

Weiterentwicklung einer Optimierungsmethode zur Integration von Solarwärme
in gewerblichen und industriellen
Produktionsprozessen

H. Schnitzer, CH. Brunner

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

49/2006

Impressum:

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber:
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI Michael Paula

Liste sowie Bestellmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

Weiterentwicklung einer Optimierungsmethode zur Integration von Solarwärme in gewerblichen und industriellen Produktionsprozessen

Hans Schnitzer (Projektleitung), Christoph Brunner,
Bettina Slawitsch, Uwe Begander
Joanneum Research Forschungsgesellschaft mbH,
Institut für Nachhaltige Techniken und Systeme

Gernot Gwehenberger, Michael Narodoslawsky
Institut für Ressourcenschonende und Nachhaltige Systeme
Technische Universität Graz

Thomas Müller, Dagmar Jähmig, Werner Weiss
AEE INTEC – Institut für nachhaltige Technologie

Wien, Mai 2006

Ein Projektbericht im Rahmen der Programmlinie



Impulsprogramm Nachhaltig Wirtschaften

Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie

Vorwort

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus der Programmlinie ENERGIESYSTEME DER ZUKUNFT. Sie wurde 2003 vom Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie im Rahmen des Impulsprogramms Nachhaltig Wirtschaften als mehrjährige Forschungs- und Technologieinitiative gestartet. Mit der Programmlinie ENERGIESYSTEME DER ZUKUNFT soll durch Forschung und Technologieentwicklung die Gesamteffizienz von zukünftigen Energiesystemen deutlich verbessert und eine Basis zur verstärkten Nutzung erneuerbarer Energieträger geschaffen werden.

Dank des überdurchschnittlichen Engagements und der großen Kooperationsbereitschaft der beteiligten Forschungseinrichtungen und involvierten Betriebe konnten bereits richtungsweisende und auch international anerkannte Ergebnisse erzielt werden. Die Qualität der erarbeiteten Ergebnisse liegt über den hohen Erwartungen und ist eine gute Grundlage für erfolgreiche Umsetzungsstrategien. Mehrfache Anfragen bezüglich internationaler Kooperationen bestätigen die in ENERGIESYSTEME DER ZUKUNFT verfolgte Strategie.

Ein wichtiges Anliegen des Programms ist, die Projektergebnisse – sei es Grundlagenarbeiten, Konzepte oder Technologieentwicklungen – erfolgreich umzusetzen und zu verbreiten. Dies soll nach Möglichkeit durch konkrete Demonstrationsprojekte unterstützt werden. Deshalb ist es auch ein spezielles Anliegen die aktuellen Ergebnisse der interessierten Fachöffentlichkeit leicht zugänglich zu machen, was durch die Homepage www.ENERGIESYSTEMEderZukunft.at und die Schriftenreihe gewährleistet wird.

Dipl. Ing. Michael Paula

Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Abstract	II
Zusammenfassung	III
Summary	IX
1 Einleitung	1
2 Ziele des Projekts	3
3 Inhalte und Ergebnisse des Projekts	4
3.1 Methoden und Daten.....	4
3.2 Wärmeintegration mit Schwerpunkt Batch-Pinch-Methoden und -Programme.....	6
3.2.1 Stand der Technik – Pinch-Analyse.....	6
3.2.2 Generelle Probleme und Überlegungen.....	10
3.2.3 Wärmespeicherung.....	11
3.2.4 Integration von thermischer Solarenergie.....	18
3.2.5 Berechnungen und Konstruktion der Wärmetauschernetzwerke.....	20
3.2.6 Wärmeintegration bei Batch Prozessen.....	21
3.3 Solartechnik und Solare Simulation.....	24
3.3.1 Analyse von Wetterdatenbanken.....	24
3.3.2 Programme zur Simulation von thermischen Solaranlagen.....	26
3.4 Fallstudien.....	40
3.4.1 Berglandmilch.....	40
3.4.2 Wolford.....	56
3.4.3 Beerenfrost.....	65
3.5 Programmevaluation.....	76
3.5.1 Hint.....	76
3.5.2 Supertarget.....	77
3.6 Verbreitung der Ergebnisse.....	79
4 Detailangaben zu den Zielen der Programmlinie	80
5 Schlussfolgerungen	82
6 Ausblick	85
7 Literaturverzeichnis	86
8 Abbildungsverzeichnis	88
9 Tabellenverzeichnis	90

Kurzfassung

In vielen Industrieländern, auch in moderaten Klimazonen, bietet sich die Nutzung der Sonnenenergie in thermischen Anlagen als CO₂-freie Alternative an. Ziel dieses Projekts war die Entwicklung einer Methode zur optimierten Integration von Solarwärme in industrielle/gewerbliche Produktionsprozesse, die chargenweise gefahren werden.

In industriellen Anwendungen stellt die Solarenergie aufgrund von diversen externen Einflussfaktoren meist nur einen Teil der benötigten Energiemenge bereit. Wie und wo diese Energie dem Prozess zugeführt werden kann, erfordert weitaus mehr Planung als bei herkömmlichen Energieversorgungssystemen. Vor den Überlegungen zum Einsatz von Solarenergie sollen alle anderen energetisch, finanziell und organisatorisch sinnvollen Möglichkeiten zur internen Energierückgewinnung genutzt werden. Zur Analyse der vorhandenen Anlagen kann die Pinch-Methode eingesetzt werden.

Folgende Schritte, die im Bericht an Hand der drei Fallstudien näher beschrieben werden, sind bei der Analyse der optimalen Integration solarthermischer Anlagen in bestehende Wärmeversorgungssysteme zu unternehmen:

- Systematische Erfassung der Energieströme
- Berechnung des minimalen theoretischen Heiz- bzw. Kühlbedarfs
- Ermittlung des Wärmebedarfs, der sinnvoll solarthermisch gedeckt werden kann
- Auslegung eines Wärmetauschernetzwerkes
- Auslegung einer solarthermischen Anlage
- Wirtschaftlichkeitsanalyse

Die Pinch-Methode erlaubt es, Aussagen über den theoretisch minimalen Energiebedarf für Kühlen und Heizen und die maximal möglich interne Wärmerückgewinnung zu treffen. Sie erlaubt auch Auskunft darüber, bei welchen Energieniveaus und in welcher Größe Kühlungs- und Heizenergie zur Verfügung gestellt werden müssen.

Die Integration von thermischer Solarenergie in industrielle Prozesse hat über den Pinch zu erfolgen. Die Pinch-Methode gibt Auskunft darüber, bei welchen Temperaturniveaus die Integration am sinnvollsten ist. Es hat sich bei den Berechnungen der Fallbeispiele herausgestellt, dass eine Entwicklung eines gemeinsamen Pinch- und Simulationsprogramms nicht notwendig ist. Vielmehr müssen sich weitere Forschungen auf die Weiterentwicklung des Pinch-Programms für den Einsatz bei Niedrigtemperaturprozessen und die Verknüpfung mit zusätzlichen Funktionen (z.B. Kostenfunktionen) konzentrieren. Im Bereich der Solarsimulation ist die Programmierung eines für industrielle Anwendungen zugeschnittenen Tools für weitere Berechnungen notwendig.

Bei der Konstruktion des Wärmetauschernetzwerkes für bestehende Anlagen wird man immer auf die existierenden Rohrleitungen, Lage von Gebäuden, bestehenden Anlagenteile etc. Rücksicht nehmen und aus den verbleibenden Varianten die betriebswirtschaftlich sinnvollste auswählen. Der theoretisch minimale Energiebedarf für Heizen und Kühlen wird daher in der Praxis nicht erreicht werden können.

Die Untersuchung der drei Fallbeispiele hat gezeigt, dass bei einer systematischen Analyse des thermischen Energieverbrauchs in den meisten Fällen ein sehr hohes Einsparpotenzial vorhanden ist. Gekoppelt mit dem Einsatz von Solarenergie konnte für alle Firmen ein viel versprechendes Gesamtpaket erarbeitet werden.

Abstract

In many developed countries, even in moderate climates, the use of solar energy in thermal plants offers a CO₂ free alternative to other energy supplies. The aim of this project was the development of a method for optimized integration of solar heat in industrial/commercial processes which are run in batch operation.

In industrial applications however, solar energy will in most cases only be able to supply one part of the necessary energy demand due to several external factors, and the question how and when this energy can be integrated into the process takes by far more consideration and planning than with conventional heat supply systems. Prior to investigations about the integration of solar energy all other energetically, financially and organisationally sensible possibilities should be utilized. For the analysis of the existing processes the Pinch-method can be applied.

The following steps, which are described in further detail in the report in the discussion of the three case studies, have to be taken to analyse the ideal integration of solar thermal plants in existing heat supply systems:

- Systematic compilation of energy streams
- Calculation of the minimal theoretical heat- and cooling demand
- Determination of the heat demand, that can be efficiently supplied by solar thermal heat
- Design of a heat exchanger network
- Design of the solar thermal plant
- Economical evaluation

The Pinch method enables statements of the theoretical minimal energy demand for heating and cooling and the maximal possible internal heat recovery. It also gives information at which energy levels and to what extent energy for cooling and heating has to be supplied.

The integration of solar thermal energy in industrial processes has to be done across the Pinch. The Pinch method here provides information at which temperature ranges the integration is most efficient. From the case studies of this project followed that a development of a common Pinch and simulation programme is not necessary. In fact further research has to focus rather on the further development of the Pinch programme for the application at low temperature processes and the link to additional functions (e.g. cost functions). In the area of solar simulation the programming of a tool designed for industrial applications is necessary for further calculations.

In the design of the heat exchanger network for existing plants the user will always consider present pipelines, the positioning of buildings, existing plant components etc. and will have to chose the economical best option out of the remaining alternatives. The theoretical minimal demand for heating and cooling will therefore not be able to be reached in practical applications.

The investigation of the three case studies showed that by a systematic analysis of the thermal heat demand in most cases a high savings potential can be identified. Combined with the integration of solar energy a promising alternative proposal could be elaborated for all companies.

Zusammenfassung

In vielen Industrieländern, auch in moderaten Klimazonen, bietet sich die Nutzung der Sonnenenergie in thermischen Anlagen als CO₂-freie Alternative an. Nach dem Bereich der Wärme für den Wohnbereich geht es nunmehr darum, die industrielle und gewerbliche Prozesswärme als nächsten hoffnungsträchtigen Markt für Solarkollektoren zu eröffnen.

Ziel dieses Projekts war die Entwicklung einer Methode zur optimierten Integration von Solarwärme in industrielle/gewerbliche Produktionsprozesse, die chargenweise gefahren werden:

- die Entwicklung einer allgemeinen Methodik zur Optimierung des Solarenergieeinsatzes in Batch-Prozessen,
- die (Weiter-)Entwicklung einer speziellen Methodik der Optimierung der Wärmeintegration, nämlich der Batch-Pinch-Berechnung von Produktionsprozessen, die Solarthermie als nicht kontinuierliche Energieversorgung berücksichtigt, und
- die Durchführung einer Machbarkeitsanalyse zur Entwicklung eines EDV-Werkzeugs „Solar-Batch-Pinch“ aufgrund der Anforderungen aus den unterschiedlichen Bereichen Prozess- und Solarsimulation und Pinch-Methodik.

Außerdem sollte am Ende des Projekts geklärt sein, ob ein Tool „Solar-Batch-Pinch“ ein eigenständiges Programm oder Werkzeug ist, oder ob es die Funktion eines „Missing Link“ zwischen Pinch-Programmen und Prozess- und Solarsimulationen übernimmt.

Wärmeintegration

Fast alle industriellen Prozesse benötigen Wärmeenergie. In den meisten Fällen wird diese Wärmeenergie mittels Dampf oder Heißwasser zugeführt. Durch Verbrennung fossiler Energieträger (Öl, Gas) in Heiz- bzw. Dampfkesseln wird die in den chemischen Verbindungen gespeicherte Energie an das durch seine hohe Wärmekapazität zur Wärmeübertragung besonders geeignete Wasser abgegeben. Diese Systeme stellen Energie auf einem hohen Temperaturniveau zur Verfügung. Diese Temperaturen sind im Allgemeinen deutlich höher als die eigentlich im Prozess benötigten, um so eine hohe Temperaturdifferenz und damit kleine Wärmetauscherflächen zu ermöglichen. Oft liegt die Versorgungstemperatur bei 150°C bis 180°C, während in vielen Prozessen Temperaturen unter 100°C benötigt werden.

Im Temperaturbereich unter 100°C kann Wärmeenergie durch Flachkollektoren bei entsprechender Sonneneinstrahlung ausreichend bereitgestellt werden. In industriellen Anwendungen wird jedoch die Solarenergie aufgrund von diversen externen Einflussfaktoren meist nur einen Teil der benötigten Energiemenge bereitstellen können. Wie und wo diese Energie dem Prozess zugeführt werden kann, erfordert weitaus mehr Planung als bei herkömmlichen Energieversorgungssystemen.

Ein Teil der Problematik solarer Energieversorgungssysteme stellt die tages- und jahreszeitlich schwankende Versorgung dar. Doch auch viele industrielle Prozesse arbeiten nicht kontinuierlich. Daher müssen generell bei Überlegungen zur solaren Energieversorgung diese nicht kontinuierlichen Vorgänge, Batch-Prozesse genannt, berücksichtigt werden.

Eine mögliche und erfolgreiche Methode zur Untersuchung des Wärme- und Kühlbedarfs von industriellen Prozessen stellt die Pinch-Methode dar (Linnhoff et al, 1982). Diese Methode erlaubt die Optimierung von Wärmetauschernetzwerken.

Die zur Optimierung nötigen Berechnungen sind teilweise sehr aufwändig. Es gibt auf dem Markt einige kommerzielle und nicht kommerzielle Computerprogramme, die bei der Auslegung von Solaranlagen bzw. bei der Optimierung von Wärmetauschernetzwerken helfen können. Inwieweit diese Programme in der Lage sind, auf die spezifischen Probleme der Energieversorgung von industriellen Prozessen mit thermischer solarer Energie einzugehen, ist Gegenstand dieser Untersuchung.

Das Programm HINT ermöglicht die Eingabe der heißen und kalten Ströme. Aus den Stromdaten werden die Kompositkurven und die Energiekaskade ermittelt und grafisch dargestellt. Im Netzdiagramm sind vorerst nur die Ströme und der Pinchbereich eingezeichnet. Nach den Designregeln der Pinch-Theorie können nun in dieses Netzdiagramm Wärmetauscher eingezeichnet werden. Der Wärmetauscherspezifikation liegt dabei eine Datenbank von verschiedenen Konstruktionstypen und Materialien zugrunde.

Das Programm unterstützt durch die Abfrage, zwischen welchen Strömen, ausgehend von thermodynamischen Daten für die Wärmetauscher, prinzipiell Wärme ausgetauscht werden kann. Für Wärmetauscherdaten gibt es einige Vorgabewerte, die durch eigene Angaben ergänzt werden können. Für die heißen und kalten Hilfsenergien können Kostenfunktionen eingegeben werden.

Dieses Programm nimmt dabei an, dass es jeweils nur eine heiße bzw. kalte Hilfsenergie gibt. Bestimmte Hilfsenergien, wie z.B. ein Kollektorfeld, müssen als Strom definiert werden. Ansonsten ist der Anwender dafür verantwortlich, welches Wärmetauschernetzwerk zustande kommt. Stromteilungen und Wärmetauscher über den Pinch können eingegeben werden. Da es bei vielen Strömen mehrere fast optimale Netzwerke gibt, ist diese Designarbeit sehr zeitaufwändig. Allerdings erlaubt es diese Freiheit auch, von vornherein nicht passende Wärmetauscher (Lage, Hygienebestimmungen etc.) auszuschließen.

Supertarget ist das professionelle Pinch-Paket von Linnhoff March. Dieses Programm erlaubt eine Berechnung des Pinch über einzelne Kolonnen, einzelne Prozesse und gesamte Anlagen. Dieses Programm ermöglicht die Eingabe der heißen und kalten Ströme ähnlich wie HINT, daneben können aber die Stromdaten auch aus bekannten Wärmetauscherdaten ermittelt werden. Weiters ist die Übernahme von Stromdaten aus externen professionellen Konstruktionsprogrammen möglich. Aus den Stromdaten werden wieder die Kompositkurven und die Energiekaskade ermittelt und grafisch dargestellt; im Netzdiagramm sind vorerst nur die Ströme und der Pinch-Bereich eingezeichnet. Nach den Designregeln der Pinch-Theorie erstellt das Programm nun automatisch mehrere Netzwerke, wobei auch Wärmetauscher über den Pinch berechnet werden, falls das Gesamtergebnis trotzdem energetisch günstiger ist. Als Ausgangslage für diese Berechnungen gilt dabei entweder eine vorher gespeicherte Variante, oder aber die Situation ganz ohne Wärmerückgewinnung.

Bevor an den Einsatz von solarer Wärmeenergie in einem Betrieb gedacht wird, sollten noch einige andere Aspekte abgeklärt werden, um die optimale Lösung für den betrachteten Betrieb zu finden:

- Neubau einer Anlage oder Renovierung einer bestehenden Anlage: Generell bietet der Neubau einer Anlage immer mehr Möglichkeiten für den Ingenieur und es kann

bereits in der Planung auf eine optimale Anlagenanordnung auch für die solare Energieversorgung Rücksicht genommen werden. Beim Umbau bestehender Anlagen kann es vorkommen, dass das eigentlich optimale Wärmetauschernetzwerk bzw. die Solaranlage aus baulichen, organisatorischen oder finanziellen Gründen nicht verwirklicht werden kann. Die gefundenen Lösungsvarianten sind dann an die jeweilige Situation anzupassen.

- Betrachtung eines einzelnen Prozesses oder einer ganzen Anlage: Es ist im Vorhinein abzuklären, ob nur einzelne ausgewählte Prozesse oder der gesamte Betrieb betrachtet werden soll.
- Andere Betriebe: Es ist abzuklären, ob benachbarte Betriebe entweder Wärmeenergie zur Verfügung stellen können oder aber diese brauchen, und wenn ja, in welchem Temperaturbereich.
- Andere Energiequellen: Neben dem Einsatz von Solarenergieanlagen können für manche Betriebe noch andere alternative Energiequellen sinnvoll sein (z.B.: Hack-schnitzelheizung bei vorhandenen Holzabfällen etc.)
- Energieeffizienzmaßnahmen: Vor den Überlegungen zum Einsatz von Solarenergie sollen alle anderen energetisch, finanziell und organisatorisch sinnvollen Möglichkeiten zur internen Energierückgewinnung genutzt werden. Zur Analyse der vorhandenen Anlagen kommt ebenfalls die Pinch-Methode zum Einsatz.
- Umgestaltung der Prozesse: Änderung und Umstellung auf Energie sparendere Prozesse oder aber eine Änderung der Produktion in der Hinsicht, dass mehr Prozesse in einen für die solare Energieversorgung günstigen Temperaturbereich fallen.
- Reorganisation: In manchen Fällen kann bereits eine Reorganisation des Arbeitsablaufes zu Einsparungen führen, z.B. energieintensive Arbeitsgänge nicht gleichzeitig durchführen lassen, um den Spitzenenergiebedarf zu senken etc.
- Zielsetzung: Bei der Planung der internen Wärmeintegration für einen Betrieb kann nach drei Gesichtspunkten optimiert werden:
 - Geringste Investitionskosten
 - Geringste Betriebskosten
 - Maximale Energieeinsparung

Solarsimulation

Bei der Auslegung von thermischen Solaranlagen ist es wichtig, den solaren Energieertrag des Systems angeben zu können. Diese Ertragsabschätzung wird für Anwendungen mit größerem Energiebedarf als jenem von Einfamilienhäusern für die Brauchwarmwasserbereitung mit Hilfe von Simulationsprogrammen durchgeführt. Dabei können verschiedene Systemkonzepte sowie alle wesentlichen Randbedingungen der betrachteten Anlage detailliert eingegeben werden und so realitätsnahe Angaben über die Energiemenge, die von der Solaranlage im Laufe eines Jahres in das System eingebracht wird, gemacht werden. Ein weiterer wichtiger Eingabeparameter ist die Klimasituation des jeweiligen Ortes, an dem die Solaranlage eingesetzt wird. Wetterdatenbanken bzw. Programme zur Generierung von Wetterdatensätzen liefern hier Daten, welche die durchschnittliche Wittersituation im Jahresverlauf (solare Einstrahlung, Außentemperatur und relative Luftfeuchtigkeit) für die Simulation ausreichend genau darstellen.

Die Anwendung der solaren Prozesswärmeerzeugung wird bisher von den Solarsimulationsprogrammen nicht unterstützt. Die am häufigsten eingesetzten Programme wurden daher auf ihre Eignung für die Simulation von solar unterstützten Produktionsprozessen geprüft. Weiters wurde der mögliche Datenaustausch in Form der Eingabe von Wärmebedarfsprofilen und der Ausgabe der Ergebnisse für die Weiterverarbeitung mit Batch-Pinch-Berechnungsprogrammen ermittelt und dokumentiert.

Zum einen wurden mögliche Programme zur Generierung von Wetterdatensätzen bzw. Wetterdatenbanken identifiziert und zum anderen wurden Programme zur Simulation von solaren Prozesswärmeversorgungsanlagen ausgewählt und deren Eignung sowie der möglichen Datenaustausch mit Batch-Pinch-Berechnungsprogrammen geprüft. Als Ergebnis wurden Wetterdatenbanken für Österreich bzw. geeignete Solarsimulationsprogramme für die weitere Arbeit im Projekt vorgeschlagen.

Weiters wurden die Möglichkeiten des Datenexportes aus Wetterdatengenerationsprogrammen bzw. Wetterdatenbanken analysiert. Es wurden dabei die in der Solartechnik üblichen Programme und Datenquellen untersucht und schließlich Vorschläge für den Datenaustausch mit den identifizierten Programmen zur Simulation von thermischen Solaranlagen gemacht.

Dazu wurden die möglichen Ausgabedaten der Wetterdatengeneratoren sowie mögliche Ausgabeformate (Dateiformat bzw. spezielle Formate für Solarsimulationsprogramme) dargestellt.

Es wurden die am häufigsten verwendeten Solarsimulationsprogramme in einem ersten Schritt auf ihre Anwendbarkeit für die Simulation von solarer Prozesswärme hin überprüft. Dies war notwendig, da die derzeit am Markt erhältlichen Programme nur für die Simulation von thermischen Solaranlagen zur Brauchwarmwassererwärmung und Raumheizungsunterstützung entwickelt wurden.

Für die speziellen Anwendungsfälle der solaren Prozesswärmeerzeugung wurde ein Anforderungsprofil an Solarsimulationsprogramme erstellt, welches aus den Fallstudien des Endberichts PROMISE – Produzieren mit Sonnenenergie (Müller et al. 2004) abgeleitet wurde. Die im Profil enthaltenen Anforderungen wurden für jedes der untersuchten Solarsimulationsprogramme überprüft. Im nächsten Schritt wurden die Simulationsprogramme für die Anwendung der solaren Prozesswärmeerzeugung durch ein konkretes Fallbeispiel überprüft. Derselbe Wärmebedarf wurde dabei mit allen Programmen simuliert und die Ergebnisse verglichen. Die Unterschiede in der Art der Abbildung der Anlage, die Realisierbarkeit der Anwendung sowie die Möglichkeiten der Datenausgabe wurden danach miteinander verglichen.

Bei Wetterdaten kann zwischen Messdaten und generierten Daten unterschieden werden. In Folge werden in diesem Bericht unter Wetterdaten die solare Globalstrahlung bzw. Diffus- und Direktstrahlung, die Außentemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit verstanden. Aufgrund der jährlichen Schwankungen der Wettersituation an einem bestimmten Standort, ist es für die Angabe der Klimadaten üblich, durchschnittliche Werte über z.B. die letzten zehn Jahre anzugeben. Diese Durchschnittsdaten werden aus den einzelnen Werten einer Messstation ermittelt.

Im Folgenden wird zwischen Anbietern von Wetterdatensätzen und Wetterdatengeneratoren unterschieden. Die Generatoren von Wetterdatensätzen erlauben die Ableitung der Klimasi-

tuation an einem bestimmten Standort, definiert durch Breiten- und Längengrad, Seehöhe sowie Situierung (Tallage, Gebirgslage, usw.), aus den Durchschnittswerten der nächstgelegenen Messstation.

Die meisten der kommerziell und frei erhältlichen Programme zur Simulation von thermischen Solaranlagen sind für die Anwendungsgebiete der häuslichen Brauchwasserbereitung und Raumheizungsunterstützung entwickelt worden. Sämtliche Systemkonzepte, die in den Programmen wählbar sind, basieren ebenfalls auf diesen Anwendungen. Die Erzeugung von industrieller Prozesswärme stellt hier andere Anforderungen an die Systemtechnik und damit an die Programme, welche die Wärmeversorgung durch eine Solaranlage abbilden sollen.

Im Bericht werden drei kommerziell vertriebene und ein frei erhältliches Solarsimulationsprogramm kurz beschrieben. Diese Programme werden im deutschen Sprachraum häufig angewendet und stellen eine Vorauswahl dar, die auf die unten beschriebenen Anforderungen hin überprüft wurden.

Fallstudien

Wie bereits eingangs erwähnt, stellt Solarenergie in industriellen Anwendungen meist nur einen Teil der benötigten Energiemenge aufgrund von diversen externen Einflussfaktoren bereit. Wie und wo diese Energie dem Prozess zugeführt werden kann, erfordert weitaus mehr Planung als bei herkömmlichen Energieversorgungssystemen. Vor den Überlegungen zum Einsatz von Solarenergie sollen alle anderen energetisch, finanziell und organisatorisch sinnvollen Möglichkeiten zur internen Energierückgewinnung genutzt werden. Zur Analyse der vorhandenen Anlagen kann die Pinch-Methode eingesetzt werden.

Folgende Schritte, die im Bericht an Hand der drei Fallstudien näher beschrieben werden, sind bei der Analyse der optimalen Integration solarthermischer Anlagen in bestehende Wärmeversorgungssysteme zu unternehmen:

- Systematische Erfassung der Energieströme
- Berechnung des minimalen theoretischen Heiz- bzw. Kühlbedarf
- Ermittlung des Wärmebedarfs, der sinnvoll solarthermisch gedeckt werden kann
- Auslegung eines Wärmetauschernetzwerkes
- Auslegung einer solarthermischen Anlage
- Wirtschaftlichkeitsanalyse

Schlussfolgerung

Die Pinch-Methode erlaubt es, Aussagen über den theoretisch minimalen Energiebedarf für Kühlen und Heizen und die maximal möglich interne Wärmerückgewinnung zu treffen. Sie erlaubt auch Auskunft darüber, bei welchen Energieniveaus und in welcher Größe Kühlungs- und Heizenergie zur Verfügung gestellt werden müssen.

Die Integration von thermischer Solarenergie in industrielle Prozesse hat über den Pinch zu erfolgen. Die Pinch-Methode gibt Auskunft darüber, bei welchen Temperaturniveaus die Integration am sinnvollsten ist. Es hat sich bei den Berechnungen der Fallbeispiele herausgestellt, dass eine Entwicklung eines gemeinsamen Pinch- und Simulationsprogramms nicht notwendig ist. Vielmehr müssen sich weitere Forschungen auf die Weiterentwicklung des

Pinch-Programms für den Einsatz bei Niedrigtemperaturprozessen und die Verknüpfung mit zusätzlichen Funktionen (z.B. Kostenfunktionen) konzentrieren. Im Bereich der Solarsimulation ist die Programmierung eines für industrielle Anwendungen zugeschnittenen Tools für weitere Berechnungen notwendig.

Bei der Konstruktion des Wärmetauschernetzwerks für bestehende Anlagen wird man immer auf die existierenden Rohrleitungen, Lage von Gebäuden, bestehenden Anlagenteile etc. Rücksicht nehmen und aus den verbleibenden Varianten die betriebswirtschaftlich sinnvollste auswählen. Der theoretisch minimale Energiebedarf für Heizen und Kühlen wird daher in der Praxis nicht erreicht werden können.

Bei der Untersuchung der drei Fallbeispiele hat sich gezeigt, dass durch eine systematische Analyse des thermischen Energieverbrauchs in den meisten Fällen ein sehr hohes Einsparpotenzial vorhanden ist. Gekoppelt mit dem Einsatz von Solarenergie konnte für alle Firmen ein viel versprechendes Gesamtpaket erarbeitet werden.

Summary

In many developed countries, even in moderate climates, the use of solar energy in thermal plants offers a CO₂ free alternative to other energy supplies. From the domestic sector onwards, it is the next aim to approach industrial process heat as future market for solar collectors.

The aim of this project was the development of a method for optimized integration of solar heat in industrial/commercial processes which are run in batch operation:

- The development of a general method for the optimization of solar heat applications in batch processes
- The (further) development of a special method for optimization of heat integration, namely the Batch-Pinch calculation of production processes, that considers solar heat as non-continuous heat supply and
- The accomplishment of a feasibility study for the development of a computer tool „Solar-Batch-Pinch“ regarding the requirements of both different areas process- and solar simulation and Pinch methodology.

Additionally it should be clear at the end of the project whether a tool “Solar-Batch-Pinch“ constitutes an own programme by itself, or whether it functions as a missing link between Pinch programmes and process and solar simulation.

Heat integration

Almost all industrial processes require heat. In most cases this heat is supplied by steam or hot water. Through the combustion of fossil energy sources (oil, gas) in heating or steam boilers the energy saved in chemical compounds is transferred to the water which is especially suitable for heat transfers due to its high heat capacity. These systems supply energy at a high temperature level. These temperatures are generally notably higher than those actually required in the process, to enable a large temperature difference and therefore small heat exchanger areas. In many cases the supply temperature is around 150°C to 180°C, whereas in many processes temperatures below 100 °C are needed.

In the temperature range below 100 °C heat can be supplied efficiently by plate collectors with respective solar radiation. In industrial applications however, solar energy will in most cases only be able to supply one part of the necessary energy demand due to several external factors, and the question how and when this energy can be integrated into the process takes by far more consideration and planning than with conventional heat supply systems.

One part of the difficulty of solar energy supply systems poses the daily and seasonally varying supply. But many industrial systems as well work non continuous. Therefore it is generally necessary to include these non continuous processes, batch processes so-to-speak, in considerations about solar energy supply.

A possible and successful method to investigate the heating and cooling demand of industrial processes is the Pinch methodology (Linnhoff et al, 1982). This method enables an optimization of heat exchanger networks.

The calculations necessary for the optimization are partly very complex. There are some commercial and non-commercial computer programs available that can assist with the design of solar systems or with the optimization of heat exchanger networks respectively. The extent, to which these programmes are able to respond to the specific problems of heat supply in industrial processes, is matter of this investigation.

The programme HINT enables an input of hot and cold streams. Based on the stream data the composite curves and the energy cascade can be established and graphically displayed. In the net diagram only the streams and the Pinch area are marked at first. According to the design rules of the Pinch theory heat exchanger can then be added to this net diagram. The basis for the heat exchanger specifications forms a database of different construction types and materials.

The programme gives support by questioning between which streams, based on the thermodynamic data for the heat exchangers, heat can principally be transferred. For the heat exchangers some given values exist that can be supplemented by own specifications. For hot and cold supporting energy streams cost functions can be added.

In that matter, the programme HINT assumes that only one hot and respectively one cold supporting energy source exists. Specific supporting energy sources, such as a collector field, have to be defined as an additional stream. Other than that the user himself is responsible for the decision which heat exchanger network is established. Stream separations and heat exchangers across the Pinch can be inputted. As with many streams several almost ideal networks exist, the design work is very time consuming. However, the user also has the freedom to exclude heat exchangers that are not possible due to predetermined factors (location, hygiene requirements etc.).

Supertarget is the professional Pinch programme of Linnhof March. This programme allows calculations of the Pinch over single columns, single processes and plants as a whole. The input of cold and hot streams is possible similarly to HINT, but additionally stream data can be acquired from known heat exchanger data. Moreover the adoption of stream data out of external construction design programmes is possible. Based on the stream data again the composite curves and the energy cascade is determined and graphically displayed. The net diagram at first only shows the streams and the Pinch range. According to the design rules of the Pinch theory this programme now automatically establishes several networks, in which also heat exchangers over the Pinch are included in case the overall results still poses an energetically favourable alternative. Basis for these calculations forms either a priory saved alternative or the situation without any heat recovery.

Prior to thinking of an application of solar heat in a company, a few other aspects should be cleared to find the ideal solution for the process under consideration:

- New development of a plant or renovation of an existing plant: Generally a new building always poses more possibilities for the engineer and an ideal positioning of the specific plants and processes can be considered already in the design. In case of a reconstruction of existing plants it can happen that the actual ideal heat exchanger network or solar plant can not be realised due to constructive, organisational or financial reasons. The determined alternatives for the solution then have to be adapted to the given situation.

- Consideration of a single process or the plant as a whole: It has to be defined a priori whether only specific processes or all processes of the company should be investigated.
- Other companies: It has to be discussed whether neighbouring companies could either supply heat or require heat, and if yes in which temperature range they do so.
- Other energy sources: Besides the use of solar energy plants other alternative energy sources might pose a sensible option for some companies (e.g. heating with wood chips in case of available wooden waste etc.).
- Energy efficiency measures: Before the consideration of applications of solar energy, other energetically, financial and organisational sensible possibilities for internal energy recovery should be utilized. For the analysis of these existing plants the Pinch method can as well be applied.
- Reorganisation of the processes: Change and conversion to energy saving processes or even a change in the production in that regard, that more processes fall into a temperature range suitable for solar energy.
- Reorganisation: In some cases already a reorganisation of the process flow / sequence of operations can lead to savings, e.g. energy intensive processes do not occur at the same time to reduce the maximum energy demand etc.
- Objective: When planning the internal heat integration for a company there are three aspects according to which the optimization can be approached:
 - Least investment costs
 - Least operation costs
 - Maximum energy savings

Solar simulation

When designing thermal solar plants it is important to be able to state the solar energy yield of the system. This yield assessment for applications larger than warm water supply in one-family-households is done with the help of simulation programmes. Here, different system concepts as well as all relevant frame conditions of the considered plant can be inputted in detail and in that way a realistic statement of the energy amount that can be introduced to the system in the course of one year can be derived. Another important input parameter is the climatic situation of the specific geographical location, at which the solar system is installed. Weather data bases or programmes for the generation of weather data sets can deliver data that demonstrate the average weather situation in the annual course (solar radiation, outdoor temperatures and relative humidity) precisely enough for the simulation.

The application of solar process heat generation is so far not supported by the solar simulation programmes. The most commonly used programmes have therefore been tested on their suitability for the simulation of solar supported production processes. Additionally the possible data transfer in form of input of heat demand profiles and output of results for the post processing with Batch-Pinch calculation programmes has been determined and documented.

On the one hand possible programmes for the generation of weather data sets, weather data bases respectively, have been identified and on the other hand programmes for the simula-

tion of solar process heat supply systems chosen and their suitability as well as the possible data transfer with Batch-Pinch programmes tested. As a result weather data bases for Austria and suitable solar simulation programmes have been proposed for the further project work.

Moreover the possibilities of data export from weather data generation programmes and weather databases have been analysed. In doing so the commonly used programmes in solar engineering have been investigated and finally proposals been made for the data transfer with the identified programmes for the simulation of solar thermal plants.

For this purpose possible output data of the weather data generators as well as possible output formats (file format and specific formats for solar simulation programmes) have been demonstrated.

The most commonly used solar simulation programmes have in a first step been investigated on their applicability for the simulation of solar process heat. This was necessary, as the currently commercially available programmes have only been developed for the simulation of solar plants for warm water supply and support in room heating.

For the specific applications of solar process heat generation a profile of requirement specifications for solar simulation programmes has been established, which has been derived from the case studies of the final report PROMISE – Producing with solar energy (Müller et al. 2004). The requirements in this profile have been tested for each of the investigated solar simulation programmes. In a next step the solar simulation programmes have been tested on the suitability for solar process heat generation by a concrete case study. The same heat demand has been simulated with all programmes and the results were compared. The differences in illustration of the plant, in the feasibility of the applications as well as the different possibilities of the data output have then been compared.

Concerning weather data it can be differed between measured data and generated data. In this report weather data is understood as solar global radiation and diffuse- and direct radiation respectively, the outdoor temperature and the relative humidity. Due to the annual variations of the weather situation at a specific location, it is common in stating climate data to specify the average values over e.g. the last ten years. These average data are established from the single values of one weather station.

In the following a distinction is being made between suppliers of weather data sets and weather data generators. The generators of weather data sets allow the derivation of the climatic situation of a specific location, defined by degree of latitude, degree of longitude, altitude as well as setting (situated in valleys or on mountains) out of average values of the closest neighboured measuring station.

Most of the commercial and free available programmes have been developed for the applications of domestic warm water supply and support in room heating. All system concepts that can be chosen in the programmes are as well based on these applications. The generation of industrial process heat poses here other requirements to the system engineering and in that way as well to the programmes that should illustrate the heat supply by a solar plant.

In the report three commercially distributed and one free available solar simulation programme are shortly described. These programmes are often applied in the German-speaking part and form a pre-selection that has been tested on the above described requirements.

Case studies

As mentioned above, in industrial applications solar energy supplies only one part of the necessary heat demand due to several external factors and its integration requires by far more consideration than conventional heat supply systems. Prior to investigations about the integration of solar energy all other energetically, financially and organisationally sensible possibilities should be utilized. For the analysis of the existing processes the Pinch method can be applied.

The following steps, which are described in further detail in the report in the discussion of the three case studies, have to be taken to analyse the ideal integration of solar thermal plants into existing heat supply systems:

- Systematic compilation of energy streams
- Calculation of the minimal theoretical heat and cooling demand
- Determination of the heat demand, that can be efficiently supplied by solar thermal heat
- Design of a heat exchanger network
- Design of the solar thermal plant
- Economical evaluation

Conclusions

The Pinch method enables statements of the theoretical minimal energy demand for heating and cooling and the maximal possible internal heat recovery. It also gives information at which energy levels and to what extent energy for cooling and heating has to be supplied.

The integration of solar thermal energy in industrial processes has to be done across the Pinch. The Pinch method here provides information at which temperature ranges the integration is most efficient. From the case studies of this project followed that a development of a common Pinch- and simulation programme is not necessary. In fact further research has to focus rather on the further development of the Pinch programme for the application at low temperature processes and the link to additional functions (e.g. cost functions). In the area of solar simulation the programming of a tool designed for industrial applications is necessary for further calculations.

In the design of the heat exchanger network for existing plants the user will always consider present pipelines, the positioning of buildings, existing plant components etc. and will have to choose the economical best option out of the remaining alternatives. The theoretical minimal demand for heating and cooling will therefore not be able to be reached in practical applications.

The investigation of the three case studies showed that by a systematic analysis of the thermal heat demand in most cases a high savings potential can be identified. Combined with the integration of solar energy a promising alternative proposal could be elaborated for all companies.

1 Einleitung

Einer der großen Effekte menschlichen Handelns auf die Zukunftsfähigkeit ist die globale Erwärmung, verursacht durch klimarelevante Gasemissionen. Der Großteil dieser Gase kommt aus Verbrennungsprozessen, an welchen die industriellen Produktionen wiederum einen großen Anteil haben. Hier kann eine signifikante Veränderung nur durch eine Umstellung auf erneuerbare Energieträger erfolgen, die aber simultan mit einer Erhöhung der Energieeffizienz umgesetzt werden muss.

In vielen Industrieländern, auch in moderaten Klimazonen, bietet sich die Nutzung der Sonnenenergie in thermischen Anlagen als CO₂-freie Alternative an. Nach dem Bereich der Wärme für den Wohnbereich geht es nunmehr darum, die industrielle und gewerbliche Prozesswärme als nächsten hoffnungsträchtigen Markt für Solarkollektoren zu eröffnen.

Grundlage für dieses Projekt war das durch die Programmlinie „Fabrik der Zukunft“ finanzierte Projekt PROMISE (Produzieren mit Sonnenenergie), in dem für zahlreiche Prozesse und Branchen der Sachgüterproduktion ein Potenzial für solare Prozesswärme ausgewiesen wurde.

In Österreich betrug 2000 der industrielle Energieeinsatz 205 PJ und war damit für 21% des nationalen Endenergieeinsatzes von 965 PJ verantwortlich. [Energieverwertungsagentur, 2004]. Charakteristisch für den Energieverbrauch der produzierenden Industrie in Österreich ist eine Abnahme des Verbrauchs an Wärme bei einem gleichzeitigen Anstieg des Stromverbrauchs. Die Gründe hierfür sind vielfältig und liegen sowohl in einer Umstrukturierung der Industrie weg von der Grundstoffindustrie als auch in der Entwicklung energieeffizienterer Verfahren. Der derzeitige Verbrauch von knapp 200 PJ an fossilen Energieträgern stellt aber unter allen Umständen ein interessantes Marktpotenzial für Solaranlagen dar.

Die konkrete Größe dieses Zukunftsmarktes für Solarwärme wurde für Österreich von einer Arbeitsgemeinschaft von AEE INTEC in Gleisdorf und JOANNEUM RESEARCH Graz im Rahmen eines Projektes innerhalb der Technologieinitiative „Fabrik der Zukunft“ des BMVIT erhoben (PROMISE – Produzieren mit Solarenergie). Die Arbeiten wurden Ende 2003 abgeschlossen und zeigen ein großes Potenzial für Hersteller von Solaranlagen. Österreich ist ein Vorbildland bezüglich der Anwendung von Solarenergie im Wohnbau. Nach anfänglichen Erfolgen im Bereich der Warmwasserbereitung erfolgte in den letzten Jahren die Ausweitung auf den Raumwärmebereich (solare Kombianlagen für Warmwasser und Heizung), den Bereich der Mehrfamilienhäuser und auf Großanlagen, wie z.B. Fernwärmeeinbindungen in Graz.

Eine Folge dieser Entwicklung sind deutlich gesunkene Systemkosten und damit verbunden die Öffnung eines großen Marktpotenzials. Mehrere Firmen in Österreich sind heute international mit der Planung und dem Verkauf von Solaranlagen erfolgreich. Darüber hinaus ist die Errichtung von Solaranlagen eine wichtige wirtschaftliche Grundlage für Installateure.

Ziel dieses Projekts war die Entwicklung einer Methode zur optimierten Integration von Solarwärme in industrielle/gewerbliche Produktionsprozesse, die chargenweise gefahren werden.

Für die Auslegung eines optimierten Wärmetauschernetzwerks bietet sich die „Pinch-Methode“ an, die auf einen diskontinuierlichen Verbrauch ausgeweitet werden soll. Bei der

solaren Energieversorgung ist auf eine diskontinuierliche Versorgung (Tagesverlauf, Jahreszeiten) Rücksicht zu nehmen. Viele Prozesse in einem Produktionsbetrieb verlaufen ebenfalls diskontinuierlich. Bei diskontinuierlichen Vorgängen muss meist ein Pufferspeicher vorgesehen werden, der den unterschiedlichen Zeitverlauf von Erzeugung und Verbrauch ausgleicht. Ein solcher Wärmepuffer kann auch die Nutzungsdauer der mittels Solarenergie erzeugten Wärme über die Sonnenscheindauer hinaus verlängern. Die Solarenergie könnte theoretisch in Österreich kurzfristig 3,3 PJ und mittelfristig 5,4 PJ Prozesswärme ersetzen [Müller et al., 2003] und ist mit einem unmittelbaren Potenzial von ca. 2,6 Mio. m² bzw. 4,3 Mio. m² Kollektorfläche sicherlich ein wesentlicher zukünftiger Markt für die Solarthermik¹ (zum Vergleich: in Österreich sind Ende 2003 2,7 Mio. m² im Bereich Warmwasser und Raumheizung installiert [Faninger 2004]).

¹ Das „Office of Energy Efficiency and Renewable Energy“ des U.S. Department of Energy spricht von einem theoretischen Potenzial von 50 % des konventionellen Energieeinsatzes [EERE, undated]

2 Ziele des Projekts

Zu Beginn des Projekts wurden folgende Ziele, vor allem basierend auf den Ergebnissen, Erfahrungen und identifizierten Bedürfnissen aus dem FdZ-Projekt PROMISE formuliert:

- die Entwicklung einer allgemeinen Methodik zur Optimierung des Solarenergieeinsatzes in Batch-Prozessen,
- die (Weiter-)Entwicklung einer speziellen Methodik der Optimierung der Wärmeintegration, nämlich der **Batch-Pinch-Berechnung** von Produktionsprozessen, die **Solarthermie** als nicht kontinuierliche Energieversorgung berücksichtigt, und
- die Durchführung einer Machbarkeitsanalyse zur Entwicklung eines EDV-Werkzeugs „**Solar-Batch-Pinch**“ aufgrund der Anforderungen aus den unterschiedlichen Bereichen Prozess- und Solarsimulation und Pinch-Methodik.

Außerdem sollte am Ende des Projekts geklärt sein, ob ein Tool „Solar-Batch-Pinch“ ein eigenständiges Programm oder Werkzeug ist, oder ob es die Funktion eines „Missing Link“ zwischen Pinch-Programmen und Prozess- und Solarsimulationen übernimmt.

Während der ersten Phase des Projekts und den ersten Berechnungen der Fallbeispiele mussten einige Ziele aufgrund der gewonnenen Erfahrungen adaptiert werden. Es stellte sich heraus, dass die Erweiterung der Pinch-Methode auf eine Batch-Pinch-Methode in den meisten Fällen und vor allem in den drei Casestudies nicht zwingend notwendig war. Aufgrund der Größe der Betriebe und deren Produktivität konnte der Energiebedarf über die Produktionszeit als konstant angenommen werden. Die Batch-Weise Verfügbarkeit der Sonnenenergie spielte ebenfalls keine Rolle in den Pinch-Betrachtungen, da die Solarenergie nicht direkt in das System eingespeist wurde, sondern immer in einen Speichertank. Dies führte bald zur Modifizierung des ersten Ansatzes eines gemeinsamen EDV-Werkzeugs „Solar-Batch-Pinch-Analyse“. Vielmehr stellte sich heraus, dass beide Programme völlig eigenständige Werkzeuge sind und nur der Benutzer aufgrund der Kenntnisse im Bereich Pinch-Analyse und Solarintegration das „Missing Link“ darstellt.

Folgende Unterziele wurden weiters verfolgt:

- Recherche bezüglich Stand der Forschung auf dem Gebiet Batch-Pinch
- Anforderungskatalog für Pinch-Methoden
- Aufarbeitung der Primärdaten zur solaren Einstrahlung
- Neue Möglichkeiten der Wärmespeicherung für das Einsatzgebiet Solarthermie
- Datentransfer zwischen bestehenden Programmen zur Solaranlagenauslegung und zur Prozesssimulation (z.B. Transys)
- Erhebung von „echten“ Prozessdaten in geeigneten Branchen und Betrieben
- Untersuchung kommerzieller Pinch-Programme auf Ihre Brauchbarkeit für Pinch-Berechnungen für solare Energieversorgung für Betriebe in Österreich

3 Inhalte und Ergebnisse des Projekts

3.1 Methoden und Daten

Fast alle industriellen Prozesse benötigen Wärmeenergie. In den meisten Fällen wird diese Wärmeenergie mittels Dampf oder Heißwasser zugeführt. Durch Verbrennung fossiler Energieträger (Öl, Gas) in Heiz- bzw. Dampfkesseln wird die in den chemischen Verbindungen gespeicherte Energie an das durch seine hohe Wärmekapazität zur Wärmeübertragung besonders geeignete Wasser abgegeben. Diese Systeme stellen Energie auf einem hohen Temperaturniveau zur Verfügung. Diese Temperaturen sind im Allgemeinen deutlich höher als die eigentlich im Prozess benötigten, um so eine hohe Temperaturdifferenz und damit kleine Wärmetauscherflächen zu ermöglichen. Oft liegt die Versorgungstemperatur bei 150°C bis 180°C, während in vielen Prozessen Temperaturen unter 100°C benötigt werden.

Im Temperaturbereich unter 100°C kann Wärmeenergie durch Flachkollektoren bei entsprechender Sonneneinstrahlung ausreichend bereitgestellt werden. In industriellen Anwendungen wird jedoch die Solarenergie aufgrund von diversen externen Einflussfaktoren meist nur einen Teil der benötigten Energiemenge bereitstellen können. Wie und wo diese Energie dem Prozess zugeführt werden kann, erfordert weitaus mehr Planung als bei herkömmlichen Energieversorgungssystemen. Die Integration von solarer thermischer Energie in industrielle Prozesse ist also eine Herausforderung sowohl für den Solarexperten als auch für den Prozessingenieur.

Einen Teil der Problematik solarer Energieversorgungssysteme stellt die tages- und jahreszeitlich schwankende Versorgung dar. Doch auch viele industrielle Prozesse arbeiten nicht kontinuierlich. Daher müssen generell bei Überlegungen zur solaren Energieversorgung diese nicht kontinuierlichen Vorgänge, Batch-Prozesse genannt, berücksichtigt werden.

Eine mögliche und erfolgreiche Methode zur Untersuchung des Wärme- und Kühlbedarfs von industriellen Prozessen stellt die Pinch-Methode dar (Linnhoff et al, 1982). Diese Methode erlaubt die Optimierung von Wärmetauschernetzwerken.

Die zur Optimierung nötigen Berechnungen sind teilweise sehr aufwändig. Es gibt auf dem Markt einige kommerzielle und nicht kommerzielle Computerprogramme, die bei der Auslegung von Solaranlagen bzw. bei der Optimierung von Wärmetauschernetzwerken helfen können. Inwieweit diese Programme in der Lage sind, auf die spezifischen Probleme der Energieversorgung von industriellen Prozessen mit thermischer solarer Energie einzugehen, ist Gegenstand dieser Untersuchung.

Bei der Auslegung von thermischen Solaranlagen ist es wichtig, den solaren Energieertrag des Systems angeben zu können. Diese Ertragsabschätzung wird für Anwendungen mit größerem Energiebedarf als jenem von Einfamilienhäusern für die Brauchwarmwasserbereitung mit Hilfe von Simulationsprogrammen durchgeführt. Dabei können verschiedene Systemkonzepte sowie alle wesentlichen Randbedingungen der betrachteten Anlage detailliert eingegeben werden und so realitätsnahe Angaben über die Energiemenge, die von der Solaranlage im Laufe eines Jahres in das System eingebracht wird, gemacht werden. Ein weiterer wichtiger Eingabeparameter ist die Klimasituation des jeweiligen Ortes, an dem die Solaranlage eingesetzt wird. Wetterdatenbanken bzw. Programme zur Generierung von Wetterdatensätzen liefern hier Daten, welche die durchschnittliche Wettersituation im Jah-

resverlauf (solare Einstrahlung, Außentemperatur und relative Luftfeuchtigkeit) für die Simulation ausreichend genau darstellen.

Die Anwendung der solaren Prozesswärmeerzeugung wird bisher von den Solarsimulationsprogrammen nicht unterstützt. Die am häufigsten eingesetzten Programme wurden daher auf ihre Eignung für die Simulation von solar unterstützten Produktionsprozessen geprüft. Weiters wurde der mögliche Datenaustausch in Form der Eingabe von Wärmebedarfsprofilen und der Ausgabe der Ergebnisse für die Weiterverarbeitung mit Batch-Pinch-Berechnungsprogrammen ermittelt und dokumentiert.

Daher ergaben sich zwei Ziele. Zum einen wurden mögliche Programme zur Generierung von Wetterdatensätzen bzw. Wetterdatenbanken identifiziert und zum anderen wurden Programme zur Simulation von solaren Prozesswärmeversorgungsanlagen ausgewählt und deren Eignung sowie der mögliche Datenaustausch mit Batch-Pinch-Berechnungsprogrammen geprüft. Als Ergebnis wurden Wetterdatenbanken für Österreich bzw. geeignete Solarsimulationsprogramme für die weitere Arbeit im Projekt vorgeschlagen.

Weiters wurden die Möglichkeiten des Datenexportes aus Wetterdatengenerationsprogrammen bzw. Wetterdatenbanken analysiert. Es wurden dabei die in der Solartechnik üblichen Programme und Datenquellen untersucht und schließlich Vorschläge für den Datenaustausch mit den in Kapitel 4.3 identifizierten Programmen zur Simulation von thermischen Solaranlagen gemacht.

Dazu wurden die möglichen Ausgabedaten der Wetterdatengeneratoren sowie mögliche Ausgabeformate (Dateiformat bzw. spezielle Formate für Solarsimulationsprogramme) dargestellt.

Es wurden die am häufigsten verwendeten Solarsimulationsprogramme in einem ersten Schritt auf ihre Anwendbarkeit für die Simulation von solarer Prozesswärme hin überprüft. Dies war notwendig, da die derzeit am Markt erhältlichen Programme nur für die Simulation von thermischen Solaranlagen zur Brauchwarmwassererwärmung und Raumheizungsunterstützung entwickelt wurden.

Für die speziellen Anwendungsfälle der solaren Prozesswärmeerzeugung wurde ein Anforderungsprofil an Solarsimulationsprogramme erstellt, welches aus den Fallstudien des Endberichts PROMISE – Produzieren mit Sonnenenergie (Müller et al. 2004) abgeleitet wurde. Die im Profil enthaltenen Anforderungen wurden für jedes der untersuchten Solarsimulationsprogramme überprüft. Im nächsten Schritt wurden die Simulationsprogramme für die Anwendung der solaren Prozesswärmeerzeugung durch ein konkretes Fallbeispiel überprüft. Derselbe Wärmebedarf wurde dabei mit allen Programmen simuliert und die Ergebnisse verglichen. Die Unterschiede in der Art der Abbildung der Anlage, die Realisierbarkeit der Anwendung sowie die Möglichkeiten der Datenausgabe wurden danach miteinander verglichen.

Ein weiterer Teil des Profils besteht aus den Anforderungen hinsichtlich des Datenexports der Ergebnisse, die als Eingabedaten für die in Kapitel 4.3 identifizierten bzw. zu entwickelnden Programme zur Berechnung des Batch-Pinch-Punkts dienen sollen.

3.2 Wärmeintegration mit Schwerpunkt Batch-Pinch-Methoden und - Programme

Bei der Betrachtung der Wärmeintegration in industriellen Prozessen ist einerseits das benötigte Temperaturniveau der Prozesse zu berücksichtigen, andererseits das zeitliche Bedarfsprofil der Wärmebereitstellung.

Diese Problematik solarer Energieversorgungssysteme stellt die tages- und jahreszeitlich schwankende Versorgung der Solarenergie und die Kopplung an nicht kontinuierliche industrielle Prozesse dar. Daher ist besonders die Betrachtung von Batch-Pinch-Methoden und - Programmen bei der Wärmeintegration solarer Prozesswärme interessant.

3.2.1 Stand der Technik – Pinch-Analyse

Die thermische Solarenergie steht im Wettbewerb mit anderen Maßnahmen zur Effizienzsteigerung, angefangen von der einfachen Isolierung der Rohrleitungen und Prozessbecken bis zu einem völligen Neudesign der Anlage. Doch auch bei den Alternativen ist für eine effektive Nutzung eine genaue Analyse der Prozesse in wärmetechnischer Hinsicht notwendig. Eine mögliche und erfolgreiche Methode zur Untersuchung des Wärme- und Kühlbedarfs von industriellen Prozessen stellt die Pinch-Methode dar (Linnhoff, Hindmarsh, 1983). Diese Methode erlaubt eine Aussage über die theoretisch maximal mögliche interne Wärmerückgewinnung, und bei welchen Temperaturen eine zusätzliche Energiequelle, wie etwa thermische Solarenergie, sinnvoll in den Prozess integriert werden kann. Im Folgenden soll nun diese Methode genauer beschrieben werden.

3.2.1.1 Ein kurzer Abriss der Pinch-Analyse

Der Wärmebedarf eines kontinuierlichen Prozesses lässt sich durch die Temperatur (T in °C) der ein- und abgehenden Wärmeströme sowie durch die Größe der Wärmeströme (in kJ/s bzw. kW) charakterisieren.

$$\dot{Q} = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (\text{kW})$$

m	Masse (kg)
c_p	spezifische Wärmekapazität (kJ/(kg K))
ΔT	Temperaturdifferenz (K)

Sind diese Ströme in irgendeiner Form fass- und messbar, z.B. Flüssigkeitsströme in Rohren oder Abluft in Abgaskanälen und Kaminen, so können diese Ströme prinzipiell für eine Pinch-Analyse herangezogen werden. Im folgenden Beispiel werden Wasserströme betrachtet.

Thermodynamische Addition von einzelnen Strömen

Zur Erläuterung: für die Versorgung eines Prozesses sind zwei Wasserströme notwendig. Der erste (a) in Abbildung 1) hat eine Größe von 615 kg pro Stunde und muss von 73°C auf 80°C erwärmt werden, im zweiten (b) werden 47,8 kg Wasser pro Stunde von 20°C auf 110°C erhitzt.

- a) $\Delta H_1 = m_1 c_p \Delta T_1 = 18 \text{ MJ/h} = 5 \text{ kW}$
- b) $\Delta H_2 = m_2 c_p \Delta T_1 = 18 \text{ MJ/h} = 5 \text{ kW}$

Während die Temperaturskala absolut ist, ist die Energieskala relativ. Dies bedeutet, dass die beiden Kurven a) und b) horizontal auf der x-Achse (Energie) verschoben werden können, nicht aber auf der y-Achse (Temperatur). Addiert man nun diese beiden Kurven unter diesen Randbedingungen, so erhält man die Kurve c). Im ersten und dritten Abschnitt der Kurve c) ist die Änderung der Energie nur durch die Kurve b) gegeben, im mittleren Abschnitt durch die Addition der Energieänderungen der Kurven a) und b) in diesem Temperaturbereich.

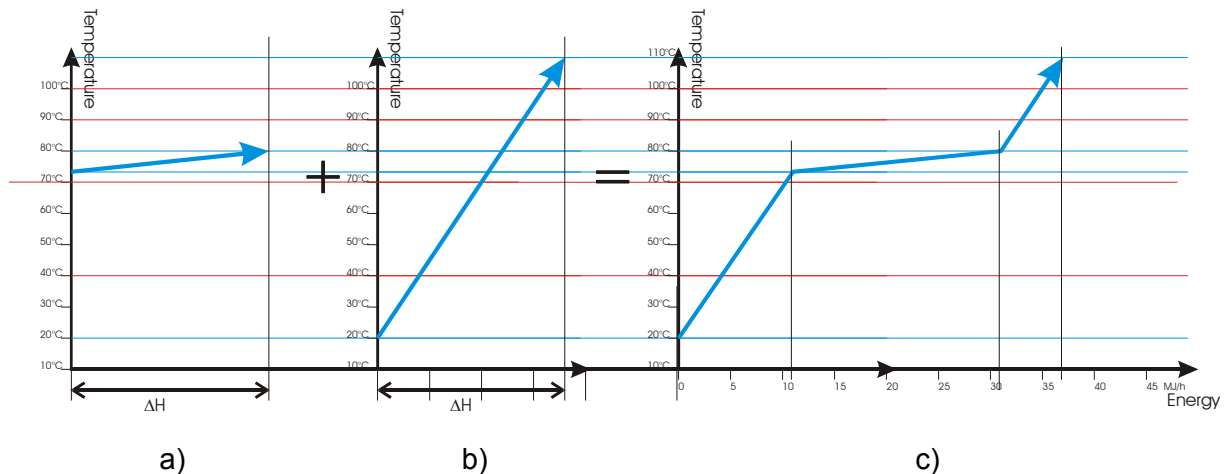


Abbildung 1: Addition der Kurven a) und b) zur Kompositkurve c)

Die Kompositkurven

Analog zu den kalten Strömen, also den Strömen, die aufgeheizt werden müssen, kann man auch die heißen, zu kühlenden Ströme nach derselben Methode addieren. Stellt man die beiden so erhaltenen Kompositkurven in einem Diagramm zusammen dar, so erhält man Abbildung 2. Dabei ist darauf zu achten, dass die heißen Ströme möglichst auf der ganzen Länge der Kompositkurven über den kalten Strömen zu liegen kommen. Aus dieser Kurve lassen sich einige wichtige grundlegende Aussagen für den Gesamtprozess ablesen.

Die Stelle, an der sich die beiden Kompositkurven am nächsten kommen, ist der Pinch-Punkt. Dieser stellt den thermodynamischen Flaschenhals des Systems dar. Die Lage dieses Punktes ist verschiebbar, da, wie oben beschrieben, die Kurven entlang der Energie-Achse verschiebbar sind. Durch dieses Verschieben ergeben sich verschiedene obere und untere Pinch-Temperaturen. Die Temperaturdifferenz ΔT_{\min} zwischen der oberen und der unteren Pinch-Temperatur wird nach der Pinch-Methode meist durch Optimierungen auf eine optimale Wirtschaftlichkeit festgelegt, es kann aber auch z.B. auf die geringste Wärmetauscherfläche optimiert werden. Die Differenz zwischen oberer und unterer Pinch-Temperatur entspricht der Temperaturdifferenz in den Wärmetauschern. Je nach Anwendung haben sich in der Praxis die folgenden Temperaturdifferenzen bewährt (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Erfahrungswerte für die Differenz ΔT_{min} zwischen oberer und unterer Pinch-Temperatur (Linnhoff March, 1998)

Anwendung	Erfahrungswerte ΔT_{min}
Öl-Raffinerien	20–40 °C
Petrochemie	10–20 °C
Chemische Industrie	10–20 °C
Niedertemperaturprozesse	3–5 °C

Eine weitere wichtige Aussage, die aus dem Diagramm in Abbildung 2 gewonnen werden kann, ist die Energiemenge, die prinzipiell intern zwischen warmen und kalten Strömen ausgetauscht werden kann. Dies ist der Bereich, in dem sich die beiden Kurven überlappen. Der Überhang der heißen Kurve über die kalte Kurve im linken Bereich des Diagramms ergibt den minimalen Kühlbedarf, der Überhang der kalten Kurve den minimalen Heizbedarf des betrachteten Prozesses.

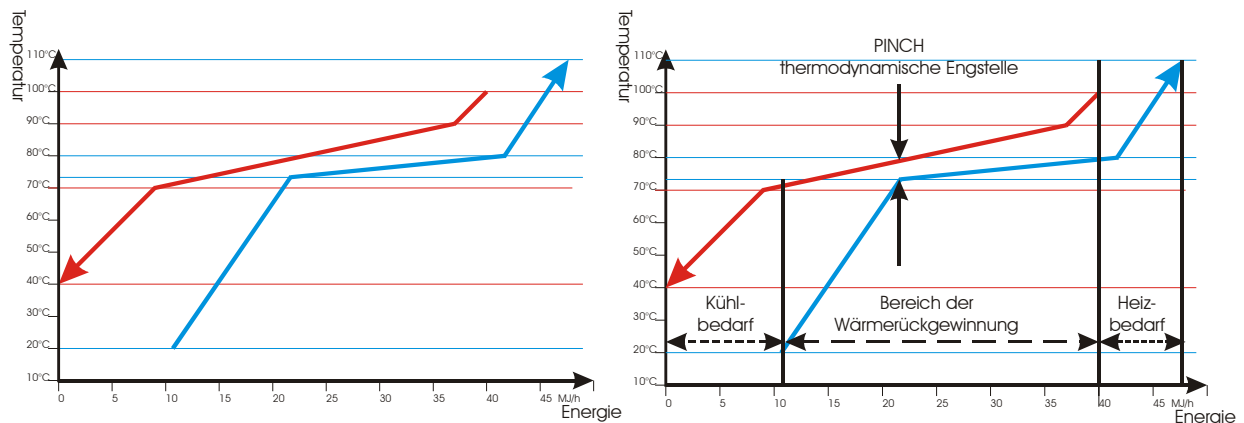


Abbildung 2: Kombination der kalten und heißen Kompositkurve zu einem Diagramm. Aus diesem Diagramm kann der minimale theoretische Kühlbedarf, der minimale theoretische Heizbedarf und die maximal für eine interne Wärmerückgewinnung zur Verfügung stehende Energiemenge abgelesen werden.

Für die Konstruktion eines optimierten Wärmetauschernetzwerkes nach der Pinch-Methode müssen drei elementare Regeln eingehalten werden, um die energetisch günstigste Lösung zu erhalten:

1. keine zusätzliche Kühlung oberhalb des Pinch
2. keine zusätzliche Heizung unterhalb des Pinch
3. kein Wärmetransfer über den Pinch

Wirtschaftliche Optimierungen

Wie schon vorher erwähnt, ist die genaue Lage des Pinch und damit die Differenz zwischen oberer und unterer Pinch-Temperatur nicht fix vorgegeben, sondern ergibt sich aus einer Optimierung nach folgenden Überlegungen.

Die zwischen kalten und heißen Strömen austauschbare Energiemenge hängt von den Flächen der Wärmetauscher ab und wird maximal bei unendlichen Wärmetauscherflächen entsprechend einer Temperaturdifferenz von 0°C . Hier ist dann auch die von außen zuzuführende Hilfsenergie für Kühlen und Heizen minimal. Dies ist natürlich in der Praxis nicht möglich, man wird also einen Kompromiss finden zwischen Wärmetauscherfläche (Investitionskosten) und der benötigten Heiz- bzw. Kühlleistung (Betriebskosten). Je größer die Wärmetauscher, desto geringer ist die Temperaturdifferenz ΔT_{\min} , desto größer die intern austauschbare Energiemenge und desto kleiner die benötigten Hilfsenergien für Kühlen und Heizen. Dies zeigt Abbildung 3.

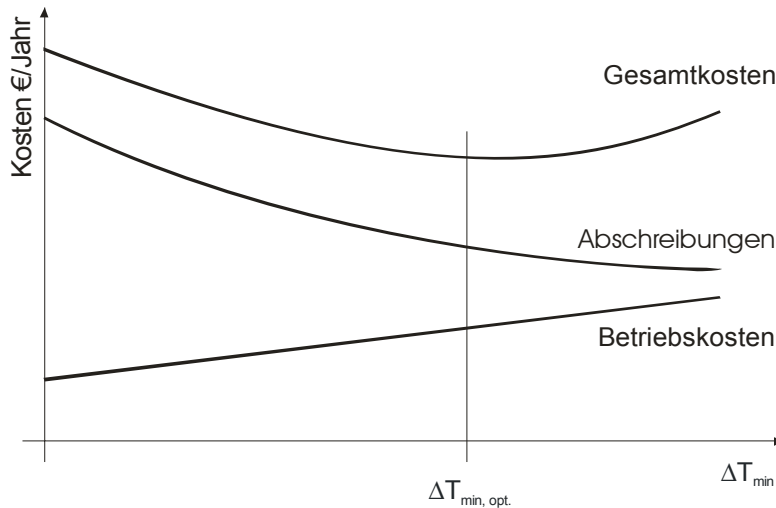


Abbildung 3: Abschreibung der Investitionskosten und Energiekosten erlauben die Bestimmung einer optimalen Temperaturdifferenz ΔT_{\min} .

Die „Grand composite curve“ GCC

Aus den Kompositkurven kann der minimale Heiz- und Kühlbedarf und die intern austauschbare Energiemenge ermittelt werden. Nicht immer muss allerdings der gesamte Heizbedarf am höchsten Temperaturniveau zur Verfügung gestellt werden. Auch in welchen Temperaturbereichen der interne Wärmeaustausch erfolgen kann, ist aus Abbildung 2 nicht unmittelbar ersichtlich. Aus diesem Grund wurde ein weiteres grafisches Werkzeug entwickelt, die „Grand Composite Curve (GCC)“. Diese erhält man grafisch, indem man die kalte Kompositkurve um $\frac{1}{2} \Delta T_{\min}$ nach oben, die heiße um $\frac{1}{2} \Delta T_{\min}$ nach unten verschiebt (siehe Abbildung 4 a)). Sodann werden Punkt für Punkt entlang der Energieachse die heiße von der kalten Kurve subtrahiert und der so erhaltene Wert in einem Diagramm (Abbildung 4 b)) aufgetragen. Das ist die GCC.

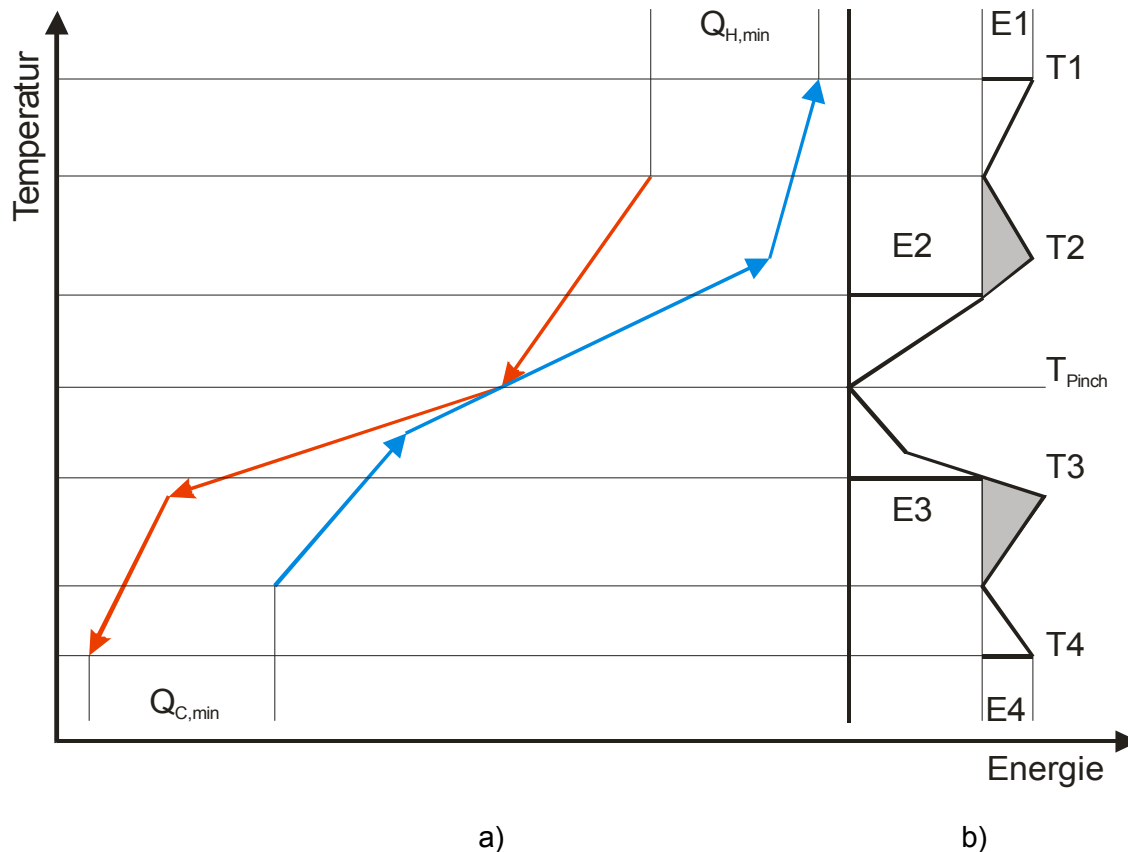


Abbildung 4: Die „Grand Composite Curve (GCC)“. Aus der GCC kann abgelesen werden, bei welchen Temperaturniveaus welche Energiemenge dem Prozess zu- oder abgeführt werden muss.

Was kann nun aus der GCC abgelesen werden? Oberhalb der Pinch-Temperatur T_{Pinch} hat der Prozess einen Heizbedarf. Wie aus der GCC (Abbildung 4 b)) ersichtlich, muss nicht die ganze Heizung bei der Temperatur T_1 erfolgen, der Betrag E_2 kann bereits bei der Temperatur E_2 zugeführt werden und nur der fehlende Anteil E_1 benötigt die Temperatur T_1 . Analoge Überlegungen können für den kalten Teil angestellt werden. Ein Teil der Kühlung (E_3) kann bereits mit der Temperatur T_3 erfolgen, nur der Rest (E_4) braucht die Temperatur T_4 . Im Allgemeinen sind die weniger „extremen“ Temperaturniveaus T_2 und T_3 kostengünstiger zu erzeugen (z.B. Quellwasser statt Eiswasser für die Kühlung, Warmwasser statt Dampf für die Heizung). Auch für den Einsatz von Solarenergie sind diese Überlegungen wichtig, da das Temperaturniveau T_2 fast immer durch Solarkollektoren zu erreichen sein wird.

Weiters sind die beiden grauen Flächen in der GCC in Abbildung 4 b) die Bereiche, in denen eine interne Wärmerückgewinnung erfolgen kann.

3.2.2 Generelle Probleme und Überlegungen

Bevor an den Einsatz von solarer Wärmeenergie in einem Betrieb gedacht wird, sollten noch einige andere Aspekte abgeklärt werden, um die optimale Lösung für den betrachteten Betrieb zu finden:

- **Neubau einer Anlage oder Renovierung einer bestehenden Anlage:** Generell bietet der Neubau einer Anlage immer mehr Möglichkeiten für den Ingenieur und es

kann bereits in der Planung auf eine optimale Anlagenanordnung auch für die solare Energieversorgung Rücksicht genommen werden. Beim Umbau bestehender Anlagen kann es vorkommen, dass das eigentlich optimale Wärmetauschernetzwerk bzw. die Solaranlage aus baulichen, organisatorischen oder finanziellen Gründen nicht verwirklicht werden kann. Die gefundenen Lösungsvarianten sind dann an die jeweilige Situation anzupassen.

- **Betrachtung eines einzelnen Prozesses oder einer ganzen Anlage:** Es ist im Vorhinein abzuklären, ob nur einzelne ausgewählte Prozesse oder der gesamte Betrieb betrachtet werden soll.
- **Andere Betriebe:** Es ist abzuklären, ob benachbarte Betriebe entweder Wärmeenergie zur Verfügung stellen können oder aber diese brauchen, und wenn ja, in welchem Temperaturbereich.
- **Andere Energiequellen:** Neben dem Einsatz von Solarenergieanlagen können für manche Betriebe noch andere alternative Energiequellen sinnvoll sein (z.B.: Hackschnitzelheizung bei vorhandenen Holzabfällen etc.).
- **Energieeffizienzmaßnahmen:** Vor den Überlegungen zum Einsatz von Solarenergie sollen alle anderen energetisch, finanziell und organisatorisch sinnvollen Möglichkeiten zur internen Energierückgewinnung genutzt werden. Zur Analyse der vorhandenen Anlagen kommt ebenfalls die Pinch-Methode zum Einsatz.
- **Umgestaltung der Prozesse:** Änderung und Umstellung auf Energie sparendere Prozesse oder aber eine Änderung der Produktion in der Hinsicht, dass mehr Prozesse in einen für die solare Energieversorgung günstigen Temperaturbereich fallen.
- **Reorganisation:** In manchen Fällen kann bereits eine Reorganisation des Arbeitsablaufs zu Einsparungen führen, z.B. energieintensive Arbeitsgänge nicht gleichzeitig durchführen lassen, um den Spitzenenergiebedarf zu senken etc.
- **Zielsetzung:** Bei der Planung der internen Wärmeintegration für einen Betrieb kann nach drei Gesichtspunkten optimiert werden:
 - Geringste Investitionskosten
 - Geringste Betriebskosten
 - Maximale Energieeinsparung

3.2.3 Wärmespeicherung

3.2.3.1 Bedeutung der Wärmespeicherung bei der Einbindung von Solaranlagen in Produktionsprozesse

Energiespeicherung wird oftmals als ein Schlüsselement der Integration von erneuerbaren Energieformen in bestehende Verteilernetze angesehen [N.N. 2003]. Durch den unregelmäßigen und nicht steuerbaren Anfall von Sonnenstrahlung und Wind kommt der Speicherung eine besondere Bedeutung zu. Dies gilt grundsätzlich auch für die Integration von Solarwärme in industrielle Produktionsprozesse, da

- die Strahlung unregelmäßig auftritt und unplanbaren Schwankungen unterliegt;
- der Großteil der Produktionsprozesse zumindest in KMUs chargenweise arbeitet (Batchbetrieb);

- der Großteil der industriellen Produktionen, besonders in KMUs, nur an Wochentagen und oftmals nur innerhalb einer Schicht (8 Stunden) betrieben wird.

Andererseits hat sich herausgestellt, dass der Wärmespeicherung vorerst keine so große Bedeutung zukommt,

- da bei den derzeit üblichen Anwendungen der Solarwärme in Produktionsprozessen diese nur einen geringen Anteil der Last abdeckt (Vorwärmung, Teillast) und somit praktisch immer in einem großen Netz untergebracht werden kann, und
- weil viele Produktionsprozesse selbst eine große Speicherkapazität haben (Prozessbäder,...) und auch aus verfahrenstechnischer Sicht meist nur ein Temperaturband einhalten müssen, innerhalb dessen sie als Speicher fungieren können.

Aufgabe des Speichers ist es, die im Kollektor mittels Sonnenstrahlung erzeugte Wärme zu speichern und für die Zeitperioden bereitzuhalten, in denen sie benötigt wird [Kaltschmitt et al. 2003].

3.2.3.2 Methoden der Wärmespeicherung in Produktionsbetrieben

Entsprechend der Thematik dieser Studie wird in der Folge nur die Speicherung von Wärmeenergie betrachtet. Das für die Integration von erneuerbaren Energieformen wichtige Thema der Speicherung elektrischer Energie (Batterien, Schwungräder, Wasserstoff, Speicherkraftwerke, Druckgas...) wird nicht betrachtet. Eine gute Übersicht über diese Technologien wurde u. a. von der Europäischen Kommission veröffentlicht [European Commission, 2001].

Weiters ist die Darstellung auf kurzfristige Speichertechnologien ausgerichtet, da Saisonspeicher für gewerbliche und industrielle Produktionsprozesse sicherlich nicht in Frage kommen. Auch ist die Frage der Speicherung von Niedertemperaturenergie bereits ausführlich aufgearbeitet (z.B. [Hadorn, 2005]).

Übersicht

Der Energieinhalt eines Stoffes ist definiert durch:

- seine Lage im Schwerfeld bzw. in elektrischen oder magnetischen Feldern
- seine Geschwindigkeit
- seine „Innere Energie“
 - Temperatur
 - Phasenzustand
 - Druck
 - Bildungsenergie

Jede dieser „Energieformen“ kann durch „Aufladen“ als Energiespeicher genutzt werden:

- Speicherkraftwerke (hoch gelagerte Wassermengen)
- Schwungräder
- Wärmespeicher, Druckluftspeicher
- chemische Speicher

Lage und Geschwindigkeit spielen für die technische Wärmespeicherung keine Rolle. Die anderen unterscheiden sich durch den technischen Aufwand, die Speicherdichte und das Temperaturniveau, in dem sie funktionieren. Diese Parameter bestimmen auch die Kosten und damit die Wirtschaftlichkeit.

Seitens der technischen und wirtschaftlichen Anforderungen können für Wärmespeichermaterialien in Produktionsprozessen folgende Kriterien definiert werden (analog „Kriterien für die Auswahl eines Wärmeträgers aus [Hirschberg, 1999]):

- Phasenumwandlungstemperatur bzw. Reaktionstemperatur muss im Temperaturbereich der Speicherung liegen.
- Volumetrische Wärmekapazität bzw. Phasenumwandlungsenergien sollten mit Rücksicht auf die Anlagen möglichst hoch sein.
- Der Dampfdruck sollte bei den maximalen Betriebstemperaturen nicht wesentlich über den Atmosphärendruck steigen, damit teure Druckausführungen der Rohrleitungen und Armaturen vermieden werden.
- Das Wärmespeichermedium darf die verwendeten Werkstoffe nicht angreifen.
- Das Medium sollte bei den auftretenden Temperaturen chemisch stabil sein, also seine Stoffwerte nicht ändern, keine Ablagerungen verursachen und keine gasförmigen Crackprodukte abspalten.
- Das Sicherheitsrisiko der Anlage sollte durch das verwendete Speichermedium nicht vergrößert werden (Brand- und Explosionsgefahr, Toxizität, ...).
- Das Wärmespeichermaterial sollte leicht verfügbar, preiswert und einfach zu entsorgen sein.

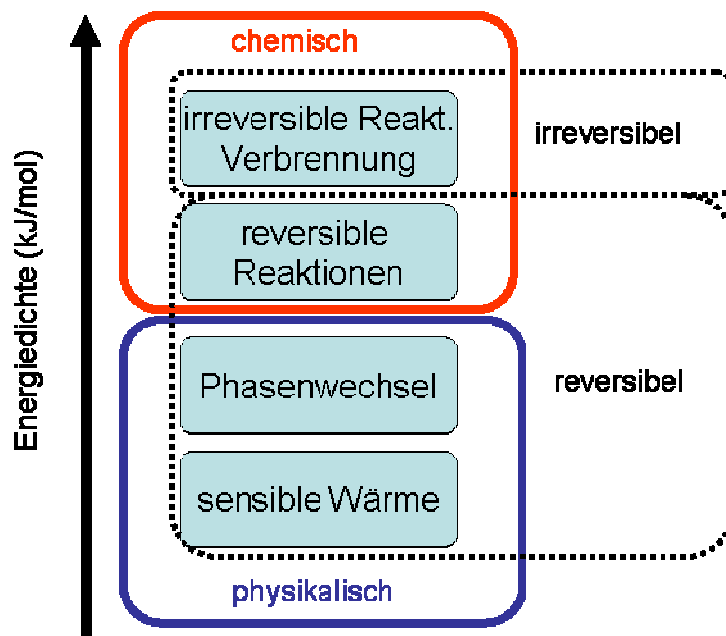


Abbildung 5: Energiedichte physikalischer und chemischer Umwandlungen

Wasser – in Form von Dampf oder Heißwasser – ist das gängige Medium für den Transport und die Speicherung von Wärmeenergie in Produktionsprozessen. Wasser weist sich durch zahlreiche technische Vorteile aus: es hat eine große Wärmekapazität, große Energieinhalte der Phasenänderungen (gefrieren, verdampfen), gute Wärmeübergangseigenschaften, geringe Viskosität, beherrschbare Korrosionseigenschaften, und ist ungiftig. Darüber hinaus ist es billig und leicht in die geforderten Qualitäten zu bringen.

1) **Fühlbare Wärme**

Die häufigst verwendeten Energiespeicher sind Wasserspeicher (Flüssigkeitsspeicher).

2) Gleichdruckspeicher

Bei diesen Speichern bleiben die Zustände (Druck und Temperatur) des gelieferten Heißwassers weitgehend konstant. Dies wird dadurch erreicht, dass während des Entladens gleichzeitig ein Medium nachgespeist wird, um das Heißwasser aus dem Behälter zu verdrängen. Im geschlossenen Kreislauf ist ein nahezu gleich großes kaltes Ausgleichsgefäß erforderlich.

Die gebräuchlichste Form des Gleichdruckspeichers ist der Verdrängungsspeicher. Hier ist für die heiße und kalte Flüssigkeit ein – vorzugsweise stehender zylindrischer – Behälter vorgesehen. Die heiße – und damit spezifisch leichtere – Flüssigkeit ist im oberen Teil des Behälters untergebracht, die kalte im unteren. Durch die Wärmeleitung zwischen der oberen heißen und der unteren kalten Flüssigkeit und vor allem der Behälterwand sowie bei Turbulenzen beim Laden und Entladen kommt es zu einer Mischzone mit einem mehr oder weniger steilen Temperaturübergang. Dieser mindert zwar die Wärmespeicherfähigkeit, mildert jedoch auch die thermische Wechselbeanspruchung der Behälterwand, was vor allem bei dickwandigen Druckbehältern von Vorteil sein kann. Turbulenzen und Durchschießen der Flüssigkeit beim Ladevorgang werden durch entsprechend geformte Leiteinrichtungen vermindert. Durch eine schlanke hohe Konstruktion wird die Bedeutung der Mischzone ebenfalls vermindert.

Der Verdrängungsspeicher kann entweder im oberen Bereich einen Dampfpolster aufweisen, oder der Speicher ist völlig gefüllt und ein externes System (Expansionsgefäß) sorgt für die Druckhaltung; die Flüssigkeit ist dann unterkühlt. Dies entspricht dem System, wie es bei Solaranlagen zur Warmwasserbereitung und Raumheizung üblich ist.

Bei Systemen mit Druckhaltung sind auch andere Speichermedien als Wasser möglich, z.B. Thermoöle (drucklose Speicherung bis 300°C), Salzschnmelzen und Flüssigmetalle (Anwendung bei Solarkraftwerken).

Flüssigkeitsspeicher können mit einer Nachheizung ausgerüstet sein, um konstante Verhältnisse im Ablauf zu gewährleisten.

3) Feststoffspeicher

Feststoffspeicher werden vorrangig in Systemen mit Luftkollektoren eingesetzt und spielen daher in der produktionsintegrierten Anwendung der Solarenergie wenig Rolle. Sie sind aber wichtig bei der Beheizung von Produktionshallen, wenn massive Gebäudeteile (Wände, Fußböden, Decken,...) oder Speichermassen aus Kies zur Wärmespeicherung genutzt werden.

4) Latentwärmespeicher

Die Änderung eines des Aggregatzustandes eines reinen Stoffes erfolgt bei konstanter Temperatur unter Zu- oder Abfuhr von Energie. Flüssigkeitsgemische haben einen Siedebereich, in dem zuerst die leichterflüchtige Komponente siedet und später zunehmend die schwerer siedende. Für Niedertemperaturanwendungen, wie in der Solartechnik üblich, wird nur der Phasenwechsel fest/flüssig genutzt, da hier meist nur eine geringe Volumensänderung auftritt. Bei industriellen Anwendungen mit Heißwasser- oder Dampfnetzen ist aber auch eine Speicherung von Dampf denkbar.

Latentwärmespeicher haben zwei große Vorteile:

- Sie weisen eine große Energiedichte auf;
- sie geben die Wärme bei einer definierten, konstanten Temperatur ab.

Demgegenüber gibt es auch Nachteile:

- Beim Phasenwechsel treten oft große Volumensänderungen auf;
- die physikalischen Eigenschaften (Wärmeleitfähigkeit, Viskosität,...) ändern sich teilweise deutlich, meist ist nur eine Phase „pumpfähig“;
- viele thermodynamisch gesehen gut geeignete Materialien sind korrosiv.

Eine ausführliche Aufarbeitung der Wärmespeicherung erfolgte im IEA Implementing Agreement on Energy Conservation through Energy Storage, Annex 17 „Advanced Thermal Energy Storage through Phase Change Materials and Chemical Reactions – Feasibility Studies and Demonstration Projects“ [Hauer et al. undated]. Abb. 1 (aus dieser Arbeit) zeigt, dass im interessierenden Temperaturbereich zwischen 0 und 200°C vorwiegend wässrige Salzlösungen, Paraffine, Fettsäuren, Salzhydrate und Alkohole in Frage kommen. Praktische Bedeutung haben derzeit nur Salzhydrate und Paraffine.

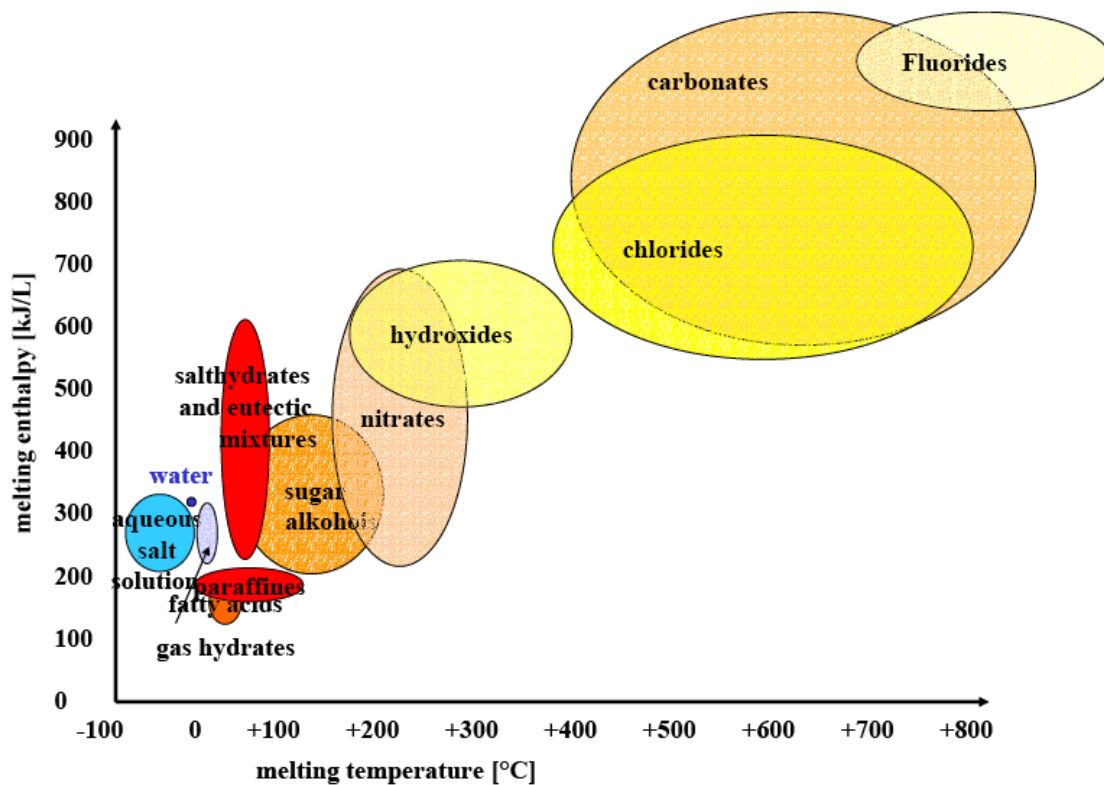


Abbildung 6: Verfügbare Materialien für Wärmespeicherung durch Phasenwechsel [Hauer et al. undated]

Die Bedeutung der PCM im industriellen Bereich liegt nicht in der Speicherung von Prozesswärme, sondern in der Heizung der Produktionshallen.

5) Druckgefällespeicher

- Dampfspeicher

Dampfspeicher sind meist wärmedämmte Druckbehälter, die in geladenem Zustand mit Wasser an der Siedegrenze gefüllt sind. Darüber befindet sich ein Dampfraum, welcher 5 bis 15 % des Speichervolumens einnimmt. Die Entnahmeleitung (Sattdampfentnahme) zweigt vom oberen Teil des Behälters ab. Beim Entladen wird durch Öffnen einer Armatur in der Entnahmeleitung und durch die einsetzende Druckabsenkung der Wasserinhalt teilweise zum Ausdampfen gebracht. Der entstehende Dampf sammelt sich im Dampfraum und wird abgezogen. Nach der Entladung bleibt ein Großteil der Wassermenge abgekühlt im Speicher. Die übliche Lademethode ist das Eindüsen von Dampf mit höherem Druck in den Wasserraum.

Während des Entladens und Ladens soll jede Temperaturschichtung im Behälter vermieden werden. Dies wird durch einen inneren Umlauf erreicht, der durch Leitbleche und unten angebrachte Ladedüsen erzielt wird. Ein möglichst rascher Umlauf ist wichtig, um die Aufenthaltszeit der Blasen und damit die Wasserspiegelanhebung gering zu halten. Hohe Ausdampfmengen (und damit Speichermengen) können nur erreicht werden, wenn eine starke Druckabsenkung erlaubt ist.

- Dampfdruckspeicher

Der Unterschied zum Dampfspeicher besteht darin, dass der Dampfdruckspeicher im geladenen Zustand völlig mit Dampf gefüllt ist. Einbauten und Umwälzungen sind daher entbehrlich. Die Speicherfähigkeit ist wesentlich geringer als beim Dampfspeicher mit Heißwasserfüllung, vor allem bei niedrigen Drücken. Dafür ist die Entlade-geschwindigkeit höher als beim Dampfspeicher, da das Wasser nicht erst verdampfen muss.

- Expandierspeicher

Dieser Speicher ist wie der Dampfspeicher im geladenen Zustand mit Heißwasser am Siedepunkt gefüllt. Die Entladeleitung ist hier jedoch im unteren Bereich des Behälters angeordnet, weshalb der Dampfraum kleiner gestaltet werden kann. Entnommen wird hier Heißwasser. Der hierbei größer werdende Dampfraum wird durch teilweise Ausdampfung des Heißwassers aufgefüllt, wobei der Speicherdruck fällt. Das Energiespeichervermögen des Expandierspeichers entspricht etwa dem des Dampfspeichers, mit dem Unterschied, dass hier auch ein Großteil der Wassermasse entladen wird.

Die Ladung erfolgt durch Zuführen von Heißwasser und das Abdrosseln auf den Druck des Speichers. Das Heißwasser muss dabei im oberen Teil eingedüst werden, damit der verkleinerte Dampfpolster stets mit dem Wasserinhalt im Gleichgewicht steht. Die Anwendung dieses Speichers beschränkt sich auf geschlossene Heißwassersysteme, die jedoch ein großes Ausgleichsgefäß brauchen.

6) Eisspeicher

Die älteste Form der industriellen Anwendung der Energiespeicherung ist zweifelsohne die Speicherung von Winterkälte in den Sommer durch das Einlagern von Eis aus Flüssen, Seen (Eisteichen) und speziellen Eisproduktionsstätten in gut isolierten Speichern. Verwendet wurde das Eis für praktisch alle Anwendungen, wo heute künstlich Kälte hergestellt wird, vorwiegend in der Lebensmittelindustrie und zur Klimatisierung.

7) Phase Change Materials

Zur Speicherung von Wärme auf einem für die Heizung nutzbaren Niveau benötigt man Chemikalien, die im Temperaturbereich 50 bis 200°C ihren Schmelzpunkt besitzen: Phasenwechselmaterialien (Phase Change Materials – PCM). Grundsätzlich sollen PCM-Materialien folgende Kriterien erfüllen [Heinz et al, 2006]:

- geeignete Schmelztemperatur
- hohe Schmelzwärme je Volumseinheit
- hohe spezifische Wärme
- geringe Volumsänderung beim Phasenwechsel
- hohe Wärmeleitfähigkeit
- Zyklenstabilität
- nicht brennbar, nicht giftig
- nicht korrosiv

Preisgünstige und toxisch unbedenkliche Materialien mit den erforderlichen Stoffeigenschaften sind Parafine und Salzhydrate. PCMs werden vorteilhaft eingekapselt oder in Materialien eingearbeitet.

In Verbundmaterialien zur Wärmespeicherung wechselt eine Komponente ihre Phase, ohne dass das Verbundmaterial seine Eigenschaften wesentlich verändert. Mikroeingeschlossene organische Flüssigkeiten können in Baustoffe integriert werden und hierdurch deren Speicherkapazität durch einen Phasenwechsel erhöhen.

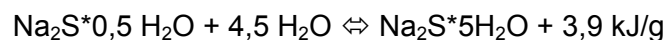
8) Adsorption, Absorption

Eine Spezialform des Latentwärmetauschers stellen die Sorptionsspeicher dar. Hierbei wird eine Komponente an einem Feststoff adsorbiert (z.B. Wasser an Silikagel) [Gartler et al, 2004] oder in einer Flüssigkeit absorbiert (Ammoniak in Wasser). Beide Vorgänge sind bei veränderten Bedingungen (geringerer Druck oder/und Höhere Temperatur) rückgängig zu machen (reversibler Vorgang).

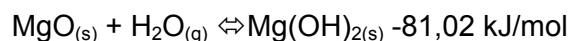
Eine Übersicht über neue Sorptionsmaterialien für die Wärmespeicherung gibt Schmidt in [Schmidt, 2006].

9) Wärmespeicherung durch chemische Reaktionen

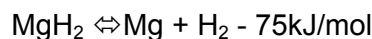
Absorptionsprozesse sind oftmals mit chemischen Reaktionen verbunden. Ein typischer Prozess hierfür ist das SWEAT-Absorber (Salt-Water Energy Accumulation and Transformation) [Bach, 2001]. Er basiert auf der reversiblen Hydrierung von Na_2S :



Diese Reaktion dient der Kühlung, aber analoge Reaktionen können zur Wärmespeicherung eingesetzt werden²:



Die Reaktionen können auch Gasphasen beinhalten, wie die Dissoziierungsreaktion:



Abhängig von Druck und Temperatur ist die Reaktion umkehrbar und die Wärme wird wieder frei³. Oftmals werden diese Reaktionen nicht nur zur Speicherung, sondern auch als Wärmepumpen vorgeschlagen. Die praktische Bedeutung für einen Einsatz in Produktionsprozessen ist aber derzeit nicht gegeben.

3.2.4 Integration von thermischer Solarenergie

Für die Integration von thermischer Solarenergie in die Pinch-Methode gibt es im Prinzip zwei Möglichkeiten.

Die erste ist die Betrachtung der von der Sonne bereitgestellten Energie als eine zusätzliche Wärmehilfsquelle. Ein zusätzlicher solarer Wärmestrom taucht hier nicht extra in den Strom-

² s...solid, g...gasförmig

³ Dieses System wird als *SOLARSTORAGE*TM von der Firma BSR Solartechnologies GmbH angeboten

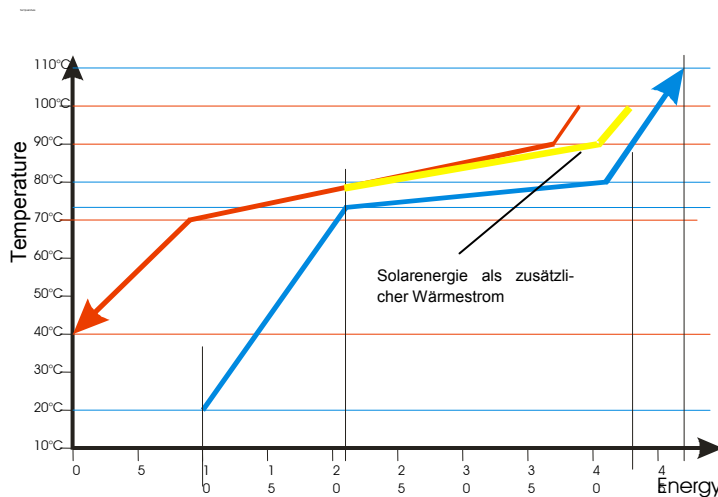


Abbildung 8: Integration von thermischer Solarenergie als zusätzlicher Wärmestrom

Bei den genauen Analysen der Fallbeispiele hat sich herausgestellt, dass die Integration der Solaranlage als Utility in das Wärmetauschernetzwerk nicht zielführend und hilfreich ist. Ebenso hat die Integration der Solarenergie als zusätzlicher Wärmestrom nicht zu dem gewünschten Erfolg geführt, da durch die nicht konstante Wärmezufuhr aufgrund der unterschiedlichen Intensität der Sonnenstrahlung eine ständige Änderung der Prozessströme notwendig wäre.

3.2.5 Berechnungen und Konstruktion der Wärmetauschernetzwerke

Die Basis für die Berechnungen sind die Stromdaten wie Durchflussmenge und Temperaturniveaus. Die Berechnungen sind sehr umfangreich, vor allem die ökonomischen Optimierungen für die Bestimmung der optimalen Temperaturdifferenz ΔT_{\min} sind rechenintensiv.

Hat man die Stromdaten und ΔT_{\min} ermittelt, so kann das Wärmetauschernetzwerk konstruiert werden. Man beginnt hier direkt am Pinch und geht nach einigen Regeln vor:

Oberhalb des Pinch

$$\begin{aligned} m_{C_{P,Kj}} &\geq m_{C_{P,Hi}} \\ n_K &\geq n_H \end{aligned}$$

Unterhalb des Pinch

$$\begin{aligned} m_{C_{P,Hi}} &\geq m_{C_{P,Kj}} \\ n_H &\geq n_K \end{aligned}$$

Hierbei steht K_j für kalte und H_i für heiße Ströme, die potenziell mit Wärmetauschern verbunden werden können, n ist die Gesamtanzahl der Ströme. Mit diesen Randbedingungen und den allgemeinen Regeln für die Pinch-Methode ergeben sich in der Regel mehrere gleichwertige Wärmetauschernetzwerke.

Die Berechnungen sind meist sehr umfangreich und werden mit speziellen Programmen durchgeführt. Diese Computerprogramme unterscheiden sich im Umfang der berechenbaren Ströme, den Datenbanken für Wärmetauscher, den Automatisierungen zur Konstruktion der Wärmetauschernetzwerke und dem Komfort in der Bedienung. Dementsprechend groß ist die Preisspanne, die von Freeware (HINT) bis zu teuren Profiprogrammen (SuperTarget) reicht. Ein Beispiel für ein mit SuperTarget berechnetes Wärmetauschernetzwerk zeigt Abbildung 7.

3.2.6 Wärmeintegration bei Batch Prozessen

Viele industrielle Prozesse laufen nicht kontinuierlich ab, sondern diskontinuierlich. Für diese Prozesse ist die oben beschriebene Pinch-Methode so nicht verwendbar, sondern es müssen spezielle Batch-Pinch-Modelle verwendet werden. Für die Analyse der Wärmeströme gilt in diesem Fall nicht nur, dass eine bestimmte Wärmemenge zwischen zwei verschiedenen Temperaturen zur Verfügung steht bzw. gestellt werden muss, sondern auch dass ein Strom nur zu bestimmten Zeiten fließt. Es müssen in einem solchen Fall Temperaturniveaus und Zeitintervalle beachtet werden. Aus diesem Grund ist für die Analyse von Batch-Prozessen die insgesamt zur Verfügung stehende Wärmemenge ein besserer Ansatz als der Wärmestrom.

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T \cdot \Delta t \quad (\text{kWh})$$

m	Masse (kg)
c_p	spezifische Wärmekapazität (kJ/(kg K))
ΔT	Temperaturdifferenz (K)
Δt	Zeitdifferenz (s)

Für die Bestimmung des theoretischen minimalen Energieverbrauchs bei Batch-Prozessen wurden mehrere Methoden entwickelt. Alle diese Methoden gehen von bestimmten Annahmen aus und sind für verschiedene Szenarien unterschiedlich gut geeignet. Sie führen daher im Allgemeinen auch zu unterschiedlichen Ergebnissen für den minimalen Energiebedarf. Im Folgenden wird auf diese Methoden genauer eingegangen.

1. Methoden, bei denen die Temperaturniveaus im Vordergrund stehen und die zeitliche Abfolge der Ströme von geringerer Bedeutung ist:
 - TAM, Time average Model
 - TSM, Time Slice Model
 - CA, Cascade Analysis
 - BUC, Batch Utility Curve
2. Methoden, bei denen die zeitliche Abfolge der kritische Faktor ist:
 - TPA, Time Pinch Analysis

Für die folgenden Erläuterungen der unterschiedlichen Batch-Pinch-Modelle wird das folgende einfache Beispiel von zwei kalten und zwei warmen Strömen zu unterschiedlichen Zeiten verwendet.

Tabelle 2: Stromdaten für zwei heiße und zwei kalte Ströme, die auch einen zeitlichen Verlauf haben.

Strom	T _{in}	T _{out}	m·cP	t _{start}	t _{end}	QC	QB
	°C	°C	kW/°C	H	h	kW	kWh
H1	170	60	4	0,25	1	440	330
H2	150	30	3	0,3	0,8	360	180
C1	20	135	10	0,5	0,7	1150	230
C2	80	140	8	0	0,5	480	240

3.2.6.1 Time Average Model

Dieses Modell (Linnhoff et al., 1988) vernachlässigt den Zeitverlauf vollständig. Die Heizung oder Kühlung eines jeden Stromes wird als über den ganzen Batchverlauf kontinuierlich erfolgend betrachtet und ein durchschnittlicher Wärmebedarf errechnet, der sich aus der Heizleistung, multipliziert mit der tatsächlichen Zeitdauer des Stromes, dividiert durch die Dauer des gesamten Batch-Prozesses ergibt. Die sich daraus ergebende Energiemenge, die dann noch benötigt wird, ist die theoretisch absolute Minimalmenge bei Annahme einer verlustlosen Wärmespeicherung.

3.2.6.2 Time Slice Model

Bei diesem Modell wird der betrachtete Prozess in einzelne Abschnitte zerlegt und für jedes dieser Zeitintervalle die mögliche Wärmerückgewinnung nach der Pinch-Theorie separat berechnet. Eine logische Unterteilung ist der Beginn- bzw. Endzeitpunkt der einzelnen Ströme. Eine Wärmespeicherung wird bei diesem Projekt nicht berücksichtigt. Bei diesem Modell können etwaige mögliche Energieeinsparungen durch eine Veränderung der Prozesslaufzeiten abgeschätzt werden.

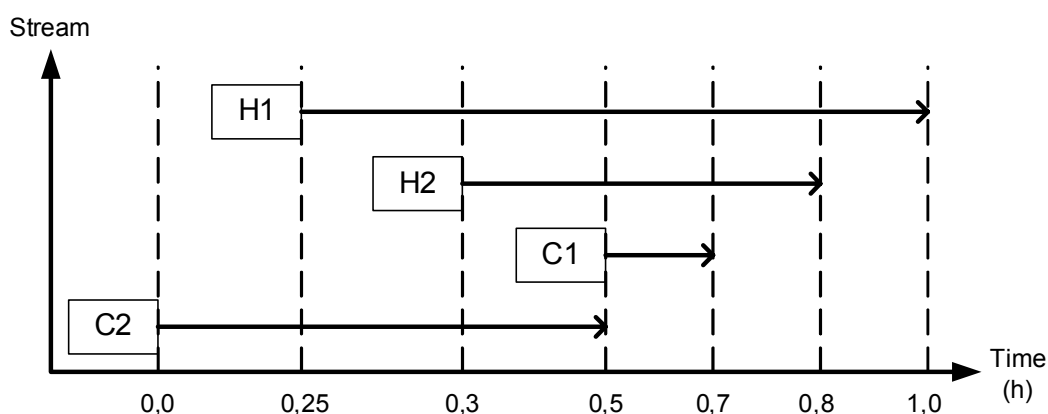


Abbildung 9: Zeitintervalle für das Beispiel zum Batch-Pinch. Die unterschiedlichen Beginn- und Endzeiten der Ströme teilen die Gesamtzeit in 6 Teilbereiche.

3.2.6.3 Cascade Analysis

Ein systematischerer Zugang zur Zeitabhängigkeit bei Strömen ist die Verwendung einer zweidimensionalen Wärmekaskade (Kemp, Deakin, 1989). Mit dieser Methode kann Wärme zu niedrigeren Temperaturen sowohl direkt über Wärmetauscher oder auch indirekt mit Hilfe von Wärmespeichern übertragen werden. Die Grenzen der Kaskade sind auf der Zeitseite wie bei der TSM die Start- und Beginnzeiten der einzelnen Ströme, auf der Temperaturseite die Quell- bzw. die Zieltemperaturen der einzelnen Ströme.

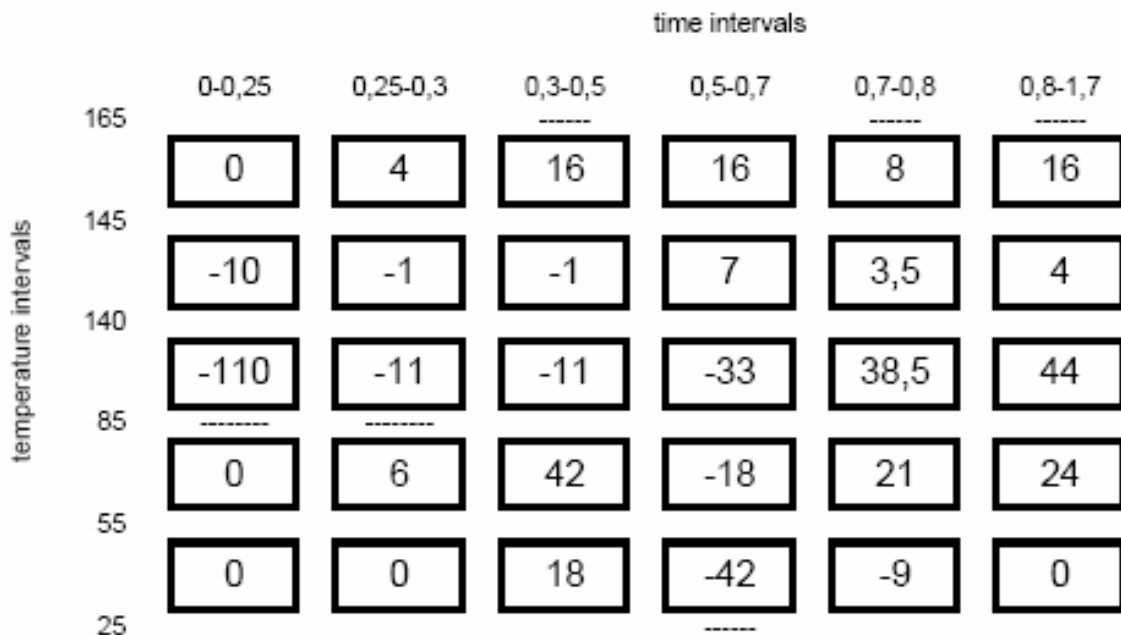


Abbildung 10: Die zweidimensionale Wärme-Zeit-Kaskade für das einfache Beispiel in Tabelle 1

Abbildung 10 zeigt die Kaskade für das einfache Beispiel, wo vier Ströme zu 5 Temperaturintervallen und 6 Zeitintervallen führen. Wird Wärme nur direkt innerhalb der Zeitintervalle übertragen, so erhält man das TSM. Wird Wärme in einem Temperaturintervall von einem Zeitpunkt zum nächsten übertragen, sind Wärmespeicher notwendig. Allerdings ist es so auch möglich, Wärme von unterhalb des Pinch in einem Zeitintervall zu einem Punkt oberhalb des Pinch in einem zweiten Zeitintervall zu transferieren.

3.2.6.4 Batch Utility Curve

Hierbei handelt es sich um ein grafisches Werkzeug, mit dem die möglichen Temperaturniveaus für einen Wärmeaustausch zu verschiedenen Zeitintervallen identifiziert werden können (Gremouti, 1991). Die Batch Utility Curve basiert auf den Grand Composite Curves für jedes Zeitintervall. Die GCCs werden am Pinchpunkt geteilt, das Gebiet unterhalb des Pinch wird als Wärmequelle betrachtet, die eventuell für andere Zeitintervalle zur Verfügung steht. Das Gebiet oberhalb des Pinch benötigt Wärme. Diese Analyse entspricht der Pinch-Analyse für ganze Anlagen.

3.2.6.5 Time Pinch Analysis

Bei dieser Methode spielt die thermodynamische Möglichkeit des Wärmetransfers keine Rolle. Diese Methode untersucht die notwendigen Wärmemengen als kritischen Aspekt des Zeitablaufs. Analog zu den CC und der GCC werden hier die notwendigen Wärmeleistungen als Funktion der Zeit in Diagramme eingetragen. Diese TPA-Kompositkurven erlauben es, mögliche Engstellen für die Wärmeübertragung bei Batch-Prozessen zu identifizieren (Time Pinch)

3.3 Solartechnik und Solare Simulation

Bei der Auslegung von großen Solaranlagen zur Prozesswärmegenerierung ist man auf die Unterstützung von Simulationsprogrammen angewiesen, um Ertragsabschätzungen abgeben zu können, welche die vielfältigen Einflussparameter eines solchen Systems berücksichtigen. Eine wesentliche Datenbasis für die Simulationen stellen die verwendeten Wetterdatensätze dar. In diesem Kapitel werden zwei Möglichkeiten des Wetterdatenbezuges sowie vier Solarsimulationsprogramme vorgestellt und auf ihre Eignung hinsichtlich des Projektzieles untersucht und bewertet.

3.3.1 Analyse von Wetterdatenbanken

Bei Wetterdaten kann zwischen Messdaten und generierten Daten unterschieden werden. In Folge werden in diesem Bericht unter Wetterdaten die solare Globalstrahlung bzw. Diffus- und Direktstrahlung, die Außentemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit verstanden. Aufgrund der jährlichen Schwankungen der Wettersituation an einem bestimmten Standort ist es für die Angabe der Klimadaten üblich, durchschnittliche Werte über z.B. die letzten zehn Jahre anzugeben. Diese Durchschnittsdaten werden aus den einzelnen Werten einer Messstation ermittelt.

Im Folgenden wird zwischen Anbietern von Wetterdatensätzen und Wetterdatengeneratoren unterschieden. Die Generatoren von Wetterdatensätzen erlauben die Ableitung der Klimasituation an einem bestimmten Standort, definiert durch Breiten- und Längengrad, Seehöhe sowie Situierung (Tallage, Gebirgslage, usw.), aus den Durchschnittswerten der nächstgelegenen Messstation.

Eine Übersicht der Quellen für Wetterdatensätze gibt Tabelle 3.

Tabelle 3: Übersicht Wetterdatenbanken und -generatoren

Quelle	Art	Anzahl der Stationen in Österreich	Zeitliche Auflösung
ZAMG Wetterdaten	Datenbank Datensätze	ca. 200	Monatswerte Stundenwerte
METEONORM	Datenbank Klimadatengenerator	15	Monatswerte Stundenwerte berechnet

3.3.1.1 Wetterdaten der ZAMG

In die Datenbank der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) – Abteilung für Klimatologie fließen nach eingehender Prüfung und Korrektur die Mess- und Beobachtungsdaten von

- 120 klassischen Klimastationen
- 150 teilautomatischen Stationen
- 110 Phänologie-Stationen

aus ganz Österreich ein. Messdaten wie sie für die Verwendung in Solarsimulationsprogrammen benötigt werden, d.h. Daten in stündlicher Auflösung können bei der ZAMG bestellt werden. Dafür stehen ca. 200 Messstationen zur Verfügung. Die Daten können für den Zeitraum eines bestimmten Jahres geliefert werden. Für die Berechnung von Mittelwerten über eine Zeitperiode von z.B. zehn Jahren können die Daten dieser Periode angefordert werden. Die Daten werden nach Wunsch zusammengestellt, es ist also möglich, Datensätze mit den Parametern Globalstrahlung, Diffusstrahlung, sowie Außentemperatur von der ZAMG von den jeweiligen Stationen zu erhalten. Die Daten können mit Tabellenkalkulationsprogrammen verarbeitet und so in einer Form gespeichert werden, dass eine Verwendung in Solarsimulationsprogrammen möglich ist.

3.3.1.2 Meteonorm

Das Programm Meteonorm, eine globale meteorologische Datenbank für Solarenergie und angewandte Meteorologie, wird von der Schweizer Firma METEOTEST entwickelt und auf dem Markt angeboten. Die derzeit aktuellste Version weist die Bezeichnung METEONORM 5.1 auf. Untersucht wurde allerdings die Version 4.0, die aber keine wesentlichen Unterschiede zur Version 5.1 aufweist. Die Datenbank enthält die Wetterdaten von weltweit 7.400 meteorologischen Stationen in Form von Monatswerten. Durch stochastische Algorithmen können aus diesen Monatswerten die für Solarsimulationsprogramme notwendigen Stundenwerte berechnet werden. In vielen Gebieten der Erde sind die Daten einer Wetterstation nur in einem Umkreis von ca. 50 km anwendbar, daher ergibt sich die Notwendigkeit, die Wetterdaten für nicht abgedeckte Gebiete aus den Werten der umliegenden Stationen zu interpolieren. Das Programm führt diese Berechnungen nach Definition des Standortes (geografische Lage sowie Situierung) durch und gibt die Daten in gewünschter Form aus.

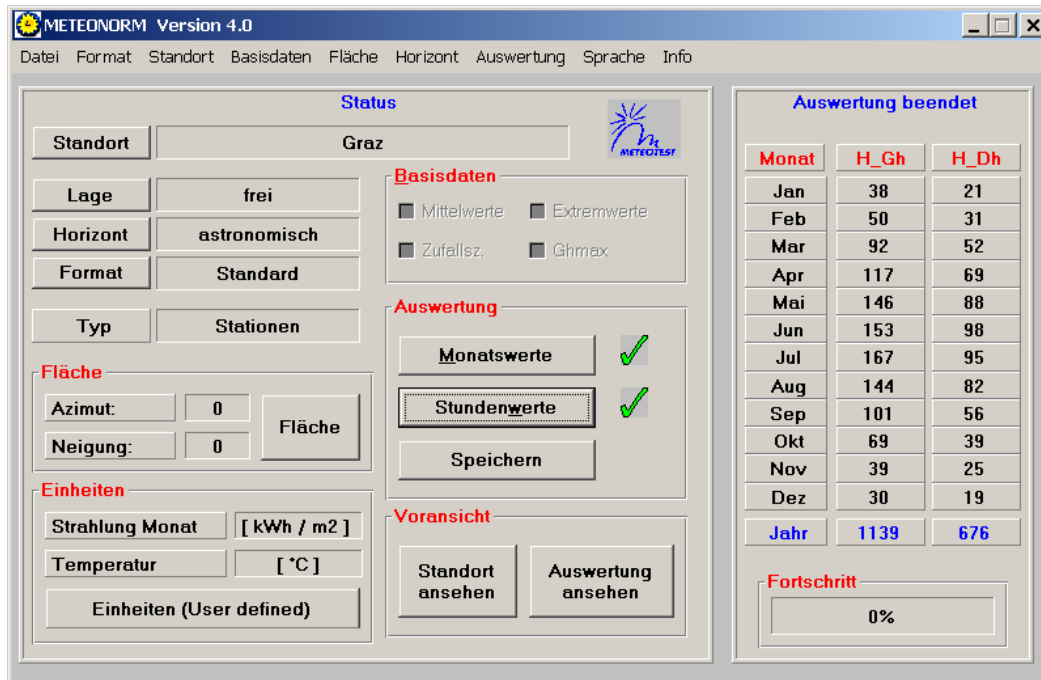


Abbildung 11: Hauptmenü METEONORM mit Daten für Graz

Die Datenausgabe erfolgt zur Weiterverarbeitung durch andere Programme in Form von ASCII Files, wobei insgesamt 18 vordefinierte Formate zur Verfügung stehen. Mit diesen Formaten werden die am häufigsten eingesetzten Solarsimulationsprogramme abgedeckt. Mit der Option der benutzerdefinierten Ausgabeformate lassen sich die gewünschten Parameter mit frei definierbarem Trennzeichen in eine ASCII Datei schreiben.

Eine weitere Option erlaubt den Datenimport von eigenen Messdaten, die dann mit allen zur Verfügung stehenden Funktionen des Programms bearbeitet werden können.

3.3.2 Programme zur Simulation von thermischen Solaranlagen

Die meisten der kommerziell und frei erhältlichen Programme zur Simulation von thermischen Solaranlagen wurden für die Anwendungsgebiete der häuslichen Brauchwasserbereitung und Raumheizungsunterstützung entwickelt.

Sämtliche Systemkonzepte, die in den Programmen wählbar sind, basieren ebenfalls auf diesen Anwendungen. Die Erzeugung von industrieller Prozesswärme stellt hier andere Anforderungen an die Systemtechnik und damit an die Programme, welche die Wärmeversorgung durch eine Solaranlage abbilden sollen.

Nachfolgend werden drei kommerziell vertriebene und ein frei erhältliches Solarsimulationsprogramm kurz beschrieben. Diese Programme werden im deutschen Sprachraum häufig angewendet und stellen eine Vorauswahl dar, die auf die unten beschriebenen Anforderungen hin überprüft wurden. Tabelle 4 gibt die Programme in der geprüften Version und deren Bezugsquelle in Österreich an.

Tabelle 4: Geprüfte Solarsimulationsprogramme

Programm	Hersteller/Entwickler	Bezugsquelle	kostenfrei
TSOL 4.03	Dr. Valentin EnergieSoftware GmbH http://www.valentin.de	AEE Unterer Heidenweg 9500 Villach http://www.aee.at	nein
Polysun 3.0	SPF Solartechnik – Prüfung – Forschung Hochschule Rapperswil HSR http://www.solarenergy.ch	SPF Solartechnik – Prüfung – Forschung Hochschule Rapperswil HSR http://www.solarenergy.ch	nein
SHWwin 2.0	Institut für Wärmetechnik Techn. Universität Graz http://wt.tu-graz.ac.at	TU Graz – Institut für Wärmetechnik Inffeldgasse 8010 Graz http://wt.tu-graz.ac.at	ja
TRNSYS 15	Solar Energy Laboratory University of Wisconsin, Madison http://sel.me.wisc.edu	Transsolar Energietechnik GmbH Curiestraße 2 70563 Stuttgart http://www.transsolar.com	nein

Prüfung der Eignung für solare Prozesswärmeanwendungen

Basierend auf den Erfahrungen, die während des FdZ-Projekts „PROMISE – Produzieren mit Sonnenenergie“ bei der Erstellung von Fallstudien gemacht wurden, können die folgenden Anforderungen an Solarsimulationsprogramme für die Anwendung der Generierung solarer Prozesswärme gestellt werden.

Tabelle 5: Anforderungen an Simulationsprogramme für solare Prozesswärmeerzeugung

Parameter	Anforderung
Wärmebedarf	<ul style="list-style-type: none"> – Eingabe des Wärmebedarfs in durchschnittlicher Menge pro Tag bzw. Menge pro Jahr (z.B. Liter Warmwasser); Verteilung des Bedarfs auf Stundenbasis, tageweise, wochenweise und monatsweise – Industrielle Wärmebedarfsmengen simulierbar
Zieltemperatur des Heißwassers	<ul style="list-style-type: none"> – Angabe von mehreren Zieltemperaturen im Jahr (Produktionsprogramm) wünschenswert, aber nicht unbedingt notwendig.
Thermischer Kollektor	<ul style="list-style-type: none"> – Frei wählbare Leistungsparameter des Kollektors wünschenswert aber nicht notwendig, sofern genügend Auswahl an verschiedenen Kollektoren vorhanden. – Fläche, Ausrichtung nach Süden und Neigung des Kollektorfeldes wählbar
Warmwasserspeicher	<ul style="list-style-type: none"> – Definierbar in Volumen, Höhen/Durchmesser-Verhältnis, Dämmstärke, Anzahl der einzelnen Speicher, Art des Wärmetauschers (intern/extern; k.A-Wert)

Systemhydraulik	<ul style="list-style-type: none"> – Idealerweise frei wählbare Zusammenstellung der Komponenten wie Kollektoren, Länge der Rohrleitungen innen und außen, Durchfluss im Solarkreis (high/low flow), Speichergröße und Anzahl bzw. auch Systeme ohne Speicher (Direktintegration), Art der Nachheizung (Energieträger, Effizienz), Regelung der Anlage (Speichermaximaltemperatur, Ein- und Ausschalten der Solaranlage bzw. Nachheizung)
Ausgabedaten	<p>Grafische und numerische Darstellung von folgenden Daten in Jahressummen und Monatssummen:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Energieertrag der Solaranlage – Nachheizenergie – Energiebedarf des Prozesses – Verluste des Speichers und der Rohrleitungen – Optional: Einsparung an Energieträger der Nachheizung

Zusätzliche Anforderungen ergeben sich durch den notwendigen Datenaustausch mit Prozesssimulationsprogrammen bzw. Programmen zur Berechnung des Batch-Pinch-Punktes. Diese Zusatzanforderungen sind in Tabelle 6 angegeben.

Tabelle 6: Zusatzanforderungen zum Datenaustausch

Parameter	Anforderung
Ausgabedaten	<p>In Form von Textdateien mit Trennzeichen wünschenswert; folgende Daten müssen mindestens in Stundenaufösung enthalten sein:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Energieertrag der Solaranlage – Nachheizenergie – Energiebedarf des Prozesses – Verluste des Speichers und der Rohrleitungen

3.3.2.1 TSOL

TSol ist ein dynamisches Simulationsprogramm zur Auslegung von thermischen Solaranlagen mit grafischer Benutzeroberfläche. Die Anwendungsgebiete des Programms liegen bei der solarthermischen Versorgung von Brauchwarmwasserbereitung und Raumheizungsunterstützung sowie der Schwimmbadheizung.

Der Leistungsumfang des Programms wird wie folgt angegeben:

- Simulation von thermischen Solaranlagen zur Trinkwassererwärmung und Heizungsunterstützung über einen frei wählbaren Zeitraum bis zu einem Jahr
- Auswahl von Komponenten (Kollektoren, Speicher, Heizkessel) aus umfangreichen Datenbanken
- Berücksichtigung von Warmwasserbedarfsprofilen

- Bilanzierung von Energien, Schadstoffemissionen und Kosten
- Berechnung der in der Solartechnik üblichen Bewertungsgrößen wie Solarer Deckungsgrad und Systemnutzungsgrad

Die zu simulierende Anlagenhydraulik ist aus einer Liste von vorgegebenen Typen wählbar, wobei für die Warmwasserbereitung neun Standardanlagen und vier Großanlagen zur Verfügung stehen. Die einzelnen Anlagentypen unterscheiden sich durch die Art und Anzahl der Speicher, der Energieeinbringung in den Speicher (interne oder externe Wärmetauscher) von der Solaranlage und der Zusatzheizung. Eine Liste der Anlagen gibt Tabelle 7 wieder, Abbildung 12 zeigt das Anlagenschema Nr. 10.

Tabelle 7: Anlagenschemata für reine Warmwasserbereitung in TSol

Nr.	Anlagenbeschreibung / Einsatzzweck
1	Warmwassersystem
2	Warmwassersystem mit Schichtladevorrichtung
3	Warmwassersystem mit elektrischem Heizstab
4	Warmwassersystem mit elektrischem Heizstab und Schichtladevorrichtung
5	Warmwassersystem (2 Speicher)
6	Warmwassersystem (2 Speicher) und Schichtladevorrichtung
7	Kombispeichersystem nur für Warmwasser
8	Kombispeichersystem (Tank in Tank)
9	Pufferspeichersystem nur für Warmwasser
10	Großanlagensystem für WW mit Solar- und Bereitschaftsspeicher
11	Großanlagensystem für WW mit Bereitschaftsspeicher
12	Großanlagensystem für WW mit Bereitschaftsspeicher und Wärmeübertrager
13	Großanlagensystem für WW mit Zusatzheizung im Durchlauf

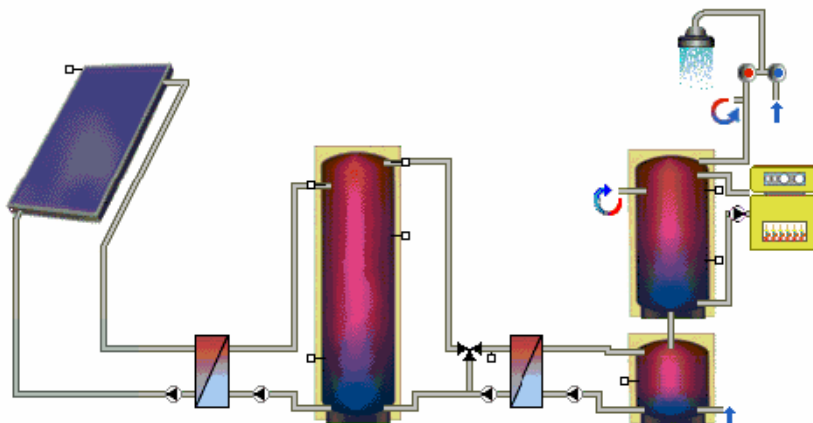


Abbildung 12: TSol Anlagenschema Nr. 10

Für die Simulationen stehen die Klimadaten von 50 Standorten in Österreich zur Verfügung. Es können aber auch importierte Klimadatensätze, die mit dem Programm Meteonorm erstellt wurden, verwendet werden.

Die Ausgabe der Ergebnisse kann in Form eines Kurzberichts, eines ausführlichen Berichts sowie in Form von Grafiken und Tabellen erfolgen. Grafiken und Tabellen können hinsichtlich der zeitlichen Auflösung in Stundenwerten, Tageswerten, Wochenwerten, Monatswerten und Jahreswerten für eine Vielzahl von Parametern definiert werden. Als wesentliche Ergebnisse stehen sämtliche Energieströme der Anlage, die wesentlichen Temperaturen im System (Kollektortemperatur, Speichertemperatur, usw.) sowie die solartechnischen Kennzahlen zur Verfügung. Die Daten können graphisch und in Tabellenform auf der Programmoberfläche dargestellt werden und zusätzlich in eine Textdatei exportiert werden, die dann von anderen Programmen weiterverarbeitet werden kann.

Polysun

Wie TSol ist auch Polysun ein Programm zur Simulation von Solaranlagen zur Brauchwasserbereitung und Raumheizungsunterstützung. Die Anzahl der verschiedenen Anlagenschemata ist etwas geringer als in TSol, aber die wichtigsten Anlagentypen sind vertreten, wie Tabelle 8 zeigt.

Tabelle 8: Anlagentypen in Polysun 3.0

Nr.	Anlagenbeschreibung / Einsatzzweck
1	Wassererwärmung (1 Speicher)
2	Wasservorwärmung (2 Speicher)
3	Wassererwärmung (1 Speicher, 2 solare WT)
4	WW + Raumheizung (Kombispeicher)
5	WW + Raumheizung (Warmwasser WT)
6	Wassererwärmung (1 Speicher, externer Solar WT)
7	Wassererwärmung (2 Speicher, externer Solar WT)
8	WW + Raumheizung (Warmwasser WT, externer Solar WT)

Das Programm arbeitet mit einer grafischen Oberfläche, auf der alle Parameter, die für die Simulation notwendig sind, eingegeben werden. Von einer Vielzahl von Standorten in Österreich stehen Wetterdaten zur Verfügung. Es können aber auch hier Daten aus dem Wetterdatengenerator Meteonorm importiert werden. Abbildung 13 zeigt die Bildschirmoberfläche von Polysun zur Eingabe der Simulationsparameter.

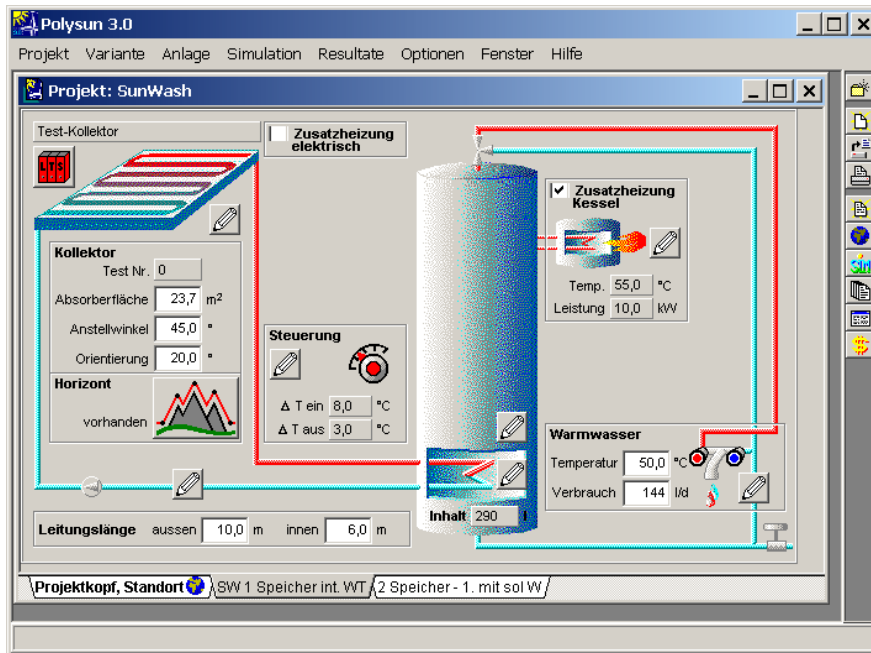


Abbildung 13: Hauptmenü Polysun

Die Ausgabe der Ergebnisse kann auf folgende Arten erfolgen:

- Ausgabe von Energiebilanzen
Jahresbilanz und Bilanzen der einzelnen Monate mit den Energiemengen für Warmwasserverbrauch, solare Energielieferung, Energie von der Zusatzheizung, Speicher- verluste, Rohrverluste, Einstrahlung auf die Kollektorfläche usw.
- Reportausgabe
Es stehen drei Formen von Reports zur Verfügung, die sich im Detaillierungsgrad un- terscheiden. Zur Auswahl stehen der Ingenieurreport, der detaillierte Report und der Präsentationsreport.

Eine Darstellung der Ergebnisse in Form von frei definierbaren Tabellen oder Grafiken, bzw. die Darstellung von Tages- oder Stundenwerten ist mit Polysun nicht möglich. Die Ausgabe der Energiebilanzen in Form von Jahres- und Monatswerten kann auch in eine ASCII Datei erfolgen, die von anderen Programmen als Eingabedatei genutzt werden kann.

3.3.2.2 SHWwiN

Das Programm wurde in den Jahren 1993 bis 1999 am Institut für Wärmetechnik der TU Graz für die Simulation von Solaranlagen zur Warmwasserbereitung und der kombinierten Warmwasserbereitung und Raumheizungsunterstützung sowie zur solaren Fernwärmeunter- stützung entwickelt.

Die folgenden vordefinierten Anlagenschemata für die Simulation der verschiedenen Anwen- dungen stehen zur Verfügung.

Tabelle 9: Anlagentypen in SHWwin

Nr.	Beschreibung des Anlagenschemas
1	Solare Brauchwassererwärmung mit Brauchwasserspeicher
2	Solare Brauchwassererwärmung mit Pufferspeicher und Durchlauferhitzer
3	Solare Brauchwassererwärmung mit 2 Speichern (Pufferspeicher und kleiner Brauchwasserspeicher)
4	Teilsolare Raumheizung, 2-Speichersystem, Heizkessel in beide Speicher
5	Teilsolare Raumheizung, 2-Speichersystem, Heizkessel nur in Warmwasserspeicher
6	Teilsolare Raumheizung, 2-Speichersystem, Heizkessel nur in Heizungsspeicher
7	Teilsolare Raumheizung, 1-Speichersystem, Heizkessel in Heizungsspeicher, Warmwasser-Durchlauferhitzer
8	Fernwärme

Sämtliche Daten der einzelnen Komponenten und auch ganzer Projekte werden in einer Datenbank gespeichert. Einmal definierte Komponenten stehen somit für alle Projekte zur Verfügung. Die Eingabe erfolgt über eine grafische Oberfläche. Es wird für jede Simulation eine Eingabedatei erstellt, die editiert werden kann. Diese Eingabedateien können auch in Batch-Programmen für Seriensimulationen eingesetzt werden. Abbildung 14 zeigt das Anlagenschema aus SHWwin, wie es für die Simulation des Fallbeispiels eingesetzt wurde.

Klimadaten können in drei verschiedenen Formaten vom Programm eingelesen werden. Es können wie bei den anderen Programmen Klimadatensätze von Meteonorm eingesetzt werden, wobei auf das richtige Format zu achten ist. Weiters können Daten, die dem Format der deutschen Testreferenzjahre entsprechen sowie ein auf dem Institut für Wärmetechnik der TU Graz ermittelter Klimadatensatz für Graz verwendet werden.

Die Ausgabedaten (Monatswerte und Jahressumme) sind in Form eines Protokolls verfügbar, das in einer Textdatei gespeichert wird und von weiteren Auswerteprogrammen verarbeitet werden kann. Das Programm SHWwin bietet auch die Möglichkeit, Diagramme in monatlicher und stündlicher Auflösung zu erstellen und zu kopieren. Als Ergebnisse werden sämtliche Energien, Einstrahlung, die Kollektorbetriebsdauer, Verluste und solare Kennwerte ausgegeben. Die Ausgabe von Stundenergebnissen erfolgt in Dateien im Microsoft Excel-Format, wobei für jeden Tag eine Datei angelegt wird.

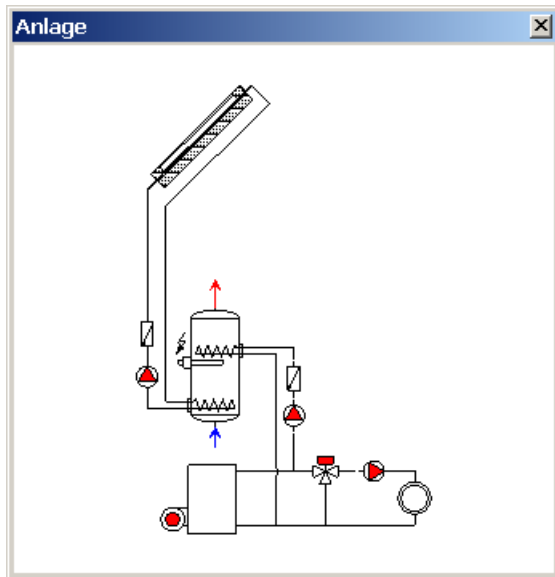


Abbildung 14: Anlagenschema Fallbeispiel SHWwin

3.3.2.3 TRNSYS

TRNSYS 15.0 (TRNSYS, 2000) – Transient System Simulation Program – ist ein Programmpaket zur Berechnung von thermischen Energieströmen und Massenströmen von definierten Systemen. TRNSYS wurde ursprünglich für die detaillierte Analyse von aktiven thermischen Solaranlagen entwickelt. Das Programm kann zur Simulation von thermischen Solaranlagen mit kombinierter beliebiger Nachheizung und beliebig definierbarem Verbrauchsprofil eingesetzt werden. Der Vorteil von TRNSYS besteht in seiner Flexibilität und der Möglichkeit, ein System sehr detailliert nachzubilden. TRNSYS ist modular aufgebaut. Es enthält eine große Anzahl von Standardkomponenten, den TYPES, die je nach Anforderung zur Nachbildung des realen Systems zusammengebunden werden können. Die offene Struktur des Programms erlaubt es dem Anwender, selbst erstellte TYPES einzubinden und vorhandene Standardkomponenten zu verändern. Jeder TYPE beschreibt die Funktionsweise einer bestimmten Systemkomponente. Das reale Betriebsverhalten der Komponenten wird in den TYPES mit mathematischen Algorithmen nachgebildet. Zur Lösung des Gleichungssystems, das sich aus den Einzelkomponenten und deren logischen Verknüpfungen im Gesamtsystem ergibt, stehen in TRNSYS verschiedene Lösungsalgorithmen zur Verfügung. Die Zeitschrittweite und die Genauigkeit, mit der simuliert wird, sind durch den Anwender wählbar. Prinzipiell können alle Eingangs- und Ausgangsgrößen jeder Komponente ausgegeben werden. Die Ausgabegrößen können zudem über definierte Zeitintervalle (Tage, Monate, Jahre) integriert werden.

Die Dateneingabe kann einerseits über eine Textdatei und andererseits über eine grafische Oberfläche (iisibat) erfolgen. Das Programm iisibat stellt eine einfachere Möglichkeit dar, die Eingabetextdatei zu definieren.

Während der Simulation kann der Verlauf der definierten Systemparameter auf einer Grafik mitverfolgt werden.

Als Ausgabedaten können alle aufgezeichneten Parameter wie Temperaturen der Ströme sowie sämtliche Energien, um das System vollständig bilanzieren zu können, in einer belie-

bigen zeitlichen Auflösung ausgegeben werden. Es können also bereits Monatswerte der Daten in die Ergebnisdatei geschrieben werden, oder es kann auch eine stundenweise Darstellung gewählt werden.

3.3.2.4 Vergleich der Ergebnisse und Eignung der Programme

Mit allen vorgestellten Programmen wurden Simulationen für eine solar unterstützte Auto- waschanlage durchgeführt, um feststellen zu können, ob die Programme für die Anwendungen der solaren Prozesswärme prinzipiell geeignet sind. Die Vorgaben an die Programme werden in Tabelle 10 wiedergegeben.

Tabelle 10: Vorgaben Fallbeispiel

Bedarf			
WW-Temperatur	60	°C	
WW-Jahresbedarf	900.000	Liter	
Energie-Jahresbedarf	52,5	MWh	
Verteilung des Bedarfs siehe Tabelle 11			
Speicher			
Anzahl der Speicher	2	Speicher	
Speicher 1	2.000	Liter	mit internen Wärmetauschern
Speicher 2	1.000	Liter	
Speichergesamtvolumen	3.000	Liter	
Dämmung	80	mm	
interner Wärmetauscher – k.A.	3.000	W/K	
Kollektorkreis			
Konversionsfaktor	0,7969		
1. Wärmeverlustkoeffizient	3,89	W/m ² .K	
2. Wärmeverlustkoeffizient	0,011	W/m ² .K ²	
Kollektornettofläche	40	m ²	
Ausrichtung	20	°	Südwest
Neigung	45	°	
Rohrlänge außen einfach	3	m	
Rohrlänge innen einfach	6	m	
Rohrdimension	32x2	mm	
Dämmung	30	mm	
Massenfluss Solarkreis	20	l/h.m ²	
Glykolkonzentration	30	%	
Zusatzheizung			
Gaskessel	100	kW	

Das Bedarfsprofil hat einen wesentlichen Einfluss auf die solaren Energiegewinne der solarthermischen Anlage. In Tabelle 11 wird die Verteilung des Bedarfs über das Jahr, die Woche und den Tag angegeben. Aufgrund der unterschiedlichen Eingabe der Daten in die Programme sind für das Tagesprofil zwei Angaben zu finden.

Tabelle 11: Bedarfsprofil Fallbeispiel

Jahresprofil Monat	Anteil am Maximalbedarf in %	Wochen- profil Tag	Anteil am Maximalbedarf in %	Tages- profil Stunde	Anteil am Maximalbedarf in %	Anteil am Gesamtbedarf in %*
Jan	100	Mo	50	1	0	0,0
Feb	100	Di	55	2	0	0,0
Mär	90	Mi	45	3	0	0,0
Apr	80	Do	53	4	0	0,0
Mai	70	Fr	80	5	0	0,0
Jun	50	Sa	100	6	0	0,0
Jul	65	So	100	7	20	1,9
Aug	70			8	32	3,1
Sep	80			9	54	5,2
Okt	90			10	83	8,0
Nov	100			11	100	9,6
Dez	100			12	90	8,7
				13	75	7,2
				14	67	6,5
				15	66	6,4
				16	68	6,6
				17	69	6,6
				18	85	8,2
				19	74	7,1
				20	70	6,7
				21	57	5,5
				22	28	2,7
				23	0	0,0
				24	0	0,0
				Gesamt		100,0

* Werte für das Tagesprofil in SHWwin

Die Vorgaben wurden, soweit möglich, in die einzelnen Programme eingegeben und die Simulationen durchgeführt. Abweichungen von den Vorgaben bei den Simulationen sowie die Ergebnisse und ein Vergleich dieser werden nachstehend angeführt.

Ergebnisse der Simulationsprogramme

Grundsätzlich konnte die Anwendung mit allen Programmen realisiert werden. Bei den Programmen TRNSYS und SHWwin wurde ein Anlagenschema mit einem Speicher anstelle von zwei Speichern eingesetzt. In beiden Fällen wurde dies aus Gründen der Einfachheit durchgeführt, da grundsätzlich die Simulation von zwei Speichern möglich ist. Die Ergebnisse der unterschiedlichen Simulationsprogramme werden in Tabelle 12 und Abbildung 15 dargestellt.

Tabelle 12: Ergebnisse der Simulationsprogramme

Parameter	TSol 4.03	Polysun 3.0	SHWwin 2.0	TRNSYS 15
Warmwasserbedarf in kWh/a	52.250	52.185	52.186	52.273
Solarenergie an Warmwasser in kWh/a	24.509	26.904	20.859	26.148
Zusatzenergie an Warmwasser in kWh/a	29.142	26.482	33.360	27.156
Globalstrahlung auf die Bezugsfläche in kWh/a	51.027	51.468	48.803	51.899
Rohrverluste in kWh/a	485	571	426	558
Speicherverluste in kWh/a	2.011	1.646	1.980	1.439
Solarer Deckungsgrad in Prozent	45,7	50,4	38,5	49,1

Es zeigt sich, dass es zu durchaus unterschiedlichen Ergebnissen kommt, die aber von einem Mittelwert für den solaren Deckungsgrad (46%) nur um +4,4%-Punkte bzw. -7,5%-Punkte abweichen. Die Unterschiede zwischen den Ergebnissen der Programme liegen zum einen bei der unterschiedlichen Definition des Lastprofils und andererseits in der Berechnung der Einstrahlung auf die Kollektorfläche. Das Programm Polysun gibt keine Möglichkeit, das Lastprofil in stündlicher und täglicher Auflösung zu definieren. Die Änderung über das Jahr wird durch den verringerten Bedarf an einem Julitag im Vergleich zu einem Januartag angegeben. Damit wird ein gleichmäßigeres Lastprofil über das Jahr simuliert, als es dem Realprofil entspricht. In der Abbildung 15 zeigt die Kurve von TSol das reale Profil. Die Definition des Profils erfolgt in TSol, SHWwin und TRNSYS in ähnlicher Weise mit Stunden-, Wochentags- und Monatswerten.

Der höhere solare Ertrag, der sich mit Polysun ergibt, kann durch das Lastprofil erklärt werden. Durch den höheren Bedarf im Sommer kann die Solaranlage in dieser Zeit mehr Energie liefern. Weiters ist das tägliche Bedarfsprofil bzw. wöchentliche Profil in Polysun nicht in der gleichen Art wie für die anderen Programme definiert. Die täglichen Schwankungen summieren sich über das jeweilige Monat bzw. Jahr auf und tragen so zu den höheren solaren Energiegewinnen bei.

Ein weiterer Unterschied besteht in der Berechnung der Strahlung in der Kollektorebene. Hier zeigen sich für SHWwin geringere Einstrahlungswerte über das Jahr, als für die anderen Programme. Polysun berechnet die höchste Einstrahlung in die Kollektorebene. Zu beachten ist, dass für alle Programme ein Klimadatensatz von Graz mit dem Programm Meteonorm erstellt wurde, d.h. die Programme die gleiche Datenbasis aufweisen.

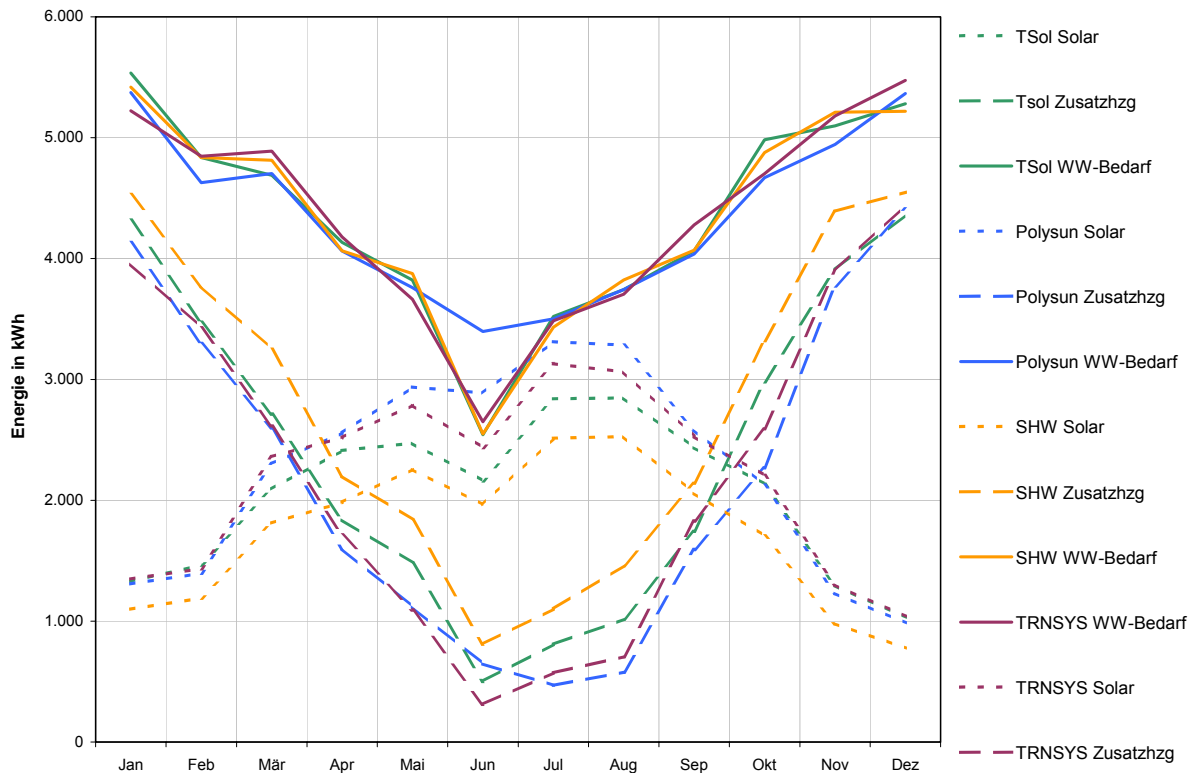


Abbildung 15: Ergebnisse der Simulationsprogramme

Die Abbildung zeigt den Vergleich der Ergebnisse der einzelnen Simulationsprogramme. Es werden der Warmwasserbedarf (WW-Bedarf), die Energieerträge der Solaranlage in den Speicher (Solar) und die Einträge der Zusatzheizung in den Speicher (Zusatzhzg) dargestellt.

Auf der folgenden Seite gibt Tabelle 13 eine Übersicht der verglichenen Solarsimulationsprogramme mit einer Beschreibung der wesentlichen Funktionen.

Tabelle 13: Übersicht Solarsimulationsprogramme

Nr.	Programm-name	Kurzbeschreibung	Wetterdaten Eingabeformat	Lastprofil Eingabemöglichkeit	Ausgabe von Ergebnissen	Ausgabeformat Ergebnisse
1	TRNSYS	Modulares Simulationsprogramm. System muss aus vorhandenen oder selbst programmierten Komponenten zusammengestellt werden. Programmieren im Texteditor oder grafischer Oberfläche (iisibat)	Große Anzahl an Datensätzen weltweit vorhanden, Daten von Meteororm oder anderen Quellen können verwendet werden. Zeitliche Auflösung beliebig (meist wird 1 Stunde verwendet)	Frei programmierbar	Beliebig wählbar	Als Textdatei, zeitliche Auflösung beliebig wählbar
2	Tsol 4.03	Programm mit grafischer Oberfläche; viele vorgegebene Systemvarianten, keine eigenen Varianten definierbar; Kollektoren nicht selbst definierbar (Leistung)	Große Anzahl an Datensätzen für A, D bzw. Importmöglichkeit von Meteororm-Datensätzen. Zeitliche Auflösung 1 Stunde	Eingabe per Hand. Tages-, Wochen-, Jahresprofil. Zeitliche Auflösung 1 Stunde. 1 Zieltemperatur	Sämtliche Energien und Verluste -> Bilanz möglich. Verschiedene Systemtemperaturen (Kollektor, Speicher, WW, usw.)	Als Grafik und Tabelle, Tabellendaten sind in Excel kopierbar. Zeitliche Auflösung 1 Stunde
3	Polysun 3.0	Programm mit grafischer Oberfläche; vorgegebene Systemvarianten, keine eigenen Varianten definierbar; Kollektoren selbst definierbar (Leistung)	Große Anzahl an Datensätzen für A, D bzw. Importmöglichkeit von Meteororm-Datensätzen. Zeitliche Auflösung 1 Stunde	Eingabe per Hand; drei grundsätzliche Profile vorgegeben; Tagesbedarf, Temperatur sowie geringerer Bedarf im Juli im Vergleich zu Jänner definiert Jahresgang. Zeitliche Auflösung 1 Stunde; 1 Zieltemperatur	Sämtliche Energien und Verluste -> Bilanz möglich. Zeitliche Auflösung 1 Monat	Nur in Form von fix vorgegebenen Berichten Die Monatsergebnisse der Energien liegen in Form einer Textdatei vor.
4	SHWwin	Programm mit grafischer Oberfläche; vorgegebene Systemvarianten, keine eigenen Varianten definierbar; Kollektoren selbst definierbar (Leistung). Eingabedaten werden in einer editierbaren Datei gespeichert.	Importmöglichkeit von Datensätzen aus Meteororm, im Format der deutschen Testreferenzjahre bzw. in einem Format, das vom Institut für Wärmetechnik TU Graz entwickelt wurde. Zeitliche Auflösung 1 Stunde	Muss über Dialog händisch eingegeben werden. Tages-, Wochen-, Jahresprofil. Zeitliche Auflösung 1 Stunde. 1 Zieltemperatur	Sämtliche Energien und Verluste -> Bilanz möglich. Verschiedene Systemtemperaturen (Kollektor, Speicher, WW, usw.)	Als Textdatei; zeitliche Auflösung monatsweise Tagesdateien mit stündlicher Auflösung können erstellt werden. Diese sind von Tabellekalkulationsprogrammen verarbeitbar.

In der folgenden Tabelle sind die Anforderungskriterien für die Simulation von solaren Prozesswärmeanwendungen und die Erfüllung durch das jeweilige Programm angegeben.

Tabelle 14: Bewertungsmatrix Solarsimulationsprogramme

Anforderung	TRNSYS 15	TSol 4.03	Polysun 3.0	SHWwin 2.0
Wetterdaten in stündlicher Auflösung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Wetterdaten aus Klimadatengenerator verwendbar	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Bedarfsprofil – Monatsaufteilung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Bedarfsprofil – Wochentagsaufteilung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Bedarfsprofil – Stundenaufteilung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Anlagenschema frei definierbar (*)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anlagenschema ohne Speicher (*)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Eingabeparameter in Textdatei	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Großanlagen simulierbar (> 200 m ²)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Kaltwassertemperaturen > 40°C (Prozessrücklauf)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Ausgabe – Energien für Bilanzierung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Ausgabe – Systemtemperaturen	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Ausgabe – Monatssummen	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Ausgabe – Tagessumme	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Ausgabe – Stundenauflösung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Ausgabe – Stundenauflösung in Textdatei	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Fallbeispiel SunWash simulierbar	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Simulation aus Batch-Datei aufrufbar (*)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

(*) nicht unbedingt notwendige Bedingung

In Tabelle 14 wird jede erfüllte Anforderung durch ein Programm mit gekennzeichnet, während nicht erfüllte Bedingungen durch markiert sind. Es zeigt sich, dass die Programme TRNSYS, TSol und SHWwin für die Simulation von solaren Prozesswärmeanwendungen geeignet sind. Das Programm Polysun wird aufgrund der nicht detailliert möglichen Eingabe des Bedarfsprofils und der Weiterverarbeitbarkeit bzw. dem Nichtvorhandensein von Detailergebnissen als eingeschränkt geeignet angesehen. Zukünftige Versionen können aber die notwendigen Anforderungen erfüllen und können dann eingesetzt werden.

Für strengere Anforderungen, wie die Seriensimulation, was eine Editierbarkeit von Eingabedateien und die Aufrufbarkeit einer ausführbaren Datei (exe-Datei) durch ein Stapelverarbeitungsprogramm (batch-datei) bedingt, bleiben die Programme TRNSYS und SHWwin in der Auswahl. Für die Umsetzung von Anlagenschemata ohne Speicher, was einer Direktintegration von Solarwärme in einen Produktionsprozess entspricht, kann nur das Programm TRNSYS verwendet werden. Somit kann folgende Klassifizierung der Programme vorgenommen werden:

- TRNSYS sehr gut geeignet
- TSol gut geeignet
- Polysun eingeschränkt geeignet
- SHWwin gut geeignet

Für weitere Arbeiten im Rahmen des Projekts werden damit die Programme TRNSYS und SHWwin, sowie für Anwendungen ohne Stapelverarbeitung zusätzlich TSol empfohlen.

3.4 Fallstudien

Fast alle industriellen Prozesse benötigen Wärmeenergie, welche in den meisten Fällen unabhängig vom benötigten Temperaturniveau mittels Dampf oder Heißwasser zugeführt wird. Im Temperaturbereich unter 100°C kann Wärmeenergie durch Flachkollektoren bei entsprechender Sonneneinstrahlung ausreichend bereitgestellt werden. In industriellen Anwendungen stellt die Solarenergie aufgrund von diversen externen Einflussfaktoren meist nur einen Teil der benötigten Energiemenge bereit. Wie und wo diese Energie dem Prozess zugeführt werden kann, erfordert weitaus mehr Planung als bei herkömmlichen Energieversorgungssystemen. Die Integration von solarthermischer Energie in industrielle Prozesse ist also eine Herausforderung sowohl für den Solarexperten als auch für den Prozessingenieur.

Vor den Überlegungen zum Einsatz von Solarenergie sollen alle anderen energetisch, finanziell und organisatorisch sinnvollen Möglichkeiten zur internen Energierückgewinnung genutzt werden. Zur Analyse der vorhandenen Anlagen kann die Pinch-Methode eingesetzt werden.

Folgende Schritte, die im Weiteren an Hand der drei Fallstudien näher beschrieben werden, sind bei der Analyse der optimalen Integration solarthermischer Anlagen in bestehende Wärmeversorgungssysteme zu unternehmen:

- Systematische Erfassung der Energieströme
- Berechnung des minimalen theoretischen Heiz- bzw. Kühlbedarfs
- Ermittlung des Wärmebedarfs, der sinnvoll solarthermisch gedeckt werden kann
- Auslegung eines Wärmetauschernetzwerks
- Auslegung einer solarthermischen Anlage
- Wirtschaftlichkeitsanalyse

3.4.1 Berglandmilch

Sitz der Unternehmensleitung und Zentrale der Berglandmilch reg.Gen.m.b.H. ist in Pasching in Oberösterreich. Die dargestellten Überlegungen beziehen sich auf den Standort Voitsberg.

In den letzten zwei Jahren wurden in den Ausbau der Käserei in Voitsberg 25 Mio. Euro investiert. Damit konnte die Jahresproduktion auf 15.000 Tonnen mehr als verdoppelt werden.

Verarbeitet wird in Voitsberg ausschließlich österreichische Rohmilch aus der Steiermark und dem südlichen Burgenland. Um einen Kilogramm Käse herzustellen, benötigt man in etwa 10 kg Milch.

Der Betrieb wurde bereits 1993 als erstes milchwirtschaftliches Unternehmen Österreichs nach ISO 9001 zertifiziert, weitere Zertifizierungen sind: ISO 9001 (seit 1993); ISO 14001 (seit 1998); SCC (Arbeitssicherheit); AQA (Austrian Quality Award seit 1998)

Das Hauptprodukt in Voitsberg ist Käse, eingeteilt nach den „Schärdinger“-Geschmackswelten:

- „Mild-fein“: Schloosdamer; Käse nach Holländerart, Gouda und Toastkäse
- „G’schmackig-mild“: Amadeus, Tilsette
- „Würzig-kraftig“: Moosbacher, Dachsteiner, St. Patron, Raclette, Bergfex, Alpzirler, Le Rose, Asmonte

Nebenprodukte sind Süßrahm, Magermilch und Molkekonzentrat.

3.4.1.1 Ermittlung der relevanten Energieströme ausgehend von den Prozessen in den Käsefertigern

Milchlinie

Rahmlinie

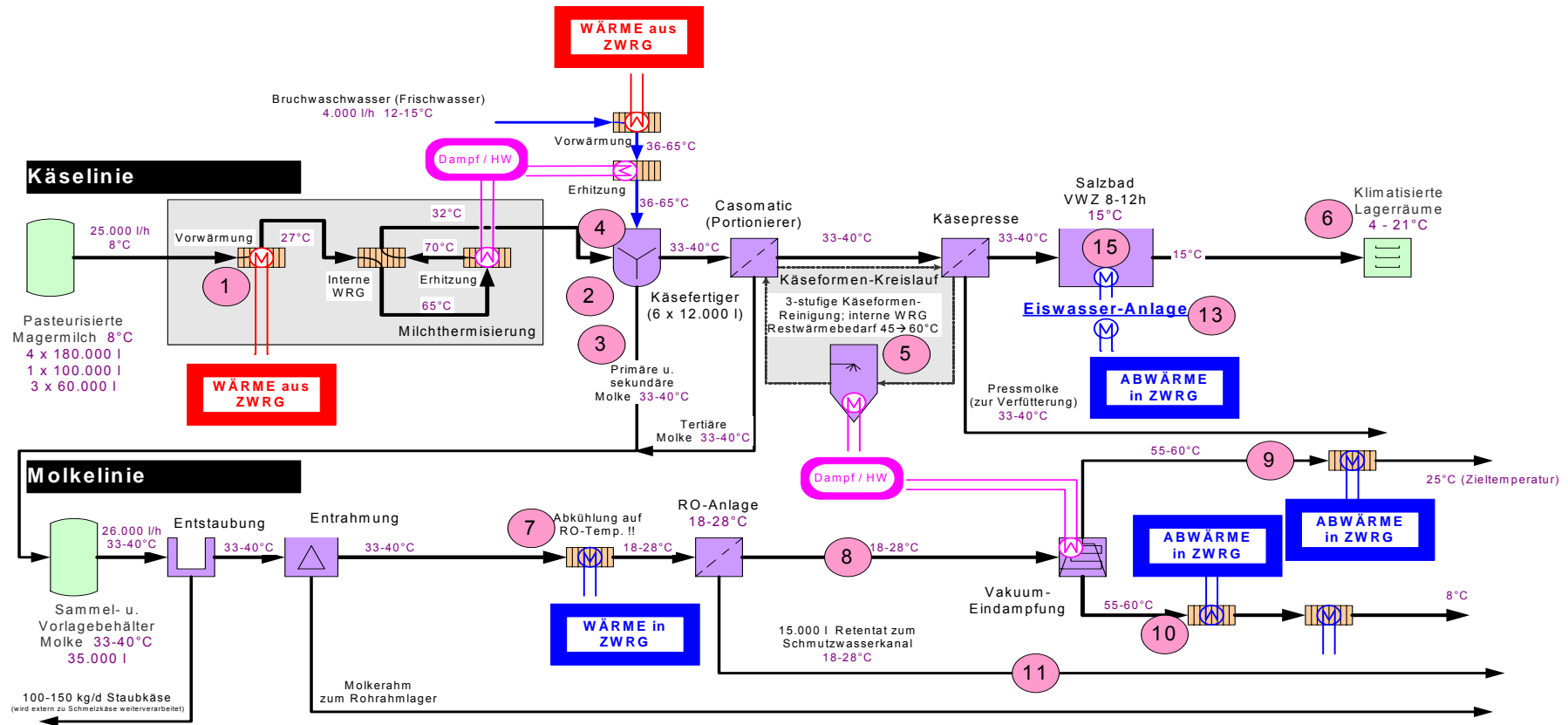


Abbildung 16: Fließschema Käseproduktion (Ziffern bedeuten die Stromnummern)

Über betriebsinterne Aufzeichnungen und diverse Messungen konnte der IST-Zustand der Käsefertigung mittels Fließbild und Sankey-Diagramm dargestellt werden.

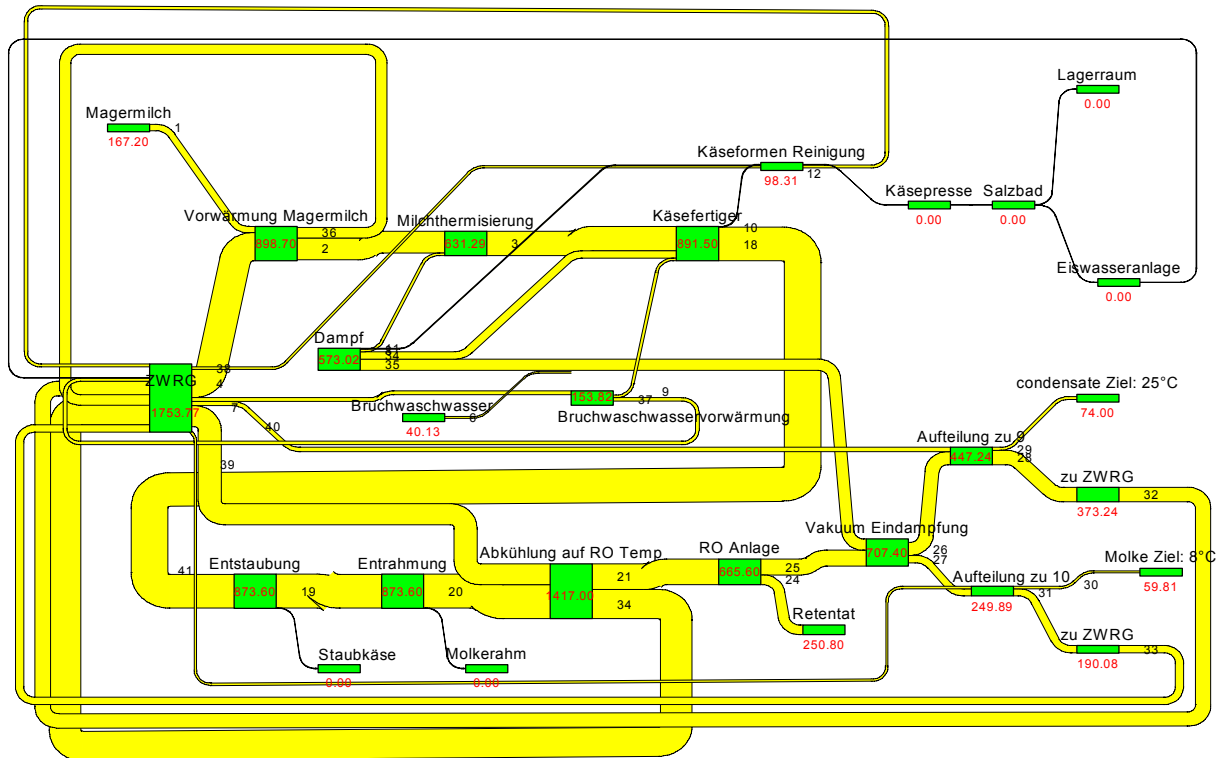


Abbildung 17: Sankey-Diagramm der Käseproduktion

Dies ermöglicht eine genaue Beschreibung der wärmerlevanten Prozesse in und nach der Käsefertigung.

Vorwärmung in der Milchthermisierung (2- bzw. 3-stufig) im Plattenwärmetauscher

In diesem Schritt wird die pasteurisierte Milch kurz auf ca. 70 °C erhitzt und dann auf die optimale Temperatur für den Käsefertiger (ca. 30–35 °C) gekühlt. Die Wärmeübertragung wird in einem Plattenwärmetauscher mit drei Registern (Vorwärmungsregister, Wärmerückgewinnungsregister, Erhitzungsregister) realisiert, wobei das erste Register (Vorwärmung aus externer Wärmerückgewinnung) über den zentralen Großwärmeschichtspeicher (100 [m³]) betrieben wird. Im zweiten Register (interne Wärmerückgewinnung) wird die kalte bzw. vorgewärmte Milch weiter erwärmt und kühlt dabei die heiße Milch auf die optimale Temperatur für den Käsefertiger ab.

Ohne Vorwärmung wird die Milch aus dem Fertigmilchlager im Wärmerückgewinnungsregister von 8°C auf ca. 46°C erwärmt und die heiße Milch von 70°C auf ca. 32°C abgekühlt. Im eigentlichen Erhitzungsschritt wird mittels Heißwasser die Milch von ca. 46°C auf 70°C gebracht, die Temperaturdifferenz beträgt 24 K.

Die Temperaturdifferenz im Wärmetauscher ist entscheidend für die Leistung, also die übertragene Wärmemenge je Zeiteinheit bzw. Austauschfläche. Bei Plattenwärmetauschern kann auch mit einer Temperaturdifferenz von 5 K oder etwas weniger eine ansprechende Leistung erzielt werden. Um möglichst wenig Energie für den Erhitzungsschritt einsetzen zu müssen, kann die Milch aus dem Fertigmilchlager vorgewärmt werden, allerdings maximal von 8°C

auf 27°C, damit zur gewünschten Austrittstemperatur von 32°C der Milch für den Käsefertiger eine Temperaturdifferenz von 5 K eingehalten wird.

Die Milch wird im optimalen Fall (minimaler Energieeinsatz) im Vorwärmerregister von 8°C auf 27°C, im internen Wärmerückgewinnungsregister von 27°C auf 65°C und schließlich im Heizregister von 65 auf 70°C aufgeheizt, danach wieder im internen Wärmerückgewinnungsregister auf ca. 32°C abgekühlt. Die notwendige Heizenergie muss nur noch für eine Erwärmung um 5°C aufgebracht werden.

Wandbeheizung Käsefertiger

Die dampfbetriebene Wandheizung der Käsefertiger dient im Wesentlichen dazu, die Abstrahlverluste ausgleichen, in seltenen Fällen erfolgt auch eine Aufheizung am Beginn oder während der Prozesskette im Käsefertiger. Der Energieaufwand dafür ist im Verhältnis zu den anderen Energieströmen so gering, dass er in den weiteren Betrachtungen vernachlässigt wird.

Reinluftzufuhr Käseküche

Nachwärmung der zugeführten Frischluft, die für die Herabsetzung der Luftfeuchtigkeit gekühlt worden ist; Zieltemperatur 25 [°C].

Vor-/Erwärmung des Bruchwaschwassers

Nach dem ersten Abziehen von Molke direkt aus dem Käsefertiger wird diesem das Bruchwaschwasser zugeführt. Dieses Frischwasser (12–14 [°C]) muss je nach Käsesorte auf ca. 35 bis 65 [°C] vorgewärmt werden, auch die zugeführte Menge differiert je nach Käsesorte zwischen ca. 3 und 30 % der eingesetzten Milchmenge, durchschnittlich sind es ca. 10 %.

Dieser Prozess scheint besonders geeignet für einen direkten Einsatz von solar erwärmtem Wasser.

Vor-/Erwärmung Waschwasser Käseformenreinigung

Die Reinigung der Käseformen erfolgt in 3 Stufen, einer Vorspülung mit dem Wasser aus der Nachspülung, einer Waschstufe mit Chemikalien und einer Nachspülung, für die wiederum erhitztes Frischwasser (65 [°C]) eingesetzt werden muss, allerdings muss dieses nur noch von 45 [°C] weg erwärmt werden, da es über interne WRG bereits vorgewärmt ist.

Abwärmenutzung aus Molkeaufbereitung (vor der RO-Anlage muss die entstaubte, entrahmte und anschließend pasteurisierte Molke auf 12 [°C] abgekühlt werden)

Die Molke aus dem Käsefertiger (1. und 2. Ablauf) und aus der Casomatic (Formen Befüllen) wird gesammelt und in einem Separator entstaubt (pro Tag fallen ca. 100 bis 150 [kg] Staubkäse an, die an einen Schmelzkäse-Hersteller weitergeliefert werden) und entrahmt. Der Molkerahm wird wieder der Käseproduktion zugeführt (für einige Käsesorten). Danach wird die Molke pasteurisiert und muss dann auf ca. 12 [°C] abgekühlt werden, um einen einwandfreien Betrieb der RO-Anlage (Reverse Osmosis = Umkehrosmose) gewährleisten zu können. Bei höheren Temperaturen kommt es sonst zu biologischen Aktivitäten an den Membranen. Zurzeit wird bei höheren Temperaturen (32–42 [°C]) und sehr großen Durchsätzen gearbeitet.

Dieser Prozessschritt entspricht einem ersten Aufkonzentrieren der Molke, das Permeat wird zur Eindampfanlage weitergeleitet, das Retentat, also das abgetrennte Wasser, wird der Kläranlage zugeführt.

Vorwärmung der kalten aufkonzentrierten Molke (nach RO-Anlage) vor Eindampfung

Die aus der RO-Anlage austretende vorkonzentrierte Molke sollte vor der Eindampfung aufgewärmt werden bzw. zu Kühlzwecken eingesetzt werden. Sowohl diese als auch die wässrige Phase aus der RO-Anlage könnten auch direkt mit der vor der RO-Anlage abzukühlenden Molke Wärme austauschen.

Abwärmenutzung aus Brüdenkondensat (Brüdeneindampfung)

Die in der Molkeindampfung kondensierten Brüden haben eine Temperatur von ca. 55–60 [°C]. Zieltemperatur für die Abkühlung sind ca. 25 [°C], der Grenzwert für die Einleitung in die Kainach beträgt 30 [°C].

Abwärmenutzung aus Molkekonzentrat (Brüdeneindampfung)

Das Molkekonzentrat fällt bei gleichen Temperaturen wie das Brüdenkondensat an (ca. 55–60 [°C]). Allerdings muss dieser Produktstrom auf Lagertemperatur heruntergekühlt werden, das sind ca. 8 [°C].

Abwärmenutzung der Eiswasseranlage (gab es in anderer Form auch schon bisher)

Die Eiswasseranlage produziert Eiswasser mit einer Temperatur von ca. 0,5 bis 1 [°C]. Die Temperatur des Rücklaufs beträgt je nach Prozess ca. zwischen 8 und 12 [°C]. Die bei der Kühlung mittels Ammoniak-Anlage entstehende Abwärme wurde bisher in einen 5 [m³]-Speicher bei ca. 50 [°C] geleitet, mit Inbetriebnahme des 100 [m³]-Puffers wurde diese Abwärmenutzung in das neue System integriert.

Vor-/Erwärmung des Heißwassers für die Außenreinigung

Alle Apparate und Anlagenteile (gesamte Verrohrung, Wärmetauscher, etc.) werden innen vollautomatisch durch so genannte CIP-Anlagen (CIP = Clean In Space) gereinigt. Nach Spülung mit Wasser werden erhitzte Säure und/oder Base (Kreislaufführung mittels Vorlagebehältern) eingesetzt, abschließend wird wieder mit Wasser gespült, wobei dieses Nachspülwasser gesammelt und im nächsten Reinigungsprozess wieder zur Vorspülung eingesetzt wird, erst dann wird es zur Kläranlage geleitet.

Für die Außenreinigung der Anlagenteile und Apparate gibt es in allen Bereichen Heißwasserstationen mit Lanzen und Bürsten, die ungefähr bei 65 [°C] betrieben werden. Auch dieses Wasser muss „lebensmittelecht“ sein, es muss also Frischwasser eingesetzt werden, das von ca. 12–14 [°C] aufzuheizen ist.

Kühlung des Salzbad

Dieser Prozess wird auf Grund der tiefen Temperatur (15 [°C]) aus dem Bereich der ZWRG eher ausgeschlossen bleiben müssen.

In den folgenden energiespezifischen Betrachtungen wird eine optimale interne Energierückgewinnung (Abwärmenutzung) für die Prozesse der Käsefertigung angestrebt. Einige sehr energieaufwändige Prozesse (Milch, Rahm und Molke Pasteurisieren, 7 CIP-Reinigungs-

kreise, Klimatisierung Käselager, Kühlung Salzbad) werden in diesen Betrachtungen nicht berücksichtigt, da sie entweder bereits intern optimiert sind (z.B. 92 % Wärmerückgewinnung in der Milchpasteurisierung) oder für die Nutzung als Wärmequelle bzw. -senke in der neuen WRG⁴-anlage (100 [m³]-Schichtpufferspeicher, Warm-/Kaltwassernetz, Wärmetauscher in den Wärmequellen und -senken) nicht in Frage kommen, weil das Temperaturniveau und/oder die Energiedichte nicht mit dem WRG-System kompatibel ist.

Folgende Prozesse werden aktuell im WRG-System eingesetzt:

- Vorwärmung in der Milchthermisierung
- Vor-/Erwärmung des Bruchwaschwassers
- Vor-/Erwärmung des Heißwassers für die Außenreinigung
- Abwärmenutzung der Eiswasseranlage (gab es in anderer Form auch schon bisher)
- Abwärmenutzung aus Brüdenkondensat
- Abwärmenutzung aus Molkekonzentrat
- Abwärmenutzung aus Molkeaufbereitung (vor der RO-Anlage muss die entstaubte und entrahmte Molke auf 12 [°C] abgekühlt werden)

Folgende Prozesse und Wärmeströme werden ebenfalls in die energetischen Überlegungen einbezogen, um weitere Optimierungspotenziale auffinden zu können:

- Vor-/Erwärmung Waschwasser Käseformenreinigung
- Vorwärmung der kalten aufkonzentrierten Molke (nach RO-Anlage) vor Eindampfung
- Solaranlage als direkte Wärmequelle für den Pufferspeicher (eventuell auch nach direktem Einsatz in der Vor-/Erwärmung des Bruchwaschwassers und/oder des Heißwassers zur Außenreinigung)

Folgende Prozesse werden nicht in die energetischen Überlegungen einbezogen, da bereits eine interne Wärmerückgewinnung durchgeführt wird oder aber Temperaturniveau und/oder Energiedichte nicht mit dem neuen WRG-System kompatibel sind:

- Milchpasteurisierung
- Rahmpasteurisierung
- Molkepasteurisierung
- CIP-Reinigungskreise
- Klimatisierung Käselager
- Kühlung Salzbad
- Kühlung Rohmilch, Rahm, entrahmte Milch

Die Käsefertigung ist ein typischer Batch-Prozess. Bei der Firma Berglandmilch läuft jedoch 6-mal derselbe Prozess parallel und zeitversetzt so ab, dass die Ströme praktisch als kontinuierlich betrachtet werden können. Weiters wird bei einem Energiebedarf und einem

⁴ WRG wird im Weiteren als Abkürzung für Wärmerückgewinnung benutzt.

3-Schicht-Betrieb wie diesem die mögliche solare Energieabdeckung immer nur einen kleinen Teil des Gesamtenergiebedarfs ausmachen, so dass in diesem Fall der Batch-Charakter der Käseerzeugung für die Berechnungen in den Hintergrund tritt und wie gewohnt kontinuierlich gerechnet wird. Das Prozesslaufschema zeigt Abbildung 16,

Tabelle 15 zeigt die betrachteten Ströme.

Tabelle 15: Zusammenfassung der Ströme bei Berglandmilch

Nr.	Apparat / Prozess	Strom	Durchsatz	Wärmekapazität	Anfangstemp.	Endtemp.	mcp
			kg/s	[kJ/kgK]	[°C]	[°C]	[kW/K]
1	Milchthermisierung	Milch wird vorgewärmt	6,944	3,77	8	27	26,181
			0,031	4,19	12	36	0,131
			0,313	4,19	12	50	1,309
4	Käsefertiger	Bruchwaschwasser	0,108	4,19	12	60	0,451
			0,313	4,19	12	65	1,309
		Summe	0,764	4,19	12	57,0	3,201
7	WT vor RO-Anlage	Molke pasteurisiert	7,014	4	42	12	28,056
9	Molke-Vakuum-Eindampfung	Brüdenkondensat	1,889	4	60	25	7,556
10		Molkekonzentrat	1,080	4	60	8	4,319
13	Eiswasseranlage	Abwärme (Kühlwasser)	1,667	4,19	40	15	6,983
14	Außenreinigung	Wasser wird erhitzt	1,389	4,19	12	65	5,819
5	Reinigung Käseformen	Spülwasser	0,694	4,19	45	60	2,910
8	WT nach RO-Anlage	Molke vorkonzentriert	2,969	4	12	50	11,875
11	zusätzl. WT	Retentat aus RO-Anlage	4,045	4	12	25	16,181

Bei der Betrachtung der Stromtabelle und des Prozesslaufschemas ist auffällig, dass die Größe der Ströme sehr unterschiedlich ist. Dies macht sich in der Pinch-Analyse auch insofern bemerkbar, dass bei gleichzeitiger Berücksichtigung aller Ströme die verwendeten Programme keinen einheitlichen Pinch-Punkt für alle Ströme finden. Aus diesen Überlegungen wurden drei Varianten gewählt und für jede der Varianten eine wärmetechnische Optimierung anhand der Pinch-Methode berechnet. Aus diesen Berechnungen ergibt sich dann auch ein möglicher Einspeisepunkt für die thermische Solarenergie:

Variante 1

Bei dieser Variante werden die beiden Ströme Milchthermisierung (1) und der Molkestrom (7) zu dem Wärmetauscher, der die Molke vor der Umkehrosmoseanlage abkühlt, getrennt vom Rest betrachtet. Da der Strom 1 gewärmt und der fast gleich große Strom 7 gekühlt werden muss, kann zwischen diesen Strömen ein direkter Wärmetausch in Betracht gezogen werden. Der mögliche Wärmetausch über die Ströme 4, 5, 8, 9, 10, 11, 14 wird mit Hilfe der Pinch-Theorie berechnet. Für diese Berechnungen wird sowohl das Freewareprogramm

HINT als auch SuperTarget herangezogen. Die Ergebnisse der beiden Programme decken sich. Für eine für Niedertemperaturprozesse typischen Temperaturdifferenz $\Delta T = 5$ K erhält man:

Pinch-Temperatur: 287 K

Minimaler theoretischer Wärmebedarf: 700 kW

Minimaler theoretischer Kühlbedarf: 39 kW

Ein mögliches Wärmetauschernetzwerk zeigen Abbildung 18 und Abbildung 19

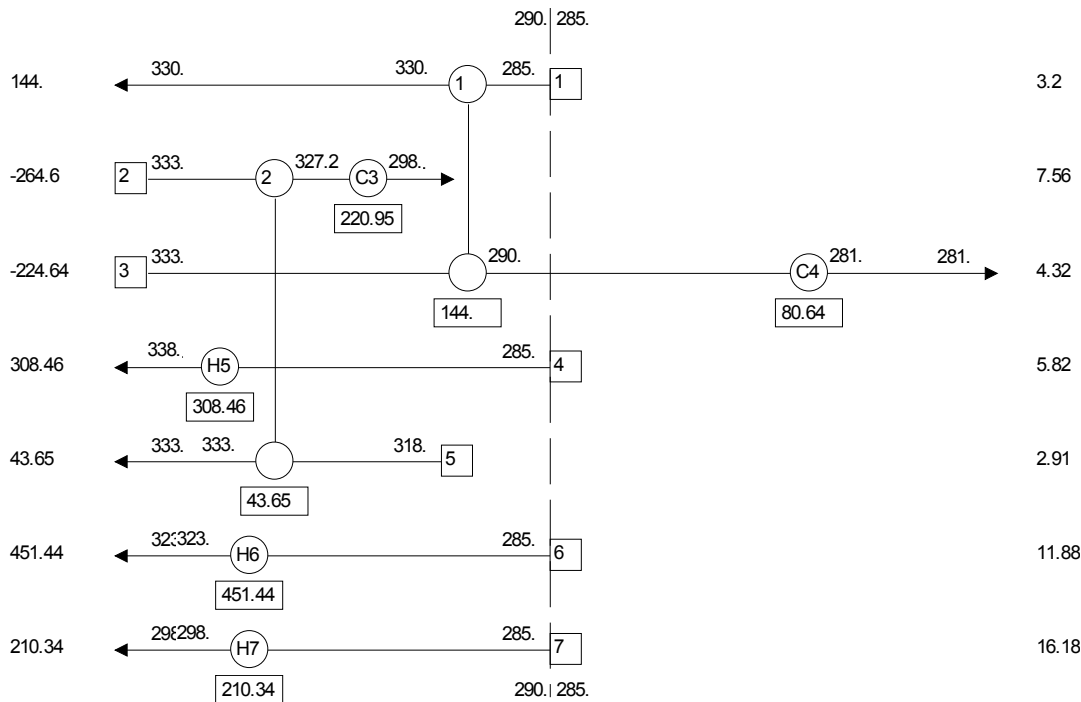


Abbildung 18: Wärmetauschernetzwerk für die Variante 1, berechnet und konstruiert mit Hilfe von HINT

Die Stromnummern decken sich nicht, da HINT durchnummeriert, daher folgende Zuordnungstabelle:

1. Käsefertiger (in Tabelle 1 Strom Nummer 4)
2. Vakuumverdampfer Brüdenkondensat(9)
3. Vakuumverdampfer Molkekonzentrat (10)
4. Außenreinigung(14)
5. Reinigen Käseformen (5)
6. Vorkonzentrierte Molke (8)
7. Retentat RO (11)

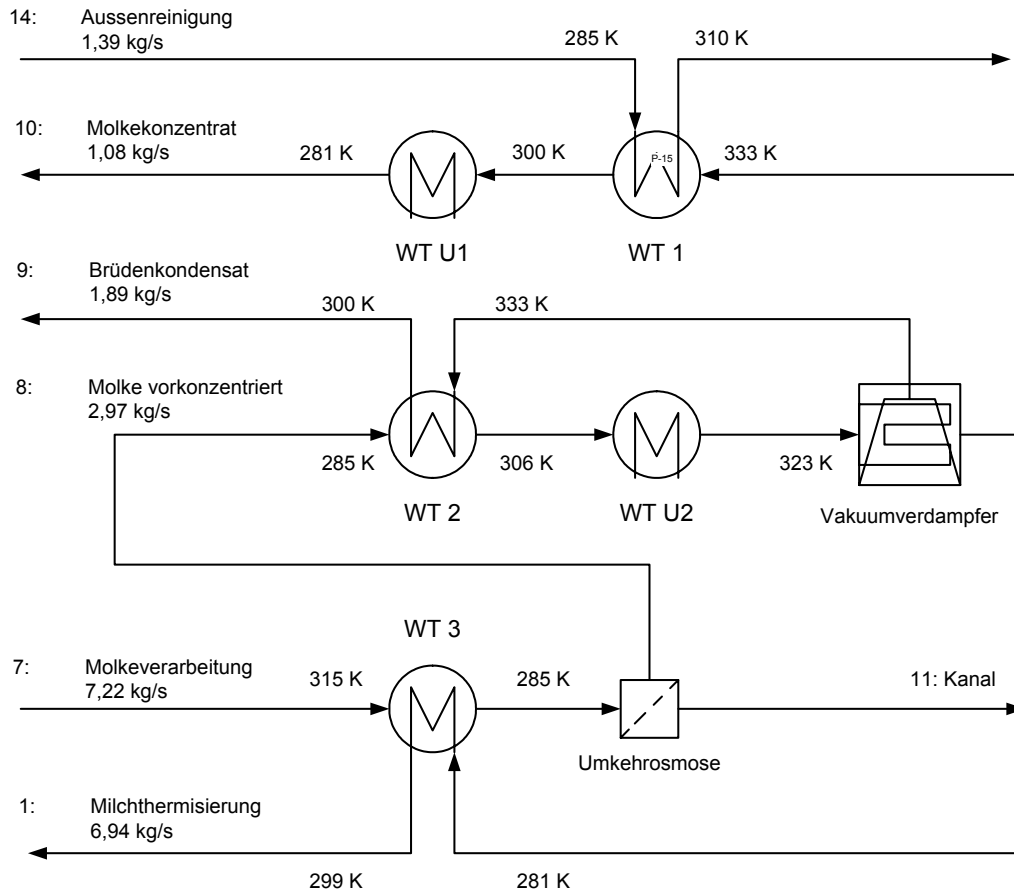


Abbildung 19: Mögliches Wärmetauschernetzwerk für die Variante 1

Diese Abbildung zeigt auch den direkten Wärmetausch zwischen Strom 1 und Strom 7 durch WT 3, der bei der Pinch-Berechnung nicht berücksichtigt wurde. Die Wärmetauscher WT Ux stellen zusätzliche Heizung und Kühlung bereit (utilities).

Variante 2

Bei dieser Variante werden nur die Ströme bei der Verarbeitung der Molke berücksichtigt (7, 8, 9, 10, 11). Der Molkestrom wird in einer Umkehrosmoseanlage konzentriert, eine weitere Aufkonzentration erfolgt in einem Vakuumverdampfer. Aus prozesstechnischen Gründen muss der Molkestrom vor der Umkehrosmose gekühlt werden, um dann im Vakuumverdampfer wieder aufgeheizt zu werden. Eine Pinch-Analyse über diese Ströme wurde wieder sowohl mit HINT als auch mit SuperTarget durchgeführt. Bei einer Temperaturdifferenz von $\Delta T = 10 \text{ K}$ erhält man:

Pinch-Temperatur: 310 K

Minimaler theoretischer Wärmebedarf: 300 kW

Minimaler theoretischer Kühlbedarf: 560 kW

Variante 3

Hier werden die Ströme von und zur Umkehrosmose (7, 8, 11) und die Ströme 1, 10, 14 und 9 getrennt voneinander berechnet. Über beide Teilprobleme wird eine Pinch-Analyse durchgeführt. Das Ergebnis für die Ströme 7, 8 und 9 ist

Pinch-Temperatur: 313 K

Minimaler theoretischer Wärmebedarf: 365 kW

Minimaler theoretischer Kühlbedarf: 140 kW

Und für die Ströme 1, 9, 10, 14

Pinch-Temperatur: 286 K

Minimaler theoretischer Wärmebedarf: 550 kW

Minimaler theoretischer Kühlbedarf: 45 kW

Ein mögliches Wärmetauschernetzwerk, das die beiden separaten Teile verbindet, zeigt Abbildung 20.

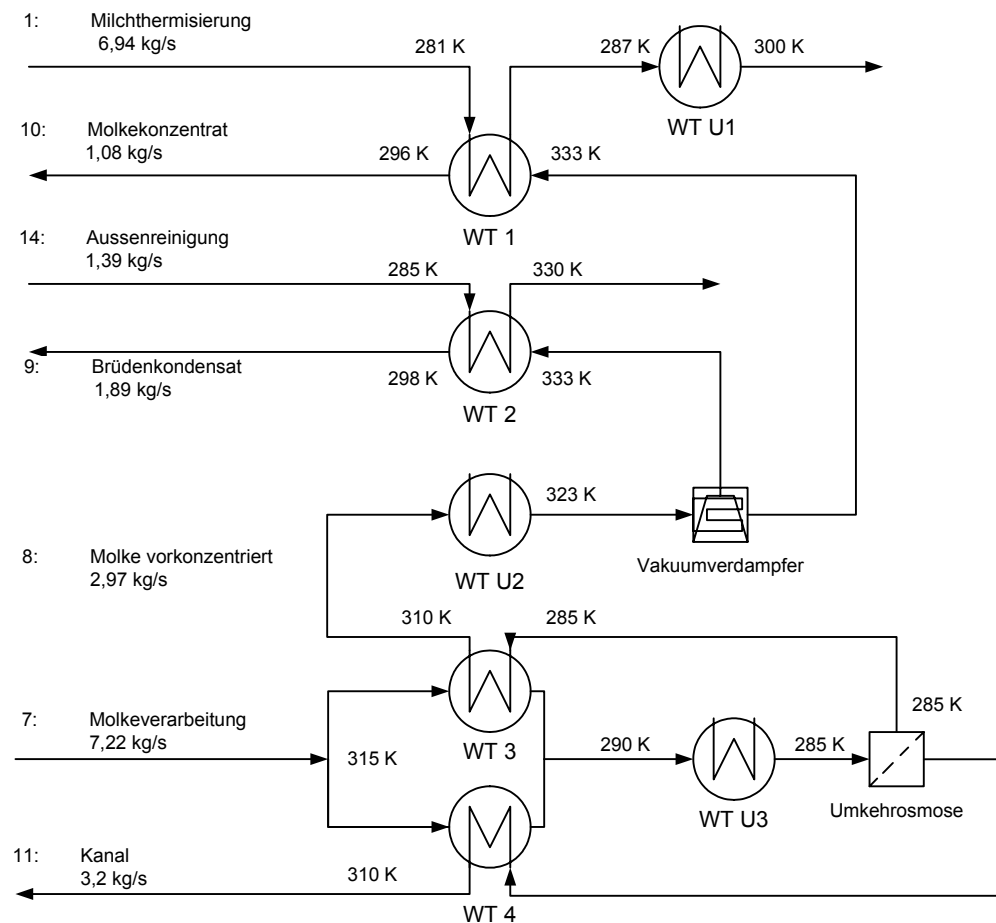


Abbildung 20: Ein mögliches Wärmetauschernetzwerk für die Variante 3 bei Berglandmilch. Die Wärmetauscher WT Ux stellen zusätzliche Heizung und Kühlung bereit (utilities).

3.4.1.2 Solarintegration

Nach der vorhergehenden Pinch-Analyse erweist sich die Erwärmung des Käsewaschwassers als die optimale Einsatzmöglichkeit für eine solarthermische Anlage. Mit 12°C Kaltwassertemperatur steht das niedrigstmögliche Niveau für die Solaranlage zur Verfügung und ermöglicht somit höchste solare Erträge. Das Bedarfsprofil lt. Tabelle 16 wurde von Berglandmilch erhoben:

Tabelle 16: Bedarfsprofil Käsewaschwasser

Vorwärmung Käsewaschwasser	
Wasserbedarf	4000 Liter/h
Starttemperatur	12 °C
Endtemperatur	65 °C
Tagesproduktionsdauer	24 h
Tage pro Woche	6 d/woche
Jahresprofil	alle Monate - konstant gleich
Tagesbedarf	96.000 Liter/d
Energiebedarf	21.369.600 kJ/d
	5.936 kWh/d
Produktionstage pro Jahr	313 d/a
Jahresbedarf	30.048.000 Liter/a
	6.688.684.800 kJ/a
	1.857.969 kWh/a

Es zeigt sich ein konstanter Betrieb über die ganze Woche mit einem Produktionsstopp am Sonntag. Es gibt keine längeren Betriebsstillstände im Sommer oder Winter.

Simulationsschema

Die Molkerei verfügt bereits über einen Speicher mit einem Volumen von 100 m³, welcher für die Speicherung der Solarenergie genutzt werden kann. Dies bietet vor allem an Sonntagen einen Vorteil, während der Produktion kann die Solarwärme direkt genutzt werden. Abbildung 21 zeigt das vereinfachte Hydraulikschema der Solaranlage, das für die Simulationen verwendet wurde.

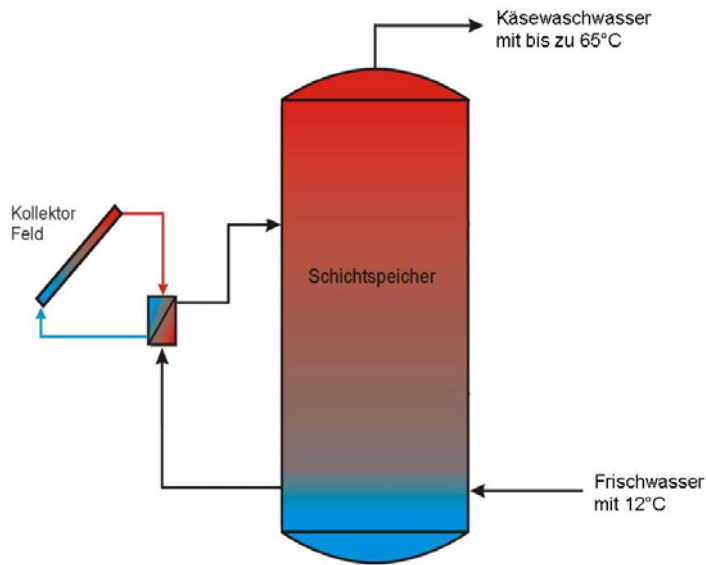


Abbildung 21: vereinfachtes Hydraulikschema bei Berglandmilch

Die Nachheizung des Heißwassers erfolgt über einen Plattenwärmetauscher vor dem eigentlichen Prozess. Damit steht der Speicher rein der Solaranlage zur Verfügung. Die Simulationen wurden mit dem Programm T*Sol4.03 für zwei Varianten durchgeführt, die sich durch die Kollektorfläche unterscheiden. Variante 1 wurde für 1000 m² und Variante 2 für 1500 m² Kollektorfläche berechnet. Die Speichergröße betrug in beiden Fällen 100 m³.

Simulationsergebnisse

Folgend werden die wesentlichen technischen Ergebnisse der Simulationsläufe angegeben. Für die Berechnung der eingesparten Gasmenge und der vermiedenen CO₂-Emissionen wurde ein Gesamtwirkungsgrad des Dampfsystems von 65 % angenommen.

Tabelle 17: Übersicht Ergebnisse Berglandmilch

Kollektorfläche	1.000 m ²	1.500 m ²
Solarer Ertrag in MWh/a	553	710
Gaseinsparung in m ³ /a	85.000	109.000
CO ₂ – Vermeidung in t/a	170	218

Abbildung 22 zeigt den Jahresverlauf der solaren Erträge für beide Simulationsvarianten. Aufgrund des durchgehenden Betriebs über das ganze Jahr und vor allem im Sommer zeigt sich ein „Synchronverlauf“ mit dem Strahlungsangebot des Standortes.

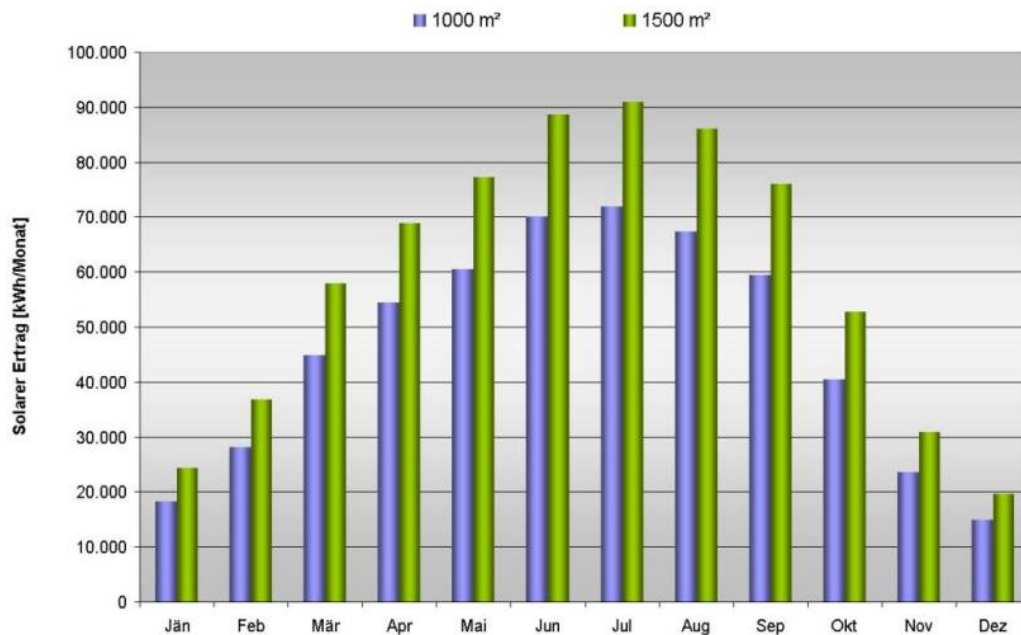


Abbildung 22: Jahresverlauf der solaren Erträge bei Berglandmilch

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Für die Entscheidung, ob und welche Variante realisiert werden soll, muss eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung angestellt werden, welche die Investitionen den Geldrückflüssen gegenüberstellt.

Folgende Annahmen wurden für die dynamischen Wirtschaftlichkeitsberechnungen angenommen:

Tabelle 18: Randbedingungen Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Berglandmilch

Parameter	Variante 1	Variante 2
	1000 m ²	1500 m ²
spezifische Investitionskosten [€/m ²]	270	270

Betriebskosten [€/a]	450	550
Gaspreis [€/m ³]	0,27	
Strompreis [€/kWh]	0,07	
Jährliche Steigerung Gaspreis [%]	4	
Jährliche Steigerung Betriebskosten [%]	2	
Verzinsung Kapital [%]	4	
Lebensdauer der Anlage [a]	20	
Förderung (z.B. KPC Forschung) [%]	50	

Grundsätzlich wurde davon ausgegangen, dass nur das Kollektorfeld, die jeweilige Verrohrung, Komponenten und Regeltechnik angeschafft werden müssen. Die Kosten für einen Speicher entfallen, da dieser bereits vorhanden ist.

Abbildung 23 fasst die Berechnungsergebnisse in Form von Geldrückflüssen für beide Varianten zusammen. Am Beginn steht dabei die tatsächliche Investition durch das Unternehmen abzüglich der Förderungen und der Einsparung an Gas im ersten Jahr. Für jedes weitere Jahr werden die Betriebskosten addiert und die jeweilige Gaseinsparung subtrahiert. In jenem Jahr, in dem die Kurve die x-Achse schneidet, ist die Amortisation der Anlage erreicht.

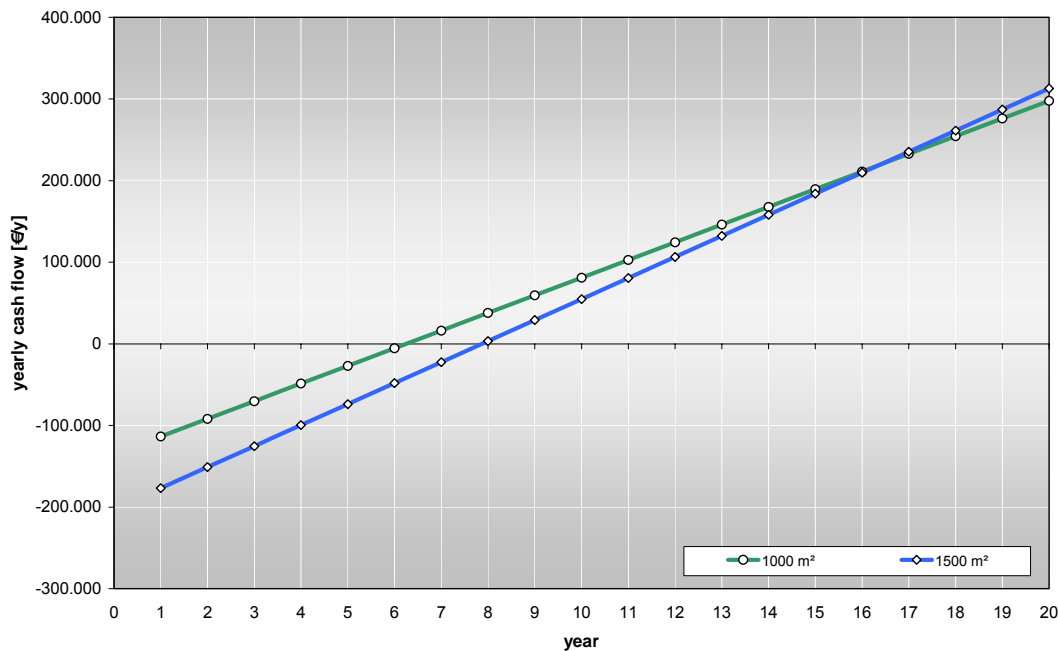


Abbildung 23: Geldrückfluss Solaranlage bei Berglandmilch

Es zeigt sich, dass die kleinere Solaranlage eine kürzere Amortisationszeit aufweist, wobei die Anlage mit 1500 m² aber nur zwei Jahre länger für die Rückzahlung benötigt. Die Amortisationszeiten liegen mit sechs bzw. acht Jahren sehr niedrig. Aufgrund des gleichen Gewinns nach 20 Jahren von ca. 300.000 € bringt die kleinere Anlage den Vorteil der geringeren Investitionskosten.

3.4.1.3 Energie-Gesamteinsparung und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Solaranlagen sind im Vergleich zu konventionellen Energiesystemen wesentlich kapitalintensiver. Sie amortisieren sich durch geringere Betriebskosten. Wie bei allen Investitionen sollte daher ein Wirtschaftlichkeitsvergleich nicht auf Basis einer Kapitalwiedereinbringzeit erfolgen, sondern auf Basis von Wirtschaftlichkeitsrechnungen, die die ganze Lebensdauer der Investition berücksichtigen.

Entscheidend für die Verringerung der Kapitalrücklaufzeit ist eine genaue Betrachtung der Energierückgewinnungsmöglichkeiten. Die Investitionen für die Wärmetauscher sind im Verhältnis zu den anderen Investitionen eher gering und können durch eine verstärkte Einsparung von Betriebskosten (hier insbesondere Heizkosten) in kurzer Zeit wieder eingebracht werden.

Wie im Beispiel der Molkerei Berglandmilch dargestellt, ergeben sich folgende Einsparungsmöglichkeiten an Gasmengen zur Dampf- und Warmwasserbereitung:

Ausgehend von einem Gesamtenergieverbrauch zur Dampf- und Warmwasserbereitung in der Käsefertigung von 16 Mio. kWh/a, erreicht man durch Maßnahmen der Energieeffizienz eine Reduktion von 12 Mio. kWh/a auf 4 Mio. kWh/a. Durch den Einsatz der berechneten Solaranlage würde sich der Gesamtenergieverbrauch um weitere 0,6 Mio. kWh/a reduzieren.

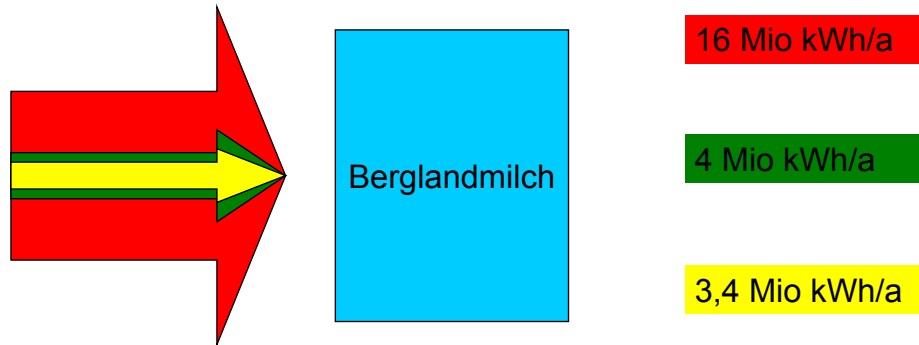


Abbildung 24: Reduktion des Energieverbrauchs in der Käsefertigung

Dies bedeutet eine totale Einsparung von ca. 80 % der momentan verbrauchten Energiemenge. Durch die Verringerung des Gasverbrauchs kommt es zu einer jährlichen Einsparung an Betriebsmitteln von ca. € 300.000.-.

years	solar process				replaced/alternative process				financial valuation factors		
	investment costs [€]	non recurring costs (other than investments) [€]	annual operating costs [€]	total [€]	investment costs eg heat exchanger [€]	market value of replaced equipment/salvage value [€]	saved costs (non recurring costs like repairs) [€]	saved annual operating costs [€]	total [€]	net present value [€]	internal rate of return %
0	-€ 300.000,00			-€ 300.000,00	-€ 601.000,00				-€ 901.000,00	-€ 901.000,00	
1				€ 0,00				€ 345.691,70	€ 345.691,70	-€ 568.604,13	-61,63%
2				€ 0,00				€ 347.420,16	€ 347.420,16	-€ 247.394,67	-11,42%
3				€ 0,00				€ 350.894,36	€ 350.894,36	€ 64.549,14	6,43%
4				€ 0,00				€ 354.403,30	€ 354.403,30	€ 367.494,57	13,28%
5				€ 0,00				€ 357.947,34	€ 357.947,34	€ 661.701,19	16,11%
6				€ 0,00				€ 361.526,81	€ 361.526,81	€ 947.421,08	17,23%
7				€ 0,00				€ 365.142,08	€ 365.142,08	€ 1.224.899,05	17,57%
8				€ 0,00				€ 368.793,50	€ 368.793,50	€ 1.494.372,85	17,52%
9				€ 0,00				€ 372.481,43	€ 372.481,43	€ 1.758.073,36	17,28%
10				€ 0,00				€ 376.206,25	€ 376.206,25	€ 2.010.224,82	16,94%

Abbildung 25: Berechnungsschema der Kapitalwiedereinbringzeit

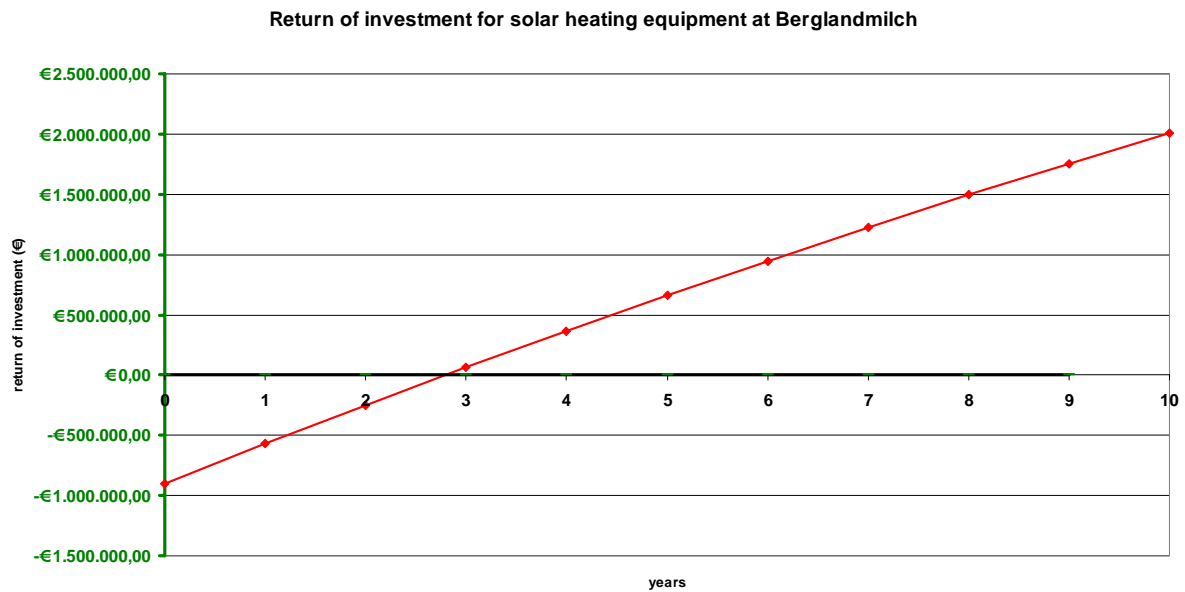


Abbildung 26: Kapitalwiedereinbringzeit der Gesamtinvestition

Bei einer Gesamtinvestition von ca. €900.000,- würde sich die Kapitalwiedereinbringzeit auf drei Jahre verringern.

Eine vollständige, sorgfältige Wirtschaftlichkeitsrechnung unter Einbeziehung aller Kostenfaktoren ist daher eine unabdingbare Voraussetzung für einen gerechten Wirtschaftlichkeitsvergleich.

3.4.2 Wolford

Die Textilindustrie weist eine Reihe von Prozessen auf, die unter 100°C ablaufen. Wie in vielen anderen Branchen findet man Waschprozesse (Wolle, Gewebe,...), aber auch energieintensive Färbeprozesse und spezielle thermische Behandlungen (fixieren, bügeln,...). Den Wasch- und Färbeprozessen folgt meist eine ebenso energieintensive Trocknung in Spanrahmen.

Die Firma Wolford AG betreibt an ihrem Produktionsstandort in Bregenz u. a. eine Färberei, um die Produkte nach eigenen Vorgaben zu färben. Dieser Färbeprozess bzw. die vor- und nachbereitenden Schritte weisen einen hohen Bedarf an Warm- und Kaltwasser auf. Die Erwärmung des Wassers erfolgt zum Großteil über eine Dampfheizung und zum kleineren Teil über die Rückgewinnung von Wärme aus der Beheizung der Färbemaschinen, dem Abwasser der Prozesse und der Abwärme der Druckluftkompressoren.

Über betriebsinterne Aufzeichnungen konnte der IST-Zustand der Käsefertigung mittels Fließbild und Sankey-Diagramm dargestellt werden.

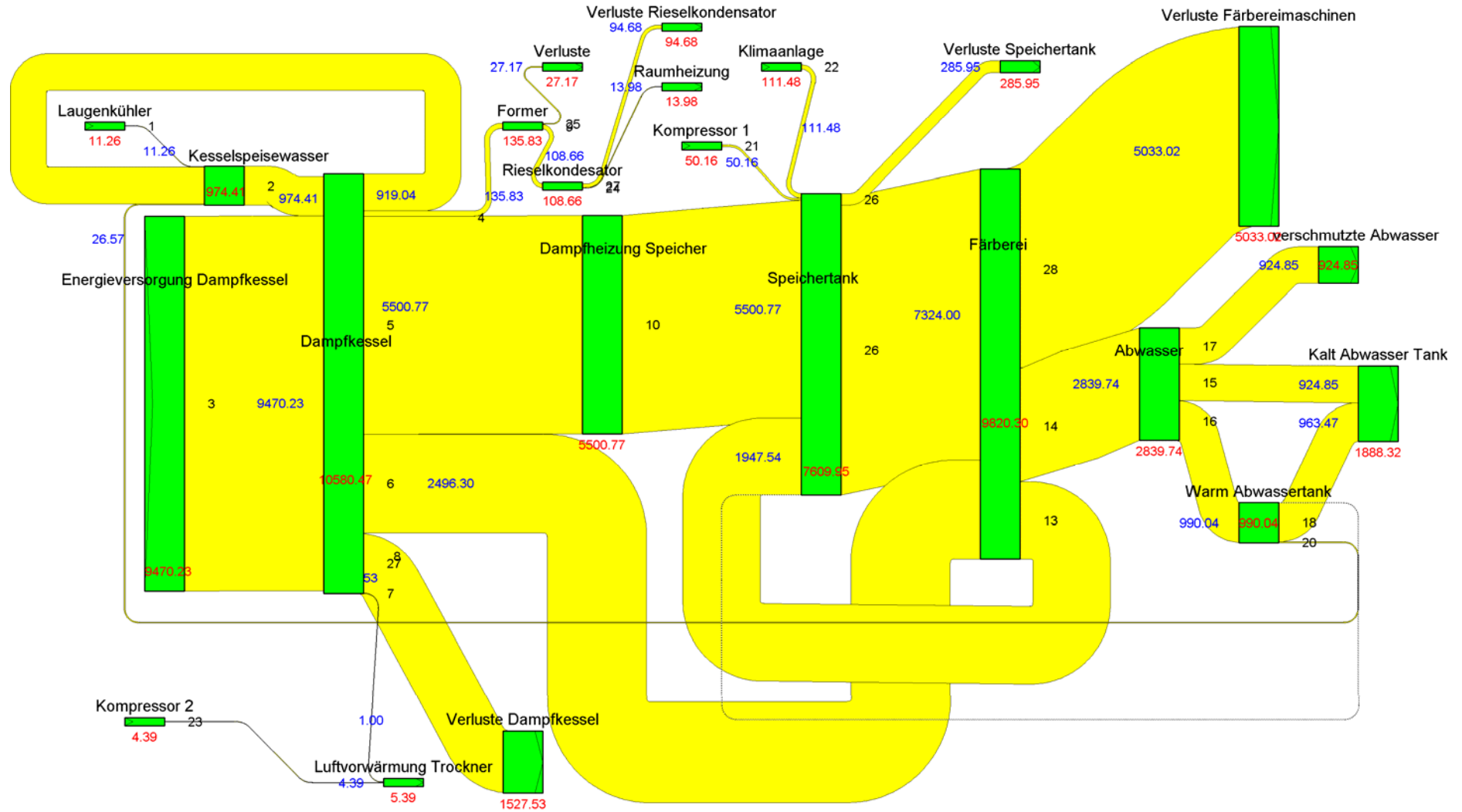


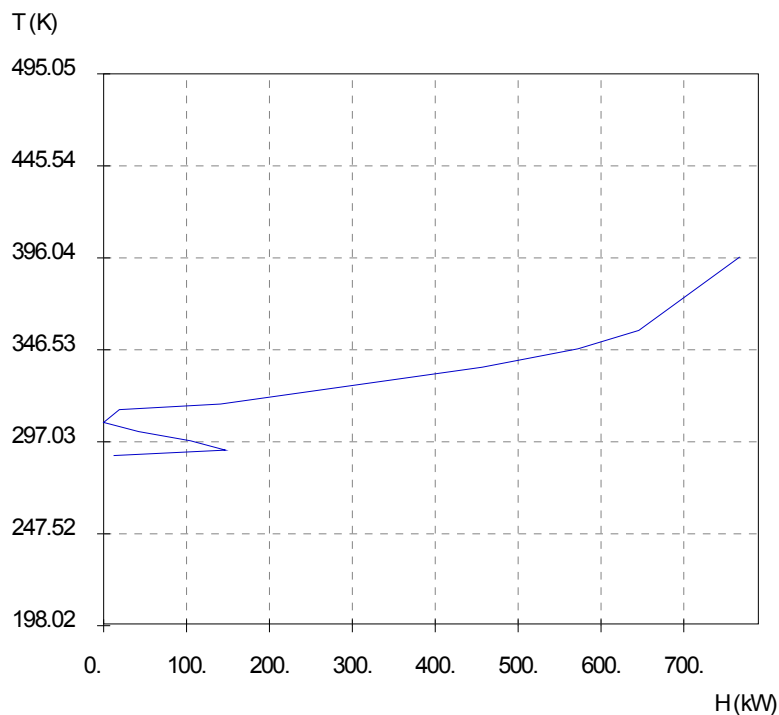
Abbildung 28: Sankey-Diagramm der Energieflüsse der Färberei bei Wolford

Die Firma Wolford hat bereits ein gut funktionierendes Wärmerückgewinnungssystem installiert. Um einen Anhaltspunkt zu geben, bei welchen Temperaturniveaus die Einspeisung von thermischer Solarenergie sinnvoll ist, wurde in einem ersten Schritt der Produktionsprozess ohne Wärmerückgewinnung analysiert. Das Ergebnis dieser Analyse ergibt den minimalen Wärme- und Kühlbedarf bei optimal funktionierender Wärmerückgewinnung und eine Temperatur, die Pinch-Temperatur, oberhalb der erst mit Solarenergie geheizt werden sollte:

Pinch-Temperatur: 311 K

Minimaler theoretischer Wärmebedarf: 780 kW

Minimaler theoretischer Kühlbedarf: 12 kW



Grand Composite Curve

Abbildung 29: Grand Composite Curve für die Ströme bei Wolford

Die Pinch-Analyse wurde mit dem Programm HINT durchgeführt. Aus den vorhandenen Stromdaten ergeben sich damit folgende Werte

Pinch-Temperatur: 310,5 K

Minimaler Heizbedarf: 780 kW

Minimaler Kühlbedarf: 120 kW

Diese Untersuchung dient nur zum Vergleich mit der bestehenden Lösung und um den Temperaturbereich abschätzen zu können, bei dem ein Einsatz von solarer Energie sinnvoll ist.

Aus den Berechnungen lassen sich folgende Rückschlüsse ziehen:

1. Die Pinch-Temperatur liegt bei 310,5°K. Nach der Pinch-Theorie ist eine Zufuhr von Wärme nur über dieser Temperatur energetisch sinnvoll. Diese Temperatur ist mit Solarenergie leicht zu erreichen und die energetische Hauptlast der bestehenden Wärmerückgewinnung liegt auch über diesem Punkt.
2. Der hauptsächliche Wärmestrom liegt im Abwasser, auch mit der bisher ungenutzten Abwassermenge (verschmutzt oder unter 40°C) geht eine Menge Energie verloren, die nach diesen theoretischen Berechnungen genutzt werden könnte.

3.4.2.2 Solarintegration

Die fehlende Abwärme aus den Kompressoren kann in einem neuen Ansatz von einer solarthermischen Anlage zur Verfügung gestellt werden. Inhalt dieser Vorstudie war es daher, die Sinnhaftigkeit und technische Realisierbarkeit einer thermischen Solaranlage zur Generierung der Prozesswärme zu untersuchen.

Aus den Angaben der Firma Wolford AG konnte folgendes Wärmebedarfsprofil abgeleitet werden, das in den Simulationen rechenstechnisch abgebildet wurde.

Gesamtbedarf an Warmwasser pro Tag	485	m³/d
Warmwassertemperatur	76	°C
Kaltwassertemperatur (für Simulation)	35	°C
Jahresenergiebedarf	7.741	MWh/a

Die folgende Grafik zeigt eine Verteilung des Energiebedarfs über das Jahr:

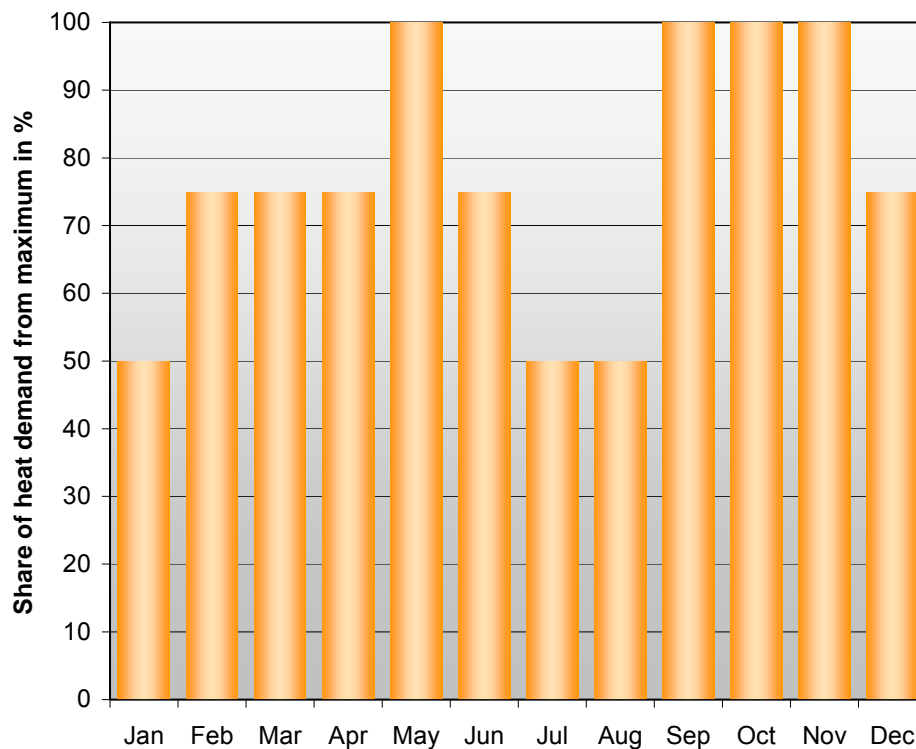


Abbildung 30: Jahresverlauf Energiebedarf Wolford

Diese Verteilung wurde in den Simulationen derart berücksichtigt, dass der maximale Gesamtbedarf pro Tag von 485 m³ mit dem Prozentsatz des jeweiligen Monats multipliziert wurde.

Weiters wurden die Betriebsstillstände im Sommer und im Winter berücksichtigt, wie dies die nachfolgende Abbildung zeigt. Im Juli gibt es eine Woche, im August zwei Wochen und im Dezember eine Woche Stillstand in der Produktion.

Für den Wochenverlauf wurde angenommen, dass an sechs Tagen der Woche jeweils 24 Stunden produziert wird, konkret von Montag bis Samstag. Insgesamt ergeben sich damit 263 Produktionstage pro Jahr für die Simulation.

Im Folgenden werden drei Varianten von solarthermischen Anlagen zur Bereitstellung der definierten Wärme simulationstechnisch untersucht und die Ergebnisse wirtschaftlich gegenüber gestellt, um die optimale Variante zu ermitteln.

Simulationsschema

Aufgrund des bestehenden Schichtspeichers konnte ein einfaches Konzept der hydraulischen Einbindung der Solaranlage gewählt werden. Die Wärme der Solaranlage wird dabei über einen externen Wärmetauscher, wie dies schon bei der Kompressorenabwärme der Fall ist, in den Speicher eingebracht. Abbildung 31 illustriert die Einbindung der Solaranlage und auch das verwendete Simulationsschema. Die Solaranlage wärmt das Wasser mit 35°C jeweils dann auf, wenn eine ausreichende Temperaturdifferenz über das Kollektorfeld eingebracht werden kann. Sofern dies nicht möglich ist, wie beispielsweise bei Nacht, wird die Erwärmung vom Zusatzsystem – im konkreten Fall der Dampfheizung – übernommen.

Die Simulationen wurden mit dem Programm T*Sol 4.03 durchgeführt. In einer Simulation wird über ein ganzes Jahr für jede Stunde eine Energiebilanz aufgelöst und die jeweiligen Energien dokumentiert, um eine spätere Auswertung nach verschiedenen Zeiträumen zu ermöglichen.

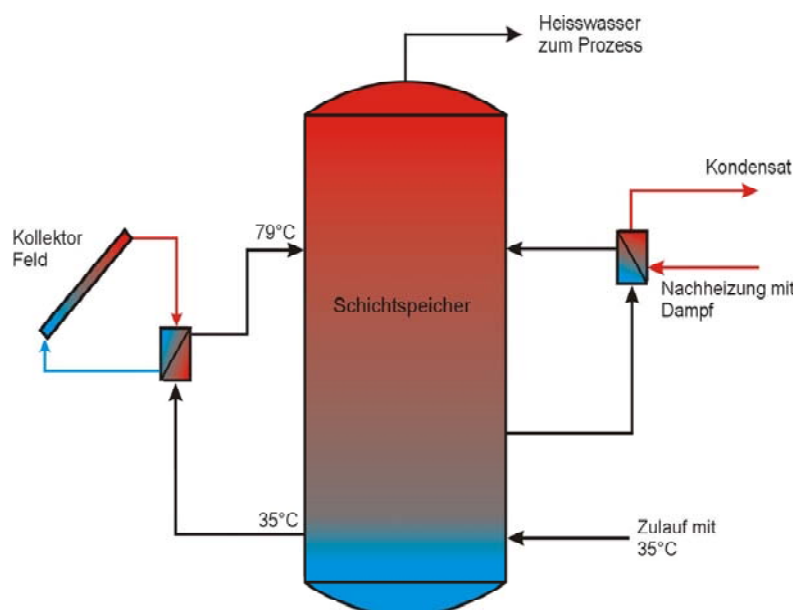


Abbildung 31: Schema der Einbindung der Solaranlage bei Wolford

Das Schema zeigt die vereinfachte Annahme für die Simulation, dass nur ein Zulauf mit 35°C besteht. Dies ist rein simulationstechnisch notwendig, da die eigentliche Aufgabe der Solaranlage in der Erwärmung der Fraktion mit 35°C auf 79°C besteht.

Für alle drei untersuchten Varianten wurde das gleiche Schema angewendet. Die Unterscheidung der Varianten erfolgt über die jeweilige Kollektorfläche. Andere Systemparameter, wie der Durchfluss durch das Kollektorfeld, die Leitungslängen bzw. die Pumpenleistungen wurden jeweils entsprechend an die Größe des Kollektorfeldes angepasst.

Die nicht runden Flächenmaße ergeben sich aus dem Umstand, dass sich ein Kollektorfeld aus Modulen mit einer bestimmten Größe zusammensetzt.

Es wurden nur Flachkollektoren simuliert, da der Einsatz von anderen Technologien für diese Anwendung wirtschaftlich nicht konkurrenzfähig zu den gewählten Kollektoren ist.

Für die Simulationen wird ein Wetterdatensatz eingesetzt, der aus Durchschnittswerten der letzten zehn Jahre generiert wurde und die Verhältnisse um Bregenz wiedergibt. Reale Einstrahlungswerte und einhergehende solare Erträge können von den Werten naturgemäß abweichen und die dargestellten Werte sowohl unter- wie auch überschreiten.

Simulationsergebnisse

Folgend werden die wesentlichen technischen Ergebnisse der Simulationsläufe angegeben. Für die Berechnung der eingesparten Gasmenge und der vermiedenen CO₂-Emissionen wurde ein Gesamtwirkungsgrad des Dampfsystems von 65 % angenommen.

Tabelle 19: Übersicht Ergebnisse Wolford

Parameter	Alternative 1	Alternative 2	Alternative 3
Specific investment costs [€/m ²]	320	270	270
Operating costs [€/a]	141	259	382
Gas price [€/m ³]	0,24		
Electricity price [€/kWh]	0,06		
Energy cost escalation rate [%]	4		
Operating cost escalation rate [%]	2		
Discount rate [%]	4		
Expected life time of plant [a]	20		
Grants [%]	50		

Abbildung 32 zeigt den Jahresverlauf der solaren Erträge für alle drei Simulationsvarianten. Aufgrund des Betriebsurlaubes im Sommer zeigt sich ein Ertragsrückgang im Monat August.

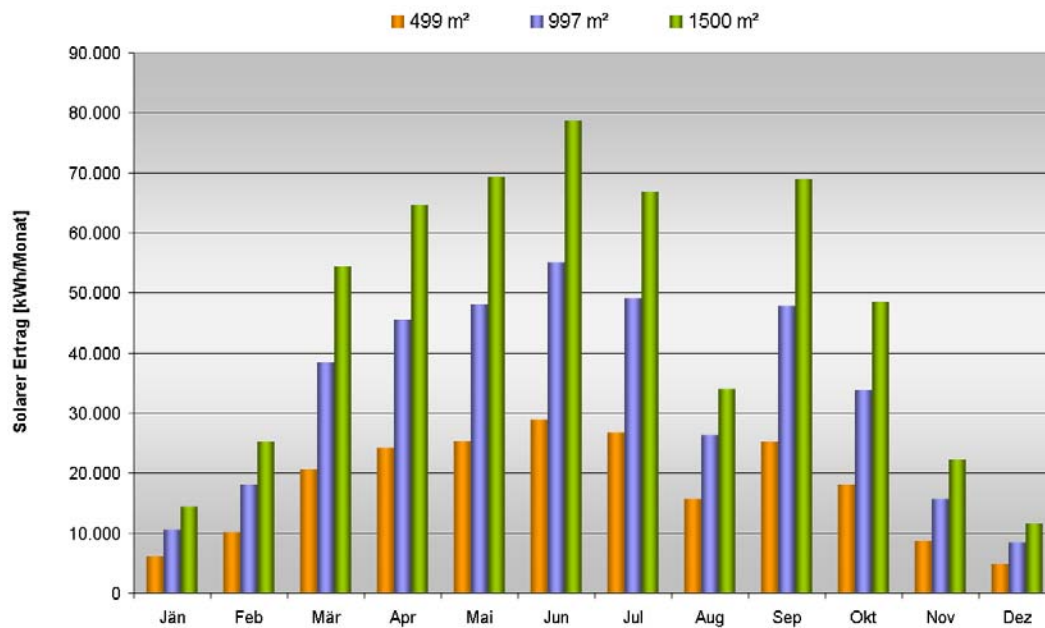


Abbildung 32: Jahresverlauf der solaren Erträge bei Wolford

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Für die Entscheidung, ob und welche Variante realisiert werden soll, muss eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung angestellt werden, welche die Investitionen den Geldrückflüssen gegenüberstellt.

Folgende Annahmen wurden für die dynamischen Wirtschaftlichkeitsberechnungen getroffen:

Grundsätzlich wurde davon ausgegangen, dass nur das Kollektorfeld, die jeweilige Verrohrung, Komponenten und Regeltechnik angeschafft werden müssen. Die Kosten für einen Speicher entfallen, da dieser bereits vorhanden ist.

Abbildung 33 fasst die Berechnungsergebnisse in Form von Geldrückflüssen für beide Varianten zusammen. Am Beginn steht dabei die tatsächliche Investition durch das Unternehmen abzüglich der Förderungen und der Einsparung an Gas im ersten Jahr. Für jedes weitere Jahr werden die Betriebskosten addiert und die jeweilige Gaseinsparung subtrahiert. In jenem Jahr, in dem die Kurve die x-Achse schneidet, ist die Amortisation der Anlage erreicht.

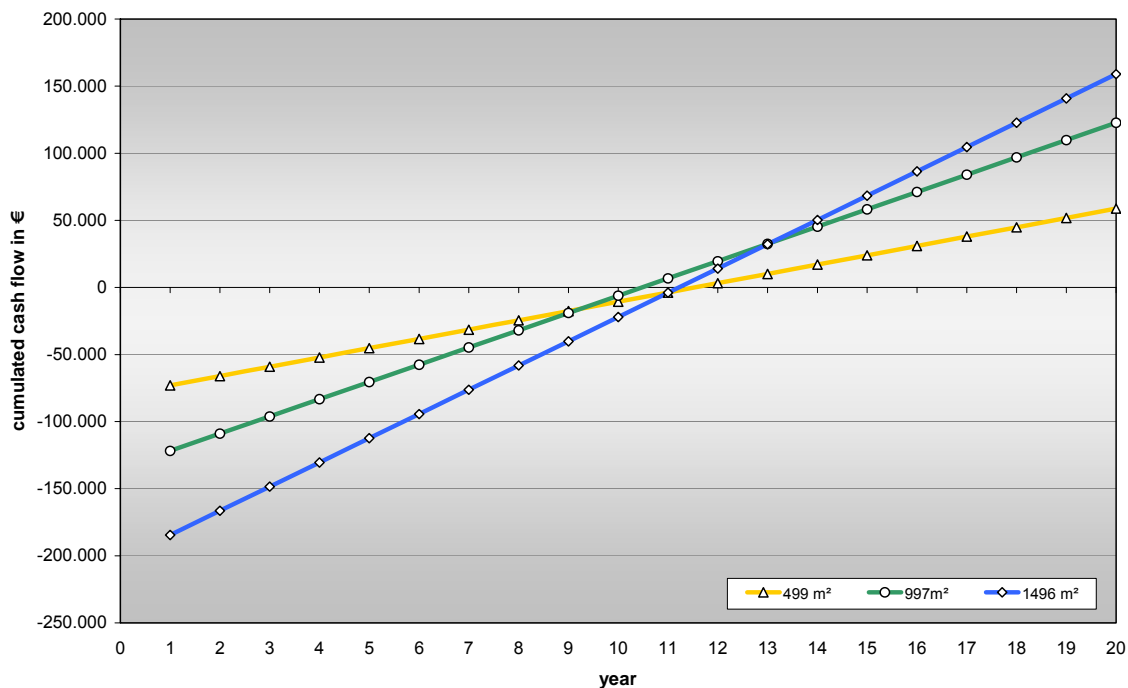


Abbildung 33: Geldrückfluss Solaranlage bei Wolford

Es zeigt sich, dass die kleinere Solaranlage eine längere Amortisationszeit aufweist, wobei die Anlage mit ca. 1500 m² aber nur drei Jahre länger für die Rückzahlung als die 1000 m² benötigt. Die Amortisationszeiten liegen bei 10 bis 13 Jahren.

3.4.2.3 Energie-Gesamteinsparung und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Wie bereits im Beispiel der Molkerei Berglandmilch dargestellt, ergeben sich auch bei Wolford folgende Einsparungsmöglichkeiten an Gasmengen zur Dampf- und Warmwasserbereitung:

Ausgehend von einem Gesamtenergieverbrauch zur Dampf- und Warmwasserbereitung von 15,8 Mio. kWh/a, erreicht man durch Maßnahmen der Energieeffizienz eine Reduktion von 11,1 Mio. kWh/a auf 4,7 Mio. kWh/a. Durch den Einsatz der berechneten Solaranlage würde sich der Gesamtenergieverbrauch um weitere 0,6 Mio. kWh/a reduzieren.

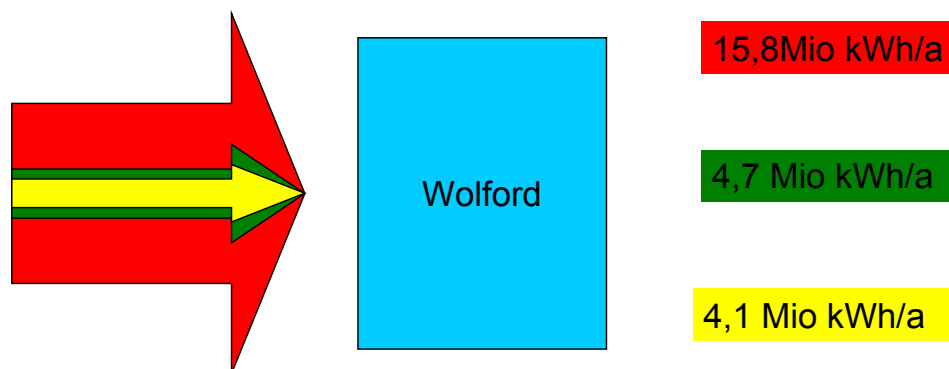


Abbildung 34: Reduktion des Energieverbrauchs bei Wolford

Dies bedeutet eine totale Einsparung von ca. 75 % der momentan verbrauchten Energiemenge. Durch die Verringerung des Gasverbrauchs kommt es zu einer jährlichen Einsparung an Betriebsmitteln von ca. € 309.000,-.

years	solar process			total [€]	replaced/alternative process				total [€]	financial valuation factors	
	investment costs [€]	non recurring costs (other than investments) [€]	annual operating costs [€]		investment costs eg heat exchanger [€]	market value of replaced equipment/salvage value [€]	saved costs (non recurring costs like repairs) [€]	saved annual operating costs [€]		net present value [€]	internal rate of return %
0	-€ 300.000,00			-€ 300.000,00	-€ 594.500,00				-€ 894.500,00	-€ 894.500,00	
1				€ 0,00				€ 309.168,46	€ 309.168,46	-€ 597.222,63	-65,44%
2				€ 0,00				€ 310.714,30	€ 310.714,30	-€ 309.949,79	-15,93%
3				€ 0,00				€ 313.821,45	€ 313.821,45	-€ 30.963,67	2,79%
4				€ 0,00				€ 316.959,66	€ 316.959,66	€ 239.974,78	10,37%
5				€ 0,00				€ 320.129,26	€ 320.129,26	€ 503.097,69	13,71%
6				€ 0,00				€ 323.330,55	€ 323.330,55	€ 758.630,52	15,21%
7				€ 0,00				€ 326.563,86	€ 326.563,86	€ 1.006.792,21	15,83%
8				€ 0,00				€ 329.829,49	€ 329.829,49	€ 1.247.795,40	16,00%
9				€ 0,00				€ 333.127,79	€ 333.127,79	€ 1.481.846,56	15,93%
10				€ 0,00				€ 336.459,07	€ 336.459,07	€ 1.709.146,25	15,73%

Abbildung 35: Berechnungsschema der Kapitalwiedereinbringzeit

Bei einer Gesamtinvestition von ca. € 890.000,- würde sich die Kapitalwiedereinbringzeit auf drei Jahre verringern.

Eine vollständige, sorgfältige Wirtschaftlichkeitsrechnung unter Einbeziehung aller Kostenfaktoren ist daher eine unabdingbare Voraussetzung für einen gerechten Wirtschaftlichkeitsvergleich.

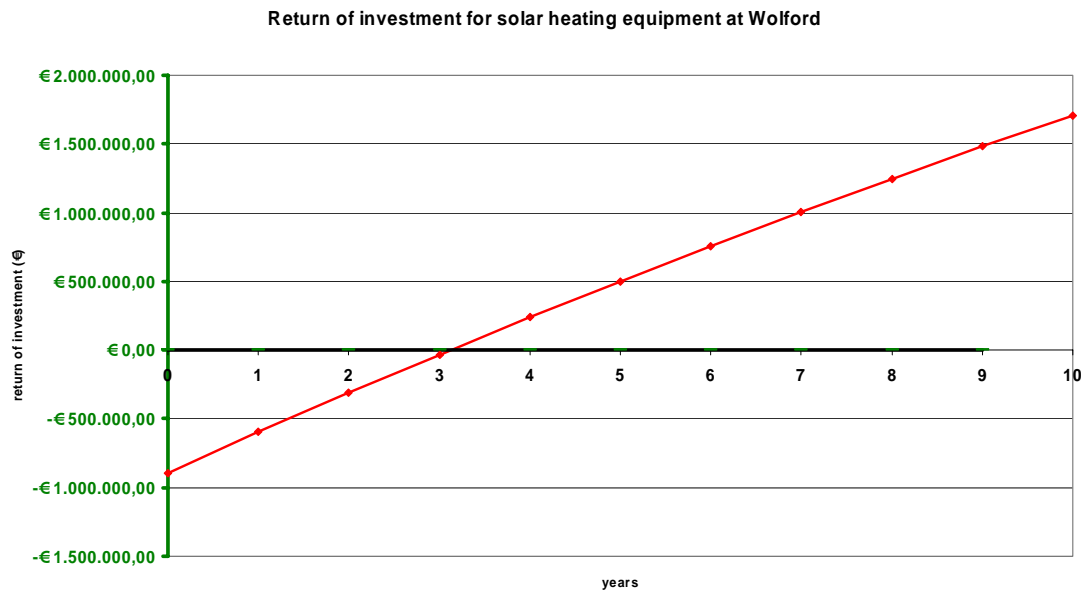


Abbildung 36: Kapitalwiedereinbringzeit der Gesamtinvestition

3.4.3 Beerenfrost

Beerenfrost ist eine Firma der Lebensmittelindustrie und betreibt hauptsächlich Kühlanlagen für Lebensmittel sowie Waschanlagen von gefrorenen Lebensmittelkisten. Besonders bei diesen Kistenwaschanlagen tritt ein großer Bedarf an Niedertemperaturwärme für das Auftauen und Waschen der Kisten an.

3.4.3.1 Ermittlung der relevanten Energieströme

Im Allgemeinen kann man die Tätigkeiten der Firma in vier über das Jahr aufgeteilte Zeitbereiche einteilen. Diese Zeitbereiche und die Aufteilung der Tätigkeiten auf diese Zeitbereiche zeigt Tabelle 20.

Die Temperaturen sind die Anfangstemperatur T1 und die Endtemperatur T2, jeweils zu dem jeweiligen Zeitraum. Die betrachteten Zeiträume sind:

1. Mitte April bis Mitte August
2. Mitte August bis Mitte Oktober
3. Mitte Oktober bis Mitte Dezember
4. Mitte Dezember bis Mitte April

Tabelle 20: Tätigkeiten und Zeitbereiche bei der Firma Beerenfrost.

Strom ID	Beschreibung	Zeitraum											
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
		x Strom ist vorhanden				T1	T1	T1	T1	T2	T2	T2	T2
						°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
1	Abwasser Auftauen KK	x	X	x		40	40	40		15	15	15	
2	Abwasser Waschen GK	x	X	x		25	25	25		15	15	15	
3	Büro	x	X	x	x	14	14	14	14	40	40	40	40
4	Abwasser Waschen KK	x	X	x		40	40	40		15	15	15	
5	Ammoniakkühlung	x	X	x	x	70	70	70	70	30	30	30	30
6	Beckenwasser	x	X	x		14	14	14		60	60	60	
7	Trocknung	x	X	x	x	20	20	20	20	70	70	70	70
8	Beckenwasser heiß	x	X			60	60			80	80		
9	Heizung				x				14				60

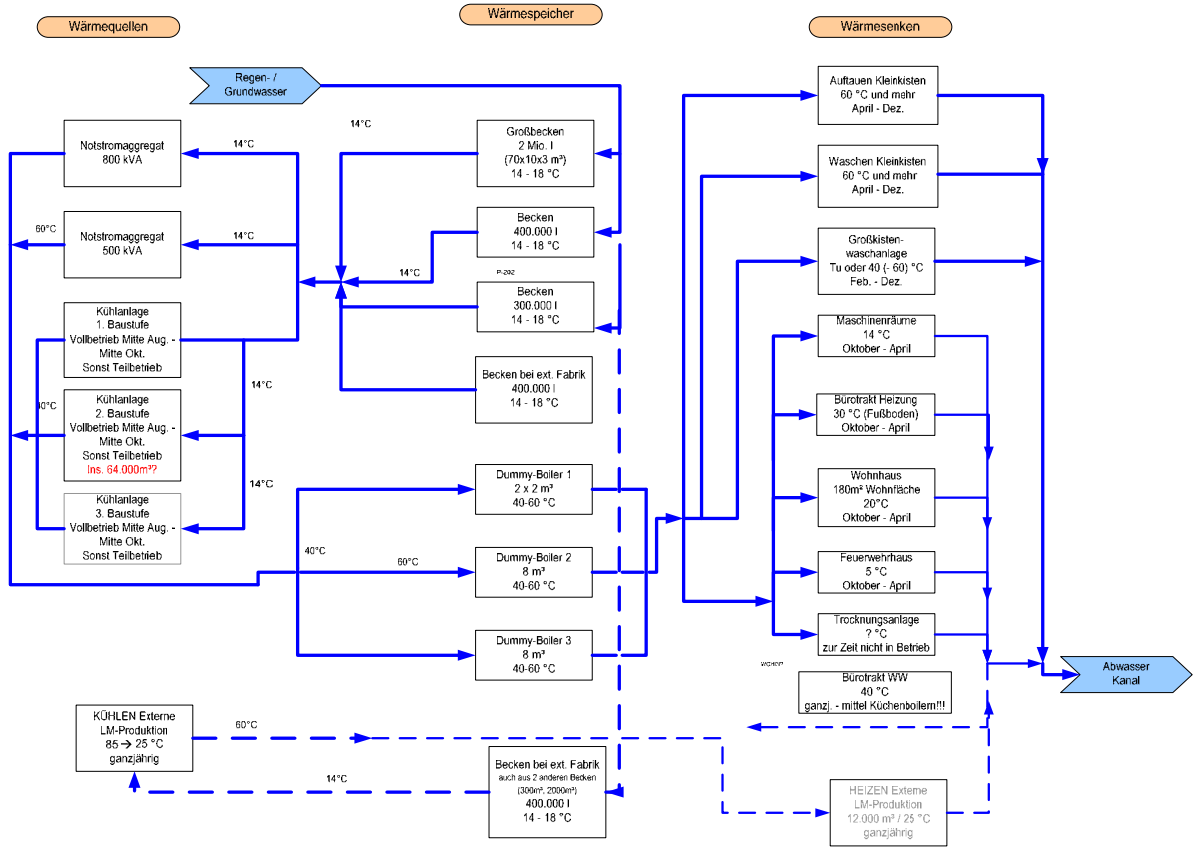


Abbildung 37: Flow Sheet Beerenfrost

Neben den verschiedenen Strömen können auch die Tätigkeiten in verschiedene Bereiche eingeteilt werden. Die Aufteilung dieser Bereiche zeigt Abbildung 38.

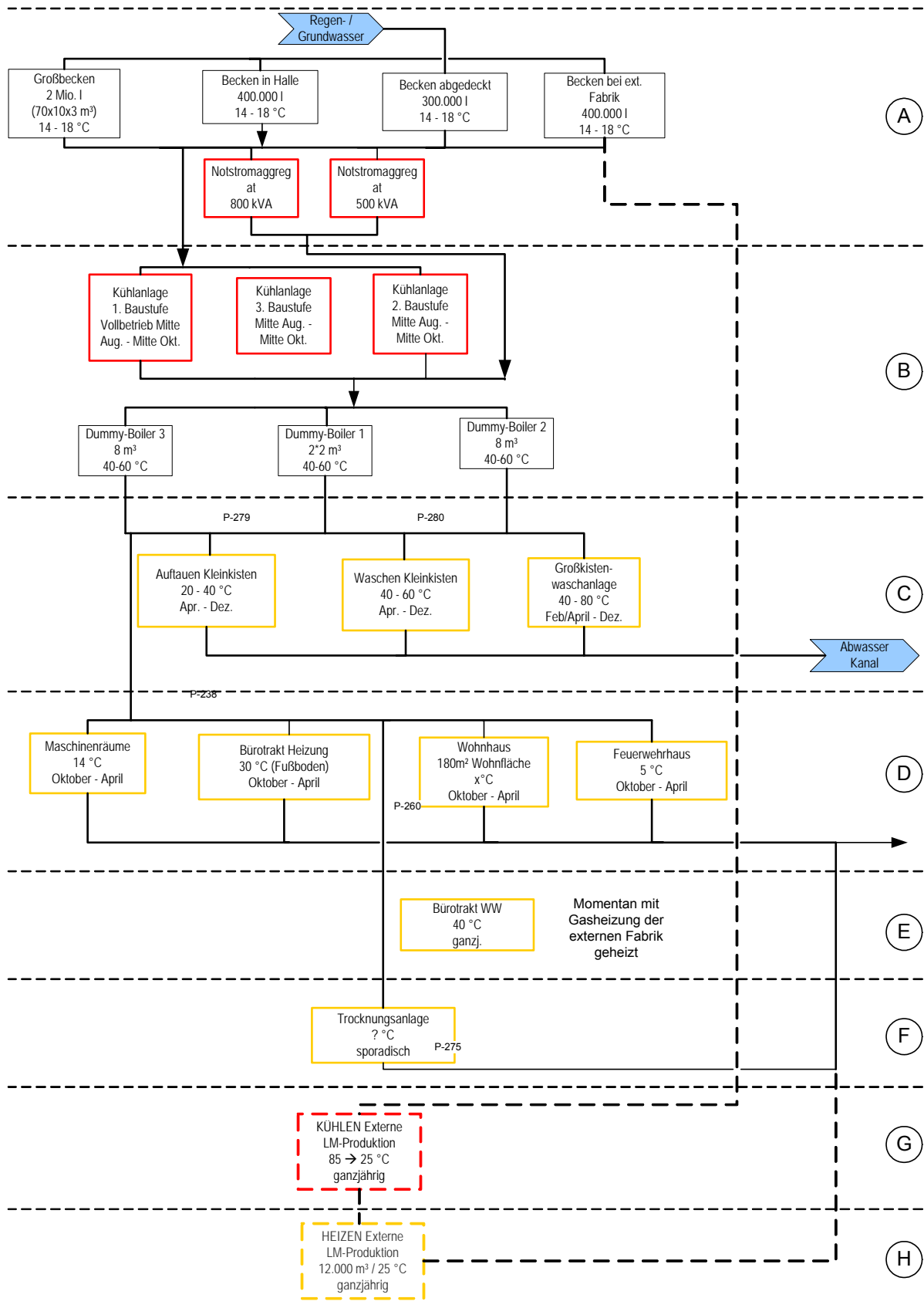


Abbildung 38: Schematische Darstellung der vorhandenen wärmerelevanten Prozesse und Speicher. Die Produktionsprozesse wurden in die Abschnitte A bis G eingeteilt, die auch zu unterschiedlichen Jahreszeiten vorhanden sind.

Bei der Pinch-Analyse wurde nun so vorgegangen, dass für jeden Zeitabschnitt separat eine Pinch-Analyse durchgeführt wurde, dies entspricht dem Vorgehen bei der Time Slice Methode TSM der Batch-Pinch-Modelle, nur dass hier die Ströme sehr lange dauern und jeder Zeitabschnitt mehrere Monate lang ist. Für jeden Zeitabschnitt ergibt sich so eine Pinch-Temperatur und ein minimaler Heiz- bzw. Kühlbedarf. Auch wurden nach der Pinch-Methode für jeden Abschnitt extra mögliche Wärmetauschernetzwerke ermittelt. Die Ergebnisse zeigen die folgenden Abbildungen. Für die Berechnungen wurde eine von der Firma geplante Trockenanlage für Pflanzenteile mit berücksichtigt (Bereich F in Abbildung 38). Nicht berücksichtigt hingegen wurde der Wärme- oder Kühlbedarf einer benachbarten Lebensmittel verarbeitenden Firma (Bereiche G und H).

Zeitabschnitt 1: Mitte April bis Mitte August

Temperaturdifferenz: 10 K

Pinch-Temperatur: 338 K

Minimaler theoretischer Wärmebedarf: 105 kW

Minimaler theoretischer Kühlbedarf: 75 kW

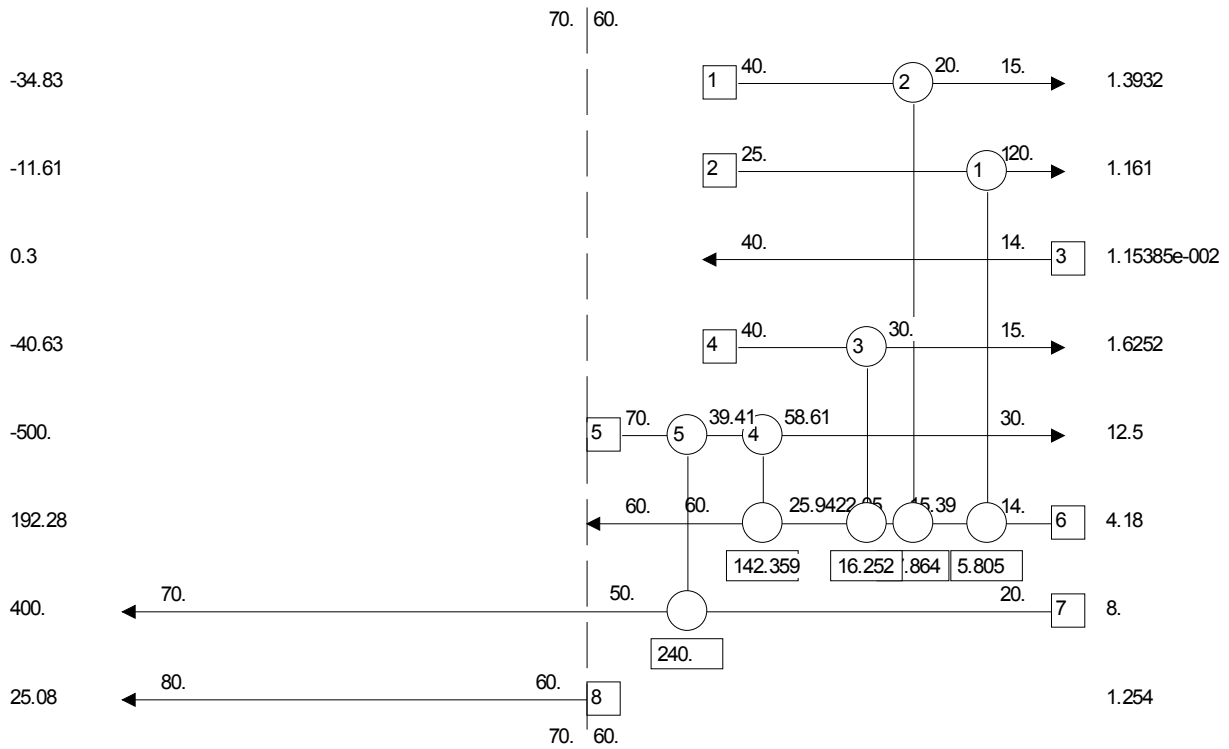


Abbildung 39: Wärmetauschernetzwerk für den Zeitabschnitt 1

Zeitabschnitt 2: Mitte August bis Mitte Oktober

Temperaturdifferenz: 10 K

Pinch-Temperatur: 338 K

Minimaler theoretischer Wärmebedarf: 105 kW

Minimaler theoretischer Kühlbedarf: 1540 kW

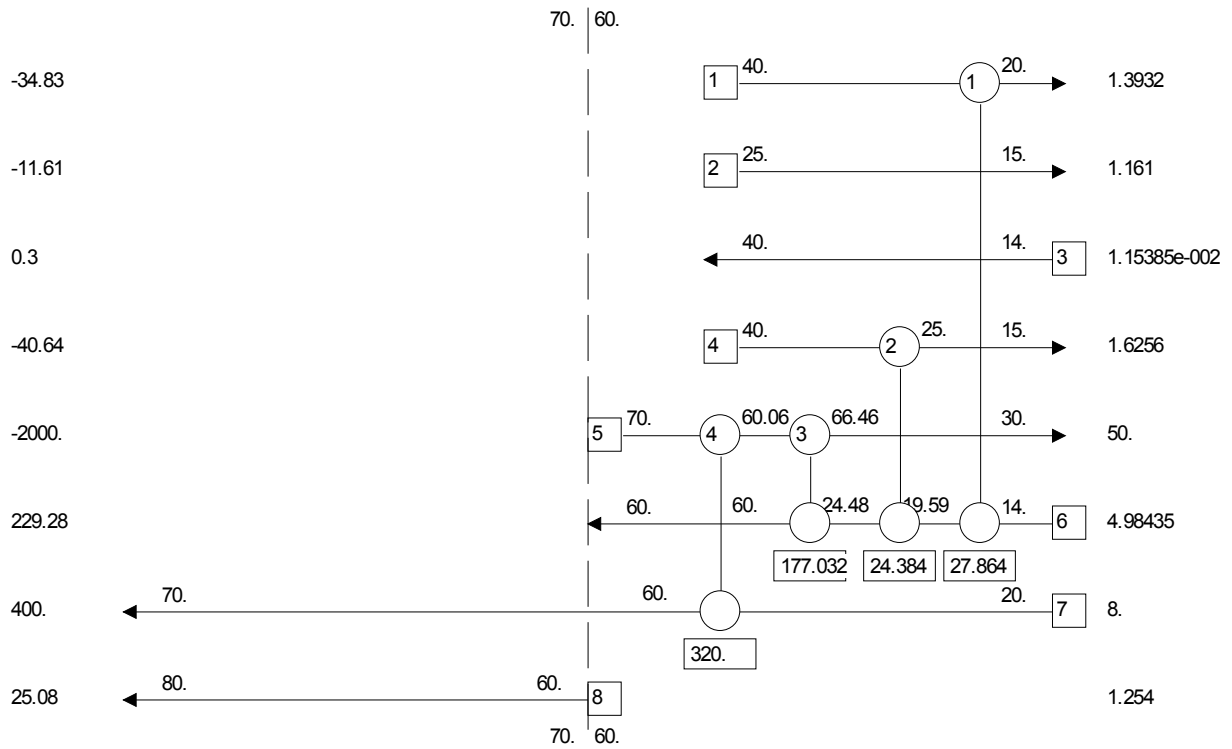


Abbildung 40: Wärmetauschernetzwerk für den Zeitabschnitt 2

Zeitabschnitt 3: Mitte Oktober bis Mitte Dezember

Temperaturdifferenz: 10 K

Pinch-Temperatur: 290 K

Minimaler theoretischer Wärmebedarf: 185 kW

Minimaler theoretischer Kühlbedarf: 17 kW

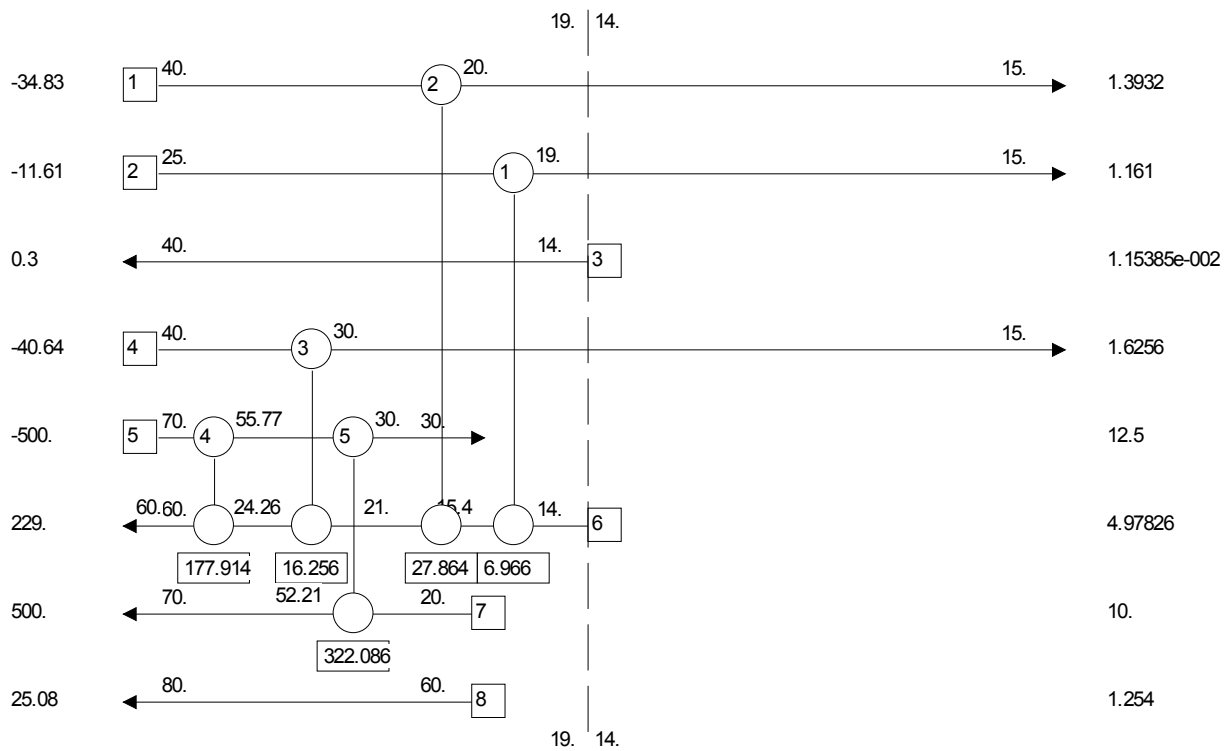


Abbildung 41: Wärmetauschernetzwerk für den Zeitabschnitt 3

Zeitabschnitt 4: Mitte Dezember bis Mitte April

Temperaturdifferenz: 5 K

Pinch-Temperatur: 341 K

Minimaler theoretischer Wärmebedarf: 40 kW

Minimaler theoretischer Kühlbedarf: 100 kW

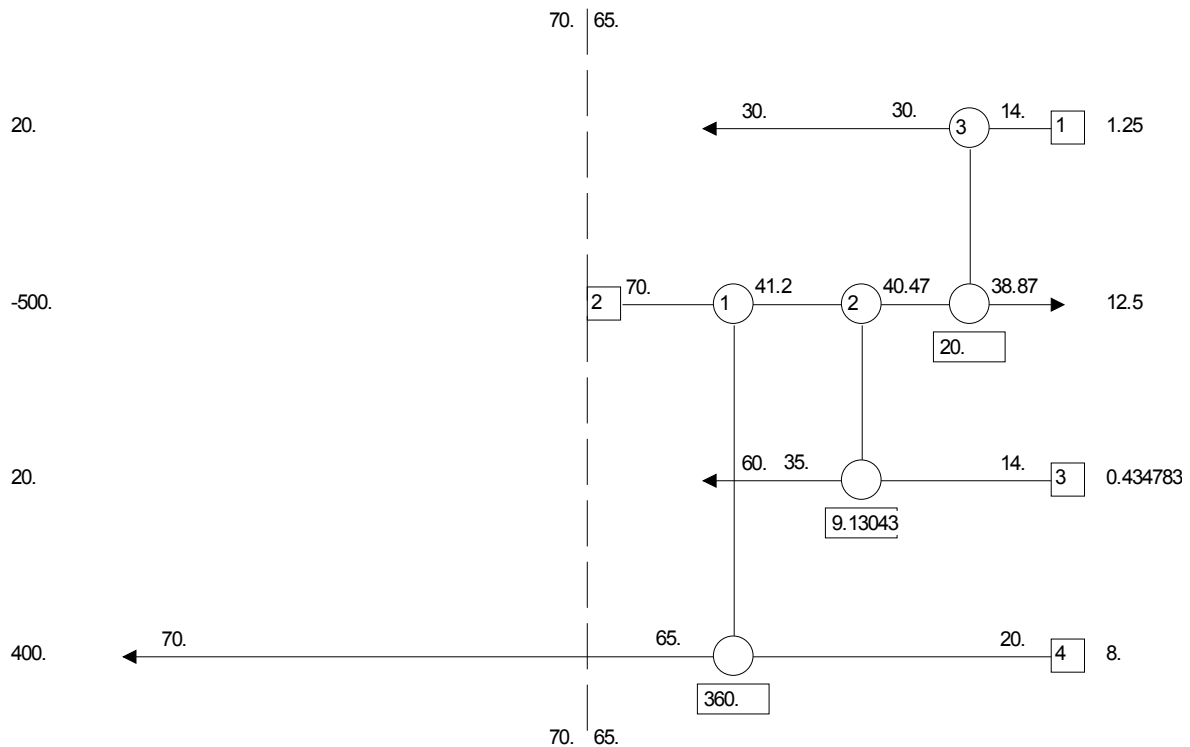


Abbildung 42: Wärmetauschernetzwerk für den Zeitabschnitt 4

Aus der Zusammenschau dieser Einzelergebnisse lassen sich jene Wärmetauscher bestimmen, die in allen Zeitabschnitten zwischen denselben Strömen Energie austauschen können. Diese Wärmetauscher und die von ihnen übertragene Wärme sind

Wärmetauscher zwischen Strom 5 (Ammoniakkühlung) und Strom 7 (Trocknung)

- Zeitabschnitt 1: 240 kW
- Zeitabschnitt 2: 320 kW
- Zeitabschnitt 3: 322 kW
- Zeitabschnitt 4: 360 kW

Wärmetauscher zwischen Strom 1 (Abwasser Auftauen KK) und Strom 6 (Becken)

- Zeitabschnitt 1: 28 kW
- Zeitabschnitt 2: 28 kW

- Zeitabschnitt 3: 28 kW
- Zeitabschnitt 4: 28 kW

Nach zuvor erfolgter Pinch-Analyse konnten die verbleibenden Ströme mit externem Heizbedarf für die zusätzliche Beheizung über eine thermische Solaranlage herangezogen werden. Tabelle 21 gibt dabei einen Überblick über die Ströme und deren Heizenergiebedarf für die vier untersuchten Perioden.

Tabelle 21: Beerenfrost – Übersicht Ströme und Heizenergiebedarf

Strom	Bezeichnung	Dez–Apr			Apr–Aug			Aug–Okt			Okt–Dez		
		Leistung [kW]	Tsupp [°C]	Ttarg [°C]	Leistung [kW]	Tsupp [°C]	Ttarg [°C]	Leistung [kW]	Tsupp [°C]	Ttarg [°C]	Leistung [kW]	Tsupp [°C]	Ttarg [°C]
3	Heizung/Bürowasser	11	35	60	0,3	14	40	0,3	14	40	0,3	14	40
4	Trocknung	40	65	70	160	50	70	80	60	70	178	52	70
8	Beckenwasser heiss				25	60	80	25	60	80			

Als weiterer Schritt werden die angegebenen Heizleistungen über die notwendige Temperaturdifferenz und die Produktions- bzw. Heizzeiten auf die zu liefernde Energiemenge in der jeweiligen Periode umgerechnet. Dafür werden zwei Produktionsmodelle herangezogen. Zum einen handelt es sich um ein Ein-Schicht-Modell mit einer täglichen Arbeitszeit von acht Stunden an sechs Tagen in der Woche. Das zweite Modell ist ein Zwei-Schicht-Modell mit 16 Stunden am Tag und sechs Tagen in der Woche. Die nachfolgende Tabelle gibt die Energiemengen bzw. die umgerechnet notwendigen Liter Warmwasser pro Tag wieder, die dann vom Heizsystem erwärmt werden müssen.

Tabelle 22: Beerenfrost Ein-Schicht-Modell – Energiebedarf für Solaranlage

1 Schicht (8 h) pro Tag 6 Tage pro Woche		Dez–Apr		Apr–Aug		Aug–Okt		Okt–Dez	
Strom	Bezeichnung	Energiebedarf [kWh]	Wasser [l/d]	Energiebedarf [kWh]	Wasser [l/d]	Energiebedarf [kWh]	Wasser [l/d]	Energiebedarf [kWh]	Wasser [l/d]
3	Heizung/Bürowasser (24h)	23.496	9.097	871	239	432	239	655	239
4	Trocknung (8h)	24.411	55.133	132.754	55.133	32.914	55.133	111.072	58.414
8	Beckenwasser heiss (8h)			20.743	8.614	10.286	7.384	-	

Tabelle 23: Beerenfrost Zwei-Schicht-Modell – Energiebedarf für Solaranlage

2 Schichten (16h) pro Tag 6 d pro Woche		Dez–Apr		Apr–Aug		Aug–Okt		Okt–Dez	
Strom	Bezeichnung	Energie- bedarf [kWh]	Wasser [l/d]	Energie- bedarf [kWh]	Wasser [l/d]	Energie- bedarf [kWh]	Wasser [l/d]	Energie- bedarf [kWh]	Wasser [l/d]
3	Heizung/Bürowasser (24h)	23.496	9.097	871	239	432	239	655	239
4	Trocknung (16h)	48.823	110.266	265.509	110.266	65.829	110.266	222.144	136.300
8	Beckenwasser heiß (16h)			41.486	14.768	20.571	17.229	-	

Für die Berechnung der notwendigen Energien bzw. Warmwassermengen wurde je Periode mit den in der nächsten Tabelle angegebenen Heiztagen bzw. Produktionstagen gerechnet. Für beide Schichtmodelle wurde die gleiche Anzahl an Heiz- und Produktionstagen für die weiteren Berechnungen und Simulationen herangezogen.

Tabelle 24: Beerenfrost – Heiztage und Produktionstage pro Periode

	von	bis	Tage	von	bis	Tage	von	bis	Tage	von	bis	Tage
Heiztage	1. Jän.	31. Mär.	89	1. Apr.	31. Jul.	121	1. Aug.	30. Sep.	60	1. Okt.	31. Dez.	91
Produktions- tage			76			104			51			78

Aus den Tabellen ist ersichtlich, dass der überwiegende Energiebedarf für den Strom Nr. 4 (Trocknung) aufgebracht werden muss. Außerdem weist dieser Strom einen annähernd konstanten Energiebedarf in allen vier Perioden auf, der sich nur durch die Temperaturdifferenzen unterscheidet. Da die anderen Ströme vergleichsweise geringen Energiebedarf auf anderen Temperaturniveaus haben, wird die Solaranlage nur für den Strom Nr. 4 ausgelegt.

3.4.3.2 Simulationsschema

Die Simulationen werden mit dem in Abbildung 10 dargestellten vereinfachten Hydraulikschema im Simulationsprogramm T*Sol 4 durchgeführt. Der Speicher im System wurde gewählt, da nur sechs Tage die Woche produziert wird und so die Einstrahlung am produktionsfreien Tag genutzt werden kann. Zusätzlich vereinfacht sich die Einbindung der solaren Wärme in das gesamte System. Da sich die „Kaltwassertemperatur“ für den Strom 4, also die Starttemperatur, in allen vier Perioden ändert, werden vier Simulationsläufe für die einzelnen Perioden durchgeführt und zu einer Jahressumme addiert.

Die Hydraulik sieht vor, dass der Kollektor mit der jeweiligen „Kaltwassertemperatur“ von 50/52/60/65°C gespeist wird. Sobald die Nutztemperatur von 70°C geliefert werden kann, wird die Energie in den Speicher eingebracht. Jene Energie, die von der Solaranlage nicht bereitgestellt werden kann, wird über die Nachheizung, in diesem Fall vom Gaskessel, geliefert. Als Kollektoren wurden für beide Schichtmodelle herkömmliche Flachkollektoren verwendet. Die Daten der Solaranlage sind folgende:

Kollektorfläche brutto: 128 m²
Speichervolumen: 10 m³

Die Dimensionierung wurde so gewählt, dass die Solaranlage im wirtschaftlich erreichbaren Optimum liegt, das im Wesentlichen durch die Systemkosten und die gewonnene Solarenergie bestimmt wird.

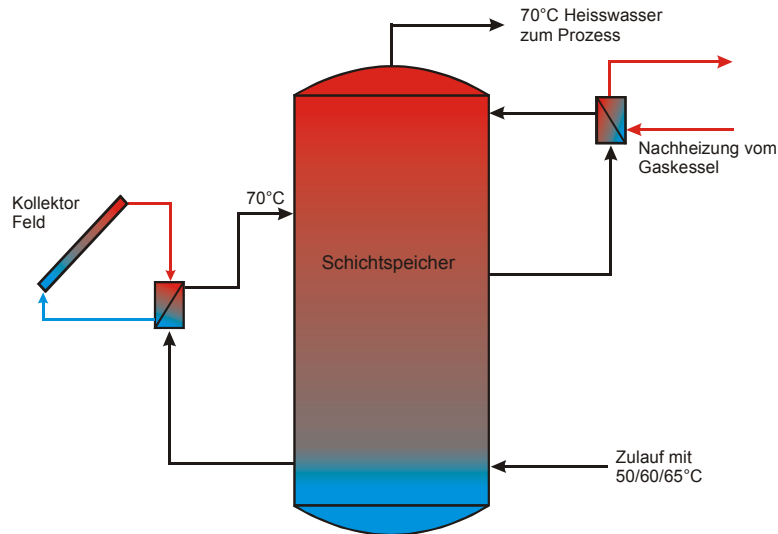


Abbildung 43: Vereinfachtes Hydraulikschema bei Beerenfrost

Simulationsergebnisse

Folgend werden die wesentlichen technischen Ergebnisse der Simulationläufe angegeben. Für die Berechnung der eingesparten Gasmenge und der vermiedenen CO₂-Emissionen wurde ein Gesamtwirkungsgrad des Nachheizsystems von 75 % angenommen.

Tabelle 25: Simulationsergebnisse Ein-Schicht-Modell

Periode	Solar an WW [kWh]	Zusatz an WW [kWh]	Gesamtbedarf [kWh]	Eingesparte Gasmenge [m ³]	Vermiedene CO ₂ -Menge [kg]
Dez–Apr	6.770	22.180	27.760	9.027	18.053
Apr–Aug	25.130	130.910	154.590	33.507	67.013
Aug–Okt	10.950	28.220	38.520	14.600	29.200
Okt–Dez	7.220	102.210	108.450	9.627	19.253

Jahr	50.070	283.520	329.320	66.760	133.520
------	--------	---------	---------	--------	---------

Tabelle 26: Simulationsergebnisse Zwei-Schicht-Modell

Periode	Solar an WW [kWh]	Zusatz an WW [kWh]	Gesamtbedarf [kWh]	Eingesparte Gasmenge [m ³]	Vermiedene CO ₂ -Menge [kg]
Dez–Apr	6.830	50.720	56.360	9.107	18.213
Apr–Aug	25.740	281.450	305.900	34.320	68.640
Aug–Okt	11.130	66.750	77.240	14.840	29.680
Okt–Dez	7.250	232.225	238.540	9.667	19.333

Jahr	50.950	631.145	678.040	67.933	135.867
------	--------	---------	---------	--------	---------

Wie sich zeigt, ändert das Produktionsmodell nichts Wesentliches an der Leistungsfähigkeit der Solaranlage. Während der Produktionstage wird der meiste Teil der Sonnenstrahlung für die Produktion verwendet. Das Zwei-Schicht-Modell verlängert im Sommer die Produktionszeit um wenige Stunden, in denen die Solaranlage noch Energie liefern kann. Dennoch ist kaum ein Unterschied zum Ein-Schicht-Modell festzustellen. Der gesamte solare Deckungsgrad liegt für das Ein-Schicht-Modell bei 15 % und beim Zwei-Schicht-Modell erwartungsgemäß bei 7,5 %. Eine Erhöhung dieses Anteils kann durch eine Vergrößerung der Kollektorfläche erreicht werden. Allerdings wird dies mit einer Verschlechterung der Wirtschaftlichkeit der Solaranlage einhergehen.

3.4.3.3 Energie-Gesamteinsparung und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Wie bereits im Beispiel der Molkerei Berglandmilch dargestellt, ergeben sich auch bei Beerenfrost folgende Einsparungsmöglichkeiten an Gasmengen zur Dampf- und Warmwasserbereitung:

Ausgehend von einem Gesamtenergieverbrauch zur Dampf- und Warmwasserbereitung von 0,63 Mio. kWh/a erreicht man durch Maßnahmen der Energieeffizienz eine Reduktion auf 0,46 Mio. kWh/a. Durch den Einsatz der berechneten Solaranlage würde sich der Gesamtenergieverbrauch um weitere 0,26 Mio. kWh/a reduzieren.

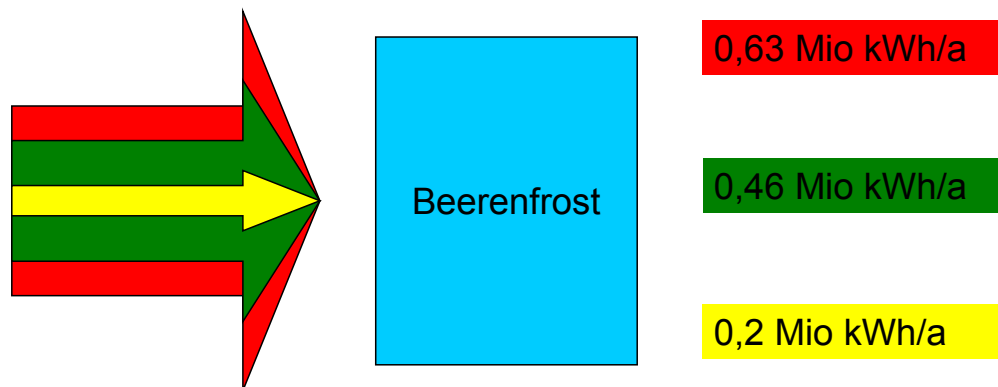


Abbildung 44: Reduktion des Energieverbrauchs bei Beerenfrost

Dies bedeutet eine totale Einsparung von ca. 70 % der momentan verbrauchten Energiemenge.

3.5 Programmevaluation

3.5.1 Hint

Allgemeine Beschreibung

Zu Beginn des Projekts war das Freewareprogramm HINT noch am Netz zu finden. Dieses Programm ermöglicht die Eingabe der heißen und kalten Ströme. Aus den Stromdaten werden die Kompositkurven und die Energiekaskade ermittelt und graphisch dargestellt. Im Netzdiagramm sind vorerst nur die Ströme und der Pinch-Bereich eingezeichnet. Nach den Designregeln der Pinch-Theorie können nun in dieses Netzdiagramm Wärmetauscher einge-

zeichnet werden. Der Wärmetauscherspezifikation liegt dabei eine Datenbank von verschiedenen Konstruktionstypen und Materialien zugrunde.

Das Programm unterstützt durch die Abfrage, zwischen welchen Strömen, ausgehend von thermodynamischen Daten für die Wärmetauscher, prinzipiell Wärme ausgetauscht werden kann. Bei Fehleingaben gibt es eine Warnmeldung, die auch ignoriert werden kann. Für Wärmetauscherdaten gibt es einige Vorgabewerte, die durch eigene Angaben ergänzt werden können. Für die heißen und kalten Hilfsenergien können Kostenfunktionen eingegeben werden.

Dieses Programm nimmt dabei an, dass es jeweils nur eine heiße und kalte Hilfsenergie gibt. Bestimmte Hilfsenergien, wie z.B.: ein Kollektorfeld, müssen als Strom definiert werden. Ansonsten ist der Anwender dafür verantwortlich, welches Wärmetauschernetzwerk zustande kommt. Stromteilungen und Wärmetauscher über den Pinch können eingegeben werden. Da es bei vielen Strömen mehrere fast optimale Netzwerke gibt, ist diese Designarbeit sehr zeitaufwändig. Allerdings erlaubt es diese Freiheit auch, im Vorhinein nicht passende Wärmetauscher (Lage, Hygienebestimmungen etc.) auszuschließen.

Bedienung

Die Eingabe der Stromdaten ist relativ einfach, latente Wärmekapazitäten wie bei Phasenübergängen können berücksichtigt werden. Die Stromdaten sind strikt in SI-Einheiten einzugeben. Berechnet werden Pinch-Temperatur, der minimale theoretische Heiz- und Kühlbedarf sowie die Größe der Wärmetauscher. Bei der Erstellung des Wärmetauschernetzwerks wird der Konstrukteur unterstützt.

Automatische Optimierungsmethoden gibt es nach der minimalen Temperaturdifferenz. Die Optimierung geht über die Kosten für die Hilfsenergien und die Größe der Wärmetauscher.

Eignung

Für kleinere Probleme ist dieses Programm gut geeignet, bei größeren Aufgaben wird die interaktive Erstellung des Wärmetauschernetzwerks schnell sehr umständlich und zeitintensiv.

Batch-Pinch ist nicht möglich.

Bemerkung

Bei einigen Windowsversionen läuft das Programm sehr instabil.

Trotz mehreren Versuchen gelang es nicht, mit den Programmierern Kontakt aufzunehmen. Daher ist nicht bekannt, in welchem Status sich das Programm befindet und was die Gründe für das vollständige Verschwinden vom Netz sind.

3.5.2 Supertarget

Allgemeine Beschreibung

Supertarget ist das professionelle Pinch-Paket von Linnhof March. Dieses Programm erlaubt eine Berechnung des Pinch über einzelne Kolonnen, einzelne Prozesse und gesamte Anlagen. Dieses Programm stand uns für Testzwecke für 2 Wochen kostenlos zur Verfügung, eine Zeitspanne, die viel zu kurz ist, um alle Details eines Programms zu testen. Wir be-

schränkten uns auf den Prozess-Pinch-Teil, weil dieser für unsere Anwendungen der geeignetste war. Dieses Programm ermöglicht die Eingabe der heißen und kalten Ströme ähnlich wie HINT, daneben können aber die Stromdaten auch aus bekannten Wärmetauscherdaten ermittelt werden. Weiters ist die Übernahme von Stromdaten aus externen professionellen Konstruktionsprogrammen möglich. Aus den Stromdaten werden die Kompositkurven und die Energiekaskade ermittelt und grafisch dargestellt. Im Netzdiagramm sind vorerst nur die Ströme und der Pinch-Bereich eingezeichnet. Nach den Designregeln der Pinch-Theorie erstellt das Programm nun automatisch mehrere Netzwerke, wobei auch Wärmetauscher über den Pinch berechnet werden, falls das Gesamtergebnis trotzdem energetisch günstiger ist. Als Ausgangslage für diese Berechnungen gilt dabei entweder eine vorher gespeicherte Variante, oder aber die Situation ganz ohne Wärmerückgewinnung. Es ist auch möglich, Wärmetauscher per Hand in das Netzdiagramm einzuzichnen. Der Wärmetauscherspezifikation liegt eine Datenbank von verschiedenen Konstruktionstypen und Materialien zugrunde. Die Auswahl unter den berechneten Netzwerkvarianten für die weiteren Berechnungen bleibt dabei dem Benutzer überlassen.

Für die Hilfsenergien können ganz gezielt Anfangs- und Endtemperatur sowie die gesamt zur Verfügung stehende Menge angegeben werden. Es gibt keine Beschränkung bei der Definition von Hilfsenergien. Jeder Hilfsenergie kann dabei ein Kostenfaktor zugeordnet werden. Bei der Optimierung auf Kosten werden daher zuerst die billigen Hilfsenergien verwendet, reichen diese nicht aus, kommen die teureren zur Anwendung. Als Standard-Wärmequelle wird eine Dampfversorgung angenommen, die Standard-Kühlquelle ist Kühlwasser.

Bedienung

Die Eingabe der Stromdaten ist relativ einfach, latente Wärmekapazitäten wie bei Phasenübergängen können berücksichtigt werden. Es stehen mehrere Einheitensysteme (metrisch, anglikanisch...) zur Verfügung, die Eingabe hat natürlich konsistent zum gewählten Maßsystem zu erfolgen. Berechnet werden Pinch-Temperatur und der minimale theoretische Heiz- und Kühlbedarf, die Größe der Wärmetauscher sowie die energetische Änderung zu vorher gespeicherten Varianten oder eine Nullvariante ganz ohne Wärmerückgewinnung. Mögliche Wärmetauschernetzwerke werden automatisch ermittelt, die Auswahl unter den berechneten Varianten obliegt dem Benutzer.

Eignung

Dieses Programm ist in der Lage, auch bei komplexen Problemen relativ schnell zu einer brauchbaren Lösung zu gelangen. Die Definition von Hilfsenergien nach Größe und Temperatur ist gerade für die Integration von Solarenergie sehr nützlich, da hier die Kennwerte eines Solarkollektorfeldes vorgegeben werden können. Auch ist es bei einmal definierten Strömen sehr einfach möglich, mehrere Varianten zu berechnen, die auch untereinander verglichen werden können.

Batch-Pinch ist nicht möglich.

Bemerkung

Aufgrund der kurzen Testphase konnten nicht alle Funktionen getestet werden.

Sehr teuer

Optimiert für den petrochemischen Bereich

3.6 Verbreitung der Ergebnisse

Im Sinne eines Know-how-Austausches und der Verbreitung der Projektidee und der Ergebnisse sind als Beispiele im Folgenden einige Vorträge der Projektmitarbeiter bezüglich Solarer Prozesswärme in Industrieprozessen genannt.

1. PROMISE – Produzieren mit Sonnenenergie, Potenzialstudie zur thermischen Solar-energienutzung in Gewerbe- und Industriebetrieben in Abhängigkeit der Produktionsprozesse, Begander U., Brunner CH., Fabrik der Zukunft – Initiative des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT) 2003
2. „Technologien und Innovationen für eine nachhaltige Produktion“, Brunner Ch., Schnitzer H., Begander U., Conference Proceedings des 8.Symposium Energie-Innovation im Rahmen der Programmlinie „Fabrik der Zukunft“, Graz 2004
3. PROMISE – Production with solar energy, Brunner Ch., Schnitzer H., Begander U., Conference Proceedings of EuroSun 2004, 5th ISES Europe Solar Conference, Freiburg 2004
4. Methoden der wärmetechnischen Integration von Solarwärme in Produktionsprozessen, Schnitzer H., Brunner Ch., Gwehenberger G., Gleisdorf Solar 2004
5. Energy Savings in Industry by competitive technologies, Brunner Ch., Schnitzer H., Gwehenberger G., European Roundtable on Sustainable Consumption and Production (ERSCP) in Antwerpen, Belgien 2005
6. Integration of Solar Thermal Energy into Industrial Processes, Brunner Ch., Schnitzer H., Gwehenberger G., European Roundtable on Sustainable Consumption and Production (ERSCP) in Antwerpen, Belgien 2005

Zusätzlich wurde im Mai 2005 die Tagung „Betriebliche Energieeffizienz und solare Prozesswärme“ von der AEE INTEC, Joanneum Research JOINTS und dem Institut RNS der TU Graz im Rahmen des Projekts durchgeführt.

Die Einladung hierzu sowie der Tagungsband befinden sich im Anhang.

4 Detailangaben zu den Zielen der Programmlinie

Die Beiträge des Projekts SolProBat zur Zielsetzung der Programmlinie werden nachfolgend entsprechend den Anforderungen an ein auf die Nutzung erneuerbarer Energieträger aufbauendes, energieeffizientes und flexibles Energiesystem vertiefend erläutert:

- Der Dienstleistungsaspekt bei solarthermischer Energieversorgung ist eine wichtige Fragestellung für künftige Umsetzungsstrategien. Entsprechende Modelle (z.B. Energie-Contracting) gibt es bereits einige. Die Solaranlage in Form von Contracting dem Industriebetrieb anzubieten, stellt eine aussichtsreiche Variante für die Umsetzung solarer Prozesswärme dar. Für diese Entwicklung ist jedoch noch einiger Entwicklungsbedarf, vor allem im Bereich des Vertragswesens, notwendig.
- Das Zusammenspiel und die Optimierung verschiedener Energieträger ist für den Anwendungsfall solare Prozesswärme selbstverständlich. Die diskontinuierliche Energieversorgung durch Sonnenenergie muss für Produktionsprozesse auf jeden Fall durch eine entsprechende Backup-Lösung abgesichert sein. Als ein nächster logischer Schritt muss eine Kombination von Energieeffizienz mittels Pinch-Analyse und anderen erneuerbaren Energieformen realisiert werden.
- Eine möglichst hohe Nutzung erneuerbarer Energieträger wird durch den Einsatz von Solarthermie in Produktionsprozessen unterstützt.
- Zum Arbeitsplatzaspekt: Der in Österreich seit einigen Jahren stagnierende Solarmarkt könnte durch die Weiterentwicklungen im Gebiet solare Prozesswärme entscheidende Steigerungen erzielen, aber auch die einzelnen Produktionsbetriebe erfahren durch die Ergebnisse eine wirtschaftliche Stärkung im Umfeld eines immer stärker werdenden Konkurrenzdrucks im internationalen Markt. Verringerung der globalen Abhängigkeit und Steigerung der Energieeffizienz sind entscheidende Vorteile hierbei.
- Schließlich ist auch noch festzuhalten, dass es durch den Einsatz von Solarthermie in Produktionsprozessen langfristig insgesamt zu einer Verringerung von verschmutzenden und den Treibhauseffekt verstärkenden Emissionen kommt.
- Jede Branche, jedes Unternehmen, jeder Produktionsprozess im Einzelnen braucht bei der solarthermischen Energieversorgung eine an die örtlichen und anderen spezifischen Anforderungen angepasste und optimierte Einzellösung, was zu einer Vielzahl verschiedener Ergebnisse führen wird. Dass Solarthermie eine entsprechende Flexibilität und Anpassungsfähigkeit hat, kann man aus den Erfahrungen der Warmwasserbereitung und solaren Raumheizung folgern.

Der Energieaspekt im Begriff der Nachhaltigkeit lässt sich stets in 2 Komponenten zerlegen. Zum einen geht es darum, eingesetzte Energie sinnvoll zu verwenden, es geht also um die Energieeffizienz. Zum anderen ist es aber auch unabdingbar, dass wir in der Energieversorgung weg von den fossilen, nicht erneuerbaren Ressourcen hin zum Einsatz erneuerbarer Energieformen kommen. In diesem Bereich kristallisiert sich immer mehr heraus, dass es dazu kein Allheilmittel gibt, sondern dass ein Mix all der verschiedenen Möglichkeiten auf diesem Gebiet sinnvoll ist. Das hat auch zusätzlich den Vorteil, dass Monopolbildungen weitestgehend vermieden werden können.

Im Projekt SolProBat wurden sowohl der Einsatz erneuerbarer Energieformen als auch die Energieeffizienz gleichwertig behandelt. Sowohl der Einsatz von Solarthermie als auch die sinnvolle Integration derselben unter Berücksichtigung der Optimierung der Energieeffizienz spielen eine wichtige Rolle.

5 Schlussfolgerungen

Die Pinch-Methode erlaubt es, Aussagen über den theoretisch minimalen Energiebedarf für Kühlen und Heizen und die maximal möglich interne Wärmerückgewinnung zu treffen. Sie erlaubt auch Auskunft darüber, bei welchen Energieniveaus und in welcher Größe Kühlungs- und Heizenergie zur Verfügung gestellt werden müssen.

Die Integration von thermischer Solarenergie in industrielle Prozesse hat über den Pinch zu erfolgen. Die Pinch-Methode gibt Auskunft darüber, bei welchen Temperaturniveaus die Integration am sinnvollsten ist. Es hat sich bei den Berechnungen der Fallbeispiele herausgestellt, dass eine Entwicklung eines gemeinsamen Pinch- und Simulationsprogramms nicht notwendig ist. Vielmehr müssen sich weitere Forschungen auf die Weiterentwicklung des Pinch-Programms für den Einsatz bei Niedrigtemperaturprozessen und die Verknüpfung mit zusätzlichen Funktionen (z.B. Kostenfunktionen) konzentrieren. Im Bereich der Solarsimulation ist die Programmierung eines für industrielle Anwendungen zugeschnittenen Tools für weitere Berechnungen notwendig.

Bei der Konstruktion des Wärmetauschernetzwerks für bestehende Anlagen wird man immer auf die existierenden Rohrleitungen, Lage von Gebäuden, bestehenden Anlagenteile etc. Rücksicht nehmen und aus den verbleibenden Varianten die betriebswirtschaftlich sinnvollste auswählen. Der theoretisch minimale Energiebedarf für Heizen und Kühlen wird daher in der Praxis nicht erreicht werden können.

Folgendes Ablaufschema verdeutlicht die Methode der Herangehensweise bei der Umsetzung:

ENERGIEAUDIT AND DESIGN-PROZESS EINES NEUEN BETRIEBES FÜR SOLARWÄRMEINTEGRATION

■ Aktionen

□ (Zwischen)Ergebnisse

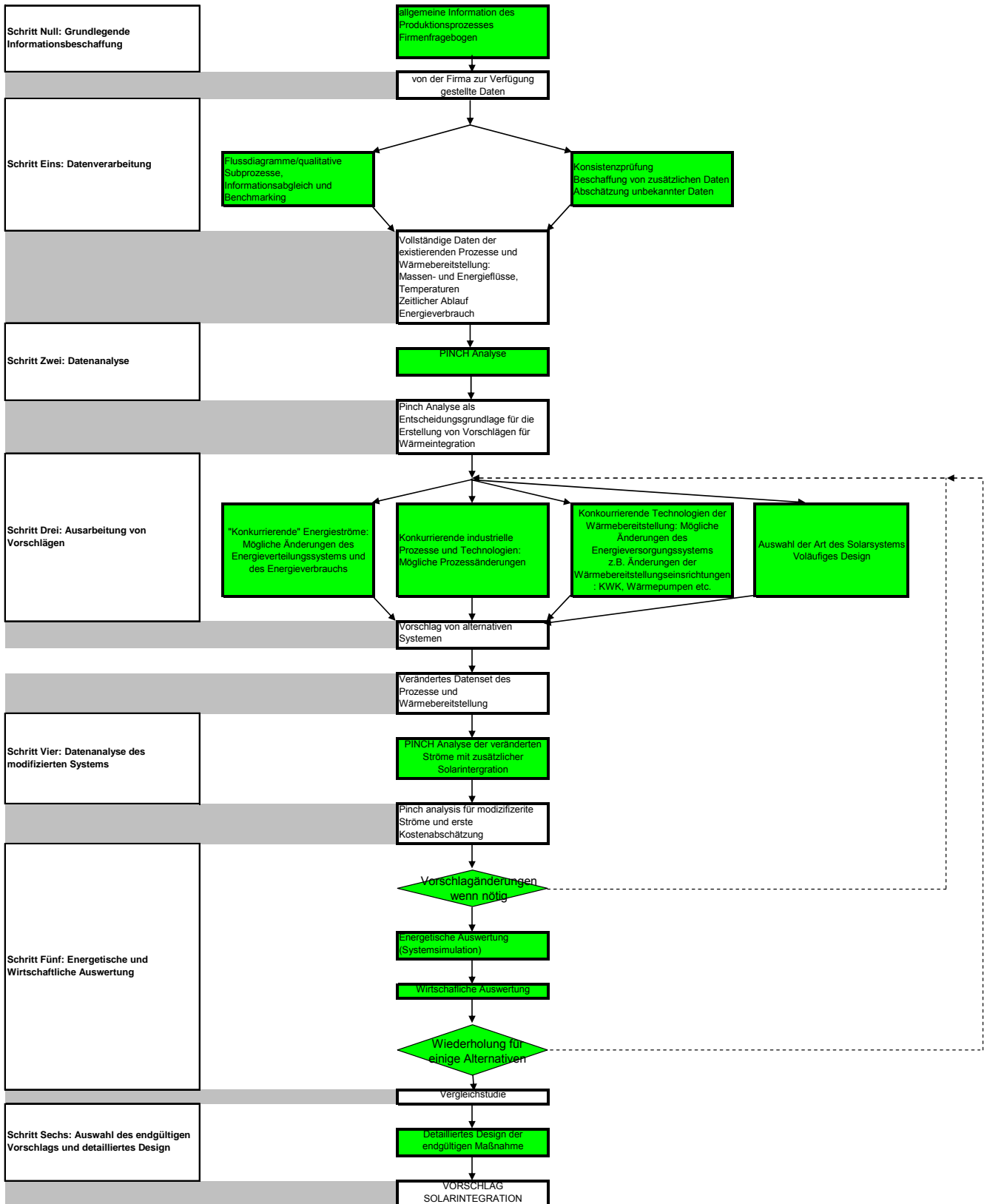


Abbildung 45: Ablaufschema für die Methode der Herangehensweise bei Projekten zur Solarwärmeintegration

Bei der Untersuchung der drei Fallbeispiele hat sich gezeigt, dass durch eine systematische Analyse des thermischen Energieverbrauchs in den meisten Fällen ein sehr hohes Einsparpotenzial zutage tritt. Gekoppelt mit dem Einsatz von Solarenergie konnte für alle Firmen ein viel versprechendes Gesamtpaket erarbeitet werden.

Ausgewählte Branchen mit ausreichenden Niedertemperaturprozessen bieten bereits heute wirtschaftliche Einsatzgebiete und werden den Anfang machen.

Die wichtigsten Folgerungen aus den bisherigen Arbeiten sind:

- Es gibt in fast allen industriell-gewerblichen Sektoren Niedertemperaturprozesse.
- Eine programmtechnische Zusammenführung von Pinch-Programm und solarer Simulation ist nicht notwendig; die Verbindung erfolgt über das gegenseitige Wissen (Solarintegration und Pinch-Analyse).
- Oftmals wird Heizen und Kühlen gleichzeitig nachgefragt, was eine integrierte Betrachtungsweise erfordert.
- Eine direkte solare Heizung der Prozesse ist wirkungsvoller, die solare Unterstützung eines existierenden Energiesystems aber risikoärmer und einfacher zu installieren.
- Trotz relativ langer Amortisationszeiten kann der Cashflow einer Solaranlage auch bei heutigen Energiepreisen positiv sein.

Die weitere Verbreitung von Solaranlagen in Industrie und Gewerbe hängt sicherlich sehr am Engagement der Energieberater und Haustechniker und bedarf einer intensiven Marktbearbeitung.

6 Ausblick

Das Ziel für weitere Arbeiten auf dem Gebiet der solaren Prozesswärme muss sein, die Solarthermie in Produktionsunternehmen energetisch und wirtschaftlich sinnvoll mit Maßnahmen zur Energieeffizienz und dem Einsatz weiterer erneuerbarer Energieträger zu verbinden. Dies kann durch die Bündelung der erarbeiteten Grundlagen und Erfahrungen über solare Prozesswärme aus verschiedenen FdZ- und EdZ-Projekten erfolgen. Um nachhaltige Energiekonzepte entwickeln zu können, müssen die vorhandenen Methoden und Werkzeuge für die Experten-anwendung (Solarbranche, Anlagenbauer, Biomasse, Berater) weiterentwickelt werden.

Die Umsetzung folgender Schwerpunkte ist für eine positive Entwicklung entscheidend:

- Bereitstellen von numerischen Verfahren (Pinch-Programm) zur Wärmeintegration in Produktionsbetrieben mit Prozessen im Niedrig- und Mitteltemperaturbereich
- Erweiterung eines Pinch-Programms in Bezug auf Kostenfunktionen
- EDV-gestützte Darstellung der wichtigsten thermischen Grundoperationen (Eindampfung, Trocknung, Pasteurisierung,...) einschließlich der Diskussion der Möglichkeiten der Energieeffizienz, der Veränderungen der Betriebsparameter in Hinblick auf eine bessere Integration von erneuerbaren Energien (Solarthermie, Biomasse, KWK, ORC,...) und des Einsatzes innovativer, energiesparender Technologien
- Systematische, EDV-gestützte Darstellung des typischen Energieverbrauchs und der Möglichkeiten zur Energieeinsparung bei Niedertemperaturprozessen in den wichtigsten Sektoren der Industrie (Lebensmittel, Textil, Metallverarbeitung, Reinigungsanstalten,...)
- Darstellung der Möglichkeiten der wärmetechnischen Integration von solarthermischen Anlagen in bestehende industrielle Heizsysteme
- Erarbeitung von wirtschaftlichen und juristischen Spezifikationen bei der Umsetzung von Contracting bei der Installierung von Solaranlagen in der industriellen Anwendung
- Erarbeitung von unterstützenden Materialien für Wirtschaftlichkeitsberechnungen und Finanzierung von Großsolaranlagen
- Entwicklung von Umsetzungsszenarien zur Unterstützung bei der Entscheidungsfindung für Produktionsbetriebe

Die Nutzung von solarer Wärme in Produktionsprozessen steht erst am Anfang und erfordert noch einen beträchtlichen Aufwand zur Umsetzung und eine Weiterentwicklung der Entwurfsmethoden. Erste umgesetzte Beispiele aber zeigen, dass die Chancen zu einer baldigen Umsetzung intakt sind und mit einer Verbreitung zu rechnen ist.

7 Literaturverzeichnis

- Valentin, G. (2001): Benutzerhandbuch T*Sol 4.x, Dr. Valentin Energiesoftware GmbH, Berlin, Deutschland
- Streicher, W., Schnedl, K., Thür, A., Vilics, A. (2004): Programmbeschreibung von SHWwin, Institut für Wärmetechnik, TU Graz, Graz, Österreich
- Klein, S. A., Beckman, W. A., et. al. (2000): A Transient System Simulation Program – Version 15, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, USA
- Polysun (1999): Polysun 3.0, Bundesamt für Energie, Bern, SPF Rapperswil, Schweiz
- Müller T., W. Weiß, H. Schnitzer, C. Brunner, U. Begander, O. Themel (2004): Endbericht „PROMISE – Produzieren mit Sonnenenergie – Potenzialstudie zur thermischen Solarenergie-nutzung in österreichischen Gewerbe- und Industriebetrieben“. AEE INTEC, Gleisdorf im Rahmen der BMVIT-Initiative „Fabrik der Zukunft“ (Proj.-Nr. 804125)
- Linnhoff, Hindmarsh, (1983): The Pinch Design Method for Heat Exchanger Networks, Chem. Eng. Sci., vol. 38, no. 5, pp. 745-763
- Linnhoff March (1998: Introduction to Pinch Technology, <http://www.linnhoffmarch.com>
- Gundersen et al. (2002): A Process Integration Primer, International Energy Agency, SINTEF Energy Research
- HINT, leider nicht mehr am Netz Verfügbar
- Supertarget, KBC Process Technology Ltd.
- Kemp, Deakin (1989): “The Cascade Analysis for Energy and Process Integration of Batch Processes – Part I. Calculation of Energy Targets”, Chem. Eng. Res. Des., vol. 67, pp. 495-505
- Gremouti (1991): “Integration of Batch Processes for Energy Savings and Debottlenecking”, M.Sc. Thesis, UMIST, Dept. of Process Integration, Manchester
- Bach P.W., Haije W.G. (2001): Heat Storage and Transformation. ZAE Symposium, Munich, 3-5 October
- European Commission (2001): Energy Storage – A key technology for decentralised power, power quality and clean transport. DG Research, ISBN 92-894-1561-4
- Gartler G., Jähnig D., Purkarthofer G., Wagner W. (2004): Development of a high energy density sorption storage system. Eurosun
- Hauer A., et al. (undated): Advanced Thermal Energy Storage through Phase Change Materials and Chemical Reactions – Feasibility Studies and Demonstration Projects. IEA, Final Report
- Hadorn J-C., ed. (2005): Thermal energy storage for solar and low energy buildings. IEA-SHC, ISBN: 84-8409-877-X

Heinz A., Streicher W., Schranzhofer H. (2006): Neue Entwicklungen bei Wärmespeichern unter Ausnutzung der Phase Change Materials – PCM. Tagung „Innovative Solar-Speicherkonzepte“, Wien

Hirschberg H.G. (1999): Handbuch Verfahrenstechnik und Anlagenbau. Springer Berlin

Kaltschmitt M., Wiese A., Streicher W. (2003): Erneuerbare Energien, Springer Berlin

N.N. 2003: Energy Storage – Key to Renewables Integration. Refocus, May/June, p34

Schmidt F., Henninger S. (2006): Neue Sorptionsmaterialien für die Wärmespeicherung. Tagung „Innovative Solar-Speicherkonzepte“, Wien

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Addition der Kurven a) und b) zur Kompositkurve c).....	7
Abbildung 2: Kombination der kalten und heißen Kompositkurve zu einem Diagramm. Aus diesem Diagramm kann der minimale theoretische Kühlbedarf, der minimale theoretische Heizbedarf und die maximal für eine interne Wärmerückgewinnung zur Verfügung stehende Energiemenge abgelesen werden.	8
Abbildung 3: Abschreibung der Investitionskosten und Energiekosten erlauben die Bestimmung einer optimalen Temperaturdifferenz ΔT_{\min}	9
Abbildung 4: Die „Grand Composite Curve (GCC)“. Aus der GCC kann abgelesen werden, bei welchen Temperaturniveaus welche Energiemenge dem Prozess zu- oder abgeführt werden muss.	10
Abbildung 5: Energiedichte physikalischer und chemischer Umwandlungen	13
Abbildung 6: Verfügbare Materialien für Wärmespeicherung durch Phasenwechsel [Hauer et al. undated].....	16
Abbildung 7: Beispiel eines mit Hilfe der Pinch-Methode konstruierten Wärmetauschernetzwerkes. In diesem Beispiel wurde ein Solarkollektorfeld als zusätzliche Utility eingeführt. Die Berechnungen erfolgten mit dem Programm SuperTarget von KBC Process Technology Ltd.	20
Abbildung 8: Integration von thermischer Solarenergie als zusätzlicher Wärmestrom	20
Abbildung 9: Zeitintervalle für das Beispiel zum Batch-Pinch. Die unterschiedlichen Beginn- und Endzeiten der Ströme teilen die Gesamtzeit in 6 Teilbereiche.	22
Abbildung 10: Die zweidimensionale Wärme-Zeit-Kaskade für das einfache Beispiel in Tabelle 1.....	23
Abbildung 11: Hauptmenü METEONORM mit Daten für Graz.....	26
Abbildung 12: TSol Anlagenschema Nr. 10	29
Abbildung 13: Hauptmenü Polysun	31
Abbildung 14: Anlagenschema Fallbeispiel SHWwin.....	33
Abbildung 15: Ergebnisse der Simulationsprogramme	37
Abbildung 16: Fließschema Käseproduktion (Ziffern bedeuten die Stromnummern).....	42
Abbildung 17: Sankey-Diagramm der Käseproduktion	43
Abbildung 18: Wärmetauschernetzwerk für die Variante 1, berechnet und konstruiert mit Hilfe von HINT	48
Abbildung 19: Mögliches Wärmetauschernetzwerk für die Variante 1	49

Abbildung 20: Ein mögliches Wärmetauschernetzwerk für die Variante 3 bei Berglandmilch. Die Wärmetauscher WT Ux stellen zusätzliche Heizung und Kühlung bereit (utilities)...	50
Abbildung 21: vereinfachtes Hydraulikschema bei Berglandmilch	52
Abbildung 22: Jahresverlauf der solaren Erträge bei Berglandmilch	53
Abbildung 23: Geldrückfluss Solaranlage bei Berglandmilch	54
Abbildung 24: Reduktion des Energieverbrauchs in der Käsefertigung	55
Abbildung 25: Berechnungsschema der Kapitalwiedereinbringzeit	55
Abbildung 26: Kapitalwiedereinbringzeit der Gesamtinvestition.....	56
Abbildung 27: Fließbild Färberei bei Wolford	57
Abbildung 28: Sankey-Diagramm der Energieflüsse der Färberei bei Wolford	58
Abbildung 29: Grand Composite Curve für die Ströme bei Wolford	59
Abbildung 30: Jahresverlauf Energiebedarf Wolford	60
Abbildung 31: Schema der Einbindung der Solaranlage bei Wolford	61
Abbildung 32: Jahresverlauf der solaren Erträge bei Wolford	63
Abbildung 33: Geldrückfluss Solaranlage bei Wolford	64
Abbildung 34: Reduktion des Energieverbrauchs bei Wolford	64
Abbildung 35: Berechnungsschema der Kapitalwiedereinbringzeit	65
Abbildung 36: Kapitalwiedereinbringzeit der Gesamtinvestition.....	65
Abbildung 37: Flow Sheet Beerenfrost.....	67
Abbildung 38: Schematische Darstellung der vorhandenen wärmerlevanten Prozesse und Speicher. Die Produktionsprozesse wurden in die Abschnitte A bis G eingeteilt, die auch zu unterschiedlichen Jahreszeiten vorhanden sind.....	68
Abbildung 39: Wärmetauschernetzwerk für den Zeitabschnitt 1	69
Abbildung 40: Wärmetauschernetzwerk für den Zeitabschnitt 2	70
Abbildung 41: Wärmetauschernetzwerk für den Zeitabschnitt 3	71
Abbildung 42: Wärmetauschernetzwerk für den Zeitabschnitt 4	72
Abbildung 43: Vereinfachtes Hydraulikschema bei Beerenfrost	75
Abbildung 44: Reduktion des Energieverbrauchs bei Beerenfrost.....	76
Abbildung 45: Ablaufschema für die Methode der Herangehensweise bei Projekten zur Solarwärmeintegration.....	83

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Erfahrungswerte für die Differenz ΔT_{\min} zwischen oberer und unterer Pinch-Temperatur (Linnhoff March, 1998).....	8
Tabelle 2: Stromdaten für zwei heiße und zwei kalte Ströme, die auch einen zeitlichen Verlauf haben.....	22
Tabelle 3: Übersicht Wetterdatenbanken und -generatoren	24
Tabelle 4: Geprüfte Solarsimulationsprogramme	27
Tabelle 5: Anforderungen an Simulationsprogramme für solare Prozesswärmeerzeugung ..	27
Tabelle 6: Zusatzanforderungen zum Datenaustausch.....	28
Tabelle 7: Anlagenschemata für reine Warmwasserbereitung in TSol	29
Tabelle 8: Anlagentypen in Polysun 3.0	30
Tabelle 9: Anlagentypen in SHWwin	32
Tabelle 10: Vorgaben Fallbeispiel	34
Tabelle 11: Bedarfsprofil Fallbeispiel	35
Tabelle 12: Ergebnisse der Simulationsprogramme	36
Tabelle 13: Übersicht Solarsimulationsprogramme.....	38
Tabelle 14: Bewertungsmatrix Solarsimulationsprogramme	39
Tabelle 15: Zusammenfassung der Ströme bei Berglandmilch.....	47
Tabelle 16: Bedarfsprofil Käsewaschwasser.....	51
Tabelle 17: Übersicht Ergebnisse Berglandmilch.....	52
Tabelle 18: Randbedingungen Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Berglandmilch.....	53
Tabelle 19: Übersicht Ergebnisse Wolford	62
Tabelle 20: Tätigkeiten und Zeitbereiche bei der Firma Beerenfrost.	66
Tabelle 21: Beerenfrost – Übersicht Ströme und Heizenergiebedarf.....	73
Tabelle 22: Beerenfrost Ein-Schicht-Modell – Energiebedarf für Solaranlage	73
Tabelle 23: Beerenfrost Zwei-Schicht-Modell – Energiebedarf für Solaranlage.....	74
Tabelle 24: Beerenfrost – Heiztage und Produktionstage pro Periode	74
Tabelle 25: Simulationsergebnisse Ein-Schicht-Modell	75
Tabelle 26: Simulationsergebnisse Zwei-Schicht-Modell	75