienen.

Die Wärmepumpe kann Wärme für Waschprozesse (Kisten, Lanzen etc.) bei einem Temperaturniveau von ca. 90 °C bereitstellen. Als Wärmequelle dient die Solaranlage, die mit gutem Wirkungsgrad Wärme im niedrigen Temperaturbereich (ca. $40\text{--}50\text{ °C}$) bereitstellt. Im Vergleich zur Umgebungswärme ermöglicht die Solarthermie so einen effizienteren Betrieb der Wärmepumpe.

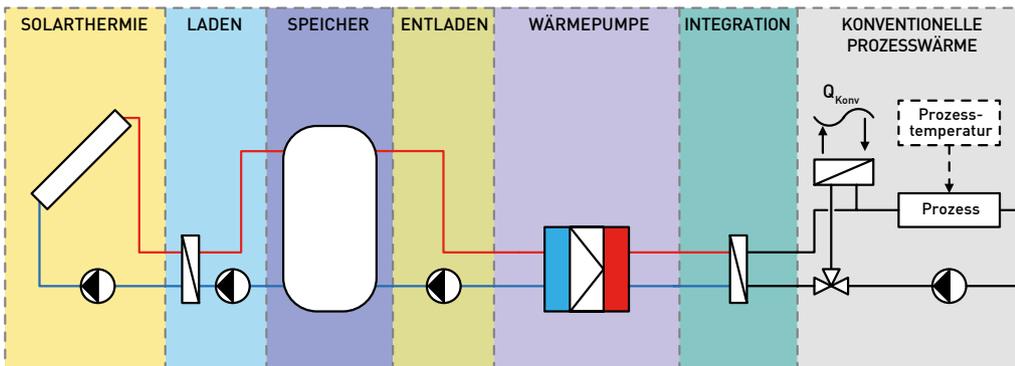


Abb. 22: Serielle Kombination 3 in einer Bäckerei (Prinzipschema)

6. TECHNO-ÖKONOMISCHE BEWERTUNG

Zur Betrachtung der Umweltauswirkungen werden die CO₂-Emissionen und der Primärenergieverbrauch des Prozesses vor und nach der Integration der erneuerbaren Technologie berechnet und gegenübergestellt.

Vor der Integration einer Wärmepumpe wird Prozesswärme beispielsweise in erdgasbefeuerten Kesseln bereitgestellt. Durch den Einsatz der Wärmepumpe wird der Erdgaseinsatz reduziert, aber dafür elektrischer Strom für den Verdichter benötigt. Bei der Solarthermie wird im laufenden Betrieb nur wenig Strom für die Pumpe benötigt, daher kann der Strombedarf in einer ersten Näherung vernachlässigt werden.

Der CO₂-Emissionsfaktor f_{CO_2} beschreibt, wie viel CO₂ pro Einheit an Endenergie, die als Prozesswärme verfügbar ist, in die Atmosphäre abgegeben wird. Darin können auch andere treibhauswirksame Gase wie Methan berücksichtigt werden (CO₂-Äquivalent = CO₂e). Der Primärenergiefaktor f_{Prim} gibt an, wie viel Energie benötigt wird, um eine Einheit der Endenergie bereitzustellen. Dabei wird erfasst, wie viel Energie für die Förderung, Verarbeitung, Speicherung, Transport, Umwandlung, Übertragung und Verteilung benötigt wird. Tabelle 2 zeigt die CO₂- und Primärenergiefaktoren verschiedener Energieträger.

Wirtschaftliche Betrachtungen

Zur Beurteilung der laufenden Energiekosten einer Wärmepumpe ist das Preisverhältnis von elektrischem Strom und dem konventionellen Energieträger maßgeblich. Bei einer Solarthermieanlage können die laufenden Energiekosten vernachlässigt werden.

Zur Berechnung der Amortisationszeit ohne Zinsen werden die Investitionskosten benötigt. Die Investitionskosten einer Wärmepumpe ohne Prozesseinbindung

INFO

OIB-Richtlinien: dienen der Harmonisierung der bautechnischen Vorschriften in Österreich und werden vom Österreichischen Institut für Bautechnik herausgegeben. Die Faktoren wurden den OIB-Richtlinien 6 aus dem Jahr 2015 entnommen.

Gemis: Globales Emissions-Modell integrierter Systeme GEMIS Österreich. Die Faktoren wurden den österreichischen Prozessen entnommen.

	CO ₂ -Emissionen		Primärenergiefaktor	
	OIB-Richtlinie g CO ₂ /kWh	GEMIS g CO ₂ e/kWh	OIB-Richtlinie kWh PE/kWh	GEMIS kWh PE/kWh
Biomasse	4	36	1,08	1,4
Erdgas	236	248	1,17	1,18
Fernwärme	291	186	1,52	1,33
Kohle	337	558	1,46	1,36
Heizöl	311	437	1,23	1,65
Strom	276	300	1,91	1,79

Tab. 2: Überblick über verschiedene CO₂- und Primärenergiefaktoren



© Fotolia

liegen nach Angaben von Herstellern für Industriewärmepumpen zwischen 250 und 400 Euro/kW Heizleistung.

Die Investitionskosten für eine Solarthermieanlage hängen von der Anlagengröße ab. Die Kosten nehmen mit zunehmender Größe ab. Anlagen im Bereich von 10 m² kosten rund 600–1000 Euro/m², im Bereich von 10.000 m² liegen die Kosten zwischen 200 und 400 Euro/m². Es handelt sich bei diesen Werten um die Systemkosten ausgeführter Anlagen (inkl. Speicher, Wärmetauscher, Prozessintegration, Ausdehnungsgefäß, Stagnationskühler etc.).

Zum Vergleich können auch die Wärmegestehungskosten für einen Zeitraum von 20 Jahren berechnet werden.

Dazu werden die laufenden Energiekosten und Investitionskosten auf die in 20 Jahren bereitgestellte Wärmemenge bezogen.

Toolbox

Mit dem EnPro-Tool kann der individuelle Nutzen aller Integrationsvarianten abgeschätzt werden. Dazu werden die Prozess- und Systemdaten, die zuvor eingegeben wurden, verwendet. Es können Parameterstudien mit unterschiedlichen Einbindungsvarianten durchgeführt werden.

Die Ergebnisse werden gegenübergestellt und anhand von techno-ökonomischen Kennzahlen, wie der Amortisationszeit oder der CO₂-Einsparung, verglichen.

INFO

Weitere Informationen zu den Investitions- und Wärmegestehungskosten verschiedener Technologien gibt es im WikiWeb.

<http://bit.ly/EnPro>

7. FÖRDERPROGRAMME FÜR SOLARTHERMIE UND WÄRMEPUMPEN

Förderprogramme für Solarthermie, Wärmepumpen und Kombinationen sind sehr heterogen und gleichzeitig überaus breit gestreut. Die Programme werden im Wesentlichen von der Europäischen Union, seitens des Bundes sowie auf der Ebene der österreichischen Bundesländer bereitgestellt.

Zu den wichtigsten Arten der Förderungen gehören

- direkte Investitionszuschüsse
- Förderung von Betriebskosten beim Betrieb von Solarthermieanlagen und/oder Wärmepumpen
- Steuerbegünstigungen zur innerbetrieblichen Forschungsförderung.

Außerdem gibt es zahlreiche indirekte Unterstützungsmaßnahmen für Unternehmen. Beispiele dafür sind Programme zur Förderung von Kooperationen mit Universitäten und außeruniversitären Forschungseinrichtungen sowie Unterstützungsmaßnahmen zur Bewusstseinsbildung und zum Wissenstransfer.

Seit 2010 bietet der Klima- und Energiefonds das Förderprogramm „Solarthermie – Solare Großanlagen“ an, von dem große solarthermische Anlagen mit einer Kollektorfläche von 100 bis 10.000 m² gefördert werden. Die Förderung erfolgt in Form von nicht rückzahlbaren Investitionszuschüssen für die Planung und Errichtung von Solaranlagen. Die Förderaktion umfasst unter anderem solare Prozesswärme in Produktionsbe-

INFO

Im WikiWeb gibt es einen Überblick über aktuelle Förderprogramme.

<http://bit.ly/EnPro>

INFO

Nähere Informationen zum Förderprogramm sind dem Leitfaden Solarthermie – Solare Großanlagen zu entnehmen:

<https://www.klimafonds.gv.at/foerderungen/aktuelle-foerderungen/2017/solarthermie-solare-grossanlagen-8-ausschreibung-2017/>

trieben, neue Technologien und innovative Ansätze. Die Förderung ist mit einem maximalen Betrag pro MWh nutzbaren Solarertrag begrenzt und erhöht sich für Projekte, die in das Begleitforschungsprogramm aufgenommen werden. Für Wärmepumpen in industriell-gewerblichen Anwendungen gibt es noch kein derartiges Förderprogramm.

