

IEA Solares Heizen und Kühlen (SHC) Task 64: Solare Prozesswärme

Arbeitsperiode 2020 - 2023

Berichte aus Energie- und Umweltforschung 84/2025

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:

Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur,
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:

Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien

Leitung: DI (FH) Volker Schaffler, MA, AKKM

Kontakt zu „IEA Forschungsk Kooperation“: Mag.^a Sabine Mitter

Autorinnen und Autoren:

DI Wolfgang Gruber-Glatzl, Rene Baumann BSc (AEE – Institut für nachhaltige
Technologien)

Dr. Simon Moser, Dr.in Valerie Rodin (Energieinstitut an der Johannes Kepler Universität
Linz)

Dr. Winfried BRAUMANN (REENAG Holding GmbH)

Ein Projektbericht gefördert im Rahmen von



Gleisdorf, Dezember 2024

Rückmeldungen: Ihre Überlegungen zu vorliegender Publikation übermitteln Sie bitte an
iii3@bmimi.gv.at.

Disclaimer:

Dieser Ergebnisbericht wurde von der Fördernehmer:in erstellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit, Aktualität sowie die barrierefreie Gestaltung der Inhalte übernimmt das Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI) keine Haftung.

Mit der Übermittlung der Projektbeschreibung bestätigt die Fördernehmer:in ausdrücklich, über sämtliche für die Nutzung erforderlichen Rechte – insbesondere Urheberrechte, Leistungsschutzrechte sowie etwaige Persönlichkeitsrechte abgebildeter Personen – am bereitgestellten Bildmaterial zu verfügen.

Die Fördernehmer:in räumt dem BMIMI ein unentgeltliches, nicht ausschließliches, zeitlich und örtlich unbeschränktes sowie unwiderrufliches Nutzungsrecht ein, das übermittelte Bildmaterial in allen derzeit bekannten sowie künftig bekannt werdenden Nutzungsarten für Zwecke der Berichterstattung, Dokumentation und Öffentlichkeitsarbeit im Zusammenhang mit der geförderten Maßnahme zu verwenden, insbesondere zur Veröffentlichung in Printmedien, digitalen Medien, Präsentationen und sozialen Netzwerken.

Für den Fall, dass Dritte Ansprüche wegen einer Verletzung von Rechten am übermittelten Bildmaterial gegen das BMIMI geltend machen, verpflichtet sich die Fördernehmer:in, das BMIMI vollständig schad- und klaglos zu halten. Dies umfasst insbesondere auch die Kosten einer angemessenen rechtlichen Vertretung sowie etwaige gerichtliche und außergerichtliche Aufwendungen.

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts im Rahmen der IEA Forschungsk Kooperation. Es wurde vom Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI) initiiert, um österreichische Forschungsbeiträge zu den Kooperationsprojekten der Internationalen Energieagentur (IEA) zu unterstützen.

Die IEA Forschungsk Kooperationen umfassen eine breite Palette an Energiethemen mit dem Ziel Energiesysteme, Städte, Mobilitäts- und Industriesysteme fit für eine nachhaltige Zukunft bis 2050 zu machen. Auch Themen wie Gendergerechtigkeit oder Ressourcen- und Kreislaufwirtschaftsaspekte werden berücksichtigt.

Dank des überdurchschnittlichen Engagements der beteiligten Forschungseinrichtungen und Unternehmen ist Österreich erfolgreich in der IEA verankert. Durch die vielen IEA-Projekte entstanden bereits wertvolle Inputs für europäische und nationale Energieinnovationen und neue internationale Standards. Auch in der Marktumsetzung konnten richtungsweisende Ergebnisse erzielt werden.

Ein wichtiges Anliegen ist es, die Projektergebnisse einer interessierten Öffentlichkeit zugänglich zu machen. Daher werden alle Berichte nach dem Open Access Prinzip in der Schriftenreihe des BMIMI über die Plattform nachhaltigwirtschaften.at veröffentlicht.

Inhalt

Impressum	2
1 Kurzfassung	7
2 Abstract	8
3 Ausgangslage.....	9
4 Projektinhalt	11
4.1 Zielsetzung	11
4.2 Unteraufgaben und Leitländer.....	11
4.3 Österreichische Beteiligung	18
5 Ergebnisse	19
5.1 Integrierte Energiesysteme.....	19
5.1.1 Referenzanwendungen und Lastprofil-Cluster	19
5.1.2 Repräsentative Standorte	23
5.1.3 Systemdesign von Integrierten Energiesystemen.....	25
5.2 Modularisierung von Systemkonzepten	32
5.2.1 Allgemeine Integrationskonzepte von integrierten Energiesystemen	32
5.2.2 Wesentliche Parameter für ein modulares Balance of Plant (BOP).....	34
5.3 Design- und Simulationswerkzeuge	38
5.3.1 Methodik.....	38
5.3.2 Vergleichsstudie von SHIP-Simulationswerkzeugen	39
5.3.3 Fallstudien	40
5.3.4 Ergebnisbewertung der Simulationstools	43
5.3.5 Design-Werkzeug CORES.....	44
5.4 Standardisierungen	47
5.4.1 Standardisiertes Vokabular	47
5.4.2 Standardisierte Umrechnungsfaktor Fläche zu Leistung	47
5.5 Guideline-to-Market	48
5.5.1 Relevante Methoden und Materialien für die Bewertung von Technologiekosten und Statistiken	49
5.5.2 Update zu den Technologiekosten.....	51
5.5.3 Trends zur Kostensenkung	52
5.5.4 Vergleich und Synergien für integrierte Energiesysteme	53
5.5.5 Angewandte Geschäftsmodelle für SHIP	55
5.5.6 Finanzierungsmodelle	58
5.6 Publikationen	59
5.6.1 Task-Ergebnisse	59
5.6.2 Disseminierung der Projektergebnisse	60
6 Vernetzung und Ergebnistransfer	62
7 Schlussfolgerungen, Ausblick und Empfehlungen.....	63
8 Tabellenverzeichnis	65

9	Abbildungsverzeichnis	66
10	Literaturverzeichnis	68

1 Kurzfassung

Der IEA SHC Task 64/IV zielt darauf ab, Solarthermie-Technologien als festen Bestandteil industrieller Wärmeversorgungssysteme zu etablieren. Trotz vieler nationaler und internationaler Initiativen im Bereich solarer Prozesswärme (Solar Heat in Industrial Processes – SHIP) und vieler technologischer Fortschritte liegt das Marktvolumen weit unter den Erwartungen: Weltweit sehen wir weniger als 1.000 SHIP-Installationen. Daher lag der Fokus auf systemischen Ansätzen, der Standardisierung von Integrationskonzepten und der Kombination mit anderen effizienten Wärmequellen wie Wärmepumpen, Biomasse und Power-to-Heat-Technologien.

Im Rahmen des Tasks wurden standardisierte Lastprofile auf Basis von Clusteranalysen entwickelt und in einem Excel-Tool zur praktischen Anwendung zusammengefasst, das Planer:innen ermöglicht, spezifische industrielle Lastprofile für verschiedene Standorte und Branchen abzuleiten. Ein Schwerpunkt lag auf der Entwicklung modularer und normierter Balance-of-Plant-Konzepte, die eine einfache Integration in industrielle Prozesse ermöglichen. Die Arbeiten zu integrierten Energiesystemen verdeutlichten die technische und wirtschaftliche Machbarkeit, fossile Wärmeerzeuger durch kombinierte Systeme aus Solarthermie und Wärmepumpen zu ersetzen, wobei insbesondere serielle und parallele Hydraulikkonzepte untersucht wurden.

Ein zentraler Bestandteil war die Bewertung von Simulationstools zur Planung und Optimierung von SHIP-Anlagen. Hierzu wurden Simulationsversuche mit mehreren Fallstudien durchgeführt, die unterschiedliche Technologien und Szenarien abbildeten, darunter Flachkollektoren, Fresnel-Systeme und Parabolrinnen-Kollektoren. Die Ergebnisse zeigten deutliche Unterschiede zwischen den verwendeten Tools hinsichtlich Modellierungsansätzen und Genauigkeit, was die Notwendigkeit standardisierter Simulationsmethoden unterstreicht. Die gewonnenen Erkenntnisse flossen in die Weiterentwicklung von Designrichtlinien und Simulationsansätzen ein.

Neben der technischen Dimension wurde auch die Marktintegration adressiert: Die „Guideline to Market“ bietet umfassende Empfehlungen zu Planungsstrategien, Kostenreduktionen, Geschäftsmodellen und Finanzierungsansätzen, darunter innovative Modelle wie Energy-as-a-Service und Leasingoptionen. Diese ermöglichen eine breitere Akzeptanz durch die Reduktion von Kapitalkosten und Bonitätsrisiken. Standardisierte Methoden zur Bewertung von Technologien und Systemen wurden entwickelt, einschließlich der Erweiterung der SHIP-Datenbank mit über 670 Anlagen, die als Grundlage für technische, wirtschaftliche und regulatorische Analysen dient.

Die Ergebnisse des Tasks tragen wesentlich zur Vereinheitlichung von Design- und Simulationsansätzen bei. Daher bieten diese Unternehmen und politischen Akteur:innen Handlungsempfehlungen, um die Marktpenetration für SHIP zu fördern. Mit diesen Maßnahmen wird Solarthermie als nachhaltige, effiziente und skalierbare Technologie für industrielle Anwendungen positioniert.

2 Abstract

IEA SHC Task 64/IV aims to establish solar technologies as an integral part of industrial heat supply systems. Despite many national and international initiatives in the field of solar process heat (Solar Heat in Industrial Processes -SHIP) and great technological progress, the growth in market volume is far below expectations: We see fewer than 1,000 SHIP installations worldwide. The focus was therefore on systemic approaches, the standardisation of integration concepts and the combination with other efficient heat sources such as heat pumps, biomass and power-to-heat technologies. As part of the task, standardised load profiles based on cluster analyses were developed and summarised in an Excel tool for practical applications, which enables planners to derive specific industrial load profiles for different locations and sectors. One focus was on the development of modular and standardised balance-of-plant concepts that enable simple integration into industrial processes. The work on integrated energy systems illustrated the technical and economic feasibility of replacing fossil heat boilers with integrated renewable systems consisting of solar thermal energy and heat pumps, whereby serial and parallel hydraulic concepts were analysed in particular.

A central component was the evaluation of simulation tools for planning and optimising SHIP – plants. To this end, simulation tests were carried out with several case studies that depicted different technologies and scenarios, including flat-plate collectors, Fresnel systems and parabolic trough collectors. The results showed clear differences between the tools used in terms of modelling approaches and accuracy, which underlines the need for standardised simulation methods. The knowledge gained was incorporated into the further development of design guidelines and simulation approaches.

In addition to the technical dimension, market integration was also addressed: The ‘Guideline to Market’ offers comprehensive recommendations on planning strategies, cost reductions, business models and financing approaches, including innovative models such as energy-as-a-service and leasing options. This enables broader acceptance by reducing capital costs and credit risks. Standardised methods for evaluating technologies and systems have been developed, including the expansion of the SHIP database with over 670 systems, which serves as the basis for technical, economic and regulatory analyses.

The results of the task contribute significantly to the standardisation and harmonisation of design and simulation approaches. Therefore, offering companies and political actors’ recommendations to promote the market penetration of solar process heat. These measures will position solar thermal energy as a sustainable, efficient and scalable technology for industrial applications.

3 Ausgangslage

Trotz vieler nationaler und internationaler Initiativen im Bereich solarer Prozesswärme (Solar Heat in Industrial Processes – SHIP) und sehr vieler technologischer Fortschritte liegt das Wachstum des Marktvolumens weit unter den Erwartungen: Weltweit sehen wir weniger als 1.000 SHIP-Installationen, wie man der kumulierten Darstellung in Abbildung 3-1 erkennen kann.

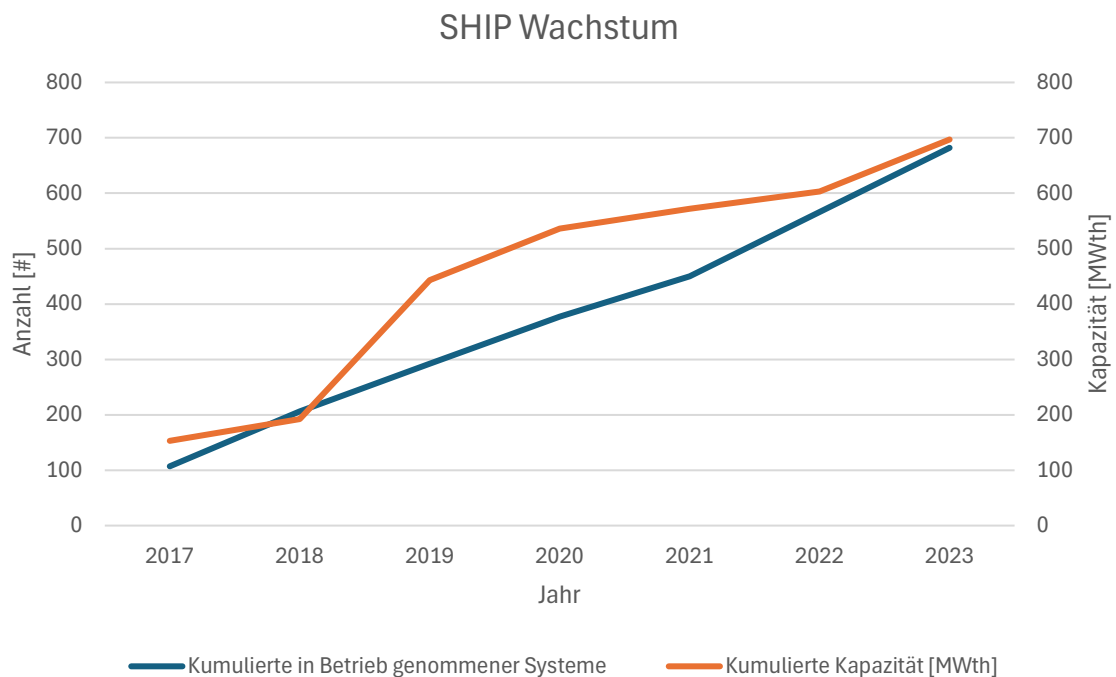


Abbildung 3-1 SHIP – Anlagen Wachstum 2017 – 2023

Andererseits wird das **Potenzial für Solare Prozesswärme** nach wie vor als relevant angesehen: In der Größenordnung von 2% bis 4% des gesamten industriellen Wärmebedarfs eines mitteleuropäischen Landes kann der Wärmebedarf realistischerweise durch Solartechnologien gedeckt werden, vgl. (Platzer, 2015). SHIP kann daher einen erheblichen Beitrag zur CO₂-Reduktion leisten.

Wesentliche Vor-Tasks waren vor allem die zwei Tasks, die sich bisher schon mit SHIP beschäftigt haben: Der IEA SHC Task 33 war der erste Task des SHC TCP zum Thema SHIP in dem viele Grundlagen wie Potentialstudien, Marktrecherchen und erste Design Guidelines erstellt wurden. Im IEA SHC Task 49 wurden Integrationskonzepte für SHIP entwickelt und darauf aufbauend ein detaillierter Leitfaden (die „Integration Guideline“) erstellt. Weiters wurden Entwicklungsarbeiten und Testpro-

zeduren für Mitteltemperatur-Kollektoren zusammengeführt und an Best-Practice-Beispielen gearbeitet und in die neu entwickelte SHIP - Datenbank¹ integriert. Zu erwähnen ist auch der IEA SHC Task 44, bei welchem hybride Konzepte (Solarthermie und Wärmepumpen) für den Gebäudebereich behandelt wurden.

Im österreichischen Projekt EnPro wurden hybride Konzepte von SHIP und Wärmepumpen entwickelt und qualitativ bewertet. Diese Konzepte wurden im darauf aufbauenden Projekt CORES aufgegriffen, um auch eine quantitative Bewertung von hybriden Konzepten (Abwärme, Wärmepumpen, Solarthermie, Speicher) zu ermöglichen. Auf internationaler Ebene sind wesentliche Forschungs-Projekte die Horizon-Projekte SHIP2FAIR mit 4 Demonstratoren in der Lebensmittelindustrie und dem Projekt FRIENDSHIP bei dem der technologische Fokus auf solarer Prozesswärme und -kälte lag und zudem an regulatorischen und finanziellen Verbesserungen für SHIP gearbeitet wird. Zu erwähnen ist das Projekt INDHEAP, dass die innovative Kombination von Solarthermie mit einem Hochtemperatur-Speicher mit flexibler Photovoltaik-Nachheizung demonstriert. Das Projekt begann mit Ende des vorliegenden Tasks.

Aus diesen vergangenen und laufenden Projekten ergaben sich folgende Fragestellungen:

- Welche hybriden Konzepte für die Industrie (Solarthermie und Wärmepumpen) sind technisch möglich und wie kann man die Anlagenteile dimensionieren und bewerten?
- Wie kann man Kosten reduzieren und die Planung verbessern, indem man Standardisierungen und Modularisierung vorantreibt und Simulationstools richtig einsetzt?
- Welche Trends in der Projektentwicklung und Finanzierung sind vielversprechend und können in einer Guideline to Market für eine bessere Marktdurchdringung genutzt werden?

¹ <https://ship-plants.info/>

4 Projekinhalt

4.1 Zielsetzung

Das Hauptziel von Task 64/IV ist es, Solartechnologien als zuverlässigen und anerkannten Bestandteil von Prozesswärmesystemen zu etablieren. Anstatt sich auf die Entwicklung einzelner Komponenten zu konzentrieren, liegt der Fokus auf dem Gesamtsystem, das bei Prozesstemperaturen von knapp über Umgebungstemperatur bis etwa 400°C–500°C arbeitet. Zu den offenen Forschungsfragen gehören die Standardisierung von Integrationskonzepten auf Prozess- und Versorgungsebene sowie die Kombination mit anderen effizienten Wärmeversorgungstechnologien wie Kraft-Wärme-Kopplung, Wärmepumpen oder Power-to-Heat-Systemen. Ein wesentlicher Aspekt ist die Zusammenführung von Erfahrungen aus verschiedenen globalen Märkten für Solar-Prozesswärme, um eine marktorientierte Verbreitung vorhandenen und neuen Wissens zu ermöglichen.

Ziel ist es, die Rolle von solarthermischen Anlagen in Kombination mit anderen Technologien wie Biomasse-, Biogas-, oder fossilen Brennern, Hochtemperatur-Wärmepumpen oder Power-to-Heat-Lösungen zu identifizieren, zu validieren und zu fördern. Dies erfordert auch die Optimierung des Energiespeichermanagements unter Berücksichtigung unterschiedlicher thermischer Speichertechnologien. Damit kann Solarenergie zu einem verlässlichen Bestandteil zukünftiger industrieller Wärmeversorgungssysteme werden.

4.2 Unteraufgaben und Leitländer

Subtask A: Integrierte Energiesysteme

Leitland: Deutschland

Leitung: Prof. Dr. Ulrike Jordan und Dr. Felix Pag, Universität Kassel

Subtask A zielte darauf ab, Referenzanwendungen für erneuerbare Heizsysteme zu analysieren, auszuwählen und zu definieren. Grundlage war die Definition repräsentativer Anwendungen anhand von Lastprofilen, Temperaturniveaus und Standorten, die ein breites Spektrum industrieller Anforderungen abbilden sollen. Ziel war es, die globale Variabilität potenzieller Wärmesenken darzustellen.

Im Rahmen der Analyse wurde die SHIP-Datenbank umfassend erweitert und modernisiert. Mit nun rund 670 erfassten Anlagen bietet sie detaillierte Informationen zu Prozessen, Integrationskonzepten und wirtschaftlichen Parametern, die auch in die jährliche Solarmarktstatistik einfließen. Eine Clusteranalyse auf Basis von KI-Algorithmen identifizierte Muster im Gasverbrauch und Prozesswär-

mebedarf verschiedener Industriesektoren, wobei Sektoren wie Lebensmittel- und Getränkeherstellung unabhängig von Außentemperaturen agieren, während etwa die Elektronikproduktion klare Abhängigkeiten zeigt.

Zur Fokussierung wurden Temperaturniveaus von 80°C und 150°C ausgewählt, da diese für Solarthermie und Wärmepumpen besonders relevant sind. Die Untersuchung repräsentativer Standorte umfasste die Analyse gemäßigter, subtropischer und tropischer Klimazonen, um Bedingungen für optimale solare Deckungsgrade und den Bedarf an Speichertechnologien zu identifizieren. Abschließend wurde ein Regressionsmodell entwickelt, das generische Lastprofile anhand von Umgebungstemperaturen mathematisch beschreibt. Auf dieser Basis entstand ein EXCEL-Tool, das Anwendern ermöglicht, spezifische Cluster und Umgebungsbedingungen einzugeben, um daraus branchenspezifische Lastprofile abzuleiten.

Weiters bildeten in Subtask A die Berichte „Tips and Tricks to Contract and Design a SHIP Project“, der praxisnahe Empfehlungen für das Design von SHIP-Projekten bietet, und „How Load Profile and Roof Area Limit Solar Fractions of SHIP Plants“, die sich mit den Herausforderungen begrenzter Dachflächen in der Industrie und daraus abgeleiteten Planungsrichtlinien befasst, zusammen mit den Systemkonzepten aus Task 2.3 und den Arbeiten im Subtask A, die technisch-ökonomische Grundlage für die Erstellung der „Integrationskonzepte und Design-Richtlinien“.

Auf die Definition der drei Standorte Bern, Casablanca und Bangkok, die unterschiedliche Klimazonen repräsentieren, erfolgte eine Analyse von Einstrahlungsprofilen aus Meteonorm. Hierbei wurden zwei zentrale Parameter berücksichtigt: das Verhältnis der minimalen zur maximalen Monatseinstrahlung zur Darstellung saisonaler Schwankungen und die jährliche Einstrahlung als Grundlage für Wirtschaftlichkeitsanalysen. Parallel dazu entwickelte die Universität Kassel Standardlastprofile auf Basis statistisch ausgewerteter Wärmebedarfsdaten. Die darauf basierenden Simulationsstudien zeigten, dass Kombinationen aus Solarthermie und Wärmepumpen industrielle Prozesse nahezu vollständig abdecken können. Insbesondere bei hoher solarer Einstrahlung und einem Wärmepumpenanteil von mindestens 50 % reduziert sich der Bedarf an Backuplösungen auf nahezu null.

Task 64/IV ergab, dass sich die Forschung zu kombinierten SHIP- und WP-Systemen in der Industrie hauptsächlich auf die Ergebnisse des österreichischen ENPRO-Projekts beschränkt. Während die VDI-Richtlinie 3988 bereits eine etablierte Grundlage für die Auslegung von SHIP-Anlagen bietet und auch für kombinierte Systeme anwendbar ist, fehlt bislang ein spezifischer Leitfaden zur Auslegung von Wärmepumpen in industriellen Anwendungen. Im Jahr 2023 wurde die Dimensionierungs- und Integrationsrichtlinie abgeschlossen. Die Richtlinie fokussiert darauf, Solarwärme in kombinierten Systemen priorisiert einzusetzen, um den Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen zu minimieren. Die Arbeiten wurden im nationalen Deliverable 2.3 dokumentiert und stellen einen wichtigen Schritt zur Förderung effizienter und nachhaltiger Industrieprozesse dar.

Subtask B: Modularisierung

Leitland: Spanien

Leiter: Dr. Eduardo Zarza Moya, Plataforma Solar de Almería

Im Rahmen des Subtask B wurden umfassende Arbeiten zur Integration von Solarwärme in industrielle Prozesse durchgeführt. Basierend auf früheren Erkenntnissen aus dem SHC-Task 49, insbesondere der „Integration Guideline“, wurden die entwickelten Integrationskonzepte für SHIP-Anwendungen als Grundlage genutzt. Parallel dazu flossen modulare Konzepte, die in Zusammenarbeit mit der Universität Kassel für die Kombination von SHIP, Wärmepumpen und anderen erneuerbaren Technologien entwickelt wurden, maßgeblich in die Methodik ein. Diese Methodik ermöglichte die Erstellung standardisierter Lastprofile für industrielle Systeme unter Berücksichtigung von Klimazonen, Industriesektoren und Prozesswärmebedarf. Ergebnisse dieser Arbeiten wurden bei Konferenzen, darunter der EuroSun 2022, präsentiert.

Ein zentrales Ergebnis war die Entwicklung einer standardisierten Methode zur Berechnung der Leistung konzentrierender Kollektoren, die nach breiter Konsultation durch die Task-Community und das SHC ExCo genehmigt wurde. Ein spezifischer Leistungsfaktor von $0,7 \text{ kWth/m}^2$ wurde als Benchmark für Statistiken eingeführt. Die Ergebnisse wurden in einer „Technical Note“ und dem Bericht „Integration schemes and BOPs more commonly used in commercial SHIP applications“ veröffentlicht, der auch eine Analyse zu Integrationskonzepten für Mittel- und Niedertemperaturanwendungen enthält.

Für Mitteltemperaturanwendungen wurden diverse Integrationskonzepte von Industriepartnern wie PROTARGET, RIOGLASS und SOLATOM untersucht. Die Bandbreite der Vorschläge zeigt, dass zukünftige Projekte unterschiedliche Integrationsstrategien verfolgen könnten. Für Niedertemperaturanwendungen lieferte die SHIP-Datenbank wichtige Einblicke, wobei die häufigsten Integrationspunkte die Frischwasseraufbereitung und direkte Prozesswärmeversorgung waren.

Ein weiterer Schwerpunkt war die Definition generischer „Balance of Plants“ (BOPs). Statt einer beschränkten Auswahl an Integrationskonzepten wurde eine systematische Analyse der am häufigsten verwendete Fluiden in Prozessen und Solarfeldern durchgeführt, um sinnvolle Kombinationen zu identifizieren. Diese führten zu generischen BOP-Ansätzen, darunter ein Konzept für Direktdampferzeugung und eines für druckbeaufschlagtes Wasser und heiße Luft.

Zusammenfassend zeigte die Arbeit die Herausforderungen bei der Standardisierung von Integrationskonzepten und führte zu einer flexibleren Strategie mit Fokus auf fluidbasierte Ansätze. Diese Ergebnisse fanden Eingang in Subtask B, der eine techno-ökonomische Bewertung von Systemkonzepten für SHIP in integrierten Energiesystemen umfasste. Hier wurden Systemlösungen aus österreichischen Projekten wie EnPro und CORES herangezogen, die hybride Wärmepumpenlösungen sowie Kombinationen aus Solarthermie, Photovoltaik und Speichertechnologien beinhalteten. Die daraus abgeleiteten Systemkonzepte wurden abschließend in Design-Richtlinien zusammengefasst.

Unteraufgabe C: Simulation und Design-Tools

Leitland: Chile

Leiter: Prof. Dr. José Miguel Cardemil, Universität von Chile

Im Rahmen von Subtask C wurden Methoden und Tools untersucht, die eine gleichzeitige Betrachtung von Prozessintensivierung und Solarintegration ermöglichen. Ziel war es, deren Eignung für unterschiedliche Planungsphasen zu bewerten. Es wurde dazu das bestehende Tool SOCO (Storage Optimization Concept), Ansätze aus dem nationalen Projekt CORES sowie das interne SHIP-Auslegungstool eingebracht. Diese Werkzeuge wurden an den internationalen Subtask-Leiter übermittelt, der sie in die laufenden Arbeiten integrierte.

Ein intensiver Austausch zwischen den internationalen Partnern zeigte die Vielfalt der Ansätze. Neben reinen Simulationsmethoden wurden auch Optimierungsverfahren verglichen, die auf verschiedenen Plattformen zum Einsatz kamen. Der internationale Subtask-Leiter erstellte ein umfassendes Kompendium verfügbarer Tools, basierend auf den Beiträgen aller Partner. Die Ergebnisse und Erkenntnisse aus dem Vergleich der Simulationswerkzeuge wurden auf einem Expert:innentreffen in Bordeaux präsentiert und stießen auf großes Interesse. Dabei lag der Fokus nicht auf einer Bewertung der Tools, sondern auf der Analyse der Sensitivität verschiedener Modellierungsansätze.

Im Rahmen dieses Tasks wurden vier Fallstudien durchgeführt, bei denen unterschiedliche Simulationstools eingesetzt wurden. Die Zuordnung der Tools zu den Fallstudien (siehe Tabelle 4-1: Verwendete Simulationstools (vgl. (Miguel Cardemil et al., 2023))) zeigte die Vielfalt der Ansätze:

Tabelle 4-1: Verwendete Simulationstools (vgl. (Miguel Cardemil et al., 2023))

Fallstudien	Simulationstools
Case A: Flat plate collectors	CEA model, Greenius, SHIP2FAIR tool, SHIPcal, System Advisor Model (SAM) TRNSYS - TESS library, TRNSYS - basic library.
Case B: Flat plate collectors with 1 axis tracking	NewHeat tool, Polysun, SHIP2FAIR tool, TRNSYS (3 simulations using different libraries)
Case C: Linear Fresnel collectors	Greenius, SAM, Scilab, SHIP2FAIR tool, SHIPcal, TRNSYS (4 simulations using different libraries)
Case D: Parabolic through collectors	Greenius, Polysun, TRNSYS, SHIP2FAIR tool

Zur Vergleichbarkeit der Simulationsergebnisse wurde ein Open-Source-Skript in Python entwickelt, das die Verarbeitung von stündlichen, täglichen, monatlichen und jährlichen Zeitreihen ermöglicht. Dabei diente eines der Simulationsergebnisse je Fallstudie als Referenz, das mit den Ergebnissen der anderen Tools verglichen wurde. Die Studie zeigte signifikante Unterschiede in den Simulationsergebnissen, die auf Modellierungsansätze und Werkzeuge zurückzuführen sind. Diese Unterschiede

unterstreichen die Notwendigkeit standardisierter Methoden, um die umfangreichen internationalen Erfahrungen der wissenschaftlichen Gemeinschaft besser zu nutzen und unbeabsichtigte Fehler zu minimieren. Eine Standardisierung der Simulationsverfahren würde die Qualität der Systemauslegung verbessern und die Fehleranfälligkeit reduzieren.

Daher wird empfohlen, Simulationswerkzeuge für SHIP und hybride SHIP-Anwendungen weiterzuentwickeln, ihre Methodik zu verbessern und international zu standardisieren. Dieses Vorgehen ist entscheidend für die Optimierung der Systemleistung und die Förderung von Solartechnologien in industriellen Anwendungen.

Unteraufgabe D: Standardisierung und Zertifizierung

Leitland: Griechenland

Leiter: Vassiliki Drosou, CRES

Die Subtask-Einleitung basierte auf der Erkenntnis, dass Innovation Standardisierung erfordert und Standards entscheidend für die Markteinführung innovativer Produkte und Dienstleistungen sind. Standards bieten eine Plattform für:

- Transfer von innovativem Know-how
- Verbreitung von Forschungsergebnissen
- Netzwerkmöglichkeiten
- Zugang zu öffentlichen Ausschreibungen
- Vergleichbarkeit & Interoperabilität (Messungen, Qualitätsindikatoren, Testmethoden)
- Sicherheit für europäische Verbraucher:innen
- Schnelleren Marktzugang
- Politischer Kontext

Relevante Richtlinien und Verordnungen:

- Innovation Union (2010): Standards fördern Innovation.
- Standardisierungsverordnung 1025/2012: Standards überbrücken die Lücke zwischen Forschung und marktfähigen Produkten.
- Horizon 2020: Unterstützung der Standardisierung zur Stärkung der europäischen Wettbewerbsfähigkeit.
- Single Market Communication 550/2015: Standards fördern Fortschritt, Sicherheit und Wettbewerb im Binnenmarkt.

Subtask D förderte die Wettbewerbsfähigkeit von SHIP (Solar Heat for Industrial Processes) durch Standardisierung und Zertifizierung. Ziel war es, SHIP-Technologie verlässlich und vergleichbar zu machen und Doppelarbeit zu vermeiden.

Die Hauptziele von Subtask D "Standardisierung und Zertifizierung" waren:

- Analyse des Standardisierungs- und Zertifizierungsbereichs für SHIP-Technologien.
- Aufbau von Verbindungen zu relevanten Technischen Komitees und Netzwerken.
- Verfolgung aktueller Entwicklungen und Mitarbeit an der Überarbeitung relevanter Standards.
- Entwicklung neuer standardisierter Verfahren und Zertifizierungsregeln.

Die geplanten Aktivitäten dieses Subtask können wie folgt unterglieder werden:

Aktivität A: Standardisierungsplan

- Erforschung relevanter Standards und Erstellung eines detaillierten Plans, der Potenziale, Lücken und Bedürfnisse für SHIP-Systeme aufzeigt. Ergebnisse fließen in ein CEN-CENELEC Workshop Agreement (CWA) ein.

Aktivität B: Neue Standardisierungsarbeiten

- Identifikation von Lücken und Vorschläge für neue Arbeiten. Erstellung eines Business-Plans basierend auf den Ergebnissen technischer Subtasks.

Aktivität C: Standardisierungsdokument

- Entwicklung eines CWAs gemäß CEN-CENELEC-Regeln, das als Grundlage für umfassendere Standards dienen kann. Präsentation in relevanten Gremien und Organisation von B2B-Meetings zur Förderung des CWAs.

Aktivität D: Zertifizierung

- Erkundung relevanter Zertifizierungssysteme und Entwicklung von Vorschlägen für deren Erweiterung auf Basis der Subtask-Ergebnisse.

Unteraufgabe E: Marktrichtlinien

Leitländer: Deutschland und Österreich

Leiter: Dr. Peter Nitz, Fraunhofer ISE, und Wolfgang Gruber-Glatzl, AEE INTEC

Das Ziel bestand darin, den traditionellen Ansatz zur Investitionsbewertung von SHIP (Solar Heat for Industrial Processes) von der Amortisationszeit hin zu einem Fokus auf langfristige Rentabilität zu erweitern. Dabei wurden ESCO- und Energy-as-a-Service-Modelle einbezogen, um SHIP-Investitionen sowohl für Industrieunternehmen als auch für Energiedienstleister (ESCOs) attraktiver zu gestalten. Ein Schlüsselansatz ist die Nutzung des „Levelised-Cost-Of-Heat“ (LCOH), der die niedrigen Kosten für solar erzeugte Prozesswärme hervorhebt.

Im Rahmen des Projekts wurden Kriterien für Investitionsbewertungen durch interne und anschließende Online-Umfragen ermittelt. Diese umfassten 51 Teilnehmer:innen aus 20 Ländern und untersuchten die Relevanz technischer und ökonomischer Parameter in verschiedenen Projektphasen. Die Ergebnisse bestätigten die Bedeutung bereits vermuteter Parameter und zeigten Forschungsbedarf bei ökologischen Aspekten auf.

Die technische Kostenbewertung basiert auf LCOH-Methoden, die in der Literatur variieren. Eine einheitliche Vergleichbarkeit wurde durch den Umwandlungsfaktor von 0,7 kWth/m² erreicht, der 2023 auf konzentrierende Kollektoren ausgeweitet wurde. Diese Vereinheitlichung erleichtert den Vergleich unterschiedlicher Technologien und Investitionsmodelle. Details zur Berechnung und den Vorteilen von LCOH sind im Ergebnissteil dargestellt.

Neue Cashflow-basierte Finanzierungsmodelle wie ESCO-Ansätze oder industrielle Leasingmethoden wurden evaluiert, um die Hemmschwellen hoher Anfangsinvestitionen und Bonitätsrisiken zu minimieren. Innovative Ansätze umfassen P90- und P50-Ertragsrisikobewertungen aus Finanzierungsmodellen für Windenergie sowie Forfaitierungen (Forderungsverkäufe) zur Refinanzierung auch für kleinere Projekte. Der Vergleich verschiedener Modelle zeigt deren Eignung für unterschiedliche Anwendungsfälle. Beispiele wie das Verkaufsmodell („Plant Sale Model“) und das „Heat Supply Model“ (ESCO) verdeutlichen die Bedeutung der Finanzierung angesichts des zeitlich unterschiedlichen Anfalls von CAPEX- und OPEX-Kosten.

Die installierten Kosten von Solarthermieranlagen variieren regional stark. Kosteneffiziente Anwendungen finden sich hauptsächlich in Bereichen mit Temperaturen bis 150 °C. Der Anteil konzentrierender Technologien wird laut Solrico bis 2026 signifikant steigen, ebenso wie der Anteil von ESCO-Verträgen. Synergien mit anderen erneuerbaren Technologien, insbesondere Wärmepumpen, wurden untersucht. Obwohl marktreife große Wärmepumpen noch fehlen, wird deren Potenzial für CO₂-Reduktionen hervorgehoben.

In den letzten Jahren wurden signifikante Kostenreduktionen bei solarthermischen Anlagen beobachtet, insbesondere in Österreich (55 % von 2013 bis 2020), Deutschland und Mexiko. Die LCOH-Vergleiche zeigen Mexiko aufgrund besserer Solarressourcen als besonders kosteneffizient. Diese Entwicklungen unterstreichen die Skalierungsvorteile größerer Projekte.

Ein Aktionsplan wurde erstellt, um SHIP-Technologien besser am Markt zu etablieren. Er umfasst ökonomische Rahmenbedingungen, öffentliche Aufmerksamkeit, Standardisierung und Kostenreduktionen. Der Plan adressiert Hürden und Strategien für eine breitere Akzeptanz und Marktintegration von SHIP-Anwendungen.

4.3 Österreichische Beteiligung

Die österreichische Beteiligung fand in allen Subtasks statt. Der Fokus lag allerdings auf den Subtasks A und C als Beteiligung und in Subtask E als Leitung:

- Subtask A:
 - Entwickelt wurde eine standardisierte Methode, die abhängig von Standort und Branche ein generisches Lastprofil für Industriebetriebe erstellt.
 - Unter Uni Kassels Leitung konnte das österreichische Konsortium wertvolle Beiträge liefern, um die Methode industrienah aufzubauen.
 - Es wurden Ergebnisse aus nationalen Projekten wie EnPro und CORES übermittelt, wie zB Integrationsschemen von Solarthermie-Wärmepumpen-Kombinationen, die sich auch in diversen Publikationen wiederfinden
 - Ein weiterer Beitrag war die Analyse von weltweiten Klimadatensätzen von Regionen mit hohem Industrieanteil. Hieraus wurden 3 Referenz-Klimadatensätze definiert, um die Anwendbarkeit der Methode für alle Klimaregionen zu gewährleisten.
- Subtask C:
 - Trotz definierter Nicht-Beteiligung in diesem Subtask, wurde durch die enge Zusammenarbeit zwischen den Subtasks ebenfalls ein entscheidender Beitrag durch das österreichische Konsortium eingebracht.
 - Das SHIP-Tool und das CORES-Tool wurden für den Simulationsvergleich eingebracht.
- Subtask E
 - Dieser Subtask wurde Teils von Peter Nitz vom Fraunhofer ISE, teils von Jürgen Fluch und Wolfgang Gruber-Glatzl geleitet. In diesem Subtask wurde durch das österreichische Konsortium Kompetenzen zu Marktnähe, Finanzierungsmodelle, Marktpenetration und SHIP-Design eingebracht und hauptverantwortlich die Ausarbeitung des Subtask E koordiniert.
 - Beiträge zur Entwicklung des Umrechnungsfaktors für konzentrierende System von Solarfläche auf Leistung
 - Weiterentwicklung der SHIP-Datenbank und zur Verfügungstellung der Daten an Stakeholder sowie für die alljährliche Weltmarktstatistik
 - Trendanalysen hinsichtlich Geschäftsmodelle wie ESCOs und Finanzierungsmodelle
 - Technologievergleich von Solarthermie mit anderen erneuerbare Prozesswärme-Optionen.
 - Entwicklung der Guideline-To-Market und des Technology Position Papers

5 Ergebnisse

5.1 Integrierte Energiesysteme

Die Integration erneuerbarer Prozesswärme in industrielle Prozesse bietet viel Flexibilität. In nahezu allen industriellen Anwendungen gibt es verschiedene Wärmesenken, die mit erneuerbarer Wärme, z.B. aus Solarthermie, Wärmepumpen oder Biomasse, versorgt werden können. Im Gegensatz zu fossilen Heizsystemen sind erneuerbare Technologien jedoch empfindlicher gegenüber den spezifischen Anforderungen des jeweiligen Unternehmens. Fossile Systeme zeichnen sich durch ihre Unempfindlichkeit gegenüber Prozesstemperaturen, ihre Flexibilität bei Teillastbetrieb und die Speichermöglichkeit des Brennstoffs aus.

Bei erneuerbaren Heizsystemen hingegen hängen die technische Machbarkeit, der Wirkungsgrad und der Deckungsgrad von der benötigten Temperatur sowie dem zeitlichen Verlauf des Wärmebedarfs ab. Zusätzlich beeinflussen die Verfügbarkeit von Wärmequellen wie Sonneneinstrahlung und Umgebungswärme die Leistung dieser Systeme. Um das Potenzial und die Leistung erneuerbarer Heizsysteme weltweit zu vergleichen, ist es wichtig, die Referenzbedingungen für industrielle Prozesse zu verstehen. Im Folgenden werden entscheidende Referenzbedingungen für industrielle Anwendungen erläutert.

5.1.1 Referenzanwendungen und Lastprofil-Cluster

Ziel war es, einen Überblick über die Anforderungen an erneuerbare Heizsysteme zu schaffen, indem Referenzanwendungen definiert werden, die sich aus einem Lastprofil, einem Temperaturniveau und einem Standort zusammensetzen. Jede dieser Referenzanwendungen soll repräsentativ für ein breites Spektrum unterschiedlicher Branchen und Standorte sein. Alle definierten Referenzanwendungen zusammen sollen die gesamte Bandbreite der weltweit möglichen Variabilität von Senken abbilden. Die Referenzbedingungen unterteilten sich in 3 Unterkategorien:

- **Zeitlicher Verlauf des Wärmebedarfs (Lastprofil):**

Für Wohngebäude existieren etablierte Methoden zur Abschätzung der Lastprofile, während im industriellen und gewerblichen Bereich Wissenslücken bestehen, insbesondere bei hohem Anteil an Prozesswärme. Zur Schließung dieser Lücken wurden 797 stündlich aufgelöste Erdgasverbrauchsprofile von deutschen Verbrauchern (> 1,5 GWh/a) aus unterschiedlichen Sektoren erhoben. Der Gasverbrauch wurde dabei als gleich dem Wärmebedarf betrachtet. Ziel war die Entwicklung einer Methodik zur Kategorisierung und Standardisierung von Wärmebedarfsprofilen.

- **Temperaturanforderungen der Senken:**
Temperaturniveaus wurden anhand von Studien zu den Anforderungen verschiedener Senken, wie sie in der Literatur dokumentiert sind, ausgewählt.
- **Verfügbarkeit erneuerbarer Wärmequellen:**
Eine Methode wurde entwickelt, um die standortspezifische Saisonalität von Temperaturen und Wärmelasten zu charakterisieren. Auf dieser Basis wurden repräsentative Standorte bestimmt.

Die mittlere tägliche Umgebungstemperatur eines Standorts wurde als zentrale Variable identifiziert, die die Wärmelastprofile beeinflusst. Der Wärmebedarf, etwa für Raumheizung oder Prozesse wie Trocknung, zeigt eine starke Saisonalität, da die Profile aus dem gemäßigten Klima Deutschlands stammen, wo die jährliche Temperaturschwankung etwa 40 K beträgt. In subtropischen und tropischen Regionen mit konstanteren Temperaturen obliegt die Umgebungstemperatur einen geringeren Anteil der Lastgangvarianz.

Weitere Einflussfaktoren, wie die Auslastung und der Betrieb von Wärmeerzeugern, die vom Nutzer:innenverhalten abhängen, konnten nicht analysiert werden, da zu den Unternehmen hinter den Profilen keine Details vorliegen. Dennoch wird die Umgebungstemperatur als geeigneter Parameter genutzt, um den größten Teil der Varianz zu erklären, insbesondere bei getrennten Analysen für Werktage und Wochenenden/Feiertage. Aufgrund fehlender Informationen blieb die Umgebungstemperatur der einzige Parameter für die Kategorisierung und Entwicklung von Standardprofilen.

Der Gasverbrauch der untersuchten Verbraucher variiert stark, wird jedoch für die Analyse auf den mittleren Gasverbrauch an Werktagen bei 8 °C normiert. Mithilfe eines K-Means-Algorithmus werden die Lastprofile anhand ihrer Temperaturabhängigkeit geclustert. Für Werktage zeigt die Analyse mit vier (wd) Clustern (Abbildung 5-1) einen guten Kompromiss zwischen Genauigkeit und Übersichtlichkeit. Die Temperaturabhängigkeit nimmt von wd-Cluster 0 bis 3 zu: wd-Cluster 0 zeigt einen konstanten Verbrauch, während in wd-Cluster 3 die Sommerlast am niedrigsten ist.

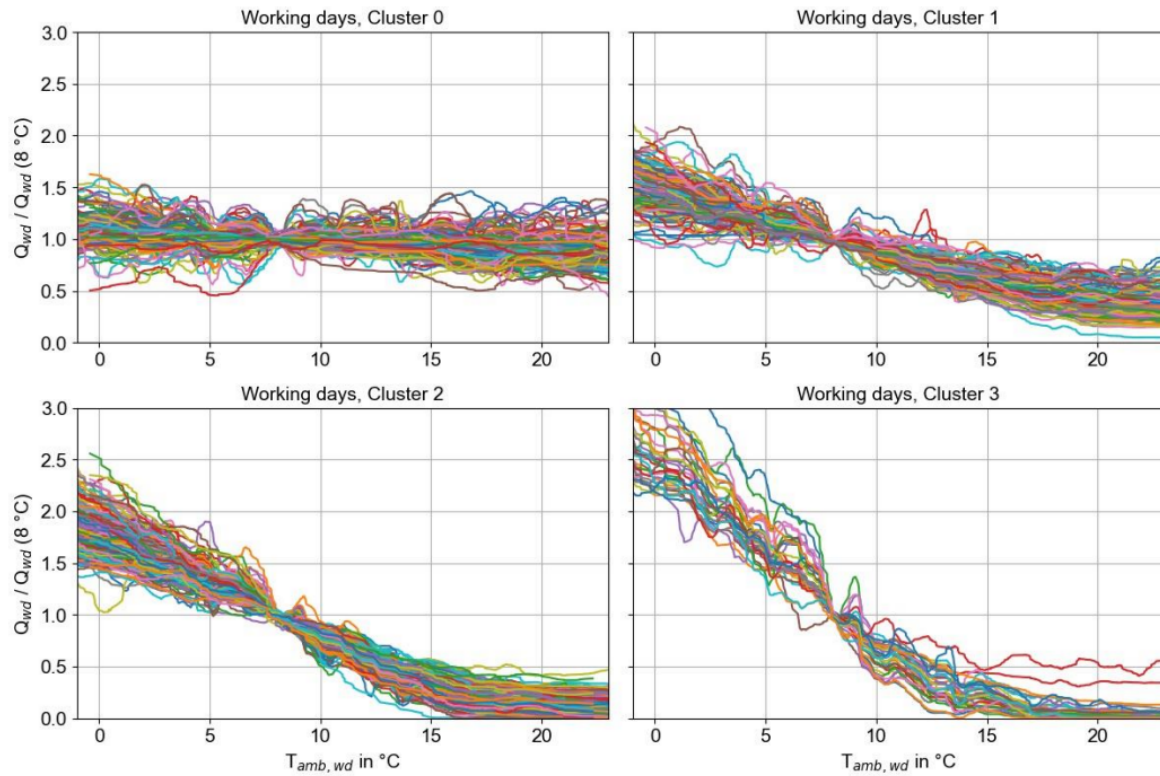


Abbildung 5-1: Ergebnisse des K-Means-Clusterings für den Gasverbrauch an Werktagen. (Vgl. (Pag et al., 2021))

Für Wochenenden und Feiertage (wknd) zeigt sich eine klare Unterscheidung im Gasverbrauch zu den Werktagen (wd). Die Clusteranalyse wird daher separat durchgeführt (Abbildung 5-2). Ein zusätzlicher Cluster (Cluster 1) berücksichtigt Verbraucher mit deutlich reduzierter Last an Wochenenden. Die anderen vier Cluster zeigen ähnliche Trends wie ihre wd-Pendants, jedoch mit etwas geringerem Verbrauch.

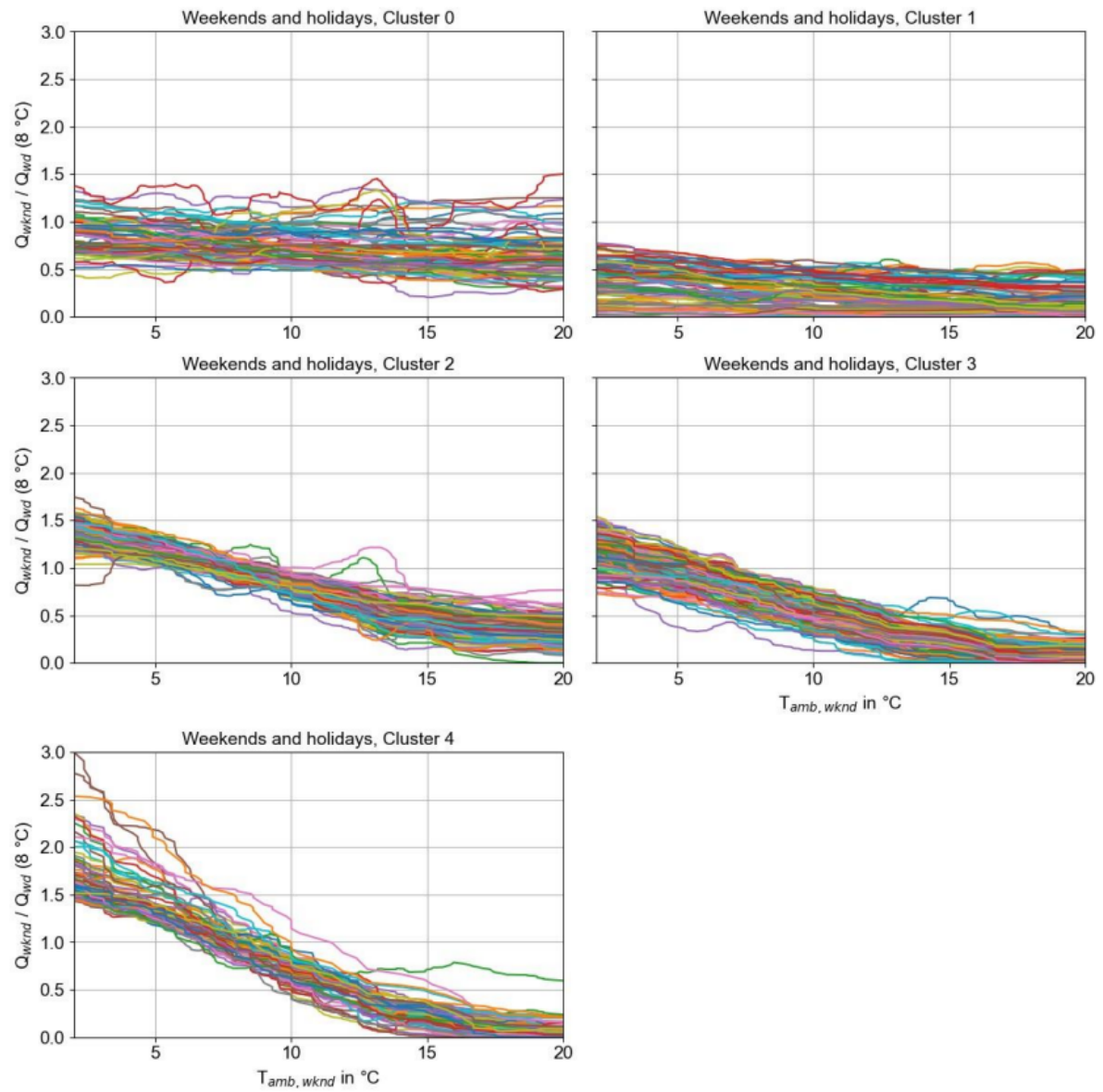


Abbildung 5-2: Ergebnisse des K-Means-Clusterings für Wochenenden und Feiertage. (Vgl. (Pag et al., 2021))

5.1.2 Repräsentative Standorte

Wie oben beschrieben, ist bei der Untersuchung regenerativer Heizsysteme besonders auf saisonale Parameter zu achten. Abbildung 5-3 zeigt die saisonale Variabilität zweier wichtiger Wetterparameter für Standorte in den Klimazonen 3, 4 und 5 (gemäßigt, subtropisch, tropisch):

Die Amplitude der monatlichen mittleren Umgebungstemperatur beeinflusst maßgeblich die Form der Wärmelastprofile. Eine höhere Amplitude führt zu stärkerer Saisonalität, geprägt durch hohen Raumwärmebedarf oder temperaturabhängige Prozesswärme. Zudem zeigt die Amplitude der Umgebungstemperatur die Verfügbarkeit von Umgebungswärme als Quelle für Wärmepumpen. Große Amplituden erhöhen die Wahrscheinlichkeit von Perioden mit eingeschränkter Nutzbarkeit der Umgebungswärme, etwa bei Frost oder technischen Begrenzungen.

Der Wärmebedarf konzentriert sich oft auf den Winter, während die Sonneneinstrahlung im Sommer maximiert ist. Das Verhältnis von maximaler zu minimaler globaler horizontaler Strahlung, ΔH_{GH} , dient als Metrik für die Saisonalität. Eine hohe Saisonalität reduziert die zeitliche Überlappung von Wärmebedarf und Sonneneinstrahlung.

Zusammenfassend nimmt von links oben nach rechts unten in Abbildung 5-3 die Komplexität solaren Heizsysteme (z. B. Speichergröße) ab. Standorte unten rechts ermöglichen potenziell 100 % solare Wärmeversorgung, etwa mit nur einem Tag Speicherkapazität. Wärmepumpen, die Umgebungswärme nutzen, folgen demselben Prinzip, jedoch nur in vertikaler Richtung.

Auch die Klimazonen reihen sich diesem Muster folgend von links oben nach rechts unten. Um einen repräsentativen Durchschnittsstandort für jede Klimazone auszuwählen, wurden Bern, Casablanca und Bangkok als Standorte gewählt.

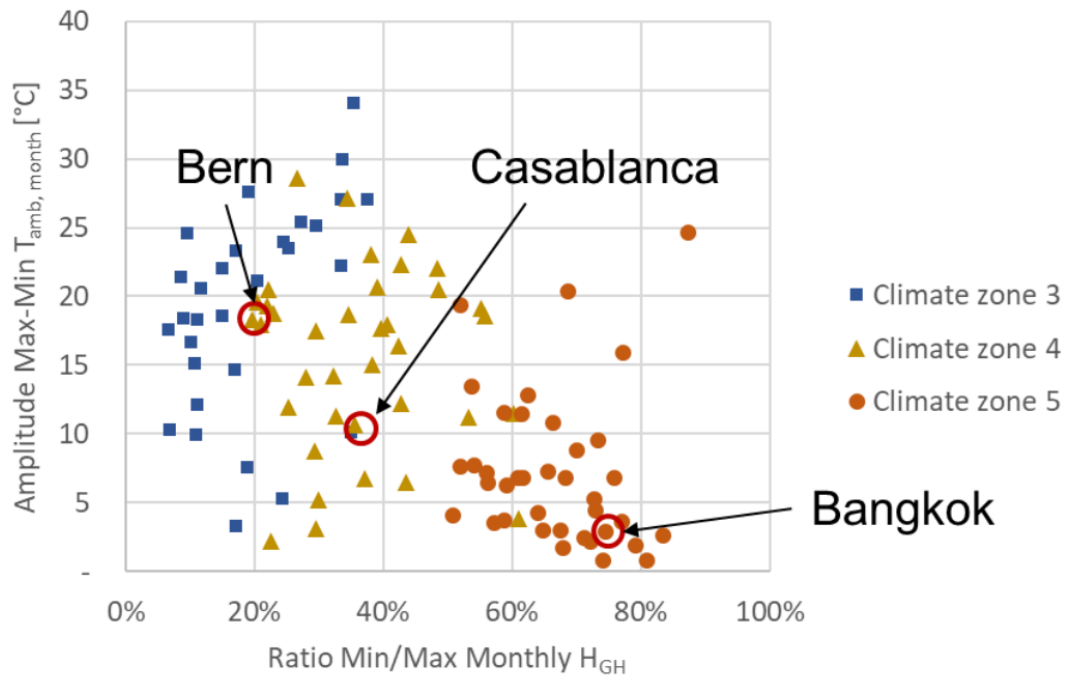


Abbildung 5-3: Definition von drei Referenzstandorten durch Analyse die Saisonalität der Umgebungstemperatur und der globalen horizontalen Einstrahlung

Basierend auf der Analyse von 797 Lastprofilen des Erdgasverbrauchs wurden sieben generische Referenzprofile für den industriellen Wärmebedarf erstellt. Die Profile bilden den normierten industriellen Wärmebedarf an drei verschiedenen Standorten ab. Saisonale Schwankungen der Umgebungstemperatur und typischer Wärmelasten werden berücksichtigt. Andere Einflüsse wie das Nutzer:innenverhalten und Schwankungen der Produktionsleistung wurden nicht ausgewertet und einbezogen. Um mehr statistische Variationen in das Profil einzuführen, können randomisierte Variationen einbezogen werden.

Im weiteren Verlauf des IEA-SHC Task 64 werden diese normierten Referenzwärmelastprofile verwendet, um das Potenzial und die Leistungsfähigkeit, aber auch die Grenzen der solaren Prozesswärme als eine Technologie in erneuerbaren Heizsystemen in Kombination mit anderen erneuerbaren Wärmetechnologien zu demonstrieren. Das im SHIP-Task 64 entwickelte EXCEL-Tool wird dazu verwendet, da dieses die Clusteranalysen und Regressionsinterpolationen beinhaltet, um je nach Inputparameter standardisierte Lastprofile abzubilden.

5.1.3 Systemdesign von Integrierten Energiesystemen

Für die Dekarbonisierung der industriellen Wärmeversorgung bedarf es die Integration von Solarthermie und Wärmepumpen. Ziel war es, Design-Richtlinien für die Dimensionierung kombinierter Systeme zu entwickeln, die fossile Wärmeerzeuger ersetzen können. Um beide Wärmeerzeuger zu kombinieren, wurden im österreichischen ENPRO-Projekt ein paralleles und drei serielle Hydraulikkonzepte mit Backup-Kessel (spare gas boiler – SGB) entwickelt (siehe Abbildung 5-4). Das parallele Konzept (P) sowie die seriellen Konzepte S1 und S2 nutzen externe Wärmequellen wie Umgebungs- oder überschüssige Wärme. Diese Systeme können fossile Wärmeerzeuger in vielen Fällen vollständig ersetzen, da sie das Potenzial ungenutzter Industriewärme effektiv nutzen.

Im parallelen Konzept müssen alle Wärmeerzeuger stets die erforderliche Vorlauftemperatur bereitstellen. Bei seriellen Konzepten wird die Temperaturdifferenz auf die drei Wärmeerzeuger aufgeteilt, wobei der erste die niedrigste Vorlauftemperatur liefert. Dadurch wird entweder die Effizienz der SHIP-Anlage (S1) oder der Seasonal Coefficient of Performance (SCOP) der Wärmepumpe (S2) erhöht. Solarwärme hat stets Vorrang, sodass die anderen Wärmeerzeuger nur reduziert arbeiten, um Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen zu minimieren.

Das serielle Konzept S3 nutzt die SHIP-Anlage als Wärmequelle für die Wärmepumpe. Es wurde jedoch nicht weiter untersucht, da sein Betrieb ohne saisonale Speicherung auf sonnige Zeiten beschränkt ist. Überschüssige Wärmequellen, die in vielen Industriebetrieben verfügbar sind, bieten hier eine effizientere Möglichkeit, höhere erneuerbare Anteile zu erreichen.

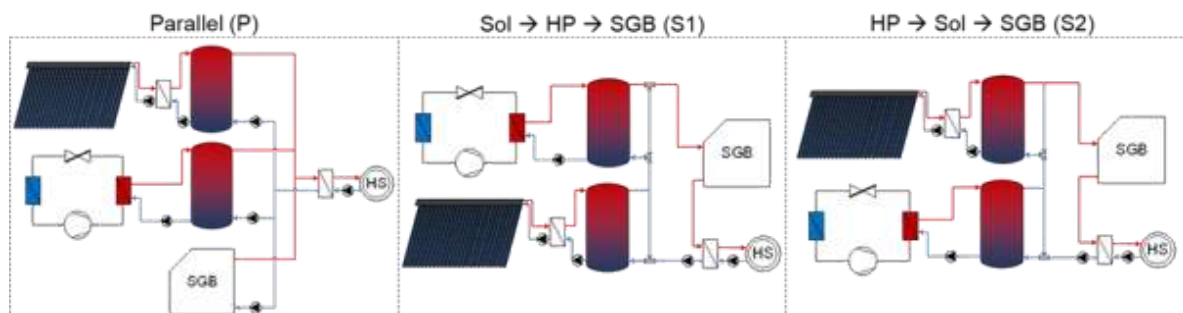


Abbildung 5-4: Hydraulikkonzept ENPRO (vgl. (Grubbauer et al., 2018))

Abbildung 5-5 zeigt die spezifische Ausbeute des Kollektorkreises (q_{col}) in Abhängigkeit von der Vorlauftemperatur der SHIP-Anlage und dem Standort. Die Berechnungen basieren auf Kollektoreffizienzkurven eines statischen CPC-Kollektors (st) und eines zweiachsigen Tracking-Concentrating-Kollektors (csh). Vorlauftemperaturen von 90 °C und 160 °C repräsentieren den Regelbetrieb, während 70 °C und 140 °C die Mindesttemperaturen im Vorwärmmodus darstellen, bei dem der Wirkungsgrad durch niedrigere Ausgangstemperaturen verbessert wird.

Die Annahme, dass die SHIP-Anlage das ganze Jahr über mit den dargestellten Temperaturen betrieben wird, führt zu einem geringeren Praxisnutzen. Die tatsächlichen Temperaturunterschiede zwischen den Szenarien sind in der Praxis meist kleiner. Der höhere Temperaturbetrieb verringert die Kollektorausbeute für csh um maximal 3 % und für st um 7 % bis 10 %, was als vernachlässigbar gilt.

Die Analyse zeigt, dass serielle Hydraulikkonzepte in der Praxis oft keinen signifikanten Vorteil für die SHIP-Anlage bieten, da sie eine komplexe Steuerung erfordern. Jedoch könnten größere Temperaturdifferenzen ($> 20\text{ K}$) den Nutzen dieser Konzepte steigern und wären daher weiter zu untersuchen.

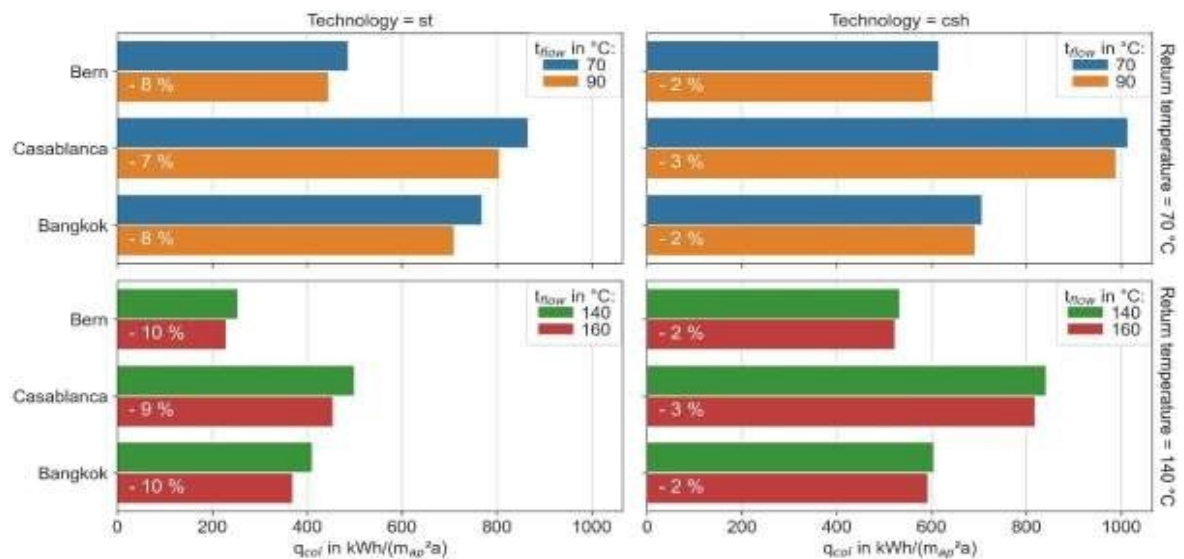


Abbildung 5-5: q_{col} als Funktion der Position und des t_{flows} (vgl. (Jesper and Pag, 2024))

Großwärmespeicher sind zentrale Elemente flexibler Heizsysteme mit hohem Anteil erneuerbarer Wärme. Im Vergleich zu anderen Technologien sind sie oft größer dimensioniert, da sie meist für Tages- statt Stundenzyklen ausgelegt sind. Besonders im Sommer wird ihr volles Potenzial benötigt, obwohl es viele Stunden im Jahr ungenutzt bleibt. Diese Kapazität ermöglicht es jedoch, andere Technologien wie BHKWs effizienter zu betreiben, indem sie deren Startzyklen um bis zu zwei Drittel reduzieren. Das senkt die Gesamtsystemkosten, da Startzyklen die Effizienz mindern, die Lebensdauer verkürzen und Wartungskosten erhöhen.

Abbildung 5-6 zeigt, dass ein BHKW die obere Hälfte des Speichers aufladen kann, ohne den Solarertrag wesentlich zu beeinträchtigen. Wird jedoch mehr als die Hälfte durch andere Wärmequellen gespeist, sinkt der solare Ertrag deutlich. Aufgrund der üblichen Speichergröße bieten Solarspeicher Vorteile für andere Wärmeerzeuger, ohne den Betrieb der Solarwärmanlage signifikant zu beeinträchtigen.

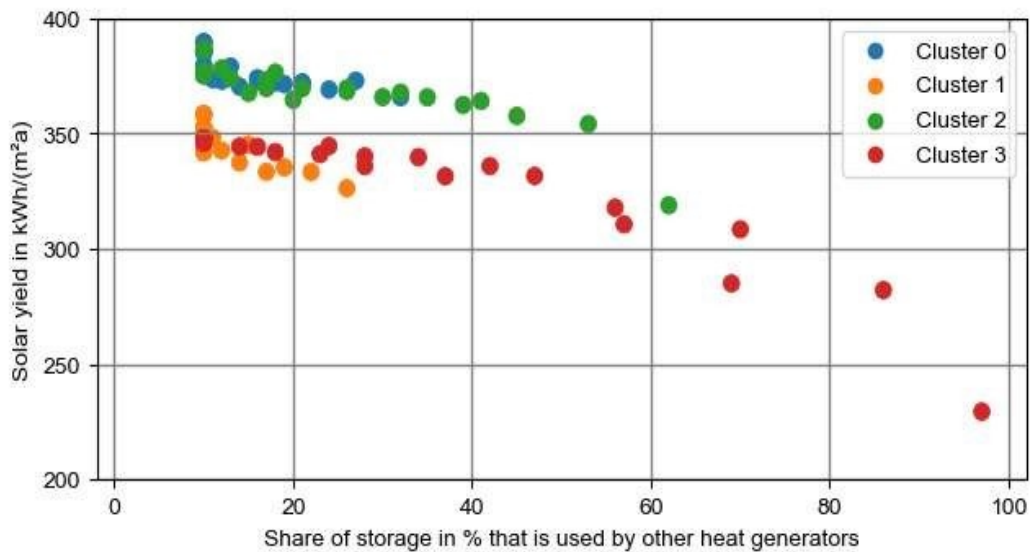


Abbildung 5-6: Spezifischer Solarertrag in Abhängigkeit vom Anteil des Solarspeichers, der von den anderen Wärmeerzeugern geladen wird für verschiedene Wärmelastcluster. (Jesper and Pag, 2024)

Mehrere Potenzialstudien im Rahmen von Task 49/IV identifizieren die Verfügbarkeit von Dachflächen als entscheidenden Faktor für den Einsatz von Solarkollektoren in der Industrie (Platzer, 2015). Die Saisonalität des Wärmelastbedarfs wurde dabei bislang nur begrenzt berücksichtigt. Laut einer Studie aus Task 64/IV mit 489 Industriebetrieben verfügen 60 % der Unternehmen über ausreichend Dachfläche, um Solarwärmeanlagen gemäß VDI 3988 zu planen vgl. (Pag et al., 2022). Abbildung 5-7(a) zeigt, dass der potenzielle solare Deckungsgrad je nach Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur zwischen 35 % (Cluster 0) und weniger als 5 % (Cluster 3) liegt. Unternehmen mit unzureichender Dachfläche verzeichnen stark reduzierte Solaranteile (Abbildung 5-7(b)), insbesondere bei hohem sommerlichem Wärmebedarf und großen benötigten Kollektorflächen.

Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass die VDI 3988 eine grundlegende, jedoch konservative Strategie zur Bemessung solaren Fraktionsanteils bietet. Für die ambitionierten Ziele erneuerbarer Wärme in der Industrie sollte die Auslegung von Solarwärmeanlagen jedoch stärker den umgebungstemperaturabhängigen Wärmebedarf, wie z. B. die Beheizung von Produktionshallen, berücksichtigen.

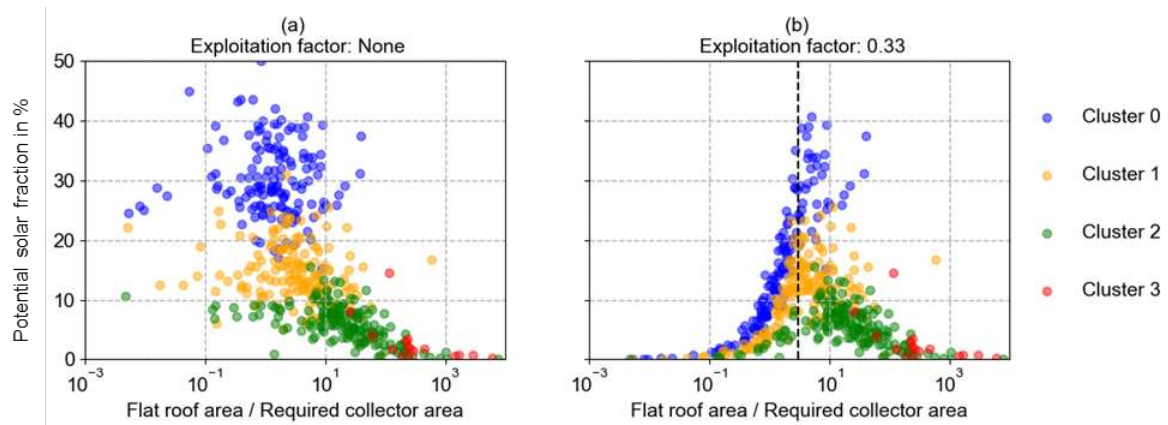


Abbildung 5-7: Solaranteil in % für jedes Unternehmen in Abhängigkeit vom Verhältnis der Dachfläche und der erforderlichen Kollektorfläche nach VDI 3988; jeder Marker steht für ein Unternehmen; Cluster 0: keine Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur, Cluster 3: starke Außentemperaturabhängigkeit des Lastprofils (a) Verfügbarkeit von Dachflächen wird nicht berücksichtigt, (b) realistische Nutzung der verfügbaren Dachfläche mit Solarkollektoren (Pag et al., 2022)

Abbildung 5-8 zeigt den solaren Deckungsgrad (f_{sol}) einer SHIP-Anlage, die gemäß der VDI 3988 ausgelegt wurde, in Abhängigkeit vom Standort und der Art des Jahreslastprofils (wd-Cluster). Die Lastprofile wurden anhand von Clustering und Regressionsanalysen von 797 Erdgaslastprofilen aus industriellen und großen Verbrauchern erstellt. Das wd-Cluster 0 stellt Verbraucher mit konstantem Prozesswärmebedarf dar, während bei den Clustern 1 und 2 die Saisonalität des Bedarfs zunimmt, wobei Cluster 2 von Raumwärmebedarf dominiert wird (nur in Bern berücksichtigt).

Da es keine spezifische Bemessungsnorm für konzentrierende Systeme, wie die VDI 3988, gibt, wurde die Dimensionierung der csh-Anlage iterativ an den solaren Ertrag der st-Anlage angepasst, was in Abbildung 5-8 zu gleichen f_{sol} -Werten führt.

Casablanca hat mit der höchsten und konstantesten Einstrahlung den höchsten f_{sol} (mindestens 50 %), während die weniger konstante Einstrahlung in Bangkok zu einem geringeren f_{sol} führt. Bern, mit den stärksten saisonalen Schwankungen, weist einen deutlich niedrigeren f_{sol} auf, erreicht jedoch aufgrund des konstanten Wärmebedarfs im wd-Cluster 0 einen höheren f_{sol} als die saisonalen Profile in Casablanca und Bangkok.

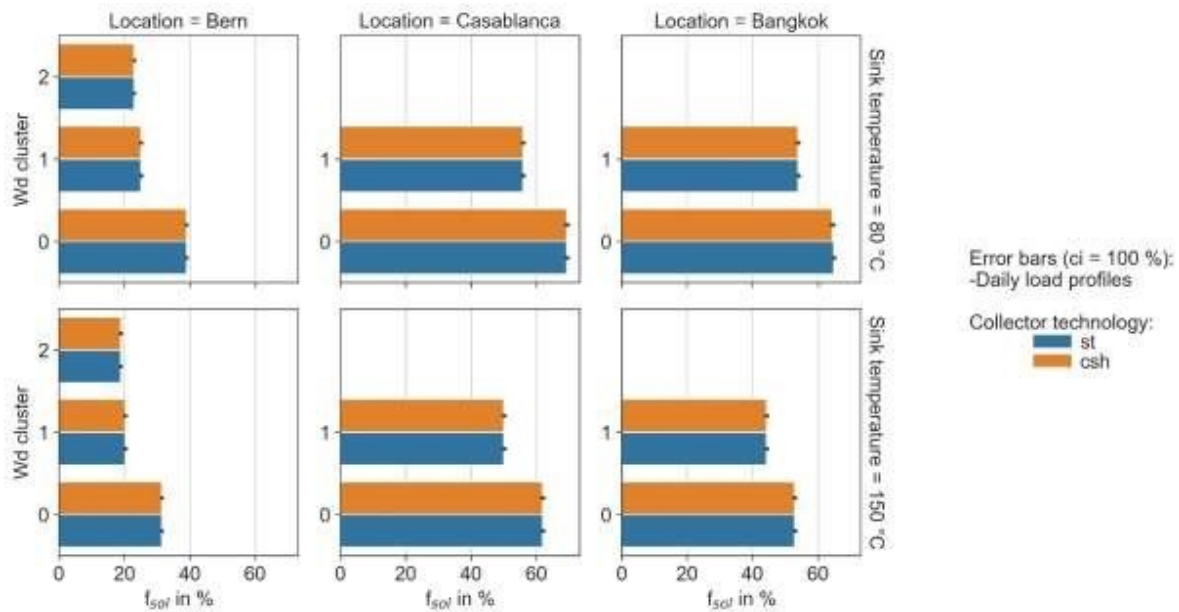


Abbildung 5-8: f_{sol} in Abhängigkeit vom Standort und dem Lastprofiltyp (wd cluster). (Pag et al., 2022)

Abbildung 5-9 bis Abbildung 5-11 vergleichen verschiedene SHIP-Bemaßungen mit einer nach VDI 3988 ausgelegten Anlage. Um höhere solare Deckungsgrade zu erzielen, kann die Kollektorfläche der SHIP-Anlage vergrößert werden, ohne dass der spezifische Kollektorertrag drastisch sinkt. In Bern führt eine Erhöhung der Kollektorfläche um 50 % zu einer maximalen Reduktion des spezifischen Ertrags von 10 %. Selbst bei einer Verdreifachung der Kollektorfläche sinkt der spezifische Ertrag für die saisonalen Lastprofile (wd-Cluster 1 und 2) nur um etwa 20 %. Der solare Anteil steigt nahezu linear, ohne eine Sättigung zu erreichen. Das konstante Jahreslastprofil (wd-Cluster 0) zeigt größere Verluste, da hier ein höherer Deckungsgrad erzielt wird. Bei einer Kollektorflächenüberdimensionierung von mehr als 50 % tritt eine Sättigung ein. In der Praxis sollten stagnationssichere Kollektoren und eine entsprechende Systemauslegung berücksichtigt werden. Unternehmen mit starken saisonalen Wärmelastprofilen, die nach VDI 3988 nur einen geringen solaren Anteil erreichen, jedoch mehr Dachfläche zur Verfügung haben, sollten größere Solarthermieranlagen in Erwägung ziehen.

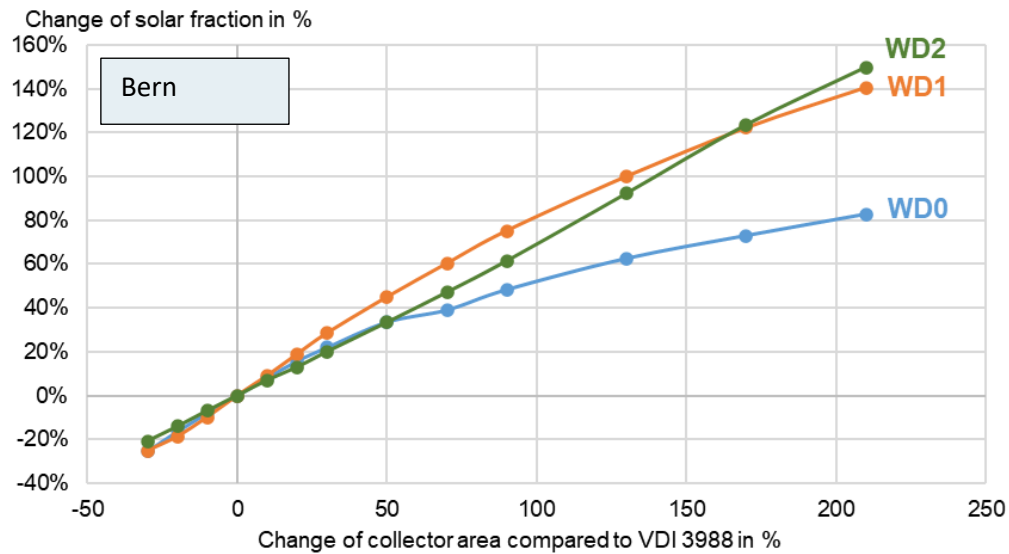


Abbildung 5-9: Veränderung des solaren Anteils gegenüber der Referenzausführung in Abhängigkeit von der Kollektorfeldgröße (st Kollektor; Bern; 0 % entspricht einer Dimensionierung nach der Richtlinie VDI 3988) (Pag et al., 2022)

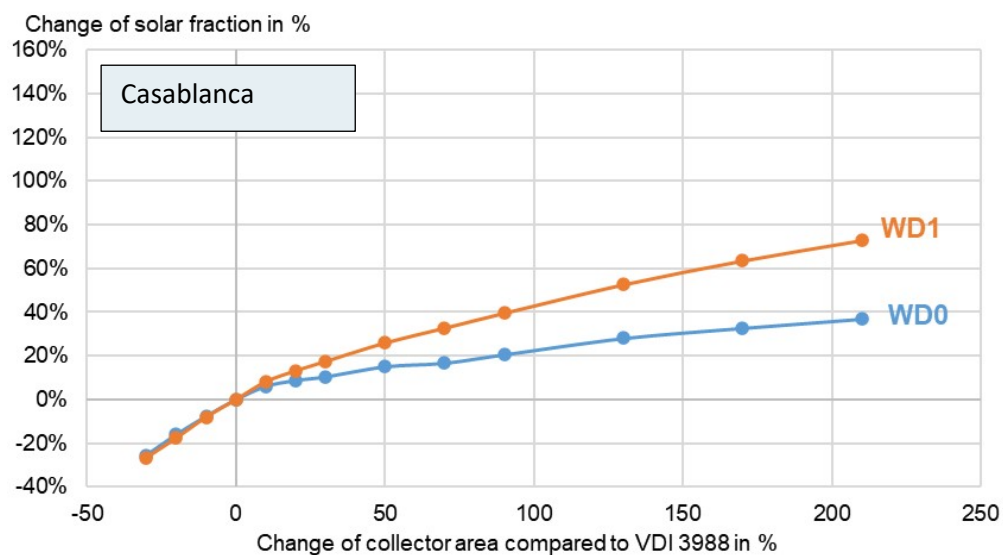


Abbildung 5-10: Veränderung des solaren Deckungsanteils im Vergleich zum Referenzdesign in Abhängigkeit von der Kollektorfeldgröße (st Kollektor; Casablanca; 0 % entspricht einer Dimensionierung nach der Richtlinie VDI 3988) (Pag et al., 2022)

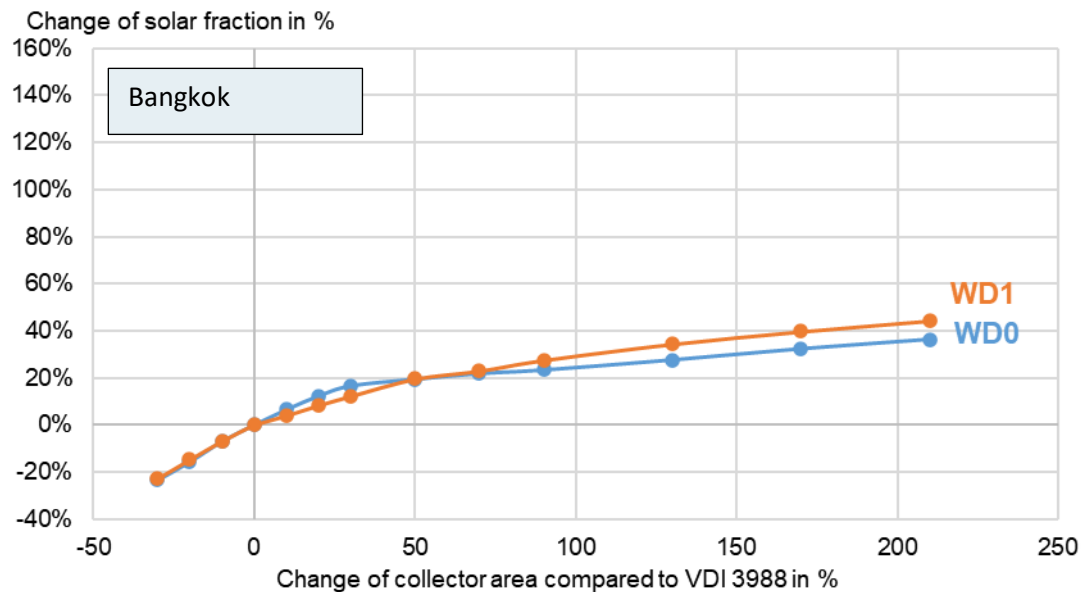


Abbildung 5-11: Veränderung des solaren Anteils gegenüber der Referenzausführung in Abhängigkeit von der Kollektorfeldgröße (st Kollektor; Bangkok; 0 % entspricht einer Dimensionierung nach der Richtlinie VDI 3988) (Pag et al., 2022)

Der aktuelle Stand der Technik sieht vor, solarthermische Projekte auf den sommerlichen Wärmebedarf auszulegen, was jedoch häufig zu niedrigen solaren Deckungsgraden führt. Eine „Überdimensionierung“ der Solaranlage könnte hingegen eine signifikante Steigerung der solaren Deckungsgrade ermöglichen.

Die Arbeiten im Rahmen des Tasks zeigen, dass sich die Forschung zu kombinierten SHIP- und Wärmepumpensystemen in der Industrie bislang hauptsächlich auf Ergebnisse des österreichischen ENPRO-Projekts stützt, welche im CORES-Projekt weiterentwickelt wurden. Für die spezifische Auslegung von SHIP-Anlagen hat sich die VDI-Richtlinie 3988 als Standard etabliert und kann auch auf kombinierte Systeme angewandt werden. Da in solchen Systemen Solarwärme stets priorisiert werden sollte, trägt diese Vorgehensweise wesentlich zur Reduzierung von Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen bei. Ein umfassender Auslegungsleitfaden für die Kombination beider Wärmeerzeuger oder auch für einzelne Wärmepumpen in der Industrie fehlt jedoch bisher.

Die in Task64/IV durchgeführten Forschungsarbeiten umfassten eine Simulationsstudie, die die Leistung kombinierter SHIP- und Wärmepumpensysteme weltweit analysierte. In Regionen ohne Einschränkungen durch verfügbare Kollektorflächen erreichen solare Deckungsgrade gemäß VDI 3988 zwischen 20 % und 40 % in gemäßigten Klimazonen und mindestens 50 % in subtropischen und tropischen Gebieten. Diese Ergebnisse können als Grundlage für die Entwicklung zukünftiger Auslegungsrichtlinien dienen.

5.2 Modularisierung von Systemkonzepten

Das Hauptziel war die Definition modularer und "normalisierter" Komponenten/Subsysteme für Solarwärmeanwendungen in industriellen Prozessen (SHIP), wie für z.B. Balance of Plant (BOP), Solarfeld, Wärmeenergiespeicher und Hydraulikkreisläufe. Die Methodik besteht aus drei Schritten:

1. Identifikation von Komponenten/Subsystemen, die in kommerziellen SHIP-Projekten häufig eingesetzt werden, unter Berücksichtigung der Beiträge der Partner und vorhandener Daten.
2. Entwicklung modularer/standardisierter Designs für diese Komponenten/Subsysteme.
3. Unterscheidung zwischen Nieder- und Mitteltemperatur-SHIP-Anwendungen.

Schritt 1 basierte auf der Analyse von Integrationsschemata, die in zukünftigen kommerziellen SHIP-Projekten verwendet werden. Es wurde erwartet, dass eine kleine Zahl vielversprechender Integrationsprojekte identifiziert wird. Die Vorschläge der Industriepartner wichen jedoch stark voneinander ab, was darauf hinweist, dass unterschiedliche Integrationsschemata sowohl im niedrigen als auch im mittleren Temperaturbereich zum Einsatz kommen können.

Aufgrund dieser Unterschiede wurde im Rahmen des Tasks eine neue Strategie entwickelt, die auf die Analyse von BOP-Optionen sowie auf den erforderlichen Medien für den industriellen Prozess und die Solarenergieanwendung beruht. Nachdem diese Medien identifiziert waren, wurden die Industriepartner gebeten, eine Integrationsanalyse der Kombinationen vorzunehmen, die Teil ihres Portfolios waren.

5.2.1 Allgemeine Integrationskonzepte von integrierten Energiesystemen

In diesem Abschnitt werden die verschiedenen Integrationspläne zusammengefasst, die in der Datenbank www.ship-plants.info bzw. den darin enthaltenen Projekten zu finden sind. Weiters wird die Anzahl der kommerziellen Projekte angegeben wird, bei denen eines der acht verschiedenen Integrationsschemata verwendet wird, die in dieser Datenbank definiert sind. Abbildung 5-12 zeigt einen Überblick über die verschiedenen Integrationsmodelle, die in www.ship-plants.info berücksichtigt werden.

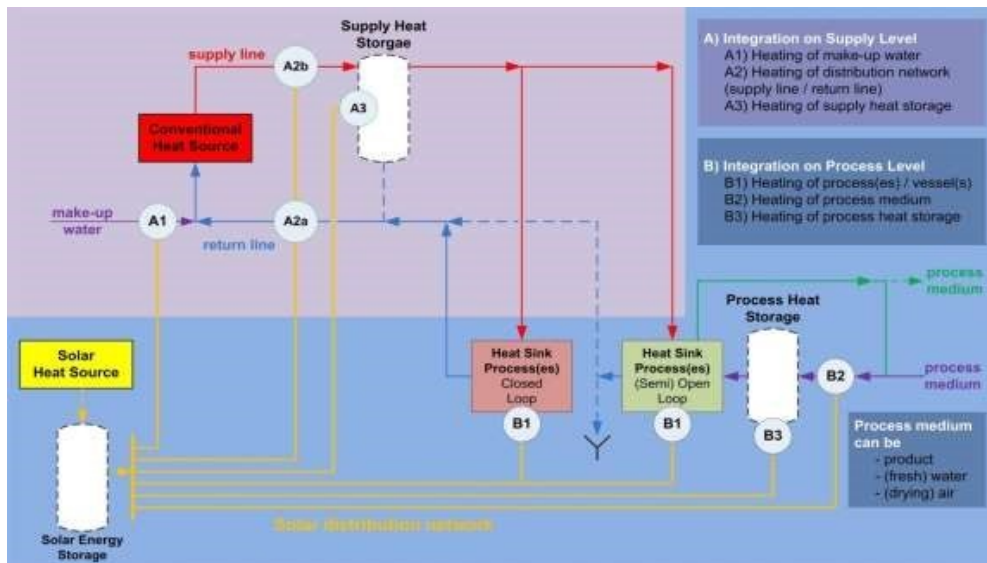


Abbildung 5-12: Verschiedene Integrationsmodelle, die in der Datenbank www.ship-plants.info berücksichtigt sind.

Die Zuordnung zwischen den in Abbildung 5-12 gezeigten Integrationsschemata und den definierten Systemen ist manchmal einfach, manchmal sehr schwierig oder sogar unmöglich, wie aus Tabelle 5-1 hervorgeht.

Tabelle 5-1: Äquivalenz zwischen den in Abbildung 5-12 dargestellten Integrationsmaßnahmen und den definierten Maßnahmen vgl. (Muster et al., 2015)

Beschreibung	Code in Abbildung 5-12	Code in Ref [2]
Solare Erwärmung von Zusatzwasser	A1	SL_S_MW
Solare Heizung der Rückleitung des Verteilungsnetzes / Solare Rücklaufverstärkung	A2a	SL_L_RF
Solare Beheizung der Versorgungsleitung des Verteilnetzes / Parallele Integration	A2b	SL_L_P
Solarwärme von Versorgungswärmespeichern / Solare Beheizung von Speichern	A3	SL_L_SC
Solare Erwärmung von Prozessen oder Behältern	B1	-----
Solare Erwärmung des Prozessmediums	B2	PL_E_PM
Solare Heizung von Prozesswärmespeichern	B3	-----
Weitere Integrationsmaßnahmen	C	-----

Die Analyse der Integrationsmaßnahmen, die in den Projekten angewandt werden, die derzeit in der Datenbank www.ship-plants.info enthalten sind, hat zu den in Tabelle 5-2 gezeigten Ergebnissen geführt.

Tabelle 5-2: Zahl der kommerziellen Projekte in www.ship-plants.info die das gleiche Integrationschema anwenden (Gesamtzahl der analysierten Projekte: 325) vgl. (Zarza et al., 2022).

Verwendetes Integrationsschema	Anzahl der Projekte
A1	64
A2a	6
A2b	40
A3	23
B1	63
B2	34
B3	12
C (andere)	83

Obwohl die Informationen über die zugeführte Temperatur nicht für jedes Projekt verfügbar sind, sind die Informationen über die Art des implementierten Solarkollektors nützlich, um eine Vorstellung von der Austrittstemperatur des Solarfeldes zu bekommen. Tabelle 5-3 zeigt verschiedene Arten von Kollektoren und die Anzahl der Projekte, die jeden Kollektortyp in www.ship-plants.info verwenden.

Tabelle 5-3: Arten von Sonnenkollektoren und Anzahl der Projekte, bei denen sie eingesetzt werden vgl. (Zarza et al., 2022).

Typ des Kollektors	Anzahl der Projekte
Luftkollektor	20
Evakuierter Röhrenkollektor	49
Flachkollektor	155
Fresnel	17
Parabolrinnen Kollektor	58
Unverglaster Kollektor	3
Andere	31

Ausgehend von den in Tabelle 5-3 angegebenen Zahlen kann man annehmen, dass mehr als 60 % der in der Datenbank enthaltenen Projekte dem Niedertemperaturbereich angehören, und folglich auch ein Großteil der Integrationskonzepte (Tabelle 5-2) im Niedertemperaturbereich angewandt werden.

5.2.2 Wesentliche Parameter für ein modulares Balance of Plant (BOP)

Aufgrund der Vielzahl der Integrationsvorschläge, die von den Industriepartnern eingingen, fiel die Entscheidung, die Problematik aus einer anderen Perspektive anzugehen. Diese neue Strategie bestand darin, eine Liste der gebräuchlichsten Medien zu definieren, die in industriellen Prozessen

verwendet werden, sowie der am häufigsten verwendeten Arbeitsmedien, die im Solarbereich verwendet werden. Nach Erstellung dieser Liste wurden die Kombinationen ermittelt, die sowohl aus technischer als auch aus kommerzieller Sicht am sinnvollsten sind. Abbildung 5-13 zeigt das Ergebnis dieser Analyse.

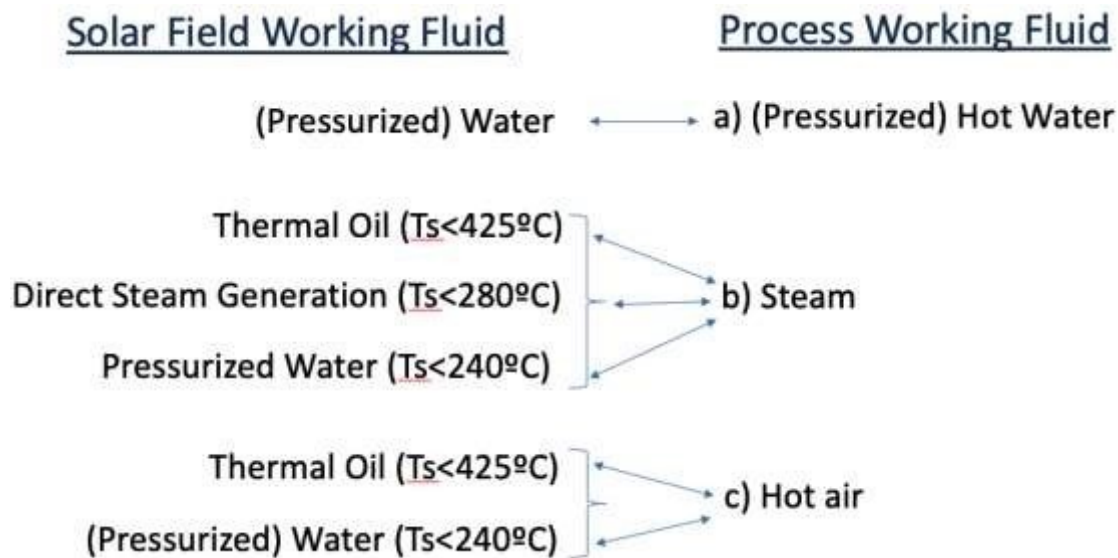


Abbildung 5-13: Unterschiedliche Kombinationen von Prozessmedien und Solarfeldarbeitsmedium werden für die Analyse generischer BOP-Konfigurationen berücksichtigt vgl. (Zarza et al., 2022).

Das spanische Unternehmen SOLATOM hat ein Integrationskonzept vorgeschlagen, das sich hauptsächlich auf die Dampferzeugung konzentriert. Als Argument werden folgende Gründe angegeben:

- Die meisten Industrien mit thermischen Prozessen verwenden einen Dampferzeuger (Kessel), der mit fossilen Brennstoffen (in der Regel Erdgas oder Diesel) gespeist wird, auch wenn sie nur heißes flüssiges Wasser benötigen. Satttdampf ist ein hervorragender Wärmelieferant, da er während des Kondensationsprozesses bei konstanter Temperatur eine erhebliche Menge an Wärmeenergie freisetzt.
- Die solare Dampferzeugung ermöglicht die parallele Integration mit dem konventionellen fossil befeuerten Kessel (Integration auf Versorgungsebene anstelle auf Prozess-Ebene). Die Anwender sind eher zurückhaltend, wenn es darum geht, Änderungen an ihren Prozessen vorzunehmen, und sind offener dafür, die Solaranlage parallel zum konventionellen Kessel auf Versorgungsebene zu schalten. Eine Umsetzung ist dadurch wahrscheinlicher.
- Die Dampferzeugung ist mit Niedertemperatur-Solarkollektoren in der Regel nicht realisierbar, was den Herstellern von konzentrierenden Kollektoren ein starkes Argument liefert, ihre Kollektoren in kommerziellen SHIP-Anwendungen einzusetzen.

Es gibt zwei Hauptoptionen für die solare Dampferzeugung (d.h. die indirekte Erzeugung mit unter Druck stehendem flüssigem Wasser im Solarfeld, das mit einem Kessel verbunden ist, und die direkte Dampferzeugung im Solarfeld) und SOLATOM ist besonders an der solaren Direktverdampfung interessiert und schlägt diese Option zur Standardisierung/Modularisierung vor, da die direkte Dampferzeugung die folgenden Vorteile hat:

- Niedrigerer Arbeitsdruck im Primärkreislauf und Vermeidung von Thermo-Öl im Solarkreislauf.
- Sie ist kostengünstiger als die Option der indirekten Dampferzeugung, weil weniger Bauteile benötigt werden.

Um einen besseren Eindruck zu geben, ist das von SOLATOM vorgeschlagene Integrationsschema in Abbildung 5-14 dargestellt, während Abbildung 5-15 ein von SOLATOM entwickeltes Skid für eine solche Integration zeigt.

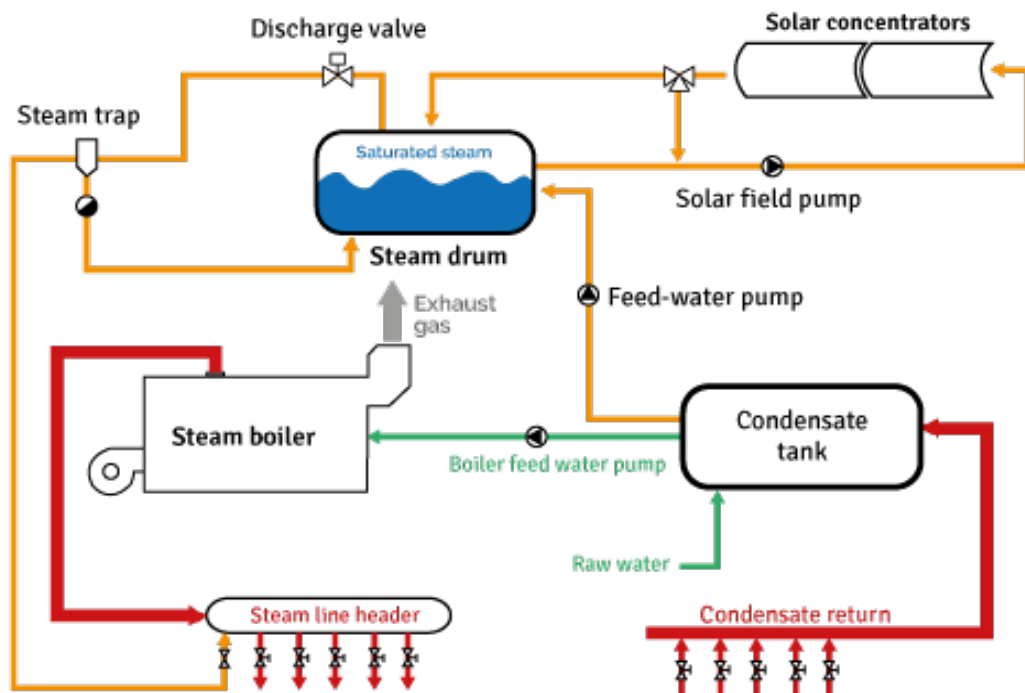


Abbildung 5-14: Von SOLATOM vorgeschlagenes Integrationsprogramm vgl. (Zarza et al., 2022).



Abbildung 5-15: Container-Lösung für das von SOLATOM entwickelte Integrationskonzept – dargestellt in Abbildung 5-14 vgl. (Zarza et al., 2022).

In der folgenden Tabelle werden wichtige technischen Parameter für BOPs mit Direktdampferzeugung erläutert.

Tabelle 5-4: Wichtige technische Parameter für BOPs mit Direktdampferzeugung vgl. (Zarza et al., 2022).

Art	Parameter	Beschreibung
Primäre Parameter	Leistung des BOP-Designs	Die Designleistung ist der wichtigste technische Parameter des BOP. Die Auslegung der Dampftrommel, des Auslassventils, der Solarpumpe und des Speisewassersystems hängt von diesem Parameter ab
	Betriebsdruck	Der Betriebsdruck (zusammen mit seinem Maximalwert) beeinflusst die Auswahl der Komponenten. Sie beeinflusst auch die Startzeiten und die Menge an Dampf, die vom BOP geliefert werden kann.
	Qualität des Speisewassers	Die Qualität des Speisewassers beeinflusst das Spülsystem der Dampftrommel und die Auswahl der Materialien in der BOP
Sekundäre Parameter	Betriebstemperatur	Die Betriebstemperatur wird durch die Sättigungstemperatur des Dampfes bei Betriebsdruck definiert. Dieser Parameter ist wichtig für die Komponentenauswahl und die Auslegung der Isolierung im BOP
	Ausgabe in Dampfqualität	Die Dampfqualität unter Auslegungsbedingungen beeinflusst die Auswahl der Solarpumpe. Die Arbeit mit geringeren Dampfqualitäten im Solarbereich bedeutet in der Regel höhere Rezirkulationsverhältnisse und damit größere Pumpen.

5.3 Design- und Simulationswerkzeuge

Es gibt eine Vielzahl an Simulationstools für solarthermische Anlagen, die sich unterschiedlich gut für SHIP-Systeme eignen. Dabei können die Ergebnisse der einzelnen Tools stark voneinander abweichen. Der IEA SHC Task 64 / IV hatte daher das Ziel, auf der in den vorherigen SHIP-Tasks 33 und 49 erarbeiteten Wissensbasis aufzubauen. Dabei sollten die Informationen entsprechend der „gemeinsamen Sprache“ der Branche aufbereitet und das Wissen sowie die Erfahrungen mehrerer Expert:innen, die mit SHIP-Simulationstools arbeiten, zusammengeführt werden.

Der Fokus lag darauf, eine umfassende Analyse der verfügbaren Simulations- und Überwachungstools durchzuführen. Ziel war es, den potenziellen Nutzen der Integration von Solarwärme in industrielle Prozesse unter Berücksichtigung bekannter Unsicherheitsquellen zu bewerten. Um dies zu erreichen, wurden verschiedene Aktivitäten durchgeführt. Diese umfassten die Identifizierung der derzeit verfügbaren Simulationstools, deren Klassifizierung nach Funktionalitäten, Simulationsansätzen und Softwarebeschränkungen.

Darüber hinaus wurden vier Fallstudien entwickelt, mit denen vergleichbare Simulationen in unterschiedlichen Tools durchgeführt und die Ergebnisse gegenübergestellt wurden. Ziel war es, die Unterschiede und deren Einfluss auf zentrale Leistungskennzahlen zu identifizieren.

5.3.1 Methodik

Der Task untersuchte Abweichungen zwischen den Ergebnissen verschiedener Simulationstools für solarthermische Anlagen und folgt dabei einem klar definierten Ablauf. Zunächst wird eine reale oder geplante Solarthermieanlage als Fallstudie ausgewählt, für die umfassende technische Informationen wie Kollektormodell, Solarfeldparameter, Wärmespeichermerkmale, Lastprofil und Regelungsmethoden vorliegen. Diese Daten werden in einer standardisierten Datei an Simulationsexpert:innen verteilt, die die Anlage mit ihren jeweiligen Tools modellieren. Meteorologische Daten im TMY-Format sowie einheitliche Vorlagen für die Ergebnisdarstellung werden ebenfalls bereitgestellt.

Die Simulationsergebnisse werden anschließend anhand ausgewählter Metriken auf vier Zeitskalen (stündlich, täglich, monatlich, jährlich) verglichen, wobei verschiedene Energieflüsse wie Solarfeld, Wärmespeicher und Last berücksichtigt werden. Ziel ist es, die Ursachen der Abweichungen zu identifizieren und zu quantifizieren, insbesondere im Hinblick auf fehlende Systeminformationen oder softwarebedingte Modellierungsbeschränkungen.

Zur Vertiefung der Analyse fanden bilaterale Gespräche mit Analyst:innen statt, um die getroffenen Annahmen zu klären. Dies führte zu einer zweiten Simulationsrunde, bei der Modelle gezielt angepasst wurden, um Annahmelücken zu schließen, ohne die Ergebnisse an das Referenztool anzugleichen.

Zusätzlich wurde eine parametrische Analyse durchgeführt, um die Auswirkungen der zuvor identifizierten Ursachen auf die Energieerträge zu bewerten. Diese Analyse isolierte den menschlichen Faktor, indem sie mit einem einheitlichen Referenztool und Analyst:innen durchgeführt wurde. Die abschließenden Schritte, einschließlich einer Folgenabschätzung, wurden ebenfalls vorgenommen, um die Unterschiede systematisch zu kategorisieren und ihre Auswirkungen zu bewerten.

5.3.2 Vergleichsstudie von SHIP-Simulationswerkzeugen

Für die Auswahl der Simulationstools gab es keine einschränkenden Kriterien. Alle Teilnehmer:innen des Subtasks, die mit einem Simulationstool vertraut waren und bereit waren, einen Beitrag zu leisten, konnten mitwirken. Dadurch konnten sowohl lizenzierte Software als auch Open-Source- und unternehmensinterne Software in die Studie einbezogen werden.

Zusätzlich zu den Simulationsergebnissen reichten die Teilnehmer:innen ein kurzes Simulationsprotokoll ein. Dieses enthielt die wesentlichen Annahmen und Einschränkungen der verwendeten Software in Bezug auf bestimmte Systemkomponenten. So wurde beispielsweise, wenn ein Tool die Verluste eines Wärmespeichers nicht modellieren konnte, ein Korrekturfaktor berücksichtigt, der die Energieerträge entsprechend anpasst. Tabelle 5-5 gibt einen Überblick über die in den einzelnen Fallstudien eingesetzten Tools und Softwarelösungen.

Tabelle 5-5: Eingesetzte Tools in der jeweiligen Fallstudie

Fallstudien	Simulationstools
Case A: Flat plate collectors	CEA model, Greenius, SHIP2FAIR tool, SHIPcal, System Advisor Model (SAM) TRNSYS - TESS library, TRNSYS - basic library.
Case B: Flat plate collectors with 1 axis tracking	NewHeat tool, Polysun, SHIP2FAIR tool, TRNSYS (3 simulations using different libraries)
Case C: Linear Fresnel collectors	Greenius, SAM, Scilab, SHIP2FAIR tool, SHIPcal, TRNSYS (4 simulations using different libraries)
Case D: Parabolic through collectors	Greenius, Polysun, TRNSYS, SHIP2FAIR tool

5.3.3 Fallstudien

Es wurden insgesamt vier Fallstudien ausgesetzt, mithilfe derer Informationen die Simulationstools getestet wurden. Die nachfolgend angeführten Daten geben nur einen Überblick dessen, was die einzelnen Simulationsingenieure übermittelt bekommen haben.

Fall A: Flachkollektor

Das System, siehe Abbildung 5-16 versorgt eine Kupfer-Elektrogewinnungsanlage in der Atacama-Wüste, Chile, und besteht aus einem 39.300 m² großen Solarfeld mit nicht-nachgeführten Flachkollektoren und einem 4.300 m³ Wärmespeicher. Die Integration erfolgt über zwei Wärmetauscher: einer verbindet das Solarfeld mit dem Speicher, der andere den Speicher mit der Last. Als Wärmeträgerflüssigkeit im Solarfeld dient ein Wasser-Glykol-Gemisch (33 % Glykol), während im Speicher demineralisiertes Wasser und im Prozess reines Wasser mit einer Solltemperatur von 70 °C und Rücklauftemperatur von 40 °C verwendet werden. Der jährliche Wärmebedarf beträgt 94.171 MWh bei einem konstanten 24/7-Lastprofil.

Die Solarfeldsteuerung nutzt einen Differenztemperaturregler, der die Umwälzpumpe aktiviert, wenn die Solarfeld-Austrittstemperatur die Speichertemperatur am Boden um mehr als 10 °C übersteigt. Bei einer Differenz von 2 °C schaltet die Pumpe ab. Die Temperatur an der Speicheroberseite wird überwacht, um ein Sieden zu verhindern; bei 100 °C wird die Pumpe deaktiviert. Auf der Seite des Wärmespeichers verhindert ein Bypass am Wärmetauscher, dass die Prozessflüssigkeit auf über 82,6 °C erhitzt wird, da eine feste Massendurchflussspumpe verwendet wird

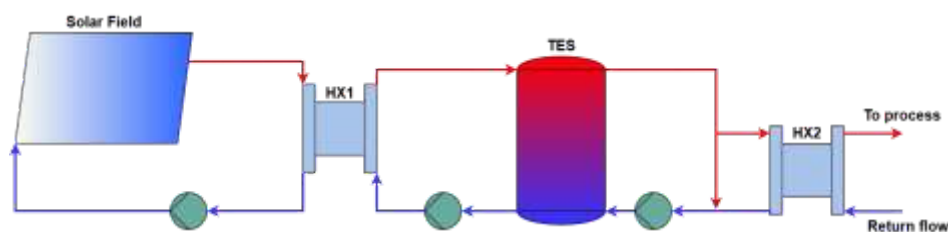


Abbildung 5-16: Systemdiagramm der Fallstudie A, Flachkollektoren zur Warmwasserversorgung eines Kupferabbauprozesses vgl. (Miguel Cardemil et al., 2023).

Fall B: Flachkollektor mit 1-Achs-Nachführung

Das System in Fall B, siehe Abbildung 5-17 dient der Vorwärmung eines Gaskessels für eine Papierfabrik in Dordogne, Frankreich. Es umfasst eine Bruttokollektorfläche von 4.212 m² mit einem 457 m³ Wärmespeicher. Die Sonnenkollektoren sind auf einem 1-Achsen-Nachführsystem installiert, dass die Energieabsorption und Wärmeerzeugung steigern. Im Primärkreislauf zirkuliert ein Wasser-Glykol-Gemisch, während im Sekundärkreislauf demineralisiertes Zusatzwasser aus der Fabrikanlage verwendet wird. Beide Kreisläufe nutzen Pumpen mit variabler Drehzahl, um die Solarfeldleistung zu optimieren.

Die Auslasstemperatur des Kollektors variiert saisonal von 30 °C im Winter bis 90 °C im Sommer, um die solare Wärmeerzeugung zu maximieren. Das Kesselspeisewasser erreicht jedoch maximal 80 °C.

Die Steuerung funktioniert wie folgt:

- Wird eine bestimmte Einstrahlungsschwelle erreicht, aktiviert sich die Solarfeldpumpe und rezirkuliert das HTF (Heat Transfer Fluid – Wärmeträgermedium) im Solarfeld, bis die gewünschte Ausgangstemperatur erreicht ist.
- Ist diese Temperatur erreicht, fließt das HTF durch den Wärmetauscher (HX), woraufhin die Pumpe des Sekundärkreislaufs aktiviert wird, die einen geschlossenen Kreislauf zwischen HX (Heat Exchanger - Wärmespeicher) und Speicher betreibt.
- Bei Wärmeanforderung des Prozesses wird heißes Wasser aus der Speicheroberseite entnommen, während kaltes Wasser in den Speicherboden gepumpt wird, um das Volumen auszugleichen.

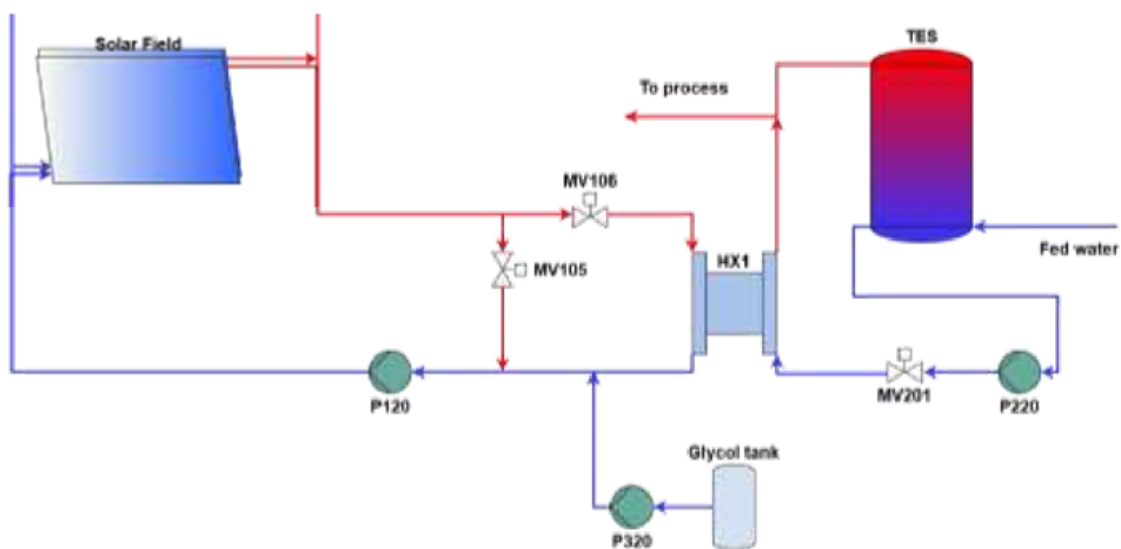


Abbildung 5-17: Systemdiagramm der Fallstudie B, 1-Achsen-Nachführung von Flachkollektoren zur Warmwasserversorgung eines Papierfabrikprozesses vgl. (Miguel Cardemil et al., 2023).

Fall C: Lineare Fresnel-Kollektor

Das in Fall C analysierte System, siehe Abbildung 5-18, basiert auf Fresnel-FTL20-Solarkollektoren der Firma Solatom, die vormontiert und transportfertig geliefert werden. Jedes Modul hat eine Aperturfläche von 26,4 m² und eine thermische Leistung von 14,5 kWth bei 1000 W/m² DNI. Die Anlage, die für Dachinstallationen geeignet ist, nutzt Direktverdampfung (DSG) und befindet sich in Sevilla, Spanien. Sie arbeitet im Rezirkulationsmodus mit einer Dampftrommel, die das vom Solarfeld erzeugte Wasser-Dampf-Gemisch trennt. Gesättigte Flüssigkeit wird in den Kollektorkreislauf zurückgeführt, während der erzeugte Sattedampf bei ausreichendem Druck in den Prozess eingespeist wird.

Das System umfasst eine reflektierende Gesamtfläche von 1.900,8 m², aufgeteilt in 6 Stränge mit jeweils 12 Modulen. Der jährliche Wärmebedarf beträgt 4.858 MWh, wobei Sattedampf mit 6 bar (158,5 °C) bereitgestellt und das Kondensat mit 70 °C zurückgeführt wird. Ein zusätzlicher Erdgaskessel, der parallel zum Solarfeld installiert ist, deckt Zeiten geringer Einstrahlung ab, wurde jedoch in den Simulationen nicht berücksichtigt.

Die Steuerung der Anlage umfasst folgende Betriebsmodi:

- **Inbetriebnahme:** Das Speisewasser zirkuliert im Solarfeld-Dampftrommel-Kreislauf, bis der Druck die Anforderungen erfüllt.
- **Normalbetrieb:** Der Dampf aus der Dampftrommel wird in die Dampfleitung eingespeist.
- **Abschaltung:** Der Massendurchfluss wird bei abnehmender Einstrahlung reduziert, mit folgenden Optionen:
 - Übergang zur Rezirkulation, wenn die Nennbedingungen nicht erfüllt werden.
 - Rezirkulation, falls der minimale Durchfluss den Bedarf übersteigt.
 - Nachtbetrieb mit minimalem Durchfluss in einem einzelnen Kollektorkreislauf, wenn die Solarressource niedrig ist.

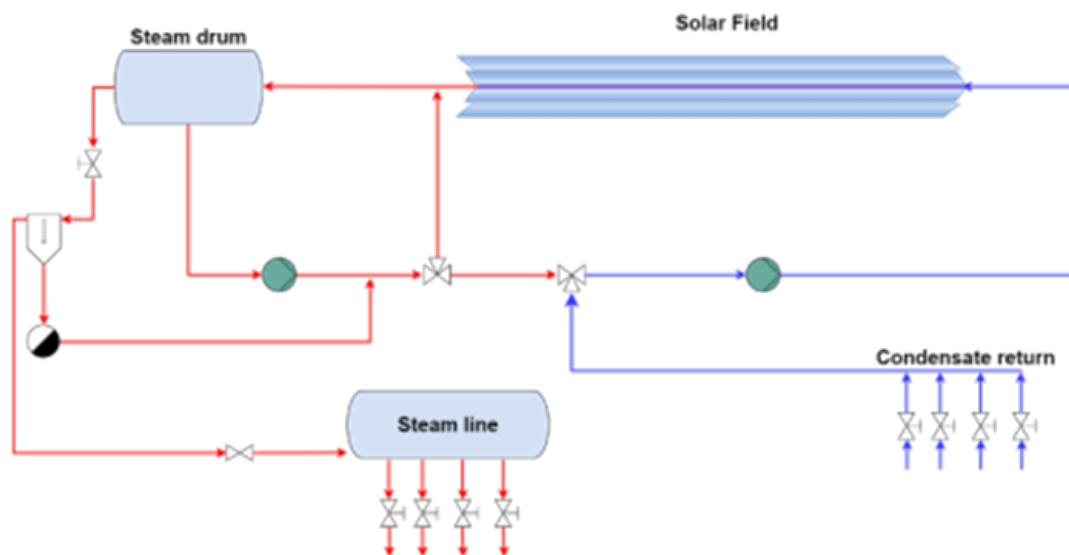


Abbildung 5-18: Systemdiagramm der Fallstudie C, linearer Fresnel-Kollektor (LFR) für die direkte Dampferzeugung vgl. (Miguel Cardemil et al., 2023).

Fall D: Parabolrinnenkollektoren

Das in Fall D betrachtete System, siehe Abbildung 5-19, umfasst ein Parabolrinnen-Kollektorfeld (PTC), das auf dem Dach einer Molkerei in Saignelégier, Schweiz, installiert ist. Es besteht aus 17 Kollektorreihen mit jeweils einem Kollektor pro Reihe. Das Solarfeld nutzt ein Wasser-Glykol-Gemisch als Wärmeträger, das auf eine Temperatur von 110 °C erhitzt wird. Die Wärme wird über einen Wärmetauscher mit einer Nennleistung von 350 kW auf das unter Druck stehende Prozesswasser übertragen, das auf 105 °C erwärmt wird. Dieses Wasser wird dann in den Kessel und das Speichersystem eingespeist und von dort an die Milchproduktionsprozesse verteilt.

Steuerungsstrategie:

Betrieb bei Sonneneinstrahlung: Wird eine direkte Einstrahlung von über 250 W/m^2 festgestellt, richten sich die Kollektoren automatisch zur Sonne aus, und die Pumpe wird aktiviert. Die Durchflussmenge wird per Frequenzumrichter geregelt, um die Solarfeldausgangstemperatur zwischen 110°C und 120°C zu halten.

Überhitzungsschutz: Überschreitet die Temperatur den maximalen Wert, werden die Kollektoren automatisch defokussiert. Eine Hochtemperaturabschaltung erfolgt nur bei hohem Durchfluss.

Abschaltung bei niedriger Einstrahlung: Liegt die direkte Sonneneinstrahlung unter 100 W/m^2 , wird die Anlage deaktiviert.

Das System ist so konzipiert, dass es die Wärme effizient für die Milchproduktionsprozesse bereitstellt und dabei präzise auf die variablen Einstrahlungsbedingungen reagiert.

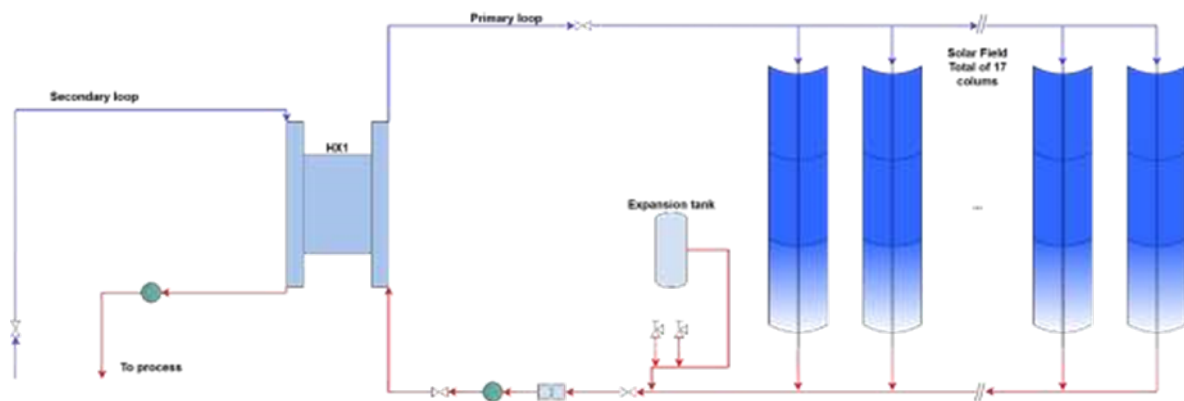


Abbildung 5-19: Systemdiagramm der Fallstudie D, Parabolrinnenkollektoren zur Warmwasserversorgung eines Molkereiprozesses vgl. (Miguel Cardemil et al., 2023).

5.3.4 Ergebnisbewertung der Simulationstools

Trotz der Verfügbarkeit zahlreicher öffentlicher und privater Simulationstools zur Untersuchung von Solartechnologien fehlt es an standardisierten Ansätzen, die das internationale Fachwissen bündeln und vergleichbare Ergebnisse liefern. Solche standardisierten Methoden könnten unbeabsichtigte Fehler erheblich reduzieren, die sich negativ auf die Systemleistung und das Design auswirken können.

Zudem wurde festgestellt, dass viele Projektentwickler auf selbst entwickelte Tools zurückgreifen. Diese sind oft speziell für bestimmte Systeme konzipiert und liefern bei der Anwendung auf andere Technologien, die von den ursprünglichen Annahmen abweichen, keine zuverlässigen Ergebnisse.

Die Analyse der Simulationsergebnisse für die Fälle A, B, C und D – durchgeführt mit unterschiedlichen Simulationstools und Szenarien, in denen gezielt Fehler induziert wurden – offenbarte erhebliche Abweichungen. Während einige Tools die statistische Verteilung der Referenzdaten gut nachbilden konnten, führten nichtlineare Modelle und fehlerhafte Annahmen zu erheblichen Ungenauigkeiten. Diese Fehler wurden teilweise durch Regelungssysteme oder Energiespeichersysteme kompensiert, dennoch wurden bei der Deckung des Energiebedarfs Abweichungen von bis zu 41 % auf Jahresbasis festgestellt.

Zusätzliche Analysen mittels Dynamic Time Warping (DTW) zeigten Unterschiede in der zeitlichen Dynamik der Ergebnisse, mit einer großen Bandbreite zwischen den Extremwerten. Die erzielten Ergebnisse und normierten Fehler können als Referenz dienen, um die Auswirkungen induzierter Fehler und die Unterschiede zwischen den Tools zu verdeutlichen. Gleichzeitig unterstreichen sie die Bedeutung präziser Modelle und Annahmen, um akzeptable Ergebnisse mit Fehlern unter 10 % zu erreichen.

5.3.5 Design-Werkzeug CORES

Die geplante Zurverfügungstellung von CORES-Simulationsdaten war im Rahmen des Subtasks aufgrund von Zeitverzögerungen in der Entwicklung des CORES-Tools nicht zeitgerecht möglich. Als Alternative wurde das interne SHIP-Tool, welches für Schulungszwecke verwendet wird, in Betracht gezogen. Hier konnte allerdings nur Fall A abgedeckt werden. Der technische Fokus von sowohl CORES als auch internem SHIP-Tool liegt in nicht-konzentrierenden System, wofür die ausgewählten Fälle nicht anwendbar waren.

Dennoch sind die beiden Tools für nicht-konzentrierende Systeme – eine Stärke von nationalen Akteuren wie Industriepartner und Contracting-Firmen – eine wesentliche Hilfestellung.

- **SHIP-Tool:** Das AEE INTEC interne SHIP-Tool wurde vorrangig für Trainingszwecke in internationalen Capacity Building Programs entwickelt und wurde in Malaysia, Ägypten und dem südlichen und westlichen Afrika für Trainings und Machbarkeitsstudien eingesetzt. Es steht auch Lektoren der FH Joanneum und FH Burgenland zur Verfügung und wird dort eingesetzt. Es kann von AEE INTEC auf Anfrage angefordert werden.
- **CORES Tool:** Das im gleichnamigen Projekt entwickelte Tool ermöglicht das schnelle und niederschwellige Design von hybriden Prozesswärmelösungen. Es wird im Folgenden näher erläutert und liegt dem Bericht als Deliverable 3.2. bei und ist frei verfügbar von der AEE INTEC Homepage herunterladbar.²

² <https://www.aee-intec.at/cores-integration-kombinierter-erneuerbarer-energiesysteme-in-die-industrie-p242>

Funktionalität des CORES Tool

Im Zuge des CORES-Projekts wurde das vorliegende Potentialtool entwickelt, das es Anwender:innen ermöglicht, einfache Berechnungen und Analysen selbstständig durchzuführen. Dieser Ansatz wurde gewählt, da die Anwendung eines komplexen Systemmodells oft nicht verfügbar, zu aufwendig oder nicht gerechtfertigt ist. Das Potentialtool integriert einfache Modelle für Photovoltaik, Solarthermie und die Wärmepumpe und nutzt Excel VBA zur Umsetzung, um eine breite Verbreitung und einfachen Zugang zu ermöglichen. Mit dem Tool wird Anwender:innen die Verfügbarkeit von thermischen und elektrischen Potenzialen in Verbindung mit einem Prozessbedarf aufgezeigt. Zudem wird eine erste Abschätzung der Investitionskosten vorgenommen. Es ermöglicht Anwender:innen, sich mit wichtigen Parametern und Leistungskennzahlen für die Auslegung vertraut zu machen und auf notwendige Informationen seitens des Prozesses aufmerksam zu werden. Das Tool eignet sich insbesondere als Unterstützung im Entscheidungsprozess, während dem Pre-Basic Engineering, da es die thermischen Potentiale erneuerbarer Technologien aufzeigt. Es ist jedoch nicht für eine detaillierte Auslegung oder Optimierung von Anlagen geeignet, da es nicht den erforderlichen Genauigkeitsgrad bietet. Die Modelle und Bilanzierungen im Tool sind stark vereinfacht. Daher sollte es nicht für detaillierte Simulationen oder Auslegungen verwendet werden. Stattdessen soll das Potentialtool das Interesse an weiterführenden Simulationen wecken, die detailliertere Informationen liefern. Dabei können die im Tool bereits erfassten Lastprofile als Grundlage dienen.

Überblick über das CORES Tool

Im Potentialtool wird ein einfaches System bestehend aus Solarthermie, Photovoltaik, Abwärmeeintegration, einer Wärmepumpe und Speichern bilanziert. Der grobe Aufbau des Systems wird in Abbildung 5-20 dargestellt. Das System wird vorrangig in zwei Teilsysteme aufgeteilt:

- Die Quellenseite, auf der die Wärmezufuhr über die Solarthermie und einen Wärmeübertrager zu einem Prozessmedium mit nutzbarer Restwärme stattfindet. Hierbei handelt es sich um die Wärmequellen für die Wärmepumpe, die Wärme auf einem niedrigen Temperaturniveau bereitstellen.
- Die Senkenseite, auf der die von der Wärmepumpe auf ein höheres Temperaturniveau gebrachte Wärme an ein Medium vom Industrieprozess abgeführt wird. Hier handelt es sich um eine Wärmesenke für die Wärmepumpe.

Beide Seiten können mit einem thermischen Speicher ausgestattet werden, um zeitliche Abweichungen zwischen Bedarf und Verfügbarkeit ausgleichen zu können. Die auftreffende Strahlung für die Kollektormodelle wird aus Wetterdaten entnommen, während die Randbedingungen von Seiten des Industrieprozesses über ein Lastprofil für den Wärmebedarf sowie ein Abwärmeprofil für die nutzbare Restwärme definiert werden. Mit dem Tool werden alle Komponenten grob ausgelegt und für einen vorgegebenen Zeitraum bilanziert und darauf basierend eine Analyse der wichtigsten thermischen und ökonomischen Rahmenbedingungen vorgenommen.

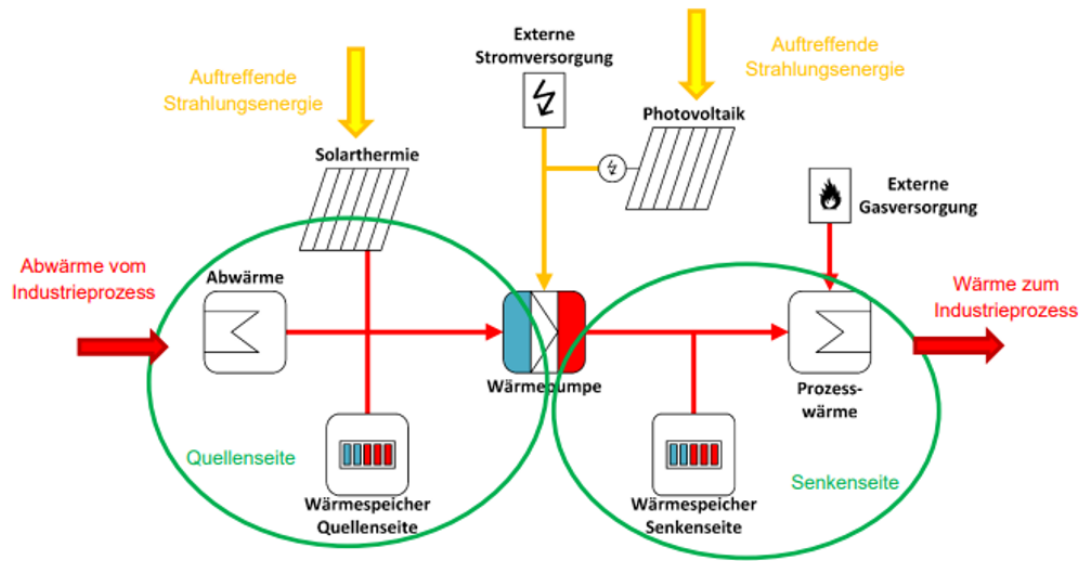


Abbildung 5-20: Überblick über das CORES – Potentialtool ³

³ CORES Tool Download und Anleitung: <https://www.aee-intec.at/cores-integration-kombinierter-erneuerbarer-energiesysteme-in-die-industrie-p242>

5.4 Standardisierungen

5.4.1 Standardisiertes Vokabular

Standardisierungen und Zertifizierungen sind wichtige Komponenten für einen erfolgreichen SHIP-Markt. Der Subtask D sollte diesen Bereich bearbeiten, musste aber vorzeitig beendet werden. Dennoch wurden wesentliche Beiträge zur aktualisierten ISO 9488:2022 ‚Solar energy — Vocabulary‘ (ISO, 2022) durchgeführt. Hier wurden für die Solarthermie-Branche generell die Begrifflichkeiten vereinheitlicht und vor allem von der griechischen Subtask-Leitung wichtige SHIP-Begriffe miteingebracht.

5.4.2 Standardisierte Umrechnungsfaktor Fläche zu Leistung

Eine zweite wesentliche Komponente der Standardisierung betrifft die standardisierte Berechnung der thermischen Leistung aus der Fläche für konzentrierende Systeme. Hier muss generell unterschieden zwischen 2 Zielen unterschieden werden:

- 1) Exakte energetische und technische Berechnung für Design und Komponenten-Auslegung
- 2) Schaffung von Vergleichbarkeit für statistische Zwecke

Für das zweite Ziel wurde eine Technical Note verfasst, um die Problematik der Einheitlichkeit von statistischen Auswertungen zu erreichen (IEA SHC, 2023).

Während für die Solarthermie-Branche oft die Kollektorfläche (m^2) ein entscheidender Wert zur Größeneinordnung ist, sind für die meisten anderen Energiesektoren die installierte (thermische) Leistung (kWth) der entscheidende Wert.

Für unverglaste, Flach- und Vakuumröhrenkollektoren wurde bereits vor 20 Jahren bei einer internationalen Tagung der Solarverbände in Gleisdorf ein Faktor von $0,7 \text{ kWth/m}^2$ empfohlen und festgehalten (IEA SHC, 2004).

Mit dem Aufkommen konzentrierender Kollektoren fehlte ein entsprechender Faktor für diese Technologie. Die Expert:innengruppe von Task 64/IV identifizierte diesen Mangel und schlug nach intensiven Diskussionen **ebenfalls $0,7 \text{ kWth/m}^2$ für einachsige Parabolrinnen, lineare Fresnel-Kollektoren und zweiachsige Systeme** vor, was als Technical Note verfasst und von IEA SHC Exco freigegeben wurde (IEA SHC, 2023).

5.5 Guideline-to-Market

Ein weiterer Teil des Task 64/IV „Solare Prozesswärme“ hatte das Ziel, die Verbreitung solarthermischer Technologien in der Industrie zu fördern und deren Beitrag zur Dekarbonisierung des Industriesektors zu verdeutlichen. Neben der Überwindung technischer und technologischer Hindernisse werden vor allem nicht-technische Barrieren in den Mittelpunkt gestellt, da diese oft einen entscheidenden Einfluss auf die Einführung von Solarwärme für industrielle Prozesse (SHIP) haben. Besonders die Wettbewerbsfähigkeit und die finanziellen Hürden stellen in vielen Fällen Engpässe dar, die die Marktdurchdringung bremsen. Daher sollte Task 64/IV eine Marktstrategie entwickeln, die diese Barrieren adressiert und SHIP als eine wirtschaftliche und effektive Lösung für die industrielle Wärme- und Kälteversorgung positioniert.

Die Hauptziele der Strategie umfassen:

- **Innovation:** Es soll gezeigt werden, dass der Einsatz solarthermischer Technologien als eine potenziell innovative Lösung zur Dekarbonisierung in der Industrie anerkannt wird. Dies umfasst die Untersuchung, wie solarthermische Technologien in Innovationsstrategien auf regionaler, nationaler oder transnationaler Ebene integriert werden können. Zudem wird die Verbreitung von Fördermitteln und die Entwicklung von Forschungsprojekten zur Reduzierung der Kosten und zur Förderung von Demonstrationsprojekten gefördert.
- **Leistbarkeit:** Hier wurde ein normalisierter Vergleich der Investitionskosten (CAPEX) von SHIP mit den Betriebskosten (OPEX) von konkurrierenden Technologien wie Heizkesseln oder Wärmepumpen angestrebt. Zusätzlich wurde eine Analyse der Trends zur Senkung der SHIP-Technologiekosten vorgenommen, um eine realistische Einschätzung zukünftiger Wärmeerzeugungskosten zu ermöglichen. SHIP soll als ein stabiler Bestandteil eines hybriden industriellen Energiesystems positioniert werden, das sich flexibel an zukünftige Energiepreisentwicklungen anpassen kann.
- **Rentabilität:** Ein Schwerpunkt liegt auf der langfristigen Rentabilität von SHIP, wobei eine Payback-basierte Bewertung als zu kurzfristig angesehen wird. Stattdessen kann die Bewertung auf Basis des Net Present Value (NPV) mit einem langfristigen Betrachtungshorizont erfolgen. Dies schließt die Sammlung von Informationen über Finanzierungsmodelle und die Entwicklung von Szenarien ein, die zeigen, dass SHIP mit anderen Energiequellen, sowohl konventionellen als auch erneuerbaren, wettbewerbsfähig ist. Ein weiteres Ziel war die Bündelung von Finanzierungsoptionen für potenzielle Projektträger:innen und Endnutzer:innen.

Die Arbeit an diesen Themen wurde durch aktuelle Informationen zu Technologiekosten unterstützt, die eine wichtige Grundlage für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit von SHIP bilden. Ein Überblick über die Entwicklungen und Trends zur Kostensenkung sowie eine Markteinschätzung bis 2026 dienten dabei als zentrale Informationsquelle. Zudem wurde der Bedarf an maßgeschneiderten Finanzierungslösungen für SHIP-Projekte thematisiert, um geeignete Geschäftsmodelle und Finanzierungsansätze zu identifizieren, die den spezifischen Anforderungen der Industrie gerecht werden.

5.5.1 Relevante Methoden und Materialien für die Bewertung von Technologiekosten und Statistiken

Die Wärmegestehungskosten (LCOH) dienen zur Bewertung der Kosten für die Erzeugung von Wärme unter Berücksichtigung von Kapital- und Betriebskosten und ermöglichen den Vergleich verschiedener Wärmeerzeugungstechnologien. Sie bieten eine standardisierte Methode, um unterschiedliche Technologien und Märkte zu analysieren. LCOH wird in verschiedenen Studien verwendet, um technologische Entwicklungen und Marktvergleiche darzustellen.

LCOH hilft dabei, fundierte Entscheidungen für politische Entscheidungsträger:innen, Investor:innen und Energieplaner:innen zu treffen, indem es eine effiziente Ressourcenallokation ermöglicht, die Energiepolitik unterstützt, Nachhaltigkeit fördert und langfristige Kosten prognostiziert. Es ist ein wichtiges Instrument für den Vergleich der Wirtschaftlichkeit von Wärmeerzeugungstechnologien und die Formulierung von Richtlinien.

Es gibt verschiedene Berechnungsmethoden für LCOH, und um unterschiedliche Ergebnisse korrekt vergleichen zu können, ist es entscheidend zu wissen, welche Methode angewendet wurde. Tabelle 5-6 bietet einen Überblick über die verwendeten LCOH-Berechnungsmethoden.

Tabelle 5-6: Vergleich der Formel zur Berechnung der LCOH für solarthermische Anlagen

Solar Payback ⁴	Solar Heat Worldwide (SHW) ⁵	IEA SHC Task 54 ⁶
$LCOH_{SP} = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{M_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{Y_t}{(1+r)^t}}$	$LCOH_{SHWW} = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^{t_{ges}} \frac{A_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^{t_{ges}} \frac{SE}{(1+r)^t}}$	$LCOH_{Task54} = \frac{I_0 - S_0 + \sum_{t=1}^T \frac{C_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^T \frac{E_t}{(1+r)^t}}$
$LCOH_{SP}$ = Levelized Cost of Heat in USD/kWh I_0 = investment expenditure in year zero M_t = operation and maintenance expenditure estimated by Task 64 experts • 1 % of total installed costs per year ($\leq 1,000$ m² aperture area of field) • 0.5 % of total installed costs per year ($>1,000$ m² aperture area of field) Y = project-specific annual heat generation [MWh/a] r = discount rate (WACC) = 5 % (real) ... fixed for the comparison n = system lifetime	$LCOH_{SHWW}$: levelized cost of heat [€/kWh] I_0: specific solar thermal system costs incl. in the statistics) [€/m²gross] A_t: fixed and variable O&M expenditures in the year t [€/m²gross] SE: solar energy yield in the year [kWh/m²gross] r: discount rate in % t: year within the period of use (1,2,...t_{ges}) t_{ges}: period of use (solar thermal system lifetime in years) [a]	$LCOH_{Task54}$: levelized cost of heat in €/kWh I_0: initial investment in € S_0: subsidies and incentives in € C_t: operation and maintenance costs (year t) in € E_t: saved final energy (year t) in kWh r: discount rate in % T: period of analysis in years

Der größte Unterschied zwischen den drei Ansätzen zur Berechnung der LCOH (Wärmegestehungskosten) liegt in der Berücksichtigung des Solarenergiebeitrags. Während Solar Payback und Solar Heat Worldwide den jährlichen Solarenergieertrag einbeziehen, berücksichtigt die Formel von Task 54 nur den "nutzbaren" Teil der erzeugten Energie, etwa unter Berücksichtigung von Wärmeverlusten. Task 54 ist auch der einzige Ansatz, der Subventionen und Anreize berücksichtigt, da diese projektabhängig sind, während SHW (Solar Heat Worldwide) Subventionen für statistische Zwecke nicht

⁴ Epp, Bärbel, Oropeza, Marisol, Taylor, Michael, August 2021, "Cost Trends Of Solar Energy For Heat In Industry". Source: https://www.solrico.com/fileadmin/solrico/media/doc/Solar_payback/Flyer_SHIP_Cost_Trends_August_2021.pdf

⁵ IEA-SHC, 2017. "Solar Heat Worldwide". Source: <http://www.iea-shc.org/solar-heat-worldwide>

⁶ Veynandt, et.al. "Comparison of the levelized cost of heat calculation methods for solar thermal applications in IEA-SHC Task 54 (LCOHs) and in Solar Heat Worldwide (LCOH)." Source: <https://task54.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/A13-Info-Sheet--LCOH-Comparison-SHWW.pdf>

abzieht. Zudem berechnet Solar Payback die LCOH in USD/kWh, während die anderen Methoden den Wert in €/kWh angeben.

Die LCOH-Methode bietet eine gute Grundlage für den Vergleich von Technologien und Energiequellen, da sie den gesamten Lebenszyklus berücksichtigt und so einen besseren Überblick über langfristige Kosten gibt. Dies ist besonders aus Sicht öffentlicher Fördergeber relevant, da die Amortisationszeitberechnungen für Solaranlagen oftmals zu kurz greifen und die Lebenszykluskosten nicht widerspiegeln.

5.5.2 Update zu den Technologiekosten

Die Kostendaten in diesem Bericht stammen aus zwei Hauptquellen: der Solarwärmekostenanalyse von Solrico in Zusammenarbeit mit IRENA und der SHIP-Datenbank, die weltweit Daten zu Solarthermieranlagen beinhaltet. Zunächst werden die Erkenntnisse aus der Kostenanalyse von Solrico und IRENA vorgestellt und mit den Ergebnissen der SHIP-Datenbank verglichen.

Große Solarthermieranlagen haben in verschiedenen Marktsegmenten, wie SHIP (Solar Heat for Industrial Processes), SDH (Solar District Heating) und dem Dienstleistungssektor, Kostensenkungen erfahren. Die Wahl des Kollektortyps beeinflusst die Kosten erheblich, da sie von den spezifischen Temperaturanforderungen der Kund:innen abhängt. Analysen zu den installierten Gesamtkosten und Wärmegestehungskosten von Solarthermieranlagen zeigen Kostensenkungstrends, insbesondere durch Skaleneffekte bei größeren Anlagen.

Die Installationskosten von Solarthermieranlagen in der Industrie sind tendenziell höher als im Gebäude- oder Energiesektor. Eine Untersuchung von 101 SHIP-Anlagen in Europa verdeutlicht die Vorteile größerer Anlagen und zeigt, dass die Wärmegestehungskosten regional variieren, von 3,9 USD-Cent/kWh in Asien bis 9,2 USD-Cent/kWh in Westeuropa, siehe Abbildung 3-1. Diese Unterschiede entstehen durch Skaleneffekte, unterschiedliche Kostenstrukturen und lokale Einstrahlungswerte. Besonders wettbewerbsfähig ist Solarwärme für Anwendungen, die eine Wärme von bis zu 150 °C benötigen, was 30 % des weltweiten industriellen Wärmebedarfs ausmacht. In Asien und Mexiko liegen die niedrigsten Wärmegestehungskosten bei 3,8 USD-Cent/kWh, was die Wirtschaftlichkeit von Solarwärme in diesen Regionen unterstreicht.

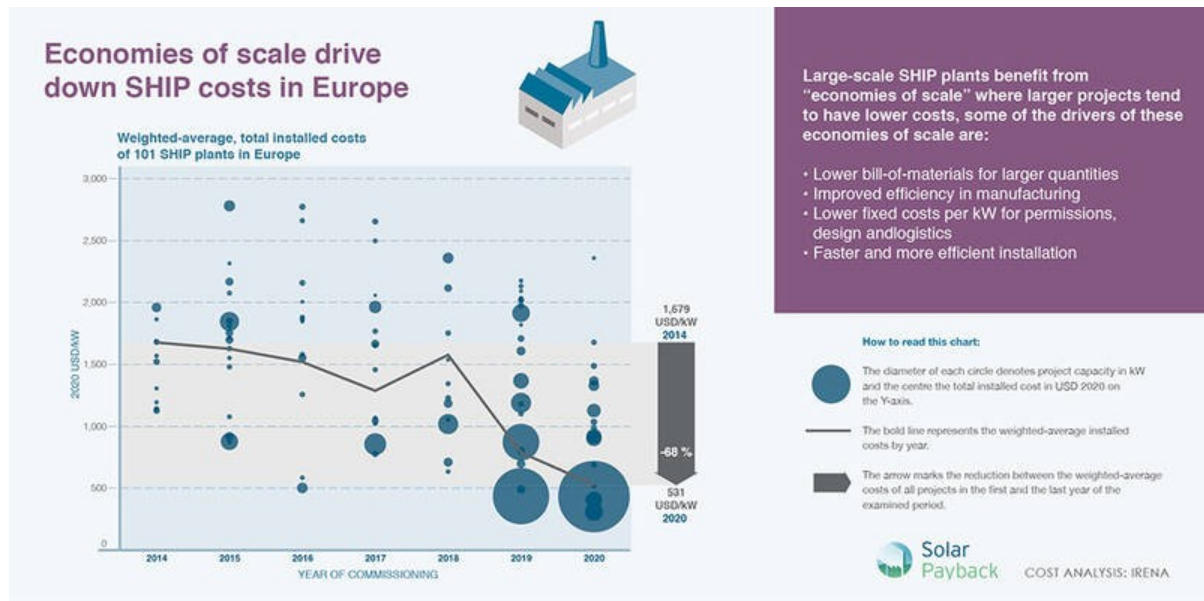


Abbildung 5-21: Einfluss der Skalierungseffekte auf die Kosten (Solar Payback/IRENA, 2022)

5.5.3 Trends zur Kostensenkung

Die Kostensenkungstrends in der Solarthermie der letzten Jahre werden anhand der Zusammenarbeit von IRENA und Solar Payback im Bericht „Erneuerbare Stromerzeugungskosten“ von 2020 aufgezeigt. In Österreich, Deutschland und Mexiko wurden deutliche Senkungen der installierten Gesamtkosten beobachtet, insbesondere bei nicht konzentrierenden Anlagen. Von 2013 bis 2020 sanken die Kosten in Österreich um 55 %, in Deutschland um 45 % und in Mexiko um 17 %, siehe Abbildung 5-22. Bis 2020 begannen die Kosten in diesen Ländern zu konvergieren, wobei Österreich bei größeren Projekten etwas niedrigere Durchschnittskosten aufwies.



Abbildung 5-22: Kostenverläufe Solarthermie für Österreich, Deutschland und Mexiko (IRENA, 2021)

Mexiko hatte 2020 mit einem LCOH von 0,039 USD/kWh aufgrund seiner hervorragenden Solarressourcen und eines reifen Marktes einen deutlichen Vorteil. In Deutschland führte ein Ausreißer zu höheren LCOH, während in Österreich die Kostensenkungen durch den Einsatz größerer Systeme und Skaleneffekte erreicht wurden. In Mexiko blieb die durchschnittliche Anlagengröße klein, aber Kostensenkungen wurden durch Produktionsoptimierungen, effizientere Logistik und intensiven Wettbewerb erzielt.

5.5.4 Vergleich und Synergien für integrierte Energiesysteme

SHIP-Lösungen erreichen allein oft nur geringe Solarthermie-Anteile und müssen mit weiteren erneuerbaren Technologien kombiniert werden, um die CO₂-Emissionen signifikant zu senken. Dies liegt an der temperaturabhängigen Natur des industriellen Wärmebedarfs, insbesondere bei Raumwärme und Lüftung. SHIP kann den sommerlichen Wärmebedarf vieler Branchen decken, jedoch nicht den ganzjährigen Bedarf.

Ein Vergleich von SHIP und Wärmepumpen (HP) zeigt Unterschiede in den Kostenstrukturen: SHIP-Systeme haben hohe Investitionskosten (CAPEX), während bei Wärmepumpen die Stromkosten dominieren. Wärmepumpen werden meist für den Grundlastbetrieb mit vielen Volllaststunden ausgelegt. Für eine stärkere Nutzung erneuerbarer Energien sind jedoch neue Auslegungsrichtlinien nötig. Ein höheres Kapazitätsverhältnis erhöht zwar die Kosten, ermöglicht aber mehr erneuerbare Energieanteile.

Hybride Systeme aus SHIP und Wärmepumpen bieten Vorteile: SHIP deckt den sommerlichen Wärmebedarf, während die Wärmepumpe den Winterbedarf übernimmt. Ein Solarpufferspeicher kann den Winterbetrieb der Wärmepumpe optimieren und Wartungskosten reduzieren. Dazu kommt, dass Solarthermie besonders für Temperaturen unter 100 °C geeignet ist, während für höhere Temperaturen Biomasse, Biogas oder Wärmepumpen sinnvoller sind. Trotz ihres Potenzials wird Solarthermie in der Industrie noch selten genutzt.

Ein Vergleich erneuerbarer Heiztechnologien zeigt, dass jede spezifische Vor- und Nachteile hat. Die Wahl hängt von lokalen Ressourcen, Kosten und Wärmeanforderungen ab. Das Projekt "Industrial Excess Heat INXS" bietet detaillierte Analysen zu diesen Technologien. Dazu hat ein Positionspapier des DCSP (Juli 2022) betont, dass die Kombination und Integration verschiedener Technologien zur Wärmewende. Solarwärme, auch mit konzentrierender Solarthermie (CST), für mittlere Temperaturen wie in Dampfnetzen zur Dekarbonisierung beitragen kann. Eine technologische Bewertung nachhaltiger Wärmerzeuger findet sich in Abbildung 5-23.

	Temperature level (commercial)	Technical availability	Availability in time	Economic efficiency (today)	Land requirements (incl. energy generation)	Integration	Potential Germany /EU
Solar thermal	80°C - 420°C	●	5000 - 6500 Full load hours	●	●	●	●
Thermal storage	60°C - 560°C	●	Generates flexibility / replaces electricity storage	●	depending on heat source	●	●
Options for hybridization							
Electric direct heating	Up to 420 °C	●	depending on availability green electricity	●	●	●	●
Heat pump	70 °C - 100°C	●	depending on availability green electricity	●	●	●	●
Steam compressor	100-150°C 150-250 °C	●		●	●	●	●
Storage power plant	100 °C-550 °C	●	4000 h with thermal storage	●	●	●	●
Deep geothermal	Up to 200°C in DE	●	7000-8000 h Full load hours	●	●	●	●
Biomass (residual, old, damaged wood)	Up to 500°C	●	7000 - 8000h Full load hours	●	●	Transport	●
Biogas (Waste materials)	All temperature ranges	●	7000 - 8000h Full load hours	●	●	●	●
Green hydrogen	All temperature ranges	●	7000-8000 Full load hours	●	●	Transport and storage	●

Abbildung 5-23: Bewertung kohlenstoffarmer Technologien für die industrielle Wärmewende, Stand Juli 2022 (Quelle: DCSP⁷)

⁷ Deutsche CSP, "Accelerating the Heat transition in the Industry", Juli 2022, erhältlich bei <https://www.deutsche-csp.com/en-gb/mediathek>

5.5.5 Angewandte Geschäftsmodelle für SHIP

Die Integration von Solarwärme in neuen Anlagen ("Greenfield"-Installationen) gestaltet sich oft einfacher, da alle Komponenten optimiert und auf die bestmögliche technische Leistung bei minimalen Kosten ausgelegt werden können. Auf bestehenden Industriestandorten ("Brownfield"-Installationen) hingegen ist die Herausforderung, Solarwärme effizient und kostengünstig in die bereits bestehende Infrastruktur zu integrieren. Dies erfordert in der Regel nur begrenzte Anpassungen der bestehenden technischen Systeme. Gleichzeitig kann die Installation einer SHIP-Anlage, möglicherweise zusammen mit einem Wärmespeicher, eine Gelegenheit bieten, zusätzliche Effizienzmaßnahmen umzusetzen und die Infrastruktur zu optimieren.

Für Industriebetriebe bedeutet die Anschaffung einer SHIP-Anlage eine hohe Anfangsinvestition (CAPEX) in die Infrastruktur, während die Amortisation durch niedrige Betriebskosten (OPEX) und Brennstoffeinsparungen im Laufe der Lebensdauer der Solaranlage erfolgt. Besonders Unternehmen sehen sich mit Anforderungen bezüglich kurzer Amortisationszeiten konfrontiert. Daraus ergibt sich, dass in Wirtschaftlichkeitsberechnungen durch die Abzinsung den zukünftigen Energieverbräuchen weniger Gewichtung gegeben wird; hohe Anfangskosten stellen sich dagegen unwirtschaftlich dar. Da diese finanziellen Bedingungen oft nicht den üblichen Erwartungen an eine kurze Amortisationszeit entsprechen, wird empfohlen, die Amortisationsberechnung durch die LCOH (Levelized Cost of Heat) mit einer langfristigen Perspektive und typischen Kreditzinssätzen zu ergänzen, um die langfristigen Vorteile eines stabilen Wärmelieferpreises hervorzuheben.

"Normaler" Ankauf einer SHIP-Anlage

Das Geschäftsmodell, bei dem eine SHIP-Anlage (Solarthermische Prozesswärme) an den Wärmeverbraucher verkauft wird, verfolgt den Ansatz, dass der Endverbraucher Eigentümer und Betreiber der gesamten Anlage wird. In diesem Fall wird ein Vertrag mit einem Turnkey Supplier abgeschlossen, der für die Planung, Lieferung und Installation des gesamten Systems verantwortlich ist. Der Turnkey-Supplier entwirft die gesamte Anlage und koordiniert den Bau, wobei die Kund:in gegebenenfalls mehrere Partnerfirmen oder eine Projektmanagementgesellschaft hinzuzieht, die den Bau und die Beauftragung von Subunternehmern übernimmt. Nach der Fertigstellung der Anlage geht das Eigentum an den Endverbraucher über, der den Kaufpreis an den Turnkey Supplier zahlt. Um die Kosten für den Kund:innen zu senken, können zusätzliche Anreize oder Subventionen eingesetzt werden.

Das Hauptmerkmal dieses Modells ist, dass die Kund:in sowohl die Investition (CAPEX) als auch das Risiko trägt, wenn es um die Betriebs- und Wartungskosten (OPEX) geht, die nicht durch vertragliche Garantien des Turnkey Suppliers abgedeckt sind. Die Kund:in übernimmt die Verantwortung für den Betrieb, die Wartung und die Reparaturen der Anlage. Dieses Modell ist besonders vorteilhaft, wenn die Kund:in bereit ist, eine höhere Anfangsinvestition zu tätigen, im Austausch für langfristige Betriebseinsparungen und eine garantierte stabile Wärmeversorgung durch die Solarthermieanlage. Abbildung 5-24 zeigt grafisch, wie so ein Verkauf bzw. „Build and Handover“ aussehen kann.

Build and handover business model

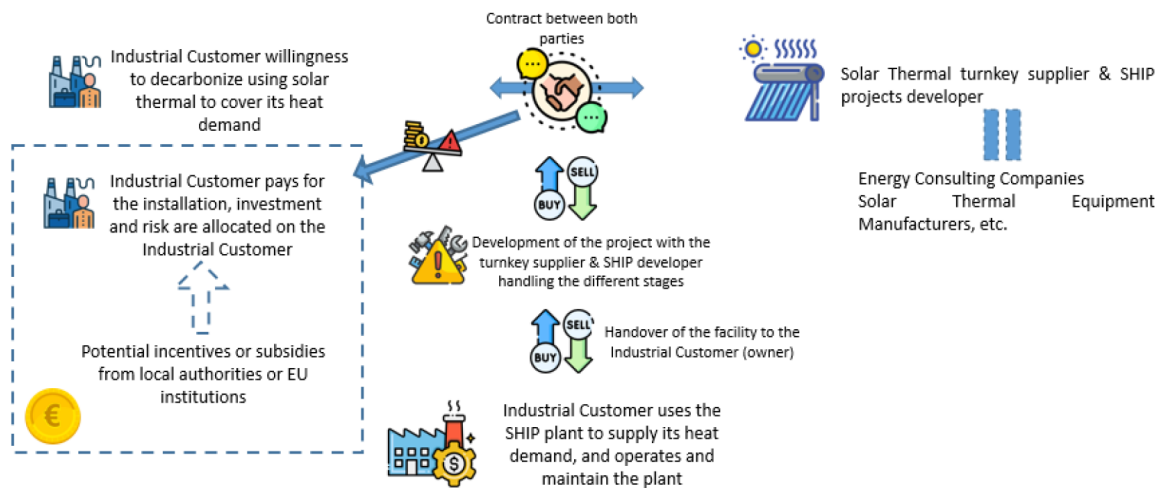


Abbildung 5-24: Visualisierung des Verkaufs einer Solarthermieranlage ⁸

Wärmeversorgungsmodelle von Energiedienstleistungsunternehmen (ESCO)

Im Gegensatz dazu gibt es das Geschäftsmodell der Energiedienstleistungsunternehmen (ESCO), das besonders den Vorteil bietet, dass der Endverbraucher keine hohen Anfangsinvestitionen tätigen muss. In einem ESCO-Modell bleibt das Eigentum an der SHIP-Anlage bei dem ESCO, das auch die gesamte Finanzierung (CAPEX) übernimmt. Das ESCO ist verantwortlich für die Planung, Finanzierung, Installation und den Betrieb der Anlage und garantiert dem Endverbraucher Einsparungen bei den Energiekosten. Der Endverbraucher zahlt eine regelmäßige Gebühr für die Wärmeversorgung, wodurch die Kosten für die Finanzierung und Installation der Ausrüstung gedeckt werden. Dies ermöglicht den Endverbrauchern, von den Vorteilen der Solarthermie zu profitieren, ohne die hohen Anfangsinvestitionen und Risiken selbst tragen zu müssen.

Das ESCO-Modell funktioniert über Energiedienstleistungsverträge, bei denen das ESCO dem Betrieb jährlich garantierte Einsparungen durch eine reduzierte Wärmeversorgungsstruktur oder durch den Bezug erneuerbarer Energie bietet. Dabei erfolgt die Vergütung des ESCO über eine Kombination einer regelmäßigen Gebühr und einem Zuschlag gemäß der gemessenen Leistung und Wärmelieferung. Ein wesentlicher Vorteil dieses Modells ist die Vermeidung hoher Vorabinvestitionen und die Reduktion finanzieller Risiken für den Endverbraucher. Es handelt sich dabei nicht nur um eine Finanzierungsstruktur, sondern um ein vollständiges Geschäftsmodell, bei dem auch der Betrieb und die Wartung der Anlagen von dem ESCO übernommen werden, was für viele Industrieunternehmen, die nicht über das nötige Know-how oder Personal verfügen, eine Erleichterung darstellt. Abbildung 5-25 visualisiert den Ablauf eines ESCO-Modells.

⁸ EDF, "Business models for the deployment of Solar Heating for Industrial Processes" Source: http://ship2fair-h2020.eu/wp-content/uploads/2023/09/SHIP2FAIR_D8.1_Business-models_Final.pdf

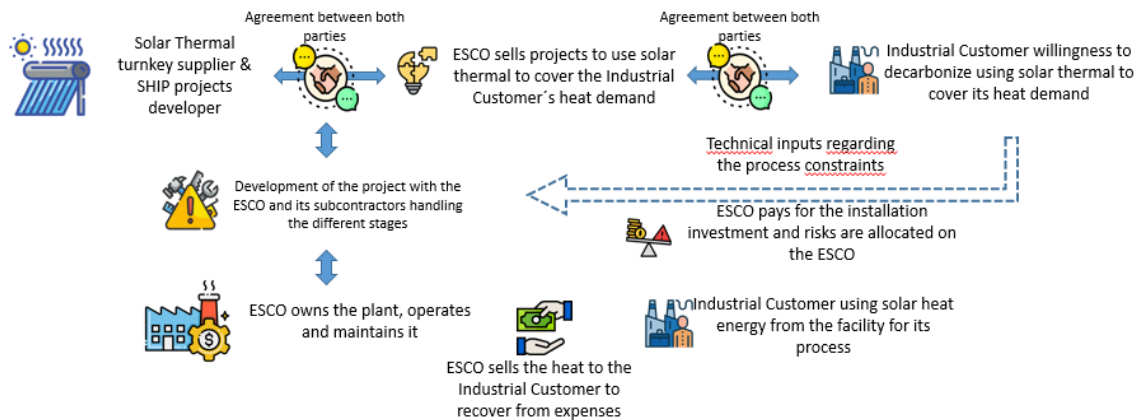


Abbildung 5-25: Visualisierung des ESCO-Modells⁹

Die USA sind ein gutes Beispiel für die weitverbreitete Nutzung des ESCO-Modells. Ursprünglich konzentrierte sich die US-amerikanische ESCO-Industrie auf Energieeffizienzprojekte im Bereich der Elektrizität, insbesondere im öffentlichen Sektor (z. B. für Schulen, Universitäten und staatliche Einrichtungen). Diese Projekte waren häufig durch finanzielle Anreize von Strom- und Gasversorgern unterstützt, um die anfänglichen Bedenken hinsichtlich der finanziellen und technischen Risiken von energieeffizienten Geräten auszuräumen.

Das ESCO-Modell hat auch im Bereich der Solarthermie an Bedeutung gewonnen, da es hilft, Hindernisse für die Einführung von SHIP-Technologien zu überwinden, insbesondere die hohen Anfangsinvestitionen. Durch den Betrieb und die Wartung der Anlage übernimmt die ESCO das Risiko der technischen und finanziellen Performance. Die Vorteile dieses Modells liegen vor allem in der Vermeidung hoher Vorabkosten, der reduzierten finanziellen Belastung und der Übernahme des Betriebs durch die ESCO. Gleichzeitig bleibt der Endverbraucher flexibel und profitiert von einer stabilen Wärmeversorgung zu garantierten Kosten.

Obwohl das ESCO-Modell eine attraktive Lösung darstellt, gibt es auch Herausforderungen bei der Implementierung. So sind viele Unternehmen im produzierenden Sektor vorsichtig, wenn es darum geht, ihre Energie- und Prozessdaten zur Verfügung zu stellen, da diese als vertraulich gelten. Auch große Industrien, die bereits über die finanziellen und technischen Ressourcen verfügen, um eigene Projekte umzusetzen, könnten wenig Interesse an einem ESCO-Modell haben. Trotzdem zeigt der Marktausblick für SHIP in den kommenden Jahren (2024–2026), dass der Großteil der geplanten Projekte in diesem Zeitraum auf ESCO-Modellen basieren wird. Dies unterstreicht die Vorteile und die Flexibilität dieses Modells im Vergleich zu anderen Geschäftsmodellen, die mit SHIP-Technologien arbeiten.

⁹ EDF, "Business models for the deployment of Solar Heating for Industrial Processes" Source: http://ship2fair-h2020.eu/wp-content/uploads/2023/09/SHIP2FAIR_D8.1_Business-models_Final.pdf

5.5.6 Finanzierungsmodelle

Die Finanzierung von Solarthermieranlagen im Industriebereich (SHIP) unterscheidet sich grundlegend von etablierten Modellen für Windkraft- und Photovoltaikanlagen (PV). Während Wind- und PV-Projekte auf standardisierte Cashflow-basierte Finanzierungsmodelle zurückgreifen, gestaltet sich die Finanzierung von Solarthermie komplexer, da weniger standardisierte Prozesse und größere technologische sowie marktbedingte Unsicherheiten vorliegen.

Wind- und PV-Projekte profitieren von ihrer breiten Akzeptanz und Verbreitung, da sie mit umfassenden Daten zu meteorologischen Bedingungen und Leistungskennzahlen unterlegt werden. Diese Daten minimieren das technische Risiko und schaffen die Grundlage für eine verlässliche Ertragsabschätzung. Häufig werden solche Projekte über Projektgesellschaften (SPVs) realisiert, die durch langfristige Darlehen und Eigenkapital finanziert werden. Durch ihre Skalierbarkeit und bewährte Technologie sind Wind- und PV-Projekte ideal für diese Art der Finanzierung geeignet.

Demgegenüber steht bei SHIP-Projekten das Risiko der Abhängigkeit von einem einzigen Abnehmer, da die erzeugte Wärme in der Regel nicht auf einem breiteren Markt verkauft werden kann. Dies erhöht das Kreditrisiko, da Zahlungsausfälle der Kund:innen erhebliche Auswirkungen haben können. Im Unterschied zu den etablierten Sektoren erfordert Solarthermie daher eine individuelle Risikoanalyse für jedes Projekt. Standardisierte Finanzierungsmechanismen, die auf Power Purchase Agreements (PPAs) aufbauen, wie sie in anderen erneuerbaren Sektoren gängig sind, sind schwierig zu etablieren, da der Markt für Solarwärme sehr klein ist.

Lösungen für kleinere Projekte

Für kleinere SHIP-Projekte, die häufig nicht die notwendige Skalierung für aufwendige Finanzierungsmodelle erreichen, bietet sich Forfaiting an. Dabei werden zukünftige Forderungen verkauft, um sofortige Liquidität zu erhalten. Dies kann für ESCOs vorteilhaft sein, da es ihnen ermöglicht, Projekte ohne langfristige Kapitalbindung zu realisieren. Fonds wie SUSI oder Solas Capital unterstützen solche Ansätze und bieten spezialisierte Finanzierungslösungen für erneuerbare Wärmeprojekte.

Rolle der politischen Förderung

Politische Unterstützung ist ein Schlüsselfaktor für die Verbreitung von SHIP-Technologien. Förderprogramme wie CAPEX-Subventionen, Steueranreize oder der EU-Innovationsfonds können den Markteintritt erleichtern und die Kostenbelastung für Unternehmen reduzieren. Da diese Programme oft zeitlich begrenzt und stark von politischen Entscheidungen abhängig sind, ist es für Unternehmen wichtig, die jeweils aktuellen Fördermöglichkeiten zu prüfen und zu nutzen.

Zusammenfassung

Die Finanzierung von Solarthermieranlagen ist aufgrund der begrenzten Marktverfügbarkeit für Wärme und des erhöhten Kreditrisikos anspruchsvoller als bei Wind- oder PV-Projekten. Sie erfordert maßgeschneiderte Ansätze wie Projektfinanzierungen, Green Bonds oder Forfaiting. Politische

Fördermaßnahmen spielen eine zentrale Rolle, um diese Herausforderungen zu bewältigen und die Akzeptanz der Technologie zu erhöhen. Trotz der Hürden bieten SHIP-Anlagen in Kombination mit innovativen Finanzierungsmodellen und gezielten Fördermaßnahmen vielversprechende Chancen für die Energiewende im Industriesektor.

5.6 Publikationen

5.6.1 Task-Ergebnisse

Als Highlights sind Publikationen hervorzuheben, in denen das österreichische Konsortium mit relevanten Beiträgen beteiligt war:

Deliverables zu Subtask A: fasst eine standardisierte Methode zusammen, mit dem abhängig von Standort und Branche ein Lastprofil für Industriebetriebe erstellt werden kann. Dies wurde von Uni Kassel leitend mit Input von AEE INTEC entwickelt. Die Ergebnisse wurden auch breit disseminiert.

- „Reference applications for renewable heat“¹⁰
- „Integration Concepts and Design Guidelines“¹¹

Deliverable zu Subtask B: Modulation

- „Integration schemes and BOPs more commonly used in commercial SHIP applications“¹²

Deliverable zu Subtask C: Aufgrund der Schnittstellen zu Subtask A und Subtask E wurde auch hier ein Beitrag geliefert.

- „Guideline for Yield Assessment in SHIP Plants“¹³

Deliverables zu Subtask E: Dieser Subtask hat die Financing-Seite und die Guidline to market sowie das Position Paper herausgebracht

- “Collection of available solar process heat related national and transnational research and funding programs”¹⁴
- „Update on SHIP Technology Costs & SHIP Business and Financing Models” wurde federführend von AEE INTEC mit Fraunhofer ISE und mit starker Mitarbeit von JKU und REENAG er-

¹⁰ https://task64.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/210416_Task64_SubtaskA_D1-1.pdf

¹¹ <https://task64.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/IEA-SHC-Task64-SubtaskA-D2-D3.pdf>

¹² <https://task64.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/IEA-SHC-Task64-SubtaskB-DB1.pdf>

¹³ <https://task64.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/IEA-SHC-Task64-SubtaskC-D1-STC.pdf>

¹⁴ <https://task64.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/IEA-SHC-Task64-SolarPACES-TaskIV-D.E1--Collection-of-solar-process-heat-related-research-and-funding-programs.pdf>

stellt. Es fasst die Guideline2Market Ansätze zusammen und gibt einen Überblick zu aktuellen Kosten, zukünftige Trends und beschreibt zum einen die Geschäftsmodelle, aber auch die Finanzierungsmodelle für SHIP¹⁵

- “SHIP - Solar Heat for Industrial Processes – Technology Position Paper” wurde unter Leitung von AEE INTEC erstellt und in einem intensiven Stakeholder-Prozess mit Task-Teilnehmer:innen entwickelt. Das Position Paper wurden bspw. beim Symposium Solarthermie in Bad Staffelstein 2023 präsentiert und ein eigener Thementisch dazu gemeinsam mit der Uni Kassel geleitet.¹⁶

5.6.2 Disseminierung der Projektergebnisse

Neben den oben angeführten Deliverables wurden die Ergebnisse über eine Reihe von Präsentationen, Poster, Fachartikel und Vorträgen disseminiert. Tabelle 5-7 gibt eine Übersicht über alle Publikationen. Sämtliche angeführten Unterlagen liegen in D5.1 ‘Sammlung von nationalen Beiträgen in Fachzeitschriften’ sowie Deliverable D5.2 ‘Sammlung von Fachvorträgen/Publikationen’ vor.

Tabelle 5-7: Disseminierung von Projektergebnissen

ID	Medium	Art	Titel	Haupt-Autor:in
1	Symposium Solarthermie 2021:	Ko-Vortrag	Standardisierte Wärmelastprofile für Industrie & GHD – erste Ergebnisse aus dem IEA SHC Task 64/IV Subtask A	Felix Pag & Jürgen Fluch
2	Symposium Solarthermie 2022:	Vortrag, Konferenz-Paper	Standardisierte wirtschaftliche Bewertungskriterien solarer Prozesswärme in hybriden Systemen – Ergebnisse aus dem IEA SHC Task 64 Subtask E	Jürgen Fluch
3	ISEC 2022:	Poster, Vortrag, Konferenz-Paper	Innovative standardised evaluation criteria of solar process heat	Jürgen Fluch
4	EuroSun 2022:	Vortrag, Konferenz-Paper	Standardized Economic Evaluation Criteria of Solar Process Heat in Hybrid Systems – Results from IEA SHC Task 64 Subtask E	Jürgen Fluch

¹⁵ <https://task64.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/IEA-SHC-Task64-SubtaskE-D.E2-D.E3.pdf>

¹⁶ <https://task64.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/IEA-SHC-Task64-Technology-Position-Paper-SHIP-2024-01.pdf>

5	Symposium Solarthemie 2023:	Vortrag, Konferenz-Paper	Solare Prozesswärme als Schlüsseltechnologie der industriellen Dekarbonisierung – Positionspapier IEA SHC Task 64	Wolfgang Gruber-Glatzl
6	SHC Academy, November 2022	Vortrag (Webinar)	SHIP – successful plants worldwide ¹⁷	Wolfgang Gruber-Glatzl
7	Nachhaltige Technologien Q2/2022	Artikel Fachzeitschrift	Solare Prozesswärme – Kriterien für den Vergleich erneuerbarer Technologien ¹⁸	Jana Fuchsberger
8	Nachhaltige Technologien Q4/2023	Artikel Fachzeitschrift	Neuer Auftrieb für Solare Prozesswärme ¹⁹	Wolfgang Gruber-Glatzl
9	AustriaSolar Workshop 27. Juni 2023	Nationaler Workshop	Workshop: Solare Prozesswärme für Wäschereien und Großküchen	Christoph Brunner
10	AustriaSolar Webinar 12. Okt. 2023	Nationales Webinar	Solarwärme in Wäschereien ²⁰	Christoph Brunner
11	AustriaSolar Workshop 25. Okt. 2023	Nationaler Workshop	Solare Eigenversorgung von Industriebetrieben	Wolfgang Gruber-Glatzl
12	IEA Task 64 – Subtask E	Internationales Webinar	Financing Solutions for Solar Heat in Industrial Processes (SHIP) Projects	Winfried Braumann, Wolfgang Gruber-Glatzl, Peter Nitz

¹⁷ <https://www.iea-shc.org/solar-academy/webinar/solar-process-heat>

¹⁸ <https://www.aee-intec.at/zeitung/nachhaltige-technologien-2-2022/26/>

¹⁹ <https://www.aee-intec.at/zeitung/nachhaltige-technologien-4-2023/26/>

²⁰ <https://www.solarwaerme.at/wp-content/uploads/2023/11/Praesentation-gesamt-Webinar-35-Waeschereien.pdf>

6 Vernetzung und Ergebnistransfer

Die Zielgruppen des Projekts waren die Solarindustrie in Österreich, produzierende Betriebe, Akteur:innen in der Projektfinanzierung, Contractoren und Banken. Zudem war der wissenschaftliche Austausch auf nationaler und internationaler Ebene wichtig, um die Weiterentwicklung von Technologie und Systemdesign zu verbessern.

Die Solarindustrie wurde durch nationale Workshops und Webinare sowie gemeinsame Veranstaltungen adressiert. Bei den drei Teilnahmen am Symposium Solarthermie in Bad Staffelstein beteiligten sich viele österreichische Solarunternehmen, da es für den D-A-CH-Raum ein wichtiges Austauschforum ist.

Der Austausch mit Akteur:innen des Finanzierungssektors erfolgte stark auf internationaler Ebene, da Österreich hier die Subtask-Leitung stellte. Hervorzuheben ist das internationale Webinar „Financing Solutions for Solar Heat in Industrial Processes (SHIP) Projects“, bei dem nationale Stakeholder teilnahmen.

Durch die Teilnahme am internationalen Task hat Österreich einen hohen Nutzen. Als jährlicher Verfasser der Weltstatistik für Solarthermie (*Solar Heat Worldwide*) und Betreiber der SHIP-Datenbank ist Österreich mit AEE INTEC stark vertreten. Die Entwicklung und vom SHC ExCo genehmigte Festlegung des Umrechnungsfaktors von 0,7 kWth/m² für alle Kollektortypen vereinfacht die Kommunikation der Technologie in der Einheit Leistung statt Fläche.

Relevanz haben Bemühungen zur Modularisierung und Standardisierung von Systemdesigns sowie die Bewertung relevanter Parameter in der Systemsimulation. Hier profitiert man von den Arbeiten internationaler Partner mit Beiträgen der österreichischen Partner.

Die Arbeiten in Subtask A dienen als Grundlage für zukünftige Anpassungen in Auslegungsrichtlinien wie der VDI 3988 zum Design von SHIP-Anlagen. Bei der Kombination von Solarthermie und Wärmepumpen wurden Grundlagen für neue Design-Richtlinien entwickelt, die weiter konkretisiert werden sollten, um Planer:innen und Ingenieur:innen klarere Vorgaben zu bieten.

Die Guideline-to-Market fasst zusammen, welche nicht-technologischen Aspekte für eine Marktstärkung wichtig sind, etwa die Stärkung von Wärmeversorgungsmodellen mit Energiedienstleistungen, um die CAPEX-Last und Risiken von Kund:innen zu senken.

Obwohl SHIP eine ausgereifte Technologie ist, sind weitere Forschungsarbeiten zu Speichertechnologien >150 °C, zur Kombination mit Wärmepumpen (integrierte Energiesysteme) sowie zu Standardisierung und Modularisierung wichtig für zukünftige FTI-Projekte.

7 Schlussfolgerungen, Ausblick und Empfehlungen

Die Projektergebnisse wurden von den internationalen und nationalen Projektteams intensiv im Rahmen des von AEE INTEC geleiteten Subtask E als Guideline-To-Market diskutiert. Als wesentliche Synthese aus diesem Prozess kann man das Technology Position Paper verstehen, in dem Action Items verfasst wurden. Daraus abgeleitet soll diese für den österreichischen Kontext zusammengefasst werden:

Herausforderung	Erforderliche Maßnahmen	Adressaten
Wirtschaftlicher Rahmen	SHIP (Solar Heat for Industrial Processes) stellt eine langfristige Investition dar, die häufig mit den eher kurzfristigen Planungszyklen der Industrie kollidiert. Daher sind geeignete Unterstützungsmechanismen der nationalen Regierungen notwendig: • Klare, langfristige Zielvorgaben für Emissionsreduktion, fossile Brennstoffe oder erneuerbare Wärme in der Industrie. • Etablierung signifikanter CO₂-Preise. • Strategische Investitionszuschüsse (CAPEX) für SHIP zur Förderung von Lernkurveneffekten. • Öffentliche oder private Garantiesysteme zur Risikominderung bei ESCO-Modellen und zur Senkung der Kapitalkosten bis zur Marktreife. • Unterstützung detaillierter Machbarkeitsstudien im MW-Maßstab (bewährte Praxis in Österreich).	Politik, Entscheidungsträger:innen
Öffentliches Bewusstsein	Mehr Bewusstsein für die Rolle von SHIP als CO ₂ -freie, zuverlässige Wärmequelle mit kalkulierbaren Kosten, unabhängig von Energiemärkten und mit hohem lokalem Mehrwert schaffen. Kontinuierliche Information von Unternehmen, Industrieverbänden und politischen Entscheidungsträger:innen. Zusammenarbeit mit etablierten Anlagenbauunternehmen , um SHIP in deren Standardportfolio zu integrieren. Integration von SHIP als State-Of-The-Art-Technologie in Dekarbonisierungsstudien, Publikationen und politische Diskussionen in Österreich.	SHIP-Industrie, F&E, Anlagenbauunternehmen
Kapazitätsaufbau	Bessere und spezifische Schulung von Energiemanager:innen, Ingenieur:innen, Projektentwickler:innen und Installateur:innen zur Förderung eines starken Marktwachstums, insbesondere in aufstrebenden Märkten. Stärkung der österreichischen Trainings-Expertise.	SHIP-Industrie, F&E

	Ausbau von Kooperationen mit österreichischen Anlagenbauunternehmen.	
Planungstools	Planungstools für solarthermische Systeme existieren bereits, jedoch müssen kommerzielle Softwarelösungen für hybride SHIP-Systeme (Wärmepumpen, Solarthermie, konzentrierende Kollektoren, Dampfsysteme und deren Integration in industrielle Prozesse) gefördert werden. Tools müssen mit Betriebsdaten validiert werden. Verpflichtende Erfassung von Performance-Daten würde Risiken reduzieren.	SHIP-Industrie, F&E
Modularität und Standardisierung	Entwicklung standardisierter Plug-and-Play-Lösungen für SHIP, die einfach zu integrieren und mit anderen Technologien kombinierbar sind.	SHIP-Industrie, F&E
Lösungen für hybride Wärmesysteme	Solarkollektoren lassen sich mit anderen Technologien kombinieren, jedoch fehlen detaillierte Designrichtlinien. Die Ergebnisse von Subtask A und aus CORES können als Grundlage für offizielle Designrichtlinien dienen und in Normen und Richtlinien einfließen	SHIP-Industrie, F&E, Normung
Qualitätsinfrastruktur	Entwicklung einfacher Fehlermeldesysteme. Wissenschaftliches Monitoring geförderter Großanlagen und Wissenstransfer der gesammelten Erkenntnisse.	Solarunternehmen, F&E, Politik
Kostenreduktion	Nutzung von Skalierungseffekten und Lernkurven durch großflächige Implementierungen ("Think BIG"). Kontinuierliche Unterstützung angewandter Forschung zur weiteren Kostensenkung.	Solarunternehmen, F&E, Politik, Förderstellen

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1: Verwendete Simulationstools (vgl. (Miguel Cardemil et al., 2023))	14
Tabelle 5-1: Äquivalenz zwischen den in Abbildung 5-12 dargestellten Integrationsmaßnahmen und den definierten Maßnahmen vgl. (Muster et al., 2015)	33
Tabelle 5-2: Zahl der kommerziellen Projekte in www.ship-plants.info die das gleiche Integrationsschema anwenden (Gesamtzahl der analysierten Projekte: 325) vgl. (Zarza et al., 2022).	34
Tabelle 5-3: Arten von Sonnenkollektoren und Anzahl der Projekte, bei denen sie eingesetzt werden vgl. (Zarza et al., 2022).	34
Tabelle 5-4: Wichtige technische Parameter für BOPs mit Direktdampferzeugung vgl. (Zarza et al., 2022).	37
Tabelle 5-5: Eingesetzte Tools in der jeweiligen Fallstudie.....	39
Tabelle 5-6: Vergleich der Formel zur Berechnung der LCOH für solarthermische Anlagen	50
Tabelle 5-7: Disseminierung von Projektergebnissen	60

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1 SHIP – Anlagen Wachstum 2017 – 2023.....	9
Abbildung 5-1: Ergebnisse des K-Means-Clusterings für den Gasverbrauch an Werktagen. (Vgl. (Pag et al., 2021))	21
Abbildung 5-2: Ergebnisse des K-Means-Clusterings für Wochenenden und Feiertage. (Vgl. (Pag et al., 2021)).....	22
Abbildung 5-3: Definition von drei Referenzstandorten durch Analyse die Saisonalität der Umgebungstemperatur und der globalen horizontalen Einstrahlung.....	24
Abbildung 5-4: Hydraulikkonzept ENPRO (vgl. (Grubbauer et al., 2018)).....	25
Abbildung 5-5: q_{col} als Funktion der Position und des t_{flows} (vgl. (Jesper and Pag, 2024)).....	26
Abbildung 5-6: Spezifischer Solarertrag in Abhängigkeit vom Anteil des Solarspeichers, der von den anderen Wärmeerzeugern geladen wird für verschiedene Wärmelastcluster. (Jesper and Pag, 2024)	27
Abbildung 5-7: Solaranteil in % für jedes Unternehmen in Abhängigkeit vom Verhältnis der Dachfläche und der erforderlichen Kollektorfläche nach VDI 3988; jeder Marker steht für ein Unternehmen; Cluster 0: keine Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur, Cluster 3: starke Außentemperaturabhängigkeit des Lastprofils (a) Verfügbarkeit von Dachflächen wird nicht berücksichtigt, (b) realistische Nutzung der verfügbaren Dachfläche mit Solarkollektoren (Pag et al., 2022)	28
Abbildung 5-8: f_{sol} in Abhängigkeit vom Standort und dem Lastprofiltyp (wd cluster). (Pag et al., 2022)	29
Abbildung 5-9: Veränderung des solaren Anteils gegenüber der Referenzausführung in Abhängigkeit von der Kollektorfeldgröße (st Kollektor; Bern; 0 % entspricht einer Dimensionierung nach der Richtlinie VDI 3988) (Pag et al., 2022).....	30
Abbildung 5-10: Veränderung des solaren Deckungsanteils im Vergleich zum Referenzdesign in Abhängigkeit von der Kollektorfeldgröße (st Kollektor; Casablanca; 0 % entspricht einer Dimensionierung nach der Richtlinie VDI 3988) (Pag et al., 2022)	30
Abbildung 5-11: Veränderung des solaren Anteils gegenüber der Referenzausführung in Abhängigkeit von der Kollektorfeldgröße (st Kollektor; Bangkok; 0 % entspricht einer Dimensionierung nach der Richtlinie VDI 3988) (Pag et al., 2022)	31
Abbildung 5-12: Verschiedene Integrationsmodelle, die in der Datenbank www.ship-plants.info berücksichtigt sind.	33
Abbildung 5-13: Unterschiedliche Kombinationen von Prozessmedien und Solarfeldarbeitsmedium werden für die Analyse generischer BOP-Konfigurationen berücksichtigt vgl. (Zarza et al., 2022). 35	
Abbildung 5-14: Von SOLATOM vorgeschlagenes Integrationsprogramm vgl. (Zarza et al., 2022).. 36	
Abbildung 5-15: Container-Lösung für das von SOLATOM entwickelte Integrationskonzept – dargestellt in Abbildung 5-14 vgl. (Zarza et al., 2022).....	37
Abbildung 5-16: Systemdiagramm der Fallstudie A, Flachkollektoren zur Warmwasserversorgung eines Kupferabbauprozesses vgl. (Miguel Cardemil et al., 2023).	40

Abbildung 5-17: Systemdiagramm der Fallstudie B, 1-Achsen-Nachführung von Flachkollektoren zur Warmwasserversorgung eines Papierfabrikprozesses vgl. (Miguel Cardemil et al., 2023).	41
Abbildung 5-18: Systemdiagramm der Fallstudie C, linearer Fresnel-Kollektor (LFR) für die direkte Dampferzeugung vgl. (Miguel Cardemil et al., 2023).	42
Abbildung 5-19: Systemdiagramm der Fallstudie D, Parabolrinnenkollektoren zur Warmwasserversorgung eines Molkereiprozesses vgl. (Miguel Cardemil et al., 2023).	43
Abbildung 5-20: Überblick über das CORES – Potentialtool	46
Abbildung 5-21: Einfluss der Skalierungseffekte auf die Kosten (Solar Payback/IRENA, 2022)	52
Abbildung 5-22: Kostenverläufe Solarthermie für Österreich, Deutschland und Mexico (IRENA, 2021)	53
Abbildung 5-23: Bewertung kohlenstoffarmer Technologien für die industrielle Wärmewende, Stand Juli 2022 (Quelle: DCSP)	54
Abbildung 5-24: Visualisierung des Verkaufs einer Solarthermieranlage	56
Abbildung 5-25: Visualisierung des ESCO-Modells	57

10 Literaturverzeichnis

- Grubbauer, A., Fluch, Jürgen, Brunner Christoph, Ramschak Thomas, Wilk, Veronika, Fleckl, Thomas, 2018. Renewable and highly efficient energy systems through innovative combination of solar thermal and heat pump systems. Chem. Eng. Trans. 70, 745–750.
<https://doi.org/10.3303/CET1870125>
- IEA SHC, 2023. Calculation method for the conversion of aperture area into thermal power for tracked concentrating solar thermal systems for statistical purposes.
- IEA SHC, 2004. Recommendation: Converting solar thermal collector area into installed capacity (m² to kW_{th}).
- IRENA, 2021. Renewable Power Generation Costs in 2020, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. https://www.solrico.com/fileadmin/solrico/media/cost_assessment/IRENA_Renewable_Heat_Generation_Costs_2010_to_2020.pdf
- ISO, 2022. ISO 9488:2022(en) Solar energy — Vocabulary.
- Jesper, M., Pag, F., 2024. Integration Concepts and Design Guidelines. IEA SHC Task 64.
<https://doi.org/10.18777/ieashc-task64-2024-0002>
- Miguel Cardemil, J., Pino, A., Starke, A., Calderón-Vásquez, I., Wolde, I., Felbol, C., F.L Lemos, L., Bonini, V., Arias, I., Sarmiento, C., Iñigo-Labairu, J., Dersch, J., 2023. Guideline for Yield Assessment in SHIP Plants. IEA SHC Task 64. <https://doi.org/10.18777/ieashc-task64-2023-0001>
- Muster, B., Hassine, I., Helmke, A., Heß, S., Krummenacher, P., Schmitt, B., Schnitzer, H., 2015. „Integration Guideline“. IEA Task 49. https://task49.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/150218_IEA%20Task%2049_D_B2_Integration_Guideline-final1.pdf
- Pag, F., Jesper, M., Jordan, U., Gruber-Glatzl, W., Fluch, J., 2021. Reference applications for renewable heat. IEA SHC Task 64. <https://doi.org/10.18777/ieashc-task64-2021-0002>
- Pag, F., Jesper, M., Kusyy, O., Vajen, K., Jordan, U., 2022. Solar fractions of SHIP plants considering the availability of roof area based on OpenStreetMap data. Sol. Energy Adv. 2, 100017.
<https://doi.org/10.1016/j.seja.2022.100017>
- Platzer, W., 2015. Potential studies on solar process heat worldwide. IEA SHC Task 49.
- Solar Payback/IRENA, 2022. Cost Trends of Solar Energy for Heat in Industry: Economies of scale drive down SHIP costs in Europe. <https://www.solrico.com/index.php?id=23>
- Zarza, E., Alarcón, D., Frassetto, M., Saini, P., 2022. Integration schemes and BOPs more commonly used in commercial SHIP applications. IEA SHC Task 64. <https://doi.org/10.18777/ieashc-task64-2022-0001>

