

Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V.

Postfach 10 48 42

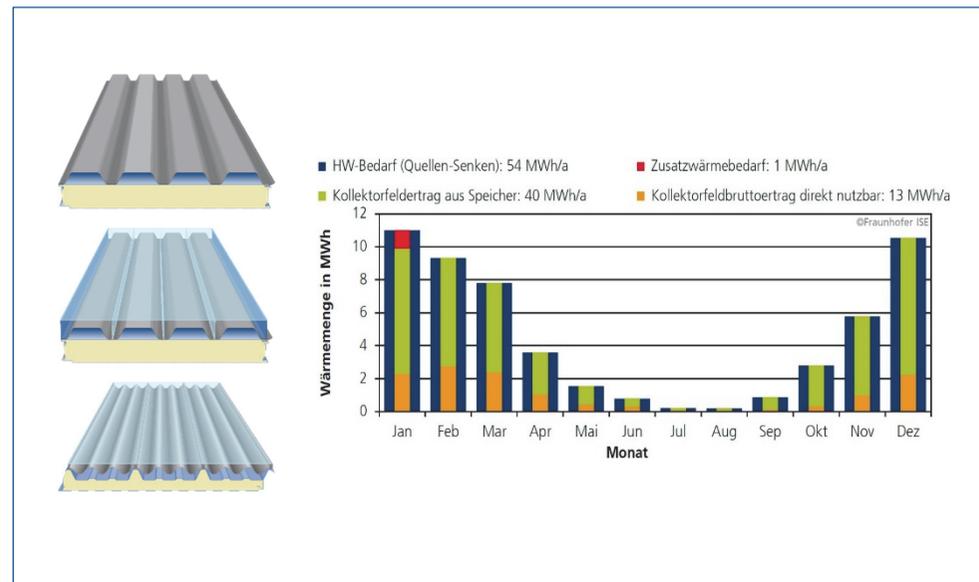
40039 Düsseldorf

Sohnstr. 65

40237 Düsseldorf

fosta@stahlforschung.de

www.stahlforschung.de



Optimierung des Wirkungsprinzips und der Energienutzung zur Sandwichbauweise mit Energie-Akkumulation, Energieverteilung und Dämmung

Optimisation of the operating principle and the use of energy in sandwich construction with energy accumulation, energy distribution and insulation

Forschung für die Praxis P 1041

Forschungsvorhaben P 1041 / S 024 10212/14

Optimierung des Wirkungsprinzips und der Energienutzung zur Sandwichbauweise mit Energie-Akkumulation, Energieverteilung und Dämmung

Optimisation of the operating principle and the use of energy in sandwich construction with energy accumulation, energy distribution and insulation

Fraunhofer-Gesellschaft e.V.

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE

Dr. Michael Hermann,

Timo Altan, Frederik Böhm, Sofia Camarena Covarrubias, Paolo Di Lauro, Stefan Fortuin, Muhammad Haris, Dr. Korbinian Kramer, Manuel Lämmle, Axel Oliva, Max Reinhardt, Christoph Thoma, Christian Welz

Engineering Rolf Koschade

Rolf Koschade (†),

Gabriele Deisenroth-Bröcker, Donald Greiner, Klaus Pilsner

Verantwortlich für die FOSTA – Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V.
Dr. Gregor Nüsse M.Sc.

Das Forschungsvorhaben wurde vom Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE und von Engineering Rolf Koschade mit fachlicher Begleitung und mit finanzieller Förderung durch die Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V., Düsseldorf, aus Mitteln der Stiftung Stahlanwendungsforschung, Essen, durchgeführt.

Beteiligte Unternehmen:

ArcelorMittal Construction Deutschland GmbH
BASF Polyurethanes GmbH
Covestro Deutschland AG
Dow Deutschland GmbH & Co. OHG
Facade-Lab GmbH
GKK+ Architekten BDA Gesellschaft von Architekten mbH
Hennecke GmbH Polyurethanes Technology
Hermann Otto GmbH
Hoesch Bausysteme GmbH
IFBS - Internationaler Verband für den Metalleichtbau
IPJ Ingenieurbüro P. Jung GmbH
iS-engineering GmbH
KKT Innovations GmbH & Co. KG
OCAS N.V.
Reisser-Schraubentechnik GmbH
thyssenkrupp Steel Europe AG
voestalpine Stahl GmbH

© 2020 Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V., Düsseldorf

Bestell-Nr. P 1041
ISBN 978-3-946885-70-2

Ansprechpartner bei der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V.:
Dr. Gregor Nüsse M.Sc.
Tel.: +49 (0)211 / 6707-856

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch die der Übersetzung in andere Sprachen, bleiben vorbehalten. Ohne schriftliche Genehmigung des Verlages sind Vervielfältigungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen nicht gestattet.

Kurzdarstellung

Industriell gefertigte Sandwichelemente mit zusätzlichen Stahltrapezblechen auf der Außenseite, wurden im FOSTA Projekt P 779 zum sogenannten SEA-Luftkollektor miteinander verbunden (SEA = Sandwich-Energie-Akkumulation). Aufgrund des Querschnitts der Stahltrapezbleche, entstehen bei der Zusammenführung der Einzelbauteile an der Außenseite Kanäle, durch die Luft strömen kann. Bei Sonneneinstrahlung an der Südfassade und an der Dachfläche, kann der SEA-Luftkollektor einen jährlichen Energieertrag von ca. 160 kWh/m² in Form von erwärmter Luft erbringen.

Im Rahmen des vorliegenden Projektes wurde untersucht, in wieweit eine weitere Verbesserung des Energieertrags dieses Kollektors durch die Optimierung physikalischer und konstruktiver Parameter erfolgen kann. Um die einzelnen Optimierungsaspekte zu untersuchen, wurde ein Forschungsansatz aus Messung, Simulation und Berechnung gewählt. So konnte in Labormessungen der positive Einfluss einer transparenten Abdeckung in Form einer Polycarbonat-Massivplatte auf die Effizienz und das Temperaturniveau des SEA-Kollektors quantifiziert werden. Ebenfalls bewährte sich eine Änderung der Profilgeometrie des Absorbers sowie eine Anpassung verschiedener konstruktiver Aspekte zur Erhöhung der Wärmeübertragung. Letztendlich ergab sich dadurch ein ästhetisch ansprechender Kollektor, bei dem sämtliche Varianten weiterhin dem Prinzip, dass ausschließlich Komponenten verwendet werden, die als Einzelbauteil am Markt erhältlich sind, genügen.

Mittels der Labormessungen wurde für die untersuchten Kollektoren die Massenstromabhängigkeit präzise geklärt und Wirkungsgradkennlinien für drei SEA-Kollektorvarianten generiert. Über die begleitende Simulation und Berechnung, wurde dargelegt, in welcher Spanne die optimale Luftkanalhöhen für flache oder trapezförmige Absorber liegen, wie sich der Einstrahlwinkel, verschiedene Absorptionsgrade und die Kollektorlängen auf die Effizienz und das Temperaturniveau der Kollektoren auswirken.

Anhand einer Musterhalle wurde abschließend in einer stundenweise aufgelösten Jahresbetrachtung mit Referenzwetterdaten gezeigt, welchen Beitrag die Kollektoren für die Energienutzungskonzepte Heizen und Kühlen unter Verwendung verschiedener Systemvarianten von Sekundärenergieerzeugern sowie der Einbindung eines Energiespeichers leisten kann. So zeigte sich im Hinblick auf das Kühlen, dass bereits ohne Energiespeicher von der Möglichkeit einer vollsolaren Deckung ausgegangen werden kann. Bei der Energienutzung des Heizens erscheint dies jedoch nur unter Einbindung eines Energiespeichers möglich.

FOSTA – Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V.

März 2020

Abstract

Industrially manufactured sandwich elements with additional trapezoidal steel sheets on the outside were connected together in the FOSTA project P 779 to form the so-called SEA air collector (SEA = Sandwich Energy Accumulation). Due to the cross-section of the trapezoidal steel sheets, channels are created on the outside when the individual components are joined together, through which air can flow. When the sun shines on the south facade and the roof surface, the SEA air collector can produce an annual energy yield of approx. 160 kWh/m² in the form of heated air.

Within the scope of the present project, it was investigated how a further improvement of the energy yield of this collector can be achieved by optimizing physical and design parameters. In order to investigate the individual optimization aspects, a research approach consisting of measurement, simulation and calculation was chosen. In laboratory measurements, the positive influence of a transparent cover in the form of a solid polycarbonate plate on the efficiency and temperature level of the SEA collector could be quantified. A change in the profile geometry of the absorber as well as an adaptation of various design aspects to increase heat transfer also proved successful. Ultimately, this resulted in an aesthetically pleasing collector in which all variants continue to comply with the principle that only components that are available on the market as individual components are used.

By means of laboratory measurements, the mass flow dependence of the investigated collectors was precisely clarified and efficiency curves for three SEA collector variants were generated. The accompanying simulation and calculation showed the range of optimum air duct heights for flat or trapezoidal absorbers, the effect of the angle of incidence, different absorption coefficients and collector lengths on the efficiency and temperature level of the collectors.

Using a model hall, the contribution that collectors can make to the energy utilisation concepts for heating and cooling by using different system variants of secondary energy generators and the integration of an energy storage system was shown in a yearly analysis with reference weather data, resolved by the hour. With regard to cooling, it was shown that the possibility of full solar coverage can be assumed even without energy storage. With regard to the energy use of heating, however, this appears to be possible only with the integration of an energy storage system.

FOSTA - Research Association for Steel Application

March 2020

Inhaltsverzeichnis Content

1	Einleitung	
	Introduction	1
1.1	Problemstellung	
	Scientific question	1
1.2	Motivation	
	Motivation	3
1.3	Zielsetzung	
	Objective	3
2	Ausgangssituation nach FOSTA-Projekt P779 "SEA1"	
	Initial situation after FOSTA project P779 "SEA1"	5
2.1	Marktbedeutung	
	Market significance.....	5
2.2	Funktionsweise des SEA-Kollektors und Energieertrag	
	SEA collector: Principle of operation and energy yield	8
2.2.1	Klimatische Rahmenbedingungen	
	Climatic framework.....	9
2.2.2	FOSTA-Forschungsprojekt P 779 (SEA1): Messzelle und Messungen	
	FOSTA research project P779 (SEA1): Measuring cell and	
	measurements	11
2.2.3	FOSTA-Forschungsprojekt P779 (SEA1): Ergebnisse und Energieertrag	
	FOSTA research Project P779 (SEA1): Results and energy yields	13
2.3	Verbesserungspotential des SEA-Prinzips	
	Potentials for improving the SEA principle.....	15
2.4	Energienutzungskonzepte und SEA-Optimierung	
	Energy utilisation concepts and the optimisation of SEA.....	17
3	Optimierungspotentiale von SEA	
	Optimisation potentials of SEA	19
3.1	Grundlagen von Solarkollektoren und Besonderheiten von Solarluftkollektoren	
	Basics on solar collectors and characteristics of solar air collectors	19
3.2	Übersicht der Optimierungspotentiale von SEA	
	Overview on the optimization potentials of SEA	28
3.3	Erläuterungen zu den einzelnen Optimierungspotentialen	
	Describing the individual optimisation potentials	30
3.3.1	Einfluss einer transparenten Abdeckung	
	Effect of a transparent covering	30
3.3.2	Einfluss konstruktiver Merkmale und der Profilgeometrie	
	Effect of constructive characteristics and the profile geometry.....	32

3.3.3	Einfluss von Farbe und Beschichtung Effect of colour and coating	34
3.3.4	Einfluss des Massenstroms Influence of the mass flow	35
3.3.5	Einfluss der Kollektormodullänge Influence of the collector module length	37
4	Methodik zur Bestimmung der Optimierungspotentiale Methodology for determining optimisation potentials	40
4.1	Grundlegende Überlegungen Fundamental considerations.....	40
4.2	Zielsetzungen der Berechnungen und Simulationen Objectives of Calculations and Simulations	41
4.3	Zielsetzungen der Messungen Objectives of measurements	47
5	Durchführung der Messungen und ihre Ergebnisse Execution of measurements and their results	49
5.1	Überblick zu den Messungen Overview on the measurements	50
5.2	Bau, Vermessung und Ergebnisse des Kollektors SEA 2.1 Construction, measurement and results of collector SEA 2.1	52
5.2.1	Zielsetzung der Vermessung des Kollektors SEA 2.1 Objectives of measuring collector SEA 2.1	52
5.2.2	Bau des Kollektors SEA 2.1 Construction of collector SEA 2.1	53
5.2.3	Leistungsmessung des Kollektors SEA 2.1 Performance measurement of collector SEA 2.1	56
5.3	Bau, Vermessung und Ergebnisse des Kollektors SEA 2.2 Construction, measurement and results of collector SEA 2.2	61
5.3.1	Zielsetzung der Vermessung des Kollektors SEA 2.2 Objectives of measuring collector SEA 2.2.....	61
5.3.2	Bau des Kollektors SEA 2.2 Construction of collector SEA 2.2	62
5.3.3	Leistungsmessung des Kollektors SEA 2.2 Performance measurement of collector SEA 2.2.....	64
5.4	Bau und Vermessung des Kollektors SEA 2.3 Construction, measurement and results of collector SEA 2.3.....	67
5.4.1	Zielsetzung der Vermessung des Kollektors SEA 2.3 Objectives of measuring collector SEA 2.3.....	67
5.4.2	Bau des Kollektors SEA 2.3 Construction of collector SEA 2.3	68

5.4.3 Leistungsmessung des Kollektors SEA 2.3 Performance measurement of collector SEA 2.3	72
5.5 Vergleich der Kollektorleistungen Comparison of the collector efficiencies	75
5.6 Stagnationsmessungen und Stagnationstemperaturen Stagnation measurements and stagnation temperatures	80
5.6.1 SEA 2.1	81
5.6.2 SEA 2.2	82
5.6.3 SEA 2.3	84
5.6.4 Ermittlung der in der Fassadenanwendung resultierenden Stagnationstemperaturen Determining stagnation temperatures for facade application of SEA	86
6 Berechnungen und Simulationen Calculations and Simulations.....	89
6.1 Voruntersuchungen Preliminary examinations	89
6.2 Simulationen und Berechnungen für SEA 2.1 und SEA 2.2 Simulations and calculations for SEA 2.1 and SEA 2.2.....	92
6.3 Kollektoren mit geringer Bauhöhe und flachen Absorbern Collectors with low profile and flat absorbers	102
6.3.1 Optimierung von Kanalhöhe und Massenstrom bei Variation typischer Randbedingungen Optimising air channel height and mass flow under the variation of typical boundary conditions	102
6.3.2 Vergleich der Strömungsquerschnitte des Trapezprofils mit analytisch optimierten flachen Strömungskanälen Comparing flow areas of the trapezoidal profile with analytically optimised flat flow channels	104
6.4 Vorsimulationen für SEA-Kollektor 2.3 Preliminary simulations for the SEA collector 2.3	105
6.5 SEA-Kollektor 2.3 ohne Abdeckung und mit anderen Farben SEA collector 2.3 without covering and different colours.....	109
6.6 Variation der Kollektorlänge Variation of the collector length	110
7 Systemsimulationen für Energienutzungskonzepte System simulations and case studies for energy use	114
7.1 Klimadaten und Standort Climate and locations	114
7.2 Berechnungstool ScenoCalc Calculation tool ScenoCalc.....	116
7.3 Weiterentwicklung ScenoCalc zu LuKoCalc Development of LuKoCalc from ScenoCalc	116

7.4	Die ECB-Industriehalle und Nutzungsprofil(e) nach DIN V 18599 The ECB industrial building and usage profile (DIN V 18599)	119
7.5	Energienutzungskonzepte Energy Utilisation Concepts and Case Studies.....	125
7.5.1	Nutzungskonzept Heizen Utilisation concept heating.....	125
7.5.2	Nutzungskonzept Kühlen Utilisation concept cooling	125
7.6	Ergebnisse der Systemsimulation Results of the system simulation	126
7.6.1	Einstrahlung auf die Hallenflächen Irradiation for the surface areas of the industrial building	126
7.6.2	Ergebnisse SEA 2.1 Results for SEA 2.1	130
7.6.3	Ergebnisse SEA 2.2 Results for SEA 2.2	155
7.6.4	Ergebnisse SEA 2.3 Results for SEA 2.3	164
7.7	Zusammenfassung Summary	172
7.7.1	Ergebnisse SEA 2.1.....	172
7.7.2	Ergebnisse SEA 2.2.....	173
7.7.3	Ergebnisse SEA 2.3.....	173
8	Sonstige Erkenntnisse im Forschungsprojekt Other findings during the research project	175
8.1	Wind und Kollektoreffizienz Wind and collector efficiency	175
8.2	Transparente Abdeckung und konstruktive Spannungen Transparent covering and constructional tensions.....	178
8.2.1	Polycarbonat-Abdeckung Polycarbonate covering	178
8.2.2	Wärmeausdehnung und konstruktive Spannungen Thermalexpansion and constructive tensions.....	178
8.3	Havariekonzept Damage prevention concept.....	179
8.4	Wartung Maintenance	181
8.5	Statik, Brandschutz und Entsorgung Statics, fire protection and disposal	182

8.5.1	Statik Statics	182
8.5.2	Brandschutz Fire protection	183
8.5.3	Entsorgung und Recycling Disposal and Recycling	183
8.6	Thermische Entlastung der Gebäudehülle Thermal relief of the building envelope.....	184
8.7	Architektonischer Gestaltungsspielraum Architectural design	186
9	Zusammenfassung Summary	188
10	Ausblick Perspective	192
11	Bemaßung der entworfenen und gemessenen SEA-Kollektoren 2.1, 2.2 und 2.3 Dimensions of the designed and measured SEA collectors 2.1, 2.2 and 2.3	193
12	Zusammenstellung aller Arbeiten, die im Zusammenhang mit dem Vorhaben veröffentlicht wurden oder in Kürze veröffentlicht werden sollen List of publications related to the project	196
13	Literaturverzeichnis Bibliography.....	197

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 2-1: HORIZONTALSCHNITT DURCH EIN SEA-ELEMENT, WIE ES IM SEA1-PROJEKT VERWENDET WURDE	9
ABBILDUNG 2-2: WIRKUNGSPRINZIP DES SEA-KOLLEKTORS.....	9
ABBILDUNG 2-3: GLOBALSTRAHLUNG IN DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND – MITTLERE JAHRESSUMMEN FÜR DEN ZEITRAUM VON 1981 - 2010; QUELLE: [DWD17A]	11
ABBILDUNG 2-4: SCHEMATISCHE SCHNITTZEICHNUNG DER SEA-MESSZELLE; QUELLE: [Fos14A]	12
ABBILDUNG 2-5 (LINKES BILD): FOTO DER SEA-MESSZELLE AUF DEM DACH DES FIW; ANSICHT SÜDSEITE; SEA-WANDKOLLEKTOR (RECHTS) MIT REFERENZ SANDWICHELEMENT (LINKS)...	13
ABBILDUNG 2-6 (RECHTES BILD): FOTO DER SEA-MESSZELLE; BLICK AUF DIE DACHFLÄCHE; SEA-DACHKOLLEKTOR (LINKS) MIT REFERENZ SANDWICHELEMENT (RECHTS).....	13
ABBILDUNG 2-7: EFFEKTIVE ENERGIEERTRÄGE DER SEA LUFTKOLLEKTOREN FÜR DACH UND WAND IN DER ZEITSPANNE VOM 01. JULI 2010 BIS 30. JUNI 2011; QUELLE: [Fos14A]	15
ABBILDUNG 3-1: WIRKUNGSGRADKENNLINIEN EINES ABGEDECKTEN (ROT) UND EINES UNABGEDECKTEN (BLAU) THERMISCHEN SOLARKOLLEKTORS	22
ABBILDUNG 3-2: LEISTUNGSKURVEN EINES ABGEDECKTEN (ROT) UND EINES UNABGEDECKTEN (BLAU) THERMISCHEN SOLARKOLLEKTORS FÜR ZWEI EINSTRAHLUNGSLEISTUNGEN	23
ABBILDUNG 3-3: BEISPIELHAFTE LEISTUNGSERMITTLUNG FÜR EINEN SOMMERFALL.....	24
ABBILDUNG 3-4: BEISPIELHAFTE LEISTUNGSERMITTLUNG FÜR EINEN WINTERFALL	25
ABBILDUNG 3-5: PRINZIPIELLE BAUARTEN VON LUFTKOLLEKTOREN	26
ABBILDUNG 3-6: WÄRMEÜBERTRAGUNG IN FLÜSSIGKEITS- UND LUFTKOLLEKTOREN.....	27
ABBILDUNG 3-7: ÜBERSICHT MÖGLICHER SEA-KONSTRUKTIONEN IM RAHMEN DER VORBEREITUNGEN ZUM FORSCHUNGSPROJEKT P1041 (SEA2); QUELLE: [Fos14B].....	28
ABBILDUNG 3-8: KOLLEKTOR AUF BASIS DER SEA1-KONFIGURATION OHNE UND MIT ABDECKUNG (LINKS, RESPEKTIVE RECHTS); DAS ARBEITSFLUID LUFT WIRD DURCH DIE LUFTKANÄLE ZWISCHEN ABSORBER (GRAU) UND DER ÄUßEREN METALLDECKSCHICHT DES SANDWICHELEMENTES (BLAU) GEFÜHRT	30
ABBILDUNG 3-9: EINFLUSS EINER TRANSPARENTEN ABDECKUNG AUF DIE WIRKUNGSGRADKENNLINIE	31
ABBILDUNG 3-10: EINFLUSS DES WÄRMEÜBERGANGS VOM ABSORBER ZUM FLUID AUF DIE WIRKUNGSGRADKENNLINIE	32
ABBILDUNG 3-11: ABHÄNGIGKEIT DER EFFEKTIVEN SOLAREN STRAHLUNG VOM EINSTRAHLUNGSWINKEL	33
ABBILDUNG 3-12: EINFLUSS DER ABSORBERFARBE AUF DIE WIRKUNGSGRADKENNLINIE	35
ABBILDUNG 3-13: WIRKUNGSGRADKENNLINIEN MIT MESSPUNKTEN EINES LUFTKOLLEKTORS FÜR DREI MASSENSTRÖME	36
ABBILDUNG 3-14: WIRKUNGSGRADKENNFELD DES LUFTKOLLEKTORS AUS ABBILDUNG 3-13	37
ABBILDUNG 3-15: WIRKUNGSGRAD NACH MASSENSTROM AUS SEA1-FORSCHUNGSPROJEKT FÜR VERSCHIEDENE KOLLEKTORLÄNGEN (2 M, 2,7 M UND 4,7 M)	38
ABBILDUNG 4-1: PHYSIKALISCHES MODELL ZUR ERMITTLUNG DER THERMISCHEN EFFIZIENZ EINES SOLARKOLLEKTORS	43
ABBILDUNG 4-2: MECHANISMEN DER WÄRMEÜBERTRAGUNG AN TRAPEZPROFILIEN	44

ABBILDUNG 4-3: ERMITTLUNG DES EFFIZIENTEN MASSENSTROMS AM MAXIMUM DER NETTOLEISTUNG.....	45
ABBILDUNG 4-4: BEISPIELHAFTE SCREENSHOTS DES EXCEL-TOOLS SCENOCALC	46
ABBILDUNG 5-1: KONFIGURATION DES TESTSTANDS FÜR GESCHLOSSENE LUFTKOLLEKTOREN AM FRAUNHOFER ISE	50
ABBILDUNG 5-2: INDOOR-SOLARSIMULATOR DES FRAUNHOFER ISE; QUELLE: FRAUNHOFER ISE INTRANET, FOTO UND PRESSEMATERIAL, 02/2008.....	51
ABBILDUNG 5-3: SCHEMA UND QUERSCHNITT DES SEA-KOLLEKTORS 2.1.....	53
ABBILDUNG 5-4: AUFBAU DES SEA-KOLLEKTORS 2.1 ALS CAD-SCHNITTZEICHNUNG	53
ABBILDUNG 5-5: QUERSCHNITT UND MAßE DES SEA-KOLLEKTORS 2.1 UND VON DESSEN LUFTKANÄLEN	54
ABBILDUNGEN 5-6: BAU VON SEA 2.1: GRUNDIEREN DES SANDWICHELEMENTS UND AUFSETZEN SOWIE VERKLEBEN DES ABSORBERS MIT DEM SANDWICHELEMENT	55
ABBILDUNGEN 5-7: BAU VON SEA 2.1: HERSTELLUNG UND ANPASSUNG DER LUFTANSCHLÜSSE	56
ABBILDUNG 5-8: SEA-KOLLEKTOR 2.1 IM SOLARSIMULATOR (TESTSTAND) DES FRAUNHOFER ISE	57
ABBILDUNG 5-9: GEMESSENEN WIRKUNGSGRADKENNLINIEN DES SEA-KOLLEKTORS 2.1 FÜR VERSCHIEDENE MASSENSTRÖME UND WINDGESCHWINDIGKEITEN.....	59
ABBILDUNG 5-10: SCHEMA UND QUERSCHNITT DES SEA-KOLLEKTORS 2.2.....	61
ABBILDUNG 5-11: SEITLICHE HOLZPROFILE, WELCHE DIE POLYCARBONAT-PLATTE TRAGEN.....	62
ABBILDUNG 5-12: SEA-KOLLEKTOR 2.2 MIT MONTIERTER POLYCARBONAT-PLATTE ÜBER DEM ABSORBER	63
ABBILDUNG 5-13: AUFBAU DES SEA-KOLLEKTORS 2.2 ALS CAD-SCHNITTZEICHNUNG	63
ABBILDUNG 5-14: SEA-KOLLEKTOR 2.2 IM SOLARSIMULATOR (TESTSTAND) DES FRAUNHOFER ISE	64
ABBILDUNG 5-15: GEMESSENE WKL DES SEA-KOLLEKTORS 2.1 (ROT) UND 2.2 (GELB) FÜR VERSCHIEDENE MASSENSTRÖME BEI EINER WINDGESCHWINDIGKEIT VON 3 M/S. DIE GRAUEN WKL SIND DIE DES SEA-KOLLEKTORS 2.1 BEI DEN WINDGESCHWINDIGKEITEN VON 1,5 UND 0,5 M/S UND DIENEN NUR ZUR BESSEREN VERGLEICHBARKEIT VON ABBILDUNG 5-9 MIT DEN ERGEBNISSEN VON DER MESSUNG DES KOLLEKTORS SEA 2.2.	65
ABBILDUNG 5-16: SCHEMA UND QUERSCHNITT DES SEA-KOLLEKTORS 2.3.....	68
ABBILDUNG 5-17: BAU VON SEA 2.3: LACKIEREN DES ABSORBERS MIT RAL 7016	69
ABBILDUNGEN 5-18: BAU VON SEA 2.3: SANDWICHELEMENT MIT 12 MONTIERTEN SOLARBEFESTIGERN UND EINGEBAUTEN TEMPERATURSENSOREN SOWIE NAHAUFNAHME DER BEFESTIGUNG DES ABSORBER-WELLENPROFILS MIT EINER GLOCKENDICHTUNG	69
ABBILDUNG 5-19: CAD-ZEICHNUNG DES SEA-KOLLEKTORS 2.3 MIT FOKUS AUF DIE VERBINDUNG ZWISCHEN SOLARBEFESTIGER, WELLPROFIL, GLOCKENDICHTUNGEN UND POLYCARBONAT-PLATTE	70
ABBILDUNG 5-20: CAD-ZEICHNUNG DES SEA-KOLLEKTORS 2.3 MIT ANSICHT DER SEITLICH AM KOLLEKTOR ANGEBRACHTEN WÄRMEDÄMMUNGEN UND DÄMMSTREIFEN, DIE AUCH ALS AUFLAGE FÜR DEN ABSORBER DIENEN	71
ABBILDUNGEN 5-21: KONSTRUKTION DES SEA-KOLLEKTORS 2.3.....	71
ABBILDUNG 5-22: SEA-KOLLEKTORS 2.3 IM SOLARSIMULATOR (TESTSTAND) DES FRAUNHOFER ISE	72
ABBILDUNG 5-23: DARSTELLUNG DER GEMESSENEN WKL DER DREI, IM RAHMEN DES PROJEKTES VERMESSENEN SEA-KOLLEKTOREN, BEI EINER WINDGESCHWINDIGKEIT VON 3 M/S. DIE	

KENNLINIEN SIND LINEAR DARGESTELLT. JEDE KENNLINIE ENTSpricht EINEM MASSENSTROM (MP). INSGESAMT WURDE JEDER KOLLEKTOR BEI VIER UNTERSCHIEDLICHEN MASSENSTRÖMEN VERMESSEN (100, 200, 400 UND 800 KG/H)	73
ABBILDUNG 5-24: JAHRESBRUTTOENERGIEERTRÄGE ALLER SEA-KOLLEKTOREN FÜR EINEN MASSENSTROM VON 100 KG/H UND EINEM WINDGESCHWINDIGKEIT VON 3 M/S. DER KOLLEKTOR SEA 1 WURDE UNTER EINEM MITTLEREN MASSENSTROM VON 52 KG/H UND VARIABLER WINDGESCHWINDIGKEIT BETRIEBEN. DIE BLASSEREN BALKEN INKLUDIEREN DIE EFFIZIENZEINBUßEN AUF BASIS DES IAM UND SONSTIGER WETTERBEDINGTER PHÄNOMENE.	77
ABBILDUNG 5-25: PROJIZIERTE TEMPERATURHÜBE ZWISCHEN EIN- UND AUSTRETENDER KOLLEKTORLUFT FÜR DIE SEA-KOLLEKTOREN ZU VERSCHIEDENEN MASSENSTRÖMEN UND WINDEINFLÜSSEN (SEA 2.1) BEI EINER GLOBALSTRAHLUNG VON 1.000 W/M ² UND EINEM 2 M LANGEN KOLLEKTORMODUL.	78
ABBILDUNG 5-26: JAHRESBRUTTOENERGIEERTRÄGE DER DREI 2 M ² GROßEN SEA-KOLLEKTOREN BEI MASSENSTRÖMEN VON 100 BIS 800 KG/H UND WINDGESCHWINDIGKEIT 3 M/S ZU EINER SOLAREN GESAMTEINSTRALUNG VON 1.104 kWh/M ² A (OHNE ABSCHLÄGE WIE IAM ETC.).	79
ABBILDUNG 5-27: VERGLEICH PROJIZIERTER MONATLICHER ENERGIEERTRÄGE DER SEA-TYPEN SEA 2.1, 2.2 UND 2.3 BEI EINEM WINDEINFLUSS VON 3 M/S UND EINEM MASSENSTROM 100 KG/H OHNE ABSCHLÄGE (IAM ETC.) AUF BASIS DES SEA1-MESSJAHRES 2010/2011. ...	79
ABBILDUNG 5-28: POSITIONEN DER ABGENOMMENEN MESSWERTE DER ABSORBERTEMPERATUREN	81
ABBILDUNG 5-29: ABHÄNGIGKEIT DER STAGNATIONSTEMPERATUR (MITTELWERTE DER GEMESSENEN ABSORBERTEMPERATUREN) VON DER EINSTRALUNG UND DER WINDGESCHWINDIGKEIT	82
ABBILDUNG 5-30: DARSTELLUNG DER POSITIONEN DER TEMPERATURSENSOREN DES SEA-KOLLEKTORS 2.2. BRAUN DARGESTELLT IST DAS SANDWICHELEMENT, BLAU DIE SENSOREN AUF DEM TRAPEZBLECH UND ROT GESTRICHELT SIND DIE SENSOREN DARGESTELLT, DIE DURCH DIE RÜCKWAND DURCH DAS SANDWICHELEMENT GESCHOBEN WORDEN SIND UND DIE TEMPERATUR DER ÄUßEREN STAHLSEITE DES SE UNTER DEM ABSORBER MESSEN.	83
ABBILDUNG 5-31: DARSTELLUNG DER POSITIONSHÖHEN IM KOLLEKTOR AN DENEN TEMPERATURSENSOREN BEIM BAU VON SEA 2.3 VERBAUT WURDEN.	84
ABBILDUNG 5-32: POSITIONEN DER TEMPERATURSENSOREN IM SEA-KOLLEKTOR 2.3 ABHÄNGIG VON DER HÖHE IM KOLLEKTOR	85
ABBILDUNG 5-33: BERECHNUNG DER STAGNATIONSTEMPERATURWERTE (T _{SE} , BLAU) DES SEA-KOLLEKTORS 2.2 ALS FASSADE IN STUNDENWERTEN FÜR EIN JAHR. GELB DARGESTELLT SIND DIE GLOBALSTRAHLUNGSWERTE BZW. EINSTRALUNG AUF EINEN KOLLEKTOR, DER ZWEIACHSIG NACHGEFÜHRT WÜRD. GRÜN DARGESTELLT SIND DIE EINSTRALUNGSWERTE AUF DIE SÜDFASSADE, MITTELS DERER DIE STAGNATIONSTEMPERATUREN FÜR DIE JEWEILIGE UMGEBUNGSTEMPERATUR FÜR DEN REFERENZ-STANDORT WÜRZBURG BERECHNET WURDE.	87
ABBILDUNG 5-34: ANZAHL UND VERTEILUNG DER STUNDEN IM JAHR MIT EINER TEMPERATURBELASTUNG VON ÜBER 80 °C / 90 °C AUF DER ÄUßEREN METALLDECKSCHICHT DES SANDWICHELEMENTES IN EINEM SEA-KOLLEKTOR 2.2 ALS SÜD-FASSADENELEMENT; BERECHNET FÜR DEN REFERENZSTANDORT WÜRZBURG (BASIIERT AUF ABBILDUNG 5-33)....	88

ABBILDUNG 6-1: AUF DIE KANALHÖHE EINES FLACHEN KANALS UMGERECHNETE STRÖMUNGSQUERSCHNITTE VON KOMBINATIONSMÖGLICHKEITEN AUS STAHLBLECH- UND SANDWICHPROFILIEN.....	90
ABBILDUNG 6-2: TEILFLÄCHEN EINES TRAPEZPROFILS (OBEN) UND ZUGEHÖRIGE IAM-VERLÄUFE (UNTEN)	93
ABBILDUNG 6-3: LEISTUNGSDICHTEN AUF ABGEWICKELTEM ABSORBER ÜBER TRANSVERSALE EINFALLSWINKEL	93
ABBILDUNG 6-4: QUERSCHNITT EINER DOPPELSTEGPLATTE AUS POLYCARBONAT MIT ANGABEN IN MM (OBEN) UND DEREN TRANSVERSALER SOWIE LONGITUDINALER IAM (UNTEN).....	94
ABBILDUNG 6-5: MODELICA-MODELL EINES SEA-KOLLEKTORS 2.1/2.2 MIT TRAPEZPROFIL.....	95
ABBILDUNG 6-6: STRÖMUNGSGESCHWINDIGKEITEN IM TRAPEZPROFIL	96
ABBILDUNG 6-7: TEMPERATUREN IM TRAPEZPROFIL; BILD OBEN: ANSICHT VORNE/OBEN, BILD UNTEN: ANSICHT VORNE/UNTEN	97
ABBILDUNG 6-8: WÄRMELEISTUNGEN IM TRAPEZPROFIL (UNTERSCHIEDLICHE SKALEN RECHTS UND LINKS)	98
ABBILDUNG 6-9: TEMPERATUREN IM TRAPEZPROFIL (STAHLBLECH/ABSORBER)	98
ABBILDUNG 6-10: SCHRITTWEISES VORGEHEN BEI DEN FEM-SIMULATIONEN	99
ABBILDUNG 6-11: ANNAHMEN FÜR DIE FEM-SIMULATIONEN VON SEA 2.1 (OBEN) UND SEA 2.2 (UNTEN)	100
ABBILDUNG 6-12: SIMULIERTE (BLAU) UND GEMESSENE (ROT) WIRKUNGSGRADKENNLINIEN DES SEA-KOLLEKTORS 2.1.....	101
ABBILDUNG 6-13: SIMULIERTE (BLAU) UND GEMESSENE (ROT) WIRKUNGSGRADKENNLINIEN DES SEA-KOLLEKTOR 2.2	101
ABBILDUNG 6-14: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG UNTERSUCHTER WESENTLICHER KOLLEKTORKONSTRUKTIONEN (GELB = DÄMMKERN, SCHWARZ = ABSORBER, HELLBLAU = TRANSPARENTE ABDECKUNG).....	102
ABBILDUNG 6-15: ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE ZU VARIATIONEN VON RANDBEDINGUNGEN MIT OPTIMIERTE KANALHÖHEN UND MASSENSTRÖMEN (ULK = UNABGEDECKTER LUFTKOLLEKTOR, ALK = ABGEDECKTER LUFTKOLLEKTOR)	103
ABBILDUNG 6-16: MITTELWERTE AUS 171 VARIATIONEN VON RANDBEDINGUNGEN MIT 18 K UND 9 K TEMPERATURHUB.....	104
ABBILDUNG 6-17: KANALHÖHEN VON FLACHEN KANÄLEN MIT GLEICHER STRÖMUNGSQUERSCHNITTSFLÄCHE WIE JENE DER BETRACHTETEN VORHANDENEN PROFILBLECHE	105
ABBILDUNG 6-18: KOLLEKTOR SEA 2.3A (OBEN: SICHT VON OBEN, UNTEN: SEITENANSICHT)....	106
ABBILDUNG 6-19: KOLLEKTOR SEA 2.3B (OBEN: SICHT VON OBEN, UNTEN: SEITENANSICHT)....	107
ABBILDUNG 6-20: TEMPERATUREN UND GESCHWINDIGKEITEN DES KOLLEKTORS SEA 2.3A BEI 100 UND 400 KG/H	108
ABBILDUNG 6-21: TEMPERATUREN UND GESCHWINDIGKEITEN DES KOLLEKTORS SEA 2.3B BEI 100 UND 400 KG/H	108
ABBILDUNG 6-22: WIRKUNGSGRADKENNLINIEN DES ABGEDECKTEN KOLLEKTORS SEA 2.3 BEI 100 KG/H (BERECHNET NACH MODELLKALIBRIERUNG AUF BASIS VON MESSUNGEN) UND DES GLEICHEN KOLLEKTORS OHNE TRANSPARENTE ABDECKUNG (BERECHNET).....	109
ABBILDUNG 6-23: WIRKUNGSGRADKENNLINIEN DES KOLLEKTORS SEA 2.3 BEI 100 KG/H MIT FARBE RAL 7016 (BERECHNET NACH MODELLKALIBRIERUNG AUF BASIS VON MESSUNGEN)	

UND DES GLEICHEN KOLLEKTORS MIT DEN FARBEN RAL 9007 (GRAUALUMINIUM) UND RAL 9002 (GRAUWEIß)	110
ABBILDUNG 6-24: ERWÄRMUNG DER KOLLEKTORLUFT IM SEA-KOLLEKTOR 2.3 FÜR VERSCHIEDENE KOLLEKTORMODUL-LÄNGEN UND MASSENSTRÖME DARGESTELLT ANHAND DER EINTRITTSTEMPERATUREN T_i UND AUSTRITTSTEMPERATUREN T_e DES JEWEILIGEN KOLLEKTORABSCHNITTS BEI EINER GLOBALSTRAHLUNG VON $G = 1000 \text{ W/m}^2$ UND EINER WINDGESCHWINDIGKEIT VON 3 m/s	111
ABBILDUNG 6-25: SPEZIFISCHE LEISTUNG PRO m^2 FÜR VERSCHIEDENE LÄNGEN DES SEA-KOLLEKTORS 2.3 SOWIE DIE JEWEILIGEN AUSTRITTSTEMPERATUREN T_e ZU VERSCHIEDENEN MASSENSTRÖMEN ($100 \text{ kg/h} - 800 \text{ kg/h}$) UNTER DEN GLEICHEN RAHMENBEDINGUNGEN WIE BEI ABBILDUNG 6-24	112
ABBILDUNG 6-26: SPEZIFISCHE LEISTUNG PRO m^2 UND FLÄCHENLEISTUNG (GESAMTLEISTUNG) FÜR VERSCHIEDENE LÄNGEN DES SEA-KOLLEKTORS 2.3 UND FÜR VERSCHIEDENE MASSENSTRÖME UNTER DEN GLEICHEN RAHMENBEDINGUNGEN WIE BEI ABBILDUNG 6-24	113
ABBILDUNG 7-1: BERECHNUNGSSCHRITTE UND BILANZGRENZEN IN LUKOCALC	119
ABBILDUNG 7-2: ECB-MUSTERHALLE NACH [BAY11]	120
ABBILDUNG 7-3: DIN-NUTZUNGSPROFIL DER ECB-MUSTERHALLE WIE IM ECB-PROJEKT DEFINIERT [BAY11]	120
ABBILDUNG 7-4: EINGESTRAHLTE SOLARE ENERGIE AUF VIER UMFASSUNGSFLÄCHEN DER BETRACHTETEN INDUSTRIEHALLE MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR HH TMY	126
ABBILDUNG 7-5: EINGESTRAHLTE SOLARE ENERGIE AUF VIER UMFASSUNGSFLÄCHEN DER BETRACHTETEN INDUSTRIEHALLE MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR HH TMY-MIN	127
ABBILDUNG 7-6: EINGESTRAHLTE SOLARE ENERGIE AUF VIER UMFASSUNGSFLÄCHEN DER BETRACHTETEN MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR HH TMY-MAX	127
ABBILDUNG 7-7: EINGESTRAHLTE SOLARE ENERGIE AUF VIER UMFASSUNGSFLÄCHEN DER BETRACHTETEN INDUSTRIEHALLE MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR MUN TMY	128
ABBILDUNG 7-8: EINGESTRAHLTE SOLARE ENERGIE AUF VIER UMFASSUNGSFLÄCHEN DER BETRACHTETEN MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR MUN TMY-MIN.	128
ABBILDUNG 7-9: EINGESTRAHLTE SOLARE ENERGIE AUF VIER UMFASSUNGSFLÄCHEN DER BETRACHTETEN INDUSTRIEHALLE MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR MUN TMY-MAX	129
ABBILDUNG 7-10: KOLLEKTORBRUTTOERTRAG ÜBER DIE VIER UMFASSUNGSFLÄCHEN DER BETRACHTETEN INDUSTRIEHALLE MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR HH TMY	130
ABBILDUNG 7-11: KOLLEKTORBRUTTOERTRAG ÜBER DIE VIER UMFASSUNGSFLÄCHEN DER BETRACHTETEN INDUSTRIEHALLE MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR HH TMY-MIN	130
ABBILDUNG 7-12: KOLLEKTORBRUTTOERTRAG ÜBER DIE VIER UMFASSUNGSFLÄCHEN DER BETRACHTETEN INDUSTRIEHALLE MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR HH TMY-MAX	131
ABBILDUNG 7-13: KOLLEKTORBRUTTOERTRAG ÜBER DIE VIER UMFASSUNGSFLÄCHEN DER BETRACHTETEN INDUSTRIEHALLE MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR MUN TMY	131
ABBILDUNG 7-14: KOLLEKTORBRUTTOERTRAG ÜBER DIE VIER UMFASSUNGSFLÄCHEN DER BETRACHTETEN INDUSTRIEHALLE MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR MUN TMY-MIN	132
ABBILDUNG 7-15: KOLLEKTORBRUTTOERTRAG ÜBER DIE VIER UMFASSUNGSFLÄCHEN DER BETRACHTETEN INDUSTRIEHALLE MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR MUN TMY-MAX	132
ABBILDUNG 7-16: MONATLICHE BILANZIERUNG DER WÄRMEMENGEN ZUR BEHEIZUNG DER INDUSTRIEHALLE MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR HH TMY	133
ABBILDUNG 7-17: MONATLICHE BILANZIERUNG DER WÄRMEMENGEN ZUR BEHEIZUNG DER INDUSTRIEHALLE MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR HH TMY-MIN	134

ABBILDUNG 7-18: MONATLICHE BILANZIERUNG DER WÄRMEMENGEN ZUR BEHEIZUNG DER INDUSTRIEHALLE MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR HH TMY-MAX.....	134
ABBILDUNG 7-19: MONATLICHE BILANZIERUNG DER WÄRMEMENGEN ZUR BEHEIZUNG DER INDUSTRIEHALLE MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR MUN TMY.....	135
ABBILDUNG 7-20: MONATLICHE BILANZIERUNG DER WÄRMEMENGEN ZUR BEHEIZUNG DER INDUSTRIEHALLE MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR MUN TMY-MIN.....	136
ABBILDUNG 7-21: MONATLICHE BILANZIERUNG DER WÄRMEMENGEN ZUR BEHEIZUNG DER INDUSTRIEHALLE MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR MUN TMY-MAX.....	136
ABBILDUNG 7-22: GEORDNETE JAHRESDAUERLINIE FÜR DEN HEIZWÄRMEBEDARF DER INDUSTRIEHALLE MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR MUN TMY. WEITERHIN IST DER ÜBER EINEN ZUSÄTZLICHEN WÄRMEERZEUGER BEREITZUSTELLENDEN HEIZWÄRMEBEDARF NACH DER DIREKTEN EINBINDUNG VON SOLARTHERMISCHER WÄRME SOWIE DER UNTER EINBINDUNG EINES THERMISCHEN SPEICHERS DARGESTELLT.	137
ABBILDUNG 7-23: GEORDNETE JAHRESDAUERLINIE FÜR DEN HEIZWÄRMEBEDARF DER INDUSTRIEHALLE MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR MUN TMY-MIN. WEITERHIN IST DER ÜBER EINEN ZUSÄTZLICHEN WÄRMEERZEUGER BEREITZUSTELLENDEN HEIZWÄRMEBEDARF NACH DER DIREKTEN EINBINDUNG VON SOLARTHERMISCHER WÄRME SOWIE DER UNTER EINBINDUNG EINES THERMISCHEN SPEICHERS DARGESTELLT.....	138
ABBILDUNG 7-24: GEORDNETE JAHRESDAUERLINIE FÜR DEN HEIZWÄRMEBEDARF DER INDUSTRIEHALLE MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR MUN TMY-MAX. WEITERHIN IST DER ÜBER EINEN ZUSÄTZLICHEN WÄRMEERZEUGER BEREITZUSTELLENDEN HEIZWÄRMEBEDARF NACH DER DIREKTEN EINBINDUNG VON SOLARTHERMISCHER WÄRME SOWIE DER UNTER EINBINDUNG EINES THERMISCHEN SPEICHERS DARGESTELLT.....	138
ABBILDUNG 7-25: GEORDNETE JAHRESDAUERLINIE FÜR DEN HEIZWÄRMEBEDARF DER INDUSTRIEHALLE MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR HH TMY. WEITERHIN IST DER ÜBER EINEN ZUSÄTZLICHEN WÄRMEERZEUGER BEREITZUSTELLENDEN HEIZWÄRMEBEDARF NACH DER DIREKTEN EINBINDUNG VON SOLARTHERMISCHER WÄRME SOWIE DER UNTER EINBINDUNG EINES THERMISCHEN SPEICHERS DARGESTELLT.	139
ABBILDUNG 7-26: GEORDNETE JAHRESDAUERLINIE FÜR DEN HEIZWÄRMEBEDARF DER INDUSTRIEHALLE MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR HH TMY-MIN. WEITERHIN IST DER ÜBER EINEN ZUSÄTZLICHEN WÄRMEERZEUGER BEREITZUSTELLENDEN HEIZWÄRMEBEDARF NACH DER DIREKTEN EINBINDUNG VON SOLARTHERMISCHER WÄRME SOWIE DER UNTER EINBINDUNG EINES THERMISCHEN SPEICHERS DARGESTELLT.	139
ABBILDUNG 7-27: GEORDNETE JAHRESDAUERLINIE FÜR DEN HEIZWÄRMEBEDARF DER INDUSTRIEHALLE MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR HH TMY-MAX. WEITERHIN IST DER ÜBER EINEN ZUSÄTZLICHEN WÄRMEERZEUGER BEREITZUSTELLENDEN HEIZWÄRMEBEDARF NACH DER DIREKTEN EINBINDUNG VON SOLARTHERMISCHER WÄRME SOWIE DER UNTER EINBINDUNG EINES THERMISCHEN SPEICHERS DARGESTELLT.	140
ABBILDUNG 7-28: MONATLICHE BILANZIERUNG DER KÄLTEMENGEN ZUR KÜHLUNG DER INDUSTRIEHALLE MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR HH TMY.....	141
ABBILDUNG 7-29: MONATLICHE BILANZIERUNG DER KÄLTEMENGEN ZUR KÜHLUNG DER INDUSTRIEHALLE MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR HH TMY-MIN.....	142
ABBILDUNG 7-30: MONATLICHE BILANZIERUNG DER KÄLTEMENGEN ZUR KÜHLUNG DER INDUSTRIEHALLE MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR HH TMY-MAX.....	142
ABBILDUNG 7-31: MONATLICHE BILANZIERUNG DER KÄLTEMENGEN ZUR KÜHLUNG DER INDUSTRIEHALLE MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR MUN TMY.....	143

Verzeichnisse

Lists

ABBILDUNG 7-32: MONATLICHE BILANZIERUNG DER KÄLTEMENGEN ZUR KÜHLUNG DER INDUSTRIEHALLE MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR MUN TMY-MIN.....	144
ABBILDUNG 7-33: MONATLICHE BILANZIERUNG DER KÄLTEMENGEN ZUR KÜHLUNG DER INDUSTRIEHALLE MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR MUN TMY-MAX	144
ABBILDUNG 7-34: GEORDNETE JAHRESDAUERLINIE FÜR DEN KÜHLBEDARF DER INDUSTRIEHALLE MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR HH TMY. WEITERHIN IST DER ÜBER EINEN ZUSÄTZLICHEN KÄLTEERZEUGER BEREITZUSTELLENDEN KÜHLBEDARF NACH DER EINBINDUNG VON SOLAR THERMISCHER WÄRME ÜBER EINE EINSTUFIGE SOLAR THERMISCH ANGETRIEBENE KÄLTEMASCHINE DARGESTELLT.	145
ABBILDUNG 7-35: GEORDNETE JAHRESDAUERLINIE FÜR DEN KÜHLBEDARF DER INDUSTRIEHALLE MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR HH TMY-MIN. WEITERHIN IST DER ÜBER EINEN ZUSÄTZLICHEN KÄLTEERZEUGER BEREITZUSTELLENDEN KÜHLBEDARF NACH DER EINBINDUNG VON SOLAR THERMISCHER WÄRME ÜBER EINE EINSTUFIGE SOLAR THERMISCH ANGETRIEBENE KÄLTEMASCHINE DARGESTELLT.	146
ABBILDUNG 7-36: GEORDNETE JAHRESDAUERLINIE FÜR DEN KÜHLBEDARF DER INDUSTRIEHALLE MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR HH TMY-MAX. WEITERHIN IST DER ÜBER EINEN ZUSÄTZLICHEN KÄLTEERZEUGER BEREITZUSTELLENDEN KÜHLBEDARF NACH DER EINBINDUNG VON SOLAR THERMISCHER WÄRME ÜBER EINE EINSTUFIGE SOLAR THERMISCH ANGETRIEBENE KÄLTEMASCHINE DARGESTELLT.	146
ABBILDUNG 7-37: GEORDNETE JAHRESDAUERLINIE FÜR DEN KÜHLBEDARF DER INDUSTRIEHALLE MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR MUN TMY. WEITERHIN IST DER ÜBER EINEN ZUSÄTZLICHEN KÄLTEERZEUGER BEREITZUSTELLENDEN KÜHLBEDARF NACH DER EINBINDUNG VON SOLAR THERMISCHER WÄRME ÜBER EINE EINSTUFIGE SOLAR THERMISCH ANGETRIEBENE KÄLTEMASCHINE DARGESTELLT.	147
ABBILDUNG 7-38: GEORDNETE JAHRESDAUERLINIE FÜR DEN KÜHLBEDARF DER INDUSTRIEHALLE MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR MUN TMY-MAX. WEITERHIN IST DER ÜBER EINEN ZUSÄTZLICHEN KÄLTEERZEUGER BEREITZUSTELLENDEN KÜHLBEDARF NACH DER EINBINDUNG VON SOLAR THERMISCHER WÄRME ÜBER EINE EINSTUFIGE SOLAR THERMISCH ANGETRIEBENE KÄLTEMASCHINE DARGESTELLT.	147
ABBILDUNG 7-39: KOLLEKTORBRUTTOERTRAG ÜBER DIE VIER UMFASSUNGSFLÄCHEN DER BETRACHTETEN INDUSTRIEHALLE MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR HH TMY	155
ABBILDUNG 7-40: KOLLEKTORBRUTTOERTRAG ÜBER DIE VIER UMFASSUNGSFLÄCHEN DER BETRACHTETEN INDUSTRIEHALLE MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR MUN TMY.....	155
ABBILDUNG 7-41: MONATLICHE BILANZIERUNG DER WÄRMEMENGEN ZUR BEHEIZUNG DER INDUSTRIEHALLE MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR HH TMY	156
ABBILDUNG 7-42: MONATLICHE BILANZIERUNG DER WÄRMEMENGEN ZUR BEHEIZUNG DER INDUSTRIEHALLE MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR MUN TMY	157
ABBILDUNG 7-43: GEORDNETE JAHRESDAUERLINIE FÜR DEN HEIZWÄRMEBEDARF DER INDUSTRIEHALLE MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR HH TMY. WEITERHIN IST DER ÜBER EINEN ZUSÄTZLICHEN WÄRMEERZEUGER BEREITZUSTELLENDEN HEIZWÄRMEBEDARF NACH DER DIREKTEN EINBINDUNG VON SOLAR THERMISCHER WÄRME SOWIE DER UNTER EINBINDUNG EINES THERMISCHEN SPEICHERS DARGESTELLT.	157
ABBILDUNG 7-44: GEORDNETE JAHRESDAUERLINIE FÜR DEN HEIZWÄRMEBEDARF DER INDUSTRIEHALLE MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR MUN TMY. WEITERHIN IST DER ÜBER EINEN ZUSÄTZLICHEN WÄRMEERZEUGER BEREITZUSTELLENDEN HEIZWÄRMEBEDARF NACH DER	

DIREKTEN EINBINDUNG VON SOLARTHERMISCHER WÄRME SOWIE DER UNTER EINBINDUNG EINES THERMISCHEN SPEICHERS DARGESTELLT.	158
ABBILDUNG 7-45: MONATLICHE BILANZIERUNG DER KÄLTEMENGEN ZUR KÜHLUNG DER INDUSTRIEHALLE MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR HH TMY.....	159
ABBILDUNG 7-46: MONATLICHE BILANZIERUNG DER KÄLTEMENGEN ZUR KÜHLUNG DER INDUSTRIEHALLE MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR MUN TMY.....	159
ABBILDUNG 7-47: GEORDNETE JAHRESDAUERLINIE FÜR DEN KÜHLBEDARF DER INDUSTRIEHALLE MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR HH TMY. WEITERHIN IST DER ÜBER EINEN ZUSÄTZLICHEN KÄLTEERZEUGER BEREITZUSTELLENDEN KÜHLBEDARF NACH DER EINBINDUNG VON SOLARTHERMISCHER WÄRME ÜBER EINE EINSTUFIGE SOLARTHERMISCH ANGETRIEBENE KÄLTEMASCHINE DARGESTELLT.	160
ABBILDUNG 7-48: GEORDNETE JAHRESDAUERLINIE FÜR DEN KÜHLBEDARF DER INDUSTRIEHALLE MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR MUN TMY. WEITERHIN IST DER ÜBER EINEN ZUSÄTZLICHEN KÄLTEERZEUGER BEREITZUSTELLENDEN KÜHLBEDARF NACH DER EINBINDUNG VON SOLARTHERMISCHER WÄRME ÜBER EINE EINSTUFIGE SOLARTHERMISCH ANGETRIEBENE KÄLTEMASCHINE DARGESTELLT.	160
ABBILDUNG 7-49: KOLLEKTORBRUTTOERTRAG ÜBER DIE VIER UMFASSUNGSFLÄCHEN DER BETRACHTETEN INDUSTRIEHALLE MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR HH TMY	164
ABBILDUNG 7-50: KOLLEKTORBRUTTOERTRAG ÜBER DIE VIER UMFASSUNGSFLÄCHEN DER BETRACHTETEN INDUSTRIEHALLE MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR MUN TMY	164
ABBILDUNG 7-51: MONATLICHE BILANZIERUNG DER WÄRMEMENGEN ZUR BEHEIZUNG DER INDUSTRIEHALLE MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR HH TMY.....	165
ABBILDUNG 7-52: MONATLICHE BILANZIERUNG DER WÄRMEMENGEN ZUR BEHEIZUNG DER INDUSTRIEHALLE MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR MUN TMY.....	166
ABBILDUNG 7-53: GEORDNETE JAHRESDAUERLINIE FÜR DEN HEIZWÄRMEBEDARF DER INDUSTRIEHALLE MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR HH TMY. WEITERHIN IST DER ÜBER EINEN ZUSÄTZLICHEN WÄRMEERZEUGER BEREITZUSTELLENDEN HEIZWÄRMEBEDARF NACH DER DIREKTEN EINBINDUNG VON SOLARTHERMISCHER WÄRME SOWIE DER UNTER EINBINDUNG EINES THERMISCHEN SPEICHERS DARGESTELLT.	166
ABBILDUNG 7-54: GEORDNETE JAHRESDAUERLINIE FÜR DEN HEIZWÄRMEBEDARF DER INDUSTRIEHALLE MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR MUN TMY. WEITERHIN IST DER ÜBER EINEN ZUSÄTZLICHEN WÄRMEERZEUGER BEREITZUSTELLENDEN HEIZWÄRMEBEDARF NACH DER DIREKTEN EINBINDUNG VON SOLARTHERMISCHER WÄRME SOWIE DER UNTER EINBINDUNG EINES THERMISCHEN SPEICHERS DARGESTELLT	167
ABBILDUNG 7-55: MONATLICHE BILANZIERUNG DER KÄLTEMENGEN ZUR KÜHLUNG DER INDUSTRIEHALLE MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR HH TMY.....	168
ABBILDUNG 7-56: MONATLICHE BILANZIERUNG DER KÄLTEMENGEN ZUR KÜHLUNG DER INDUSTRIEHALLE MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR MUN TMY.....	168
ABBILDUNG 7-57: GEORDNETE JAHRESDAUERLINIE FÜR DEN KÜHLBEDARF DER INDUSTRIEHALLE MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR HH TMY. WEITERHIN IST DER ÜBER EINEN ZUSÄTZLICHEN KÄLTEERZEUGER BEREITZUSTELLENDEN KÜHLBEDARF NACH DER EINBINDUNG VON SOLARTHERMISCHER WÄRME ÜBER EINE EINSTUFIGE SOLARTHERMISCH ANGETRIEBENE KÄLTEMASCHINE DARGESTELLT.	169
ABBILDUNG 7-58: GEORDNETE JAHRESDAUERLINIE FÜR DEN KÜHLBEDARF DER INDUSTRIEHALLE MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR MUN TMY. WEITERHIN IST DER ÜBER EINEN ZUSÄTZLICHEN KÄLTEERZEUGER BEREITZUSTELLENDEN KÜHLBEDARF NACH DER EINBINDUNG VON	

Verzeichnisse

Lists

SOLARTHERMISCHER WÄRME ÜBER EINE EINSTUFIGE SOLARTHERMISCH ANGETRIEBENE KÄLTEMASCHINE DARGESTELLT.	169
ABBILDUNG 8-1: LEISTUNGSZUWACHS PRO M ² FÜR SEA 2.1 UND 2.2 AUSGEHEND VON EINER WINDGESCHWINDIGKEIT VON 3 M/S (100%) FÜR GERINGERE WERTE BEI EINEM MASSENSTROM VON 100 KG/H.....	176
ABBILDUNG 8-2: KLIMAKARTE DER WINDGESCHWINDIGKEIT IN M/S FÜR DEN ZEITRAUM 1995 BIS 2008 AUF BASIS STÜNDLICHER WERTE; QUELLE: [DWD17B].....	177
ABBILDUNG 8-3: FOTO DER BEOBACHTETEN WELLUNG DER PC-PLATTE UNTER STAGNATION (SEA 2.3)	179
ABBILDUNG 8-4: TEMPERATURVERLÄUFE DER ÄUßEREN OBERFLÄCHEN VON REFERENZ-SE (BLAUE LINIE), DES SEA-TRAPEZ-PROFILS (= ABSORBER, SCHWARZE LINIE) UND DEM SE UNTER DEM TRAPEZPROFIL (ORANGE LINIE) AM DACH DER SEA1-MESSZELLE SOWIE DER AUßENLUFT (GRÜNE LINIE) FÜR EINEN SONNIGEN BEISPIELTAG AUS DEM SEA1-PROJEKT MIT EINER GEMESSENEN SOLAREN TAGESSTRAHLUNGSENERGIE VON 7.962 WH/M ² AUF DEM DACH.....	185
ABBILDUNG 8-5: BEISPIELFOTOS AUS DER PRÄSENTATION VON FACADE-LAB ZU DEN ARCHITEKTONISCHEN GESTALTUNGSMÖGLICHKEITEN MIT SEA-ÄHNLICHEN FASSADEN, LINKS: DATA STORAGE CENTER, BASEL, SCHWEIZ, ARCH.: FFBK ARCHITECT; RECHTS: REISS HEADQUARTER, LONDON, UK, ARCH.: SQUIRE & PARTNERS	187

List of figures

FIGURE 2-1: CROSS SECTION OF THE SEA ELEMENT AS USED DURING THE SEA1 PROJECT	9
FIGURE 2-2: OPERATING PRINCIPLE OF THE SEA COLLECTOR.....	9
FIGURE 2-3: GLOBAL RADIATION IN GERMANY – AVERAGE ANNUAL SUMS FOR THE PERIOD OF 1981 - 2010; SOURCE: [DWD17A]	11
FIGURE 2-4: SCHEMATIC SECTIONAL DRAWING OF THE SEA MEASUREMENT CELL; SOURCE: [FOS14A]	12
FIGURE 2-5 (LEFT PICTURE): PHOTO OF THE SEA MEASURING CELL ON THE ROOF OF THE FIW; VIEW ON SOUTHERN FACADE; SEA WALL COLLECTOR (RIGHT PART) AND REFERENCE SANDWICH ELEMENT (LEFT PART)	13
FIGURE 2-6: (RIGHT PICTURE): PHOTO OF THE SEA MEASURING CELL ; VIEW ON THE ROOF SURFACE; SEA ROOF COLLECTOR (LEFT PART) AND REFERENCE SANDWICH ELEMENT (RIGHT PART).....	13
FIGURE 2-7: EFFECTIVE ENERGY YIELDS OF THE SEA AIR COLLECTORS FOR ROOF AND WALL IN THE PERIOD FROM 01/07/2010 THROUGH 30/06/2011; SOURCE: [FOS14A]	15
FIGURE 3-1: EFFICIENCY CURVES OF A COVERED (RED) AND AN UNCOVERED (BLUE) SOLAR THERMAL COLLECTOR	22
FIGURE 3-2: POWER CURVES OF A COVERED (RED) AND AN UNCOVERED (BLUE) SOLAR THERMAL COLLECTOR FOR TWO DIFFERENT IRRADIATION INTENSITIES	23
FIGURE 3-3: EXEMPLARY POWER DETERMINATION FOR A SUMMER CASE.	24
FIGURE 3-4: EXEMPLARY POWER DETERMINATION FOR A WINTER CASE.....	25
FIGURE 3-5: PRINCIPAL TYPES OF SOLAR AIR COLLECTORS.....	26
FIGURE 3-6: HEAT TRANSFER IN SOLAR LIQUID AND SOLAR AIR COLLECTORS.....	27
FIGURE 3-7: OVERVIEW OF POSSIBLE SEA CONSTRUCTIONS AS CONSIDERED DURING THE PREPARATIONS FOR RESEARCH PROJECT P1041 (SEA2); SOURCE: [FOS14B].....	28
FIGURE 3-8:COLLECTOR BASED ON THE SEA1 CONFIGURATION WITHOUT AND WITH COVERING (LEFT, RESPECTIVELY RIGHT SIDE); THE WORKING FLUID AIR IS CONDUCTED THROUGH THE AIR CHANNELS BETWEEN THE ABSORBER (GREY) AND THE OUTER METAL SHEET OF THE SANDWICH ELEMENT (BLUE)	31
FIGURE 3-9: INFLUENCE OF A TRANSPARENT COVER ON THE EFFICIENCY CURVE	31
FIGURE 3-10: EFFECT OF THE HEAT TRANSFER FROM ABSORBER TO FLUID ON THE EFFICIENCY CURVE	32
FIGURE 3-11: DEPENDENCE OF THE EFFECTIVE SOLAR RADIATION UPON THE IRRADIATION ANGLE	33
FIGURE 3-12: INFLUENCE OF ABSORBER COLOUR ON THE EFFICIENCY CURVE.....	35
FIGURE 3-13: EFFICIENCY CURVES WITH MEASURING POINTS OF A SOLAR AIR COLLECTOR FOR THREE MASS FLOWS	36
FIGURE 3-14: EFFICIENCY SURFACE DIAGRAM OF THE AIR COLLECTOR FROM FIGURE 3-13	37
FIGURE 3-15: EFFICIENCIES BASED ON MASS FLOWS FOR DIFFERENT COLLECTOR LENGTHS (2 M, 2.7 M, 4.7 M) OBTAINED FROM SEA1 RESEARCH PROJECT	38
FIGURE 4-1: PHYSICAL MODEL FOR THE DETERMINATION OF THE THERMAL EFFICIENCY OF A SOLAR COLLECTOR.....	43
FIGURE 4-2: MECHANISMS OF HEAT TRANSFER IN TRAPEZOIDAL PROFILES	44
FIGURE 4-3: DETERMINATION OF THE EFFICIENT MASS FLOW AT THE MAXIMUM OF THE NET POWER	45

Verzeichnisse

Lists

FIGURE 4-4: SAMPLE SCREENSHOTS OF EXCEL TOOL SCENOCALC.....	46
FIGURE 5-1: CONFIGURATION OF THE TESTING FACILITY FOR CLOSED SOLAR AIR COLLECTORS AT FRAUNHOFER ISE	50
FIGURE 5-2: INDOOR SOLAR SIMULATOR AT THE FRAUNHOFER ISE; SOURCE: FRAUNHOFER ISE INTRANET, PHOTO AND PRESS MATERIAL, 02/2008.	51
FIGURE 5-3: SCHEME AND CROSS SECTION OF THE SEA COLLECTOR 2.1.....	53
FIGURE 5-4: COMPOSITION OF THE SEA COLLECTOR 2.1 AS CAD SECTIONAL DRAWING.....	53
FIGURE 5-5: CROSS SECTION AND DIMENSIONS OF THE SEA COLLECTOR 2.1 AND ITS AIR CHANNELS	54
FIGURES 5-6: CONSTRUCTION OF SEA 2.1: PRIMING THE SANDWICH ELEMENT, THEN FITTING AND ADHERING THE ABSORBER TO THE SANDWICH ELEMENT	55
FIGURES 5-7: CONSTRUCTION OF SEA 2.1: PRODUCTION AND FITTING OF THE AIR CONNECTION	56
FIGURE 5-8: SEA COLLECTOR 2.1 IN THE SOLAR SIMULATOR (TEST LAB) OF FRAUNHOFER ISE....	57
FIGURE 5-9: MEASURED EFFICIENCY CURVES OF SEA COLLECTOR 2.1 FOR DIFFERENT MASS FLOWS AND WIND SPEEDS.....	59
FIGURE 5-10: SCHEME AND CROSS SECTION OF THE SEA COLLECTOR 2.2.....	61
FIGURE 5-11: LATERAL WOOD PROFILES SUPPORTING THE POLYCARBONATE SHEET	62
FIGURE 5-12: SEA COLLECTOR 2.2 WITH POLYCARBONATE SHEET MOUNTED ABOVE THE ABSORBER	63
FIGURE 5-13: COMPOSITION OF THE SEA COLLECTOR 2.2 AS CAD SECTIONAL DRAWING.....	63
FIGURE 5-14: SEA COLLECTOR 2.2 IN THE SOLAR SIMULATOR (TEST LAB) OF FRAUNHOFER ISE ..	64
FIGURE 5-15: EFFICIENCY CURVES OF SEA COLLECTOR 2.1 (RED) AND 2.2 (YELLOW) FOR DIFFERENT MASS FLOWS AND A WIND SPEED OF 3 M/S. THE GREY EFFICIENCY CURVES ARE BASED ON THE SEA COLLECTOR 2.1 FOR THE LOWER WIND SPEED OF 1,5 M/S AND 0,5 M/S AND ARE INCLUDED FOR BETTER COMPARISON OF FIGURE 5-9 WITH THE RESULTS OF COLLECTOR SEA 2.2.....	65
FIGURE 5-16: SCHEME AND CROSS SECTION OF THE SEA COLLECTOR 2.3.....	68
FIGURE 5-17: CONSTRUCTION OF SEA 2.3: VARNISHING OF THE ABSORBER WITH RAL 7016.....	69
FIGURE 5-18: CONSTRUCTION OF SEA 2.3: SANDWICH ELEMENT WITH 12 AFFIXED SOLAR FASTENERS AND ATTACHED TEMPERATURE SENSORS AS WELL AS A CLOSE-UP VIEW OF THE FIXATION OF THE CORRUGATED ABSORBER ELEMENT WITH THE GASKET	70
FIGURE 5-19: CAD DRAWING OF THE SEA COLLECTOR 2.3 FOCUSING ON THE CONNECTION BETWEEN SOLAR FASTENER, CORRUGATED ABSORBER ELEMENT, GASKET AND POLYCARBONATE SHEET	70
FIGURE 5-20: CAD DRAWING OF THE SEA COLLECTOR 2.3 FOCUSING ON THE LATERALLY FITTED THERMAL INSULATIONS AND INSULATION STRIPS, WHICH ALSO SUPPORT THE ABSORBER.....	71
FIGURES 5-21: FINISHED SEA COLLECTOR 2.3	71
FIGURE 5-22: SEA COLLECTOR 2.3 IN THE SOLAR SIMULATOR (TEST LAB) OF FRAUNHOFER ISE ..	72
FIGURE 5-23: DEPICTION OF THE EFFICIENCY CURVES WITH A WIND SPEED OF 3 M/S OF ALL THREE SEA COLLECTORS MEASURED WITHIN THE RESEARCH PROJECT. THE EFFICIENCY CURVES ARE LINEAR. EACH CURVE REPRESENTS A DIFFERENT MASS FLOW (MP). ALTOGETHER EVERY COLLECTORS HAS BEEN MEASURED WITH FOUR DIFFERENT MASS FLOWS (100, 200, 400 AND 800 KG/H).....	73
FIGURE 5-24: ANNUAL GROSS ENERGY YIELDS OF ALL SEA COLLECTORS FOR 100 KG/H MASS FLOW AND A WIND SPEED OF 3 M/S. THE SEA 1 COLLECTOR HAS BEEN OPERATED UNDER AN AVERAGE MASS FLOW OF 52 KG/H AND A VARIABLE WIND SPEED. THE DIMMED PILES INCLUDE	

THE EFFICIENCY REDUCTIONS BASED ON IAM AND MISCELLANEOUS WEATHER-RELATED PHENOMENA.....	77
FIGURE 5-25: PROJECTED TEMPERATURE INCREASE BETWEEN INPUT AND OUTPUT COLLECTOR AIR OF THE DIFFERENT 2 M LONG SEA COLLECTOR MODULES BASED ON DIFFERENT MASS FLOWS AND WIND SETTINGS (SEA 2.1) AND A GLOBAL RADIATION OF 1,000 W/M ²	78
FIGURE 5-26: YEARLY ENERGY YIELDS OF THE THREE 2 M ² BIG SEA TYPES WITH VARYING MASS FLOWS OF 100 KG/H TO 800 KG/H AND A WIND INFLUENCE OF 3 M/S CORRESPONDING TO A SOLAR RADIATION OF 1,104 KWH/M ² A (WITHOUT EFFICIENCY REDUCTIONS IAM ETC.).....	79
FIGURE 5-27: COMPARISON OF PROJECTED MONTHLY ENERGY YIELDS OF THE THREE SEA TYPES SEA 2.1, 2.2 AND 2.3 WITH A WIND INFLUENCE OF 3 M/S AND A MASS FLOW OF 100 KG/H WITHOUT EFFICIENCY REDUCTIONS (IAM ETC.) BASED ON THE DATA OF THE SEA1 OBSERVATION YEAR 2010/2011.....	79
FIGURE 5-28: POSITIONS FOR THE MEASUREMENTS FOR THE ABSORBER TEMPERATURES.....	81
FIGURE 5-29: DEPENDENCY OF THE STAGNATION TEMPERATURES (MEAN VALUES OF THE MEASURED ABSORBER TEMPERATURES) ON DIFFERENT RADIATION AND WIND INFLUENCE ...	82
FIGURE 5-30: POSITIONING OF THE TEMPERATURE SENSORS FOR THE SEA COLLECTOR 2.2. THE SANDWICH ELEMENT IS DEPICTED IN BROWN, THE SENSORS ON THE TRAPEZOIDAL SHEET IN BLUE AND THE SENSORS PLUGGED THROUGH THE BACKSIDE MEASURING THE TEMPERATURES OF THE OUTER STEEL SHEET OF THE SANDWICH ELEMENT BENEATH THE ABSORBER ARE DEPICTED IN DOTTED RED CIRCLES.....	83
FIGURE 5-31: DEPICTION OF THE POSITIONAL HEIGHTS WERE TEMPERATURE SENSORS HAVE BEEN BUILT IN DURING CONSTRUCTION OF SEA 2.3.	84
FIGURE 5-32: POSITION OF THE TEMPERATURE SENSORS IN THE SEA COLLECTOR 2.3 DEPENDING ON THE HEIGHT IN THE COLLECTOR	85
FIGURE 5-33: CALCULATION OF THE HOURLY STAGNATION TEMPERATURES (T_SE, BLUE) FOR THE SEA COLLECTOR 2.2 AS FACADE ELEMENT OVER A ONE YEAR PERIOD. GIVEN IN YELLOW ARE THE GLOBAL RADIATION VALUES, I.E. THE EFFECTIVE RADIATION FOR A COLLECTOR WITH DUAL-AXIS-TRACKING OF THE SUN'S MOVEMENT. GREEN REPRESENTS THE CORRESPONDING EFFECTIVE RADIATION FOR A SOUTHERN FACADE VIA WHICH THE STAGNATION TEMPERATURES ARE CALCULATED FOR ANY GIVEN AMBIENCE TEMPERATURE IN THE REFERENCE LOCATION WÜRZBURG.	87
FIGURE 5-34: AMOUNT AND DISTRIBUTION OF HOURS IN A YEAR WITH A TEMPERATURE LOAD OF OVER 80 °C / 90 °C ON THE OUTER METAL SHEET OF THE SANDWICH ELEMENT OF A SEA COLLECTOR 2.2 USED AS SOUTHERN FACADE ELEMENT; CALCULATED FOR THE REFERENCE LOCATION OF WÜRZBURG (BASED ON FIGURE 5-33).	88
FIGURE 6-1: CROSS-SECTIONS OF POSSIBLE COMBINATIONS OF STEEL SHEET AND SANDWICH PROFILES AND THEIR RESPECTIVE CONVERSION TO CHANNEL HEIGHTS OF A FLAT CHANNEL	90
FIGURE 6-2: PARTIAL AREAS OF A TRAPEZOIDAL PROFILE (TOP) AND CORRESPONDING IAM CURVES (BOTTOM).....	93
FIGURE 6-3: POWER DENSITIES ON UNCOILED ABSORBER OVER TRANSVERSAL INCIDENCE ANGLE	93
FIGURE 6-4: CROSS-SECTION OF A POLYCARBONATE DOUBLE-SKIN SHEET WITH DATA IN MM (TOP) AND THE CORRESPONDING TRANSVERSAL AS WELL AS LONGITUDINAL IAM (BOTTOM).....	94
FIGURE 6-5: MODELICA MODEL OF A SEA COLLECTOR 2.1/2.2 WITH TRAPEZOIDAL PROFILE	95
FIGURE 6-6: FLOW VELOCITIES WITHIN THE TRAPEZOIDAL PROFILE.....	96
FIGURE 6-7: TEMPERATURES WITHIN THE TRAPEZOIDAL PROFILE; TOP FIGURE: FRONTAL-TOP VIEW, BOTTOM FIGURE: FRONTAL-BOTTOM VIEW.....	97

Verzeichnisse

Lists

FIGURE 6-8: THERMAL POWER IN TRAPEZOIDAL PROFILE (DIFFERENT SCALES RIGHT AND LEFT) ...	98
FIGURE 6-9: TEMPERATURES IN TRAPEZOIDAL PROFILE (STEEL SHEET/ABSORBER).....	98
FIGURE 6-10: STEPWISE FEM SIMULATION APPROACH.....	99
FIGURE 6-11: ASSUMPTIONS FOR THE FEM SIMULATIONS OF SEA 2.1 (TOP) AND SEA 2.2 (BOTTOM).....	100
FIGURE 6-12: SIMULATED (BLUE) AND MEASURED (RED) EFFICIENCY CURVES OF THE SEA COLLECTOR 2.1.....	101
FIGURE 6-13: SIMULATED (BLUE) AND MEASURED (RED) EFFICIENCY CURVES OF THE SEA COLLECTOR 2.2.....	101
FIGURE 6-14: SCHEMATIC REPRESENTATION OF INVESTIGATED ESSENTIAL COLLECTOR CONSTRUCTIONS (YELLOW = CORE INSULATION, BLACK = ABSORBER, LIGHT BLUE = TRANSPARENT COVER)	102
FIGURE 6-15: SUMMARY OF THE RESULTS ON VARIATIONS OF BOUNDARY CONDITIONS WITH OPTIMIZED CHANNEL HEIGHTS AND MASS FLOWS (ULK = UNCOVERED AIR COLLECTOR, ALK = COVERED AIR COLLECTOR)	103
FIGURE 6-16: MEAN VALUES OF 171 VARIATIONS OF BOUNDARY CONDITIONS WITH 18 K AND 9 K TEMPERATURE RISE.....	104
FIGURE 6-17: CHANNEL HEIGHTS OF FLAT CHANNELS WITH SAME CROSS-SECTIONAL AREA AS THOSE OF THE CONSIDERED EXISTING PROFILED SHEETS.....	105
FIGURE 6-18: COLLECTOR SEA 2.3A (TOP: TOP VIEW, BOTTOM: SIDE VIEW).....	106
FIGURE 6-19: COLLECTOR SEA 2.3B (TOP: TOP VIEW, BOTTOM: SIDE VIEW).....	107
FIGURE 6-20: TEMPERATURES AND VELOCITIES OF COLLECTOR SEA 2.3A AT 100 AND 400 KG/H	108
FIGURE 6-21: TEMPERATURES AND VELOCITIES OF COLLECTOR SEA 2.3B AT 100 AND 400 KG/H	108
FIGURE 6-22: EFFICIENCY CURVES OF THE COVERED COLLECTOR SEA 2.3 AT 100 KG/H (CALCULATED AFTER MODEL CALIBRATION BASED ON MEASUREMENTS) AND OF THE SAME COLLECTOR WITHOUT THE TRANSPARENT COVERING (CALCULATED)	109
FIGURE 6-23: EFFICIENCY CURVES OF THE COLLECTOR SEA 2.3 AT 100 KG/H WITH COLOR RAL 7016 (CALCULATED AFTER MODEL CALIBRATION BASED ON MEASUREMENTS) AND OF THE SAME COLLECTOR WITH COLORS RAL 9007 (ALUMINIUM GREY) AND RAL 9002 (GREY-WHITE)	110
FIGURE 6-24: HEATING OF THE COLLECTOR AIR IN SEA COLLECTOR 2.3 FOR DIFFERENT COLLECTOR MODULE LENGTHS AND MASS FLOWS DEPICTED VIA THE RESPECTIVE INPUT TEMPERATURES T_i AND OUTPUT TEMPERATURES T_e OF THE CORRESPONDING COLLECTOR SECTION WITH GLOBAL RADIATION OF $G = 1000 \text{ W/m}^2$ AND A WIND INFLUENCE OF 3 M/S.....	111
FIGURE 6-25: SPECIFIC OUTPUT PER m^2 FOR DIFFERENT LENGTHS OF A SEA COLLECTOR 2.3 AND THEIR CORRESPONDING OUTPUT TEMPERATURES T_e BASED ON DIFFERENT MASS FLOWS (100 KG/H – 800 KG/H) UNDER THE SAME ENVIRONMENTAL CONDITIONS AS IN FIGURE 6-24	112
FIGURE 6-26: SPECIFIC OUTPUT PER m^2 AND TOTAL OUTPUT FOR DIFFERENT LENGTHS OF A SEA COLLECTOR 2.3 AND DIFFERENT MASS FLOWS UNDER THE SAME ENVIRONMENTAL CONDITIONS AS IN FIGURE 6-24.....	113
FIGURE 7-1: CALCULATION STEPS AND BALANCE LIMITS IN LUKOCALC	119
FIGURE 7-2: ECB REFERENCE HALL BASED ON [BAY11]	120
FIGURE 7-3: DIN USAGE PROFILE FOR ECB REFERENCE HALL AS DEFINED BY THE ECB PROJECT [BAY11]	120

FIGURE 7-4: IRRADIATED SOLAR ENERGY FOR FOUR SURFACE AREAS OF THE OBSERVED INDUSTRIAL BUILDING WITH WEATHER DATA HH TMY	126
FIGURE 7-5: IRRADIATED SOLAR ENERGY FOR FOUR SURFACE AREAS OF THE OBSERVED INDUSTRIAL BUILDING WITH WEATHER DATA HH TMY-MIN	127
FIGURE 7-6: IRRADIATED SOLAR ENERGY FOR FOUR SURFACE AREAS OF THE OBSERVED INDUSTRIAL BUILDING WITH WEATHER DATA HH TMY-MAX.....	127
FIGURE 7-7: IRRADIATED SOLAR ENERGY FOR FOUR SURFACE AREAS OF THE OBSERVED INDUSTRIAL BUILDING WITH WEATHER DATA MUN TMY.....	128
FIGURE 7-8: IRRADIATED SOLAR ENERGY FOR FOUR SURFACE AREAS OF THE OBSERVED INDUSTRIAL BUILDING WITH WEATHER DATA MUN TMY-MIN	128
FIGURE 7-9: IRRADIATED SOLAR ENERGY FOR FOUR SURFACE AREAS OF THE OBSERVED INDUSTRIAL BUILDING WITH WEATHER DATA HH TMY-MAX.....	129
FIGURE 7-10: COLLECTOR ENERGY YIELDS FOR THE FOUR SURFACE AREAS OF THE OBSERVED INDUSTRIAL BUILDING WITH WEATHER DATA OF HH TMY	130
FIGURE 7-11: AS IN FIGURE 7-10 WITH WEATHER DATA FOR HH TMY-MIN	130
FIGURE 7-12: AS IN FIGURE 7-10 WITH WEATHER DATA FOR HH TMY-MAX.....	131
FIGURE 7-13: AS IN FIGURE 7-10 WITH WEATHER DATA FOR MUN TMY	131
FIGURE 7-14: AS IN FIGURE 7-10 WITH WEATHER DATA FOR MUN TMY-MIN	132
FIGURE 7-15: AS IN FIGURE 7-10 WITH WEATHER DATA FOR MUN TMY-MAX.....	132
FIGURE 7-16: MONTHLY BALANCE OF HEAT ENERGY AMOUNTS REQUIRED FOR HEATING OF THE INDUSTRIAL BUILDING WITH WEATHER DATA OF HH TMY	133
FIGURE 7-17: AS IN FIGURE 7-16 WITH WEATHER DATA OF HH TMY-MIN	134
FIGURE 7-18: AS IN FIGURE 7-16 WITH WEATHER DATA OF HH TMY-MAX	134
FIGURE 7-19: AS IN FIGURE 7-16 WITH WEATHER DATA OF MUN TMY	135
FIGURE 7-20: AS IN FIGURE 7-16 WITH WEATHER DATA OF MUN TMY-MIN	136
FIGURE 7-21: AS IN FIGURE 7-16 WITH WEATHER DATA OF MUN TMY-MAX	136
FIGURE 7-22: SORTED ANNUAL DURATION CURVE FOR THE HEATING DEMAND (BLUE) OF THE INDUSTRIAL BUILDING WITH WEATHER DATA OF MUN TMY. FURTHERMORE THE REQUIRED HEATING DEMAND TO BE PROVIDED BY A SUPPLEMENTARY HEAT GENERATOR AFTER DIRECT INPUT OF SOLAR THERMAL HEAT IS SHOWN (ORANGE) AS WELL AS WITH THE INTEGRATION OF A THERMAL STORAGE (GREEN).....	137
FIGURE 7-23: AS IN FIGURE 7-22 WITH WEATHER DATA OF MUN TMY-MIN	138
FIGURE 7-24: AS IN FIGURE 7-22 WITH WEATHER DATA OF MUN TMY-MAX	138
FIGURE 7-25: AS IN FIGURE 7-22 WITH WEATHER DATA OF HH TMY	139
FIGURE 7-26: AS IN FIGURE 7-22 WITH WEATHER DATA OF HH TMY-MIN	139
FIGURE 7-27: AS IN FIGURE 7-22 WITH WEATHER DATA OF HH TMY-MAX	140
FIGURE 7-28: MONTHLY BALANCE OF COOLING ENERGY AMOUNTS REQUIRED FOR COOLING OF THE INDUSTRIAL BUILDING WITH WEATHER DATA OF HH TMY	141
FIGURE 7-29: AS IN FIGURE 7-28 WITH WEATHER DATA OF HH TMY-MIN	142
FIGURE 7-30: AS IN FIGURE 7-28 WITH WEATHER DATA OF HH TMY-MAX	142
FIGURE 7-31: AS IN FIGURE 7-28 WITH WEATHER DATA OF MUN TMY	143
FIGURE 7-32: AS IN FIGURE 7-28 WITH WEATHER DATA OF MUN TMY-MIN	144
FIGURE 7-33: AS IN FIGURE 7-28 WITH WEATHER DATA OF MUN TMY-MAX	144
FIGURE 7-34: SORTED ANNUAL DURATION CURVE FOR THE COOLING DEMAND (BLUE) OF THE INDUSTRIAL BUILDING WITH WEATHER DATA OF HH TMY. FURTHERMORE THE REQUIRED COOLING DEMAND TO BE PROVIDED BY A SUPPLEMENTARY COOLING GENERATOR AFTER	

INTEGRATION OF THE SOLAR THERMAL HEAT VIA A SINGLE-STAGE COOLING UNIT IS SHOWN (RED).....	145
FIGURE 7-35: AS IN FIGURE 7-34 WITH WEATHER DATA OF HH TMY-MIN.....	146
FIGURE 7-36: AS IN FIGURE 7-34 WITH WEATHER DATA OF HH TMY-MAX.....	146
FIGURE 7-37: AS IN FIGURE 7-34 WITH WEATHER DATA OF MUN TMY.....	147
FIGURE 7-38: AS IN FIGURE 7-34 WITH WEATHER DATA OF MUN TMY-MAX.....	147
FIGURE 7-39: COLLECTOR ENERGY YIELDS FOR THE FOUR SURFACE AREAS OF THE OBSERVED INDUSTRIAL BUILDING WITH WEATHER DATA OF HH TMY	155
FIGURE 7-40: AS IN FIGURE 7-39 WITH WEATHER DATA OF MUN TMY.....	155
FIGURE 7-41: MONTHLY BALANCE OF HEAT ENERGY AMOUNTS REQUIRED FOR HEATING OF THE INDUSTRIAL BUILDING WITH WEATHER DATA OF HH TMY	156
FIGURE 7-42: AS IN FIGURE 7-41 WITH WEATHER DATA FOR MUN TMY.....	157
FIGURE 7-43: SORTED ANNUAL DURATION CURVE FOR THE HEATING DEMAND (BLUE) OF THE INDUSTRIAL BUILDING WITH WEATHER DATA OF HH TMY. FURTHERMORE THE REQUIRED HEATING DEMAND TO BE PROVIDED BY A SUPPLEMENTARY HEAT GENERATOR AFTER DIRECT INPUT OF SOLAR THERMAL HEAT IS SHOWN (ORANGE) AS WELL AS WITH THE INTEGRATION OF A THERMAL STORAGE (GREEN).....	157
FIGURE 7-44: AS IN FIGURE 7-43 WITH WEATHER DATA FOR MUN TMY.....	158
FIGURE 7-45: MONTHLY BALANCE OF COOLING ENERGY AMOUNTS REQUIRED FOR COOLING OF THE INDUSTRIAL BUILDING WITH WEATHER DATA OF HH TMY	159
FIGURE 7-46: AS IN FIGURE 7-45 WITH WEATHER DATA FOR MUN TMY.....	159
FIGURE 7-47: SORTED ANNUAL DURATION CURVE FOR THE COOLING DEMAND (BLUE) OF THE INDUSTRIAL BUILDING WITH WEATHER DATA OF HH TMY. FURTHERMORE THE REQUIRED COOLING DEMAND TO BE PROVIDED BY A SUPPLEMENTARY COOLING GENERATOR AFTER INTEGRATION OF THE SOLAR THERMAL HEAT VIA A SINGLE-STAGE COOLING UNIT IS SHOWN (RED).....	160
FIGURE 7-48: AS IN FIGURE 7-47 WITH WEATHER DATA FOR MUN TMY.....	160
FIGURE 7-49: COLLECTOR ENERGY YIELDS FOR THE FOUR SURFACE AREAS OF THE OBSERVED INDUSTRIAL BUILDING WITH WEATHER DATA OF HH TMY	164
FIGURE 7-50: AS IN FIGURE 7-49 WITH WEATHER DATA FOR MUN TMY.....	164
FIGURE 7-51: MONTHLY BALANCE OF HEAT ENERGY AMOUNTS REQUIRED FOR HEATING OF THE INDUSTRIAL BUILDING WITH WEATHER DATA OF HH TMY	165
FIGURE 7-52: AS IN FIGURE 7-51 WITH WEATHER DATA FOR MUN TMY.....	166
FIGURE 7-53: SORTED ANNUAL DURATION CURVE FOR THE HEATING DEMAND (BLUE) OF THE INDUSTRIAL BUILDING WITH WEATHER DATA OF HH TMY. FURTHERMORE THE REQUIRED HEATING DEMAND TO BE PROVIDED BY A SUPPLEMENTARY HEAT GENERATOR AFTER DIRECT INPUT OF SOLAR THERMAL HEAT IS SHOWN (ORANGE) AS WELL AS WITH THE INTEGRATION OF A THERMAL STORAGE (GREEN).....	166
FIGURE 7-54: AS IN FIGURE 7-53 WITH WEATHER DATA FOR MUN TMY.....	167
FIGURE 7-55: MONTHLY BALANCE OF COOLING ENERGY AMOUNTS REQUIRED FOR COOLING OF THE INDUSTRIAL BUILDING WITH WEATHER DATA OF HH TMY	168
FIGURE 7-56: AS IN FIGURE 7-55 WITH WEATHER DATA FOR MUN TMY.....	168
FIGURE 7-57: SORTED ANNUAL DURATION CURVE FOR THE COOLING DEMAND (BLUE) OF THE INDUSTRIAL BUILDING WITH WEATHER DATA OF HH TMY. FURTHERMORE THE REQUIRED COOLING DEMAND TO BE PROVIDED BY A SUPPLEMENTARY COOLING GENERATOR AFTER	

INTEGRATION OF THE SOLAR THERMAL HEAT VIA A SINGLE-STAGE COOLING UNIT IS SHOWN (RED)	169
FIGURE 7-58: AS IN FIGURE 7-57 WITH WEATHER DATA FOR MUN TMY	169
FIGURE 8-1: OUTPUT GAIN PER M ² OF SEA 2.1 AND 2.2 BASED ON 3 M/S (100%) FOR LOWER VALUES WITH A MASS FLOW OF 100 KG/H.....	176
FIGURE 8-2: CLIMATE MAP OF WIND SPEEDS IN M/S FOR THE PERIOD OF 1995 - 2008 BASED ON HOURLY OBSERVATION; SOURCE: [DWD17B].....	177
FIGURE 8-3: PHOTO OF THE OBSERVED CORRUGATION OF THE PC SHEET UNDER STAGNATION (SEA 2.3)	179
FIGURE 8-4: TEMPERATURE PROFILES OF THE OUTER SURFACES OF THE REFERENCE SE (BLUE LINE), THE TRAPEZOIDAL STEEL SHEET (= ABSORBER, BLACK LINE) AND THE SE BELOW THE ABSORBER (ORANGE LINE) FOR THE ROOF OF THE SEA1 MEASURING CELL AS WELL AS OF THE OUTER AMBIENT AIR AS MEASURED DURING A SUNNY SAMPLE DAY (DAILY SUM OF SOLAR ENERGY ON THE ROOF WAS 7,962 WH/M ²) WITHIN THE SEA1 RESEARCH PROJECT.....	185
FIGURE 8-5: SAMPLES FROM THE PRESENTATION BY FACADE-LAB DISPLAYING ARCHITECTONIC DESIGN WITH SEA SIMILAR FACADES, LEFT PICTURE: DATA STORAGE CENTER, BASEL, SCHWEIZ, ARCH.: FFBK ARCHITECT; RIGHT PICTURE: REISS HEADQUARTER, LONDON, UK, ARCH.: SQUIRE & PARTNERS	187

Tabellenverzeichnis

TABELLE 2-1: NICHTWOHNGBÄUDE 2015 MIT METALLEICHTBAUELEMENTEN, MARKTERFASSUNG 65 %; QUELLE: [IFBS16].....	6
TABELLE 2-2: NICHTWOHNGBÄUDE 2015 MIT METALLEICHTBAUELEMENTEN, MARKTABDECKUNG 100 %	6
TABELLE 2-3: INDUSTRIE- UND HALLENBAU 2015 MIT METALLEICHTBAUELEMENTEN, MARKTERFASSUNG 100 %	7
TABELLE 2-4: INDUSTRIE- UND HALLENBAU 2015 MIT METALLEICHTBAUELEMENTEN, MARKANTEIL 70 % (HALLEN MIT HEIZ- ODER KÜHL- ODER KÄLTEBEDARF).....	7
TABELLE 2-5: JÄHRLICHE FLÄCHENWERTE, VERTEILT NACH FASSADEN UND DACH (2015).....	7
TABELLE 2-6: JÄHRLICHER FLÄCHENBAU UND ENTSPRECHENDER ENERGIEERTRAG DER BEI VERSCHIEDENEN MARKTANTEILEN VON SEA REALISIERT WERDEN KÖNNTE (2015).....	8
TABELLE 2-7: EFFEKTIVE ENERGIEERTRÄGE DES WAND- UND DACHKOLLEKTORS DER SEA1-MESSZELLE PRO QUADRATMETER ÜBER DAS MESSJAHR; QUELLE: [FOS14A].....	14
TABELLE 2-8: BEISPIELE ZUR MÖGLICHEN ENERGIEENTZUG FÜR DAS SEA-PRINZIP; QUELLE: [FOS14B].....	18
TABELLE 5-1: ÜBERSICHT ZU DEN DREI VERMESSENEN SEA-KOLLEKTOREN: UNTERSCHIEDE UND ZENTRALE UNTERSUCHUNGSGEGENSTÄNDE	52
TABELLE 5-2: ERGEBNISSE DER LEISTUNGSMESSUNG DES SEA-KOLLEKTORS 2.1	57
TABELLE 5-3: ERMITTLUNG DER MITTLEREN LUFTTEMPERATUREN, MIT DENEN SEA 2.1 IN SCENOCALC-BERECHNUNGEN DIE ENERGIEERTRÄGE VON SEA 1 ERREICHT	60
TABELLE 5-4: ERGEBNISSE DER LEISTUNGSMESSUNG DES SEA-KOLLEKTORS 2.2.....	64
TABELLE 5-5: VERGLEICH DER JAHRESBRUTTOENERGIEERTRÄGE AUF BASIS DER SCENOCALC-BERECHNUNGEN AUS SEA 2.2 UND DER PROJEKTION AUS EINER DYNAMISCHEN JAHRESSIMULATION FÜR SEA 2.2 AUF BASIS DER WETTER-MESSDATEN ZU STRAHLUNG UND TEMPERATUR AUS DEM SEA1-FORSCHUNGSPROJEKT.....	66
TABELLE 5-6: ERGEBNISSE DER LEISTUNGSMESSUNG DES SEA-KOLLEKTORS 2.3.....	73
TABELLE 5-7: VERGLEICH DER JAHRESBRUTTOENERGIEERTRÄGE AUF BASIS DER SCENOCALC-BERECHNUNGEN AUS SEA 2.3 UND DER PROJEKTION AUS EINER DYNAMISCHEN JAHRESSIMULATION FÜR SEA 2.3 AUF BASIS DER WETTER-MESSDATEN ZU STRAHLUNG UND TEMPERATUR AUS DEM SEA1-FORSCHUNGSPROJEKT.....	74
TABELLE 5-8: WIRKUNGSGRAD FÜR EIN 2 M ² GROSSES SEA-KOLLEKTORMODUL, BEI DEM UMGEBUNGSLUFT ANGESAUGT WIRD ($T_1 = T_A$) FÜR VERSCHIEDENE MASSENSTRÖME UND WINDEINFLÜSSE (SEA 2.1)	75
TABELLE 5-9: JAHRESBRUTTOERTRÄGE, WIRKUNGSGRAD UND AUSTRITTS-LUFTTEMPERATUREN DER SEA-KOLLEKTOREN 1 (GEMESSEN), 2.1, 2.2 UND 2.3 (PROJIZIERT) AUF BASIS DER DATEN DES SEA1-MESSJAHRES 2010/2011.....	76
TABELLE 5-10: DARSTELLUNG DER GEMESSENEN TEMPERATURWERTE IN °C AUF DEM ABSORBER (TRAPEZBLECH) DES SEA-KOLLEKTORS 2.1	81
TABELLE 5-11: STAGNATIONSTEMPERATURWERTE IN °C DES ÄUßEREN STAHLBLECHS (UNTER DEM TRAPEZBLECH) DES SANDWICH-ELEMENTS.....	83
TABELLE 5-12: STAGNATIONSTEMPERATURWERTE IN °C AUF DEM TRAPEZBLECH (ABSORBER) GEMESSEN; ¹⁾ BEI DIESEN SENSOREN KONNTE EIN SICHERER KONTAKT ZWISCHEN SENSOR	

UND ABSORBERBLECH NICHT HERGESTELLT WERDEN. DIE SENSORWERTE SIND ZU NIEDRIG.	84
TABELLE 5-13: DIE GEMESSENEN STAGNATIONSTEMPERATURWERTE IN ABHÄNGIGKEIT ZUR IN ABBILDUNG 5-32 ANGEgebenEN POSITION IM SEA-KOLLEKTOR 2.3	85
TABELLE 7-1: WESENTLICHE PARAMETER UND GRÖßEN DER BETRACHTETEN INDUSTRIEHALLE	122
TABELLE 7-2: CHARAKTERISTIKA DER BERECHNETEN INDUSTRIEHALLE UND BAUPHYSIKALISCHE PARAMETER	122
TABELLE 7-3: BETRIEBSZEITEN UND AUFTEILUNG DER INTERNEN WÄRMEGEWINNE IN DER INDUSTRIEHALLE	122
TABELLE 7-4: WETTERDATENSATZ HH TMY: AUS DEN CHARAKTERISTIKA DER INDUSTRIEHALLE SOWIE DEREN NUTZUNGSKONZEPT BERECHNETE AN HEIZWÄRME- UND KÜHLBEDARF. ES ERFOLGT EINE NACHTABSENKUNG ZWISCHEN 16 UHR UND 7 UHR MIT KEINEM MECHANISCHEN LUFTWECHSEL.....	123
TABELLE 7-5: WETTERDATENSATZ HH TMY-MIN: AUS DEN CHARAKTERISTIKA DER INDUSTRIEHALLE SOWIE DEREN NUTZUNGSKONZEPT BERECHNETE AN HEIZWÄRME- UND KÜHLBEDARF. ES ERFOLGT EINE NACHTABSENKUNG ZWISCHEN 16 UHR UND 7 UHR MIT KEINEM MECHANISCHEN LUFTWECHSEL.....	123
TABELLE 7-6: WETTERDATENSATZ HH TMY-MAX: AUS DEN CHARAKTERISTIKA DER INDUSTRIEHALLE SOWIE DEREN NUTZUNGSKONZEPT BERECHNETE AN HEIZWÄRME- UND KÜHLBEDARF. ES ERFOLGT EINE NACHTABSENKUNG ZWISCHEN 16 UHR UND 7 UHR MIT KEINEM MECHANISCHEN LUFTWECHSEL.....	123
TABELLE 7-7: WETTERDATENSATZ MUN TMY: AUS DEN CHARAKTERISTIKA DER INDUSTRIEHALLE SOWIE DEREN NUTZUNGSKONZEPT BERECHNETE AN HEIZWÄRME- UND KÜHLBEDARF. ES ERFOLGT EINE NACHTABSENKUNG ZWISCHEN 16 UHR UND 7 UHR MIT KEINEM MECHANISCHEN LUFTWECHSEL.....	124
TABELLE 7-8: WETTERDATENSATZ MUN TMY-MIN: AUS DEN CHARAKTERISTIKA DER INDUSTRIEHALLE SOWIE DEREN NUTZUNGSKONZEPT BERECHNETE AN HEIZWÄRME- UND KÜHLBEDARF. ES ERFOLGT EINE NACHTABSENKUNG ZWISCHEN 16 UHR UND 7 UHR MIT KEINEM MECHANISCHEN LUFTWECHSEL.....	124
TABELLE 7-9: WETTERDATENSATZ MUN TMY-MAX: AUS DEN CHARAKTERISTIKA DER INDUSTRIEHALLE SOWIE DEREN NUTZUNGSKONZEPT BERECHNETE AN HEIZWÄRME- UND KÜHLBEDARF. ES ERFOLGT EINE NACHTABSENKUNG ZWISCHEN 16 UHR UND 7 UHR MIT KEINEM MECHANISCHEN LUFTWECHSEL.....	124
TABELLE 7-10: PARAMETER DER BETRACHTETEN KOLLEKTORTYPEN.....	124
TABELLE 7-11: MAXIMAL MÖGLICHER KOLLEKTORFELDBRUTTOERTRAG (BERECHNET) UND DESSEN NUTZUNG FÜR DIE ANWENDUNGEN BEHEIZUNG UND PROZESSWÄRME MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR HH TMY	133
TABELLE 7-12: MAXIMAL MÖGLICHER KOLLEKTORFELDBRUTTOERTRAG (BERECHNET) UND DESSEN NUTZUNG FÜR DIE ANWENDUNGEN BEHEIZUNG UND PROZESSWÄRME MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR HH TMY-MIN	133
TABELLE 7-13: MAXIMAL MÖGLICHER KOLLEKTORFELDBRUTTOERTRAG (BERECHNET) UND DESSEN NUTZUNG FÜR DIE ANWENDUNGEN BEHEIZUNG UND PROZESSWÄRME MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR HH TMY-MAX.....	134
TABELLE 7-14: MAXIMAL MÖGLICHER KOLLEKTORFELDBRUTTOERTRAG (BERECHNET) UND DESSEN NUTZUNG FÜR DIE ANWENDUNGEN BEHEIZUNG UND PROZESSWÄRME MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR MUN TMY	135

Verzeichnisse

Lists

TABELLE 7-15: MAXIMAL MÖGLICHER KOLLEKTORFELDBRUTTOERTRAG (BERECHNET) UND DESSEN NUTZUNG FÜR DIE ANWENDUNGEN BEHEIZUNG UND PROZESSWÄRME MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR MUN TMY-MIN	135
TABELLE 7-16: MAXIMAL MÖGLICHER KOLLEKTORFELDBRUTTOERTRAG (BERECHNET) UND DESSEN NUTZUNG FÜR DIE ANWENDUNGEN BEHEIZUNG UND PROZESSWÄRME MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR MUN TMY-MAX.....	136
TABELLE 7-17: KOLLEKTORFELDBRUTTOERTRAG (BERECHNET) ZUM DIREKTEN ANTRIEB EINER EINSTUFIGEN, THERMISCHEN KÄLTEMASCHINE MIT EINER MINIMALEN ANTRIEBSTEMPERATUR VON 65 °C UND DER RESULTIERENDE SOLARE DECKUNGSANTEIL AM KÜHLBEDARF MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR HH TMY	141
TABELLE 7-18: KOLLEKTORFELDBRUTTOERTRAG (BERECHNET) ZUM DIREKTEN ANTRIEB EINER EINSTUFIGEN, THERMISCHEN KÄLTEMASCHINE MIT EINER MINIMALEN ANTRIEBSTEMPERATUR VON 65 °C UND DER RESULTIERENDE SOLARE DECKUNGSANTEIL AM KÜHLBEDARF MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR HH TMY-MIN	141
TABELLE 7-19: KOLLEKTORFELDBRUTTOERTRAG (BERECHNET) ZUM DIREKTEN ANTRIEB EINER EINSTUFIGEN, THERMISCHEN KÄLTEMASCHINE MIT EINER MINIMALEN ANTRIEBSTEMPERATUR VON 65 °C UND DER RESULTIERENDE SOLARE DECKUNGSANTEIL AM KÜHLBEDARF MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR HH TMY-MAX.....	142
TABELLE 7-20: KOLLEKTORFELDBRUTTOERTRAG (BERECHNET) ZUM DIREKTEN ANTRIEB EINER EINSTUFIGEN, THERMISCHEN KÄLTEMASCHINE MIT EINER MINIMALEN ANTRIEBSTEMPERATUR VON 65 °C UND DER RESULTIERENDE SOLARE DECKUNGSANTEIL AM KÜHLBEDARF MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR MUN TMY	143
TABELLE 7-21: KOLLEKTORFELDBRUTTOERTRAG (BERECHNET) ZUM DIREKTEN ANTRIEB EINER EINSTUFIGEN, THERMISCHEN KÄLTEMASCHINE MIT EINER MINIMALEN ANTRIEBSTEMPERATUR VON 65 °C UND DER RESULTIERENDE SOLARE DECKUNGSANTEIL AM KÜHLBEDARF MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR MUN TMY-MIN	143
TABELLE 7-22: KOLLEKTORFELDBRUTTOERTRAG (BERECHNET) ZUM DIREKTEN ANTRIEB EINER EINSTUFIGEN, THERMISCHEN KÄLTEMASCHINE MIT EINER MINIMALEN ANTRIEBSTEMPERATUR VON 65 °C UND DER RESULTIERENDE SOLARE DECKUNGSANTEIL AM KÜHLBEDARF MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR MUN TMY-MAX.....	144
TABELLE 7-23: ENDENERGIEBEDARF DER SEKUNDÄREN ERZEUGUNGSEINHEITEN, DER DURCH DEN EINSATZ DES SOLARTHHERMISCHEN WÄRMEERZEUGERS REDUZIERT WIRD. DIE SOLARTHHERMISCH ERZEUGTE ENERGIE WIRD DABEI DIREKT OHNE SPEICHERUNG EINGEBUNDEN.	149
TABELLE 7-24: ENDENERGIEBEDARF DER SEKUNDÄREN ERZEUGUNGSEINHEITEN, DER DURCH DEN EINSATZ DES SOLARTHHERMISCHEN WÄRMEERZEUGERS REDUZIERT WIRD. DIE SOLARTHHERMISCH ERZEUGTE ENERGIE WIRD DABEI ZUSÄTZLICH ÜBER EINEN THERMISCHEN SPEICHER GEFÜHRT UND DORT ZWISCHENGESPEICHERT, SO DASS SICH DER ENERGIEBEDARF DER SEKUNDÄREN ERZEUGUNGSEINHEITEN WEITER REDUZIEREN LÄSST.	149
TABELLE 7-25: ENDENERGIEBEDARF EINER LUFT-WÄRMEPUMPE ALS SEKUNDÄRE ERZEUGUNGSEINHEIT, WENN IN DIESE SOLARTHHERMISCH ERZEUGTE WÄRME ZUR QUELLANHEBUNG EINGEBUNDEN WIRD. DER COP IST DABEI EINE FUNKTION DER QUELLTEMPERATUR DER AUßENLUFT, DIE BEI EINBINDUNG VON ST UM 10 K ANGEHOBEN WIRD.....	150
TABELLE 7-26: ENDENERGIEBEDARF DER SEKUNDÄREN ERZEUGUNGSEINHEITEN, DER DURCH DEN EINSATZ DES SOLARTHHERMISCHEN WÄRMEERZEUGERS REDUZIERT WIRD. DIE	

SOLARTHERMISCH ERZEUGTE ENERGIE WIRD DABEI DIREKT OHNE SPEICHERUNG EINGEBUNDEN.	150
TABELLE 7-27: ENDENERGIEBEDARF DER SEKUNDÄREN ERZEUGUNGSEINHEITEN, DER DURCH DEN EINSATZ DES SOLARTHERMISCHEN WÄRMEERZEUGERS REDUZIERT WIRD. DIE SOLARTHERMISCH ERZEUGTE ENERGIE WIRD DABEI ZUSÄTZLICH ÜBER EINEN THERMISCHEN SPEICHER GEFÜHRT UND DORT ZWISCHENGESPEICHERT, SO DASS SICH DER ENERGIEBEDARF DER SEKUNDÄREN ERZEUGUNGSEINHEITEN WEITER REDUZIEREN LÄSST.	150
TABELLE 7-28: ENDENERGIEBEDARF EINER LUFT-WÄRMEPUMPE ALS SEKUNDÄRE ERZEUGUNGSEINHEIT, WENN IN DIESE SOLARTHERMISCH ERZEUGTE WÄRME ZUR QUELLANHEBUNG EINGEBUNDEN WIRD. DER COP IST DABEI EINE FUNKTION DER QUELLTEMPERATUR DER AUßENLUFT, DIE BEI EINBINDUNG VON ST UM 10 K ANGEHOBEN WIRD.	150
TABELLE 7-29: ENDENERGIEBEDARF DER SEKUNDÄREN ERZEUGUNGSEINHEITEN, DER DURCH DEN EINSATZ DES SOLARTHERMISCHEN WÄRMEERZEUGERS REDUZIERT WIRD. DIE SOLARTHERMISCH ERZEUGTE ENERGIE WIRD DABEI DIREKT OHNE SPEICHERUNG EINGEBUNDEN.	151
TABELLE 7-30: ENDENERGIEBEDARF DER SEKUNDÄREN ERZEUGUNGSEINHEITEN, DER DURCH DEN EINSATZ DES SOLARTHERMISCHEN WÄRMEERZEUGERS REDUZIERT WIRD. DIE SOLARTHERMISCH ERZEUGTE ENERGIE WIRD DABEI ZUSÄTZLICH ÜBER EINEN THERMISCHEN SPEICHER GEFÜHRT UND DORT ZWISCHENGESPEICHERT, SO DASS SICH DER ENERGIEBEDARF DER SEKUNDÄREN ERZEUGUNGSEINHEITEN WEITER REDUZIEREN LÄSST.	151
TABELLE 7-31: ENDENERGIEBEDARF EINER LUFT-WÄRMEPUMPE ALS SEKUNDÄRE ERZEUGUNGSEINHEIT, WENN IN DIESE SOLARTHERMISCH ERZEUGTE WÄRME ZUR QUELLANHEBUNG EINGEBUNDEN WIRD. DER COP IST DABEI EINE FUNKTION DER QUELLTEMPERATUR DER AUßENLUFT, DIE BEI EINBINDUNG VON ST UM 10 K ANGEHOBEN WIRD.	151
TABELLE 7-32: ENDENERGIEBEDARF DER SEKUNDÄREN ERZEUGUNGSEINHEITEN, DER DURCH DEN EINSATZ DES SOLARTHERMISCHEN WÄRMEERZEUGERS REDUZIERT WIRD. DIE SOLARTHERMISCH ERZEUGTE ENERGIE WIRD DABEI DIREKT OHNE SPEICHERUNG EINGEBUNDEN.	151
TABELLE 7-33: ENDENERGIEBEDARF DER SEKUNDÄREN ERZEUGUNGSEINHEITEN, DER DURCH DEN EINSATZ DES SOLARTHERMISCHEN WÄRMEERZEUGERS REDUZIERT WIRD. DIE SOLARTHERMISCH ERZEUGTE ENERGIE WIRD DABEI ZUSÄTZLICH ÜBER EINEN THERMISCHEN SPEICHER GEFÜHRT UND DORT ZWISCHENGESPEICHERT, SO DASS SICH DER ENERGIEBEDARF DER SEKUNDÄREN ERZEUGUNGSEINHEITEN WEITER REDUZIEREN LÄSST.	152
TABELLE 7-34: ENDENERGIEBEDARF EINER LUFT-WÄRMEPUMPE ALS SEKUNDÄRE ERZEUGUNGSEINHEIT, WENN IN DIESE SOLARTHERMISCH ERZEUGTE WÄRME ZUR QUELLANHEBUNG EINGEBUNDEN WIRD. DER COP IST DABEI EINE FUNKTION DER QUELLTEMPERATUR DER AUßENLUFT, DIE BEI EINBINDUNG VON ST UM 10 K ANGEHOBEN WIRD.	152
TABELLE 7-35: ENDENERGIEBEDARF DER SEKUNDÄREN ERZEUGUNGSEINHEITEN, DER DURCH DEN EINSATZ DES SOLARTHERMISCHEN WÄRMEERZEUGERS REDUZIERT WIRD. DIE SOLARTHERMISCH ERZEUGTE ENERGIE WIRD DABEI DIREKT OHNE SPEICHERUNG EINGEBUNDEN.	152
TABELLE 7-36: ENDENERGIEBEDARF DER SEKUNDÄREN ERZEUGUNGSEINHEITEN, DER DURCH DEN EINSATZ DES SOLARTHERMISCHEN WÄRMEERZEUGERS REDUZIERT WIRD. DIE	

SOLARTHERMISCH ERZEUGTE ENERGIE WIRD DABEI ZUSÄTZLICH ÜBER EINEN THERMISCHEN SPEICHER GEFÜHRT UND DORT ZWISCHENGESPEICHERT, SO DASS SICH DER ENERGIEBEDARF DER SEKUNDÄREN ERZEUGUNGSEINHEITEN WEITER REDUZIEREN LÄSST.	152
TABELLE 7-37: ENDENERGIEBEDARF EINER LUFT-WÄRMEPUMPE ALS SEKUNDÄRE ERZEUGUNGSEINHEIT, WENN IN DIESE SOLARTHERMISCH ERZEUGTE WÄRME ZUR QUELLANHEBUNG EINGEBUNDEN WIRD. DER COP IST DABEI EINE FUNKTION DER QUELLTEMPERATUR DER AUßENLUFT, DIE BEI EINBINDUNG VON ST UM 10 K ANGEHOBBEN WIRD.....	153
TABELLE 7-38: ENDENERGIEBEDARF DER SEKUNDÄREN ERZEUGUNGSEINHEITEN, DER DURCH DEN EINSATZ DES SOLARTHERMISCHEN WÄRMEERZEUGERS REDUZIERT WIRD. DIE SOLARTHERMISCH ERZEUGTE ENERGIE WIRD DABEI DIREKT OHNE SPEICHERUNG EINGEBUNDEN.	153
TABELLE 7-39: ENDENERGIEBEDARF DER SEKUNDÄREN ERZEUGUNGSEINHEITEN, DER DURCH DEN EINSATZ DES SOLARTHERMISCHEN WÄRMEERZEUGERS REDUZIERT WIRD. DIE SOLARTHERMISCH ERZEUGTE ENERGIE WIRD DABEI ZUSÄTZLICH ÜBER EINEN THERMISCHEN SPEICHER GEFÜHRT UND DORT ZWISCHENGESPEICHERT, SO DASS SICH DER ENERGIEBEDARF DER SEKUNDÄREN ERZEUGUNGSEINHEITEN WEITER REDUZIEREN LÄSST.	153
TABELLE 7-40: ENDENERGIEBEDARF EINER LUFT-WÄRMEPUMPE ALS SEKUNDÄRE ERZEUGUNGSEINHEIT, WENN IN DIESE SOLARTHERMISCH ERZEUGTE WÄRME ZUR QUELLANHEBUNG EINGEBUNDEN WIRD. DER COP IST DABEI EINE FUNKTION DER QUELLTEMPERATUR DER AUßENLUFT, DIE BEI EINBINDUNG VON ST UM 10 K ANGEHOBBEN WIRD.....	153
TABELLE 7-41: MAXIMAL MÖGLICHER KOLLEKTORFELDBRUTTOERTRAG (BERECHNET) UND DESSEN NUTZUNG FÜR DIE ANWENDUNGEN BEHEIZUNG UND PROZESSWÄRME MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR HH TMY.....	156
TABELLE 7-42: MAXIMAL MÖGLICHER KOLLEKTORFELDBRUTTOERTRAG (BERECHNET) UND DESSEN NUTZUNG FÜR DIE ANWENDUNGEN BEHEIZUNG UND PROZESSWÄRME MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR MUN TMY.....	156
TABELLE 7-43: KOLLEKTORFELDBRUTTOERTRAG (BERECHNET) ZUM DIREKTEN ANTRIEB EINER EINSTUFIGEN, THERMISCHEN KÄLTEMASCHINE MIT EINER MINIMALEN ANTRIEBSTEMPERATUR VON 65 °C UND DER RESULTIERENDE SOLARE DECKUNGSANTEIL AM KÜHLBEDARF MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR HH TMY.....	158
TABELLE 7-44: KOLLEKTORFELDBRUTTOERTRAG (BERECHNET) ZUM DIREKTEN ANTRIEB EINER EINSTUFIGEN, THERMISCHEN KÄLTEMASCHINE MIT EINER MINIMALEN ANTRIEBSTEMPERATUR VON 65 °C UND DER RESULTIERENDE SOLARE DECKUNGSANTEIL AM KÜHLBEDARF MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR MUN TMY.....	159
TABELLE 7-45: ENDENERGIEBEDARF DER SEKUNDÄREN ERZEUGUNGSEINHEITEN, DER DURCH DEN EINSATZ DES SOLARTHERMISCHEN WÄRMEERZEUGERS REDUZIERT WIRD. DIE SOLARTHERMISCH ERZEUGTE ENERGIE WIRD DABEI DIREKT OHNE SPEICHERUNG EINGEBUNDEN.	161
TABELLE 7-46: ENDENERGIEBEDARF DER SEKUNDÄREN ERZEUGUNGSEINHEITEN, DER DURCH DEN EINSATZ DES SOLARTHERMISCHEN WÄRMEERZEUGERS REDUZIERT WIRD. DIE SOLARTHERMISCH ERZEUGTE ENERGIE WIRD DABEI ZUSÄTZLICH ÜBER EINEN THERMISCHEN SPEICHER GEFÜHRT UND DORT ZWISCHENGESPEICHERT, SO DASS SICH DER ENERGIEBEDARF DER SEKUNDÄREN ERZEUGUNGSEINHEITEN WEITER REDUZIEREN LÄSST.	161

TABELLE 7-47: ENDENERGIEBEDARF EINER LUFT-WÄRMEPUMPE ALS SEKUNDÄRE ERZEUGUNGSEINHEIT, WENN IN DIESE SOLAR THERMISCH ERZEUGTE WÄRME ZUR QUELLANHEBUNG EINGEBUNDEN WIRD. DER COP IST DABEI EINE FUNKTION DER QUELLTEMPERATUR DER AUßENLUFT, DIE BEI EINBINDUNG VON ST UM 10 K ANGEHO BEN WIRD.	161
TABELLE 7-48: ENDENERGIEBEDARF DER SEKUNDÄREN ERZEUGUNGSEINHEITEN, DER DURCH DEN EINSATZ DES SOLAR THERMISCHEN WÄRMEERZEUGERS REDUZIERT WIRD. DIE SOLAR THERMISCH ERZEUGTE ENERGIE WIRD DABEI DIREKT OHNE SPEICHERUNG EINGEBUNDEN.	162
TABELLE 7-49: ENDENERGIEBEDARF DER SEKUNDÄREN ERZEUGUNGSEINHEITEN, DER DURCH DEN EINSATZ DES SOLAR THERMISCHEN WÄRMEERZEUGERS REDUZIERT WIRD. DIE SOLAR THERMISCH ERZEUGTE ENERGIE WIRD DABEI ZUSÄTZLICH ÜBER EINEN THERMISCHEN SPEICHER GEFÜHRT UND DORT ZWISCHENGESPEICHERT, SO DASS SICH DER ENERGIEBEDARF DER SEKUNDÄREN ERZEUGUNGSEINHEITEN WEITER REDUZIEREN LÄSST.	162
TABELLE 7-50: ENDENERGIEBEDARF EINER LUFT-WÄRMEPUMPE ALS SEKUNDÄRE ERZEUGUNGSEINHEIT, WENN IN DIESE SOLAR THERMISCH ERZEUGTE WÄRME ZUR QUELLANHEBUNG EINGEBUNDEN WIRD. DER COP IST DABEI EINE FUNKTION DER QUELLTEMPERATUR DER AUßENLUFT, DIE BEI EINBINDUNG VON ST UM 10 K ANGEHO BEN WIRD.	162
TABELLE 7-51: MAXIMAL MÖGLICHER KOLLEKTORFELDBRUTTOERTRAG (BERECHNET) UND DESSEN NUTZUNG FÜR DIE ANWENDUNGEN BEHEIZUNG UND PROZESSWÄRME MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR HH TMY	165
TABELLE 7-52: MAXIMAL MÖGLICHER KOLLEKTORFELDBRUTTOERTRAG (BERECHNET) UND DESSEN NUTZUNG FÜR DIE ANWENDUNGEN BEHEIZUNG UND PROZESSWÄRME MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR MUN TMY	165
TABELLE 7-53: KOLLEKTORFELDBRUTTOERTRAG (BERECHNET) ZUM DIREKTEN ANTRIEB EINER EINSTUFIGEN, THERMISCHEN KÄLTEMASCHINE MIT EINER MINIMALEN ANTRIEBSTEMP ERATUR VON 65°C UND DER RESULTIERENDE SOLARE DECKUNGSANTEIL AM KÜHLBEDARF MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR HH TMY	167
TABELLE 7-54: KOLLEKTORFELDBRUTTOERTRAG (BERECHNET) ZUM DIREKTEN ANTRIEB EINER EINSTUFIGEN, THERMISCHEN KÄLTEMASCHINE MIT EINER MINIMALEN ANTRIEBSTEMP ERATUR VON 65°C UND DER RESULTIERENDE SOLARE DECKUNGSANTEIL AM KÜHLBEDARF MIT DEM WETTERDATENSATZ FÜR MUN TMY	168
TABELLE 7-55: ENDENERGIEBEDARF DER SEKUNDÄREN ERZEUGUNGSEINHEITEN, DER DURCH DEN EINSATZ DES SOLAR THERMISCHEN WÄRMEERZEUGERS REDUZIERT WIRD. DIE SOLAR THERMISCH ERZEUGTE ENERGIE WIRD DABEI DIREKT OHNE SPEICHERUNG EINGEBUNDEN.	170
TABELLE 7-56: ENDENERGIEBEDARF DER SEKUNDÄREN ERZEUGUNGSEINHEITEN, DER DURCH DEN EINSATZ DES SOLAR THERMISCHEN WÄRMEERZEUGERS REDUZIERT WIRD. DIE SOLAR THERMISCH ERZEUGTE ENERGIE WIRD DABEI ZUSÄTZLICH ÜBER EINEN THERMISCHEN SPEICHER GEFÜHRT UND DORT ZWISCHENGESPEICHERT, SO DASS SICH DER ENERGIEBEDARF DER SEKUNDÄREN ERZEUGUNGSEINHEITEN WEITER REDUZIEREN LÄSST.	170
TABELLE 7-57: ENDENERGIEBEDARF EINER LUFT-WÄRMEPUMPE ALS SEKUNDÄRE ERZEUGUNGSEINHEIT, WENN IN DIESE SOLAR THERMISCH ERZEUGTE WÄRME ZUR QUELLANHEBUNG EINGEBUNDEN WIRD. DER COP IST DABEI EINE FUNKTION DER	

Verzeichnisse

Lists

QUELLTEMPERATUR DER AUßENLUFT, DIE BEI EINBINDUNG VON ST UM 10 K ANGEHOBEN WIRD.....	170
TABELLE 7-58: ENDENERGIEBEDARF DER SEKUNDÄREN ERZEUGUNGSEINHEITEN, DER DURCH DEN EINSATZ DES SOLARTHERMISCHEN WÄRMEERZEUGERS REDUZIERT WIRD. DIE SOLARTHERMISCH ERZEUGTE ENERGIE WIRD DABEI DIREKT OHNE SPEICHERUNG EINGEBUNDEN.	171
TABELLE 7-59: ENDENERGIEBEDARF DER SEKUNDÄREN ERZEUGUNGSEINHEITEN, DER DURCH DEN EINSATZ DES SOLARTHERMISCHEN WÄRMEERZEUGERS REDUZIERT WIRD. DIE SOLARTHERMISCH ERZEUGTE ENERGIE WIRD DABEI ZUSÄTZLICH ÜBER EINEN THERMISCHEN SPEICHER GEFÜHRT UND DORT ZWISCHENGESPEICHERT, SO DASS SICH DER ENERGIEBEDARF DER SEKUNDÄREN ERZEUGUNGSEINHEITEN WEITER REDUZIEREN LÄSST.	171
TABELLE 7-60: ENDENERGIEBEDARF EINER LUFT-WÄRMEPUMPE ALS SEKUNDÄRE ERZEUGUNGSEINHEIT, WENN IN DIESE SOLARTHERMISCH ERZEUGTE WÄRME ZUR QUELLANHEBUNG EINGEBUNDEN WIRD. DER COP IST DABEI EINE FUNKTION DER QUELLTEMPERATUR DER AUßENLUFT, DIE BEI EINBINDUNG VON ST UM 10 K ANGEHOBEN WIRD.....	171
TABELLE 7-61: ZUSÄTZLICHER ENERGIEBEDARF FÜR DIE VARIANTEN 1B UND 2B MIT SEA 2.1 MIT DEM WETTERDATENSATZ HH TMY (SIEHE TABELLE 7-24)	172
TABELLE 7-62: ZUSÄTZLICHER ENERGIEBEDARF FÜR DIE VARIANTEN 3A UND 3B MIT SEA2.1 MIT DEM WETTERDATENSATZ HH TMY (SIEHE TABELLE 7-25)	172
TABELLE 7-63: ZUSÄTZLICHER ENERGIEBEDARF FÜR DIE VARIANTEN 1B UND 2B MIT SEA2.2 MIT DEM WETTERDATENSATZ HH TMY (SIEHE TABELLE 7-46)	173
TABELLE 7-64: ZUSÄTZLICHER ENERGIEBEDARF FÜR DIE VARIANTEN 3A UND 3B MIT SEA2.2 MIT DEM WETTERDATENSATZ HH TMY (SIEHE TABELLE 7-47)	173
TABELLE 7-65: ZUSÄTZLICHER ENERGIEBEDARF FÜR DIE VARIANTEN 1B UND 2B MIT SEA2.3 MIT DEM WETTERDATENSATZ HH TMY (SIEHE TABELLE 7-56)	174
TABELLE 7-66: ZUSÄTZLICHER ENERGIEBEDARF FÜR DIE VARIANTEN 3A UND 3B MIT SEA2.3 MIT DEM WETTERDATENSATZ HH TMY (SIEHE TABELLE 7-57)	174
TABELLE 8-1: BERECHNUNG DER WÄRMEAUSDEHNUNG DER VERSCHIEDENEN MATERIALE FÜR 2 M LÄNGE UND ΔT VON 103 K	179
TABELLE 8-2: STAGNATIONSTEMPERATURWERTE IN °C DES SEA 2.3 KOLLEKTORS MIT GESCHLOSSENEM UND OFFENEM GEHÄUSE (KONVEKTIONSGEKÜHLT)	181

List of tables

TABLE 2-1: NON-RESIDENTIAL BUILDINGS 2015 IN METAL LIGHTWEIGHT CONSTRUCTION, MARKET COVERAGE 65 %; SOURCE: [IFBS16].....	6
TABLE 2-2: NON-RESIDENTIAL BUILDINGS 2015 IN METAL LIGHTWEIGHT CONSTRUCTION, MARKET COVERAGE 100 %	6
TABLE 2-3: INDUSTRIAL AND GENERIC HALL CONSTRUCTION 2015 IN METAL LIGHTWEIGHT CONSTRUCTION, MARKET COVERAGE 100%.....	7
TABLE 2-4: INDUSTRIAL AND COMMERCIAL BUILDING CONSTRUCTION 2015 IN METAL LIGHTWEIGHT CONSTRUCTION, MARKET COVERAGE 70% (HALLS REQUIRING HEATING OR COOLING)	7
TABLE 2-5: ANNUAL BUILDING ENVELOPE SURFACE AREAS DISTRIBUTED BETWEEN FACADES AND ROOF (2015)	7
TABLE 2-6: POSSIBLE ANNUAL CONSTRUCTION AMOUNT IN M ² AND ENERGY YIELD OF SEA ELEMENTS FOR DIFFERENT MARKET SHARES (2015)	8
TABLE 2-7: EFFECTIVE ENERGY YIELDS PER M ² OF THE SEA1 MEASURING CELL'S WALL AND ROOF SEA COLLECTORS DURING THE OBSERVED TIME FRAME; SOURCE [FOS14A].....	14
TABLE 2-8: EXAMPLES OF POSSIBLE ENERGY UTILISATION FOR THE SEA PRINCIPLE; SOURCE: [FOS14B]	18
TABLE 5-1: OVERVIEW ON THE THREE MEASURED SEA COLLECTORS: DIFFERENCES AND PRINCIPAL RESEARCH SUBJECTS	52
TABLE 5-2: PERFORMANCE RESULTS OF THE SEA COLLECTOR 2.1	57
TABLE 5-3: DETERMINATION OF THE MEAN AIR TEMPERATURE WITH WHICH SEA 2.1 REACHES THE ENERGY YIELDS FROM SEA 1 IN SCENOCALC CALCULATIONS.....	60
TABLE 5-4: PERFORMANCE RESULTS OF THE SEA COLLECTOR 2.2	64
TABLE 5-5: COMPARISON OF THE ANNUAL GROSS ENERGY YIELDS BETWEEN SCENOCALC CALCULATIONS BASED ON SEA 2.2 AND THE PROJECTION OF A DYNAMIC SIMULATION FOR SEA 2.2 BASED ON THE WEATHER DATA OF MEASURED SOLAR RADIATION AND TEMPERATURE WITHIN THE SEA1 RESEARCH PROJECT	66
TABLE 5-6: PERFORMANCE RESULTS OF THE SEA COLLECTOR 2.3	73
TABLE 5-7: COMPARISON OF THE ANNUAL GROSS ENERGY YIELDS BETWEEN SCENOCALC CALCULATIONS BASED ON SEA 2.3 AND THE PROJECTION OF A DYNAMIC SIMULATION FOR SEA 2.3 BASED ON THE WEATHER DATA OF MEASURED SOLAR RADIATION AND TEMPERATURE WITHIN THE SEA1 RESEARCH PROJECT	74
TABLE 5-8: EFFICIENCY FOR 2 M ² -SIZED SEA COLLECTORS TAKING IN AMBIENCE AIR ($T_1 = T_A$) FOR DIFFERENT MASS FLOWS AND WIND INFLUENCES (SEA 2.1).....	75
TABLE 5-9: ANNUAL GROSS ENERGY YIELDS, EFFICIENCIES AND OUTPUT AIR TEMPERATURES OF THE SEA COLLECTORS 1 (MEASURED), 2.1, 2.2 AND 2.3 (PROJECTED) BASED ON THE DATA OF THE SEA 1 OBSERVATION YEAR 2010/2011	76
TABLE 5-10: MEASURED TEMPERATURES IN °C OF THE ABSORBER (TRAPEZOIDAL SHEET) OF THE SEA COLLECTOR 2.1	81
TABLE 5-11: MEASURED TEMPERATURE VALUES IN °C OF THE OUTER STEEL SHEET (BELOW THE TRAPEZOIDAL SHEET) OF THE SANDWICH ELEMENT DURING STAGNATION	83
TABLE 5-12: MEASURED TEMPERATURE VALUES IN °C OF THE TRAPEZOIDAL SHEET (ABSORBER) DURING STAGNATION; ¹⁾ NO RELIABLE CONTACT BETWEEN THESE SENSORS AND THE	

Verzeichnisse

Lists

ABSORBER SHEET COULD BE ESTABLISHED AND THE SENSOR VALUES ARE THEREFORE TOO LOW.....	84
TABLE 5-13: MEASURED TEMPERATURES DURING STAGNATION CORRESPONDING TO THE POSITIONS AS GIVEN BY FIGURE 5-32 IN THE SEA COLLECTOR 2.3.....	85
TABLE 7-1: IMPORTANT PARAMETERS AND DIMENSIONS OF THE EXAMINED INDUSTRIAL BUILDING	122
TABLE 7-2: CHARACTERISTICS OF THE EXAMINED INDUSTRIAL BUILDING AND IMPORTANT BUILDINGS PHYSICS.....	122
TABLE 7-3: OPERATING HOURS AND DISTRIBUTION OF HEAT GAINS IN THE INDUSTRIAL BUILDING	122
TABLE 7-4: WEATHER DATA HH TMY: HEATING AND COOLING DEMAND BASED ON THE CHARACTERISTICS OF THE INDUSTRIAL BUILDING AND ITS USAGE CONCEPT. THERE IS A NIGHT-TIME REDUCTION BETWEEN 16 H AND 07 H WITH NO MECHANIC AIR EXCHANGE.....	123
TABLE 7-5: WEATHER DATA HH TMY-MIN: OTHERWISE AS IN TABLE 7-4	123
TABLE 7-6: WEATHER DATA HH TMY-MAX: OTHERWISE AS IN TABLE 7-4	123
TABLE 7-7: WEATHER DATA MUN TMY: OTHERWISE AS IN TABLE 7-4	124
TABLE 7-8: WEATHER DATA MUN TMY-MIN: OTHERWISE AS IN TABLE 7-4	124
TABLE 7-9: WEATHER DATA MUN TMY-MAX: OTHERWISE AS IN TABLE 7-4	124
TABLE 7-10: PARAMETERS OF THE EXAMINED COLLECTOR TYPES	124
TABLE 7-11: MAXIMUM POSSIBLE GROSS COLLECTOR AREA ENERGY YIELD (CALCULATED) AND ITS UTILISATION FOR HEATING AND PROCESS HEATING WITH WEATHER DATA OF HH TMY	133
TABLE 7-12: AS IN TABLE 7-11 WITH WEATHER DATA OF HH TMY-MIN.....	133
TABLE 7-13: AS IN TABLE 7-11 WITH WEATHER DATA OF HH TMY-MAX	134
TABLE 7-14: AS IN TABLE 7-11 WITH WEATHER DATA OF MUN TMY	135
TABLE 7-15: AS IN TABLE 7-11 WITH WEATHER DATA OF MUN TMY-MIN.....	135
TABLE 7-16: AS IN TABLE 7-11 WITH WEATHER DATA OF MUN TMY-MAX	136
TABLE 7-17: GROSS COLLECTOR AREA ENERGY YIELD (CALCULATED) FOR DIRECT POWERING A SINGLE-STAGE THERMAL COOLING UNIT WITH A MINIMUM OPERATING TEMPERATURE OF 65 °C AND THE CORRESPONDING PROPORTION OF THE COOLING ENERGY DEMAND MET BY THE SOLAR ENERGY YIELD BASED ON WEATHER DATA OF HH TMY	141
TABLE 7-18: AS IN TABLE 7-17 WITH WEATHER DATA OF HH TMY-MIN.....	141
TABLE 7-19: AS IN TABLE 7-17 WITH WEATHER DATA OF HH TMY-MAX	142
TABLE 7-20: AS IN TABLE 7-17 WITH WEATHER DATA OF MUN TMY	143
TABLE 7-21: AS IN TABLE 7-17 WITH WEATHER DATA OF MUN TMY-MIN.....	143
TABLE 7-22: AS IN TABLE 7-17 WITH WEATHER DATA OF MUN TMY-MAX	144
TABLE 7-23: FINAL ENERGY DEMAND OF SECONDARY (SUPPLEMENTARY) GENERATORS, I.E. AFTER BEING REDUCED BY THE USAGE OF THE SOLAR HEAT GENERATOR. IN THESE CASES, SOLAR THERMAL ENERGY IS BEING USED DIRECTLY WITHOUT ENERGY STORAGE.	149
TABLE 7-24: FINAL ENERGY DEMAND OF SECONDARY (SUPPLEMENTARY) GENERATORS, I.E. AFTER BEING REDUCED BY THE USAGE OF THE SOLAR HEAT GENERATOR. IN THESE CASES, SOLAR THERMAL ENERGY IS BUFFERED IN AN ENERGY STORAGE ALLOWING FOR A LARGER REDUCTION OF THE SECONDARY ENERGY PROVISION.....	149
TABLE 7-25: FINAL ENERGY DEMAND OF AN AIR-WATER HEAT PUMP AS SECONDARY ENERGY GENERATOR, IF SOLAR THERMAL ENERGY IS INTEGRATED FOR PREHEATING. THE COP IS A FUNCTION OF THE SOURCE TEMPERATURE OF THE AMBIENCE BEING RAISED BY 10 K BY SOLAR THERMAL ENERGY.	150
TABLE 7-26: AS IN TABLE 7-23 WITH WEATHER DATA OF HH TMY-MIN.....	150

TABLE 7-27: AS IN TABLE 7-24 WITH WEATHER DATA OF HH TMY-MIN.....	150
TABLE 7-28: AS IN TABLE 7-25 WITH WEATHER DATA OF HH TMY-MIN.....	150
TABLE 7-29: AS IN TABLE 7-23 WITH WEATHER DATA OF HH TMY-MAX.....	151
TABLE 7-30: AS IN TABLE 7-24 WITH WEATHER DATA OF HH TMY-MAX.....	151
TABLE 7-31: AS IN TABLE 7-25 WITH WEATHER DATA OF HH TMY-MAX.....	151
TABLE 7-32: AS IN TABLE 7-23 WITH WEATHER DATA OF MUN TMY.....	151
TABLE 7-33: AS IN TABLE 7-24 WITH WEATHER DATA OF MUN TMY.....	152
TABLE 7-34: AS IN TABLE 7-25 WITH WEATHER DATA OF MUN TMY.....	152
TABLE 7-35: AS IN TABLE 7-23 WITH WEATHER DATA OF MUN TMY-MIN.....	152
TABLE 7-36: AS IN TABLE 7-24 WITH WEATHER DATA OF MUN TMY-MIN.....	152
TABLE 7-37: AS IN TABLE 7-25 WITH WEATHER DATA OF MUN TMY-MIN.....	153
TABLE 7-38: AS IN TABLE 7-23 WITH WEATHER DATA OF MUN TMY-MAX.....	153
TABLE 7-39: AS IN TABLE 7-24 WITH WEATHER DATA OF MUN TMY-MAX.....	153
TABLE 7-40: AS IN TABLE 7-25 WITH WEATHER DATA OF MUN TMY-MAX.....	153
TABLE 7-41: MAXIMUM POSSIBLE COLLECTOR AREA ENERGY YIELD (GROSS) AND ITS UTILISATION FOR HEATING AND PROCESS HEATING WITH WEATHER DATA OF HH TMY.....	156
TABLE 7-42: AS IN TABLE 7-41 WITH WEATHER DATA OF MUN TMY.....	156
TABLE 7-43: COLLECTOR AREA ENERGY YIELD FOR DIRECT POWERING A SINGLE-STAGE THERMAL COOLING UNIT WITH A MINIMUM OPERATING TEMPERATURE OF 65 °C AND THE CORRESPONDING PROPORTION OF THE COOLING ENERGY DEMAND MET BY THE SOLAR ENERGY YIELD BASED ON WEATHER DATA OF HH TMY.....	158
TABLE 7-44: AS IN TABLE 7-43 WITH WEATHER DATA OF MUN TMY.....	159
TABLE 7-45: FINAL ENERGY REQUIREMENT OF SECONDARY (SUPPLEMENTARY) GENERATORS, I.E. AFTER BEING REDUCED BY THE USAGE OF THE SOLAR HEAT GENERATOR. IN THESE CASES, SOLAR THERMAL ENERGY IS BEING USED DIRECTLY WITHOUT ENERGY STORAGE.....	161
TABLE 7-46: FINAL ENERGY REQUIREMENT OF SECONDARY (SUPPLEMENTARY) GENERATORS, I.E. AFTER BEING REDUCED BY THE USAGE OF THE SOLAR HEAT GENERATOR. IN THESE CASES THE SOLAR THERMAL ENERGY IS BUFFERED IN AN ENERGY STORAGE ALLOWING FOR A LARGER REDUCTION OF THE SECONDARY ENERGY PROVISION.....	161
TABLE 7-47: FINAL ENERGY DEMAND OF AN AIR-WATER HEAT PUMP AS SECONDARY ENERGY GENERATOR, IF SOLAR THERMAL ENERGY IS INTEGRATED FOR PREHEATING. THE COP IS A FUNCTION OF THE SOURCE TEMPERATURE OF THE AMBIENCE BEING RAISED BY 10 K BY SOLAR THERMAL ENERGY.	161
TABLE 7-48: AS IN TABLE 7-45 WITH WEATHER DATA OF MUN TMY.....	162
TABLE 7-49: AS IN TABLE 7-46 WITH WEATHER DATA OF MUN TMY.....	162
TABLE 7-50: AS IN TABLE 7-47 WITH WEATHER DATA OF MUN TMY.....	162
TABLE 7-51: MAXIMUM POSSIBLE COLLECTOR AREA ENERGY YIELD (GROSS) AND ITS UTILISATION FOR HEATING AND PROCESS HEATING WITH WEATHER DATA OF HH TMY.....	165
TABLE 7-52: AS IN TABLE 7-51 WITH WEATHER DATA OF MUN TMY.....	165
TABLE 7-53: COLLECTOR AREA ENERGY YIELD FOR DIRECT POWERING A SINGLE-STAGE THERMAL COOLING UNIT WITH A MINIMUM OPERATING TEMPERATURE OF 65 °C AND THE CORRESPONDING PROPORTION OF THE COOLING ENERGY DEMAND MET BY THE SOLAR ENERGY YIELD BASED ON WEATHER DATA OF HH TMY.....	167
TABLE 7-54: AS IN TABLE 7-53 WITH WEATHER DATA OF MUN TMY.....	168

TABLE 7-55: FINAL ENERGY DEMAND OF SECONDARY (SUPPLEMENTARY) GENERATORS, I.E. AFTER BEING REDUCED BY THE USAGE OF THE SOLAR HEAT GENERATOR. IN THESE CASES, SOLAR THERMAL ENERGY IS BEING USED DIRECTLY WITHOUT ENERGY STORAGE.	170
TABLE 7-56: FINAL ENERGY DEMAND OF SECONDARY (SUPPLEMENTARY) GENERATORS, I.E. AFTER BEING REDUCED BY THE USAGE OF THE SOLAR HEAT GENERATOR. IN THESE CASES, SOLAR THERMAL ENERGY IS BUFFERED IN AN ENERGY STORAGE ALLOWING FOR A LARGER REDUCTION OF THE SECONDARY ENERGY PROVISION.....	170
TABLE 7-57: FINAL ENERGY DEMAND OF AN AIR-WATER HEAT PUMP AS SECONDARY ENERGY GENERATOR, IF SOLAR THERMAL ENERGY IS INTEGRATED FOR PREHEATING. THE COP IS A FUNCTION OF THE SOURCE TEMPERATURE OF THE AMBIENCE BEING RAISED BY 10 K BY SOLAR THERMAL ENERGY.	170
TABLE 7-58: AS IN TABLE 7-55 WITH WEATHER DATA OF MUN TMY	171
TABLE 7-59: AS IN TABLE 7-56 WITH WEATHER DATA OF MUN TMY	171
TABLE 7-60: AS IN TABLE 7-57 WITH WEATHER DATA OF MUN TMY	171
TABLE 7-61: ADDITIONAL ENERGY REQUIREMENT FOR VARIANTS 1B AND 2B WITH SEA 2.1 AND THE WEATHER DATA OF HH TMY (S. TABLE 7-24)	172
TABLE 7-62: ADDITIONAL ENERGY DEMAND FOR VARIANTS 3A AND 3B WITH SEA 2.1 AND THE WEATHER DATA OF HH TMY (S. TABLE 7-25)	172
TABLE 7-63: ADDITIONAL ENERGY REQUIREMENT FOR VARIANTS 1B AND 2B WITH SEA 2.2 AND THE WEATHER DATA OF HH TMY (S. TABLE 7-46)	173
TABLE 7-64: ADDITIONAL ENERGY DEMAND FOR VARIANTS 3A AND 3B WITH SEA 2.2 AND THE WEATHER DATA OF HH TMY (S. TABLE 7-47)	173
TABLE 7-65: ADDITIONAL ENERGY DEMAND FOR VARIANTS 1B AND 2B WITH SEA 2.3 AND THE WEATHER DATA OF HH TMY (S. TABLE 7-56)	174
TABLE 7-66: ADDITIONAL ENERGY DEMAND FOR VARIANTS 3A AND 3B WITH SEA 2.3 AND THE WEATHER DATA OF HH TMY (S. TABLE 7-57)	174
TABLE 8-1: CALCULATION OF THE THERMAL EXPANSION OF THE DIFFERENT MATERIALS FOR COMPONENT LENGTHS OF 2 M AND A ΔT OF 103 K.....	179
TABLE 8-2: TEMPERATURES IN °C DURING STAGNATION IN A SEA COLLECTOR 2.3 WITH CLOSED AND OPENED CASING (CONVECTION COOLED)	181

Abkürzungsverzeichnis / Abbreviations and symbols

%	Prozent
°	Grad
°C	Grad Celsius
A	(Querschnitts-)Fläche
a	Jahr
a_1	Linearer Verlustkoeffizient (Gradient der WKL)
a_2	Quadratischer Verlustkoeffizient
ALK	Abgedeckter Luftkollektor
c_f	Formfaktor für die Strömung
c_p	spezifische Wärmekapazität
c_m	Koeffizient zur Beschreibung der Massenstromabhängigkeit der thermischen Verluste
CAD	Computer-aided design, rechnerunterstütztes Konstruieren
COP	Coefficient of Performance (Leistungszahl)
c.p.	ceteris paribus, das weitere gleich gehalten
d.h.	das heißt
DIN	Deutsches Institut für Normung
DWD	Deutscher Wetterdienst
ECB	EcoCommercial Building (Programm)
EN	Europäische Norm
EPBD	European Performance of Buildings Directive
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuke
ERK	Engineering R. Koschade (FSt. 2)
et al.	et alii / et aliae, und andere
FEM	Finite-Elemente-Simulationen; FEM-Simulationen
FIW	Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V.
FOSTA	Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V.
F'	Kollektorwirkungsgradfaktor
G	Globalstrahlung
G''	Nettostrahlung = Globalstrahlung - langwelliger Abstrahlung
h	Stunde
HH	Hansestadt Hamburg (Wetterdatensatz)
IAM	Incidence Angle Modifier, Einstrahlwinkel-Korrekturfaktor
IFBS	Internationaler Verband für den Metallleichtbau
ISE	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (FSt. 1)
ISO	International Organization for Standardization
K	Kelvin

Verzeichnisse

Lists

K Θ	Einstrahlwinkel-Korrekturfaktor (IAM)
KLT	Kollektorlufttemperatur
Luko	(solarer) Luftkollektor
m	Masse als Variable, Meter als Einheit
$\dot{m} = m_p$	Massenstrom
m ²	Quadratmeter (Einheit)
MAX	Maximalwerte für den Wetterdatensatz (Kapitel 7)
MIN	Minimalwerte für den Wetterdatensatz (Kapitel 7)
MMP	Mass flow per row of maximum net primary power saving
MUN	München Flughafen Wetterdatensatz (Kapitel 7)
MW	Mineralwolle
PC	Polycarbonat
PBA	Projektbegleitender Ausschuss
PU	Polyurethan
Q	Wärme (-energie)
R _{Abs}	Wärmeleitwiderstand des Absorbers
R _{Abs-Flüssigk}	Wärmeleitwiderstand von Absorber auf flüssiges Arbeitsmedium
R _{Abs-Luft}	Wärmeleitwiderstand von Absorber auf Luft als Arbeitsmedium
SE	Sandwichelement(e)
SEA	Sandwich Energy Accumulation, zu Luftkollektoren modifizierte Sandwichelemente
T _a	Umgebungslufttemperatur
T _e	Austrittstemperatur des Fluides im Kollektor
T _i	Eintrittstemperatur des Fluides im Kollektor
T _m	Mittlere Fluidtemperatur
T _{stag}	Stagnationstemperatur
ΔT	Temperaturdifferenz der zwischen mittlerer Fluidtemperatur und Umgebungsluft
ΔT_{Hub}	Temperaturdifferenz zw. Eintritts- und Austrittstemperatur des Fluides im Kollektor
TRY	Testreferenzjahre (DWD)
TMY	Testreferenzjahre (METEONORM 7)
U	Gemessener Gesamt-Wärmeverlustkoeffizient (Bezug Fluidtemperatur)
U _{Verlust}	Gesamt-Wärmeverlustkoeffizient des Kollektors (Bezug Absorbertemperatur)
ULK	Unabgedeckter Luftkollektor
UV	Ultraviolett(e) elektromagnetische Strahlung
v	Geschwindigkeit
W	Watt
WKL	Wirkungsgradkennlinie
WKF	Wirkungsgradkennfläche
WP	Wärmepumpe

α	Absorptionskoeffizient; zwischen 0 und 1
η	(Momentan-)Wirkungsgrad (eta)
η_0	Konversionsfaktor, maximaler Wirkungsgrad, Schnittpunkt der WKL mit der y-Achse
ρ	Rohdichte

1 Einleitung Introduction

Kurzfassung

In dem vorherigen FOSTA-Forschungsprojekt P779 konnte gezeigt werden, dass zu solaren Luftkollektoren modifizierte Sandwichelemente in der Lage sind, neben ihrer Gebäudehüllfunktion, jährlich bis zu 160 kWh/m²a thermische Energie zur Verfügung zu stellen [Fos14a]:. Diese modifizierten Elemente werden SEA (für Sandwich Energy Accumulation) genannt. Aufgrund der Bedeutung die der Metalleichtbau, der avisierte Anwendungsbereich dieser SEA-Elemente, im Industrie- und Gewerbebau hat, wurde in diesem Forschungsprojekt beabsichtigt, die SEA-Elemente energetisch zu optimieren und den Einfluss verschiedener konstruktiver und physikalischer Parameter zu prüfen. Darüber hinaus soll der letztendliche Anwendungsnutzen der thermischen Energie durch eine Einbettung der SEA-Energieerträge in einige gängige Energienutzungsprofile von Industrie- und Gewerbehallen im Forschungsprojekt konkretisiert werden.

Abstract

The preceding FOSTA research project P779 showed that sandwich elements modified to solar air collectors, besides their function as building envelope, could annually provide up to 160 kWh/m²a of thermal energy. [Fos14a]. These modified sandwich elements are named SEA (for Sandwich Energy Accumulation). Due to the importance of metal lightweight construction, the envisioned area of application of these SEA elements, in industrial and commercial construction, this research project aims to optimise the SEA elements energetically and examine the influence of several constructional and physical parameters. Moreover the final energetic application benefit of the thermal energy shall be concretised within the research project by embedding the SEA energy yields in a number of well-established energy utilisation profiles of industrial and commercial buildings.

1.1 Problemstellung Scientific question

SEA steht für **S**andwich **E**nergie **A**kkumulation und ist eine Modifikation eines seriell hergestellten Sandwichelementes zu einem solarthermischen Luftkollektor, welcher sich insbesondere für Fassaden und Dächer im Industrie- und Gewerbebau bei Beibehaltung der Gebäudehüllfunktion eignen kann. Im Abschlussbericht als auch in Folge des Forschungsprojektes der FOSTA P779: Entwicklung eines Sandwichelementes mit Energie-Akkumulation, Energieverteilung und Dämmung (SEA), im Folgenden mit "SEA1" bezeichnet, haben sich drei wesentliche Erkenntnisse zu SEA erhärtet [Fos14a]:

1. Das SEA-Konzept wurde durch das Forschungsprojekt "SEA1" in Funktionalität und Energieertrag bestätigt (siehe zu "SEA1" auch Kapitel 2.2).
2. Es wurden eine Reihe möglicher Optimierungspotentiale erarbeitet, welche SEA mit und ohne weitere Modifikationen in dessen Effizienz erheblich steigern können (siehe Kapitel 2.3 und 3)
3. Es wurde deutlich, dass die Definition der notwendigen Optimierungspotentiale grundsätzlich von der letztendlichen Nutzung der Energie abhängt (siehe Kapitel 2.4 und 7)

Um also das SEA-Konzept sinnvoll weiter zu entwickeln, da es ein interessanter Lösungsansatz zur Gewinnung erneuerbarer Energien für im Metallleichtbau errichtete Hallen im Industrie- und Gewerbebau sein kann, ist die Ausarbeitung und Untersuchung der Optimierungspotentiale eine wesentliche Notwendigkeit. Dies gilt einerseits um für verschiedene Nutzungskonzepte die richtige Mischung aus Temperaturniveau und Energiemenge zu erreichen. Da die thermische Effizienz von solaren Luftkollektoren, also auch SEA-Kollektoren, mit zunehmender Kollektorlufttemperatur sinkt, ist das Wechselspiel der Veränderungen von Temperaturniveau und Energiemenge nicht linear und muss stets mit Blick auf die letztendliche Nutzung der erwärmten Luft erfolgen. Andererseits gilt es den Einfluss alternativer Profilgeometrien und alternativer Farbgebung, die im Bau häufig Verwendung finden, auf die Effizienz des SEA-Kollektors zu überprüfen. Die dafür notwendigen Simulationen, Messungen und Berechnungen sind für sich bereits auf komplexe Weise miteinander verwoben, bilden allerdings die Grundlage für die Kreation eines optimierten SEA-Luftkollektors sowie möglicher Varianten und Betriebsweisen.

Da aber die durch SEA-Kollektoren gesammelte warme Luft zunächst nur innerhalb der Bilanzgrenzen des Kollektors einen Energieertrag darstellt, muss die praktische Verwendung dieser erwärmten Luft ebenfalls beachtet werden. Letztendlich muss der optimierte SEA-Kollektor mit seinen Variationen im Betrieb einen konkreten energetischen Zweck erfüllen, d.h. ein energetisches Nutzungsprofil erfüllen. Daher sind die Optimierungsansätze des SEA-Kollektors aus Sicht eines jeweiligen Energienutzungsprofils zu bewerten, weswegen die im Rahmen der Optimierung gewonnenen Erkenntnisse durch ihre Einbettung in verschiedene Energienutzungskonzepte überprüft werden müssen. Das erfordert eine zeitlich aufgelöste Gegenüberstellung von solarer Energiebereitstellung samt entsprechend möglichen Temperaturniveaus und dem Energiebedarf sowie notwendigen Temperaturniveaus.

Es erfordert somit einen geschlossenen Ansatz, welcher die Optimierungspotentiale in ihrer energetischen Auswirkung zwar einzeln untersucht, aber in Hinblick auf ihre konkrete Zweckmäßigkeit und ihrer Mischung untereinander einer Berücksichtigung der letztendlichen Energienutzung unterliegt. Ebenso muss der Grundgedanke des SEA-Prinzips erhalten bleiben, dass ausschließlich marktgängige Bauteile die Basis als Halbzeuge für den SEA-Kollektor bilden.

1.2 Motivation Motivation

Fassaden und Dächer aus kontinuierlich gefertigten Sandwichelementen, mit beidseitigen Stahldeckschichten und Kerndämmung aus Polyurethan (PU)-Hartschaum oder Mineralwolle (MW), nehmen heute insbesondere im Industrie- und Hallenbau eine bedeutende Marktstellung in Europa ein. Es zeigt sich für Europa ein jährlicher Markt von ca. 80 Mio. m², für Deutschland von etwa 11 Mio. m² Dach- und Wandflächen bei Industrie- und Gewerbehallen mit Heiz- bzw. Kühlbedarf (vgl. Tabelle 2-4) [Kos11a], [Kos11b].

Bislang bieten diese selbsttragenden Sandwichelemente aus energetischer Sicht einen ausgezeichneten Beitrag zum passiven Wärmeschutz der Gebäudehülle, liefern jedoch keinen aktiven Beitrag zur Energiegewinnung, wie dies bis zum Jahr 2020 von der EU für die Gebäude durch die European Performance of Buildings Directive (EPBD) angestrebt wird. Durch modifizierte Sandwichelemente, also SEA, werden diese Bauelemente selbst zu solaren Luftkollektoren, die sowohl über Dach- und Fassadenflächen aufgrund solarer Einstrahlung einen Energiebeitrag in Form von erwärmter Luft liefern [EUC10].

Es besteht also ein energetischer Nutzen, ein politischer Wille und eine durch das FOSTA-Forschungsprojekt P779 (SEA1) grundsätzlich bestätigte praktische Möglichkeit, in Zukunft Industrie- und Gewerbehallen im Metalleichtbau, welche im Moment solarthermisch beinahe ungenutzt sind, aber über erhebliche Flächenanteile deutschlandweit verfügen, durch SEA-Elemente zu realisieren. Dafür ist allerdings eine Optimierung mit letztendlichem Bezug zu allgemein verwendeten Energienutzungsprofilen ein unerlässlicher Schritt.

Das Alleinstellungsmerkmal des SEA-Konzepts besteht darin, dass auf Basis der bestehenden Serientechnologie des Sandwichbaus, für den bereits ein sehr guter Marktzugang existiert, unter Verwendung zusätzlicher kostengünstiger Serienbauteile eine Luftkollektorkonstruktion entwickelt wird, die im Gegensatz zu anderen Produkten nicht additiv ist, also auf eine Fassade bzw. auf ein Dach aufgesetzt wird, sondern eine konventionelle Fassade bzw. Dach, demnach die gesamte Gebäudehülle, vollständig substituiert und dabei zusätzlich einen energetischen Mehrwert bietet. Durch die Fokussierung auf marktverfügbare, in Serie produzierte Halbzeuge und die Beibehaltung der bestehenden konstruktiven Eigenschaften von Sandwichelementen erwarten die beiden Forschungsstellen, dass auf Basis des SEA-Konzepts attraktive Produkte entstehen können, deren Wirtschaftlichkeit auf einer Optimierung der Effizienz sowie auf der Nutzung von Synergieeffekten basiert.

1.3 Zielsetzung Objective

Das hier dargelegte Forschungsvorhaben P1041 "SEA2" beabsichtigt die Klärung der Optimierungspotentiale in Einklang mit dem letztendlichen Energienutzung. Dies umfasst eine Reihe von Teilaufgaben [Fos14b]:

1. Definition der einzelnen Optimierungspotentiale und Klärung (d.h. durch Messung, Simulation und Berechnung) auf welche Weise, diese in ihren energetischen Auswirkungen in sinnvoller Reihenfolge überprüft werden können;
2. Messtechnische Überprüfung des Nachbaus eines SEA1-Kollektors im Labor als Referenzwert sowie zweier weiterer neu zu kreierender SEA-Kollektoren, um Optimierungspotentiale, welche sich vorrangig nur durch Messungen bestimmen lassen, energetisch bewerten zu können;
3. Klärung weiterer Optimierungspotentiale mit Hilfe von Simulationen und Berechnungen im Zuge des Baus und der Vermessung der beiden weiteren oben genannten SEA-Kollektoren;
4. Einarbeitung und Abstimmung der identifizierten Optimierungspotentiale in die temperaturrelevanten und energetischen Anforderungen gängiger Energienutzungskonzepte;
5. Ausarbeitung der Energiebedarfsdeckung durch SEA-Kollektoren für verschiedene Energienutzungsfälle am Beispiel einer Musterhalle mit Rücksicht auf notwendige Temperaturniveaus; Dabei ist die zeitliche Auflösung von Bereitstellung bzw. Bedarf der Energie wesentlich sowie die Einbindung einiger gängiger Systemkonzepte;
6. Berücksichtigung und Beobachtung weiterer wichtiger Aspekte wie z.B. der Stagnationstemperaturen, Verfügbarkeit der Bauteile, Anforderungen der Industrie bzw. im Hallenbau oder des Windeinflusses.

Diese Teilaufgaben wurden in enger und erfolgreicher Zusammenarbeit zwischen beiden Forschungsstellen, dem Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) und Engineering R. Koschade (ERK) bearbeitet und die dabei erarbeiteten Ergebnisse werden nachfolgend vorgestellt.

2 Ausgangssituation nach FOSTA-Projekt P779 "SEA1" Initial situation after FOSTA project P779 "SEA1"

Kurzfassung

Jährlich werden große Flächenmengen an Metallleichtbauelementen in Deutschland bzw. Europa produziert und verbaut. Grundsätzlich ist davon ein erheblicher Flächenanteil geeignet, auch mit SEA-Elementen konstruiert zu werden. So kommt zur Hüllfunktion noch eine aktive energetische Funktion in Form eines solaren Luftkollektors hinzu. Das FOSTA-Forschungsprojekt P779 (SEA1) zeigte durch einen Langzeit-Feldversuch mit genauen Messdaten über ein Jahr, dass Südfassade und Dach mit den damals verwendeten SEA1-Elementen durchschnittlich ca. 160 kWh/m²a thermische Energie aus der Solarstrahlung erbringen. Allerdings wurden während und nach diesem Projekt Optimierungspotentiale identifiziert, welche den Energieertrag noch erheblich steigern können, bzw. deren Einfluss aus architektonischen Gründen zu untersuchen ist. Darüber hinaus wurde klar, dass die jeweilige Nutzung der thermischen Energie definiert, welche Anforderungen an Energiemenge und Temperaturniveau der erwärmten Luft zu stellen sind, weswegen eine Betrachtung und Optimierung von SEA aus Sicht der letztendlichen Nutzung notwendig erscheint.

Abstract

Annually, large amounts of metal lightweight components are produced and used to construct industrial and commercial buildings. Generally a large share of these surface areas is suited for SEA elements, which combine the function of a building envelope with the active energetic function of a solar air collector. The FOSTA research project P779 (SEA1) showed in a long-term field trial with exact measurement data, within the period of one year, that southern facade and roof using SEA1 elements are able to provide an average of 160 kWh/m²a of thermal energy using the solar radiation. However, a number of optimisation potentials were identified during and after the project, which could increase the energy yield considerably or which should be examined on architectonic grounds. Moreover it became evident that the eventual utilisation of the thermal energy defines the requirements for energy amount and temperature level of the heated air. Hence the examination and optimisation must be done in view of the final utilisation of the energy.

2.1 Marktbedeutung Market significance

Einen wichtigen Anwendungsbereich für das SEA-Prinzip stellt der Hallenbau im Industrie- und Gewerbebau dar. Der Hauptgrund liegt in den großen Fassaden- und Dachflächen, die bei diesen Gebäudetypen zur Verfügung stehen. In vielen Fällen

werden diese Flächen auch nicht bzw. nur zu einem geringen Anteil von anderen Bauteilen unterbrochen – ein Umstand der die ausgedehnte Verwendung von Solarkollektoren fördert. Aus Angaben der Sandwichindustrie und der Statistik für Deutschland wird hierzu eine Abschätzung des Marktvolumens vorgenommen, das für SEA-Elemente erreichbar wäre.

In Deutschland wurden im Jahr 2015 nach Angaben des Industrieverbandes für das Bauen im Metalleichtbau e.V. (IFBS) jährlich ca. 47,4 Mio. m² Metalleichtbauelemente für Dach- und Fassadenflächen von Nichtwohngebäuden hergestellt und verbaut (Tabelle 2-1) [IFBS16].

Nichtwohngebäude 2015 mit Metallleichtbauelementen, Markterfassung 65 %	Mio. m²
Sandwichelemente	14,5
Trapezblech	31,5
Kassettenelemente	1,4
Summe Metall-Leichtbauelemente	47,4

Tabelle 2-1: Nichtwohngebäude 2015 mit Metalleichtbauelementen, Markterfassung 65 %; Quelle: [IFBS16]

Table 2-1: Non-residential buildings 2015 in metal lightweight construction, market coverage 65 %; source: [IFBS16]

Diese Zahlen spiegeln nach Erfahrungswerten der Industrieteilnehmer etwa 65 % des Marktes wider [Fos14b]. Die nachfolgende Tabelle 2-2 zeigt die Werte für den gesamten Markt mit 100 %.

Nichtwohngebäude 2015 mit Metallleichtbauelementen, Marktabdeckung 100 %	Mio. m²/a
Sandwichelemente	22,3
Trapezprofile	48,5
Kassettenprofile	2,2
Summe Metall-Leichtbauelemente	73,0

Tabelle 2-2: Nichtwohngebäude 2015 mit Metalleichtbauelementen, Marktabdeckung 100 %

Table 2-2: Non-residential buildings 2015 in metal lightweight construction, market coverage 100 %

Innerhalb der Nichtwohngebäude nimmt der Industrie- und Hallenbau einschließlich Lagergebäude etwa 70 % ein. Unterteilt man nach gleichen Anteilen der drei Metall-Leichtbauelementtypen, so zeigen sich für den Industrie- und Hallenbau folgende Zahlen in Tabelle 2-3:

Industrie- und Hallenbau 2015 mit Metall-Leichtbauelementen, Markterfassung 100 %	Mio. m²/a
Sandwichelemente	15,6
Trapezblech	34,0
Kassettenelemente	1,5
Summe Metall-Leichtbauelemente	51,1

Tabelle 2-3: Industrie- und Hallenbau 2015 mit Metalleichtbauelementen, Markterfassung 100 %

Table 2-3: Industrial and generic hall construction 2015 in metal lightweight construction, market coverage 100%

Damit ergibt sich in Deutschland jährlich eine Gesamtfläche von 51,1 Mio. m² für Dach- und Fassadenflächen im Industrie- und Hallenbau, welche für SEA-Elemente, die die Funktion der Gebäudehülle um eine integrierte aktive energetische Funktion erweitern, grundsätzlich geeignet scheinen. Von dieser Gesamtfläche wird allerdings noch ein Anteil von ca. 30 % für Gebäude abgezogen, die aufgrund ihres geringen Energiebedarfs (z. B. keine Heizung) wenig geeignet erscheinen (Tabelle 2-4).

Industrie- und Hallenbau 2015 mit Metall-leichtbauelementen, Marktanteil 70 %	Mio. m²/a
Sandwichelemente	10,9
Trapezblech	23,8
Kassettenelemente	1,1
Summe Metall-Leichtbauelemente	35,8

Tabelle 2-4: Industrie- und Hallenbau 2015 mit Metalleichtbauelementen, Marktanteil 70 % (Hallen mit Heiz- oder Kühl- oder Kältebedarf)

Table 2-4: Industrial and commercial building construction 2015 in metal lightweight construction, market coverage 70% (halls requiring heating or cooling)

Unter Berücksichtigung der Abzüge für nicht substituierbare Flächen, z.B. Fenster, Tore, Oberlichter und konstruktiv problematische Flächen, von ca. 20 % sowie einer laut IFBS überschlägig gleichmäßig anzunehmenden Verteilung zwischen Dach- und Fassadenelementen, ergeben sich die folgenden jährlichen Flächenwerte.

Flächenwerte und Verteilung (2015)	Mio. m²/a
Gesamt	35,8
Abzüge (20%)	7,2
Gesamt inkl. Abzüge	28,6
Fassaden	14,3
Dach	14,3

Tabelle 2-5: Jährliche Flächenwerte, verteilt nach Fassaden und Dach (2015)

Table 2-5: Annual Building envelope surface areas distributed between facades and roof (2015)

Es kann sicher nicht davon ausgegangen werden, dass eine Marktabdeckung von 100% dieser Flächen erzielt wird. Eine realistische Einschätzung dürfte ein Marktanteil von bis zu 40 % sein, die sich in jährlichen Schritten von ca. 5 - 10 % erreichen

lassen. Entsprechend den vorherigen Flächenwerte ergibt sich folgende Markteinschätzung für Deutschland, wobei SEA1 vom gemessenen Energieertrag von 160 kWh/m²a und die modifizierten SEA2-Elemente von einem avisierten Energieertrag von 250 kWh/m²a ausgehen. Dabei wird angenommen, dass die Fassadenflächen in Hinblick auf den Energieertrag im Durchschnitt in gleichen Teilen in die jeweiligen Himmels-richtungen ausgerichtet sind.

Flächen/Energieertrag auf Basis der Flächenwerte und Verteilung (2015)	Einheit	Marktanteile				
		Gesamtmarkt (100%)	5%	10%	20%	40%
Flächen Fassade	m ²	14.320.000	716.000	1.432.000	2.864.000	5.728.000
Flächen Dach	m ²	14.320.000	716.000	1.432.000	2.864.000	5.728.000
Flächen Gesamt	m ²	28.640.000	1.432.000	2.864.000	5.728.000	11.456.000
Energieertrag SEA1	GWh/a	3.637	182	364	727	1.455
Energieertrag SEA2	GWh/a	5.683	284	568	1.137	2.273

Tabelle 2-6: Jährlicher Flächenbau und entsprechender Energieertrag der bei verschiedenen Marktanteilen von SEA realisiert werden könnte (2015)

Table 2-6: Possible annual construction amount in m² and energy yield of SEA elements for different market shares (2015)

Für den deutschen Markt alleine sind jährlich bei einem Marktanteil von 40 % beinahe 11,5 Mio. Quadratmeter SEA-Elemente möglich, wobei diese abhängig von einer Umsetzung mit SEA1 oder SEA2-Elementen jährliche Energiemengen von ca. 1,45 TWh bzw. 2,3 TWh liefern würden. Das entspricht bei 8760 Stunden im Jahr einer Durchschnittsleistung von ca. 165 MW für SEA1 und ca. 260 MW für SEA2. Hinsichtlich des europäischen Marktes kann auf Basis durchschnittlicher Werte von EUROSTAT von einem Bauvolumen in sieben- bis achtfacher Höhe ausgegangen werden, mit entsprechendem Einfluss auf Flächen und Energieerträge. Zum Vergleich lag die jährliche Bruttostromerzeugung in Deutschland auf Basis von Mineralölprodukten (nicht Erdgas) 2016 bei etwa 5,8 TWh [StR17].

2.2 Funktionsweise des SEA-Kollektors und Energieertrag SEA collector: Principle of operation and energy yield

Die wichtigsten Grundlagen hierzu basieren auf dem Schlussbericht des vorangegangenen Forschungsvorhabens der Forschungsvereinigung Stahlanwendung FOSTA e.V.: Entwicklung eines Sandwichelements mit Energie-Akkumulation, Energieverteilung und Dämmung (SEA), im hier vorgelegten Abschlussbericht auch Forschungsprojekt SEA1 genannt [Fos14a].

Ergänzend zur metallischen Außenschale (Stahl) werden industriell vorgefertigte Sandwichelemente mit Polyurethan(PU)-Hartschaumkern bzw. Mineralwolle (MW) mit einem zusätzlichen Stahlhohlprofil, in dem Luft strömen kann, ausgerüstet. Dieses Hohlkammerprofil könnte als fertiges Bauteile verschäumt (Semikonti), aber auch durch Verklebung entsprechender Stahlprofile auf das fertige Sandwichelement

(Konti) hergestellt werden. Abbildung 2-1 zeigt den Horizontalquerschnitt eines SEA-Elementes, wie es im Rahmen des Forschungsprojektes "SEA1" zur Verwendung kam.

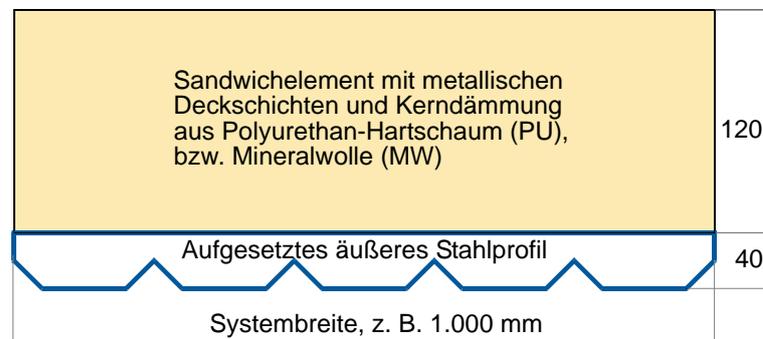


Abbildung 2-1: Horizontalschnitt durch ein SEA-Element, wie es im SEA1-Projekt verwendet wurde

Figure 2-1: Cross section of the SEA element as used during the SEA1 project

Das zusätzlich aufgesetzte Außenprofil aus Stahl dient als Absorber zur Energie-Akkumulation, dem Transport der solar erwärmten Luft sowie zur thermischen Entlastung der Gebäudehülle. In den Luftkammern des Außenprofils wird die einströmende Luft durch solare Strahlung erwärmt (siehe zum Wirkungsprinzip Abbildung 2-2). Die erwärmte Luft wird sodann über ein Sammlersystem mit Ventilator bspw. der Raumluftheizung zugeführt, bzw. via Wärmetauscher für Brauchwassererwärmung und / oder Prozesswärme, bzw. auch zur Umwandlung in Kälteenergie verwendet. Der Überschuss an nicht sofort verwertbarer Wärmeenergie kann beispielsweise gespeichert oder über einen Stirling-Motor verstromt werden. Die vorgestellte SEA-Bauweise eignet sich prinzipiell für alle Fassaden- und Dachflächen eines Gebäudes. Sie kann damit die gesamte Gebäudehülle zur Energiegewinnung nutzen, entlastet bei klimatisierten Gebäuden die Kühlung und verbessert den Wärmeschutz.

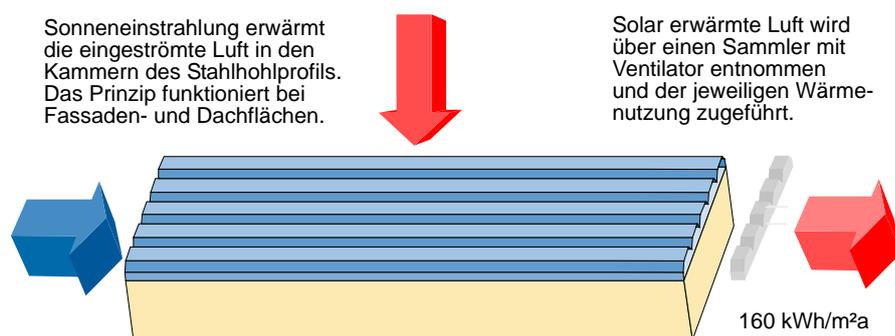


Abbildung 2-2: Wirkungsprinzip des SEA-Kollektors

Figure 2-2: Operating principle of the SEA collector

2.2.1 Klimatische Rahmenbedingungen Climatic framework

Die wichtigsten physikalischen Prinzipien und Grundlagen zur Lufterwärmung durch Solarenergie sind hinlänglich bekannt und werden bereits seit längerer Zeit für

zahlreiche Technologien erfolgreich genutzt. In Kapitel 3.1 findet eine detailliertere Beschreibung über die Grundlagen zu solaren Luftkollektoren statt.

Da für die Erwärmung des Absorbers, im Fall von SEA1 also des äußeren Trapezblechs, die Solarstrahlung naturgemäß die bedeutendste Rolle spielt, sind Einstrahlungswinkel und -intensität von hoher Bedeutung. Während man im Jahresverlauf im Raum Deutschland abhängig von der gewählten geographischen Position von jahres- und tageszeitlich wechselnden Einstrahlungswinkeln ausgehen kann, steigerte sich im Verlauf der letzten 30 Jahre die Summe der Sonnenstunden im Jahr und folglich auch die solaren Strahlungsenergiemenge. Die jährliche Sonnenscheindauer erhöhte sich 2007 gegenüber dem Referenzzeitraum 1961 – 1990 von 1.528 Stunden um 10,6 % auf 1.691 Stunden. Im Kalenderjahr 2015 schien die Sonne 1.723 Stunden, was einer Erhöhung gegenüber dem Referenzzeitraum von 12,7 % entspricht. Die solare Strahlung in Deutschland scheint also zuzunehmen.

Selbiges gilt ebenfalls für eine Zunahme der durchschnittlichen jährlichen Lufttemperaturen. Für 2011 verzeichnete der Deutsche Wetterdienst für die Bundesrepublik Deutschland eine mittlere Lufttemperatur von 9,6 °C. Dies ist gegenüber dem Referenzzeitraum von 1961 bis 1990 eine Zunahme von 1,5 °C. Für 2015 ermittelte das DWD eine mittlere Lufttemperatur von 9,9 °C und damit eine Zunahme um 1,8 °C gegenüber dem Referenzzeitraum von 1961 – 1990.

Die Zusammensetzung des Sonnenspektrums, die Sonnenscheindauer und der Winkel, unter dem die Sonnenstrahlen auf die Erdoberfläche fallen, hängen von Uhrzeit, Jahreszeit und Breitengrad ab. Damit unterscheidet sich auch die eingestrahlte Energie regional (Abbildung 2-3). Diese beträgt in Deutschland zwischen 950 und 1.250 kWh, also ca. 1.000 kWh pro Quadratmeter und Jahr, wohingegen vergleichsweise in der Sahara etwa 2.350 kWh pro Quadratmeter und Jahr eingestrahlt werden [DWD17a]. So entsprechen 1.000 kWh etwa dem Heizwert von 100 Litern Heizöl. Natürlich gibt es auch Einschränkungen. Etwa 3/4 der Sonnenenergie steht im Sommerhalbjahr zur Verfügung. Sogar an bewölkten Sommertagen mit einem diffusen Strahlungsanteil von über 80 % kann der Wert der Globalstrahlung noch immer bis zu 300 W/m² betragen.

Es liegt nahe, diese solar bereitgestellte jährliche Energie – auch in Hinblick auf die politischen Vorgaben – besser zu nutzen, zumal sich statistisch zeigt, dass jährliche Zuwächse zu verspüren sind. Das SEA-Prinzip beabsichtigt dies nicht mittels Hochleistungskollektoren, sondern über die Nutzung weiter Gebäudehüllflächen im Industrie- und Gewerbebau unter Verwendung von SEA-Elementen, die so Gebäudehülle und Luftkollektor in einem darstellen.

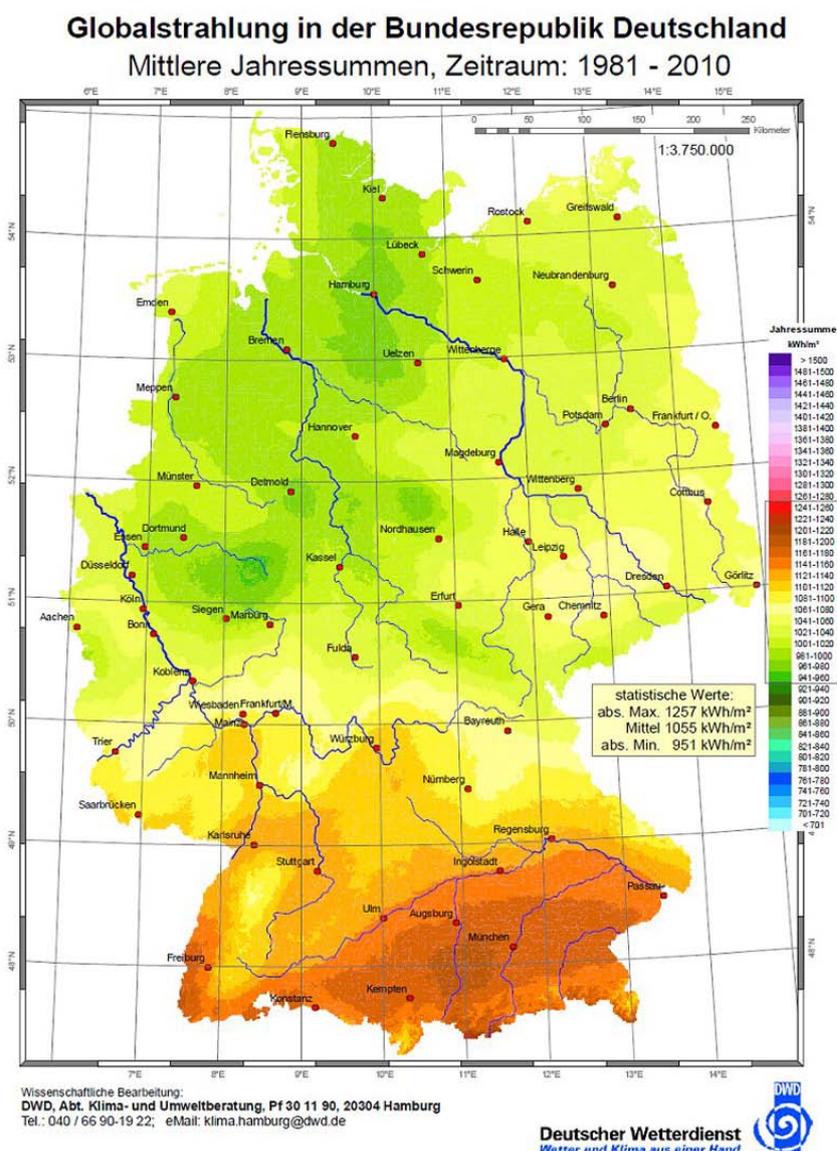


Abbildung 2-3: Globalstrahlung in der Bundesrepublik Deutschland – Mittlere Jahressummen für den Zeitraum von 1981 - 2010; Quelle: [DWD17a]

Figure 2-3: Global radiation in Germany – Average annual sums for the period of 1981 - 2010; source: [DWD17a]

2.2.2 FOSTA-Forschungsprojekt P 779 (SEA1): Messzelle und Messungen FOSTA research project P779 (SEA1): Measuring cell and measurements

Der Zweck des Forschungsprojektes P779 (SEA1) war es, die Funktionsweise und den Energieertrag der SEA-Elemente anhand einer kleinen Messzelle für ein Messjahr – also unter den diversen jahreszeitlichen und täglichen Wettereinflüssen – zu messen und zu überprüfen. Dabei wurden in diesem Pilotprojekt die Daten aller Einfluss- und Ertragsgrößen in fünf-minütiger Taktung hochauflösend erfasst und ausgewertet. Schlussendlich wurden die Ergebnisse in einfache Energieertragsgrößen zur besseren Vergleichbarkeit überführt. Zur Durchführung der Messungen wurde eine Messzelle aufgebaut, die nach der Fertigstellung mit einem Kran auf das Gebäudedach des Forschungsinstituts für Wärmeschutz e.V. (FIW) gehoben wurde.

Ausgangssituation nach FOSTA-Projekt P779 "SEA1" Initial situation after FOSTA project P779 "SEA1"

Dort war diese unverschattet rund um die Uhr der möglichen Sonneneinstrahlung ausgesetzt.

Die Wände der Messzelle bestanden aus 100 mm dicken PU-Sandwichelementen. Die Dicke des PU-Sandwichelementes, das die Dachfläche bildete, betrug 120 mm. Die Dachfläche war 15° nach Süden geneigt. Die nach Süden ausgerichtete Wandfläche war 2 m breit und 2 m hoch. Diese Wandfläche war in zwei je 1 m breite Hälften geteilt. Auf der in der Draufsicht rechten Hälfte war auf der Außenseite ein 1 m breites und 2 m hohes Trapezprofil befestigt (SEA) worden. Die andere Hälfte der Südwand diente als Referenzfläche, die ebenfalls in die Temperaturmessungen einbezogen war. Die Abbildung 2-4 bis Abbildung 2-6 zeigen schematischen den Aufbau sowie einige Fotos der Messzelle. Zusätzlich zu den diversen Temperaturmessfühlern für Oberflächen-, Luft- und Sammlerlufttemperaturen waren Pyrano- sowie Pyrgeometer zur Erfassung der exakt auf jeder Fläche momentan eintreffenden kurz- und langwelligen Solarstrahlung angebracht. So wurde die Leistungsfähigkeit der SEA-Elemente anhand einer langen Zeitreihenmessung im Feldversuch über den Verlauf eines Messjahres von Juli 2010 bis Juni 2011 mit einer sehr großen Zahl von Messdaten bestimmt.

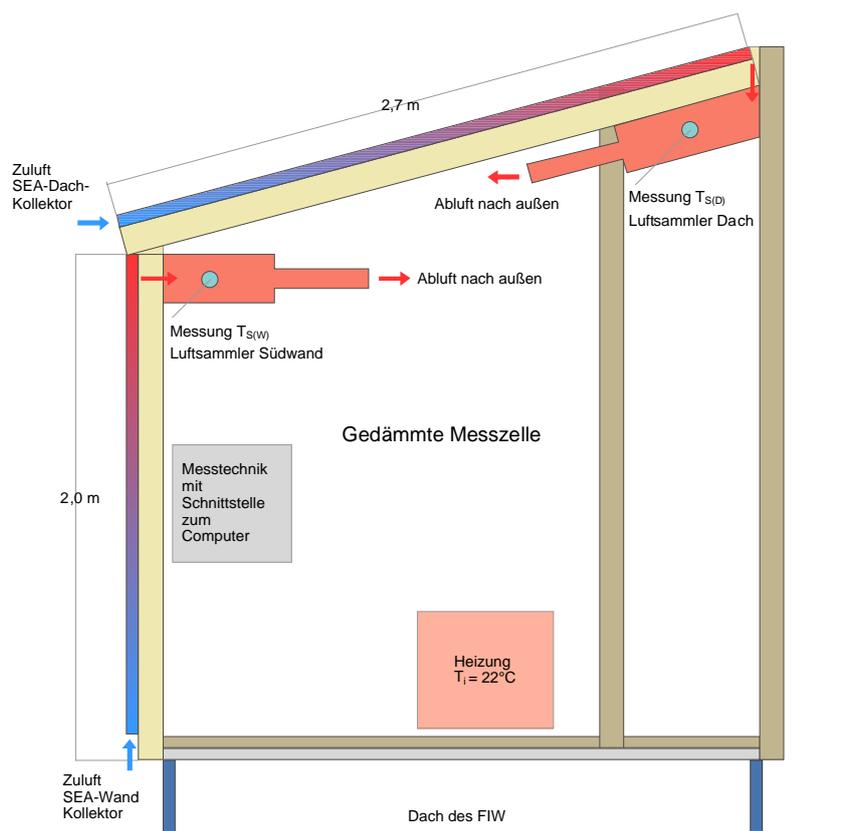


Abbildung 2-4: Schematische Schnittzeichnung der SEA-Messzelle; Quelle: [Fos14a]

Figure 2-4: Schematic sectional drawing of the SEA measurement cell; source: [Fos14a]



Abbildung 2-5 (linkes Bild): Foto der SEA-Messzelle auf dem Dach des FIW; Ansicht Südseite; SEA-Wandkollektor (rechts) mit Referenz Sandwichelement (links)

Figure 2-5 (left picture): Photo of the SEA measuring cell on the roof of the FIW; view on southern facade; SEA wall collector (right part) and reference sandwich element (left part)

Abbildung 2-6 (rechtes Bild): Foto der SEA-Messzelle; Blick auf die Dachfläche; SEA-Dachkollektor (links) mit Referenz Sandwichelement (rechts)

Figure 2-6: (right picture): Photo of the SEA measuring cell ; view on the roof surface; SEA roof collector (left part) and reference sandwich element (right part)

2.2.3 FOSTA-Forschungsprojekt P779 (SEA1): Ergebnisse und Energieertrag FOSTA research Project P779 (SEA1): Results and energy yields

Das wesentliche Forschungsziel war, neben Erkenntnissen für zentrale energetische Einflussgrößen und Optimierungspotentialen, die Ermittlung des solaren Energieertrags des SEA-Kollektors. Der Energieertrag wurde getrennt für Dach und Südwand auf Basis des jeweiligen Temperaturunterschiedes zwischen Außenluft und der nach Durchströmung des Kollektors gesammelten Luft ermittelt. Diese Temperaturdifferenzen wurden mit der spezifischen Wärmekapazität als auch der jeweils durchlaufenen Luftmasse multipliziert. Der dafür täglich angesetzt und grundsätzlich definierte Zeitraum war unabhängig von der Jahreszeit 08:00 Uhr bis 20:00 Uhr. Die nachfolgenden Gleichungen 2-1 bis 2.3 geben die Berechnung der Wärmeenergiemenge wieder. Dabei wird der Temperaturhub zwischen der nach Durchlaufen des Dach- bzw. Wandkollektors gesammelten Luft und der einströmenden Luft für jedes fünf-minütige Messintervall gebildet. Beim SEA-Kollektor wird die einströmende Luft aus der Umgebung gesaugt.

$$\Delta T_{Hub (D/W)} = T_{e (D/W)} - T_{i (D/W)} \quad ; \text{ wobei } T_{i (D/W)} = T_a \quad \text{in K} \quad (2-1)$$

Aus Messdaten der beiden Messrohre im Dach- und Wandkollektor für die Strömungsgeschwindigkeiten $v_{D/W}$ sowie den Strömungsquerschnitten $A_{D/W}$ werden die Massen $m_{D/W}$ der gesamten erwärmten Luft in der Zeit t nach den folgenden Gleichungen ebenfalls für jedes fünf-minütige Messintervall ermittelt:

Angangssituation nach FOSTA-Projekt P779 "SEA1"
Initial situation after FOSTA project P779 "SEA1"

$$m_{D/W} = v_{D/W} \cdot c_f \cdot A_{D/W} \cdot \rho_{Luft} \cdot t \quad \text{in kg} \quad (2-2)$$

Und daraus folgt nach obigem Ansatz für die Energieerträge von Dach- und Wandkollektor für einen gegebenen fünf-minütigen Zeitraum:

$$\Delta Q_{D/W} = \Delta T_{Hub (D/W)} \cdot c_p \cdot m_{D/W} \quad \text{in kWh} \quad (2-3)$$

Im Laufe des Messjahres gab es durch kleine Messausfälle sowie durch den Einbau leistungsstärkerer Ventilatoren kürzere Ausfälle einzelner Messgeräte. Um die Jahresbilanz der SEA Energieerträge für 365 Tage zu erhalten, wurden die fehlenden 29 Messtage mit den jeweils zutreffenden monatlichen Mittelwerten der vorliegenden Messtage linear ergänzt. Die nachfolgende Tabelle 2-7 führt die Erträge des SEA1-Kollektors im Messjahres in kWh/m² auf.

Zeitraum		Messwerte		Fehl- tage	Ergänzungs- werte		Effektiver SEA-Energieertrag		
Jahr	Monat	Wand	Dach	d	+Wand	+Dach	SEA Wand	SEA Dach	SEA W+D
-	-	kWh/m ²	kWh/m ²	#	kWh/m ²	kWh/m ²	kWh/m ²	kWh/m ²	kWh/m ²
2010	Jul	6,8	8,0	3	0,73	0,86	7,5	8,8	8,2
2010	Aug	9,7	9,3	0	0	0	9,7	9,3	9,5
2010	Sep	10,2	6,5	0	0	0	10,2	6,5	8,3
2010	Okt	8,2	5,6	6	1,98	1,36	10,2	7,0	8,6
2010	Nov	7,7	3,9	0	0	0	7,7	3,9	5,8
2010	Dez	5,3	2,8	1	0,18	0,09	5,5	2,9	4,2
2011	Jan	6,7	4,1	5	1,28	0,78	8,0	4,8	6,4
2011	Feb	10,5	6,4	3	1,25	0,77	11,7	7,2	9,4
2011	Mär	10,5	11,9	1	0,35	0,40	10,9	12,3	11,6
2011	Apr	25,3	19,7	8	9,19	7,16	34,5	26,8	30,6
2011	Mai	26,4	31,8	2	1,82	2,20	28,2	34,0	31,1
2011	Jun	19,6	34,3	0	0	0	19,6	34,3	27,0
Summe		146,8	144,4	29	16,78	13,61	163,6	158,0	160,8

Tabelle 2-7: Effektive Energieerträge des Wand- und Dachkollektors der SEA1-Messzelle pro Quadratmeter über das Messjahr; Quelle: [Fos14a]

Table 2-7: Effective energy yields per m² of the SEA1 measuring cell's wall and roof SEA collectors during the observed time frame; source [Fos14a]

Tabelle 2-7 und Abbildung 2-7 zeigen die effektiven Energieerträge der SEA Kollektoren über den ausgewerteten Zeitraum von einem Jahr.

In Summe ergeben sich für das Jahr:

SEA Wandkollektor (Südfassade): **163,6 kWh/(m²a)**

SEA Dachkollektor (15° Neigung nach Süden) : **158,0 kWh/(m²a)**

SEA Kollektor – Durchschnitt für Wand + Dach : **160,8 kWh/(m²a)**

Aufgrund unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeiten im SEA-Element unterscheiden sich die Erträge im Sommer 2010 nur wenig von denen im Winter 2010/2011. Der Hauptgrund für die deutlich höheren Energieerträge seit April 2011 liegt darin, dass ab diesem Zeitpunkt durch den Einbau deutlich stärkerer Ventilatoren höhere Strömungsgeschwindigkeiten möglich waren. Auf den Einfluss dieses wichtigen Parameters wird noch in Kapitel 3.3.4 eingegangen. Zum anderen zeigen sich aber auch immer wieder Unterschiede durch die Imponderabilien des Wetters. Die im Forschungsprojekt ermittelten Erträge liegen mit +64 % (Wand) bzw. +86 % (Dach) deutlich über der Abschätzung aus dem Forschungsantrag vom April 2009.

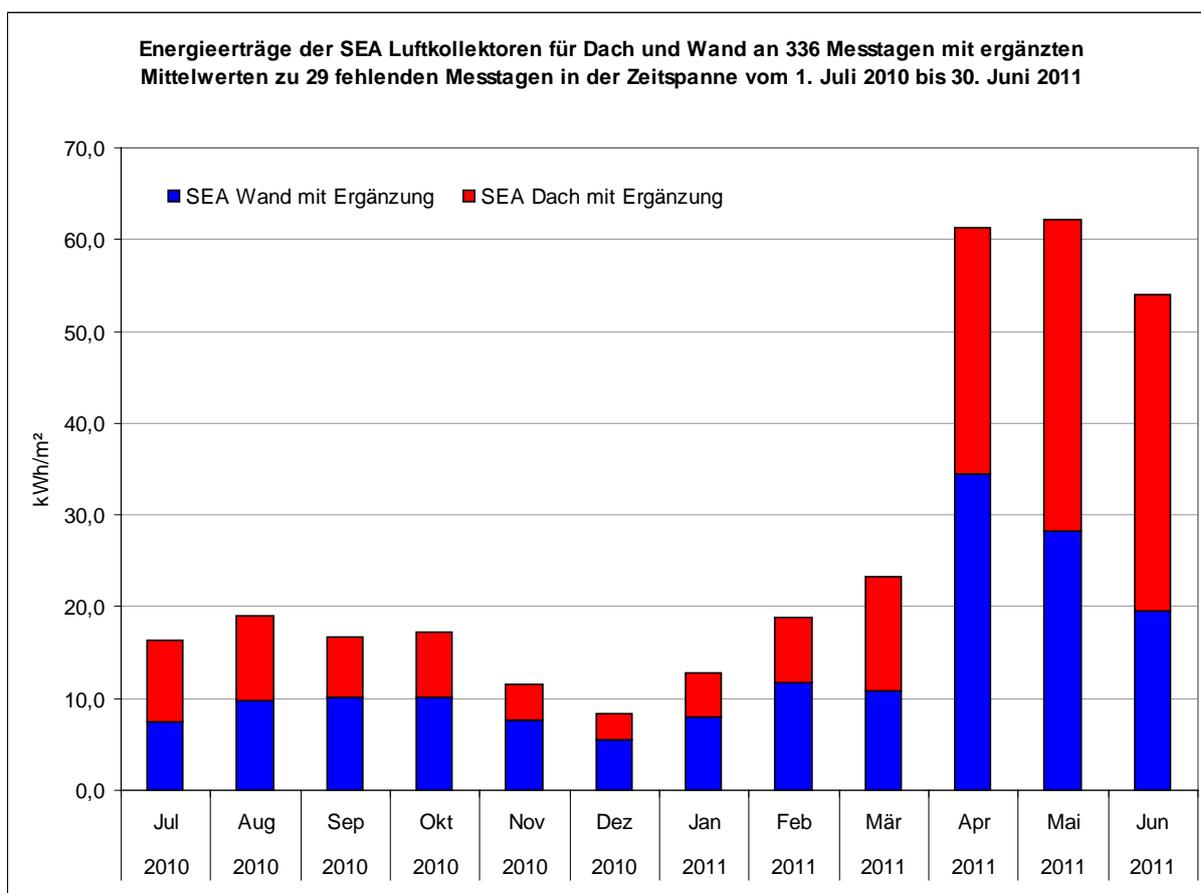


Abbildung 2-7: Effektive Energieerträge der SEA Luftkollektoren für Dach und Wand in der Zeitspanne vom 01. Juli 2010 bis 30. Juni 2011; Quelle: [Fos14a]

Figure 2-7: Effective energy yields of the SEA air collectors for roof and wall in the period from 01/07/2010 through 30/06/2011; source: [Fos14a]

2.3 Verbesserungspotential des SEA-Prinzips Potentials for improving the SEA principle

Im Rahmen des FOSTA-Forschungsprojektes P779 (SEA1) wurde bereits eine Reihe von Optimierungspotentialen identifiziert. Weitere Überlegungen auf Basis der Messungen und Berechnungen in Folge des Projektes deuteten auf weitere Verbesserungsmöglichkeiten hin. Diese bilden die Grundlage dieses Forschungsprojektes P1041: Optimierung der Energienutzung und des Wirkungsprinzips der Sandwichbauweise mit Energie-Akkumulation (SEA2). So wurde ermittelt, dass durch

verschiedene konstruktive und physikalische Parameter der Energieertrag und/oder das Temperaturniveau gesteigert werden könnte. Die Optimierung der SEA-Elemente zielt darauf ab, ausreichend hohe Jahresenergieerträge, unter Berücksichtigung der für die angedachten Anwendungen notwendigen Temperaturniveaus, zu erreichen, um einen wirtschaftlichen Betrieb zu gewährleisten. Dazu müssen die Elemente eine ausreichend hohe Effizienz aufweisen, die beispielsweise durch geeignete Wahl der Kanalgeometrie, des Absorptionsgrades der Oberfläche, die Verwendung einer transparenten Abdeckung und durch die Strömungsgeschwindigkeit beeinflusst wird [Fos14b].

Dabei soll gleichzeitig ein wichtiger Grundgedanke des SEA-Prinzips, die Verwendung marktgängiger Bauteile als Bestandteil des Kollektors, erhalten bleiben. Ebenso relevant ist es, die dabei wichtigen thermischen Auswirkungen auf die optimierten SEA Elemente zu erfassen, sofern sie durch Messungen verifiziert werden können.

Die im Rahmen des Forschungsprojektes P1041 (SEA2) näher beleuchteten Optimierungspotentiale entsprechen einigen für Luftkollektoren grundsätzlich gängigen Möglichkeiten der Leistungsoptimierung, dabei müssen allerdings auch die speziellen Anforderungen des SEA-Prinzips, d. h. Einsatz im Metalleichtbau und die Verwendung serieller Bauteile, berücksichtigt werden [ISE14a]:

- Einfluss einer transparenten Abdeckung auf den SEA-Kollektor, z.B. einer transparenten Polycarbonat-Platte
- Einfluss weiterer konstruktiver Merkmale wie z. B. der Luftkanalbreiten
- Einfluss der Profilgeometrien für effizientere solare Absorption sowie optimierten Wärmeübergang zwischen Absorber und der Luft
- Einfluss von Farbe und Beschichtung des Absorbers auf die thermische Effizienz des Kollektors
- Einfluss des Massenstroms, d. h. der pro Zeiteinheit durch den Kollektor durchgeführten Luftmasse auf Energiemenge und Temperaturniveau
- Einfluss der Kollektormodullängen, insbesondere im Zusammenhang mit dem Massenstrom, auf das Temperaturniveau und die Energiemenge

Diese werden in Kapitel 3 genauer dargestellt. Die verschiedenen Einflüsse können ihrem Wesen nach entweder messtechnisch, rechnerisch auf Basis der Messungen oder simulationsgestützt ermittelt und approximiert werden. Zusammen mit dem Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) wurde eine Vorgehensweise definiert, welche die verschiedenen Optimierungsaspekte in einer methodisch sinnvollen Weise abarbeitet.

Während das Forschungsprojekt SEA1 seinem Wesen nach ein Feldexperiment darstellte, in dem nur ein SEA-Kollektor verschiedenen externen Umweltbedingungen, d.h. den Wetter- und Jahreszeiteinflüssen, für ein Messjahr ausgesetzt wurde, sind die für SEA2 angesetzten Messungen als Labormessung durchgeführt worden. So ist es hier unter klar definierten und konstant gehaltenen externen Bedingungen wie der wirksamen Solarstrahlung und dem Windeinfluss möglich, den

Unterschied oben aufgeführter Optimierungsaspekte einzeln nach dem Ceteris-Paribus-Grundsatz, d. h. alle anderen Einflüsse gleich haltend, zu untersuchen. Ebenso können so die grundlegenden Erkenntnisse zum SEA1-Kollektor im Labor überprüft und validiert werden.

2.4 Energienutzungskonzepte und SEA-Optimierung

Energy utilisation concepts and the optimisation of SEA

Ein ebenfalls wichtiger Punkt des hier dargestellten Forschungsvorhabens war die letztendliche Verwendung der durch SEA bereitgestellten thermischen Energie. Bereits im Rahmen des Vorgängerprojektes (SEA1) wurden grundlegende Ideen vorgestellt, wie die erwärmte Luft nutzbar gemacht werden kann, bzw. für welche gängigen Anwendungsprofile von Industrie- und Gewerbehallen SEA diese nützlich sein könnte. Hier wurde bereits verdeutlicht, dass oftmals abhängig vom gewählten Nutzungsfall gewisse Minimaltemperaturen der erwärmten Luft notwendig sind.

Bereits durch die Gleichung 2-3 in Kapitel 2.2.3 wurde dargelegt, dass sich die Leistung mit der spezifischen Wärmekapazität aus dem Massenstrom und dem Temperaturhub ergibt. Wird also eine bestimmte Leistung übertragen und z. B. der Massenstrom verdoppelt, ergibt sich ein halbiertes Temperaturhub ΔT_{Hub} zwischen der Austrittstemperatur der T_e und Eintrittstemperatur T_i der Luft (unter Vernachlässigung des sich verändernden Wirkungsgrades, siehe unten).

Somit sind also Temperaturhub und Massenstrom gekoppelt. Nun kommt jedoch hinzu, dass nicht die komplette eingestrahelte Leistung an die Luft übertragen wird, sondern nur ein Teil davon, weil auf dem Weg von der Sonne zum Absorber und von dort zum Fluid auch optische und thermische Verluste auftreten. Der Quotient aus übertragener Leistung und eingestrahelter Leistung ist der Wirkungsgrad eines solarthermischen Kollektors. Da die Verluste von der Kollektorlufttemperatur (KLT) abhängen, gibt es keine einzelnen Wirkungsgrade, sondern Wirkungsgradkennlinien [ISE14a]. Die Übertragung der Wärme vom Absorber zur Luft hängt wiederum sehr stark von der Strömungsgeschwindigkeit und damit auch vom Massenstrom ab. Daher würden also bei einem höheren Massenstrom auch der Wirkungsgrad und damit die übertragene Leistung in oben genanntem Beispiel steigen, so dass der Temperaturhub dementsprechend tatsächlich etwas mehr als die Hälfte des ursprünglichen Wertes erreichen würde.

Bereits diese Zusammenhänge sorgen dafür, dass durch die Wahl eines jeweiligen Nutzungskonzeptes im vornherein definiert wird, ob in der Anwendung eine reine Maximierung der gewonnen Energiemenge durch den SEA Kollektor beabsichtigt wird – also ungeachtet der letztendlichen Kollektorluftaustrittstemperatur oder die Energiemenge unter der Nebenbedingung einer einzuhaltenden Minimaltemperatur maximiert werden soll. So wurde der letztendlichen Energienutzung eine eigene und wichtige Position in diesem Forschungsvorhaben eingeräumt. Die Nutzung definiert wichtige Randbedingungen und somit die Konfiguration eines SEA-Kollektors, d. h. welcher Mix an konstruktiven Merkmalen, Kollektorlängen und Massenströmen ein gegebenes Nutzungsprofil erforderlich macht. So kann dann in einer grundlegenden Einschätzung geklärt werden, welche Energienutzungen mit welchem SEA-Kollektor sinnvoll erscheinen und welche nicht. Da allerdings die Anforderungen bei der

Prozesswärme sehr vielfältig sind, erfolgte eine Begrenzung auf die allgemein gängigen Nutzungsweisen Heizen und Kühlen, wenngleich überschüssige Energie theoretisch für die Prozesswärme nutzbar wäre.

Im Vorherein wurde im Projektantrag eine Übersicht möglicher Systemkonzepte für die gängigen Nutzungsprofile Heizen, Kühlen und Verstromung erstellt. Diese Auflistung in Tabelle 2-8 ist nicht erschöpfend, sondern eine beispielhafte Übersicht möglicher Nutzungsarten wie sie im Antrag definiert wurden. Die Fraunhofer ISE hat sodann für die Energienutzung Heizen und Kühlen die Anforderungen einiger Systemkonzepte überprüft und auf Basis einer Musterhalle mit den verschiedenen möglichen SEA-Energieerträgen analysiert (Kapitel 7).

SEA Temperatur	Technologie	Nutzung	Nutztemperatur
5°C bis 35°C	Luft/Luft-Kreuzwärmetauscher für Lüftung	Wärme/Kühlung	5°C bis 35°C
55°C	Luft/Wasser-Wärmepumpe (elektrisch) für Heizung	Wärme	45°C
55°C	Luft/Wasser-Gas-Wärmepumpe für Heizung	Wärme	45°C
55°C	Luft/Sole-Wärmepumpe für Erdspeicher	Wärme	45°C
85°C	Luft + sorptionsgestützte Klimatisierung	Kälte	75°C
95°C	ORC-Prozess (Organic Rankine Cycle)	Wärme/Strom	85°C
95°C	Kalina-Kreisprozess	Wärme/Strom	85°C

Tabelle 2-8: Beispiele zur möglichen Energienutzung für das SEA-Prinzip; Quelle: [Fos14b]

Table 2-8: Examples of possible energy utilisation for the SEA principle; source: [Fos14b]

Um beispielsweise bei niedrigen Außentemperaturen und geringer Solareinstrahlung noch Temperaturen zu erreichen, die direkt zum Heizen geeignet sind (ohne Wärmepumpe), ist eine hohe Effizienz notwendig. Damit erreicht derselbe Kollektor im Sommer recht hohe Temperaturen, obwohl dies – für den reinen Zweck des Heizens – nicht notwendig wäre. Ebenso benötigt ein Kollektor, der im Sommer hohe Temperaturen erzeugen soll (z. B. zum Antrieb einer sorptionsgestützten Klimatisierungsanlage), eine hohe Effizienz. Hier könnte also ein Kollektor mit hoher Effizienz im Sommer zum Kühlen und im Winter zum Heizen eingesetzt werden. Ein Kollektor ohne zusätzliche transparente Abdeckung wird wiederum nur geringe Effizienz und daher im Winterfall auch nur niedrige Temperaturen erreichen können. Diese Variante erfordert daher eine Wärmepumpe, um Heiztemperaturen zu erreichen. Eine unabgedeckte Variante könnte wiederum im Sommer zur nächtlichen Kühlung durch Wärmeabstrahlung an den kalten Nachthimmel genutzt werden.

Daher wurden im Verlauf des Forschungsprojektes P1041 (SEA2) die allgemein verwendeten Nutzungskonzepte Heizen und Kühlen für einige Systemvarianten in Hinblick auf den Jahresertrag und der Temperaturanforderungen für verschiedene Kollektorkonfigurationen geprüft. Die Basis für diese Analyse stellte eine Musterhalle dar, wie sie durch das "Eco-Commercial-Building"-Projekt (ECB) definiert wurde [Bay11]. Eine Reihe gängiger Energienutzungsprofile wird auf Basis jeweiliger SEA-Energieerträge in Kapitel 7 vorgestellt und energetisch analysiert. Dafür wurde von der Forschungsstelle Fraunhofer ISE ein Excel-Programm weiterentwickelt, welches auch weitergehende Analysen erlaubt.

3 Optimierungspotentiale von SEA Optimisation potentials of SEA

Kurzfassung

SEA ist durch Definition ein solarer Luftkollektor und so treffen wichtige Grundlagen zu Luftkollektoren wie bspw. die deutliche Abhängigkeit des Wirkungsgrades vom Massenstrom auch für SEA zu. Im ersten Schritt wurden daher die möglichen Optimierungspotentiale von SEA identifiziert und qualitativ bewertet. So gibt es einerseits Optimierungsmöglichkeiten in der wechselseitigen Abhängigkeit zwischen Leistung und Temperaturniveau, so bspw. der genannte Massenstrom oder die Länge der Kollektormodule. Dies ist insbesondere auch in Hinblick auf die Anforderungen der letztendlichen Energienutzung wichtig, da hier teilweise Bedingungen an das notwendige Temperaturniveau geknüpft sind. Andererseits gibt es Möglichkeiten, die Leistung als auch das Temperaturniveau der Kollektorluft gleichzeitig zu erhöhen, so durch konstruktive Änderungen, eine andere Profilgeometrie, die Absorberbeschichtung oder eine transparente Abdeckung. Diese können den optischen Wirkungsgrad erhöhen und/oder die thermischen Verluste des Luftkollektors reduzieren.

Abstract

SEA is by definition a solar air collector, thus important basics of these also apply for SEA, like the high dependence of the collector's efficiency on the applied mass flow setting. In the first step the different optimisation potentials were therefore identified and qualitatively assessed. On the one hand, there are optimisation potentials within the mutual dependence between output and temperature level, e.g. the aforementioned mass flow or the length of the collector modules. This is particularly important in regard to the requirements of the eventual energy utilisation, as some concepts require certain minimum temperature levels. On the other hand, there are optimisation potentials which are suited to increase output and temperature level likewise, e.g. constructional changes, different profile geometry, the absorber coating or a transparent covering. These can increase the so-called optical efficiency of the collector and/or reduce its thermal losses.

3.1 Grundlagen von Solarkollektoren und Besonderheiten von Solarluftkollektoren **Basics on solar collectors and characteristics of solar air collectors**

Grundlagen zur Solarthermie sind in [Duf13], [Nor14], [Ric13], [Sti12], [Eic12] zu finden. Das Herzstück eines thermischen Solarkollektors ist der **Absorber**. Er absorbiert die Solarstrahlung; der Anteil, der tatsächlich aufgenommen wird, hängt vom solaren **Absorptionsgrad** α ($1 > \alpha > 0$) des Absorbers ab. Je höher dieser ist,

desto mehr Strahlung kann in Wärme umgewandelt werden. Genutzt werden kann prinzipiell das gesamte Sonnenspektrum, es geht also nicht nur um dessen langwelligen Infrarotanteil. Falls der Absorber transparent abgedeckt wird, um die thermischen Verluste zu reduzieren (Konvektionsverluste, hauptsächlich durch Wind), muss außerdem der solare **Transmissionsgrad** der Abdeckung (Glas oder – im Fall von SEA – eine Polycarbonat-Platte) berücksichtigt werden. Um viel Solarstrahlung nutzen zu können, sollten also beide, d. h. der Absorptionsgrad des Absorbers sowie der Transmissionsgrad der transparenten Abdeckung (sofern vorhanden), möglichst hoch sein. Der Absorptionsgrad ist bei schwarzer Farbe maximal, bei grau bzw. bei anderen Farben geringer. Insofern hat bereits ein architektonischer Wunsch nach einer bestimmten Farbe einen Einfluss auf den Wirkungsgrad des Solarkollektors.

Die absorbierte Strahlung wird anschließend in **Wärme** umgewandelt. Ein möglichst hoher Anteil davon soll an das Wärmeträgermedium – im Fall von SEA ist das Luft – abgegeben werden, während ein anderer an die Umgebung abgegeben wird. Letzteres sind **thermische Verluste**, die nicht erwünscht sind. Sie werden sehr stark durch die transparente Abdeckung beeinflusst; durch sie entsteht eine weitgehend ruhende Luftschicht zwischen Absorber und Abdeckung, die einen wärmedämmenden Effekt hat. Vor allem aber werden die Konvektionsverluste deutlich reduziert, weil strömende kältere Außenluft nicht mehr direkt mit dem warmen Absorber in Kontakt kommt, sondern nur mit der – gegenüber dem Absorber kälteren – **transparenten Abdeckung**. Somit wird deutlich, dass für eine hohe Effizienz eine gute Wärmeabgabe an die Luft, die durch die Absorberkanäle strömt, notwendig ist und eine möglichst geringe Wärmeabgabe an die Umgebung. Bereits durch diese Betrachtung ist offensichtlich, dass die grundsätzliche Entscheidung für oder gegen eine transparente Abdeckung (z. B. aus gestalterischen oder wirtschaftlichen Gründen) die Effizienz des Kollektors stark beeinflusst.

Bei Solarabsorbern nach dem Stand der Technik werden in der Regel so genannte **spektralselektive Beschichtungen** verwendet. Diese weisen einen hohen Absorptionsgrad im Solarspektrum auf, gleichzeitig aber einen niedrigen Emissionsgrad im Infrarotspektrum (typischerweise angegeben für 100 °C). Damit sollen auch die thermischen Verluste durch Infrarotabstrahlung im Betrieb reduziert werden. Da in dem hier vorgestellten Forschungsprojekt P1041 (SEA2) Serienbauteile verwendet werden sollten, die derart beschichtete Halbzeuge üblicherweise nicht verwenden, wurden spektralselektive Beschichtungen im Projekt nicht weiter untersucht. Allerdings wäre es durch physikalische Kollektormodelle durchaus möglich, deren Einfluss auf ein SEA-Konzept zu simulieren.

Nach dem Stand der Technik verwenden die meisten Kollektoren flüssige **Wärmeträgermedien** (meist Wasser-Glykol-Gemische mit Korrosionsinhibitoren, wobei das Glykol den Frostschutz sicherstellt). **Luft** hat als Wärmeträgermedium hinsichtlich Verfügbarkeit vor Ort, Unbedenklichkeit bezüglich Toxizität, Stagnationsverhalten und Frostschutz einige Vorteile. Dem gegenüber stehen Nachteile in Hinblick auf die geringe Dichte und geringe Wärmekapazität. Aufgrund dieser Eigenschaften sind relativ große Volumenströme notwendig, um eine bestimmte Wärmemenge pro Zeit bei gegebenem Temperaturhub zu übertragen (d. h. eine bestimmte Wärmeleistung zu erreichen). Der **Volumenstrom** beeinflusst

gemeinsam mit dem durchströmten Querschnitt die Strömungsgeschwindigkeit. Diese hat wiederum einerseits einen Einfluss auf den Druckverlust und damit die benötigte Leistung für den Ventilator, andererseits auf den Wärmeübergang vom Absorber an die strömende Luft. So führen geringe **Querschnittsflächen** zu hohen **Strömungsgeschwindigkeiten** und umgekehrt. Durch hohe Strömungsgeschwindigkeiten entstehen wiederum hohe **Druckverluste**, aber auch höhere **Wärmeübergangskoeffizienten** (und umgekehrt). Erstere führen zu einem höheren Bedarf an elektrischer Energie für den Betrieb der Ventilatoren, letzterer führt zu einer Erhöhung der thermischen Effizienz. Dieser gegenläufige Effekt macht die Notwendigkeit einer Optimierung zur Findung des optimalen Volumen- bzw. Massenstroms, der zu einer **maximalen Gesamteffizienz** bzw. einer **maximalen Primärenergieeinsparung** führt, deutlich. Bei der Berechnung des Druckverlusts darf nicht nur der Kollektor betrachtet werden, sondern muss das gesamte **System**, also auch die Rohrleitungen, Krümmer etc. zur Verteilung der vom Kollektor erwärmten Luft berücksichtigt werden.

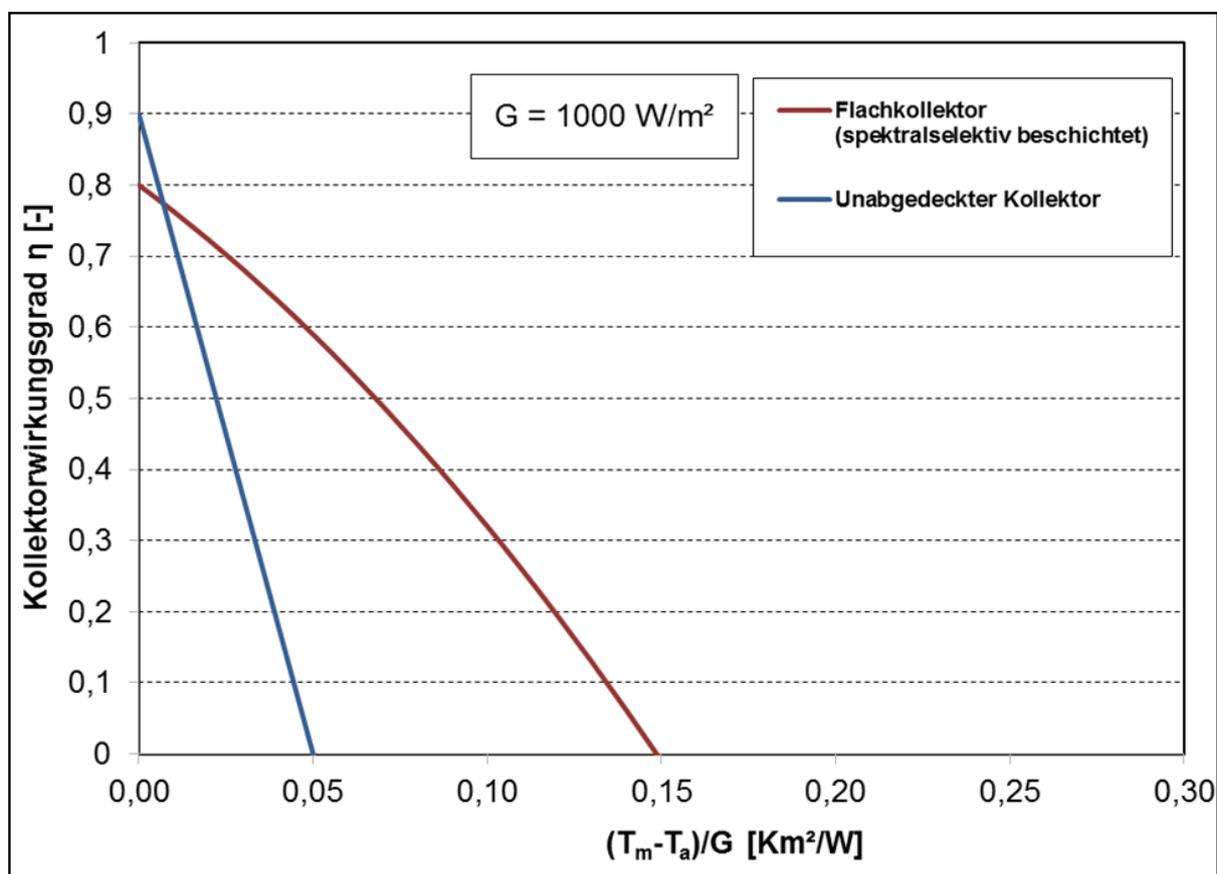
Die Optimierung in Hinblick auf die maximale Primärenergieeinsparung ist möglich, sofern der Volumenstrom frei gewählt werden kann und sich der Temperaturhub beliebig einstellen kann. Soll jedoch ein bestimmter **Temperaturhub** zwischen Kollektoreintritt und -austritt bzw. eine bestimmte Zieltemperatur erreicht werden, ist dieser Freiheitsgrad nicht mehr gegeben. Dann ergibt sich der Volumenstrom zwangsläufig aus der erreichbaren Kollektorleistung und dem gewünschten Temperaturhub.

Aus den dargestellten Betrachtungen wird deutlich, dass eine Auslegung immer im **System- und Anwendungskontext** erfolgen muss: Wenn z. B. eine bestimmte Austrittstemperatur benötigt wird (z. B. für solare Kühlung), muss der Volumenstrom während des Betriebs ständig je nach Einstrahlung und Außentemperatur angepasst werden und kann nicht in Hinblick auf maximale Gesamteffizienz optimiert werden. Anders z. B. bei einer Luftvorheizung einer Halle (mit Zusatzheizung): Hier können immer optimale Volumenströme eingestellt werden; die Austrittstemperaturen ändern sich, was aber unkritisch ist, da ohnehin nachgeheizt wird (z. B. durch Dunkelstrahler).

Während sich der Wirkungsgrad eines Photovoltaikmoduls in Abhängigkeit der Temperatur nur wenig ändert, ist er bei einem thermischen Solarkollektor aufgrund der mit steigender Temperatur zunehmenden thermischen Verluste deutlich davon abhängig. Dieses Verhalten wird durch die **Wirkungsgradkennlinie (WKL)** beschrieben. Der Wirkungsgrad hängt von der **mittleren Fluidtemperatur**, der **Umgebungstemperatur** sowie der **Globalstrahlung** ab. Er wird typischerweise über der Differenz aus mittlerer Fluid- und Umgebungstemperatur ($T_m - T_a$) dividiert durch die Globalstrahlung G dargestellt (sog. reduzierte Temperaturdifferenz).

Um die obigen Ausführungen zwischen Leistung und Energie sowie die Darstellung der Wirkungsgradkennlinien zu erklären, zeigt Abbildung 3-1 nun **beispielhaft** die WKL eines abgedeckten Flachkollektors mit spektralselektiver Beschichtung sowie eines unabgedeckten Kollektors für eine Einstrahlung von 1000 W/m^2 . Es ist deutlich zu erkennen, dass die Kurve des unabgedeckten Kollektors deutlich steiler verläuft, d. h. mit zunehmender Temperaturdifferenz zur Umgebung nehmen die thermischen

Verluste sehr stark zu und damit der Wirkungsgrad ab. Beim abgedeckten Kollektor werden die thermischen Verluste wie oben dargelegt deutlich reduziert, wodurch die Reduktion des Wirkungsgrads η mit zunehmender mittlerer Kollektorlufttemperatur (mittlere Fluidtemperatur) T_m deutlich geringer ausfällt.

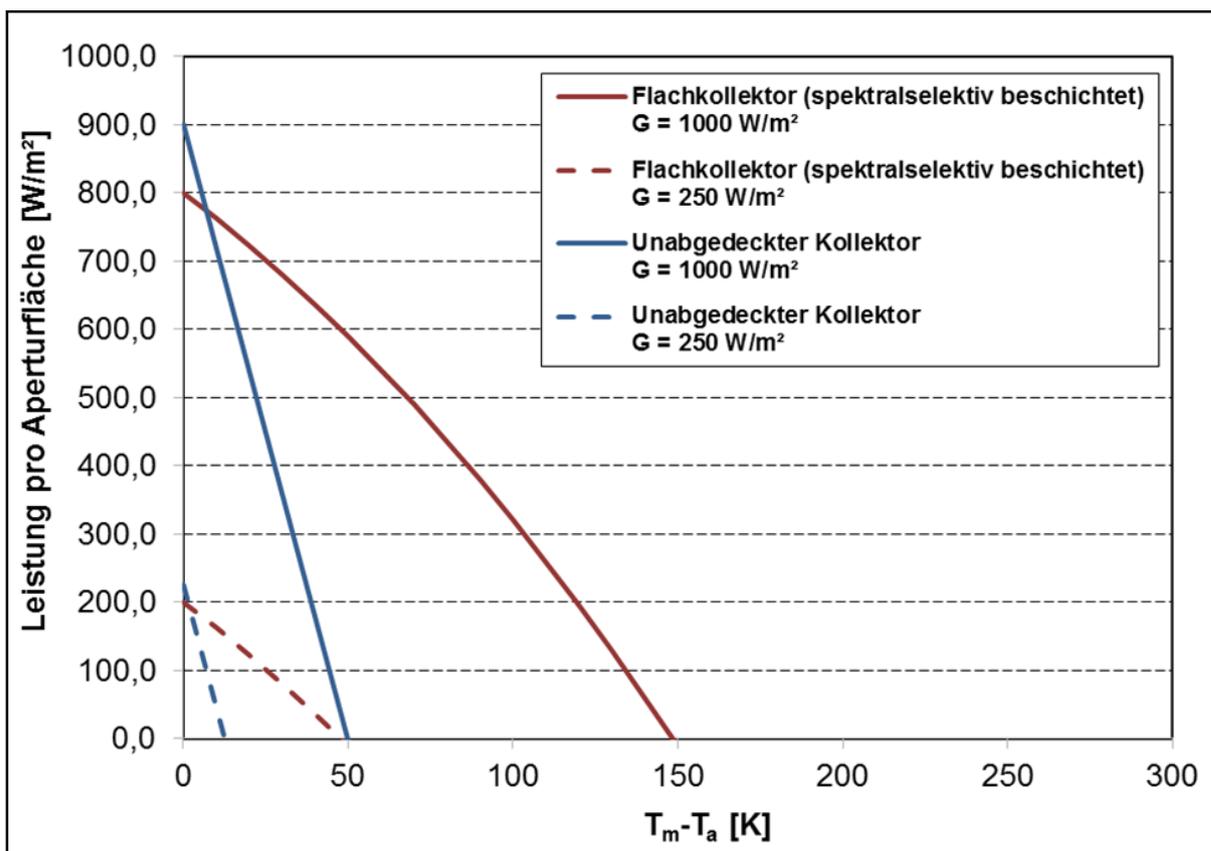


G Globalstrahlung
 T_m Mittlere Fluidtemperatur
 T_a Umgebungstemperatur

Abbildung 3-1: Wirkungsgradkennlinien eines abgedeckten (rot) und eines unabgedeckten (blau) thermischen Solarkollektors

Figure 3-1: Efficiency curves of a covered (red) and an uncovered (blue) solar thermal collector

Etwas anschaulicher als die Darstellung über Wirkungsgradkennlinien ist die Verwendung von **Leistungskurven**. Dabei wird die Leistung pro Aperturfläche über der Differenz aus mittlerer Fluid- und Umgebungstemperatur dargestellt (Abbildung 3-2). Dadurch wird direkt ablesbar, welche Leistung der Kollektor bei einer bestimmten Temperaturdifferenz erreichen kann. Allerdings gilt nun eine einzelne Kurve nur noch für eine bestimmte Einstrahlung. Diese Abbildungsweise ist also anschaulicher, aber in Hinblick auf die wechselnde Globalstrahlung weniger vielseitig, bzw. umfassend. In Abbildung 3-2 ist gut erkennbar, wie die gesamte Kurve bei Verringerung der Einstrahlung nach links unten, also zu geringeren Leistungen und Temperaturdifferenzen, wandert (jeweils gestrichelte Kurve).

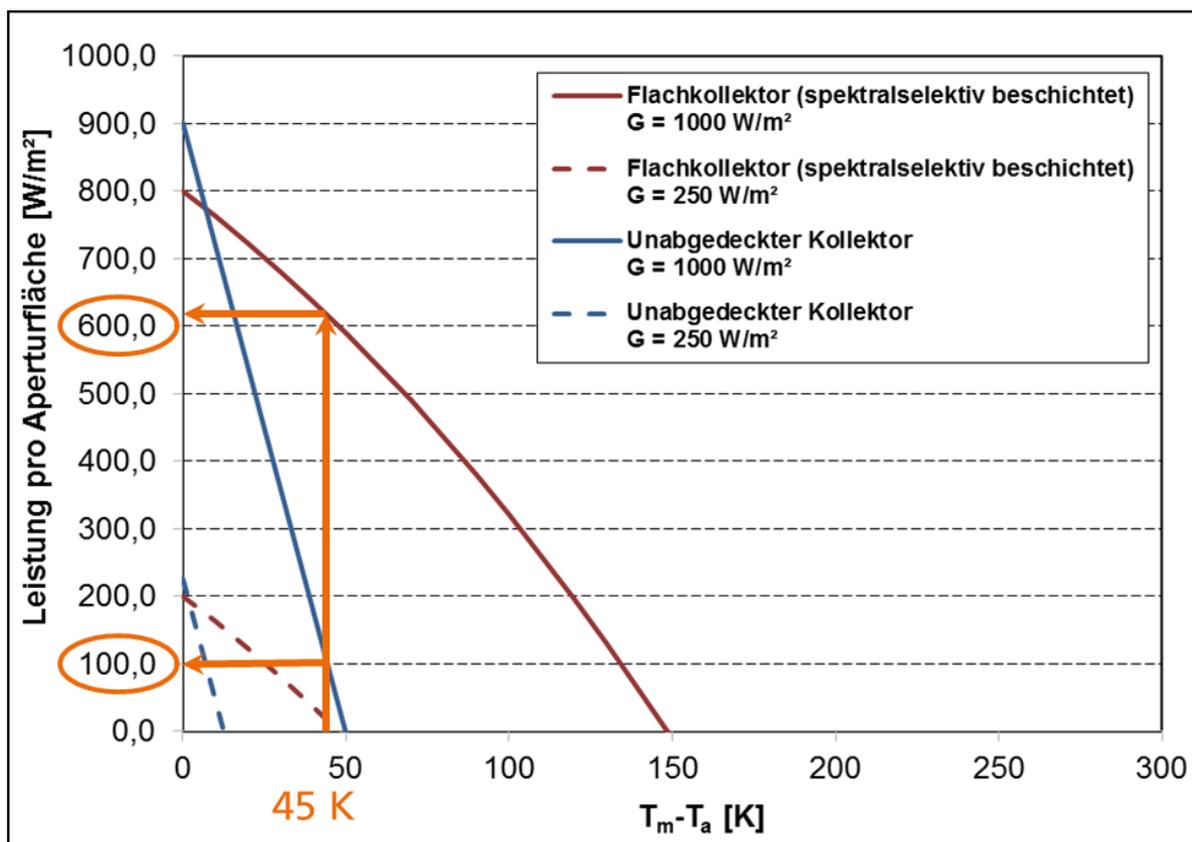


G Globalstrahlung
 T_m Mittlere Fluidtemperatur
 T_a Umgebungstemperatur

Abbildung 3-2: Leistungskurven eines abgedeckten (rot) und eines unabgedeckten (blau) thermischen Solarkollektors für zwei Einstrahlungsleistungen

Figure 3-2: Power curves of a covered (red) and an uncovered (blue) solar thermal collector for two different irradiation intensities

An den **Beispielen** in Abbildung 3-3 und Abbildung 3-4 soll die Ermittlung der Leistungen für einen Sommer- und einen Winterfall exemplarisch erläutert werden. Für den Sommerfall (Abbildung 3-3) seien eine Einstrahlung von 1000 W/m² und eine Außentemperatur von 30 °C angenommen. Die Wärme des Kollektors soll zum Antrieb einer solaren sorptionsgestützten Klimatisierungsanlage mit einer notwendigen mittleren Fluidtemperatur von 75 °C genutzt werden. Dies führt zu einer Temperaturdifferenz von 45 K, wodurch die Position auf der x-Achse bestimmt ist. Die Schnittpunkte mit den jeweiligen Leistungskurven für 1000 W/m² ergeben eine Kollektorleistung von 600 W für den abgedeckten bzw. 100 W für den unabgedeckten Kollektor. Der Ertrag des unabgedeckten Kollektors ist zwar viel geringer, jedoch könnte in diesem Fall durch eine Versechsfachung der Fläche der gleiche Ertrag bei gleicher Zieltemperatur erreicht werden. Hier könnte also ein niedrigerer Wirkungsgrad durch Fläche kompensiert werden.



Sommer: Betrieb einer solaren sorptionsgestützten Klimatisierungsanlage

$G = 1000 \text{ W/m}^2$
 $T_m = 75 \text{ °C}$
 $T_a = 30 \text{ °C} \quad \rightarrow T_m - T_a = 45 \text{ K}$

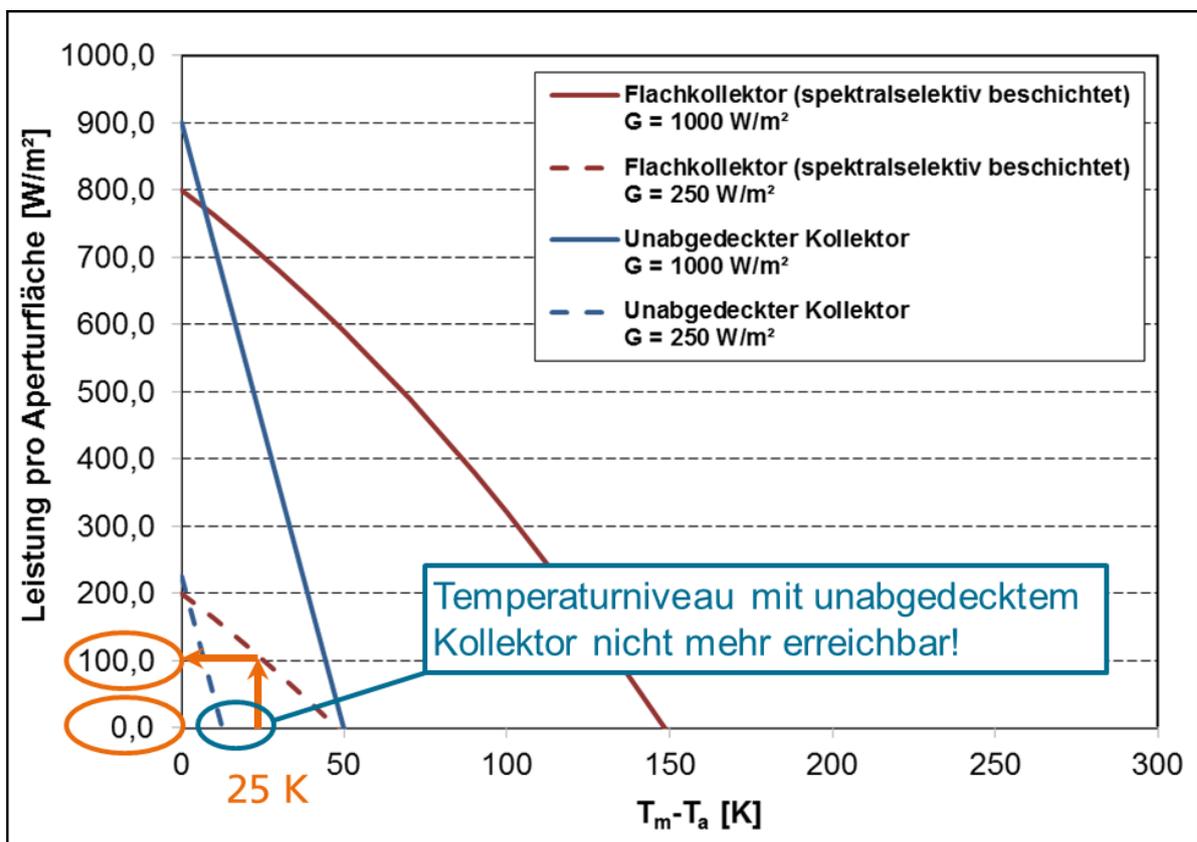
Abbildung 3-3: Beispielhafte Leistungsermittlung für einen Sommerfall.

Figure 3-3: Exemplary power determination for a summer case.

Für den Winterfall (Abbildung 3-4) seien nur 250 W/m^2 und eine Außentemperatur von 0 °C sowie eine avisierte mittlere Fluidtemperatur von 25 °C angenommen. Die Position auf der x-Achse liegt somit bei 25 K , und als Schnittpunkte mit den Leistungskurven für 250 W/m^2 ergeben sich 100 W für den abgedeckten und 0 W für den unabgedeckten Kollektor. Es wird deutlich, dass unter diesen Bedingungen das notwendige Temperaturniveau mit dem unabgedeckten Kollektor nicht mehr erreicht werden kann. Dies kann auch nicht durch eine Erhöhung der Kollektorfläche kompensiert werden; der Kollektor ist in diesem Fall für die angedachte Anwendung nicht (mehr) geeignet.

Dadurch wird verständlich, wie wichtig die Betrachtung des Kollektors mit seiner Wirkungsgradkennlinie bzw. seinen Leistungskurven im Anwendungskontext ist: Es macht keinen Sinn, einen Kollektor unabhängig von seiner Nutzung im Hinblick auf maximalen Wirkungsgrad zu optimieren. Wichtig sind die relevanten Betriebspunkte, auf die der Kollektor ausgelegt werden soll. So kann man beispielsweise erkennen, dass im dargestellten Beispiel die Kurve des unabgedeckten Kollektors im Bereich

sehr geringer Temperaturdifferenzen, also bei mittleren Fluidtemperaturen nahe der Umgebungstemperatur, sogar höher als jene des abgedeckten Kollektors liegt (siehe auch Kapitel 3.3.1). Dies ist darauf zurückzuführen, dass beim unabgedeckten Kollektor die optischen Verluste durch die transparente Abdeckung wegfallen. Somit ist ein unabgedeckter Kollektor sehr gut für die Beheizung eines Schwimmbads oder zur Anhebung der Quellentemperatur einer Wärmepumpe geeignet, weil bei beiden nur ein niedriges Temperaturniveau gefordert ist. Für die späteren Betrachtungen ist daher wichtig zu verstehen, dass „**Optimierung**“ immer an Randbedingungen durch die Anwendung geknüpft ist, weshalb in diesem Projekt ein möglichst **breites Spektrum an Kollektorbauarten und Anwendungen** aufgezeigt werden soll.



Winter: Luftheizung

$$G = 250 \text{ W/m}^2$$

$$T_m = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_a = 0 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\rightarrow T_m - T_a = 25 \text{ K}$$

Abbildung 3-4: Beispielhafte Leistungsermittlung für einen Winterfall

Figure 3-4: Exemplary power determination for a winter case

Es gibt unterschiedliche prinzipielle Bauarten (Abbildung 3-5) bei Luftkollektoren. Ein Luftkollektor kann mit oder ohne transparente Abdeckung gestaltet sein, sein Absorber kann über-, unter- oder durchströmt sein. Dabei sind auch Kombinationen

aus diesen Varianten möglich. Bezüglich der transparenten Abdeckung ist zu beachten, dass diese nur zu einer nennenswerten Reduktion der thermischen Verluste führt, wenn sie nicht direkt unterströmt ist (vgl. B1), sondern eine stehende Luftschicht zwischen Absorber und Abdeckung entsteht (vgl. B2).

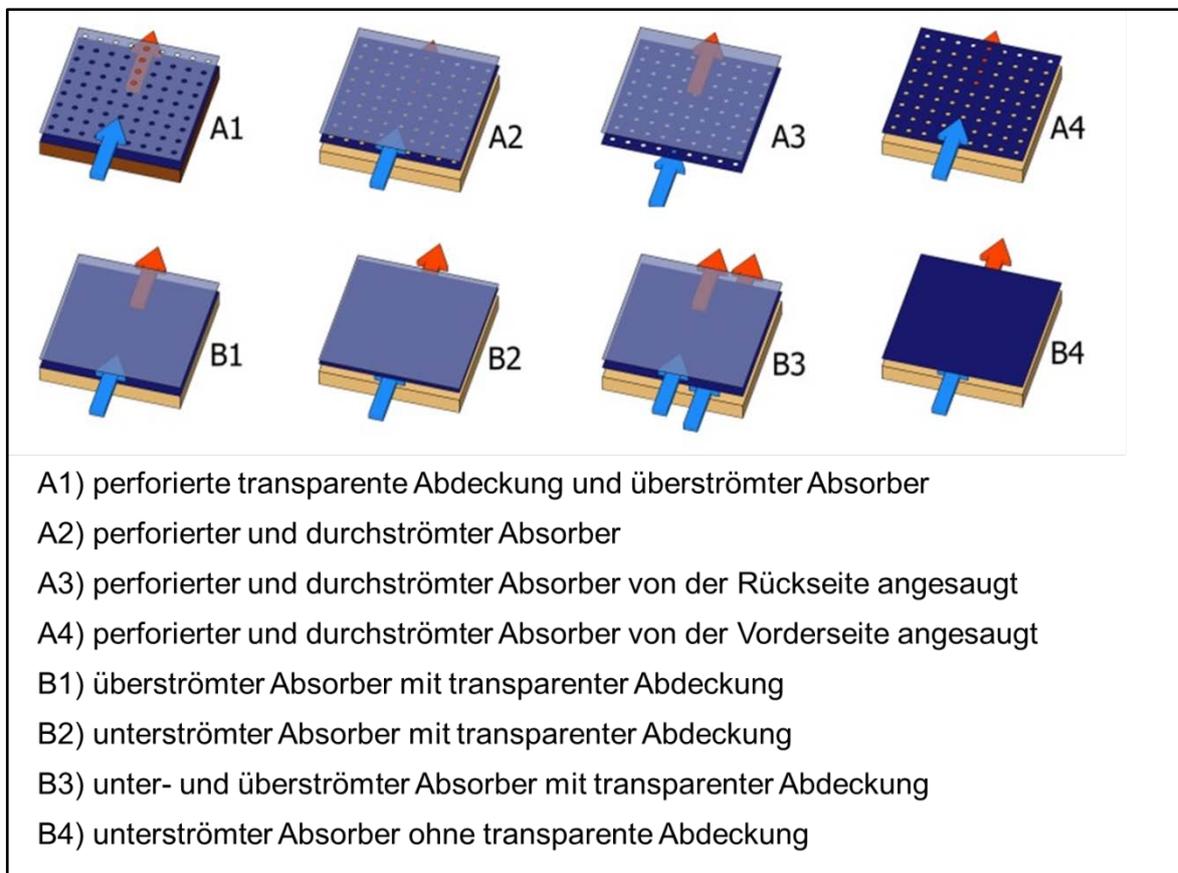


Abbildung 3-5: Prinzipielle Bauarten von Luftkollektoren

Figure 3-5: Principal types of solar air collectors

Die Unterschiede von Kollektoren mit Flüssigkeiten und Luft als Arbeitsmedium erlauben deren gezielte Auswahl für eine Vielzahl von Anwendungen und unterschiedliche Klimata. Luftkollektoren eignen sich besonders dort, wo warme Luft direkt benötigt wird, insbesondere wenn die Wärme nicht gespeichert werden muss.

Luftkollektoranlagen sind in der Regel kostengünstig, da die Luftkollektoren einfacher als Flüssigkeitskollektoren gefertigt werden können. Außerdem braucht die Luft nicht nachgefüllt oder gewechselt zu werden, wie es bei Flüssigkeitskollektoren aufgrund der Degradation der Frostschutzmittel der Fall ist. In dem Zusammenhang sind auch keine Maßnahmen zum Frostschutz nötig. Nachteilig sind die voluminösen Kanäle zwischen Luftkollektorfeld und Verbraucher. Luft eignet sich als Arbeitsmedium besonders bei Integration der Kollektoren in Fassade und Dach, da dies im Gegensatz zu Flüssigkeiten bei Undichtigkeiten keinen Gebäudeschaden verursacht.

Bei der Entwicklung von Luftkollektoranlagen ist es wichtig, die technischen Besonderheiten von Luftkollektoren zu kennen. Diese werden in Abbildung 3-6 erklärt. Zunächst wird die Solarstrahlung von den Absorbern des Flüssigkeits-

kollektors (Querschnitt links) und des Luftkollektors (rechts) gleichermaßen absorbiert.

Beim Flüssigkeitskollektor fließt die Wärme quer über das Absorberblech über einen langen Weg mit flachem Querschnitt zum Fluidrohr (R_{Abs}). Dieser verhältnismäßig große thermische Widerstand ist **konstruktiv** bedingt. Beim Luftkollektor fließt die Wärme senkrecht durch das Absorberblech über einen kurzen Weg mit breitem Querschnitt zum Luftkanal (R_{Abs}). Dabei ist nur ein sehr kleiner Widerstand zu überwinden.

Anschließend fließt die Wärme bei beiden Kollektorarten weiter in das Arbeitsmedium ($R_{Abs-Flüssig.}$, $R_{Abs-Luft}$). Dieser Widerstand ist stark vom **Betriebsparameter** Massenstrom abhängig. Bei Flüssigkeiten ist er vernachlässigbar klein. Beim Luftkollektor stellt diese Wärmeübertragung den größeren Widerstand in der Übertragungskette dar [ISE14b].

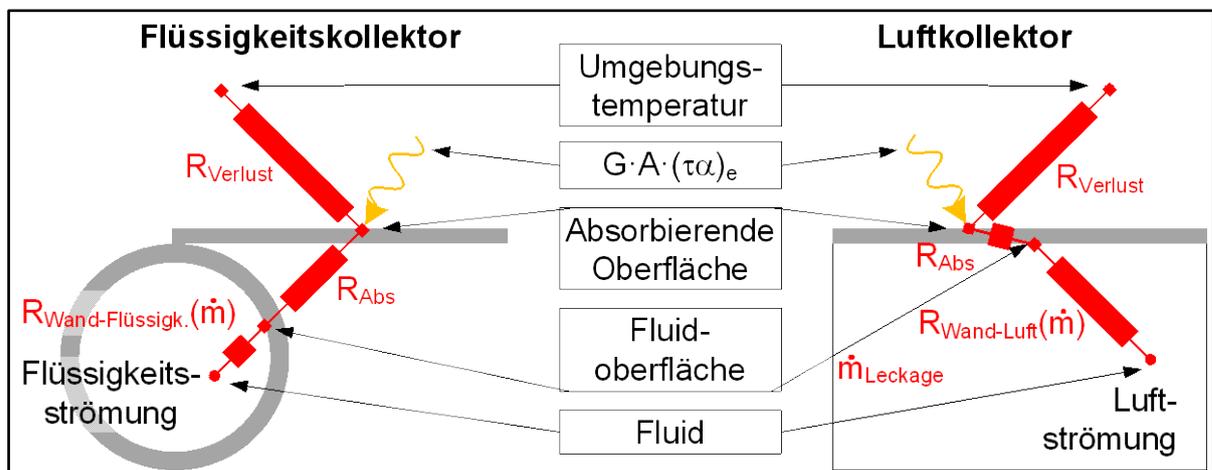


Abbildung 3-6: Wärmeübertragung in Flüssigkeits- und Luftkollektoren

Figure 3-6: Heat transfer in solar liquid and solar air collectors

Da bei Flüssigkeitskollektoren der Massenstrom nur einen geringen Einfluss hat, braucht er im Wirkungsgradmodell nicht berücksichtigt zu werden. Die konstruktiv bedingten Eigenschaften sind durch die Modellkoeffizienten enthalten. Bei Luftkollektoren wird der Massenstrom jedoch in das Modell aufgenommen.

In Abbildung 3-6 ist vereinfacht nur ein flacher Absorber für den Luftkollektor dargestellt. Damit Luftkollektoren auch einen niedrigen Hilfsenergiebedarf bei gutem thermischem Ertrag aufweisen, sind konstruktive Maßnahmen am Absorber notwendig. Diese Maßnahmen verbessern die Wärmeübertragung an die Luft beispielsweise durch Vergrößerung der Übertragungsfläche mittels Rippen. Dennoch reichen diese Maßnahmen nicht aus, die Massenstromabhängigkeit zu vernachlässigen.

3.2 Übersicht der Optimierungspotentiale von SEA Overview on the optimization potentials of SEA

Nach Abschluss des Forschungsprojektes P779 (SEA1) wurde zunächst betrachtet, welche Varianten für neue SEA-Kollektoren auf Basis von Serienbauteilen möglich sind. Es zeigte sich, dass durch die Kombination der einzelnen Komponenten zahlreiche Bauarten vorstellbar sind. Dabei wurde im ersten Schritt noch nicht unterschieden, welche Lösungen eher für die Fassade und welche eher für das Dach Anwendung finden könnten, sondern welche Möglichkeiten es grundsätzlich als auch auf Basis im Markt verfügbarer Bauelemente gibt, eine Optimierung zu realisieren. Die folgende Übersicht wurde in der Projektvorbereitung erstellt (Abbildung 3-7):

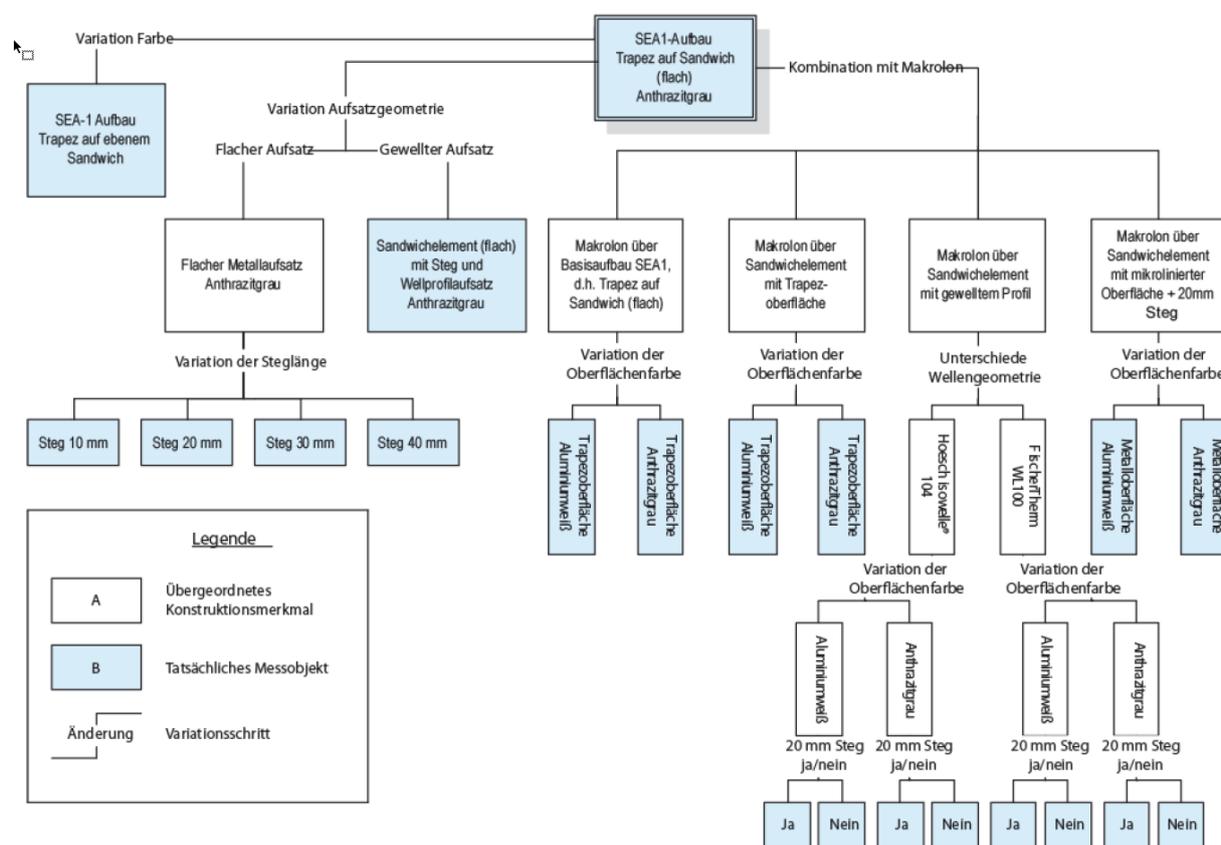


Abbildung 3-7: Übersicht möglicher SEA-Konstruktionen im Rahmen der Vorbereitungen zum Forschungsprojekt P1041 (SEA2); Quelle: [Fos14b]

Figure 3-7: Overview of possible SEA constructions as considered during the preparations for research project P1041 (SEA2); source: [Fos14b]

Die Aufgabe im Forschungsprojekt P1041 (SEA2) bestand nun darin, aus dieser Vielfalt sinnvolle Varianten durch Vorauswahl, Berechnungen und Simulationen zu identifizieren, um das SEA-Konzept insgesamt näher an eine spätere mögliche Produktentwicklung zu bringen. Dabei ist wichtig, die Kriterien festzulegen, nach denen eine Auswahl erfolgen soll, und es muss verstanden werden, welche Konsequenzen eine bestimmte Kombination aus Sandwichelement, aufgesetztem Stahlprofil und ggf. transparenter Abdeckung auf den fertigen SEA-Kollektor hat.

Zunächst wurden folgende Randbedingungen identifiziert, die für die Weiterentwicklung des SEA-Konzepts wichtig sind:

- Die Idee des SEA-Konzepts basiert auf der Sandwichbauweise, damit verbunden der Metalleichtbauweise und somit deren typischen Anwendungsbereichen, also v. a. im Industrie- und Gewerbehallenbau.
- Es sollen grundsätzlich nur Serienbauteile eingesetzt werden.
- Es sollen schließlich sinnvolle, wirtschaftliche Gesamtlösungen zum Heizen und Kühlen (Energienutzung, siehe Kapitel 7) gefunden werden, d. h. die möglichen Kollektorvarianten müssen von Anfang an im späteren Anwendungskontext betrachtet werden.

Somit muss zunächst verstanden werden, wie Kollektor, Gebäude und Anwendung interagieren und welche konkrete Konsequenz sich hieraus für das Lastenheft des Kollektors ergeben. Ziel des Projekts war nicht eine bloße Optimierung eines Kollektors ohne Anwendungskontext, sondern vielmehr eine systemorientierte Komponentenentwicklung im Hinblick auf Gesamtlösungen.

Wie aus (Abbildung 3-7) deutlich wird, gibt es zahlreiche Möglichkeiten, einen SEA-Kollektor aufzubauen und zu betreiben. Dabei sind vor allem folgende Merkmale relevant:

- Abdeckung des Kollektors
- Konstruktive Merkmale
- Profilgeometrie
- Farbe/Beschichtung des Solarabsorbers
- Massenstrom
- Kollektorlänge

Diese Merkmale haben Einflüsse auf die Wirkungsgradkennlinien bzw. Wirkungsgradkennfläche (siehe unten) eines Kollektors, und diese bestimmen im Anwendungs- und Systemkontext schließlich den Ertrag. Um bei der Auswahl der möglichen Varianten systematisch vorgehen zu können, ist es wichtig, die qualitative Auswirkung der oben genannten Merkmale zu verstehen. Daher sollen diese im nachfolgenden Kapitel 3.3 erläutert werden. Die Ausführungen machen deutlich, dass mit Grundkenntnissen und Erfahrung die Auswirkungen bestimmter Entscheidungen (z. B. transparente Abdeckung, Farbe, Dimensionen von Ober- und Untergurten etc.) bereits qualitativ abgeschätzt werden können. Nach einer Vorauswahl können dann detaillierte Simulationen auf Basis physikalischer Modelle durchgeführt werden.

3.3 Erläuterungen zu den einzelnen Optimierungspotentialen Describing the individual optimisation potentials

3.3.1 Einfluss einer transparenten Abdeckung Effect of a transparent covering

Unter abgedeckten Kollektoren werden typischerweise solche Kollektoren verstanden, bei denen sich in einem Abstand von ca. 15 - 20 mm eine transparente Abdeckung (bei klassischen Flachkollektoren in der Regel aus Glas) befindet. Diese transparente Abdeckung hat den Zweck, zwischen dieser und dem Absorber eine ruhende Luftschicht zur Reduktion thermischer Verluste aufzubauen. Abgedeckte Kollektoren sind in den meisten Fällen effizienter als unabgedeckte, wenngleich es Ausnahmen gibt (siehe weiter unten). Grundlegend kann die höhere thermische Effizienz abgedeckter Kollektoren folgendermaßen erklärt werden.

Die Abbildung 3-8 zeigt exemplarisch einen SEA-Kollektor wie er im Rahmen des Forschungsprojektes P779 (SEA1) realisiert wurde und einen ebensolchen mit transparenter Abdeckung. Der Absorber ist in dunkelgrauer Farbe dargestellt. Das Arbeitsfluid Luft wird durch die Luftkanäle zwischen dem solar erwärmten Absorber und Sandwichelement geführt und dadurch erwärmt.

In beiden Fällen wird die Solarstrahlung vom Absorber absorbiert und in Wärme umgewandelt, im Fall des abgedeckten Kollektors allerdings aufgrund optischer Verluste durch die transparente Abdeckung etwas weniger. Diese Wärme kann nun einerseits an das Fluid Luft und andererseits an die Umgebung abgegeben werden. Die jeweiligen Anteile ergeben sich über die thermischen Widerstände bzw. deren Verhältnis zueinander; je geringer der thermische Widerstand im Vergleich zum anderen ist, desto mehr Wärme wird über den betreffenden Pfad übertragen und umgekehrt. Somit weist der ideale Kollektor einen minimalen Widerstand zum Fluid und einen maximalen Widerstand zur Umgebung auf. Der Widerstand vom Absorber zum Fluid ist in beiden Fällen in Abbildung 3-8 gleich, jedoch führen beim abgedeckten Kollektor die ruhende Luftschicht und die transparente Abdeckung zu einem deutlich höheren thermischen Widerstand an die Umgebung als dies beim unabgedeckten Kollektor der Fall ist, weil bei letzterem insbesondere bei Wind z. B. direkt Wärme vom Absorber an die Außenluft abgegeben werden kann.

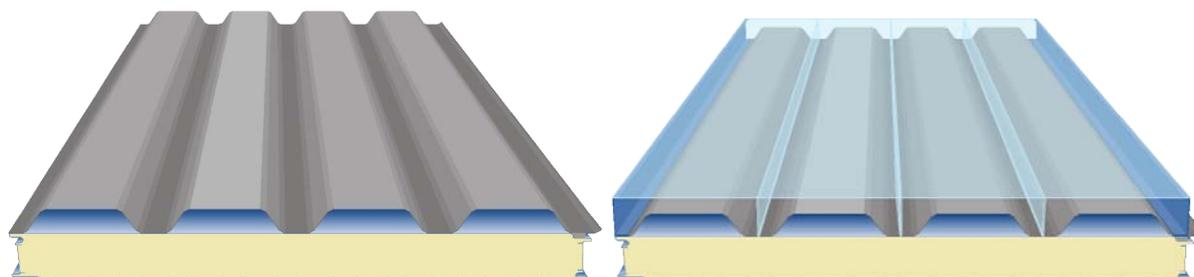


Abbildung 3-8: Kollektor auf Basis der SEA1-Konfiguration ohne und mit Abdeckung (links, respektive rechts); das Arbeitsfluid Luft wird durch die Luftkanäle zwischen Absorber (grau) und der äußeren Metaldeckschicht des Sandwichelementes (blau) geführt

Figure 3-8: Collector based on the SEA1 configuration without and with covering (left, respectively right side); the working fluid air is conducted through the air channels between the absorber (grey) and the outer metal sheet of the sandwich element (blue)

Der zwischen Absorber und Abdeckung vorhandene Luftspalt reduziert also die thermischen Verluste an die Umgebungsluft, führt damit zu höheren Wirkungsgraden und führt somit bei sonst gleichen Bedingungen zu höheren Temperaturhuben des Arbeitsfluides. Aus dem gleichen Grund ist ein solcher abgedeckter Kollektor auch weniger anfällig für Effizienzeinbußen durch wetterbedingte Windeinwirkung.

Die transparente Abdeckung erhöht somit die thermische Effizienz eines Luftkollektors, wodurch sich eine Erhöhung der möglichen Temperaturniveaus und der Energiemengen ergibt. Abbildung 3-9 zeigt den Effekt beispielhaft auf: die Kennlinie des Kollektors mit Abdeckung liegt über jener ohne Abdeckung, und sie verläuft flacher. Damit sind insgesamt auch höhere Temperaturen erreichbar. Im dargestellten Fall liegt auch der Wirkungsgrad η bei $\Delta T/G = 0$ (sogenannter Konversionsfaktor η_0) über jenem des unabgedeckten Kollektors.

Dies ist allerdings nicht zwangsläufig so; hier gibt es zwei gegenläufige Effekte: Durch die verringerten Verluste nach außen wird mehr Wärme ins Fluid transportiert, wodurch der Wirkungsgrad – wie im Beispiel dargestellt – steigt. Allerdings wird durch die transparente Abdeckung ein zusätzlicher optischer Verlust eingebracht, weshalb nicht die gesamte Solarstrahlung auf dem Absorber ankommt. Je nach Transmissionsgrad der Abdeckung kann dies dann dazu führen, dass der Konversionsfaktor η_0 (Schnittpunkt der WKL mit der y-Achse) des abgedeckten Kollektors unter jenem des unabgedeckten liegt und sich die Kurven erst bei $\Delta T/G > 0$ schneiden. Deshalb kann ein unabgedeckter Kollektor gegebenenfalls bei geringen Fluidtemperaturen zu höheren Wirkungsgraden führen als ein abgedeckter.

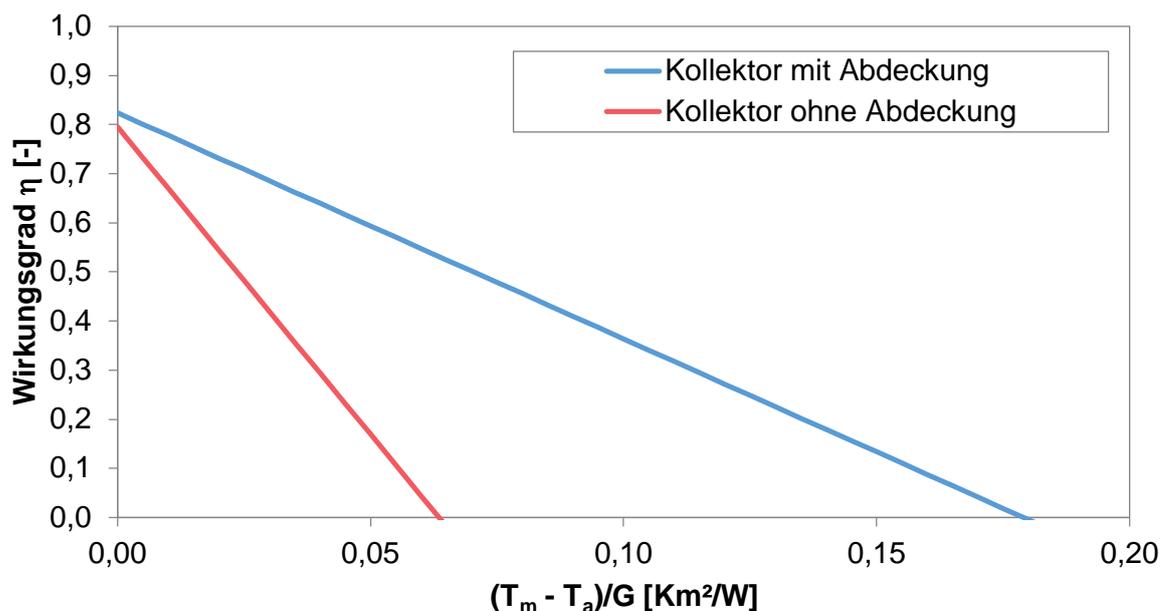


Abbildung 3-9: Einfluss einer transparenten Abdeckung auf die Wirkungsgradkennlinie

Figure 3-9: Influence of a transparent cover on the efficiency curve

Im Rahmen dieses FOSTA-Forschungsvorhabens P1041 (SEA2) war es daher eine wesentliche Zielsetzung, den Nutzen einer zusätzlichen transparenten Abdeckung auf die Effizienz des SEA-Kollektors genauer zu bestimmen, wobei bereits von vornherein aus den oben angesprochenen physikalischen Gründen von einem eindeutig positiven Effekt auszugehen war.

3.3.2 Einfluss konstruktiver Merkmale und der Profilgeometrie Effect of constructive characteristics and the profile geometry

Beim FOSTA-Forschungsvorhaben P779 (SEA1) konnte nur eine Profilgeometrie eines zuvor definierten Trapezprofils im Langzeitversuch untersucht werden. Dies diente dazu als Pilotprojekt eine Ergebnisbasis für SEA zu schaffen.

Die Konstruktion des Absorbers sowie die Durchströmung beeinflussen den Wirkungsgrad des Kollektors ebenfalls wesentlich. So führt beispielsweise ein größerer Abstand der Absorberrohre (bei Flüssigkeitskollektoren) oder der Rippen (bei Luftkollektoren) zu einer Verringerung des Wärmeübergangs (bzw. Erhöhung des thermischen Widerstands) vom Absorber zum Wärmeträgermedium (siehe Kapitel 3.1). Abbildung 3-10 illustriert den Effekt eines schlechten Wärmeübergangs auf die Wirkungsgradkennlinie. Diese wird um den Schnittpunkt mit der x-Achse gedreht, d. h. eine Verschlechterung des Wärmeübergangs führt zu einer Verringerung des Konversionsfaktors η_0 und durchweg zu geringeren Wirkungsgraden. Allerdings bleiben der Schnittpunkt mit der x-Achse und damit das erreichbare Temperaturniveau gleich.

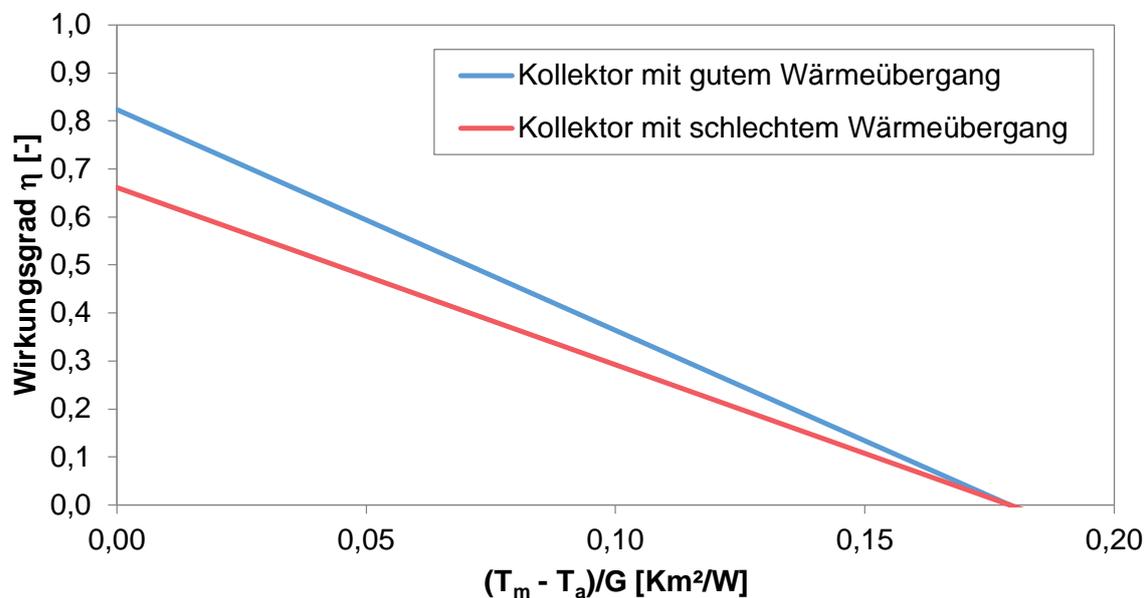


Abbildung 3-10: Einfluss des Wärmeübergangs vom Absorber zum Fluid auf die Wirkungsgradkennlinie

Figure 3-10: Effect of the heat transfer from absorber to fluid on the efficiency curve

Die Profilgeometrie beeinflusst den Wärmeübergang vom Absorber zum Fluid auf mehrere Arten. So führt beispielsweise ein Absorber als Trapezprofil mit breiten Untergurten dazu, dass die dort entstehende Wärme einen weiten Weg bis zum

Wärmeträgermedium Luft zurücklegen muss. Dieser hohe thermische Widerstand reduziert den Wirkungsgrad des Kollektors (s. o.). Daher muss stets im Detail untersucht bzw. durch Vorüberlegungen geklärt werden, welche Maßnahme den Wärmeübergang bei einem Kollektor verbessern oder verschlechtern könnte.

In diesem Kontext ist es wichtig, die weiteren Auswirkungen einer Vergrößerung der Oberflächen, die im direkten Kontakt mit der Luft stehen, zu beachten. Zwar führt dies zu einem besseren Wärmeübergang und damit auch zu einem höheren thermischen Wirkungsgrad, allerdings auch zu einer Reduktion der Querschnittsfläche. Eine Verringerung der gesamten Querschnittsfläche sorgt bei gleichbleibendem Volumenstrom für eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit. Daraus resultiert zwar einerseits eine erneute Erhöhung des Wärmeübergangskoeffizienten, andererseits auch ein erhöhter Energiebedarf der Ventilatoren wegen des höheren Druckverlusts (thermo-hydraulische Bewertung, Kapitel 4.2).

Dies kann so erklärt werden: Grundsätzlich sind turbulente Strömungen im Kollektor laminaren vorzuziehen, da sie einen besseren Wärmeübergang von Absorber auf die Luft gewährleisten. So kann manche Profilgeometrie hier vorteilhafter sein, denn insbesondere bei niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten (niedriger Massenstrom) im Kollektorluftkanal treten laminare Strömungen auf, und so kann dies hier ggf. durch eine geeignetere Profilgeometrie unterbunden werden, d. h. eher eine turbulente Strömung erzeugt werden. Deshalb wird die Profilgeometrie im direkten Zusammenhang mit der Optimierung der Strömungsgeschwindigkeiten (Massenströme) stehen, zumal turbulente Strömungen zu höheren Druckverlusten führen als laminare (siehe Kapitel 3.3.4).

Es ist aus physikalischen Gründen ebenfalls anzunehmen, dass durch eine Variation der Profilgeometrie, neben der bereits dargestellten Optimierung des Wärmeübergangs vom Absorber auf das Arbeitsfluid, auch eine Optimierung der Nutzung der eintreffenden Solarstrahlung erzielt werden könnte.

Die Sonneneinstrahlung auf die Erdoberfläche ist die Haupteinflussgröße des Wettergeschehens und des regionalen wie globalen Klimas. Die Bestrahlungsstärke oder Strahlungsstromdichte, also die Strahlungsenergie pro Flächen- und Zeiteinheit, hängt vom Winkel der Sonneneinstrahlung ab. Bei flachem Winkel treffen weniger Photonen pro Flächeneinheit auf dem Boden auf und erwärmen ihn weniger stark als bei senkrechtem Einfall. Die Winkelabhängigkeit ist in Abbildung 3-11 dargestellt.

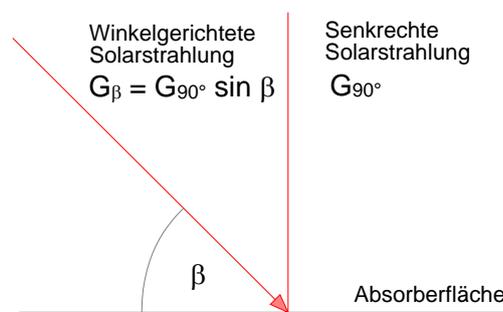


Abbildung 3-11: Abhängigkeit der effektiven solaren Strahlung vom Einstrahlungswinkel

Figure 3-11: Dependence of the effective solar radiation upon the irradiation angle

Hierbei bezeichnet G die Strahlungsleistung, G_{90° die Strahlungsleistung bei senkrechtem Einfallswinkel und β den Einfallswinkel der Sonnenstrahlen gegenüber dem Horizont. Verstärkt wird der Effekt noch durch den verlängerten Weg, den das Licht bei flachen Winkeln durch die Atmosphäre zurücklegen muss.

Die Intensität der Strahlung hängt also besonders vom Einfallswinkel der Solarstrahlung ab. Während der jahreszeitlichen Varianz der Deklination der Sonnenstrahlung kaum durch eine Änderung der Profilgeometrie Rechnung getragen werden sollte, sondern eher durch die grundlegende Ausrichtung der Flächen am Gebäude sowie des Dachneigungswinkels, gilt dies nicht für den Tagesverlauf der Sonnenstrahlung. Hier findet naturgemäß eine starke Variation des Azimuts und des Sonnenhöhenwinkels statt, da die Sonne am Himmel ihre tägliche Wanderung von Ost nach West absolviert. So könnte es bspw. für eine effizientere Absorption der Solarstrahlung im Tagesverlauf sinnvoll sein, ein gewelltes Profil zu verwenden, um bessere Einfallswinkel zu realisieren unter gleichzeitiger Nutzung der guten Wärmeleitung von Metall.

Wie dargestellt, sind durch konstruktive Merkmale sowie der Wahl der geeigneten Profilgeometrie diverse Effizienzeinflüsse in Hinblick auf Wärmeübergang und Strahlungsabsorption vorhanden, welche durch physikalische Gedankengänge, Messungen und Simulationen überprüft werden müssen. Einige Änderungen können, wie dargestellt, auch gegenläufige Effekte generieren. Diese gegenläufigen Effekte müssten im Rahmen einer Gesamtoptimierung ebenfalls berücksichtigt werden.

3.3.3 Einfluss von Farbe und Beschichtung **Effect of colour and coating**

Wie am Absorptionsverhalten des Lichts leicht erkenntlich, spielen verschiedene Farben und auch die Oberflächenstrukturen für die Absorption bzw. Reflexion des Lichts eine wichtige Rolle. Neben den Optimierungsmöglichkeiten via Farbe – im Zusammenhang mit den Profilgeometrien – interessiert hierbei auch der Einfluss hellerer Farben, denn man kann nicht davon ausgehen, dass bei jedem Bauvorhaben sehr dunkle Farben seitens der Architekten oder Bauherren stets gewünscht werden. Entsprechend sollte im hier vorgestellten Forschungsvorhaben auch der Einfluss verschiedener Absorptionsgrade solarer Strahlung untersucht werden. Ebenso relevant ist das Emissionsverhalten des Absorbers bei langwelliger Strahlung.

Die Farbe des Solarabsorbers drückt sich physikalisch im Absorptionsgrad aus, wobei zwischen dem visuellen (Farbe) und dem solaren Absorptionsgrad zu unterscheiden ist. Letzterer bezieht sich auf das gesamte Solarspektrum, das auch für das menschliche Auge nicht sichtbare Anteile enthält. Im Vergleich zu einem schwarzen Absorber weist ein hellerer Absorber einen geringeren Absorptionsgrad auf. Abbildung 3-12 zeigt, dass sich dies in der WKL als Parallelverschiebung nach unten, also zu geringeren Wirkungsgraden und Temperaturen, auswirkt. Je heller die Farbe, desto weiter rückt die WKL nach unten. Hellere Absorber führen also zu geringeren Wirkungsgraden und geringeren erreichbaren Temperaturniveaus.

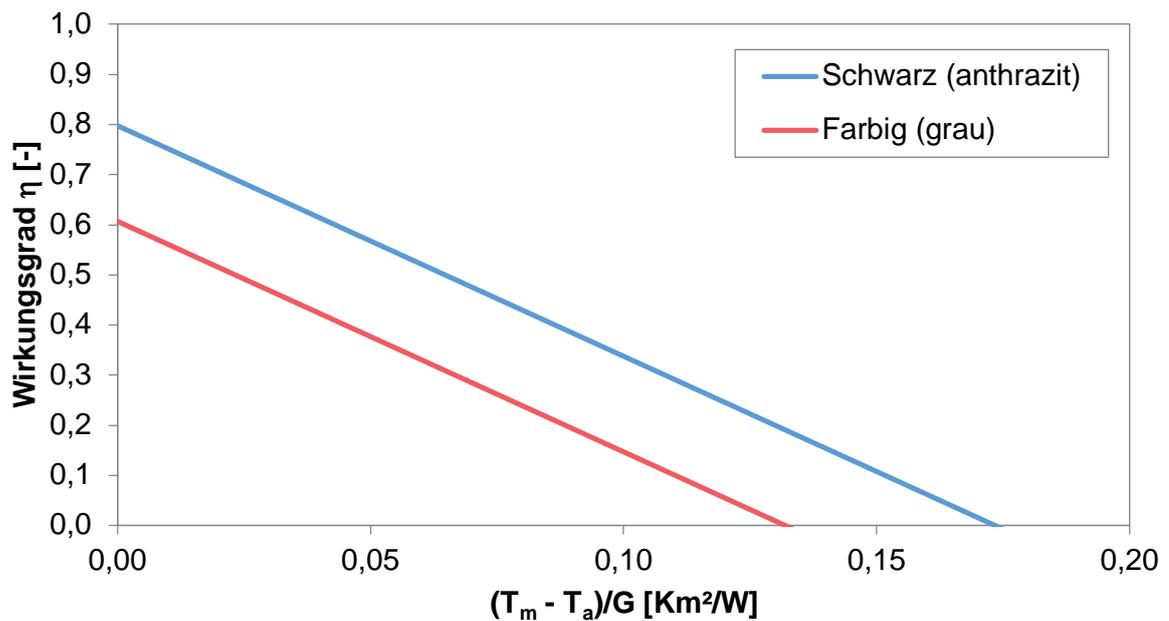


Abbildung 3-12: Einfluss der Absorberfarbe auf die Wirkungsgradkennlinie

Figure 3-12: Influence of absorber colour on the efficiency curve

Neben dem Absorptionsgrad ist auch der Infrarot-Emissionsgrad wichtig. Bei üblichen Farbbeschichtungen ist er durchweg hoch, d. h. es wird relativ viel Infrarotstrahlung abgegeben, was einen thermischen Verlust darstellt. Wird allerdings eine spektralselektive Beschichtung verwendet (siehe Kapitel 3.1), so wirkt sich dies analog zur Betrachtung der transparenten Abdeckung (siehe Kapitel 3.3.1) aus, d. h. die Wirkungsgradkennlinie wird flacher.

3.3.4 Einfluss des Massenstroms Effect of the mass flow

Im Schlussbericht zum FOSTA-Forschungsprojekt P779 (SEA1) sowie im Kapitel 3.1 wurde bereits erläutert, warum die Strömungsgeschwindigkeit der Kollektorluft einen wichtigen Parameter für die Kollektorleistung darstellt. Im Forschungsvorhaben SEA1 konnten die Wirkungsgradkennlinien für verschiedene Massenströme des SEA1-Kollektors bisher nicht ermittelt werden, da dafür konstante Eingangsgrößen zur Solarstrahlung, Eintrittslufttemperatur und Windeinfluss, wie sie nur in einem Labor sichergestellt werden können, notwendig sind.

Wie bereits in Kapitel 3.3.2 dargestellt, beeinflussen Profilgeometrie und Strömungsgeschwindigkeit den thermischen Wirkungsgrad sowie den Energiebedarf zum Betrieb des Ventilators. Die Strömungsgeschwindigkeit ergibt sich dabei aus dem Quotienten von Volumenstrom und der durchströmten Querschnittfläche; der Volumenstrom lässt sich wiederum aus dem Massenstrom dividiert durch die Dichte der Luft berechnen. Aufgrund der deutlich höheren Massenstromabhängigkeit von Luftkollektoren gegenüber Flüssigkeitskollektoren (siehe Kapitel 3.1) ist die Ermittlung mehrerer WKL bei unterschiedlichen Massenströmen (typischerweise drei) essentiell.

Der Wirkungsgrad von (Flüssigkeits-) Kollektoren wird seit mehreren Jahrzehnten mit dem Modell in der Gleichung 3-1 wiedergegeben:

$$\eta = \eta_0 - a_1 T_m^* - a_2 G T_m^{*2} \quad \text{--} \quad (3-1)$$

Dabei wird die sogenannte reduzierte Temperaturdifferenz T_m^* aus der Differenz von mittleren Kollektorlufttemperatur T_m (Durchschnitt von Ein- (T_i) und Austrittstemperatur (T_e) der Kollektorluft) und Umgebungstemperatur T_a dividiert durch die Strahlung G definiert:

$$T_m^* = \frac{T_m - T_a}{G} \quad ; \text{ wobei } T_m = \frac{T_i + T_e}{2} \quad \text{in K} \quad (3-2)$$

Das Modell kann als eine Kennlinie wie in Abbildung 3-13 dargestellt werden.

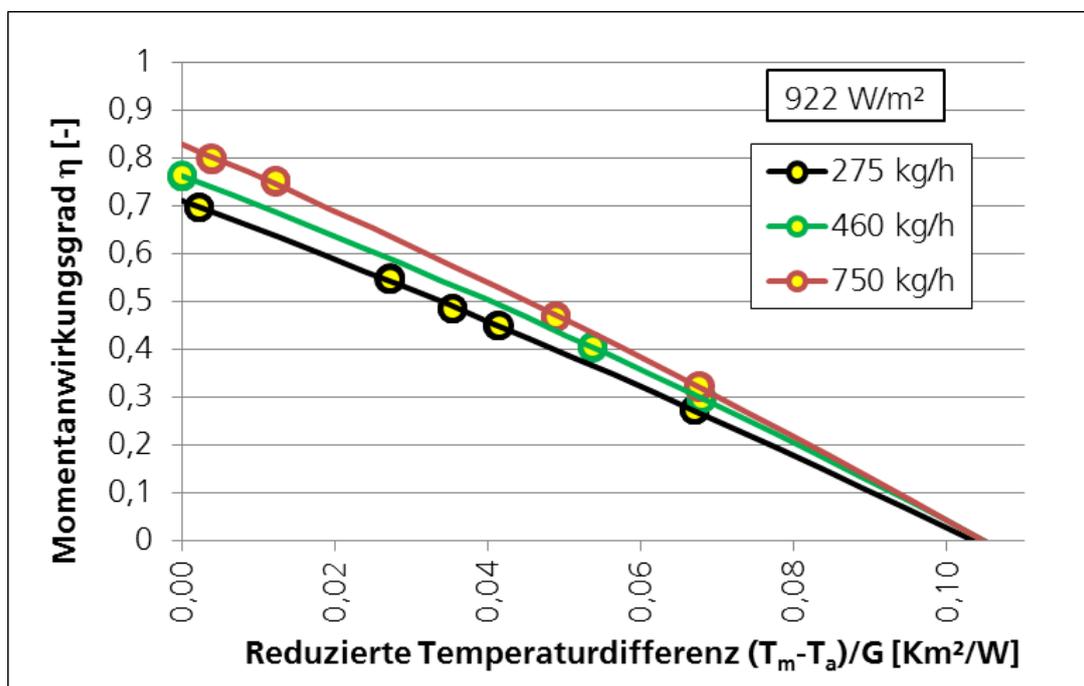


Abbildung 3-13: Wirkungsgradkennlinien mit Messpunkten eines Luftkollektors für drei Massenströme

Figure 3-13: Efficiency curves with measuring points of a solar air collector for three mass flows

Abbildung 3-13 zeigt die Kennlinien eines Luftkollektors, die bei drei verschiedenen Massenströmen gemessen wurden. Diese eignen sich jedoch nicht gut für Simulationen, da nur mit den gemessenen Massenströmen simuliert werden könnte und nicht ohne Weiteres interpoliert werden kann. Daher wurde das Kennlinienmodell auf das Modell des Wirkungsgradkennfeldes (WKF) erweitert [ISE07]:

$$\eta = (1 - e^{-c_m \bar{m}_{row}}) \cdot (\eta_{0max} - a_{1max} T_m^* - a_{2max} G T_m^{*2}) \quad \text{--} \quad (3-3)$$

Die Exponentialfunktion mit dem Massenstrom und einem kollektorspezifischen Koeffizienten im ersten Klammerausdruck ermöglicht die Interpolation zwischen den gemessenen Massenströmen. Das Diagramm in Abbildung 3-14 hat dieselbe x- und y-Achse, es wurde jedoch um die z-Achse mit dem Massenstrom erweitert. Das Kennfeld desselben Luftkollektors ist mit der Lage der Kennlinien und Messpunkte darauf abgebildet. Der Wirkungsgrad kann mit dem Modell des Kennfelds in

Simulationen massenstromabhängig interpoliert werden. Der Koeffizient c_m beschreibt die Massenstromabhängigkeit der thermischen Verluste beziehungsweise des thermischen Wirkungsgrads.

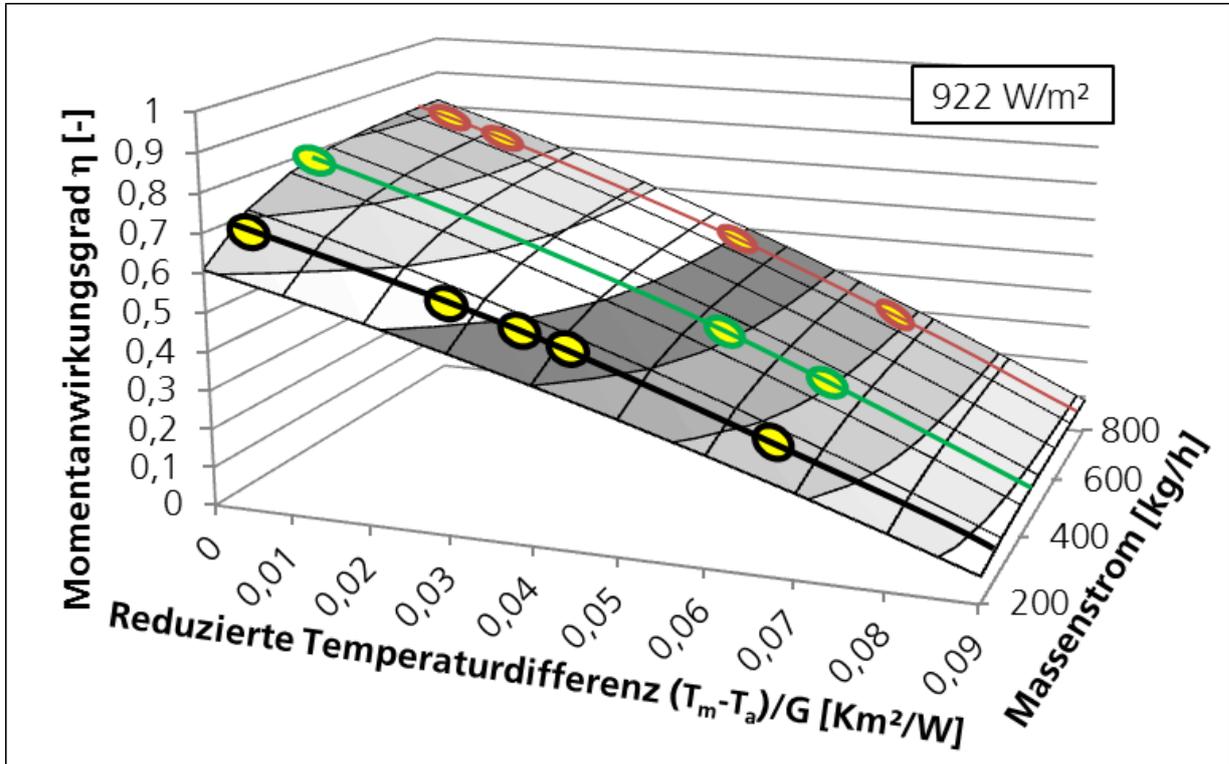


Abbildung 3-14: Wirkungsgradkennfeld des Luftkollektors aus Abbildung 3-13

Figure 3-14: Efficiency surface diagram of the air collector from Figure 3-13

3.3.5 Einfluss der Kollektormodullänge Effect of the collector module length

Unter der Kollektormodullänge wird ganz intuitiv verstanden, wie lang der Kollektor ist und somit, über welche Länge der Absorber auf die ihn durchströmende Luft thermische Energie übertragen kann. Wie im vorherigen Kapitel dargelegt, bildet der Massenstrom eine wesentliche Größe hinsichtlich der Effizienz eines Luftkollektors.

Die Längen der Kollektoren des SEA1-Forschungsprojektes waren inklusive einiger Änderungen am Ende des Projektes zwischen 2 m und 4,7 m. Die Abbildung 3-15 zeigt die damals in Folge des SEA1-Projektes gewonnen Erkenntnisse zur grundsätzlichen Abhängigkeit zwischen Wirkungsgraden (gemessene Wärmemenge im Vergleich zu gemessener solarer eingestrahlter Energie) und Volumenströmen im Bereich laminarer Strömung.

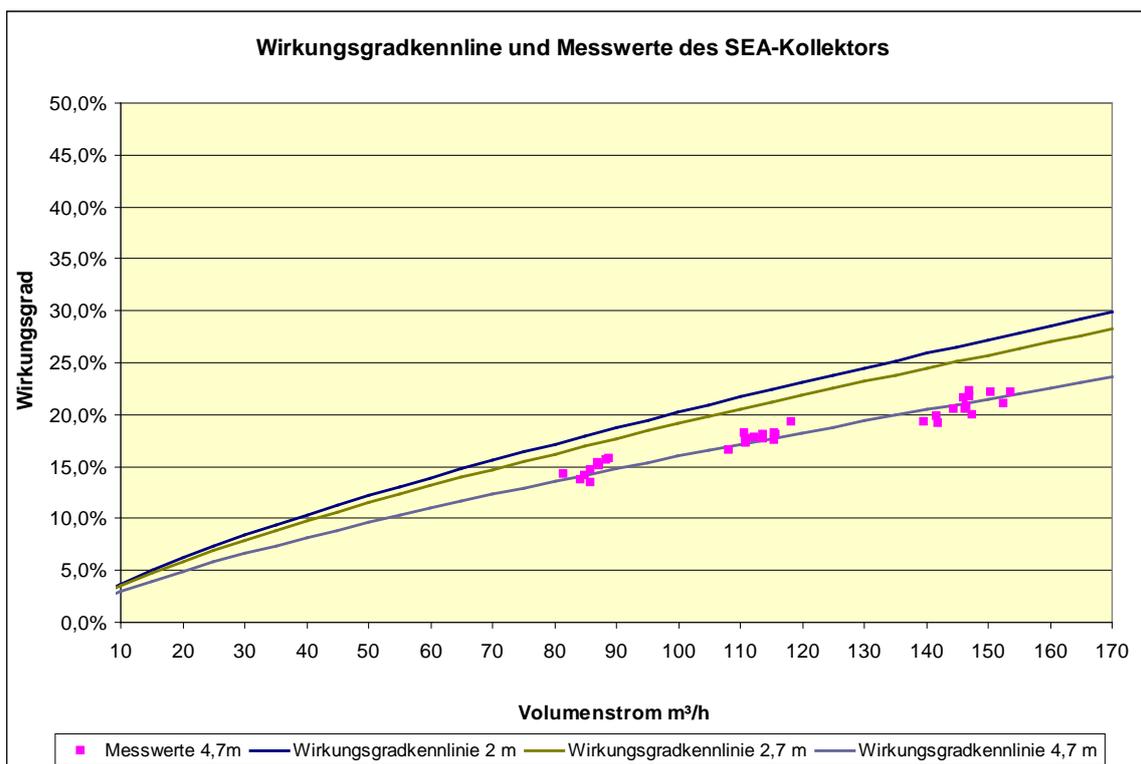


Abbildung 3-15: Wirkungsgrade nach Massenstrom aus SEA1-Forschungsprojekt für verschiedene Kollektorlängen (2 m, 2,7 m und 4,7 m)

Figure 3-15: Efficiencies based on mass flows for different collector lengths (2 m, 2.7 m, 4.7 m) obtained from SEA1 research project

Das bedeutet, die Kollektormodullänge hat bei einer gegebenen Einstrahlung und einem gegebenen Massenstrom einen Einfluss auf den Temperaturhub der Luft zwischen Ein- und Austritt des Kollektors: Bei vereinfachter Annahme eines konstanten Wirkungsgrads (Einfluss der Temperatur- und damit Wirkungsgradänderung über den Kollektor wird vernachlässigt) bedeutet beispielsweise eine Verdopplung der Kollektormodullänge bei gleichbleibendem Massenstrom ebenfalls eine Verdopplung des Temperaturhubs. Berücksichtigt man – was realistischer ist – die Zunahme der Lufttemperatur über den Kollektor, wird der erreichbare Temperaturhub allerdings geringer, also nicht ganz verdoppelt.

Ändert man allerdings den Massenstrom pro Kollektormodul proportional zur Erhöhung der Kollektormodullänge, hält also den *spezifischen* Massenstrom konstant (was in obigem Beispiel nicht der Fall war), bleibt der Temperaturhub unabhängig von der Kollektorlänge gleich.

Mit den Kollektormodullängen und dem Massenstrom beeinflusst man also einerseits den Wirkungsgrad des Kollektors (siehe Kapitel 3.3.4) und andererseits den Temperaturhub der Luft zwischen Ein- und Austritt. Je nach Anwendung kann der Temperaturhub beliebig sein – dann kann der Massenstrom z. B. im Hinblick auf die maximale Primärenergieeinsparung optimiert werden (Kapitel 4.2). Soll jedoch ein bestimmtes Temperaturniveau erreicht werden, muss der Massenstrom dementsprechend geregelt werden. Größere Kollektormodullängen können also im Zusammenspiel mit Massenströmen genutzt werden, um die Temperaturniveaus zu erhöhen, wengleich dadurch Abstriche in der Leistung pro m^2 für einen gegebenen

Massenstrom entstehen (siehe Kapitel 3.1 und Kapitel 6.6). Allerdings ist der Wirkungsgrad höher, als wenn man in einem kürzeren Kollektormodul den gleichen Temperaturhub erzeugen wollte, weil man dann den Massenstrom reduzieren müsste, was wiederum den Wirkungsgrad deutlich reduziert. Wenn man also einen hohen Temperaturhub erreichen möchte, kann eine große Kollektorlänge bzw. eine Serienschaltung von Kollektoren durchaus sinnvoll sein, weil man einen hohen Temperaturhub bei gleichzeitig relativ hohem spezifischem Massenstrom erreichen kann. Allerdings muss auch hier im Hinblick auf die Gesamtoptimierung der dadurch höhere Druckverlust berücksichtigt werden.

4 Methodik zur Bestimmung der Optimierungspotentiale Methodology for determining optimisation potentials

Kurzfassung

Beide Forschungsstellen einigten sich darauf, den Optimierungspotentialen durch eine vernetzte Methodik aus Messungen, Simulationen und Berechnungen auf den Grund zu gehen. Während der Einfluss der transparenten Abdeckung, einer geänderten Profilgeometrie oder des Massenstroms am besten durch Labormessungen des Kollektors genau geklärt werden kann, sind Simulationen und Berechnungen geeignet, aufzuzeigen, welche Luftkanalbreiten für bspw. flache Luftkanäle vorteilhaft sind, wie sich Änderungen im Absorptionsgrad der Absorberbeschichtung auswirken oder welchen Einfluss verschiedene Kollektormodullängen auf Leistung und Temperaturniveau haben. Dabei unterstützten die Ergebnisse der Messungen und Simulationen sich gegenseitig bei der Klärung der Einflüsse und beim Entwurf und Bau optimierter SEA-Kollektoren.

Abstract

Both research institutions agreed to examine the identified optimisation potentials by a cross-linked methodology of measurements, simulations and calculations. While the influence of a transparent covering, a changed profile geometry or the mass flow can best be determined by laboratory measurements of the collector, simulations and calculations are suited to determine which channel heights are most efficient for flat air channels, how different absorption coefficients of the absorber coating affect the collector's efficiency or which influence the collector module lengths have on the output and temperature levels. For that matter the results of the measurements and simulations mutually supported each other in examination of the different influential parameters and the design of optimised SEA collectors.

4.1 Grundlegende Überlegungen Fundamental considerations

Bevor konkrete Kollektoren gebaut und vermessen werden konnten, sollten zunächst die Ziele der Vorauswahl und der weiteren Simulationen geklärt werden. Dabei sind Grundüberlegungen und Erfahrungen zu den einzelnen Verbesserungspotentialen wie in Kapitel 3.3 die Basis für die Definition der zu messenden Kollektoren. Dies wird durch eine Reihe von Berechnungen und Simulationen ergänzt.

- Aufzeigen des Verbesserungspotenzials des SEA1-Kollektors
- Aufzeigen des Spektrums an Möglichkeiten, die das SEA-Konzept bietet, und qualitative sowie teilweise quantitative Einordnung von Varianten, die in ihrer Leistungsfähigkeit dazwischen einzuordnen sind
- Finden sinnvoller, realistischer Varianten

Neben den in Kapitel 3 bereits ausgeführten Randbedingungen sollen außerdem folgende Kriterien berücksichtigt werden:

- Einfacher Aufbau des Kollektors
- Verwendung marktgängiger Bauteile
- Mechanisch funktionale Konstruktion
- Gewichtsrestriktionen im Metalleichtbau
- Vermeidung zu hoher Temperaturbelastung des Sandwichelements
- Ästhetisches Erscheinungsbild

Die beiden Forschungsstellen beschlossen auf Grund der Vielzahl und der Vernetzung der verschiedenen zu berücksichtigenden Rahmenbedingungen sowie in Anbetracht der diversen Optimierungspotentiale eine Forschungsmethodik, die auf einem engen Wechselspiel aus Messungen, Simulationen und Berechnungen besteht. Dabei sollen die verschiedenen Optimierungspotentiale ihrem jeweiligen Wesen nach durch eine oder mehrere dieser Herangehensweisen auf den Grund gegangen werden. So soll einerseits ein optimierter Kollektor entstehen, andererseits die sonstigen Stellschrauben zur Optimierung in ihrer Größenordnung geklärt, bzw. approximiert werden. Letztendlich sollen auf Basis der optimierten SEA-Kollektoren die in Kapitel 7 beschriebenen Energienutzungskonzepte geprüft werden.

Ein zentrales Ziel des Projekts war das Auffinden von auf SEA-Kollektoren basierenden sinnvollen, wirtschaftlichen Gesamtlösungen zum Heizen oder Kühlen, insbesondere von Hallen. Dazu musste der jeweilige Energiebedarf einer Musterhalle – entsprechend gängigen Nutzungsprofilen im Industrie- und Gewerbebau – dargestellt und mit den möglichen Beiträgen von SEA-Kollektoren in Einklang gebracht werden. Für die entsprechenden Simulationen mussten die Kollektoren geeignet charakterisiert werden, was durch die WKL erfolgt. Es galt daher, diese WKL qualitativ einzuschätzen bzw. zu berechnen und schließlich real zu vermessen.

Wie in Kapitel 3 dargestellt, beschreiben die WKL jedoch nur den thermischen Teil des Kollektors; die Gesamteffizienz eines Kollektors im System hängt jedoch auch vom Energiebedarf für die Ventilatoren ab; dieser wird wiederum durch den Druckverlust in den Kollektoren, aber auch im restlichen System sowie vom Volumenstrom bestimmt. Für eine Gesamtbetrachtung müssen alle Aspekte berücksichtigt werden.

Im weiteren Verlauf dieses Kapitels wird dargestellt, welche Ziele mit den Messungen, Simulationen und Berechnungen im Einzelnen verfolgt wurden und wie dies grundlegend durchgeführt wurde. Sodann legen die beiden folgenden Kapitel 5 und 6 die Ergebnisse dieser jeweiligen Ansätze dar.

4.2 Zielsetzungen der Berechnungen und Simulationen Objectives of Calculations and Simulations

Die Berechnungen und Simulationen dienen dazu, das Verhalten eines einzelnen Kollektors oder eines gesamten Systems im Anwendungskontext grob einschätzen oder auch detaillierter voraussagen zu können. In Kapitel 3 wurde gezeigt, dass sich die Einflüsse einiger konstruktiver Merkmale aufgrund des Stands von Wissenschaft und Technik und langjähriger Erfahrung bereits qualitativ voraussagen lassen, jedoch

ist dies nicht ausreichend, um sinnvolle Kollektoren und Gesamtsysteme zu entwickeln. Gleichzeitig wäre es auch nicht zielführend, zahlreiche detaillierte Simulationen ohne entsprechende Messungen durchzuführen, zumal etliche Randbedingungen nur unvollständig bzw. vereinfacht in die Simulationen eingehen können. So kann bspw. die Durchströmung eines Kollektors unter Idealbedingungen simuliert werden, jedoch wird sich das Strömungsprofil am Eintritt schon deutlich ändern, wenn die Einbausituation geändert wird (z. B. wenn ein Diffusor mit 90°-Krümmer davor verwendet wird). Somit sind Simulationen auf Entwicklungsebene im Rahmen dieses Projekts als Assistenzinstrument zu verstehen, um vorausgewählte Kollektoren konkret zu dimensionieren und bestimmte konstruktive Entscheidungen treffen zu können. Es werden dazu verschiedene Modellierungs-/Simulationswerkzeuge für unterschiedliche Fragestellungen eingesetzt.

Physikalische Modellierung der Wirkungsgradkennlinie (WKL) bzw. Wirkungsgradkennfläche (WKF)

Die Wirkungsgradkennlinien von Kollektoren können an Testständen des TestLab Solar Thermal Systems des Fraunhofer ISE vermessen werden. Es ist aber auch möglich, sie durch physikalische Modelle zu berechnen. Dazu ist eine Kenntnis der Energiebilanz im Kollektor und der Wärmeübertragungsvorgänge notwendig. Der Kollektor wird bei diesen Modellen nicht geometrisch aufgelöst, sondern es werden lediglich thermische Widerstände bzw. U-Werte verwendet, um die Energiebilanz zu ermitteln (Abbildung 4-1). Mit ihnen kann der Wärmestrom vom Absorber zum Fluid (hier Luft) bzw. vom Absorber zur Umgebung beschrieben werden. Dabei sind die Wärmeübertragungsmechanismen Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung zu berücksichtigen.

$$\eta = \frac{R_{Verlust}}{R_{Verlust} + R_{AbsorberFluid}} (\tau\alpha)_e - \frac{1}{R_{Verlust} + R_{AbsorberFluid}} \frac{\Delta T}{A \cdot G}$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{F'}$
 $\underbrace{\hspace{10em}}_{F' U_{Verlust}}$

$$\eta = \underbrace{F' (\tau\alpha)_e}_{\eta_0} - \underbrace{U}_{U} \frac{\Delta T}{G}$$

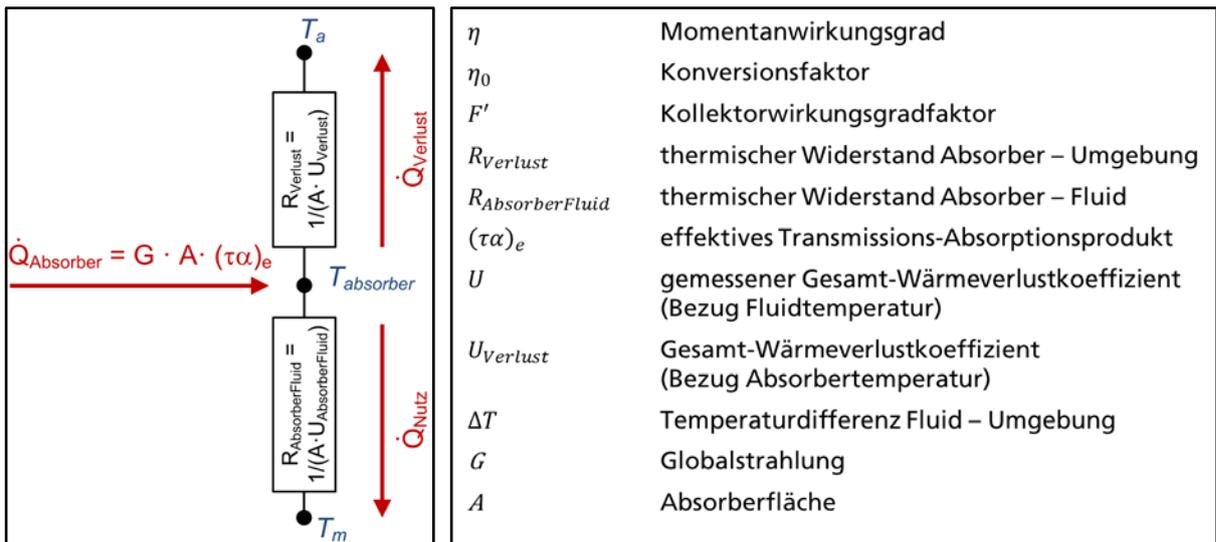
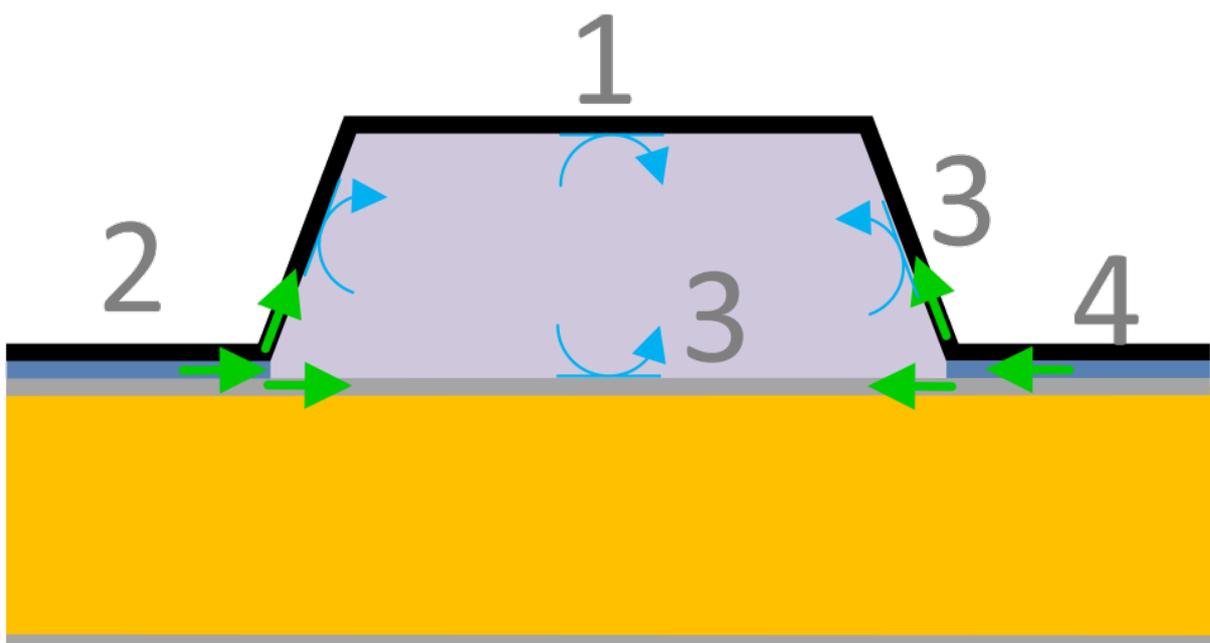


Abbildung 4-1: Physikalisches Modell zur Ermittlung der thermischen Effizienz eines Solarkollektors

Figure 4-1: Physical model for the determination of the thermal efficiency of a solar collector

Gegenüber einem flachen Absorber besteht z.B. bei einem Trapezblech die Herausforderung darin, dass die unterschiedlichen Oberflächen unter verschiedenen Winkeln von der Sonne beschienen werden und auch ggf. unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten und damit unterschiedliche Wärmeübergangskoeffizienten anzusetzen sind. In den Abschnitten zwischen zwei durchströmten Trapezen (d. h. den Untergurten) kann die Wärme wiederum nicht direkt an die Luft abgegeben werden, sondern nur indirekt über Wärmeleitung an die nächsten durchströmten Trapeze. Abbildung 4-2 stellt prinzipielle Mechanismen der Wärmeübertragung in Trapezprofilen dar. Mit der Modellierungssprache **Modelica** und der Simulationsumgebung **Dymola** wurde ein entsprechendes Modell für Trapezgeometrien entworfen.



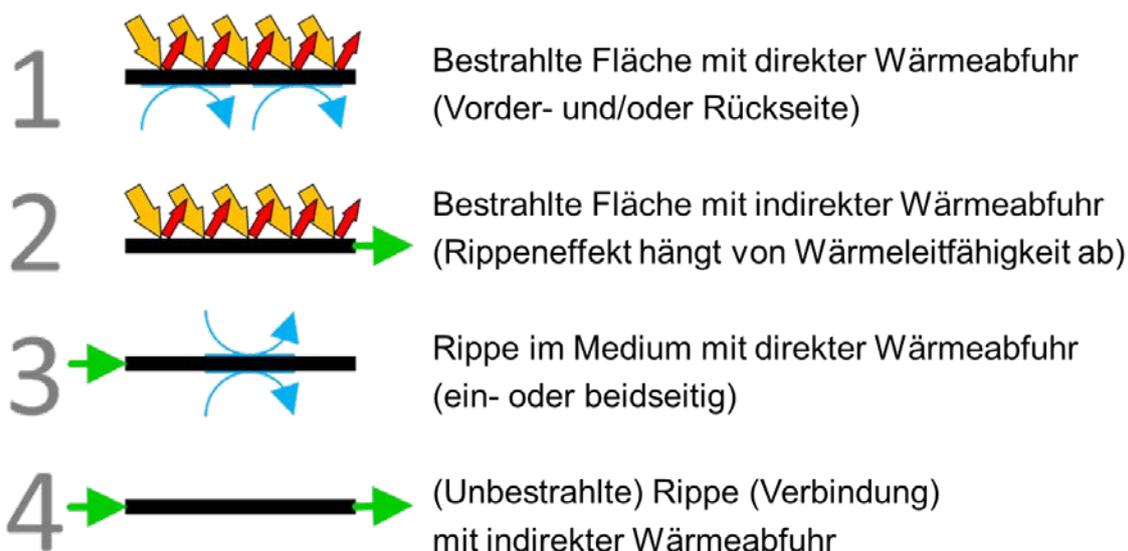


Abbildung 4-2: Mechanismen der Wärmeübertragung an Trapezprofilen

Figure 4-2: Mechanisms of heat transfer in trapezoidal profiles

Optische Simulationen

WKL-Messungen bzw. -Simulationen gehen zunächst von senkrechter Einstrahlung aus; der Winkeleinfluss muss mittels des winkelabhängigen sogenannten Einstrahlwinkel-Korrekturfaktors IAM (Incidence Angle Modifier) berücksichtigt werden. Dabei wird zwischen dem IAM in Richtung der Längsachse (longitudinaler IAM) und jenem in Querrichtung (transversaler IAM) unterschieden. Bei Flachkollektoren sind diese bekannt und beschrieben, bei anderen Geometrien wie z. B. Trapezprofilen können sie durch optische Simulationen ermittelt werden. Dabei werden mittels Raytracing (Strahlverfolgung) einzelne Strahlen der Sonne simuliert, wobei Absorption, Transmission und Reflexion sowie Brechung der einzelnen Bauteile berücksichtigt werden können. Somit lässt sich schließlich bilanzieren, wie viel Strahlung in Abhängigkeit des Einstrahlwinkels auf einer bestimmten Fläche ankommt. Diese wird zu jener bei senkrechter Einstrahlung in Beziehung gesetzt; der Quotient der beiden Strahlungen ist der IAM für den betreffenden Winkel. Die optischen Simulationen wurden mit der Software OptiCAD durchgeführt.

Finite-Elemente-Simulationen (FEM-Simulationen)

Um zu verstehen, welche Strömungen und damit welche Temperaturen sich in einem Kanal einstellen, sind 3D-FEM-Modelle (Finite-Elemente-Methode) notwendig. Diese wurden mit der Simulationssoftware COMSOL Multiphysics durchgeführt. Aus ihnen erhält man direkt Geschwindigkeits- und Temperaturprofile, kann jedoch auch z.B. Wärmeübergangskoeffizienten bestimmen, die in o. g. physikalische Modelle eingehen.

Thermo-hydraulische Bewertung

Der Massenstrom bestimmt bei Luftkollektoren nicht nur den Temperaturhub. Abbildung 4-3 zeigt die thermische Leistung eines Luftkollektors (blaue durchgezogene Kurve), welche mit dem Massenstrom kontinuierlich ansteigt. Daher wäre man nun geneigt, einen hohen Massenstrom für den Betrieb zu wählen, was zwar geringe Temperaturhübe, aber die maximale Leistung pro m² bewirkt. Allerdings steigt mit dem Massenstrom auch die primärenergetische Hilfsleistung für den Ventilator zur Überwindung des Druckverlusts (rote Kurve).

Bei niedrigen Massenströmen steigt die thermische Leistung schneller, bei hohen Massenströmen steigt die Hilfsleistung schneller. Für die höchste Primärenergieeinsparung muss für den Massenstrom ein Kompromiss gefunden werden. Dazu wird die Differenz der beiden Leistungen gebildet (blaue gestrichelte Kurve) und deren Maximum ermittelt (grünes Kreuz). Mit diesem Massenstrom MMP (**M**ass flow per row of **M**aximum net primary **P**ower saving) kann der Kollektor effizient betrieben werden. Werden Betriebskosten und -gewinne anstelle von Leistungen berücksichtigt, lässt sich der ökonomisch effiziente Massenstrom auf gleiche Weise ermitteln [ISE12], [ISE13] (siehe Kapitel 3.3.4).

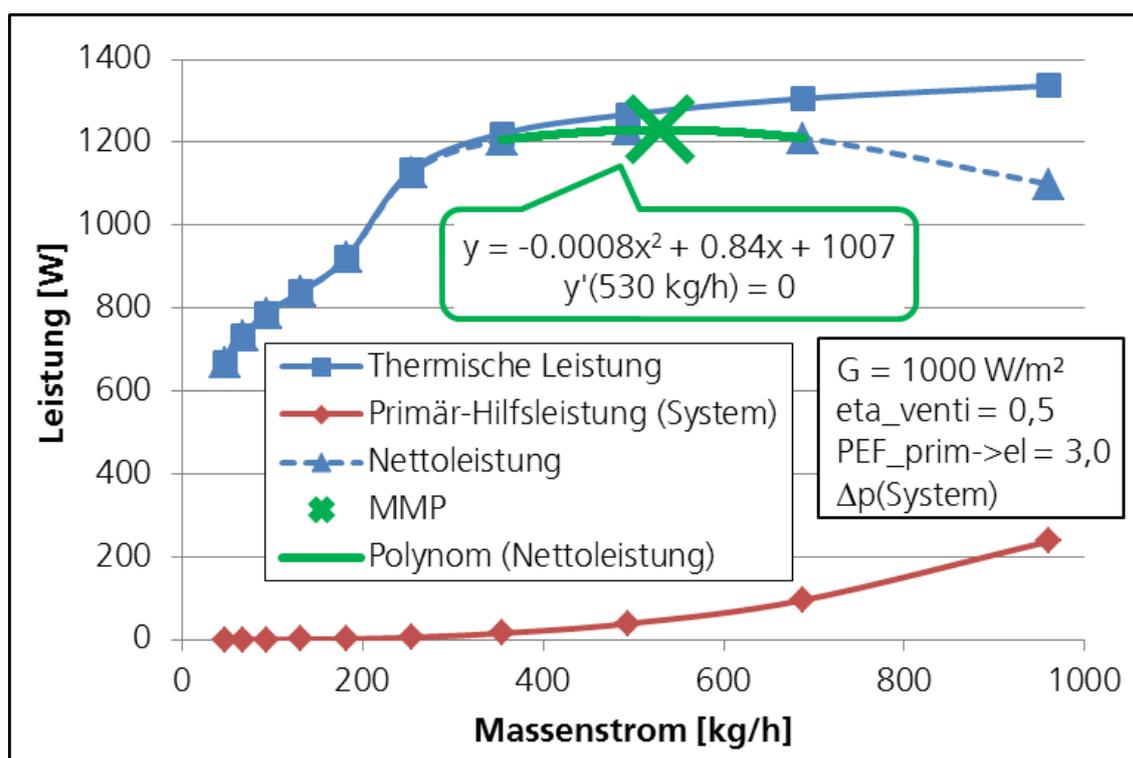


Abbildung 4-3: Ermittlung des effizienten Massenstroms am Maximum der Nettoleistung

Figure 4-3: Determination of the efficient mass flow at the maximum of the net power

Wichtig ist dabei, den Druckverlust des gesamten Solarluftsystems zu berücksichtigen, da der Ventilator das ganze System durchströmen muss. Der MMP hängt auch stark von der solaren Einstrahlung, der Umgebungstemperatur, der Fluidtemperatur und einer Reihe weiterer Faktoren ab. Dazu wurde im Zuge dieses Projekts die bestehende Modellierung [ISE14b] von Welz et al. zu [ISE17a] weiter-

entwickelt und in einem umfangreichen Berechnungs- und Optimierungswerkzeug für Microsoft Excel umgesetzt.

Excel-Tool ScenoCalc

Mit dem im Internet verfügbaren Excel-Tool ScenoCalc können Jahresbruttoerträge (also direkte Kollektorserträge ohne Berücksichtigung des Systems) berechnet werden [RIS17]. Dabei wird vereinfacht über das ganze Jahr hinweg eine konstante mittlere Fluidtemperatur angenommen. Die Berechnungen werden für drei Temperaturen, typischerweise 25, 50 und 75 °C, durchgeführt. Das Tool gibt einen sehr schnellen Überblick über mögliche Jahreserträge, berücksichtigt jedoch keine Lastprofile in Form von Zeitreihen.

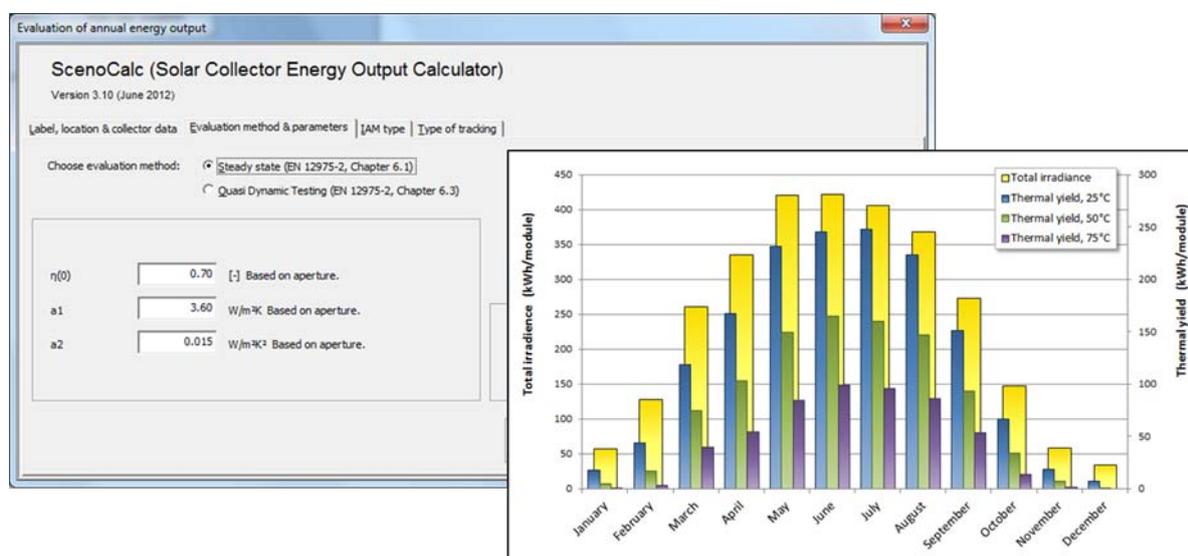


Abbildung 4-4: Beispielhafte Screenshots des Excel-Tools ScenoCalc

Figure 4-4: Sample screenshots of Excel tool ScenoCalc

Systemsimulationen

Mit detaillierten Systemsimulationen, z.B. mit der Software **TRNSYS**, sind Berechnungen von Jahreserträgen konkreter Anlagen möglich. Allerdings ist der Aufwand dafür sehr hoch und erfordert genaue Angaben der Randbedingungen und Modelle für alle Komponenten. Da in diesem Forschungsprojekt P1041 (SEA2) unterschiedliche Kollektoren und Systeme betrachtet werden sollten, wurde ein anderer Weg gewählt, um Kollektoren im Systemkontext zu betrachten.

Excel-Tool LuKoCalc mit Zeitreihen für konkrete Anwendungen

Um verschiedene Anwendungsszenarien mit unterschiedlichen Kollektoren betrachten zu können, wurde seitens des Fraunhofer ISE ein erweitertes Excel-Tool namens LukoCalc unter Verwendung von ScenoCalc erstellt. Dabei werden auch Zeitreihen berücksichtigt (Stundenwerte), die den Heiz- bzw. Kühlbedarf beschreiben. Außerdem können Speichermassen als Kapazität eingebracht werden, so dass z. B.

eine Fußbodenheizung (Aktivierung des Betonbodens) simuliert werden kann. Nähere Ausführungen finden sich dazu im Kapitel 7.3.

Iterative Berechnungen für unterschiedliche Kollektormodullängen

Mit Hilfe der für einen Kollektor bestimmten WKL kann über iterative Berechnungen auch der Einfluss der Kollektormodullängen auf Leistung und Austrittslufttemperatur errechnet werden. Da üblicherweise realistische Hallenmaße Kollektormodullängen von bis zu 20 m (maximale Längen von Sandwichelementen) erlauben könnten, aber auch kürzere Längen, insbesondere an den Hallenseiten möglich sind, kann dies nur in einem gewissen Maße durch eine Erhöhung des Massenstroms zur Beibehaltung des spezifischen Massenstroms erfolgen. Dies liegt einerseits an möglichen Geräuschentwicklungen als auch an dem Primärenergieanstieg im Zusammenhang mit den steigenden Druckverlusten (siehe oben sowie auch Kapitel 3.3.4 sowie 3.3.5). Aufgrund der höheren mittleren Lufttemperatur sinkt der Wirkungsgrad und damit die Leistung pro Quadratmeter, aber das Temperaturniveau steigt. Letzteres kann auch in Hinblick auf die Energienutzungskonzepte ein notwendiges Ziel sein. Mittels Berechnungen auf Basis der WKL kann dieser Einfluss auf die wesentlichen Ergebnisgrößen Temperaturniveau und Leistung sehr gut approximiert werden.

4.3 Zielsetzungen der Messungen Objectives of measurements

Ungeachtet der Notwendigkeit grundlegender physikalischer Vorüberlegungen, der Unterstützung durch Simulationsprogramme sowie sonstiger Berechnungsansätze, können klare Erkenntnisse zum genauen Einfluss einiger Optimierungspotentiale nur durch Messungen erreicht werden. Entsprechend wurde bereits im Antrag festgelegt, dass drei Kollektoren gebaut und unter den geltenden Standards für die Vermessung von Luftkollektoren im Labor des Fraunhofer ISE vermessen werden. Auf diese Weise sollte im Wesentlichen der Einfluss der transparenten Abdeckung (Kapitel 3.3.1) und alternativer Profilgeometrien (Kapitel 3.3.2) auf die thermische Effizienz der SEA-Kollektoren identifiziert werden. Die Änderung dieser beiden Einflüsse lässt sich durch Simulationsprogramme nur approximieren, da eine Vielzahl komplexer Faktoren eine Rolle für Strömung und Wärmeübertragung spielen.

Da ebenfalls die thermische Leistung eines Luftkollektors mit steigenden Massenströmen (siehe Kapitel 3.3.4 und 4.2) keiner genau berechenbaren Abhängigkeit unterliegt, verlangen die Standards die Vermessung eines Luftkollektors stets auf Basis mehrerer definierter Massenströme, normalerweise drei. Die dazwischen liegenden Massenströme können sodann mit Hilfe der Gleichung 3-3 sehr gut approximiert und in ein Wirkungsgradkennfeld (WKF) überführt werden.

Um dies zu bewerkstelligen wurde der Solarsimulator des Fraunhofer ISE zur Laborvermessung von Luftkollektoren unter normierten Eingangs und Randbedingungen verwendet (siehe auch Kapitel 5.1). So konnte ceteris paribus der Einfluss verschiedener Massenströme oder konstruktiver Änderungen auf die thermische Leistung des Kollektors sehr präzise gemessen und verglichen werden. Die Messungen im Solarsimulator (Indoor-Teststand) des Fraunhofer ISE basieren

auf den dafür entwickelten Grundlagen zur Luftkollektorvermessung und erreichen in Genauigkeit höhere Anforderungen als normbedingt erforderlich [ISE14a].

Die in Kapitel 3 beschriebenen Grundlagen sowie die Erfahrung zeigen, dass eine transparente Abdeckung einen signifikanten Einfluss auf die Wirkungsgradkennlinie (WKL) bzw. die Wirkungsgradkennfläche (WKF) hat. Die Forschungsstellen erachteten es daher als sinnvoll, im ersten Schritt einen SEA1-Kollektor nachzubauen (Bezeichnung im Folgenden: SEA 2.1; Kapitel 5.2). Der Nachbau und dessen Vermessung waren notwendig, um eine Referenz für die nachfolgenden SEA-Konzepte zu haben. Im Forschungsprojekt P779 (SEA1) war der Kollektor noch nicht auf einem geeigneten Teststand für Solarluftkollektoren unter Normbedingungen vermessen worden, so dass die benötigten Wirkungsgradkennlinien des Kollektor SEA1 bzw. SEA 2.1 bei drei Massenströmen auch nicht vorlagen, sondern die Messdaten eines Jahres als Realdaten aus einem Langzeittest ohne WKL. Die erarbeiteten WKL des Kollektors SEA 2.1 erlaubten nun außerdem eine Berechnung der Erträge unter den Randbedingungen, zu denen der SEA1-Kollektor damals tatsächlich vermessen worden war, so dass ein Vergleich möglich wurde.

Der Bau sowie die Vermessung des Kollektors SEA 2.2 diente zunächst vorrangig dazu, den Einfluss einer transparenten Abdeckung quantitativ experimentell bei sonst gleichem Aufbau zu ermitteln – also erneut ein Vergleich unter *ceteris paribus* (Kapitel 5.3). Dabei wurde also weder Änderungen der Profilgeometrie, noch sonstige konstruktive Anpassungen, durchgeführt. Veränderungsgegenstand war alleine die transparente Abdeckung.

Konstruktive Änderungen und eine andere Profilgeometrie wurden schließlich im Konzept für den SEA-Kollektor 2.3 umgesetzt (Kapitel 5.4), bei dem die transparente Abdeckung allerdings beibehalten wurde. Diese Änderungen manifestierten sich in einem geänderten Absorberprofil, anderen Abständen zwischen Absorber, Sandwichelement und transparenter Abdeckung und damit auch in anderen Luftkanalquerschnitten und Wärmeübergängen. Dazu wurden vorab verschiedene Varianten diskutiert und bewertet, wobei unterschiedliche Berechnungen und Simulationen in den Auswahlprozess eingeflossen sind.

5 Durchführung der Messungen und ihre Ergebnisse Execution of measurements and their results

Kurzfassung

Die Messungen wurden am Indoor-Teststand des Fraunhofer ISE für drei verschiedene SEA-Kollektoren zu verschiedenen Massenströmen unter genauen Prüfbedingungen durchgeführt. Der erste SEA-Kollektor, genannt SEA 2.1, war ein möglichst genauer Nachbau des SEA-Kollektors aus dem FOSTA-Forschungsprojekt P779 (SEA1). Die Ergebnisse des Vorgängerprojekts konnten so erfolgreich im Labor validiert und die Wirkungsgradkennlinien für diesen Kollektor als Referenzfall bestimmt werden. Der SEA-Kollektor 2.2 war grundsätzlich ein SEA-Kollektor 2.1, allerdings mit einer transparenten Abdeckung aus einer Polycarbonat-Platte, um den Effekt dieser konstruktiven Änderung möglichst genau bestimmen zu können. Der sodann entworfene SEA-Kollektor 2.3 behielt die transparente Abdeckung bei, es wurden aber Profilgeometrie und Kanalquerschnitte sowie thermische Kopplung des Absorbers auf Basis von Vorüberlegungen und Simulationen geändert. Jeder SEA-Kollektor brachte eine Verbesserung der Leistung als auch höhere Temperaturniveaus, wobei der Einfluss der transparenten Abdeckung erwartungsgemäß den größten Unterschied in der Effizienz ausmachte. Für alle drei SEA-Kollektoren liegen nun Wirkungsgradkennlinien zu verschiedenen Massenströmen als auch ihre Stagnationstemperaturen vor.

Abstract

The measurements of three SEA collectors were conducted in the indoor test facility of Fraunhofer ISE for different mass flows and under exact test conditions. The first SEA collector, SEA 2.1, was to be an exact replica of the SEA collector of the FOSTA research project P779 (SEA1). The results of the preceding research project could thus be successfully validated and exact efficiency curves were obtained for this collector. SEA collector 2.2 was basically a SEA 2.1 collector, though modified by applying a transparent covering by a polycarbonate sheet to examine the effect of this particular change in detail. Thereafter SEA collector 2.3 was designed and built, incorporating a new profile geometry, new air channel cross-sections and a changed thermal coupling based on preliminary considerations as well as simulations, while at the same time keeping the transparent covering of SEA 2.2. Each subsequent SEA collector yielded an increase in performance and temperature level, whereat the transparent covering proved to provide the biggest leap in efficiency. For all three SEA collectors efficiency curves for different mass flows are now available as well as their respective stagnation temperatures.

5.1 Überblick zu den Messungen Overview on the measurements

Für die Leistungsvermessung eines geschlossenen Luftkollektors müssen vor Kollektoreintritt und nach Kollektoraustritt die Luftmassenströme, die Temperaturen und die Luftdrücke gemessen werden. Weiter müssen der Wassergehalt der Luft, die Umgebungsbedingungen (Lufttemperatur und -feuchte) und die Einstrahlungsleistung (Direkt- und Diffusanteil) erfasst werden. Der Testkollektor ist mit den Massenströmen zu durchströmen, die den für ihn charakteristischen Arbeitsbereich abdecken und die entsprechende Ventilatorleistung muss sodann vorgehalten werden. Abbildung 5-1 zeigt das Schema des Luftkollektor-Teststands für geschlossene Luftkollektoren am Fraunhofer ISE.

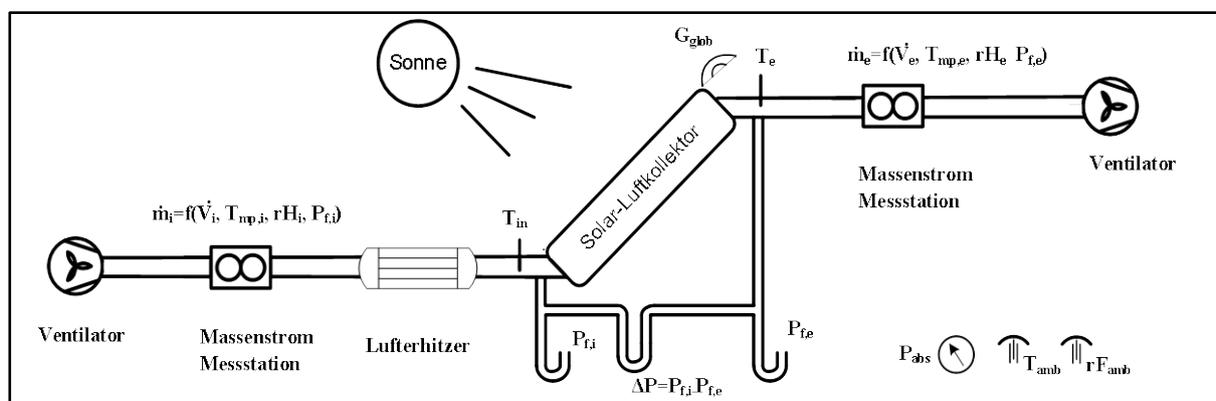


Abbildung 5-1: Konfiguration des Teststands für geschlossene Luftkollektoren am Fraunhofer ISE

Figure 5-1: Configuration of the testing facility for closed solar air collectors at Fraunhofer ISE

Die Konfiguration des Teststands und die Mindestanforderungen an die Messpräzision sind in der DIN EN ISO 9806 ersichtlich. Der ISE-Luftkollektor-Teststand übererfüllt die geforderten Bedingungen zur Messgenauigkeit deutlich. Um eine sehr gute Vergleichbarkeit der Messungen untereinander zu erzielen, werden die Messungen am Indoor-Teststand durchgeführt.

Der Indoor-Teststand am Fraunhofer ISE ist der sogenannte Solarsimulator. Der Teststand bietet gute Reproduzierbarkeit von Messbedingungen und Ergebnissen, ist witterungsunabhängig und kann so sehr gut als experimentelle Einrichtung genutzt werden. Am Solarsimulator können Messungen zur Bestimmung von Wirkungsgradkennlinien thermischer Kollektoren sowie Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für Kollektorhersteller durchgeführt werden. Der Solarsimulator bietet durch sein Lampenfeld konstante Einstrahlung und beliebig lange Einstrahlungsdauer. Mit Hilfe eines künstlich erzeugten Windes und eines künstlichen Himmels werden Außenbedingungen so realistisch wie möglich nachgebildet. Die Abbildung 5-2 zeigt ein Foto des Solarsimulators.

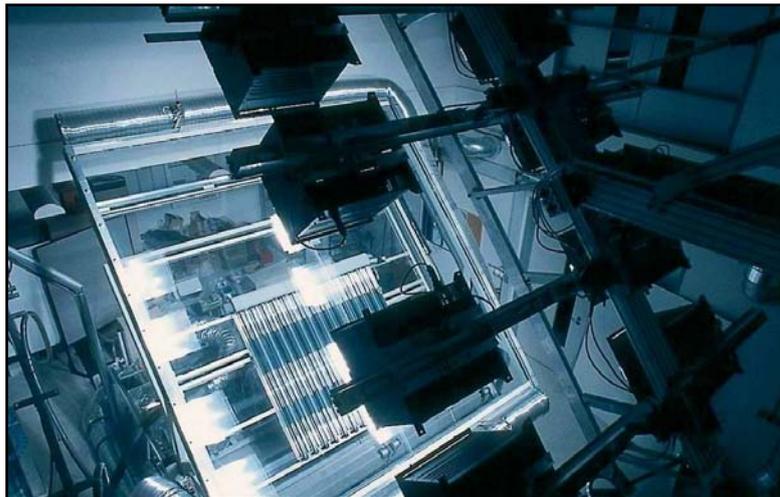


Abbildung 5-2: Indoor-Solarsimulator des Fraunhofer ISE; Quelle: Fraunhofer ISE Intranet, Foto und Pressematerial, 02/2008.

Figure 5-2: Indoor solar simulator at the Fraunhofer ISE; source: Fraunhofer ISE Intranet, photo and press material, 02/2008.

Zur Ermittlung der WKL wurden alle drei SEA-Kollektoren in einem vergleichbaren Prüfzenario vermessen. Dabei wird der jeweilige Kollektor einer definierten und konstanten Strahlung im rechten Winkel ausgesetzt. Ein parallel zur Absorberfläche angesetzter konstanter Wind der Geschwindigkeit 3,0 m/s, bzw. beim ungedeckten SEA-Kollektor 2.1 auch für Windgeschwindigkeiten von 1,5 und 0,5 m/s, wird ebenfalls angelegt. Nun wird vorerwärmte Luft in verschiedenen Temperaturstufen, d. h. eine T_i von etwa 30 °C, 40 °C, 50 °C und 60 °C durch den Kollektor befördert, während die Umgebungsluft T_a konstant gehalten wird. Die exakten Temperaturwerte variierten leicht, wurden aber für den Leistungsberechnung und Bestimmung der Messpunkte genau berücksichtigt. Durch die verschiedenen Temperaturstufen kann der Effizienzverlust des Kollektors bei wärmerer Luft, d. h. die thermischen Verluste des Kollektors, in Erfahrung gebracht werden. Ab dem Zeitpunkt, bei dem für gegebene Eintrittslufttemperatur, Luftmassenstrom, Solarstrahlung und Wind stabile Temperaturwerte herrschen, wird die jeweilige Austrittstemperatur T_e mehrfach gemessen. Aus diesen einzelnen Messwerten lassen sich sodann Messpunkte im WKL-Diagramm für einen gegebenen Massenstrom (und Windeinfluss) generieren, deren Verbindung sodann die WKL ergibt.

Wie im Kapitel 4.3 dargestellt, erfolgte die Auswahl, der Bau und die Vermessung der drei Kollektoren dem Gedankengang, stets einen direkten Vergleich zum Vorgängermodell erreichen zu können, wobei jeweils ein wesentlicher Aspekt verändert wurde. So konnte der Einfluss der transparenten Abdeckung sowie einer veränderten Profilgeometrie bzw. konstruktiver Änderungen Schritt für Schritt dargestellt werden. Ebenso erlauben und erfordern die standardisierten Messungen die Ermittlung der thermischen Leistung der Kollektoren unter verschiedenen Massenströmen – eine grundlegende Notwendigkeit, da dies nur unzureichend rechnerisch oder simulationsbasiert ermittelt werden kann (siehe Kapitel 3.3.4). So stehen genaue Leistungsdaten der drei Kollektoren für verschiedene Massenströme zur Verfügung. Ebenso wurden Temperaturmessungen verschiedener Bauteilkomponenten während der Versuche durchgeführt. So wurden die Kollektoren im

Betrieb unter verschiedenen Massenströmen sowie unter dem Extremfall der Stagnation, d.h. dem Ausfall bzw. der Abschaltung der Ventilatoren, hinsichtlich des Temperaturverhaltens seiner Komponenten untersucht. Die nachfolgende [Tabelle 5-1](#) gibt einen Überblick zu den drei Kollektoren:

Name	Unterschied zum Vorgänger	Untersuchungsgegenstand
SEA 2.1	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Möglichst exakter Nachbau des SEA1-Kollektors ➤ Wesentlicher Unterschied liegt hier in der Vermessung: Labor vs. Feldversuch 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Vergleich der Ergebnisse des SEA1-Lanzeitfeldversuchs mit den Laborergebnissen; ➤ Ermittlung des variablen Windeinflusses auf den unabgedeckten Kollektor
SEA 2.2	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Der SEA 2.1 Kollektor wird um eine transparente Abdeckung ergänzt ➤ Keine sonstigen konstruktiven Änderungen 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Einfluss der transparenten Abdeckung auf den SEA-Kollektor ➤ Verhalten der Betriebs- und Stagnationstemperaturen
SEA 2.3	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Die transparente Abdeckung wird grundsätzlich belassen ➤ Nun Änderung konstruktiver Merkmale und der Profilgeometrie 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Der Einfluss konstruktiver Optimierung und veränderter Profilgeometrie auf den SEA-Kollektor ➤ Reduktion der Stagnationstemperaturen und/oder Leistungserhöhung des Kollektors

Tabelle 5-1: Übersicht zu den drei vermessenen SEA-Kollektoren: Unterschiede und zentrale Untersuchungsgegenstände

Table 5-1: Overview on the three measured SEA collectors: Differences and principal research subjects

5.2 Bau, Vermessung und Ergebnisse des Kollektors SEA 2.1 Construction, measurement and results of collector SEA 2.1

5.2.1 Zielsetzung der Vermessung des Kollektors SEA 2.1 Objectives of measuring the collector SEA 2.1

Im Rahmen des FOSTA-Forschungsprojektes P779 (SEA1) wurde die grundlegende Funktionalität und der projizierte Energieertrag des damaligen SEA-Kollektors in einem Langzeit-Feldversuch überprüft (siehe Kapitel 2.2) [Fos14a]. Dabei wurde der SEA-Kollektor als Südfassade und als nach Süd geneigtes Pultdach einer kleinen Messzelle der Variabilität des Wetters für ein gesamtes Messjahr rund um die Uhr auf dem Dach des Gebäudes des FIW ausgesetzt. Während so bereits eine Reihe wichtiger Erkenntnisse gesammelt und die im Antrag projizierten Energieerträge in diesem realitätsnahen Setup übertroffen werden konnten, war dieser Versuchsaufbau als Feldversuch nicht geeignet, die WKL unter verschiedenen Massenströmen und Windeinflüssen exakt zu bestimmen. Daher war es eine der ersten Zielsetzungen der Messungen am Fraunhofer ISE, dies für einen möglichst exakten Nachbau des SEA1-Kollektors durchzuführen. Zum Nachbau des Kollektors fand am 20. November 2014 ein Arbeitstreffen am Fraunhofer ISE zwischen beiden Forschungsstellen statt, um den Kollektor gemeinsam nachzubauen. Dieser Kollektor mit der Bezeichnung SEA 2.1 wurde sodann für verschiedene Massenströme und Windeinflüsse am Indoor-Teststand des Fraunhofer ISE vermessen.

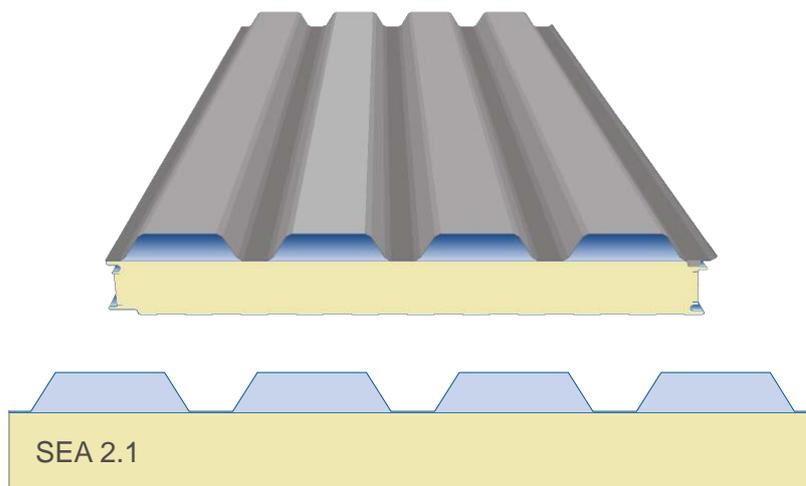


Abbildung 5-3: Schema und Querschnitt des SEA-Kollektors 2.1

Figure 5-3: Scheme and cross section of the SEA collector 2.1

5.2.2 Bau des Kollektors SEA 2.1 Construction of collector SEA 2.1

Der SEA-Kollektor 2.1 besteht aus dem Sandwichelement Isowand Integral® 120 E/L der Firma Hoesch mit einer Dämmstärke von 120 mm PU-Schaum. Auf dem Sandwichelement ist direkt ein Trapezblech Hoesch Trapezprofil T-50.1 verklebt (Abbildung 5-4).

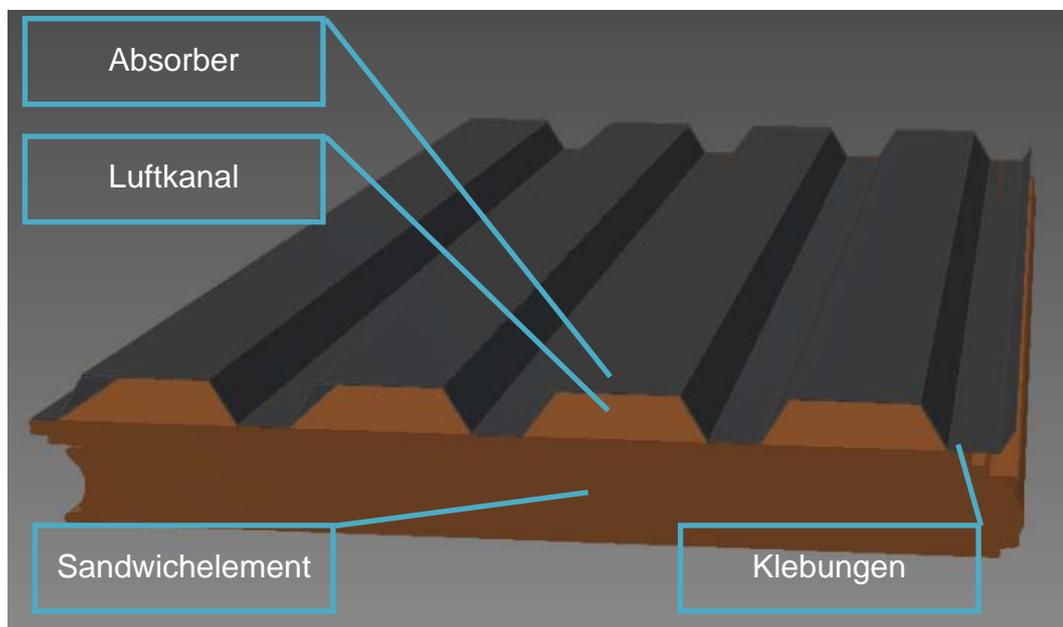


Abbildung 5-4: Aufbau des SEA-Kollektors 2.1 als CAD-Schnittzeichnung

Figure 5-4: Composition of the SEA collector 2.1 as CAD sectional drawing

Das Trapezblech wurde mit einer Zwei-Komponenten-Lackbeschichtung der Farbe RAL 7016 gewalzt. Das Absorptionsvermögen der Beschichtung RAL 7016 wurde mit $\alpha = 0,91 = 91\%$ gemessen. Die Abmessungen des Kollektors sind 2000 mm Höhe

und 1000 mm Breite und der Querschnitt des SEA-Kollektors 2.1 sowie seiner Luftkanäle kann aus (Abbildung 5-5) entnommen werden.

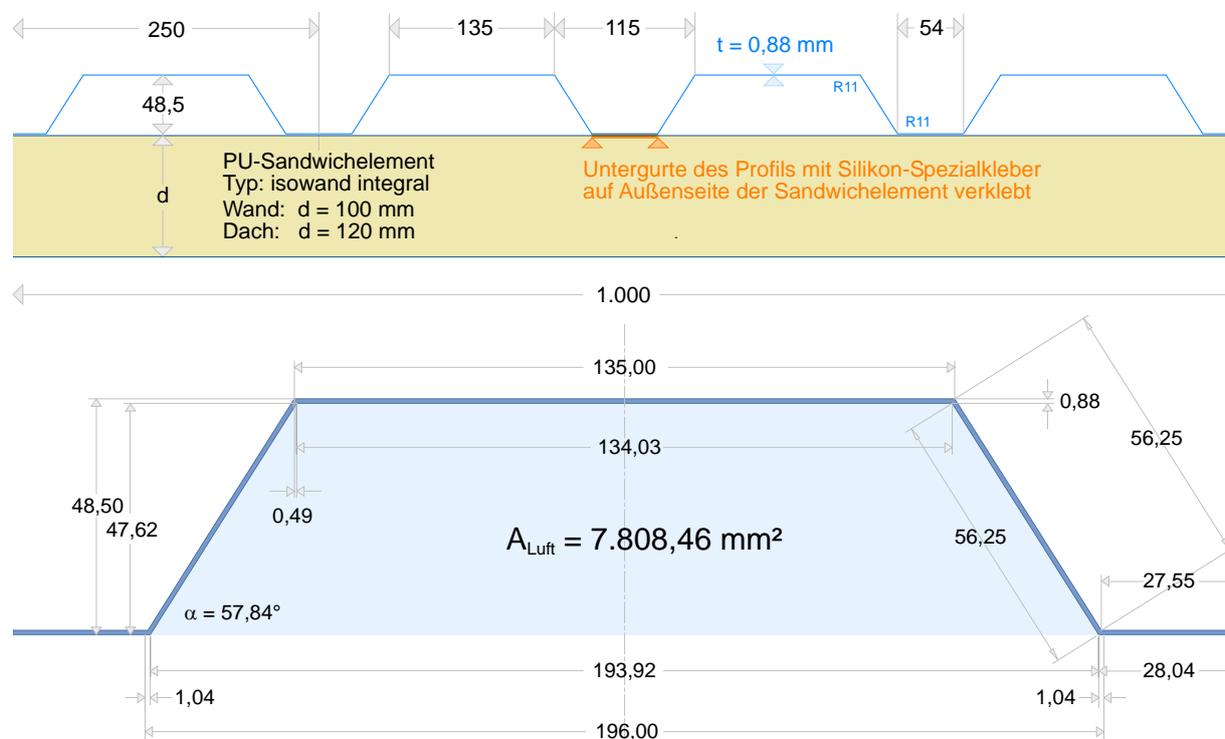


Abbildung 5-5: Querschnitt und Maße des SEA-Kollektors 2.1 und von dessen Luftkanälen

Figure 5-5: Cross section and dimensions of the SEA collector 2.1 and its air channels

Dieser Kollektor wurde zweifach gefertigt. Der Hersteller des Trapezblechs konnte aus Zeitgründen nur ein Stahlblech liefern, das mit einer RAL-9002-Beschichtung (Altweiß) versehen war (Absorptionsgrad $\alpha = 0,363$). Ein Trapezblech mit einer RAL-7016-Beschichtung, jene die auch der SEA1-Kollektor hatte, konnte nicht geliefert werden. Das Umlackieren auf die Farbe RAL 7016 wurde selbst durchgeführt. Genaue Angaben zur verwendeten Farbbeschichtung sind bei Forschungsstelle 1, Fraunhofer ISE, verfügbar. Die Messungen des Absorptions-grades ergaben einen Wert von 0,910, der mit dem SEA1-Kollektor ($\alpha = 0,916$) vergleichbar ist.

Der erste gebaute Kollektor sollte erst nach Abschluss der ersten Messungen mit der RAL-9002-Schicht umlackiert werden. Es zeigte sich aber, dass sich dieser Kollektor aufgrund von Ausgasungen von Silikon bei der Klebung und anschließendem Niederschlag der Ausgasungen auf dem Trapezblech nicht mehr lackieren ließ. Der Lack hatte keinen ausreichenden Halt mehr auf der Oberfläche. Der Kollektor der für die Leistungsmessung verwendet wurde, hatte ein Trapezblech, das nun vor der Verklebung mit einer RAL-7016-Lackierung gewalzt wurde.



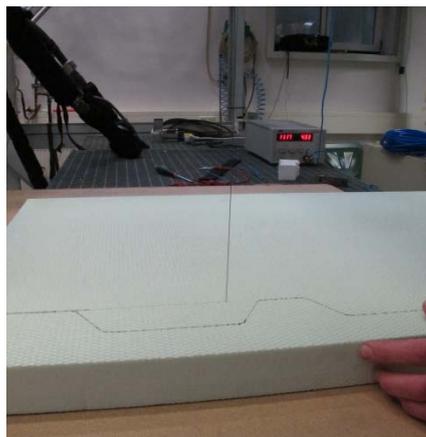
Abbildungen 5-6: Bau von SEA 2.1: Grundieren des Sandwichelements und Aufsetzen sowie Verkleben des Absorbers mit dem Sandwichelement

Figures 5-6: Construction of SEA 2.1: Priming the sandwich element, then fitting and adhering the absorber to the sandwich element

Vor der Verklebung wurde das Sandwichelement mit dem Reiniger OTTO Cleaner T von OTTO Chemie gereinigt und die Klebeflächen anschließend mit dem OTTO Cleanprimer 1101, ebenfalls von OTTO Chemie, vorbehandelt. Nach dem Abtrocknen des Cleanprimers wurde das Zwei-Komponenten-Silikon OTTOCOLL S 610 C04 von OTTO Chemie aufgetragen und das Trapezblech auf dem Sandwichelement ausgerichtet. Nach dem Aufsetzen des Trapezblechs wurden die Klebestellen mit Schraubzwingen aufeinander gepresst, bis die Verklebung erfolgreich abgeschlossen war (Abbildungen 5-6).

Für den Anschluss des Kollektors an dem Teststand wurde ein Anschlussadapter benötigt, da im Teststand wie in Abbildung 5-1 dargestellt der exakte Massenstrom beim Ein- und Ausströmen der Luft aus dem Kollektor gemessen wird. Daher müssen die Luftanschlüsse passgenau und dicht sein. Der Teststand ist mit einem runden DN200-Luftkanal aufgebaut. Ein trichterförmiger Adapter mit dem Übergang der vier Lüftungskanäle des Kollektors auf die Anschlussgeometrie des Teststandes musste angefertigt werden.

Für ein passgenaues Ausschneiden der Trapezgeometrie wurde eine Schneidvorrichtung mit stromdurchflossenem, heißem Draht konstruiert und die Geometrie exakt aus einer Styrodur-Platte ausgeschnitten. Für den luftdichten Anschluss wurde zusätzlich ein Quellband eingesetzt, das den Kollektor luftdicht mit dem Anschluss verbindet. Der Anschlussadapter bildet exakt die Geometrie der Luftkanäle ab, wodurch sichergestellt ist, dass nur die messtechnisch erfasste Luft durch die Luftkanäle des Kollektors strömt. Es wurden zwei dieser Adapter für den Kollektoreintritt und -austritt gefertigt (siehe Abbildungen 5-7). Die genauen Bauteile, ihre Bemaßung sowie die Bemaßung des fertigen SEA-Kollektors 2.1 befinden sich im Anhang (Kapitel 11).



Abbildungen 5-7: Bau von SEA 2.1: Herstellung und Anpassung der Luftanschlüsse
Figures 5-7: Construction of SEA 2.1: Production and fitting of the air connection

5.2.3 Leistungsmessung des Kollektors SEA 2.1 Performance measurement of collector SEA 2.1

Bei dem Nachbau des SEA1-Kollektors (SEA 2.1) handelt es sich um einen unabgedeckten Kollektor. Unabgedeckte Kollektoren sind auf Grund der nicht vorhandenen transparenten Absorberabdeckung stark windsensitiv (siehe Kapitel 8.1). Nach der Prüfnorm DIN EN ISO 9806 werden diese Kollektoren daher bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten auf ihre Leistungsfähigkeit bei verschiedenen Massenströmen vermessen. Die angelegten Windgeschwindigkeiten sind parallel zum Absorber und liegen bei 3 m/s, 1,5 m/s und 0,5 m/s. Unter einer genau definierten effektiv wirkenden Globalstrahlung senkrecht zum Kollektor wird verschieden vorerwärmte Luft in vier Temperaturstufen zu den gegebenen Massenströmen und bei definiertem Windeinfluss für eine ausreichende Zeitdauer durch den Kollektor durchgeführt (Abbildung 5-8, siehe zum Prüfzenario die Beschreibung in Kapitel 5.1). Auf diese Weise lässt sich die thermische Effizienz eines Kollektors in Wirkungsgradkennlinien ermitteln. Zwar werden die WKL unabgedeckter Luftkollektoren in der Regel zur Netto-Bestrahlungsstärke G'' angegeben, also abzüglich der langwelligen Abstrahlung des Absorber, aber die hier angegebenen Werte beziehen sich zur besseren Vergleichbarkeit mit den abgedeckten

SEA-Kollektoren 2.2 und 2.3 auf die Globalstrahlung G, da diese bei abgedeckten Kollektoren zur Referenz verwendet wird.



Abbildung 5-8: SEA-Kollektor 2.1 im Solarsimulator (Teststand) des Fraunhofer ISE

Figure 5-8: SEA collector 2.1 in the solar simulator (test lab) of Fraunhofer ISE

In der folgenden Tabelle 5-2 sind die Parameter der gemessenen WKL des SEA-Kollektors 2.1 aufgeführt und in Abbildung 5-9 sind diese Kennlinien sodann grafisch dargestellt. Die Parameter als auch die WKL werden in diesem Kapitel nachfolgend erklärt (siehe hierzu auch Kapitel 3.1). Die Erklärungen gelten für die Messungen zu den SEA-Kollektoren 2.2 und 2.3 analog.

Windgeschwindigkeit [m/s]	Massenstrom [kg/h]	η_0 [-]	a_1 [m ² K / W]
0,5	100,5	0,328	7,621
0,5	201,6	0,435	9,973
0,5	400,4	0,542	13,076
0,5	801,8	0,638	17,875
1,5	100,5	0,270	7,312
1,5	200,5	0,361	9,813
1,5	400,5	0,463	13,492
1,5	802,6	0,558	18,769
3,0	99,7	0,193	7,961
3,0	199,9	0,270	10,999
3,0	400,8	0,358	15,365
3,0	800,5	0,449	23,845

Tabelle 5-2: Ergebnisse der Leistungsmessung des SEA-Kollektors 2.1

Table 5-2: Performance results of the SEA collector 2.1

Die obige Tabelle 5-2 gibt für gegebene Konfigurationen von Windgeschwindigkeiten und Massenströmen die Funktionen der Wirkungsgradkennlinien wieder. Dabei stellt der Parameter η_0 den maximalen Wirkungsgrad des Kollektors dar und wird auch Konversionsfaktor genannt. Dies ist der thermische Wirkungsgrad, den der Kollektor auf Luft hat, die noch der Umgebungstemperatur der Luft entspricht, d. h. gerade nach Eintritt in den Kollektor. Mit zunehmender Verweildauer der Luft im Kollektor erwärmt sich die Luft und die thermische Effizienz des Kollektors sinkt, d. h. die Wärmeverluste des Absorbers an die Umgebungsluft nehmen zu, da das Temperaturgefälle zwischen Absorber und Umgebungsluft zunehmend höher wird als zwischen Absorber und Arbeitsfluid. Dieser stetige Verlust an thermischer Effizienz des Kollektors wird durch den linearen Verlustkoeffizienten (Gradient a_1) in der Tabelle dargestellt. Je höher dieser Wert, desto steiler fällt die Effizienz des Kollektors mit zunehmender Temperaturdifferenz zwischen mittlerer Kollektorlufttemperatur T_m und Umgebungsluft T_a . Das heißt ein Kollektor ist möglichst effizient, wenn der Konversionsfaktor η_0 möglichst hoch und der Gradient a_1 der thermischen Verluste möglichst gering ist.

Die nachfolgende Abbildung 5-9 gibt die obige Tabelle graphisch in Form der Wirkungsgradkennlinien (WKL) wieder. Die unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten sind farblich (rot, violett und grün), die unterschiedlichen Betriebsmassenströme sind durch die Art der Linie gekennzeichnet. Dabei stellt η_0 für eine gegebene Konfiguration aus Windgeschwindigkeit und Massenstrom den Schnittpunkt der entsprechenden Funktion mit der y-Achse dar. Der Gradient entspricht dem Gefälle der Funktion. Die x-Achse besteht aus den Werten der sogenannten reduzierten Temperaturdifferenz $(T_m - T_a)/G$ (siehe Kapitel 3.1 und 3.3.4).

Die Werte der x-Achse können folgendermaßen verstanden werden: Für einen gegebenen Strahlungswert, bspw. $G = 1000 \text{ W/m}^2$, bedeutet ein x-Achsenwert von $0,02 \text{ m}^2\text{K/W}$, dass eine Temperaturdifferenz zwischen mittlerer Fluidtemperatur im Kollektor T_m und Umgebungstemperatur T_a von 20 K angenommen wird. Die in Abbildung 5-9 dargestellte Wirkungsgradkennlinie des SEA-Kollektors 2.1 bei einem Massenstrom von 800 kg/h und einer Windgeschwindigkeit von $0,5 \text{ m/s}$ gibt dafür bspw. einen Momentanwirkungsgrad η von ca. 29% bzw. eine thermische Kollektorleistung von 290 W/m^2 wieder. Für $G = 500 \text{ W/m}^2$ würde der gleiche Wert des Momentanwirkungsgrades η bei gleichen restlichen Rahmenbedingungen für eine Temperaturdifferenz zwischen T_m und T_a von 10 K anliegen, was nun einer thermischen Leistung des Kollektors von ca. 145 W/m^2 ($0,29 \cdot 500 \text{ W/m}^2$) entspricht.

Ein Kollektor hat also nicht einen Wirkungsgrad, sondern einen maximalen Wirkungsgrad η_0 und einen Momentanwirkungsgrad η . Dieser wird in Abhängigkeit zur Differenz aus mittlerer Fluid- und Umgebungstemperatur dividiert durch die Globalstrahlung dargestellt (reduzierte Temperaturdifferenz) und spiegelt die thermischen Verlusten des Kollektors wider (Gefälle der WKL). Je geringer die thermischen Verluste, desto effizienter wird bereits erwärmte Luft, also bei hohen Werten der reduzierten Temperaturdifferenz $(T_m - T_a)/G$, weiter durch den Kollektor erwärmt und desto flacher verläuft die Funktion. Folglich sind höhere Temperaturniveaus möglich (siehe hierzu auch Kapitel 3.1 und Abbildung 4-1).

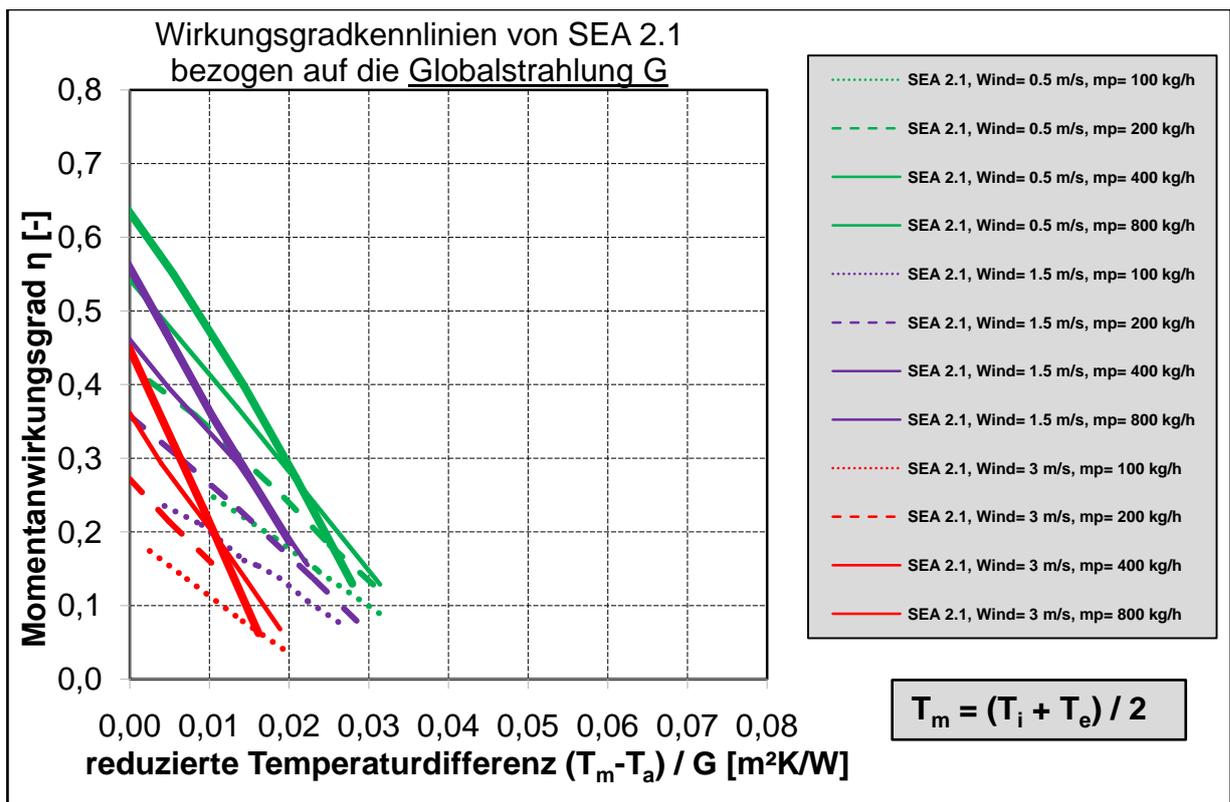


Abbildung 5-9: Gemessenen Wirkungsgradkennlinien des SEA-Kollektors 2.1 für verschiedene Massenströme und Windgeschwindigkeiten

Figure 5-9: Measured efficiency curves of SEA collector 2.1 for different mass flows and wind speeds

Aus den Messergebnissen lassen sich deutlich die Abhängigkeiten des Wirkungsgrades von der Windgeschwindigkeit und dem Betriebsmassenstrom erkennen. Mit abnehmendem Wind (rot → violett → grün) nimmt der Wirkungsgrad deutlich zu. Auch mit der Erhöhung des Betriebsmassenstroms verändert sich die Lage (gepunktete Linie → gestrichelte Linie → Volllinie → dicke Volllinie je Farbe) der Kennlinien deutlich. Die WKL sind ihrem Wesen nach von der angesetzten Strahlung unabhängig. Eine Überführung in eine Leistungskurve, die konkrete Leistungen auf der y-Achse und Temperaturdifferenzen aus T_m und T_a auf der x-Achse abbildet, ist durch die Multiplikation beider Achsen mit einer definierten Strahlung G möglich (siehe weiter oben oder Kapitel 3.1).

Wie in Kapitel 5.1 angemerkt war es auch ein Ziel der Messungen des SEA-Kollektors 2.1, einen Vergleich mit den Ergebnissen aus dem Forschungsprojekt P779 (SEA1) der FOSTA e.V. durchzuführen.

Vergleich auf Basis von ScenoCalc

Das Fraunhofer ISE berechnete mit den für den SEA-Kollektor 2.1 ermittelten WKL und vereinfacht angenommener konstanter mittlere Lufttemperaturen über das Programm ScenoCalc (siehe Kapitel 4.2) den Jahresbruttoertrag des Kollektors für Klimadaten des Standorts Würzburg [RIS17]. Dabei wurde „rückwärts“ gerechnet, d. h. die mittleren Fluidtemperaturen wurden in ScenoCalc derart angepasst, dass die im Projekt SEA 1 gemessenen Erträge erreicht wurden, und es wurde anschließend

beurteilt, ob die so ermittelten mittleren Fluidtemperaturen (als konstant über das ganze Jahr angenommen) realistisch sind. Sie ergaben sich zu 20 – 28 °C, was plausibel erscheint, d. h. die im Projekt SEA 1 ermittelten Ertragsdaten scheinen realistisch zu sein. Es wurde jedoch auch deutlich, dass mit höheren Massenströmen wesentlich höhere Erträge zu erwarten sind. Die nachfolgende Tabelle 5-3 vergleicht die Jahresbruttoerträge zwischen SEA1-Feldmessungen und den Berechnungen auf Basis von ScenoCalc für SEA 2.1. Es ist wichtig anzumerken, dass ein exakter Vergleich nicht möglich war, da im SEA1-Projekt variable Massenströme und ein variabler Windeinfluss vorlagen. Ungeachtet dessen zeigt der Vergleich die Plausibilität der Ergebnisse des SEA1-Projektes. Die Wand ist nach Süden ausgerichtet und im rechten Winkel zur horizontalen Fläche, sämtliche Dachneigungen sind ebenfalls gen Süden ausgerichtet.

SEA 1/2.1: Erträge [kWh/m²a] zur Lage	Wand 90°	Dach 15°	Dach 0°	Dach 25°
Außenmessung (SEA1-Projekt)	163,6	158,0	n/V	n/V
Standort: Gräfelfing (Raum München), Messjahr 2010/2011, Volumenströme 27 - 167 m ³ /h, Ansaugen von Umgebungsluft variabler Temperatur				
Messung im Solar Simulator ISE und Simulation mit ScenoCalc (SEA2-Projekt)	156,0	n/V	155,1	160,2
Standort: Würzburg, Klimadaten: 1996-2005, WKL: SEA 2.1 mit 100kg/h				
Konstante mittlere Lufttemperatur im Kollektor	20 °C	n/V	25 °C	28 °C

Tabelle 5-3: Ermittlung der mittleren Lufttemperaturen, mit denen SEA 2.1 in ScenoCalc-Berechnungen die Energieerträge von SEA 1 erreicht

Table 5-3: Determination of the mean air temperature with which SEA 2.1 reaches the energy yields from SEA 1 in ScenoCalc calculations

Vergleich auf Basis einer dynamischen Jahressimulation

Mit Hilfe der vom Fraunhofer ISE ermittelten WKL konnte ERK eine vereinfachte dynamische Jahressimulation durchführen. Da aus dem Forschungsprojekt SEA1 in Fünf-Minuten-Taktung die genauen Temperatur- und effektiven Strahlungswerte erfasst wurden, konnte nun mittels der WKL und dieser Eingangsgrößen ein Jahresertrag simuliert werden. Abhängig vom jeweils angesetzten mittleren Windeinfluss bestätigte auch dieser Ansatz auf Basis gemessener Wetterdaten aus dem Raum München jährliche Energieerträge zwischen 160,6 kWh/m²a und 249,7 kWh/m²a für mittlere Windgeschwindigkeiten von 3 m/s, respektive 0,5 m/s. Weitere Details hierzu, insbesondere auch Vergleiche zu den anderen vermessenen SEA-Kollektoren, sind im Kapitel 5.5 aufgeführt.

5.3 Bau, Vermessung und Ergebnisse des Kollektors SEA 2.2 Construction, measurement and results of collector SEA 2.2

5.3.1 Zielsetzung der Vermessung des Kollektors SEA 2.2 Objectives of measuring collector SEA 2.2

Der SEA-Kollektor 2.2 ist im Wesentlichen eine Modifikation des SEA-Kollektors 2.1, wobei dieser um eine transparente Polycarbonat-Abdeckung ergänzt wird. Die transparente Abdeckung hat das Ziel, möglichst große Teile der eintreffenden Solarstrahlung passieren zu lassen, aber gleichzeitig eine ruhende Luftschicht (Kapitel 3.3.1) zu generieren. Allerdings ruht diese Luft nicht komplett, denn es entstehen Konvektionswalzen zwischen dem Absorberprofil (Trapez) und der Polycarbonat-Platte. Diese Luftschicht fungiert nun als eine Wärmedämmung zwischen Absorber und Umgebungsluft und dies soll die thermischen Verluste des Kollektors reduzieren. Es wurde daher ein klar positiver Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Kollektors erwartet. Analog dazu reduziert sich bei einem abgedeckten Kollektor der Einfluss des Windes auf diesen, da er durch die Abdeckung und die ruhende Luftschicht besser von den erhöhten thermischen Konvektionsverlusten eines stärkeren Windes abgeschirmt ist.

Um diese Effekte klar quantifizieren zu können, wurde ein ansonsten baugleicher Aufbau des SEA-Kollektors 2.2 zum vorherigen SEA-Kollektor 2.1 durchgeführt. Entsprechend wurde der SEA-Kollektor 2.2 auch bei den gleichen Massenströmen vermessen wie der SEA-Kollektor 2.1 um eine direkte Vergleichbarkeit der Wirkungsgradkennlinien zu gewährleisten.

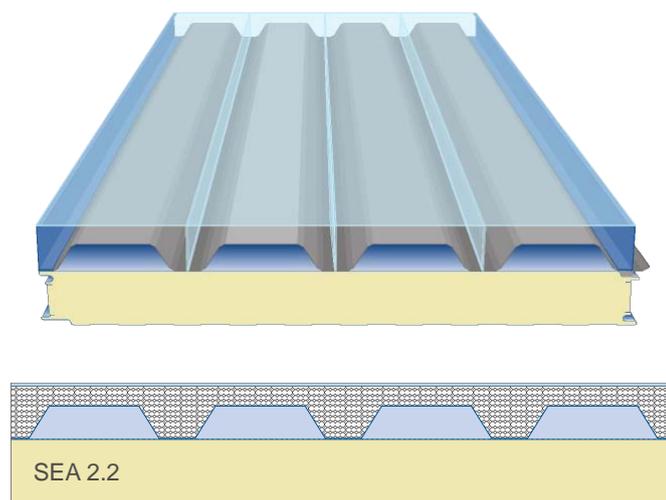


Abbildung 5-10: Schema und Querschnitt des SEA-Kollektors 2.2

Figure 5-10: Scheme and cross section of the SEA collector 2.2

Ebenfalls von Interesse waren bei diesem Kollektor die Betriebs- und Stagnationstemperaturen wichtiger Kollektorbauteile. Durch die Messdaten und die Begutachtung des SEA1-Kollektors im Langzeit-Feldversuch des FOSTA-Forschungsprojektes P779 (SEA1) konnte bereits ausgeschlossen werden, dass Betrieb und Stagnation, d. h. Ausfall oder Abschaltung der Ventilatoren unter starker solarer Bestrahlung, zu Schäden oder Havarie führen. Die Infrarot-Messungen für den Kollektor SEA 2.1 im

Teststand der Fraunhofer ISE bestätigten dies. Da nun durch die transparente Abdeckung höhere Betriebs- und Stagnationstemperaturen anzunehmen waren, musste dies gesondert überprüft werden (Kapitel 5.6).

5.3.2 Bau des Kollektors SEA 2.2 **Construction of collector SEA 2.2**

Die SEA-Kollektor 2.2 ist in Hinblick auf das verwendete Sandwichelement sowie Absorber und Beschichtungen baugleich mit dem Kollektor SEA 2.1 (Kapitel 5.2.2). Auf dem Kollektor wurde sodann eine 3 mm dicke Polycarbonat-Massivplatte Makrolon® UV der Firma Bayer MaterialScience/Covestro als transparente Abdeckung montiert. Auf die Gründe für die Auswahl dieser Abdeckung wird in Kapitel 8.2.1 eingegangen. Die Polycarbonat-Massivplatte wurde hierzu über dem Absorber befestigt und lag seitlich auf Holzprofilen auf. Die Holzprofile selbst wurden über Stahlwinkel an der Unterseite des Sandwichelementes befestigt (Abbildung 5-11).

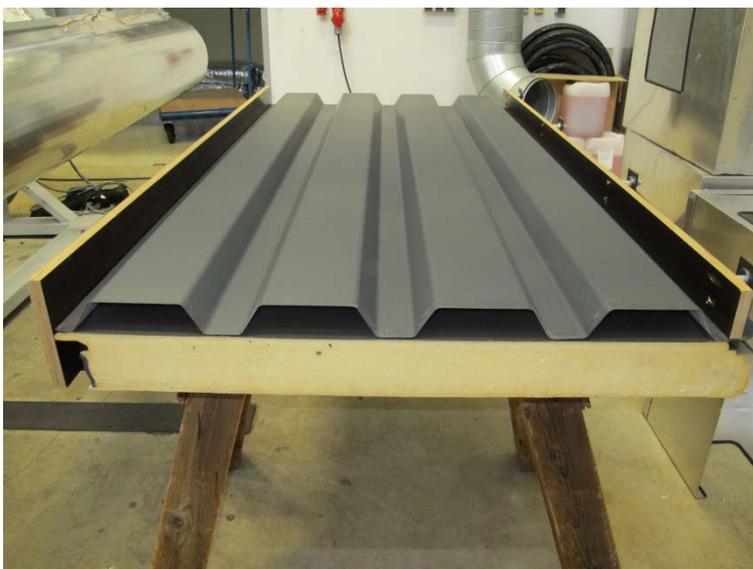


Abbildung 5-11: Seitliche Holzprofile, welche die Polycarbonat-Platte tragen

Figure 5-11: Lateral wood profiles supporting the polycarbonate sheet

Um die mechanische Stabilität der Polycarbonat-Platte zu erhöhen, wurden vertikal stehende Polycarbonat-Streifen zwischen Untergurte und Polycarbonat-Platte in den mittleren Bereichen der Untergurte eingebaut und verklebt (Abbildung 5-12). Als Klebstoffe und Primer wurde von OTTO Chemie der Kleber OTTOSEAL 72 S, OTTO Cleaner T und OTTO Primer 1217 verwendet.

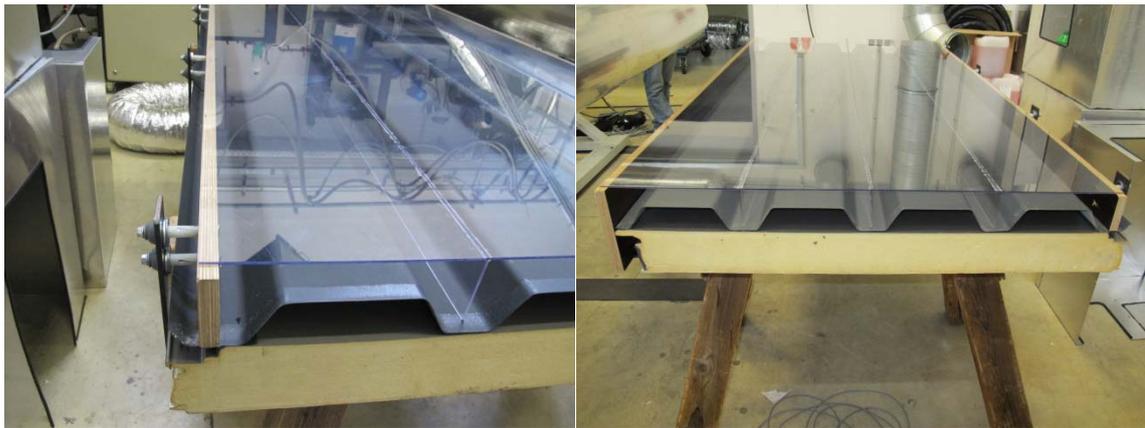


Abbildung 5-12: SEA-Kollektor 2.2 mit montierter Polycarbonat-Platte über dem Absorber

Figure 5-12: SEA collector 2.2 with polycarbonate sheet mounted above the absorber

Es ist naheliegend, dass eine solche Konstruktion produktionstechnisch für eine Massenfertigung als Gebäudebauteil nicht sinnvoll ist und dies auch statische Probleme beinhaltet, allerdings lag der Fokus bei der Vermessung des SEA-Kollektors 2.2 auf der Ermittlung des Unterschiedes einer transparenten Abdeckung und nicht auf produktionstechnischen Erwägungen. Das Fraunhofer ISE hat im Rahmen des Projektes zur 3. PBA-Sitzung allerdings auch alternative Befestigungskonzepte vorgestellt [ISE15]. Die genauen Bauteile, ihre Bemaßung sowie die Bemaßung des fertigen SEA-Kollektors 2.2 befinden sich im Anhang (Kapitel 11).

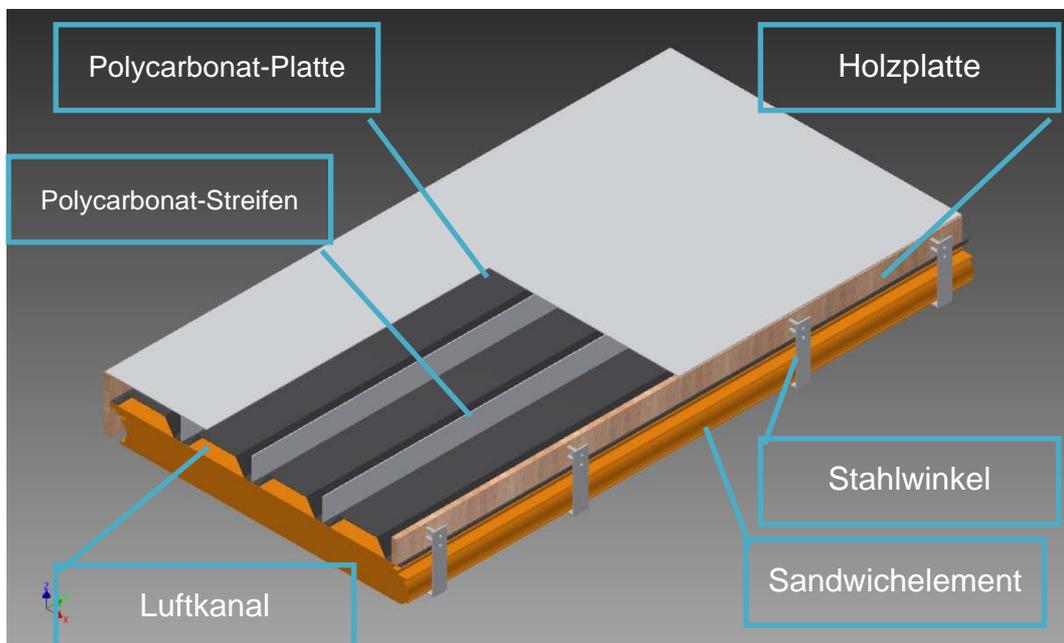


Abbildung 5-13: Aufbau des SEA-Kollektors 2.2 als CAD-Schnittzeichnung

Figure 5-13: Composition of the SEA collector 2.2 as CAD sectional drawing

5.3.3 Leistungsmessung des Kollektors SEA 2.2 Performance measurement of collector SEA 2.2

Der SEA-Kollektor 2.2 wurde ebenfalls zu den laminaren und turbulenten Massenströmen von 100 kg/h, 200 kg/h, 400 kg/h und 800 kg/h vermessen, allerdings nur bei einer Windgeschwindigkeit. Aufgrund der Abdeckung wurde der Kollektor normativ nur bei einer Windgeschwindigkeit von 3 m/s parallel zum Absorber vermessen. Dies entspricht der Prüfnorm für Luftkollektoren DIN EN ISO 9806, da abgedeckte Kollektoren eine deutlich geringe Windsensitivität aufweisen. Die angesetzte Windgeschwindigkeit von 3 m/s entspricht in etwa dem jährlichen und regionalen Durchschnitt in der Bundesrepublik Deutschland, daher stellt dieser Wert eine realitätsnahe Messgröße dar. Mehr zum Punkt Windeinfluss findet sich in Kapitel 8.1.



Abbildung 5-14: SEA-Kollektor 2.2 im Solarsimulator (Teststand) des Fraunhofer ISE

Figure 5-14: SEA collector 2.2 in the solar simulator (test lab) of Fraunhofer ISE

Die Tabelle 5-4 fasst die Ergebnisse der Leistungsmessung zusammen. Zur Erklärung der Parameter der Tabelle sowie der WKL wird auf die Ausführungen in Kapitel 5.2.3 zum SEA-Kollektor 2.1 bzw. in Kapitel 3.1 für Luftkollektoren im Allgemeinen verwiesen.

Windgeschwindigkeit [m/s]	Massenstrom [kg/h]	η_0 [-]	a_1 [m ² K / W]
3,0	99,5	0,428	6,019
3,0	200,0	0,502	6,609
3,0	399,7	0,596	8,634
3,0	799,4	0,642	11,556

Tabelle 5-4: Ergebnisse der Leistungsmessung des SEA-Kollektors 2.2

Table 5-4: Performance results of the SEA collector 2.2

In der Abbildung 5-15 sind die WKL des SEA-Kollektors 2.1 (rot) und SEA-Kollektors 2.2 (gelb) Kollektors bei der Windgeschwindigkeit von 3 m/s vergleichend dargestellt. Die grau hinterlegten Kennlinien sind die Ergebnisse des SEA-Kollektors 2.1 bei den geringeren Windgeschwindigkeiten (1,5 und 0,5 m/s).

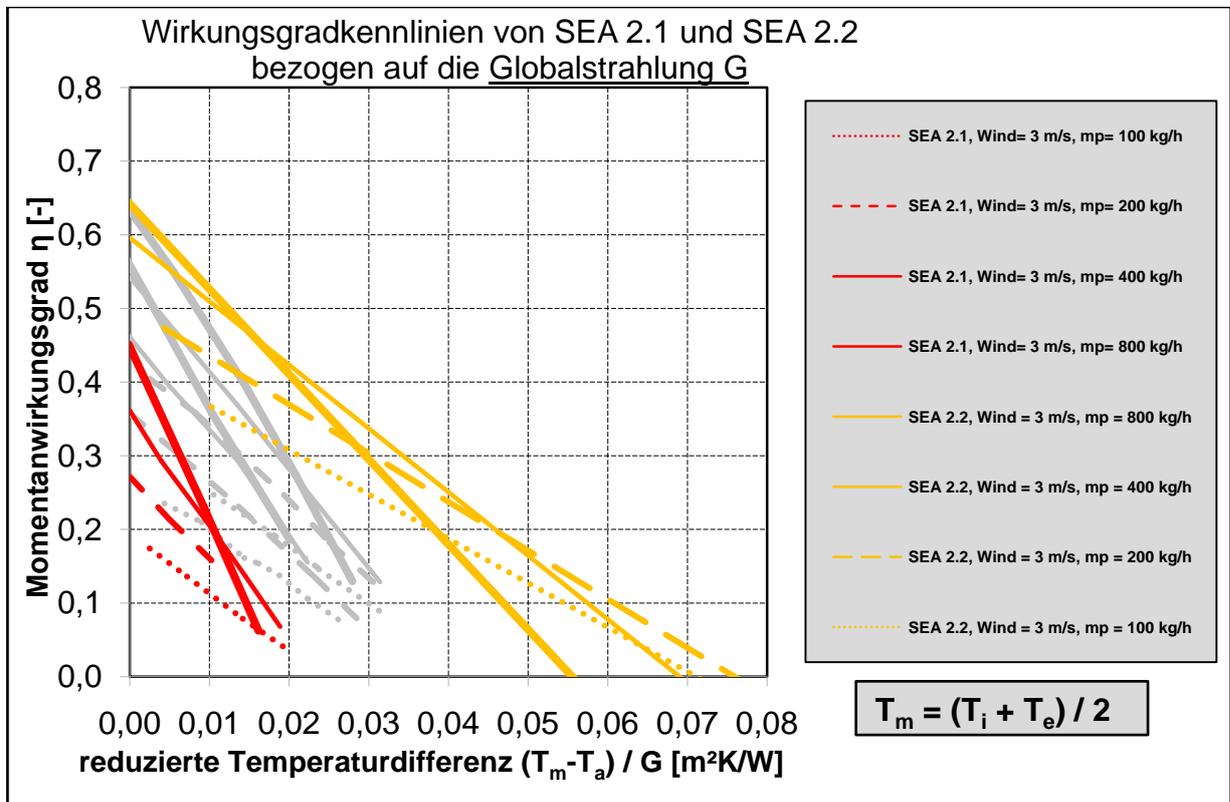


Abbildung 5-15: Gemessene WKL des SEA-Kollektors 2.1 (rot) und 2.2 (gelb) für verschiedene Massenströme bei einer Windgeschwindigkeit von 3 m/s. Die grauen WKL sind die des SEA-Kollektors 2.1 bei den Windgeschwindigkeiten von 1,5 und 0,5 m/s und dienen nur zur besseren Vergleichbarkeit von Abbildung 5-9 mit den Ergebnissen von der Messung des Kollektors SEA 2.2.

Figure 5-15: Efficiency curves of SEA collector 2.1 (red) and 2.2 (yellow) for different mass flows and a wind speed of 3 m/s. The grey efficiency curves are based on the SEA collector 2.1 for the lower wind speed of 1,5 m/s and 0,5 m/s and are included for better comparison of figure 5-9 with the results of collector SEA 2.2.

Die gelungene Optimierung des SEA-Kollektors 2.1 durch die transparente Abdeckung ist deutlich in der Abbildung 5-15 zu erkennen. Qualitativ lässt sich die starke Verbesserung zum einen am maximalen Wirkungsgrad η_0 (Konversionsfaktor) erkennen. Verglichen mit dem Kollektor SEA 2.1 ist dieser für geringe Massenströme mehr als zwei Mal so groß und bleibt auch für hohe Massenströme bei fast dem eineinhalbfachen Wert. Zum anderen sind die thermischen Verluste deutlich geringer, was an dem geringeren linearen Verlustkoeffizienten (Gradient a_1) der WKL zu erkennen ist und zu deutlich nach rechts verschobenen Schnittpunkten der WKL mit der x-Achse führt. Letztendlich bedeutet dies, dass auch bereits deutlich erwärmte Luft weiterhin im Kollektor erwärmt wird, für die im SEA-Kollektor 2.1 keine weitere Erwärmung mehr stattfände. Es sind folglich höhere Lufttemperaturniveaus möglich.

Auch für den SEA-Kollektor 2.2 wurde eine Einschätzung der Jahresbruttoerträge auf zwei verschiedene Vorgehensweisen getroffen. Mittels einer dynamischen Jahres-

simulation auf Basis der bei Forschungsstelle 2 verfügbaren hochauflösenden Messdaten zu Temperaturen und effektiven Solarstrahlungen aus dem SEA1-Messjahr wurde ein Jahresbruttoenergieertrag von 389,9 kWh/m²a für einen Massenstrom von 100 kg/h und einer Windgeschwindigkeit von 3,0 m/s ermittelt. Dies liegt deutlich über dem avisierten Projektziel dieses Forschungsprojektes von 250 – 300 kWh/m²a und ebenfalls über dem Wert von SEA 2.1 von 160,6 kWh/m²a für die gleichen gegebenen Rahmenbedingungen. Die angegebenen Werte beziehen sich auf einen Durchschnitt zwischen Ertrag einer Verbauung des SEA-Kollektors in einer Südfassade und der Verbauung als Dachelement mit einer Südneigung von 15°. Allerdings sind hier noch keine Energieertrags-Abschläge auf Basis des IAM (Einstrahlwinkel-Korrekturfaktors, Kapitel 4.2 und 6.2) beinhaltet.

Da der Wert von 389,9 kWh/m²a auf Basis eines Durchschnitts von Südfassade und nach Süden geneigtem Dach ermittelt wurde und sich die Bauteile folglich statisch zum Sonnenstand richten, ist der IAM zu berücksichtigen. Während die eintreffenden Solarstrahlungen abhängig vom Winkel zur Sonne mittels der Messgeräte korrekt ermittelt wurden, führt die transparente Abdeckung zu Reflexionen eingehender Strahlung sowie ggf. zu leichten Verschattungen durch die Trapezgeometrie, die stets vom jeweiligen Winkel abhängen. Da dieser Winkel ständig schwankt, kann hier nur mit einem Durchschnittswinkel und daher ein Durchschnitts-IAM gearbeitet werden, ähnlich der Berechnungen auf Basis von ScenoCalc. Darüber hinaus kann von weiteren leichten Effizienzverlusten im Betrieb z.B. durch im Winter manchmal notwendiger Schneeschmelze am Dach, ausgegangen werden. In Summe lassen sich diese Effekte überschlägig mit einem Abschlag von ca. 10 % auf den Jahresbruttoenergieertrag veranschlagen. Das bedeutet, dass ein Bruttoenergieertrag von 350,9 kWh/m²a als realistisch anzusetzen ist. Mehr zum Vergleich der Jahresbruttoerträge aller drei SEA-Kollektoren findet sich im Kapitel 5.5.

SEA 2.2: Erträge [kWh/m ² a] nach T _m	ca. 15 °C	18 °C	20 °C	22 °C
Jahressimulation SEA 2.2 auf Basis Wetterdaten aus Projekt SEA1	350,9	n/V	n/V	n/V
Standort: Gräfelfing (Raum München), Wettermessdaten aus 2010/2011, WKL: SEA 2.2 mit 100 kg/h, Windgeschwindigkeit 3,0 m/s mit 10% Abschlag (IAM und sonstige Einbußen)				
Messung im Solar Simulator ISE und Simulation mit ScenoCalc auf Basis dreier Werte für T _m	n/V	282	249	220
Standort: Würzburg, Klimadaten: 1996-2005, WKL: SEA 2.2 mit 100 kg/h, IAM = 0,95 bei θ = 50°				

Tabelle 5-5: Vergleich der Jahresbruttoenergieerträge auf Basis der ScenoCalc-Berechnungen aus SEA 2.2 und der Projektion aus einer dynamischen Jahressimulation für SEA 2.2 auf Basis der Wetter-Messdaten zu Strahlung und Temperatur aus dem SEA1-Forschungsprojekt

Table 5-5: Comparison of the annual gross energy yields between ScenoCalc calculations based on SEA 2.2 and the projection of a dynamic simulation for SEA 2.2 based on the weather data of measured solar radiation and temperature within the SEA1 research project

Das Fraunhofer ISE verwendete zur Ermittlung eines Jahresbruttoenergieertrags das Berechnungsprogramm ScenoCalc (siehe Kapitel 4.2) für Klimadaten des Standorts

Würzburg [RIS17]. Hier wurden vereinfacht eine mittlere Kollektorlufttemperatur (T_m) und ein ebenfalls statischer IAM angenommen, um einen Normjahresbruttoertrag zu berechnen. Dieser Erträge sind in Tabelle 5-5 dargestellt, ebenso der Ertrag aus zuvor erwähnter Jahressimulation, wobei bei dieser laut Projektion eine mittlere Kollektorlufttemperatur T_m von ca. 15 °C anliegt. Das ist der Durchschnitt zwischen ein- und ausströmender Luft über das gesamte Jahr, also von morgens bis abends, zu kalten wie zu warmen Tagen. Die Ergebnisse, obwohl verschieden generiert, sind hinlänglich konsistent und es zeigt sich, dass bereits für einen niedrigen Massenstrom von 100 kg/h das avisierte Projektziel erreicht wurde. Bei höheren Massenströmen sind entsprechend vorher aufgeführter WKL höhere Energieerträge zu erwarten.

Die Unterschiede in den Energieerträgen lassen sich einerseits durch die geringere mittlere Fluidtemperatur erklären (geringere thermische Verluste) und andererseits durch das sonnige Messjahr 2010/2011, indem insbesondere die Übergangsjahreszeiten sich durch warmes und sonniges Wetter auszeichneten. Allgemein ist in den letzten Jahren eine Erhöhung der Sonnenscheindauern deutlich. Die für ScenoCalc verwendeten durchschnittlichen Klimadaten aus den Jahren 1995 – 2005 zeichnen sich eher durch kühlere Übergangsperioden im Vergleich zum Messjahr aus.

Die Erkenntnisse zu den Stagnationstemperaturen des Kollektors SEA 2.2 werden zu Übersichtszwecken geschlossen für alle drei Kollektoren im Kapitel 5.6 dargelegt. Es kann allerdings bereits hier vermerkt werden, dass im Stagnationsfall auf der äußeren Metalldeckschicht des Sandwichelementes direkt unter dem Untergurt des Absorbers Temperaturen von 120 °C gemessen wurden. Zwar ist dieser Fall mit beinahe 1.000 W/m² senkrecht eintreffender Solarstrahlung extrem – ein nur im Sommer mittags auf einem mit Süd-Neigung montiertem Dach möglicher Zustand in Deutschland, doch sind diese Temperaturen für eine längere Belastung des PU im Sandwichelement zu hoch.

5.4 Bau und Vermessung des Kollektors SEA 2.3

Construction, measurement and results of collector SEA 2.3

5.4.1 Zielsetzung der Vermessung des Kollektors SEA 2.3

Objectives of measuring collector SEA 2.3

Aus den Leistungs- und Stagnationstemperaturmessungen des SEA-Kollektors 2.2 ist klar ersichtlich, dass die transparente Abdeckung in Form der Polycarbonat-Platte die Leistungsfähigkeit des Kollektors deutlich erhöht. Die Messungen zeigen jedoch auch, dass Stagnationstemperaturen von ca. 120 °C auf der äußeren Metalldeckschicht des Sandwichelementes unter dem Absorber vorherrschen. Gerade durch das direkte Aufkleben des Trapezprofils (Absorber) auf das Sandwichelement kommt es zu einer direkten Wärmeleitung im Bereich der Verklebung und hiermit zu diesen hohen Werten.

Durch die Notwendigkeit, die Auswirkungen der Profilgeometrie und konstruktiver Optimierungen in Hinblick auf eine weitere Verbesserung des SEA-Kollektors zu überprüfen sowie eine thermische Entlastung in den Stagnationstemperaturen im

Vergleich zum SEA-Kollektor 2.2 zu erreichen, bestand die Zielsetzung beim SEA-Kollektor 2.3 aus drei Teilen:

1. Überprüfen der Optimierungsmöglichkeiten des SEA-Kollektors mit einer alternativen Profilgeometrie sowie konstruktiven Anpassungen;
2. Unter der Maßgabe von Punkt 1, nach Möglichkeit ein Erhöhung des Energieertrags oder zumindest Konstanz unter Maßgabe von Punkt 3;
3. Nach Möglichkeit eine Reduktion der Stagnationstemperaturen im Kollektor.

Dabei wurde beschlossen, Wellprofil als Absorber zu verwenden, da dieses aus gestalterischen Aspekten ästhetischer (z. B. im Vergleich zu einem Trapez) durch Architekten und Bauherren eingestuft werden könnte. Zudem sollte dieses Mal die transparente Abdeckung im Vergleich zum SEA-Kollektor 2.2 beibehalten werden, also den Optimierungsaspekt der transparenten Abdeckung konstant bleiben.

Durch die Flächen der Klebung und der Geometrie des Trapezblechs bei dem SEA-Kollektor 2.2 wird ein Teil der möglichen durchströmbaren Fläche des Sandwichelementes nicht genutzt. Im Bereich der Klebung muss die Wärme entlang des Trapezblechs zu den Strömungskanälen transportiert werden und kann erst hier als Wärme nutzbar gemacht werden. Dieser Wärmetransportvorgang reduziert mitunter die Leistungsfähigkeit des Kollektors. Dieses Verbesserungspotential soll bei dem Konzept des SEA-Kollektors 2.3 genutzt werden. Hierfür wurden zwischen beiden Forschungsstellen intensive Vorüberlegungen getätigt sowie eine Reihe von Erwägungen auf Basis der Erkenntnisse aus den Simulationen eingebunden (Kapitel 6.4). Das Ergebnis ist ein Kollektor, dessen Leistung weiter verbessert wurde und der auch architektonisch gestalterisches Potential aufweist. (siehe Abbildung 5-16).

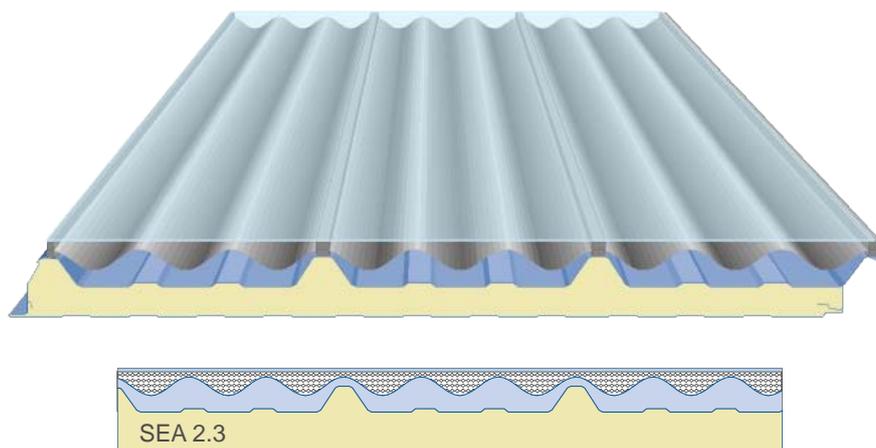


Abbildung 5-16: Schema und Querschnitt des SEA-Kollektors 2.3

Figure 5-16: Scheme and cross section of the SEA collector 2.3

5.4.2 Bau des Kollektors SEA 2.3 Construction of collector SEA 2.3

Die Wahl der Komponenten fiel bei dem SEA-Kollektor 2.3 nach gründlichen Vorüberlegungen und Absprachen der beiden Forschungsstellen auf ein Wellprofil als Absorber und ein trapezförmiges Sandwichelement als Rückseite. Die Profile Welle 27/111 der Firma Laukien und das Ondatherm Sandwich-Element 1001 TSF der

Firma ArcelorMittal haben hierbei eine gleiche Periodizität und sind daher für das Vorhaben, ein Wellprofil und trapezförmiges Sandwichelement zu vereinen, sehr gut geeignet. Als transparente Absorberabdeckung kommt wieder eine 3 mm dicke Polycarbonat-Massivplatte (Makrolon® UV von Bayer MaterialScience bzw. Covestro) zum Einsatz. Das Wellprofil (Absorber) wurde auf die Farbe RAL 7016 umlackiert (Abbildung 5-17), damit im Absorptionsgrad keine Varianz zu den vorherigen SEA-Kollektoren entsteht, also allein die konstruktiven Änderungen und die veränderte Profilgeometrie in ihrem Einfluss auf die Kollektorleistung ausschlaggebend sind.



Abbildung 5-17: Bau von SEA 2.3: Lackieren des Absorbers mit RAL 7016

Figure 5-17: Construction of SEA 2.3: Varnishing of the absorber with RAL 7016

Die Tragkonstruktion des Wellprofils und der Polycarbonat-Platte wurde aus Komponenten des Projektpartners Reisser Schraubentechnik aufgebaut. Durch das Trapez-Sandwichelement wurden Solarbefestiger vom Typ RSB-Z-8,0/M10xLg/LM 8,0/M10x150/70 geschraubt und auf der Rückseite des SE fixiert. Das Wellprofil wurde an den entsprechenden Stellen, an denen die Solarbefestiger das Profil durchdringen, aufgebohrt. Darüber hinaus wurden die für die Betriebs- und Stagnationstemperaturmessungen notwendigen Temperatursensoren an den notwendigen Stellen angebracht (Abbildungen 5-18).



Abbildungen 5-18: Bau von SEA 2.3: Sandwichelement mit 12 montierten Solarbefestigern und eingebauten Temperatursensoren sowie Nahaufnahme der Befestigung des Absorber-Wellenprofils mit einer Glockendichtung

Figure 5-18: Construction of SEA 2.3: Sandwich element with 12 affixed solar fasteners and attached temperature sensors as well as a close-up view of the fixation of the corrugated absorber element with the gasket

Prinzipiell war es nun möglich, den Absorber über die M10-Gewindestange des Solarbefestigers auf einen gewünschten Abstand zum SE zu positionieren. Eine Glockendichtung vom Typ GLD 25/7,8/13 fungierte als abdichtendes Element des Luftkanals und hielt gleichzeitig die Polycarbonat-Platte auf einen Abstand von 10 mm. Eine weitere Glockendichtung fixierte die Polycarbonat-Platte und den Absorber. Der Abstand zwischen Wellprofil und Obergurt des Trapez-SE wurde für die ersten Tests auf den minimal einstellbaren Abstand von 10 mm gesetzt. In der Abbildung 5-19 ist eine 3D-CAD-Zeichnung abgebildet, die den Aufbau verdeutlicht.

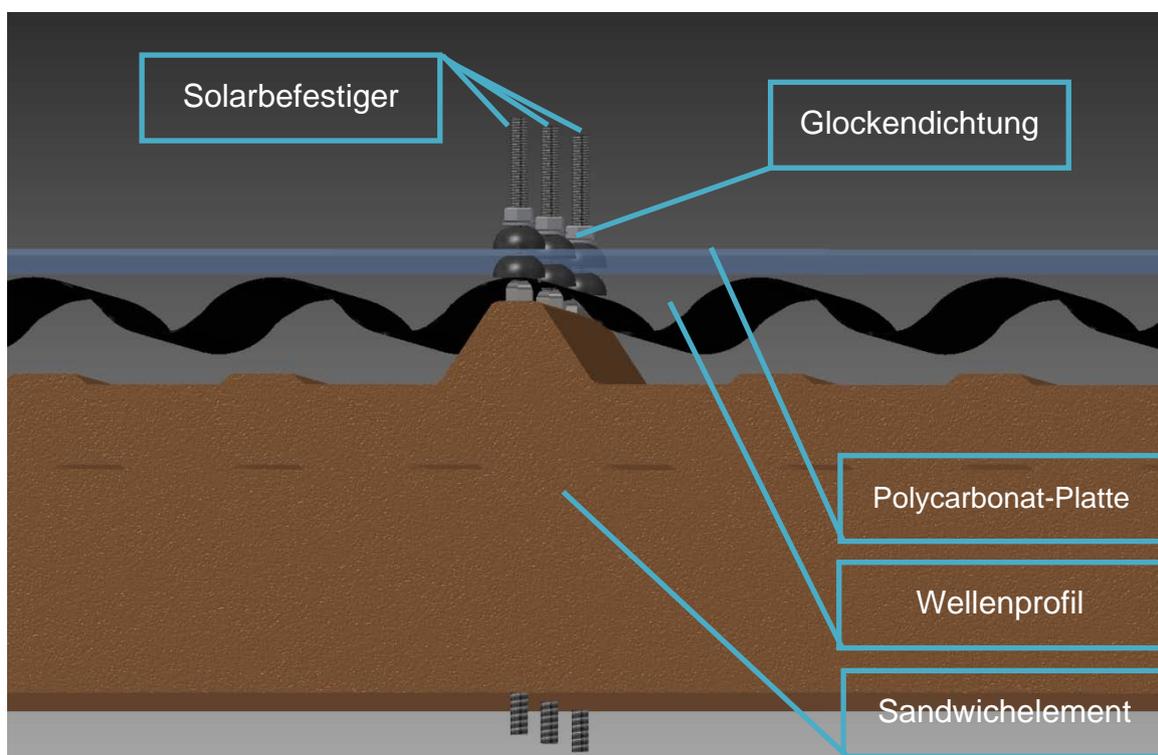


Abbildung 5-19: CAD-Zeichnung des SEA-Kollektors 2.3 mit Fokus auf die Verbindung zwischen Solarbefestiger, Wellprofil, Glockendichtungen und Polycarbonat-Platte

Figure 5-19: CAD drawing of the SEA collector 2.3 focusing on the connection between solar fastener, corrugated absorber element, gasket and polycarbonate sheet

An den Seiten des Kollektors war eine Dämmung (grau und dunkelrot) angebracht, um die Wärmeverluste des über den Obergurt heraus stehenden Absorbers zu reduzieren. Der Absorber selbst lag auf einem EPDM-Dämmstreifen in der Stärke von 19 mm auf. Dieser EPDM-Dämmstreifen bildete gleichzeitig die Abdichtung des Luftkanals gegenüber der Umgebung. Auch die Polycarbonat-Platte lag auf eine EPDM-Dämmung auf. Durch das Anziehen der M10-Muttern wurden die Glockendichtung und EPDM-Dämmstreifen miteinander verpresst (Abbildung 5-20).

Die konstruktiven Änderungen erhöhen den Flächenanteil des Absorbers der im direkten Kontakt mit der Kollektorluft steht. So liegt dieser bei den SEA-Kollektoren 2.1 und 2.2 bei ca. 82 %, da die Untergurte des Trapez-Absorbers nicht direkt im

Kontakt stehen. Beim SEA-Kollektor 2.3 ist dieser Anteil näherungsweise bei 99 %, da nur im Bereich der Befestigungen kein direkter Kontakt zum Arbeitsfluid besteht. Die Querschnittsfläche der Kollektorkanäle von SEA 2.1/2.2 mit 31.234 mm² reduziert sich auf 27.186 mm² bei SEA 2.3 (Abstand Absorber, Wellenberg zu Obergurt, Trapez-SE auf 10 mm gesetzt, bei 15 mm wären es 32.001 mm²; siehe weiter oben). Die genauen Bauteile, ihre Bemaßung sowie die Bemaßung des gesamten SEA-Kollektors 2.3 befinden sich im Anhang (Kapitel 11).

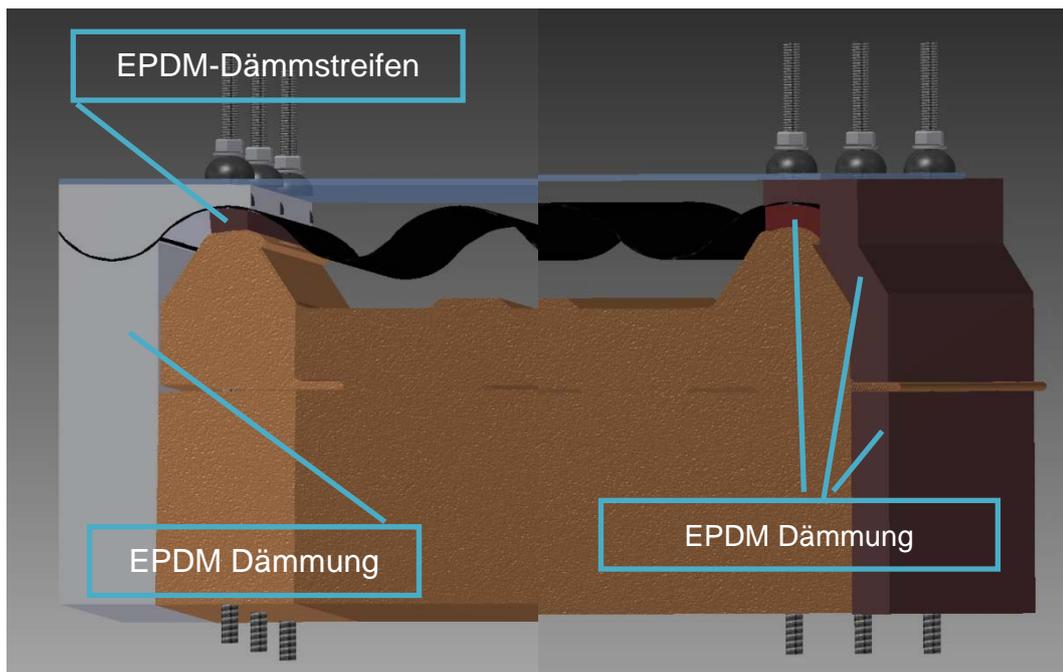


Abbildung 5-20: CAD-Zeichnung des SEA-Kollektors 2.3 mit Ansicht der seitlich am Kollektor angebrachten Wärmedämmungen und Dämmstreifen, die auch als Auflage für den Absorber dienen
Figure 5-20: CAD drawing of the SEA collector 2.3 focusing on the laterally fitted thermal insulations and insulation strips, which also support the absorber



Abbildungen 5-21: Konstruktion des SEA-Kollektors 2.3
Figures 5-21: Finished SEA collector 2.3

5.4.3 Leistungsmessung des Kollektors SEA 2.3 Performance measurement of collector SEA 2.3

Wie die vorherigen SEA-Kollektoren wurde auch SEA 2.3 bei den verschiedenen Massenströmen von 100 kg/h, 200 kg/h, 400 kg/h und 800 kg/h im Teststand des Fraunhofer ISE vermessen (Abbildung 5-22). Da es sich bei diesem Kollektor auch um einen abgedeckten Kollektor handelt, wurde er analog zum SEA-Kollektor 2.2 auch nur bei einer Windgeschwindigkeit von 3 m/s parallel zum Absorber geprüft.

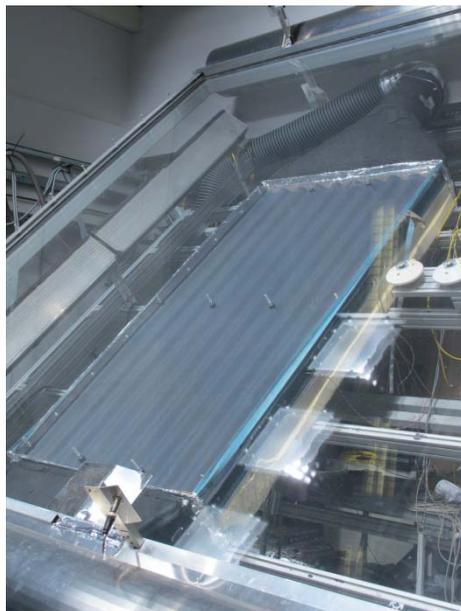


Abbildung 5-22: SEA-Kollektors 2.3 im Solarsimulator (Teststand) des Fraunhofer ISE

Figure 5-22: SEA collector 2.3 in the solar simulator (test lab) of Fraunhofer ISE

Die konstruktiven Änderungen des SEA-Kollektors 2.3 unterscheiden ihn deutlich von der Konstruktion der Kollektoren SEA 2.1 und SEA 2.2. So führt die Optimierung zu einer Verbesserung bezüglich des Wärmeübergangs und der hydraulischen Durchströmung. Entsprechend konnte die Leistungsfähigkeit des Kollektors nicht nur konstant mit der des SEA-Kollektors 2.2 gehalten, sondern leicht erhöht werden. Ebenfalls ist nun der Absorber weitestgehend vom SE thermisch entkoppelt, was sich vorteilhaft auf einige Stagnationstemperaturen auswirkt. Mehr Details zu den Stagnationstemperaturen aller drei SEA-Kollektoren befinden sich in Kapitel 5.6.

In Folge wurden die Optimierung für den SEA-Kollektor 2.3 erfüllt, da eine Leistungssteigerung erreicht wurde. Die konstruktiven Änderungen sowie die veränderte Profilgeometrie haben sich bewährt. In nachfolgender Tabelle 5-6 sind die wesentlichen Parameter aus der Leistungsmessung des SEA-Kollektors 2.3 zusammengefasst. Hinsichtlich der Erklärung zu den einzelnen Parametern wird auf Kapitel 5.2.3 und 3.1 verwiesen.

Windgeschwindigkeit [m/s]	Massenstrom [kg/h]	η_0 [-]	a_1 [m ² K / W]
3,0	99,6	0,465	6,338
3,0	199,7	0,544	6,998
3,0	399,0	0,635	8,963
3,0	797,9	0,686	12,113

Tabelle 5-6: Ergebnisse der Leistungsmessung des SEA-Kollektors 2.3

Table 5-6: Performance results of the SEA collector 2.3

In der folgenden Abbildung 5-23 sind die Ergebnisse der WKL aller drei SEA-Kollektoren bei der Windgeschwindigkeit von 3 m/s übersichtlich dargestellt. Die roten WKL bilden SEA 2.1, die gelben SEA 2.2 und die blauen SEA 2.3 ab. Je dichter bzw. dicker der Linientyp desto höher der jeweilige Massenstrom. Es ist erkennbar, dass sämtliche WKL von SEA 2.3 über der jeweiligen WKL von SEA 2.2 liegen, also in allen Betriebspunkten höhere Wirkungsgrade als SEA 2.2 aufweisen.

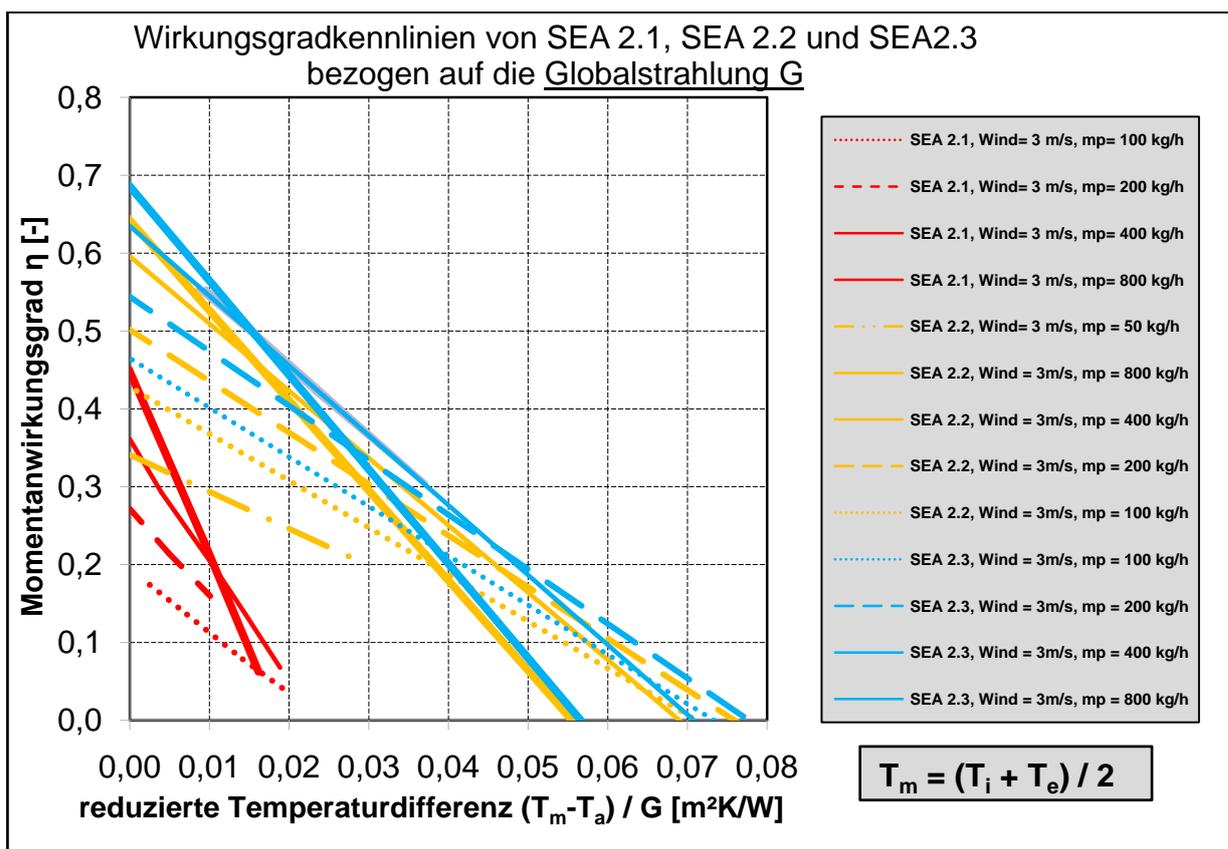


Abbildung 5-23: Darstellung der gemessenen WKL der drei, im Rahmen des Projektes vermessenen SEA-Kollektoren, bei einer Windgeschwindigkeit von 3 m/s. Die Kennlinien sind linear dargestellt. Jede Kennlinie entspricht einem Massenstrom (mp). Insgesamt wurde jeder Kollektor bei vier unterschiedlichen Massenströmen vermessen (100, 200, 400 und 800 kg/h)

Figure 5-23: Depiction of the efficiency curves with a wind speed of 3 m/s of all three SEA collectors measured within the research project. The efficiency curves are linear. Each curve represents a different mass flow (mp). Altogether every collectors has been measured with four different mass flows (100, 200, 400 and 800 kg/h).

Daher liegt auch der Punkt, an dem der jeweilige Kollektor keinen Wirkungsgrad mehr hat ($\eta = 0$, Schnittpunkte mit der x-Achse) bei höheren dT/G -Werten als bei dem SEA-Kollektor 2.2. Mit diesem Kollektor lassen sich demnach auch höhere mittlere Fluidtemperaturen (T_m) und auch höhere Betriebstemperaturen erreichen.

Wie für die beiden vorherigen Messungen wurde für den SEA-Kollektor 2.3 auch eine Berechnung der Jahresbruttoenergieerträge auf Basis der ermittelten Parameter durchgeführt. Erwartungsgemäß spiegelt sich die Erhöhung der Effizienz des SEA-Kollektors auch in diesen wider. So konnte auf Basis der Messdaten zu den Lufttemperaturen und zur effektiven Solarstrahlung aus dem SEA1-Messjahr 2010/2011 eine dynamische Jahressimulation durchgeführt werden. Wie bei den vorherigen beiden SEA-Kollektoren wurde ein Massenstrom von 100 kg/h und eine Windgeschwindigkeit von 3 m/s angenommen, was zu einem Bruttoenergieertrag von 420,7 kWh/m²a bei einer mittleren Kollektorlufttemperatur von ca. 15 °C führt. Wie hier gilt analog zum SEA-Kollektor 2.2, dass ein Abschlag auf Basis kollektorinhärenter Verschattungen und Reflexionsverluste durch die transparente Abdeckung von ca. 10 % veranschlagt werden sollte (siehe dazu Kapitel 5.3.3), was somit zu einem Jahresbruttoenergieertrag von 378,6 kWh/m²a für den Mittelwert aus Südwand und nach Süden geneigtem Dach (15°) führt. Mehr zum Vergleich der Jahresbruttoenergieerträge aller drei SEA-Kollektoren befindet sich in Kapitel 5.5.

Die Tabelle 5-7 fasst erneut die Berechnungen zum Jahresbruttoenergieertrag auf Basis von ScenoCalc und auf Basis der dynamischen Jahressimulation analog zu SEA 2.2 (Tabelle 5-5 in Kapitel 5.3.3) zusammen.

SEA 2.3: Erträge [kWh/m ² a] nach T_m	ca. 15 °C	18 °C	20 °C	22 °C
Jahressimulation SEA 2.3 auf Basis Wetterdaten aus Projekt SEA1	378,6	n/V	n/V	n/V
Standort: Gräfelfing (Raum München), Wettermessdaten aus 2010/2011, WKL: SEA 2.3 mit 100 kg/h, Windgeschwindigkeit 3,0 m/s mit 10% Abschlag (IAM und sonstige Einbußen)				
Messung im Solar Simulator ISE und Simulation mit ScenoCalc auf Basis dreier Werte für T_m	n/V	308	272	241
Standort: Würzburg, Klimadaten: 1996-2005, WKL: SEA 2.3 mit 100kg/h, IAM = 0,95 bei $\theta = 50^\circ$				

Tabelle 5-7: Vergleich der Jahresbruttoenergieerträge auf Basis der ScenoCalc-Berechnungen aus SEA 2.3 und der Projektion aus einer dynamischen Jahressimulation für SEA 2.3 auf Basis der Wetter-Messdaten zu Strahlung und Temperatur aus dem SEA1-Forschungsprojekt

Table 5-7: Comparison of the annual gross energy yields between ScenoCalc calculations based on SEA 2.3 and the projection of a dynamic simulation for SEA 2.3 based on the weather data of measured solar radiation and temperature within the SEA1 research project

Hinsichtlich der Stagnationstemperaturen kann nur von einem Teilerfolg gesprochen werden. Die weitere Optimierung des SEA-Kollektors 2.3 mit noch höheren Wirkungsgraden resultierte verständlicherweise in noch höheren Temperaturen auf dem Absorber, wobei allerdings die thermische Entkopplung dazu führt, dass diese Temperaturen nicht im vollen Maß auf das Sandwichelement übertragen werden. Allerdings ist an Stellen wo die Wellentäler des Absorbers nahe an SE liegen, eine Oberflächentemperatur auf der äußeren Metalldeckschicht des SE gemessen

worden, die zu hoch für eine längere Temperaturbelastung dessen liegt (siehe Kapitel 5.6). Hier müssten im Rahmen einer Produktentwicklung mittels Ingenieursleistungen Lösungen gefunden, welche die Stagnationstemperaturen des SE reduzieren. Dazu wird auch in Kapitel 8.3 ein einfaches Havarie-Konzept vorgestellt.

5.5 Vergleich der Kollektorleistungen Comparison of the collector efficiencies

In diesem Kapitel wird ein Vergleich aller drei vermessenen SEA-Kollektoren zu den Jahresbruttoenergieerträgen übersichtlich dargestellt.

Durch das Fraunhofer ISE wurde ein Excel-Berechnungsprogramm zur Verfügung gestellt, welches mit Hilfe der Kennlinien die jeweiligen Wirkungsgrade, Energieerträge und Austrittslufttemperaturen T_e für die verschiedenen Kennlinien darstellt. Als Referenzfall wird ein zwei Quadratmeter großes Kollektormodul verwendet, also jene Kollektorgröße, welche auch vermessen wurde. Hierfür ist es nun möglich, Wirkungsgrade anzugeben, welche sich einstellen, wenn Umgebungsluft angesaugt wird. Größere Kollektormodullängen können sodann in einem iterativen Verfahren berechnet werden (siehe Kapitel 6.6).

Hier werden nun in Tabelle 5-8 die Wirkungsgrade für den Referenzfall eines 2 m² großen Kollektormoduls angegeben (Bauteilgröße: 2 m hoch, 1 m breit). Diese Werte dürfen nicht mit dem Maximalwirkungsgrad η_0 (Konversionsfaktor) verwechselt werden, da dies der Wirkungsgrad bei einem x-Wert von 0 ist, d. h. einem Null-Wert der reduzierten Temperaturdifferenz $(T_m - T_a)/G$. Da aber hier im Kollektor eine deutliche Erwärmung der Luft bis zu einem gewissen Punkt hin stattfindet, ist auch die mittlere Lufttemperatur größer als die Umgebungstemperatur und damit die reduzierte Temperaturdifferenz $(T_m - T_a)/G$ positiv.

Wirkungsgrad bei 2 m ² -Kollektormodul, Ansaugen Umgebungsluft				
Kollektor und Windeinfluss	Massenströme			
	100 kg/h	200 kg/h	400 kg/h	800 kg/h
SEA 2.1 (Wind = 0,5 m/s)	25,9%	37,0%	48,6%	59,2%
SEA 2.1 (Wind = 1,5 m/s)	21,5%	30,8%	41,4%	51,5%
SEA 2.1 (Wind = 3,0 m/s)	15,1%	22,6%	31,6%	40,6%
SEA 2.2 (Wind = 3,0 m/s)	35,3%	44,9%	55,4%	61,1%
SEA 2.3 (Wind = 3,0 m/s)	38,1%	48,5%	58,9%	65,2%

Tabelle 5-8: Wirkungsgrade für ein 2 m² großes SEA-Kollektormodul, bei dem Umgebungsluft angesaugt wird ($T_i = T_a$) für verschiedene Massenströme und Windeinflüsse (SEA 2.1)

Table 5-8: Efficiency for 2 m²-sized SEA collectors taking in ambience air ($T_i = T_a$) for different mass flows and wind influences (SEA 2.1)

Nachfolgend werden mittels der für die Kollektoren definierten Parameter und den Klima-Messdaten aus dem SEA1-Messjahr 2010/2011 die Jahresbruttoenergieerträge aller SEA-Kollektoren unter den verschiedenen Massenströmen bei einer Windgeschwindigkeit von 3 m/s aufgezeigt. Zur Referenz werden auch die

Erträge des SEA1-Kollektors aus dem gleichnamigen Forschungsprojekt aufgeführt, wobei hier Wind und Massenstrom variabel waren.

Kollektor SEA-Typ Nr.	Luft	Tage	Luft	Wind	Solarenergie	Kollektor-Erträge					
	Masse	p.a.	T _a	v _w	PYR MW	Energie	T _e	ΔT _{Hub}	WG	Energie*	WG*
	kg/h	d/a	°C	m/s	kWh/m ²	kWh/m ²	°C	K	%	kWh/m ²	%
SEA 1	51,7	365	11,4	var	1.103,7	158,3	17,45	6,05	14,3%	158,3	14,3%
SEA 2.1	100,0	365	11,4	3,0	1.103,7	166,3	14,10	2,70	15,1%	158,0	14,3%
SEA 2.1	200,0	365	11,4	3,0	1.103,7	249,7	13,42	2,02	22,6%	237,3	21,5%
SEA 2.1	400,0	365	11,4	3,0	1.103,7	348,3	12,81	1,41	31,5%	330,9	30,0%
SEA 2.1	800,0	365	11,4	3,0	1.103,7	448,5	12,31	0,91	40,6%	426,1	38,6%
SEA 2.2	100,0	365	11,4	3,0	1.103,7	389,9	17,74	6,34	35,3%	350,9	31,8%
SEA 2.2	200,0	365	11,4	3,0	1.103,7	495,8	15,42	4,02	44,9%	446,3	40,4%
SEA 2.2	400,0	365	11,4	3,0	1.103,7	611,3	13,88	2,48	55,3%	550,1	49,8%
SEA 2.2	800,0	365	11,4	3,0	1.103,7	674,1	12,77	1,37	61,0%	606,7	55,0%
SEA 2.3	100,0	365	11,4	3,0	1.103,7	420,7	18,08	6,68	38,1%	378,6	34,3%
SEA 2.3	200,0	365	11,4	3,0	1.103,7	535,8	15,64	4,24	48,5%	482,2	43,7%
SEA 2.3	400,0	365	11,4	3,0	1.103,7	650,3	13,98	2,58	58,9%	585,3	53,0%
SEA 2.3	800,0	365	11,4	3,0	1.103,7	719,5	12,83	1,43	65,1%	647,6	58,7%

Tabelle 5-9: Jahresbruttoerträge, Wirkungsgrade und Austritts-Lufttemperaturen der SEA-Kollektoren 1 (gemessen), 2.1, 2.2 und 2.3 (projiziert) auf Basis der Daten des SEA1-Messjahres 2010/2011

Table 5-9: Annual gross energy yields, efficiencies and output air temperatures of the SEA collectors 1 (measured), 2.1, 2.2 and 2.3 (projected) based on the data of the SEA 1 observation year 2010/2011

Energie definiert den projizierten, bzw. bei SEA1 den gemessenen Jahresbruttoenergieertrag. **T_e** bildet die mittlere Kollektorluftaustrittstemperatur des ganzen Jahres ab, d.h. von 08:00 Uhr morgens bis 20:00 Uhr abends zu allen Tagen des Jahres, **ΔT_{Hub}** den damit in Verbindung stehenden Temperaturhub zur Umgebungsluft **T_a** und **WG** den erreichten Wirkungsgrad. Die Spalten **Energie*** und **WG*** gehen von dem Energieertrag bzw. Wirkungsgrad aus, welche sich unter Einbeziehung des IAM-Abschlags ergeben – also kollektorinhärenter Verschattungen (SEA 2.1, 2.2 und 2.3) und optischer Reflexionsverluste durch die transparenten Abdeckung (SEA 2.2 und 2.3) usw. Bei SEA1 war hier keine Modifikation notwendig, da es sich bereits um reale Messdaten eines Feldversuches handelte (vgl. auch Kapitel 4.2 und 6.2).

Dies ist in nachfolgender Abbildung 5-24 für einen Massenstrom von 100 kg/h und eine Windgeschwindigkeit von 3 m/s dargestellt. Ausgenommen ist der SEA1-Kollektor, bei dem im Messjahr ein mittlerer Massenstrom von 52 kg/h herrschte sowie variable Windbedingungen anlagen, da der Kollektor kontinuierlich dem Wettereinfluss ausgesetzt war. Die blasser dargestellten Balken beinhalten die zuvor angesprochenen Effizienz- bzw. Energieabschläge.

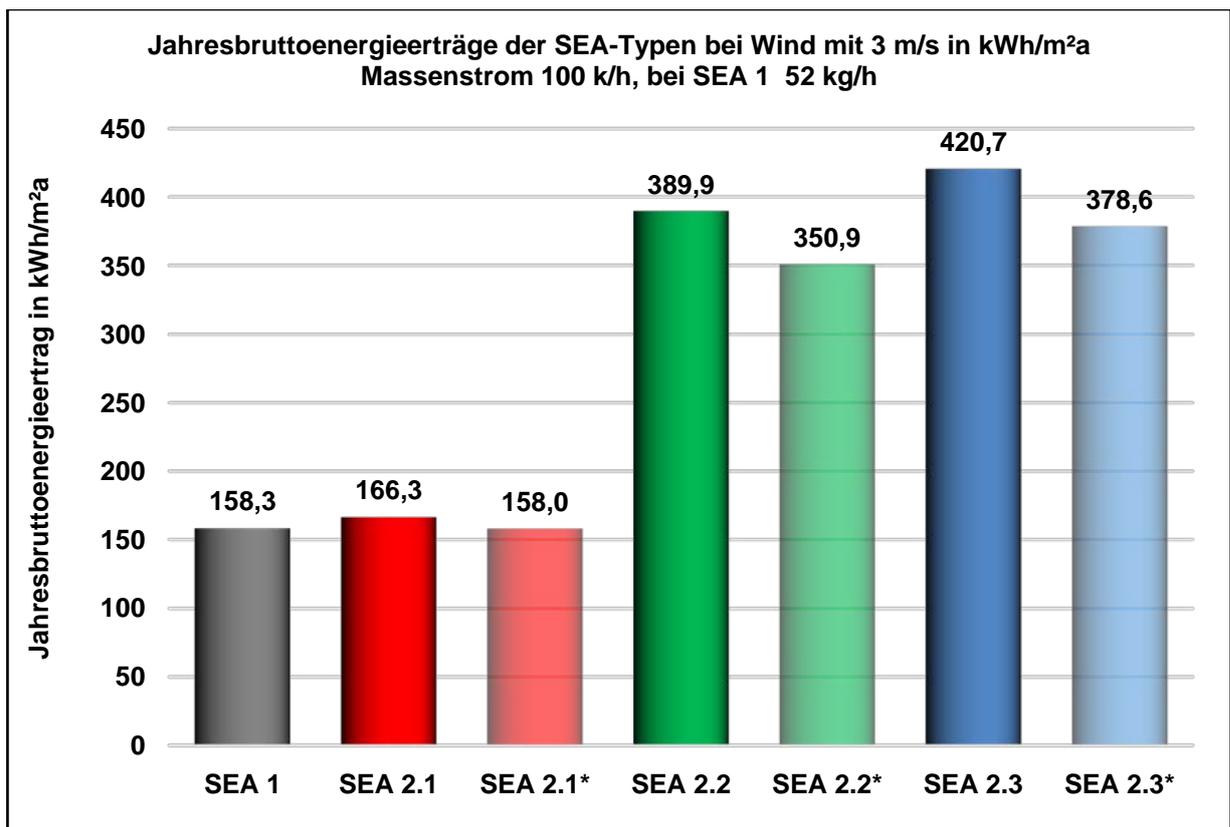


Abbildung 5-24: Jahresbruttoenergieerträge aller SEA-Kollektoren für einen Massenstrom von 100 kg/h und einem Windgeschwindigkeit von 3 m/s. Der Kollektor SEA 1 wurde unter einem mittleren Massenstrom von 52 kg/h und variabler Windgeschwindigkeit betrieben. Die blasseren Balken inkludieren die Effizienzeinbußen auf Basis des IAM und sonstiger wetterbedingter Phänomene.

Figure 5-24: Annual gross energy yields of all SEA collectors for 100 kg/h mass flow and a wind speed of 3 m/s. The SEA 1 collector has been operated under an average mass flow of 52 kg/h and a variable wind speed. The dimmed piles include the efficiency reductions based on IAM and miscellaneous weather-related phenomena.

Die aufgezeigten Jahresenergieerträge pro m² basieren auf einem 2 m langen und 1 m breiten SEA-Kollektormodul, also in den vermessenen Dimensionen. Abhängig vom gewählten Kollektor und Massenstrom ergeben sich jeweilige jährliche Durchschnittstemperaturhübe ($T_e - T_i$). Geht man allerdings von längeren Kollektoren aus, wie dies für Hallenmaße naheliegend ist, ändern sich die Ergebnisse. Wird bspw. eine höhere Kollektorlänge (z.B. 6 – 8 m) angesetzt, eine für eine Hallenfassade realistische Bauteillänge und ein identischer Massenstrom von 100 kg/h, der durch den Kollektor gesaugt wird, reduziert sich die spezifische Kollektorleistung pro m², aber der Temperaturhub erhöht sich. Dieser Veränderungen sind allerdings nicht linear. Nur wenn der *spezifische* Massenstrom, also definiert für den Quadratmeter und nicht für die gesamte Kollektorlänge, konstant gesetzt wird, bleiben auch die Energieerträge und Temperaturhübe konstant. Zum Einfluss der Kollektormodul-längen auf die thermische Kollektorleistung und Temperaturhub siehe Kapitel 3.3.5 und 6.6.

Für ein 2 m langes Kollektormodul ergeben sich bei einer Einstrahlung von 1.000 W/m² die in Abbildung 5-25 angegebenen Temperaturhübe zwischen eintretender und austretender Kollektorluft für verschiedene Massenströme und

Windeinflüsse (SEA 2.1). Bei einer Strahlung von bspw. 500 W/m² würden die Hübe sodann halbiert.

Es zeigt sich, dass insbesondere mit den abgedeckten Kollektoren hohe Temperaturhübe möglich sind, allerdings auch beim SEA-Kollektor 2.1 unter geringerer Windeinwirkung. Ebenfalls ersichtlich ist die nicht-lineare Abhängigkeit zwischen den Temperaturhüben und Massenströmen.

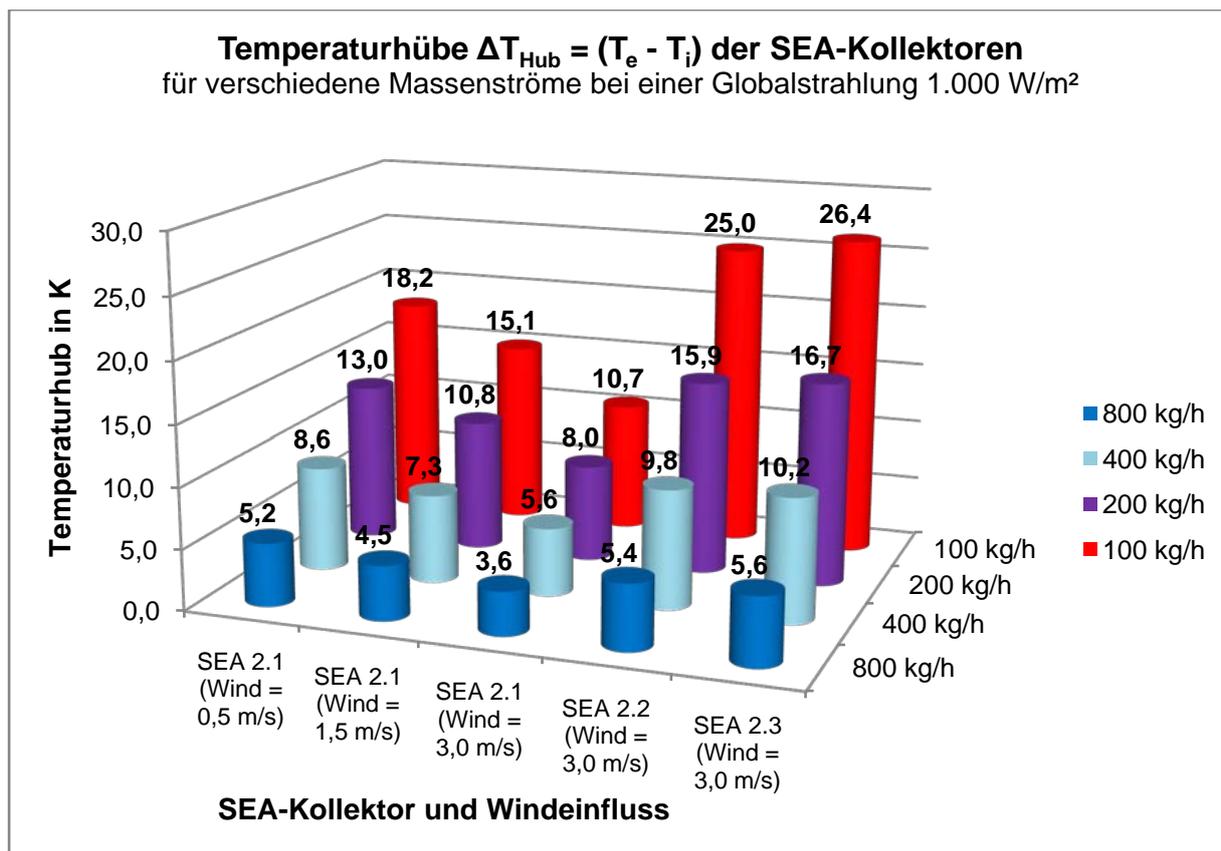


Abbildung 5-25: Projizierte Temperaturhübe zwischen ein- und austretender Kollektorluft für die SEA-Kollektoren zu verschiedenen Massenströmen und Windeinflüssen (SEA 2.1) bei einer Globalstrahlung von 1.000 W/m² und einem 2 m langen Kollektormodul.

Figure 5-25: Projected temperature increase between input and output collector air of the different 2 m long SEA collector modules based on different mass flows and wind settings (SEA 2.1) and a global radiation of 1,000 W/m²

Es zeigt sich, dass insbesondere mit den abgedeckten Kollektoren deutliche Temperaturhübe möglich sind, allerdings auch beim SEA-Kollektor 2.1 unter geringerer Windeinwirkung. Ebenfalls ersichtlich ist die nicht-lineare Abhängigkeit zwischen den Temperaturhüben und Massenströmen.

Die angegebenen Temperaturhübe könnten auf eine jeweilige Außen-, d. h. Eintritts-temperatur T_i der Luft aufaddiert werden, um sodann die Austrittslufttemperatur T_e zu erhalten. Rechnerisch sind die Temperaturhübe unabhängig von der Eintritts-temperatur. Für größere Kollektormodullängen ergeben sich aus den vorher dargelegten Erwägungen höhere Temperaturhübe, sollte der Massenstrom nicht im gleichen Maß vergrößert werden, also der spezifische Massenstrom sinken.

Die Massenstromabhängigkeit der Leistung lässt sich für die drei 2 m² großen SEA-Kollektoren in der Abbildung 5-26 auch für die Jahresbruttoenergieerträge anhand der solaren Strahlung des SEA1-Messjahres 2010/2011 aufzeigen.

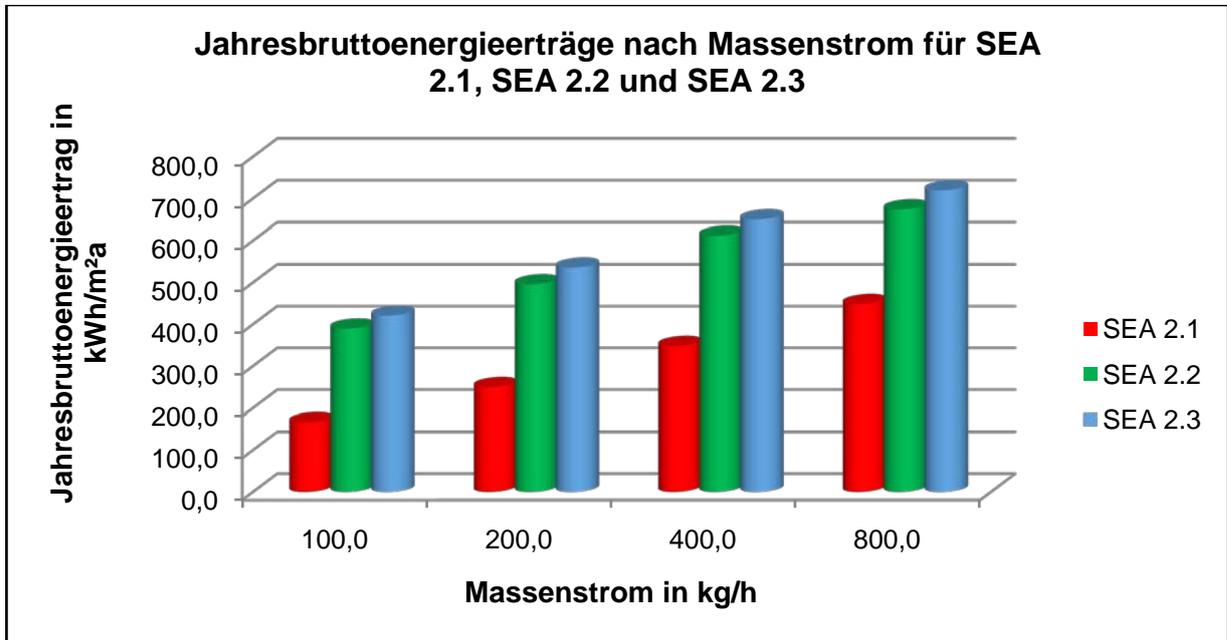


Abbildung 5-26: Jahresbruttoenergieerträge der drei 2 m² großen SEA-Kollektoren bei Massenströmen von 100 bis 800 kg/h und Windgeschwindigkeit 3 m/s zu einer solaren Gesamteinstrahlung von 1,104 kWh/m²a (ohne Abschläge wie IAM etc.).

Figure 5-26: Yearly energy yields of the three 2 m² big SEA types with varying mass flows of 100 kg/h to 800 kg/h and a wind influence of 3 m/s corresponding to a solar radiation of 1,104 kWh/m²a (without efficiency reductions IAM etc.).

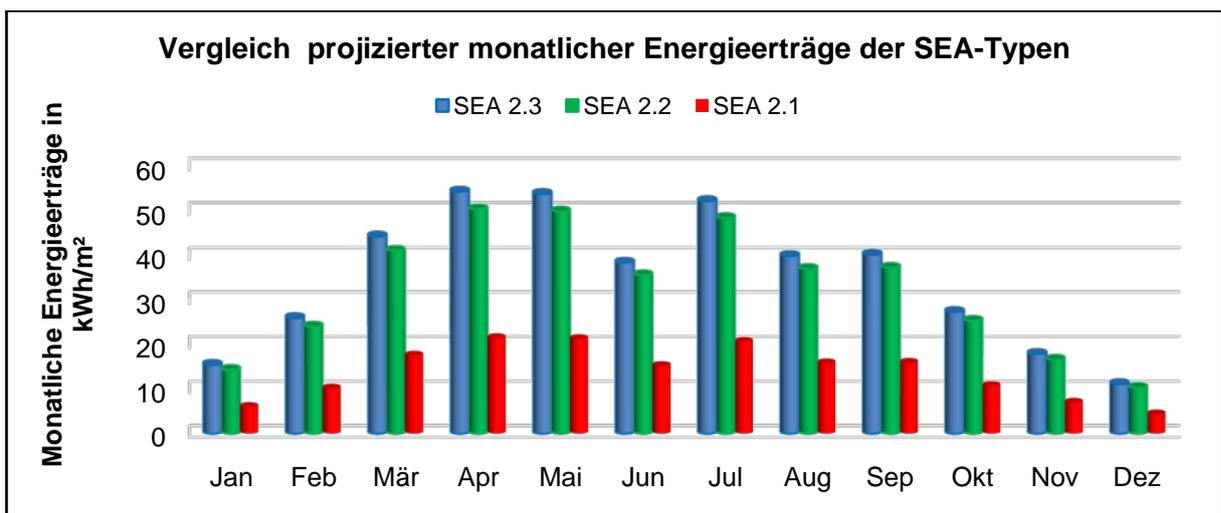


Abbildung 5-27: Vergleich projizierter monatlicher Energieerträge der SEA-Typen SEA 2.1, 2.2 und 2.3 bei einem Windeinfluss von 3 m/s und einem Massenstrom 100 kg/h ohne Abschläge (IAM etc.) auf Basis des SEA1-Messjahres 2010/2011.

Figure 5-27: Comparison of projected monthly energy yields of the three SEA types SEA 2.1, 2.2 and 2.3 with a wind influence of 3 m/s and a mass flow of 100 kg/h without efficiency reductions (IAM etc.) based on the data of the SEA1 observation year 2010/2011.

Um einen Eindruck zur Verteilung binnen eines Jahres zu erhalten, wird anhand Abbildung 5-27 aufgezeigt, wie sich die projizierte Verteilung der Bruttoenergieerträge für die drei SEA-Kollektoren über ein Jahr anhand der Wetter-Messdaten des SEA1-Messjahres darstellt.

Die getätigten Vergleiche zu Wirkungsgraden und Jahresbruttoenergieerträgen unterstreichen die erfolgreiche Optimierung des SEA-Kollektors. Durch die Messungen konnte bestätigt werden, dass die transparente Abdeckung einen erheblichen Einfluss auf den Energieertrag hat und höhere Kollektorlufttemperaturen ermöglicht. Dies zeigt sich Wirkungsgradkennlinien, die über jenen des SEA-Kollektors 2.1 liegen.

Ebenfalls sinkt durch die transparente Abdeckung der Einfluss des Windes (Kapitel 8.1) auf den Kollektorsertrag, weswegen sich ein abgedeckter SEA-Kollektor (SEA 2.2 und 2.3) insbesondere für Orte mit stärkerer Windbelastung (geographisch wie umgebungsabhängig) empfiehlt.

Die im SEA-Kollektor 2.3 erfolgte konstruktive und profilgeometrische Optimierung führte ebenfalls zu einer Effizienzsteigerung sowie zu einer ästhetisch attraktiven Lösung. So ist es im Rahmen der hier geprüften Optimierungsaspekte gelungen, leistungsfähige Kollektoren zu kreieren, die durch die Beibehaltung des SEA-Prinzips aus marktgängigen Bauteilen geschaffen wurden und ihrem Wesen nach als Fassaden oder Dachbauteile für große Flächen geeignet sind. Diese Flächenwirkung kombiniert mit der für einen Luftkollektor nennenswerten Effizienz bietet erhebliche Flächenleistungen für eine Halle. Abhängig vom angesetzten Energie-nutzungskonzept und der dafür notwendigen Leistung, bzw. Temperaturniveau, empfiehlt sich sodann ein zu wählender SEA-Kollektortyp (Kapitel 7).

5.6 Stagnationsmessungen und Stagnationstemperaturen **Stagnation measurements and stagnation temperatures**

Neben der Vermessung der Kollektoren bezüglich der Leistungsfähigkeit, spielt auch die Prüfung der thermischen Belastung auf die Bauelemente eine wichtige Rolle. Eine zu den Qualitätstests gehörende Messung der Zertifizierungsmessung, ist die Bestimmung der Stagnationstemperatur des Kollektors. Durch diesen Hochtemperaturtest werden die höchsten Temperaturen (Stagnationstemperaturen) bestimmt, die entstehen, wenn der Kollektor der Einstrahlung ausgesetzt ist, jedoch keine thermische Leistung abgenommen wird, bspw. wenn die Ventilatoren ausfallen. Dieser Betriebszustand wird Stagnation genannt, die gesamte eingestrahelte Leistung wird in Wärmeverluste gewandelt.

Prinzipiell müssen alle verbauten Komponenten in dem Kollektor auf die maximal auftretenden Temperaturen ausgelegt sein und diesen dauerhaft und ohne bleibende Schäden standhalten. Um dies zu ermitteln, wird der Kollektor einer hohen senkrechten Einstrahlung und Umgebungstemperatur ausgesetzt. An den heißesten Stellen im Kollektor werden zur Erfassung der Temperaturwerte Sensoren eingebaut. Die messtechnisch ermittelten Temperaturen ($T_{\text{abs, Messwert}}$) werden anschließend mit Gleichung 5-1 auf normierte Werte (1000 W/m^2 und eine Umgebungstemperatur T_a von 30 °C) umgerechnet.

$$T_{stag} = 30^{\circ}\text{C} + \frac{1000 \text{ Wm}^{-2}}{G_{\text{Messwert}}} (T_{\text{abs, Messwert}} - T_{\text{a, Messwert}}) \quad \text{in } ^{\circ}\text{C} \quad (5-1)$$

Im Falle der eingesetzten Polyurethan-Hartschäume bzw. Polyurethan-Haftvermittler in den Sandwichelementen sollten dauerhaft keine höheren Temperaturen als 80 – 85 °C auftreten. Detaillierte Angaben zu den maximalen Belastungstemperaturen des PU hängen von der verwendeten Rezeptur ab und die Forschungsstellen verweisen auf die beteiligten Industriepartner. Die angegebenen Werte wurden in den PBA des hier behandelten Forschungsprojekts als sinnvolle Richtwerte von den Industriepartnern angegeben.

5.6.1 SEA 2.1

Der SEA-Kollektor 2.1 wurde zur Bestimmung der Stagnationstemperatur einer Einstrahlung von 958 W/m² und einer Umgebungstemperatur von 30,8 °C ausgesetzt und so lange belastet, bis die Temperaturen stabile Werte erreichten.

Im Falle des SEA-Kollektors 2.1 konnten auf Grund der einfachen Messbarkeit der Absorberoberfläche ganzflächig Messungen der Temperaturen durchgeführt werden. Mit Hilfe eines Infrarot-Temperatursensors wurden die Temperaturen auf dem Absorber an verschiedenen Punkten nach Abbildung 5-28 bestimmt. Diese sind sodann in Tabelle 5-10 zusammengefasst.

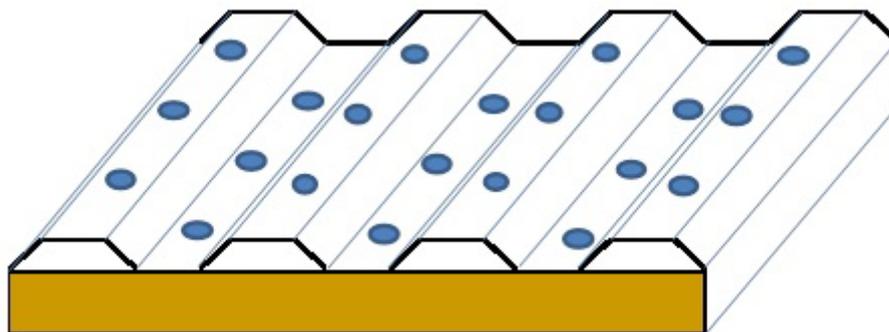


Abbildung 5-28: Positionen der abgenommenen Messwerte der Absorbertemperaturen

Figure 5-28: Positions for the measurements for the absorber temperatures

Höhe	Ober-gurt 1 (links)	Unter-gurt 1	Ober-gurt 2	Unter-gurt 2 (Mitte)	Ober-gurt 3	Unter-gurt 3	Ober-gurt 4 (rechts)
2/3 H	83,8	84,9	86,8	86,1	86,8	83,9	83,3
1/2 H	82,1	82,8	84,8	84,2	85,9	83,8	82,2
1/3 H	76,9	74,8	74,4	74,7	77,2	74,9	75,6

Tabelle 5-10: Darstellung der gemessenen Temperaturwerte in °C auf dem Absorber (Trapezblech) des SEA-Kollektors 2.1

Table 5-10: Measured temperatures in °C of the absorber (trapezoidal sheet) of the SEA collector 2.1

In Tabelle 5-10 sind die Messwerte der Stagnationstemperaturen auf den Ober- und Untergurten des Trapezblechs des SEA-Kollektors 2.1 dargestellt. Der Kollektor wurde hierzu bei 2/3 Höhe, halber Höhe und 1/3 Höhe gemessen. Aus den Einzelmesswerten wurde der Mittelwert von 81,4 °C gebildet, die maximale Temperatur betrug bei der Messung 86,8 °C.

Diese Messung wurde ebenso bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten parallel über den Absorber durchgeführt. Durch die Möglichkeit der Umrechnung der Messwerte auf andere Umgebungstemperatur- und Einstrahlungswerte lassen sich die Messwerte auf andere Einsatzbedingungen und Standorte umrechnen. In Abbildung 5-29 sind die Ergebnisse dargestellt.

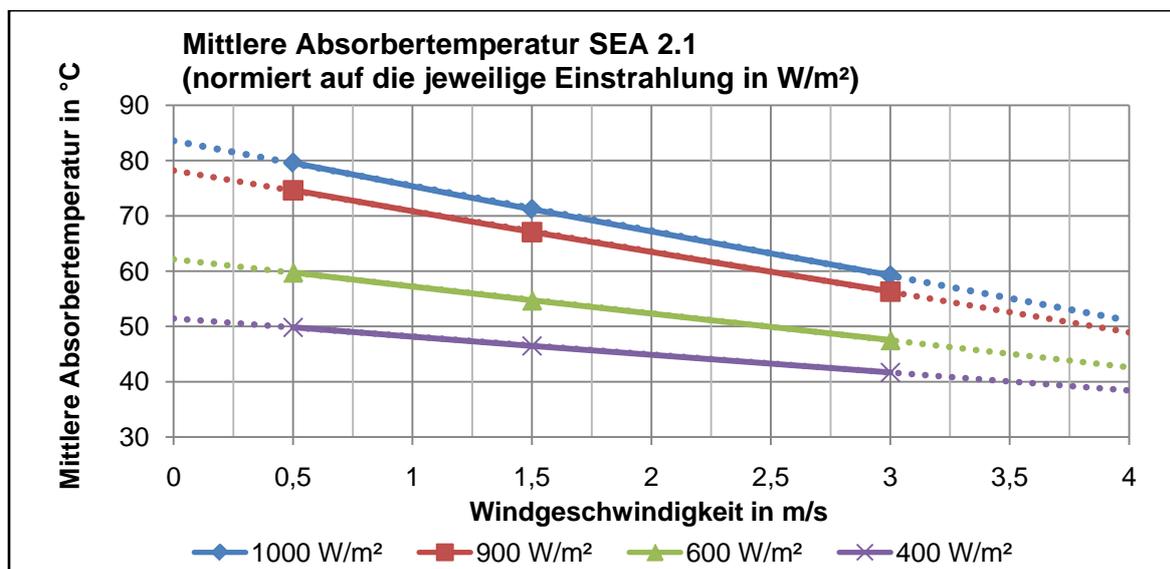


Abbildung 5-29: Abhängigkeit der Stagnationstemperatur (Mittelwerte der gemessenen Absorberrtemperatur) von der Einstrahlung und der Windgeschwindigkeit

Figure 5-29: Dependency of the stagnation temperatures (mean values of the measured absorber temperatures) on different radiation and wind influence

Aus der Abbildung 5-29 wird deutlich, dass sich die hohen Absorberrtemperatur bei Stagnation von über 85 °C je nach Einstrahlung und Windgeschwindigkeit über den Absorber stark ändern. Um eine Aussage über die Eignung des Kollektors in einer realen Anwendung machen zu können, müssen die genauen Einsatzbedingungen bekannt sein und die Laborwerte entsprechend umgerechnet werden.

5.6.2 SEA 2.2

Bei den SEA-Kollektoren mit transparenter Abdeckung (SEA 2.2 und SEA 2.3) kann nicht wie bei dem SEA-Kollektor 2.1 mit einem Infrarot-Temperatursensor gemessen werden, da die Absorberabdeckung als Infrarot-Filter wirkt. Bei diesen Kollektoren mussten lokal Temperatursensoren angebracht werden. Bei dem SEA-Kollektor 2.2 wurden die Sensoren erst nachträglich installiert. Durch das nachträgliche Platzieren der Sensoren konnte nicht immer sichergestellt werden, dass die Sensoren mit dem Kollektor einen guten thermischen Kontakt hatten.

In der folgenden Abbildung 5-30 sind die Positionen des Kollektors markiert, an denen Temperatursensoren zur Messung der Temperaturbelastung verbaut wurden. Auf dem Absorber (Trapezblech) sind zwei Sensoren auf den Obergurten und ein Sensor auf dem mittleren Untergurt platziert (blaue Markierungen).

Die Stagnationstemperaturwerte des SE wurden durch Temperatursensoren erfasst, die durch die Rückwand bis zum äußeren Stahlblech des Sandwichelementes (direkt unter dem Trapezblech) geschoben wurden (rote Markierungen). Dieses Stahlblech stand in direktem Kontakt mit dem Absorber bzw. Luftkanal. Mit diesen Sensoren wurde die thermische Belastung des Sandwichelementes erfasst.

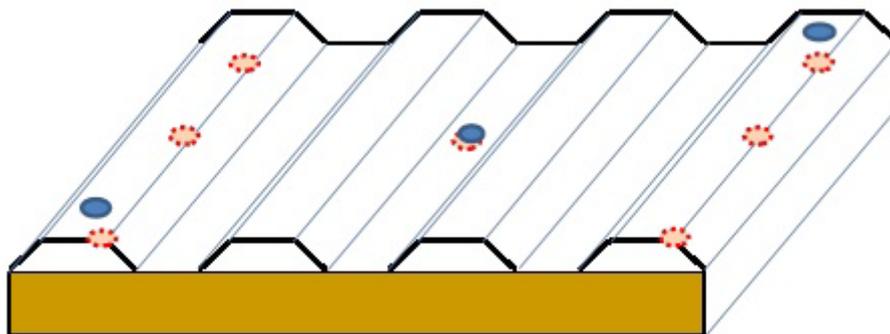


Abbildung 5-30: Darstellung der Positionen der Temperatursensoren des SEA-Kollektors 2.2. Braun dargestellt ist das Sandwichelement, blau die Sensoren auf dem Trapezblech und rot gestrichelt sind die Sensoren dargestellt, die durch die Rückwand durch das Sandwichelement geschoben worden sind und die Temperatur der äußeren Stahlseite des SE unter dem Absorber messen.

Figure 5-30: Positioning of the temperature sensors for the SEA collector 2.2. The sandwich element is depicted in brown, the sensors on the trapezoidal sheet in blue and the sensors plugged through the backside measuring the temperatures of the outer steel sheet of the sandwich element beneath the absorber are depicted in dotted red circles.

In den folgenden Tabellen (Tabelle 5-11 und Tabelle 5-12) sind die Ergebnisse dargestellt. Hierbei handelt es sich um die auf Normbedingungen ($G_{\text{Glob}} = 1000 \text{ W/m}^2$, $T_a = 30 \text{ °C}$) umgerechnete Stagnationstemperaturwerte.

Obergurt 1	Untergurt 2 (Kollektormitte)	Obergurt 4
(Sensor liefert keinen Messwert)		72,05
102,03	122,89	92,94
96,70		90,96

Tabelle 5-11: Stagnationstemperaturwerte in °C des äußeren Stahlblechs (unter dem Trapezblech) des Sandwich-Elements

Table 5-11: Measured temperature values in °C of the outer steel sheet (below the trapezoidal sheet) of the sandwich element during stagnation

Obergurt 1	Untergurt 2 (Kollektormitte)	Obergurt 4
		(82,4) ¹⁾
	119,7	
(81,5) ¹⁾		

Tabelle 5-12: Stagnationstemperaturwerte in °C auf dem Trapezblech (Absorber) gemessen; ¹⁾ Bei diesen Sensoren konnte ein sicherer Kontakt zwischen Sensor und Absorberblech nicht hergestellt werden. Die Sensorwerte sind zu niedrig.

Table 5-12: Measured temperature values in °C of the trapezoidal sheet (absorber) during stagnation; ¹⁾ No reliable contact between these sensors and the absorber sheet could be established and the sensor values are therefore too low.

Aus den beiden Tabellen ist ersichtlich, dass die Temperaturbelastung des Sandwichelements unter Stagnation deutlich oberhalb der maximal zulässigen Werte von 85 °C unter den Standardtestbedingungen ($G_{\text{Glob}} = 1000 \text{ W/m}^2$, $T_a = 30 \text{ °C}$) liegt. Die maximalen Temperaturen liegen etwa 40 K oberhalb der Werte des Kollektors SEA 1.

5.6.3 SEA 2.3

Bei dem SEA 2.3 Kollektor wurden direkt bei dem Kollektorbau die Sensoren mit eingebracht und fixiert. Bei diesem Kollektor sind die Sensoren mit dem Kollektor thermisch sehr gut gekoppelt. Der Kollektor wurde in 3 Bereiche unterteilt, an denen Sensoren verbaut wurden. Die Bereiche sind bei $1/3$, $1/2$ und $2/3$ der Kollektorhöhe. Die Positionen sind in den folgenden Schnittzeichnungen dargestellt. Für diesen Kollektortyp werden die höchsten Temperaturen typischerweise im Bereich $2/3 H$ erreicht. An dieser Stelle sind daher die meisten Sensoren verbaut.

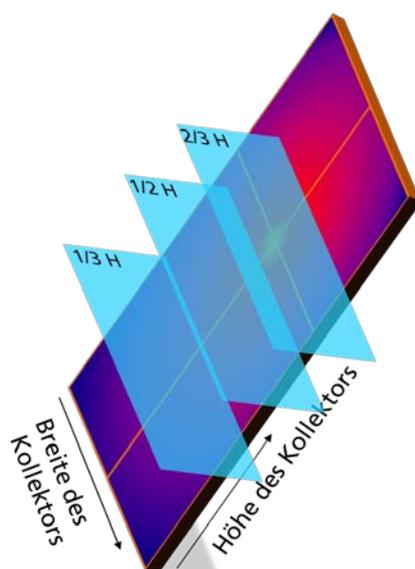


Abbildung 5-31: Darstellung der Positionshöhen im Kollektor an denen Temperatursensoren beim Bau von SEA 2.3 verbaut wurden.

Figure 5-31: Depiction of the positional heights where temperature sensors have been built in during construction of SEA 2.3.

Die Messungen ergaben zu den jeweils angegebenen Positionen der Abbildung 5-32 die in der Tabelle 5-13 angegebenen Stagnationstemperaturwerte in °C.



Abbildung 5-32: Positionen der Temperatursensoren im SEA-Kollektor 2.3 abhängig von der Höhe im Kollektor

Figure 5-32: Position of the temperature sensors in the SEA collector 2.3 depending on the height in the collector

Höhe	Position	Messwert in °C	Normiert in °C ($G = 1000 \text{ W/m}^2$ und $T_a = 30 \text{ °C}$)
2/3	Absorber	128,7	134,1
2/3	Obergurt	125,2	130,5
2/3	Untergurt	122,7	128,0
2/3	Rückseite des Sandwichelementes	36,3	39,1
1/2	Obergurt	119,0	124,1
1/3	Untergurt	104,7	109,5
1/3	Rückseite des Sandwichelementes	35,2	38

Tabelle 5-13: Die gemessenen Stagnationstemperaturwerte in Abhängigkeit zur in Abbildung 5-32 angegebenen Position im SEA-Kollektor 2.3

Table 5-13: Measured temperatures during stagnation corresponding to the positions as given by Figure 5-32 in the SEA collector 2.3

Die weitere Optimierung des SEA-Kollektors hat auch zur Folge, dass sich die Stagnationswerte gegenüber dem SEA-Kollektor 2.2 noch einmal erhöhen. Die weitestgehende thermische Entkoppelung des Absorbers von dem Sandwichelement durch die Befestigungsschrauben hat zur Folge, dass die Absorberrtemperen von 134,1 °C selbst kein unmittelbares Problem mehr für den Kollektor darstellen. Doch liegen die Stagnationstemperaturwerte der äußeren Stahlschicht des SE an den Punkten der geringsten Entfernung zu den Wellentälern des Absorbers mit den gemessenen 130,5 °C noch einmal etwa 8 K höher als die Temperaturen des SEA-

Kollektors 2.2 und würden dauerhaft einwirkend, eine Beschädigung des Sandwichelementes mit sich führen. Daher muss bei den SEA-Kollektoren 2.2 und 2.3 bei einer möglichen Produktentwicklung ein Lösungsansatz für den Stagnationsfall gefunden werden (siehe Havarie-Konzept im Kapitel 8.3).

Die obigen Werte gehen allerdings von einer hohen Strahlungsintensität aus, wie sie in Deutschland de facto für Fassadenelemente nicht und für Dachelemente nur selten im Sommer mittags bei einer Südneigung auftreten können, da nur dann solare Strahlungsintensität und (nahezu) rechtwinklige Einstrahlungswinkel effektive Einstrahlungen von 1000 W/m^2 auf die Flächen ermöglichen.

5.6.4 Ermittlung der in der Fassadenanwendung resultierenden Stagnationstemperaturen **Determining stagnation temperatures for facade application of SEA**

Aus den Stagnationstemperaturmessungen wird deutlich, dass die Grenztemperaturen des Polyurethan (Kerndämmung oder Haftvermittler bei MW-Kerndämmung) im SE deutlich überschritten werden. Klar ist aber auch, dass die Kollektoren eigentlich als Fassaden- bzw. Dachkollektoren verwendet werden sollen, d. h. nicht oder selten in einem rechten Winkel zur Solarstrahlung stehen.

Die unter Laborbedingungen ermittelten Stagnationstemperaturen, welche für Einstrahlungen von 1000 W/m^2 und Umgebungstemperaturen von 30 °C bestimmt wurden, sind exemplarisch für den abgedeckten SEA-Kollektor 2.2 auf reale Fassaden-Bedingungen für einen Referenzstandort umgerechnet worden. Der Referenzstandort wurde auf Würzburg festgelegt. Die Orientierung der Fassade ist gen Süden und die Aufstellung ist mit 90° von der Horizontalen gewählt. Es wurden Einstrahlungs- und Umgebungstemperaturwerte als Stundenwerte für die Wetterdaten mittels METEONORM 7.0 erzeugt [MET17].

In der Abbildung 5-33 sind die erzeugten Stundenwerte der Einstrahlung (**grün**) und Umgebungstemperatur mittels der Gleichung 5-1 zu Stagnationstemperaturwerten des SEA-Kollektors 2.1 als Süd-Fassadenelement (**blau**, rechte y-Achse) umgerechnet worden. Als Vergleich sind noch die Einstrahlungsbedingungen der Globalstrahlung (z.B. bei 2-achsiger Nachführung eines Kollektors, **gelb**) dargestellt. Die aus dieser Berechnung resultierenden Temperaturwerte liegen deutlich niedriger als die sehr hohen Stagnationswerte aus den Labormessungen.

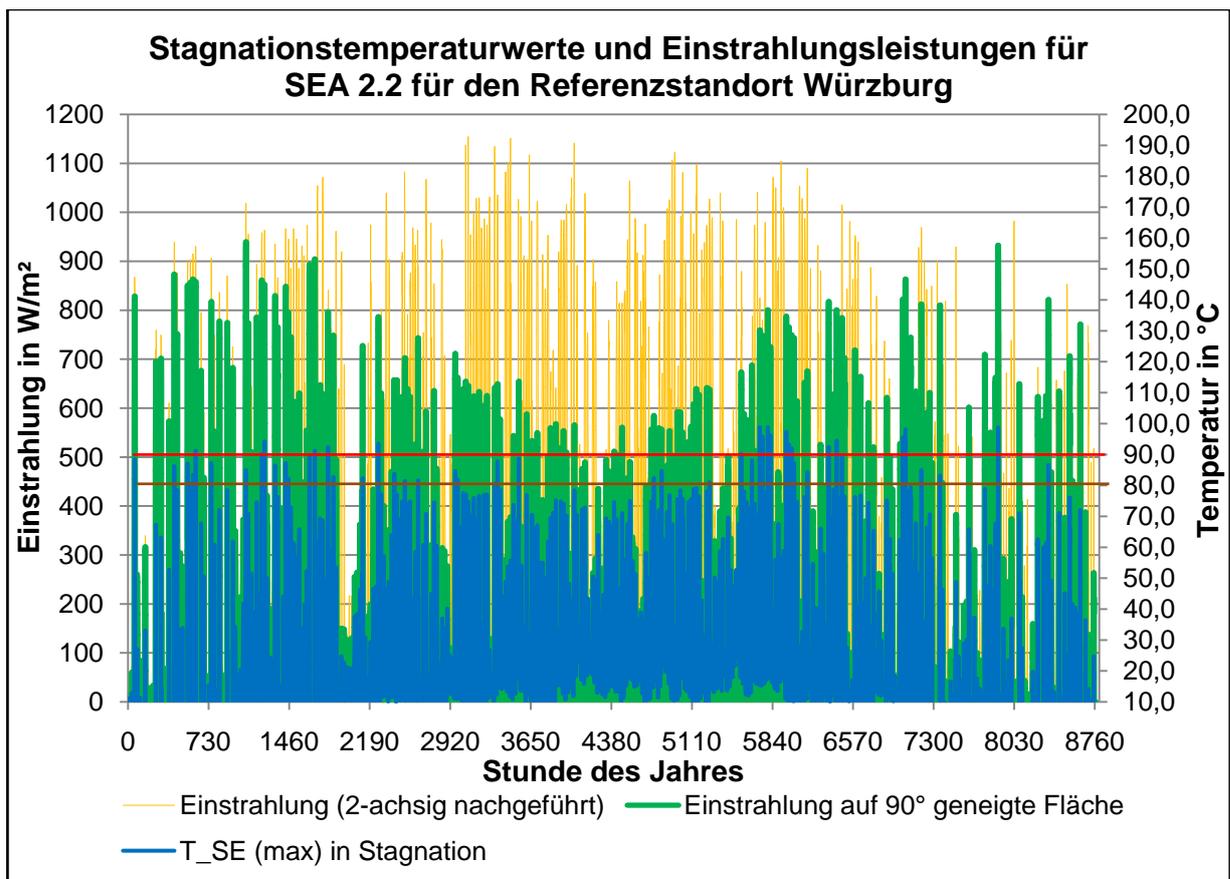


Abbildung 5-33: Berechnung der Stagnationstemperaturwerte (T_{SE} , blau) des SEA-Kollektors 2.2 als Fassade in Stundenwerten für ein Jahr. Gelb dargestellt sind die Globalstrahlungswerte bzw. Einstrahlung auf einen Kollektor, der zweiachsig nachgeführt würde. Grün dargestellt sind die Einstrahlungswerte auf die Südfassade, mittels derer die Stagnationstemperaturen für die jeweilige Umgebungstemperatur für den Referenz-Standort Würzburg berechnet wurde.

Figure 5-33: Calculation of the hourly stagnation temperatures (T_{SE} , blue) for the SEA collector 2.2 as facade element over a one year period. Given in yellow are the global radiation values, i.e. the effective radiation for a collector with dual-axis-tracking of the sun's movement. Green represents the corresponding effective radiation for a southern facade via which the stagnation temperatures are calculated for any given ambience temperature in the reference location Würzburg.

In 98,53 % der gesamten Dauer bleiben die Temperaturen unter 80 °C. Bei 1,47 % der Zeitdauer (90 Stunden) liegt die Temperatur über 80 °C (braune horizontale Linie im Diagramm und bei 0,45 % (39 Stunden) ist eine Oberflächentemperatur von über 90 °C berechnet worden (rote horizontale Linie im Diagramm). Die Abbildung 5-34 zeigt die Temperaturverteilung oberhalb von 90 °C auf. Es zeigt sich folglich, dass unter der Berücksichtigung realistischer Einstrahlungswinkel und -werte, die Temperaturbelastung des Sandwichelementes unter Stagnation für den abgedeckten Kollektor SEA 2.2 deutlich geringer ist als bei den Labormessungen, die von einer Einstrahlung im rechten Winkel zum Kollektor ausgeht.

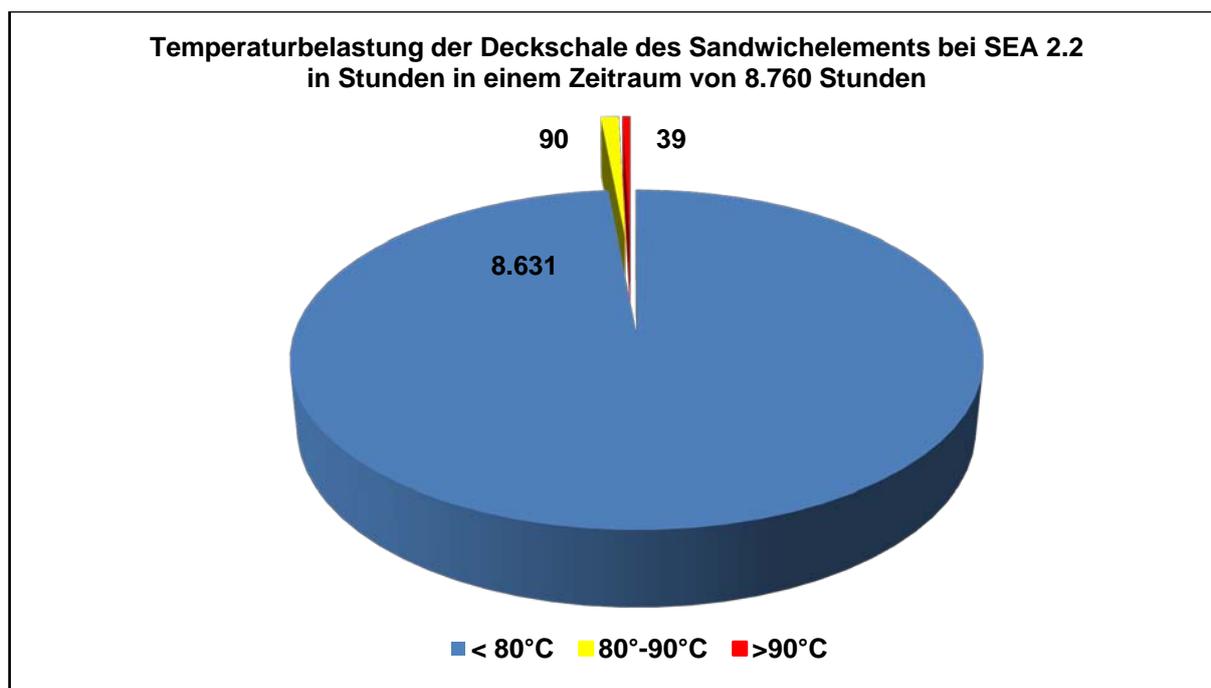


Abbildung 5-34: Anzahl und Verteilung der Stunden im Jahr mit einer Temperaturbelastung von über 80 °C / 90 °C auf der äußeren Metaldeckschicht des Sandwichelementes in einem SEA-Kollektor 2.2 als Süd-Fassadenelement; berechnet für den Referenzstandort Würzburg (basiert auf Abbildung 5-33).

Figure 5-34: Amount and distribution of hours in a year with a temperature load of over 80 °C / 90 °C on the outer metal sheet of the sandwich element of a SEA collector 2.2 used as southern facade element; calculated for the reference location of Würzburg (based on Figure 5-33).

6 Berechnungen und Simulationen Calculations and Simulations

Kurzfassung

Mit Hilfe von Simulationen konnten verschiedene Punkte geklärt werden. So wurden die notwendigen Einstrahlwinkel-Korrekturfaktoren (IAM) für kollektorinhärente Reflexionen und Verschattungen der solaren Einstrahlung durch den Einstrahlungswinkel bestimmt – ein wichtiger Punkt für die Verwendung realer Klimadaten mit den WKL der Kollektoren. Darüber hinaus wurden so optimale Luftkanalhöhen für flache und trapezprofilerte Absorberbleche in Abhängigkeit zu gegebenen Rahmenbedingungen bestimmt. Die Ergebnisse unterstreichen, dass auch filigrane SEA-Kollektorarten mit geringen Kanalhöhen von unter 20 mm thermisch sehr effizient sein können. Der Einfluss verschiedener Absorptionsgrade auf die Wirkungsgradkennlinien der SEA-Kollektoren konnte auch mittels Simulationen bestimmt werden und dieser zeigt sich als eine parallele Verschiebung der WKL.

Abstract

Using simulations a number of aspects could be resolved. So the required correction coefficients for different incidence angles (IAM) due to collector inherent reflections and occlusions of the solar radiation could be determined – an important issue for using climate data with the collector efficiency curves. Likewise optimal air channel heights for flat and trapezoidal absorbers based on given boundary conditions could be approximated within the simulations. The results show that rather flat channels with less than 20 mm height could thermally be very efficient. The influence of different absorption coefficients on the efficiency curves has also been determined by simulations, producing a parallel shift of the efficiency curves.

6.1 Voruntersuchungen Preliminary examinations

Zunächst fand eine Vorauswahl in einem iterativen, gemeinsamen Prozess der beiden Forschungsstellen statt. Dabei flossen einerseits die Erfahrungen sowie Berechnungen des Fraunhofer ISE zu Solarluftkollektoren ein, andererseits die Erfahrungen von ERK bezüglich der Sandwichbauweise, dem Industrie- und Gewerbebau im Allgemeinen und den Interessen von Industriefirmen als potenziellen Herstellern und Anwendern.

Der Verbraucher bevorzugt ein bestimmtes Temperaturniveau beziehungsweise einen bestimmten Temperaturhub, welches der Energiewandler im System bereitstellen sollte. Um einen gewünschten Temperaturhub zu erreichen, muss die Luft mit entsprechendem Massenstrom durch den Kollektor strömen. Dazu bedarf es

eines angemessenen Strömungsquerschnitts, der eine Strömungsgeschwindigkeit für eine schon hohe thermische Leistung (hohe Wärmeübertragung Absorber zu Luft) bei noch niedrigem Hilfsenergiebedarf ergibt. Dazu wurden Kombinationsmöglichkeiten der marktgängigen Stahlblech- und Sandwichprofile betrachtet und in Abhängigkeit von deren Strömungsquerschnitt in Abbildung 6-1 dargestellt.

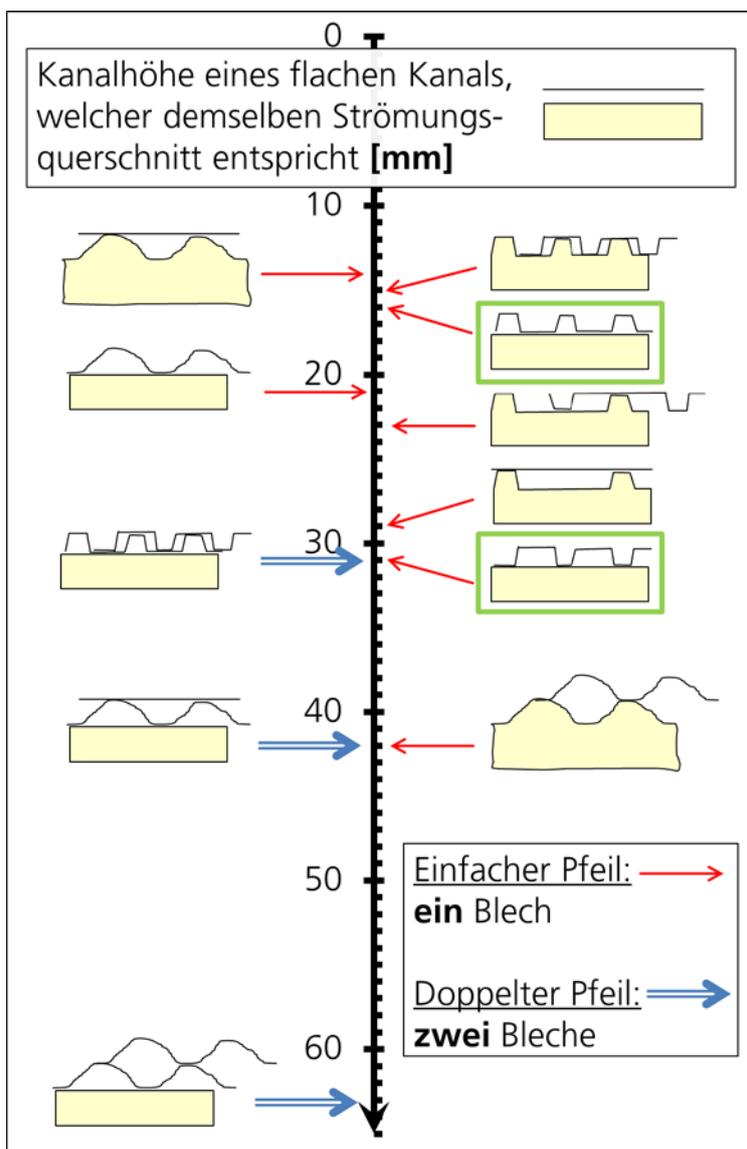


Abbildung 6-1: Auf die Kanalhöhe eines flachen Kanals umgerechnete Strömungsquerschnitte von Kombinationsmöglichkeiten aus Stahlblech- und Sandwichprofilen

Figure 6-1: Cross-sections of possible combinations of steel sheet and sandwich profiles and their respective conversion to channel heights of a flat channel

Um eine bessere praktische Vorstellung von den Strömungsquerschnitten der Kombinationsmöglichkeiten zu erhalten, wurden sie auf die Kanalhöhe eines flachen Absorberkanals mit gleichem Strömungsquerschnitt umgerechnet. Geometrische Einflüsse wie der hydraulische Durchmesser blieben in Abbildung 6-1 zunächst unberücksichtigt.

Mit zwei Stahlprofilen (blaue Pfeile) lassen sich in der Regel größere Strömungsquerschnitte erreichen als mit einem Stahlprofil (rote Pfeile). Hauptsächlich sagt die Grafik aus, dass mit den gegebenen Materialien ein breites Spektrum an Strömungsquerschnitten erreicht werden kann, welches von 14 mm bis 63 mm der Höhe eines flachen Kanals reicht. Wenn die Untersuchungen durch Wahl einer Anwendung und Festlegung weiterer Randbedingungen fortgeschritten sind, können passende Profil-Sandwich-Kombinationen gewählt werden.

Es wurden außerdem Simulationen flacher Absorber (Luftspalt zwischen Absorber und Sandwichelement) durchgeführt (siehe Kapitel 6.3).

Nach diesen Vorgesprächen und Voruntersuchungen wurden von den Forschungsstellen schließlich folgende grundsätzlichen Bauarten als vielversprechend eingeschätzt:

1. Sehr guter abgedeckter Kollektor

Der Kollektor SEA 2.1 (Nachbau von SEA1) sollte mit einer transparenten Abdeckung versehen werden, um den bekannten und zu erwartenden deutlichen Effekt auf die thermische Effizienz quantitativ durch Messungen nachweisen zu können. Dieser Kollektor sollte die Bezeichnung SEA 2.2 bekommen.

2. Filigraner Kollektor mit geringer Bauhöhe

Mittels Simulationen konnten verschiedene Kollektorvarianten mit flachen Absorbern simuliert werden.

3. Ästhetisch ansprechender, abgedeckter Kollektor mit weiterer energetischer Optimierung und Temperaturentlastung des Sandwichelementes

Gegenüber SEA 2.2 sollte eine Variante untersucht werden, bei der das Trapezprofil durch ein Wellprofil ersetzt wird. Durch diese Maßnahme entfallen auch die Untergurte. Die Solarstrahlung wird somit nur vom Wellprofil absorbiert und sodann thermisch der gesamten Breite nach an die dahinter strömende Luft übertragen, wodurch gegenüber den Trapezprofilen, deren Untergurte direkt mit dem Sandwichelement verbunden sind, geringere Wärmewiderstände im Transfer der thermischen Energie zur Luft zu überwinden sind. Zudem ist der Absorber so thermisch nicht leitend mit dem Sandwichelement verbunden, was eine Temperaturentlastung unter Stagnation möglich machen sollte. Dieser Kollektor sollte die Bezeichnung SEA 2.3 bekommen.

4. Konstruktiv einfacher Kollektor

Trotz seiner Limitationen in maximaler Betriebstemperatur und Windsensitivität ist der SEA-Kollektor 2.1 ein konstruktiv einfacher Lösungsansatz für Anwendungsfälle, in denen keine großen Temperaturhübe benötigt oder geringere Windwirkung vorausgesetzt wird.

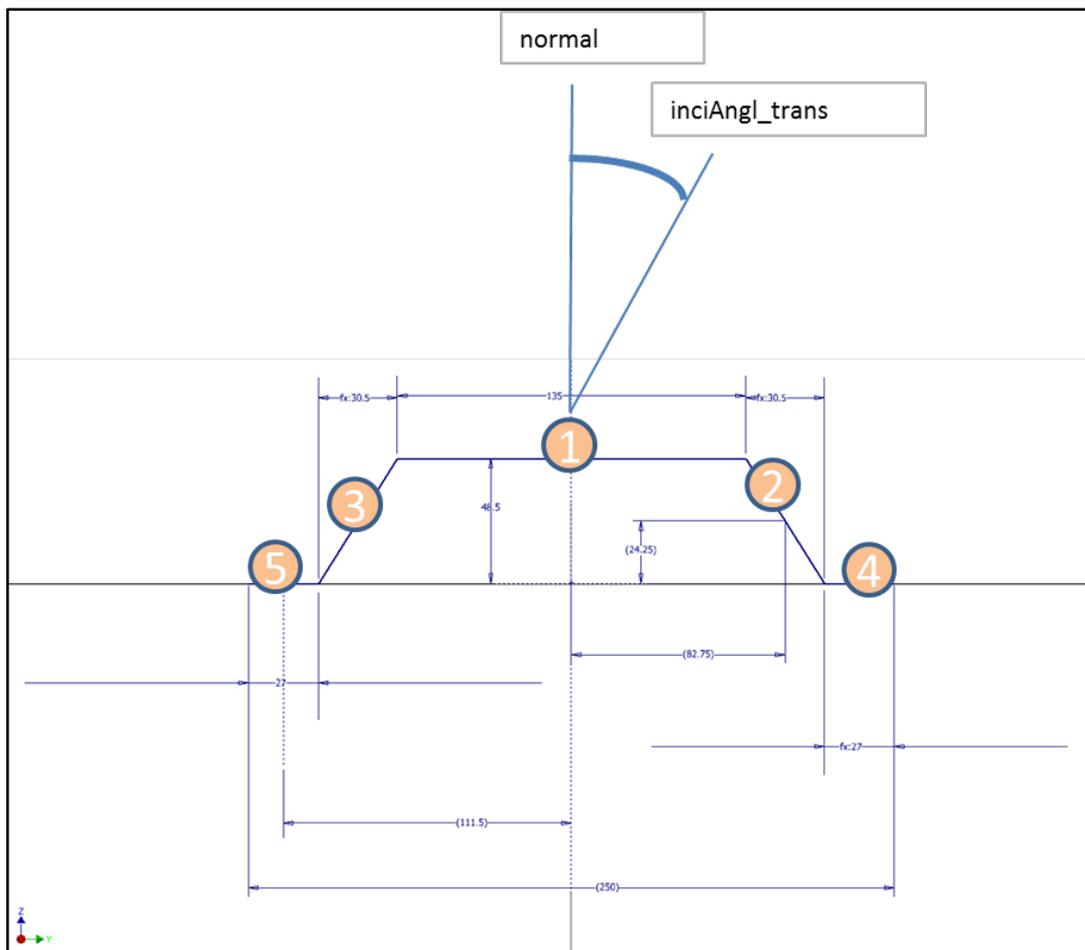
In den folgenden Kapiteln werden die zur Untersuchung und Auslegung der oben genannten Kollektoren durchgeführten Simulationen näher erläutert und der Einfluss der Kollektormodullänge, d. h. größerer und im Hallenbau üblicher Bauteillängen exemplarisch dargestellt.

6.2 Simulationen und Berechnungen für SEA 2.1 und SEA 2.2 Simulations and calculations for SEA 2.1 and SEA 2.2

Zur Untersuchung und Weiterentwicklung von SEA 2.1 und SEA 2.2 wurden Modelica-Modelle erstellt, optische Simulationen zur Ermittlung des IAM sowie eine Reihe von FEM-Simulationen (Finite-Elemente-Simulationen) für thermische und strömungsmechanische Berechnungen durchgeführt (siehe Kapitel 4.2).

Sowohl SEA 2.1 als auch SEA 2.2 basieren auf Trapezprofilen. In Kapitel 4.2 wurde bereits auf die Bedeutung des Einstrahlwinkel-Korrekturfaktors IAM hingewiesen. Dieser wurde für ein Trapezprofil mit Hilfe optischer Simulationen ermittelt.

Die Teilflächen eines Trapezprofils sind gegenüber der Sonne unterschiedlich ausgerichtet, daher weist jede einen eigenen IAM-Verlauf auf (Abbildung 6-2). Abbildung 6-3 zeigt die resultierenden Leistungsdichten auf dem abgewinkelten Absorber über dem transversalen Einfallswinkel aufgetragen.



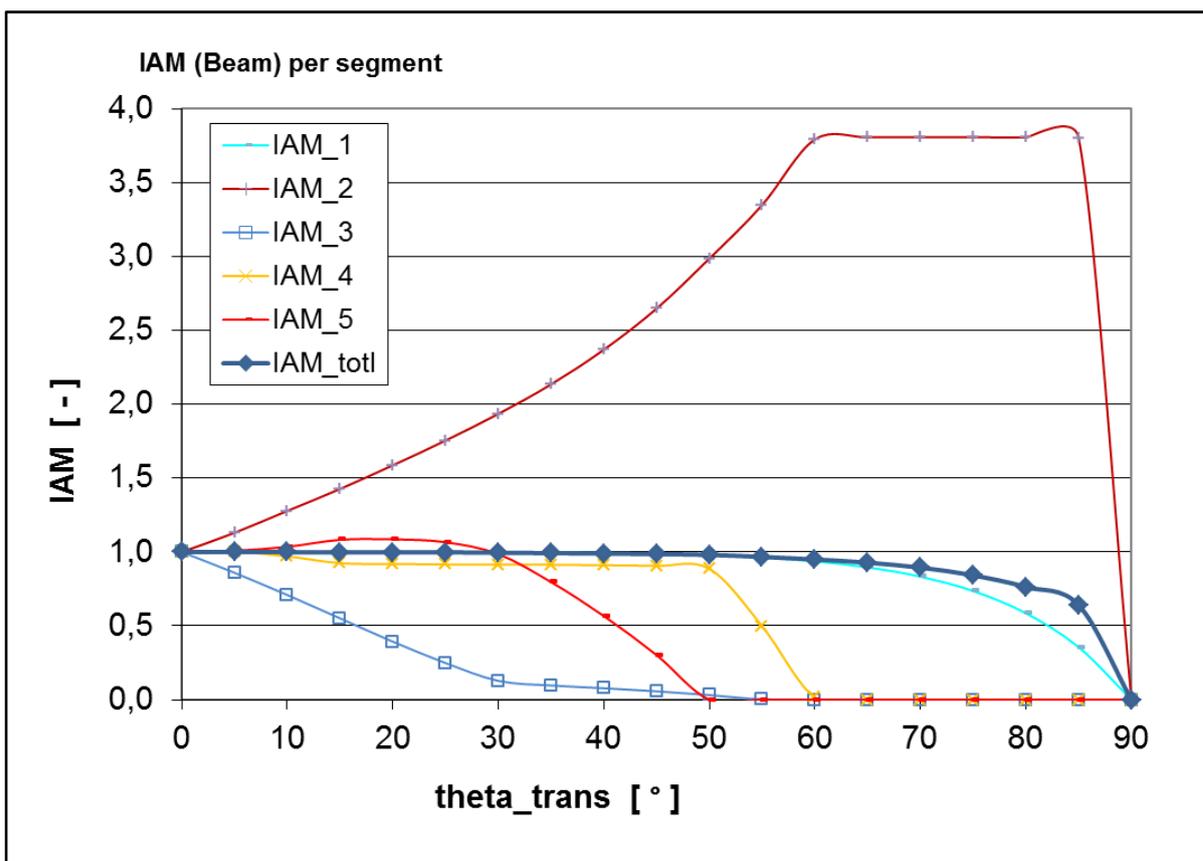


Abbildung 6-2: Teilflächen eines Trapezprofils (oben) und zugehörige IAM-Verläufe (unten)
Figure 6-2: Partial areas of a trapezoidal profile (top) and corresponding IAM curves (bottom)

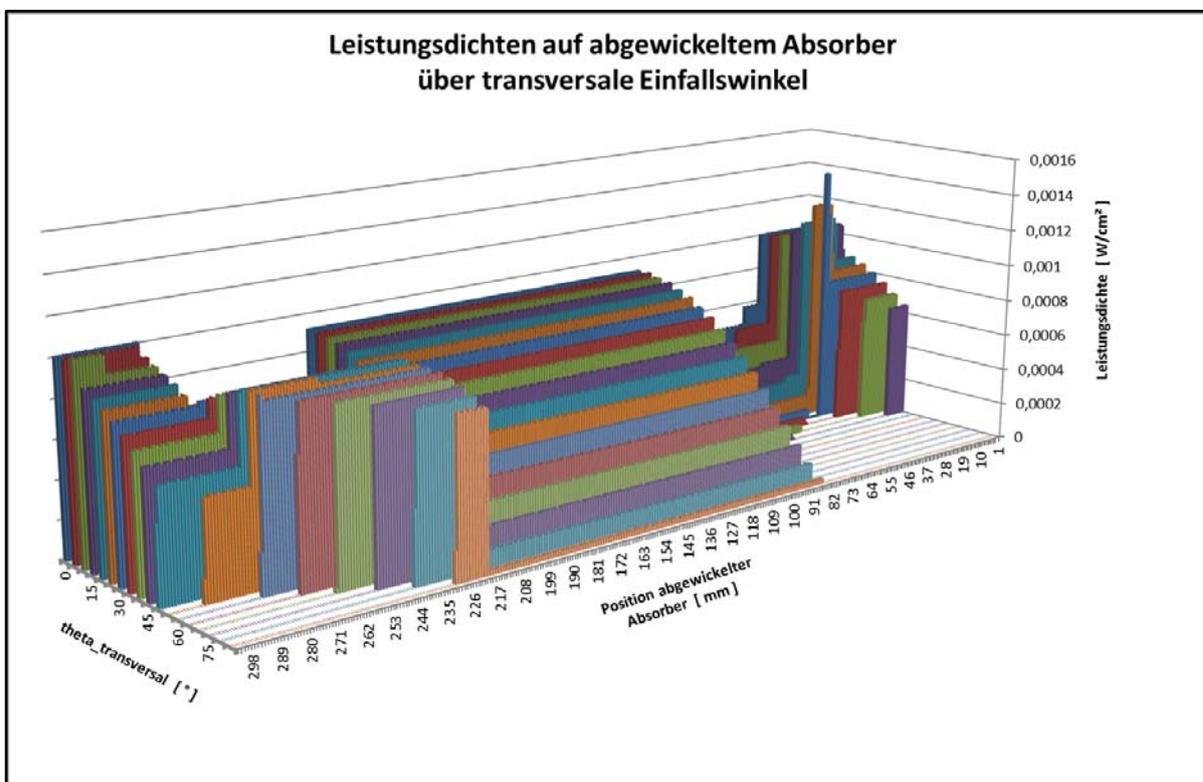


Abbildung 6-3: Leistungsdichten auf abgewickeltem Absorber über transversale Einfallswinkel
Figure 6-3: Power densities on uncoiled absorber over transversal incidence angle

Eine Massiv- oder Doppelstegplatte aus Polycarbonat beeinflusst den IAM ebenfalls; auch dazu wurden Simulationen durchgeführt, um den Einfluss der Polycarbonat-Platte auf den IAM festzustellen (Abbildung 6-4).

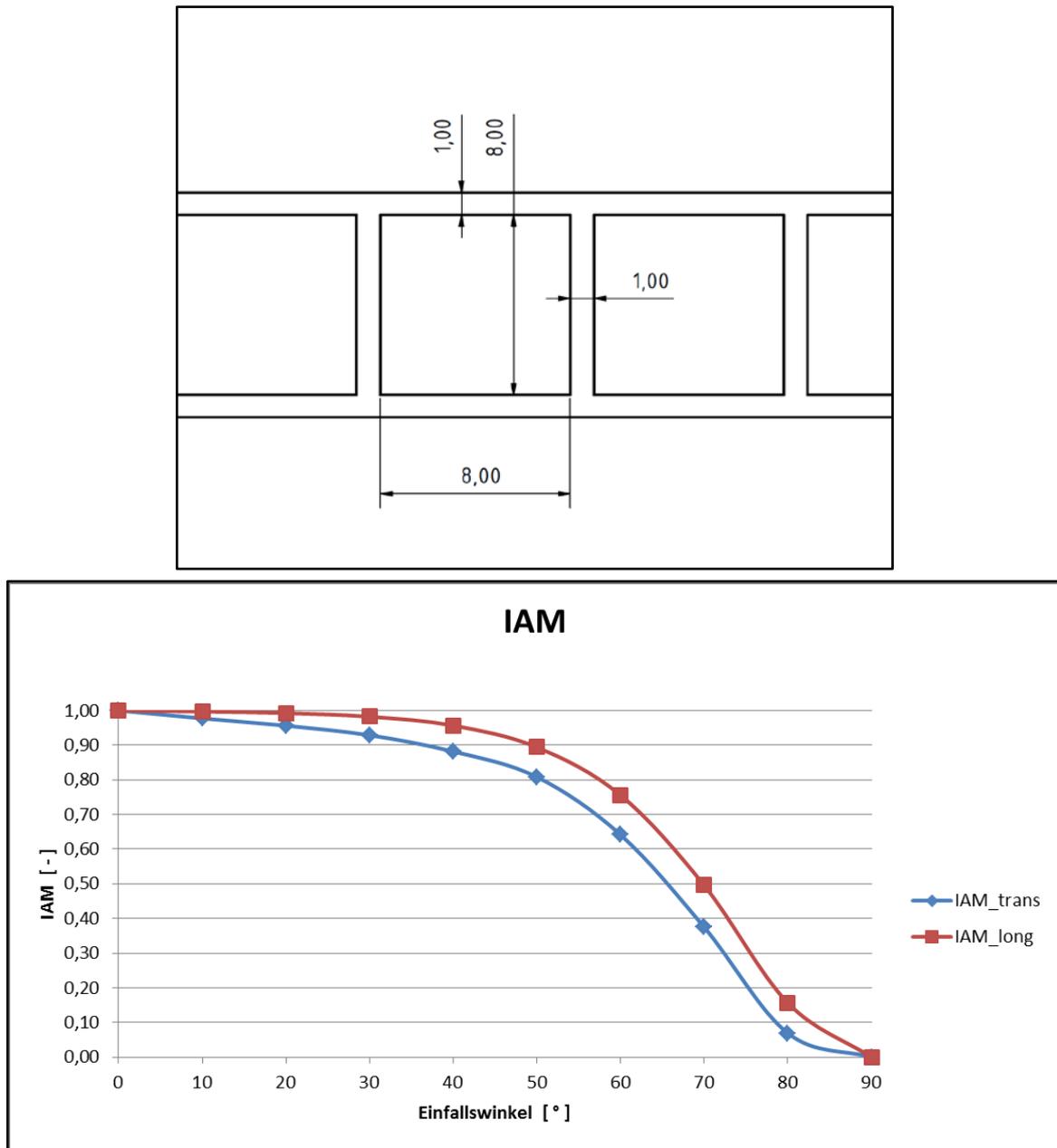


Abbildung 6-4: Querschnitt einer Doppelstegplatte aus Polycarbonat mit Angaben in mm (oben) und deren transversaler sowie longitudinaler IAM (unten)

Figure 6-4: Cross-section of a polycarbonate double-skin sheet with data in mm (top) and the corresponding transversal as well as longitudinal IAM (bottom)

Abbildung 6-5 zeigt ein thermisch-optisches Knotenmodell, das in Modelica realisiert wurde. Um mit einem solchen Modell SEA-Kollektoren mit Trapezprofilen abbilden zu können, müssten insbesondere die Wärmeübergangskoeffizienten an den unterschiedlich orientierten Oberflächen bekannt sein. Diese hängen jedoch von den

lokalen Strömungsgeschwindigkeiten und Temperaturen ab, weshalb für weitere Untersuchungen FEM-Simulationen durchgeführt wurden.

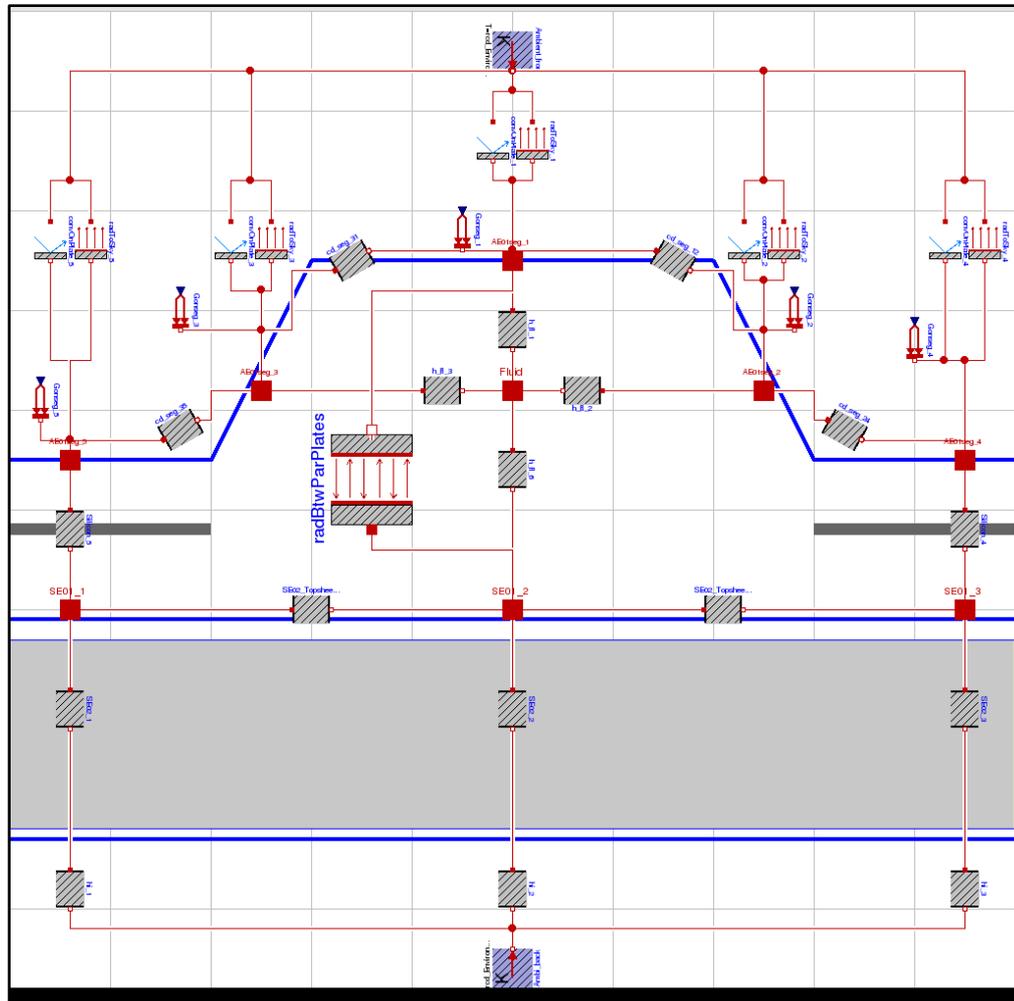


Abbildung 6-5: Modelica-Modell eines SEA-Kollektors 2.1/2.2 mit Trapezprofil

Figure 6-5: Modelica model of a SEA collector 2.1/2.2 with trapezoidal profile

Abbildung 6-6 zeigt das Strömungsprofil in einem Trapezprofil bei einer Eintrittsgeschwindigkeit von 4 m/s (entspricht einem Massenstrom von 540 kg/h); es ist zu erkennen, dass die Strömungsgeschwindigkeit in den Ecken rechts und links unten sehr gering ist. Für die Simulationen wurde das Profil AE 01 angenommen; die Eintritts- sowie die Außentemperatur wurden mit 20 °C angenommen, die Windgeschwindigkeit auf der Kollektoroberfläche mit 0,5 m/s.

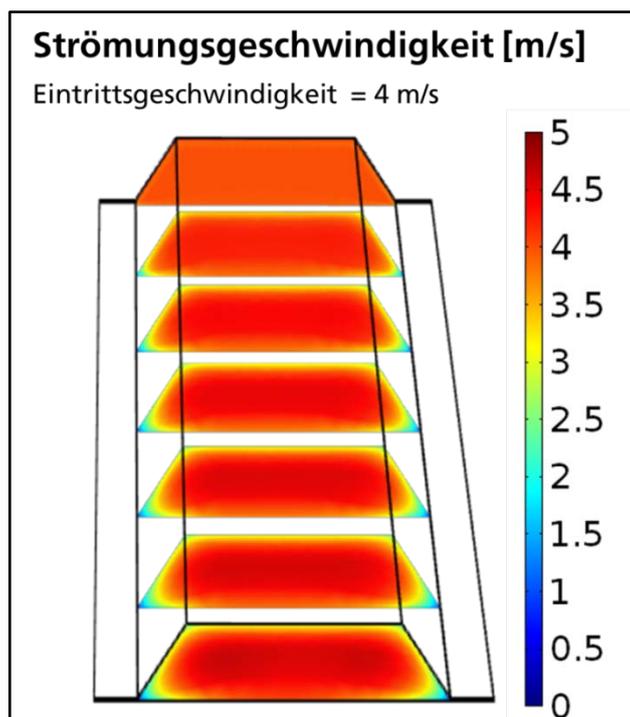


Abbildung 6-6: Strömungsgeschwindigkeiten im Trapezprofil

Figure 6-6: Flow velocities within the trapezoidal profile

Abbildung 6-7 zeigt die Temperaturen und Abbildung 6-8 die Wärmeleistungen im Trapezprofil bei einer Eintrittsgeschwindigkeit von 0,5 bzw. 4 m/s unter unterschiedlichen Einstrahlwinkeln. Es ist deutlich zu sehen, wie sich die Einstrahlwinkel auf die Asymmetrie der Temperaturen und Wärmeleistungen auswirkt.

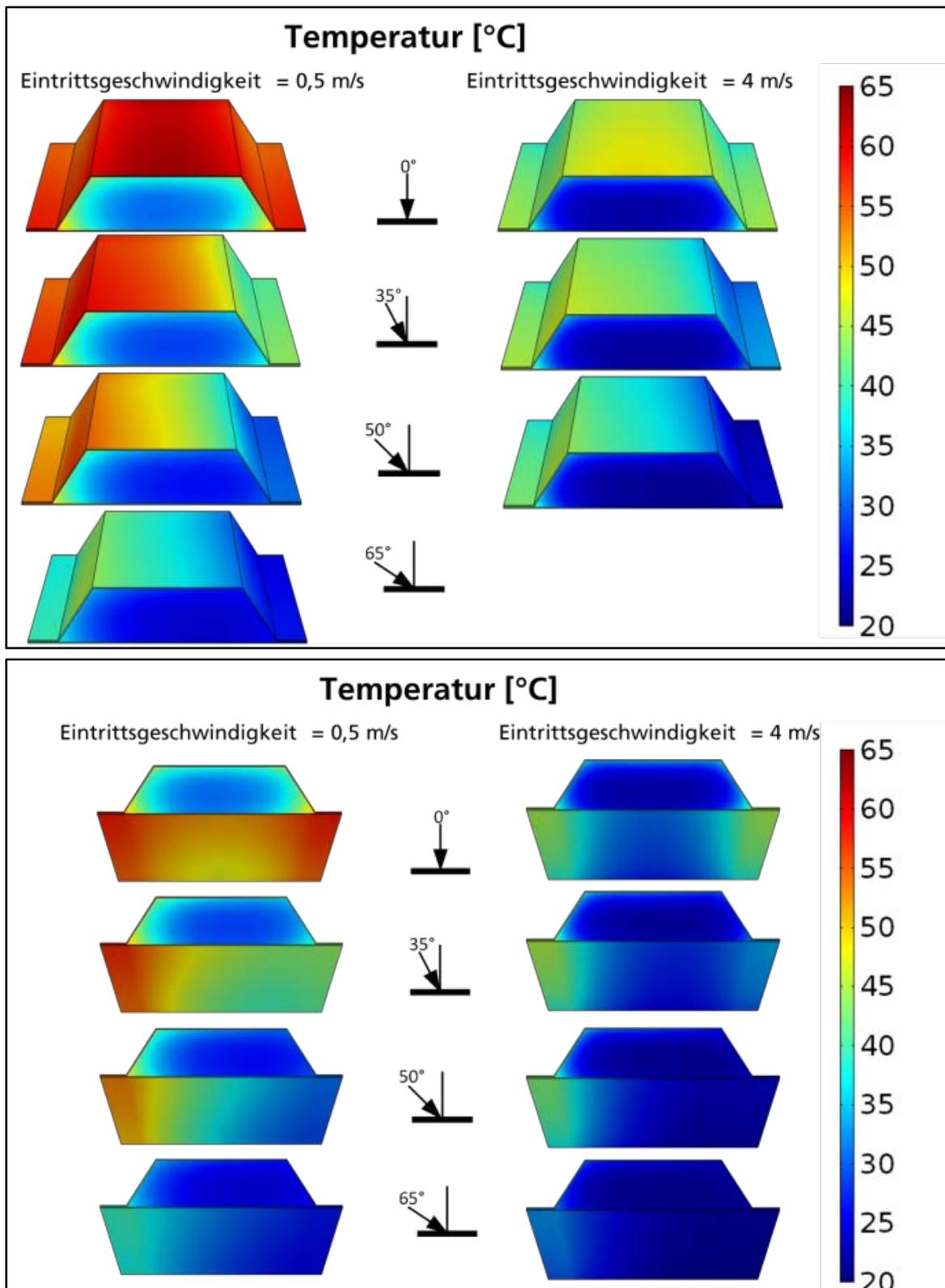


Abbildung 6-7: Temperaturen im Trapezprofil; Bild oben: Ansicht vorne/oben, Bild unten: Ansicht vorne/unten

Figure 6-7: Temperatures within the trapezoidal profile; top figure: frontal-top view, bottom figure: frontal-bottom view

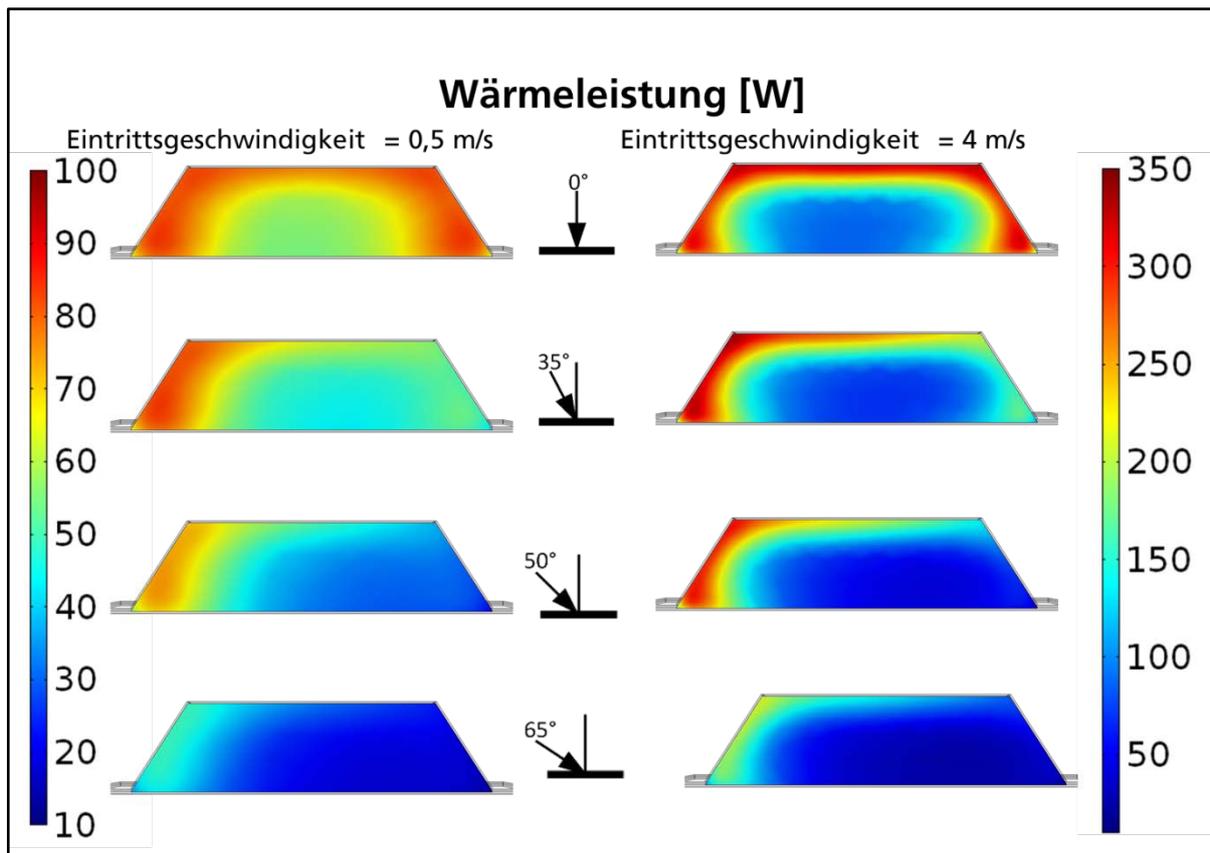


Abbildung 6-8: Wärmeleistungen im Trapezprofil (unterschiedliche Skalen rechts und links)
 Figure 6-8: Thermal power in trapezoidal profile (different scales right and left)

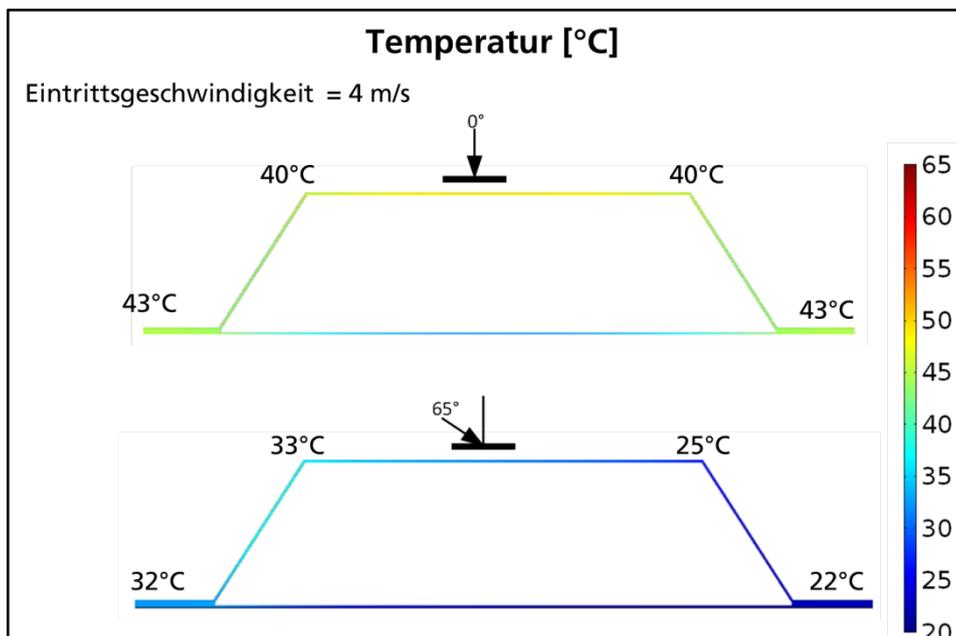


Abbildung 6-9: Temperaturen im Trapezprofil (Stahlblech/Absorber)
 Figure 6-9: Temperatures in trapezoidal profile (steel sheet/absorber)

Weitere FEM-Simulationen von SEA 2.1 und 2.2 wurden schrittweise mit COMSOL durchgeführt: zunächst nur als reine Kanalströmung, dann mit zusätzlicher Wärmeleitung, dann mit zusätzlicher natürlicher Konvektion und schließlich auch mit einem vereinfachten Strahlungsmodell (Abfolge in Abbildung 6-10). Abbildung 6-11 zeigt die den Simulationen zugrundeliegenden Annahmen. Auf Basis der COMSOL-Simulationen wurden Wirkungsgradkennlinien ermittelt und mit jenen, die aus Messungen bestimmt wurden, verglichen (Abbildung 6-12 und Abbildung 6-13). Die Ergebnisse zeigen noch deutliche Abweichungen zwischen den gemessenen und simulierten Kennlinien. Es gibt einen sehr starken Einfluss des Massenstroms. Möglicherweise liegt eine Ursache für die Abweichungen darin, dass die Kanäle des Kollektors bei der Messung ungleichmäßig durchströmt wurden. Insbesondere der Eintrittsbereich wird in der Simulation nicht realistisch abgebildet. Die simulierten Kennlinien zeigen, dass die thermischen Verluste offenbar gegenüber der Realität unterschätzt werden (flachere Kennlinie). Andererseits liegt der simulierte Konversionsfaktor η_0 teilweise auch unter den Messwerten. Unter der Annahme, dass der Transmissionsgrad der transparenten Abdeckung sowie der Absorptionsgrad des Absorbers in der Simulation korrekt angenommen wurden, bedeutet dies, dass sich in der Simulation ein geringerer Kollektorwirkungsgradfaktor F' als in der Realität ergeben hat. Da geringere thermische Verluste, d. h. ein höherer thermischer Widerstand zwischen Absorber und Umgebung, den Wert für F' jedoch bei sonst gleichen Bedingungen erhöhen müsste, scheint der thermische Widerstand vom Absorber zum Fluid überschätzt worden zu sein (vgl. Abbildung 4-1). Der Wärmeübergang war in der Realität vermutlich höher als in der Simulation. Dies könnte ggf. damit erklärt werden, dass aufgrund der Einströmbedingungen – z. B. durch Strömungsumlenkungen – zusätzliche Turbulenzen entstehen, die den Wärmeübergang erhöhen.

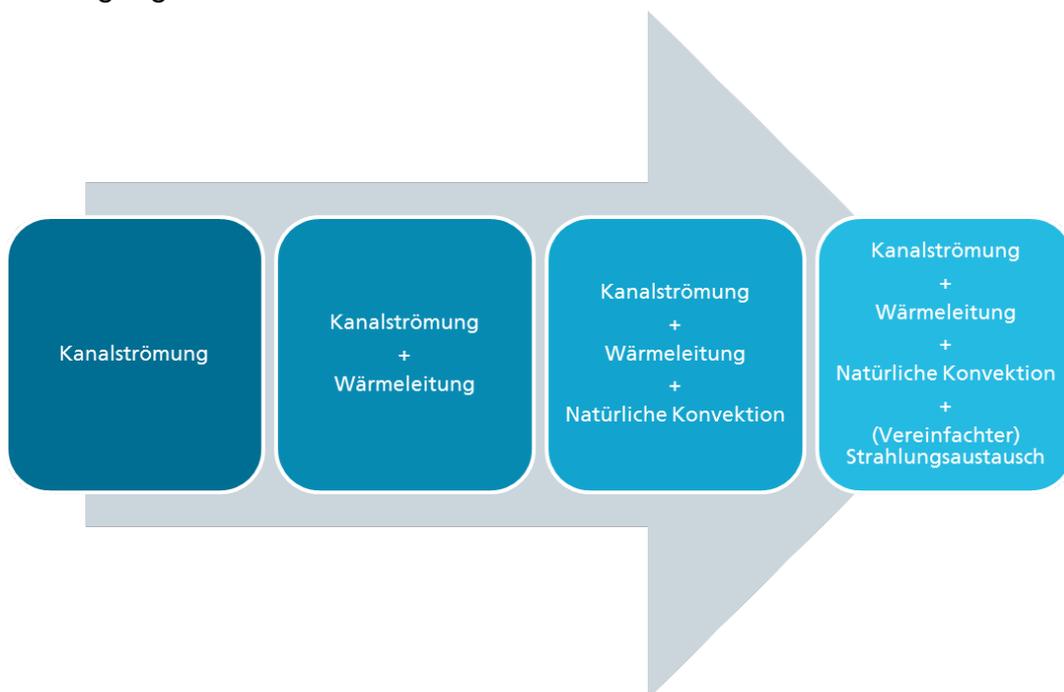


Abbildung 6-10: Schrittweises Vorgehen bei den FEM-Simulationen

Figure 6-10: Stepwise FEM simulation approach

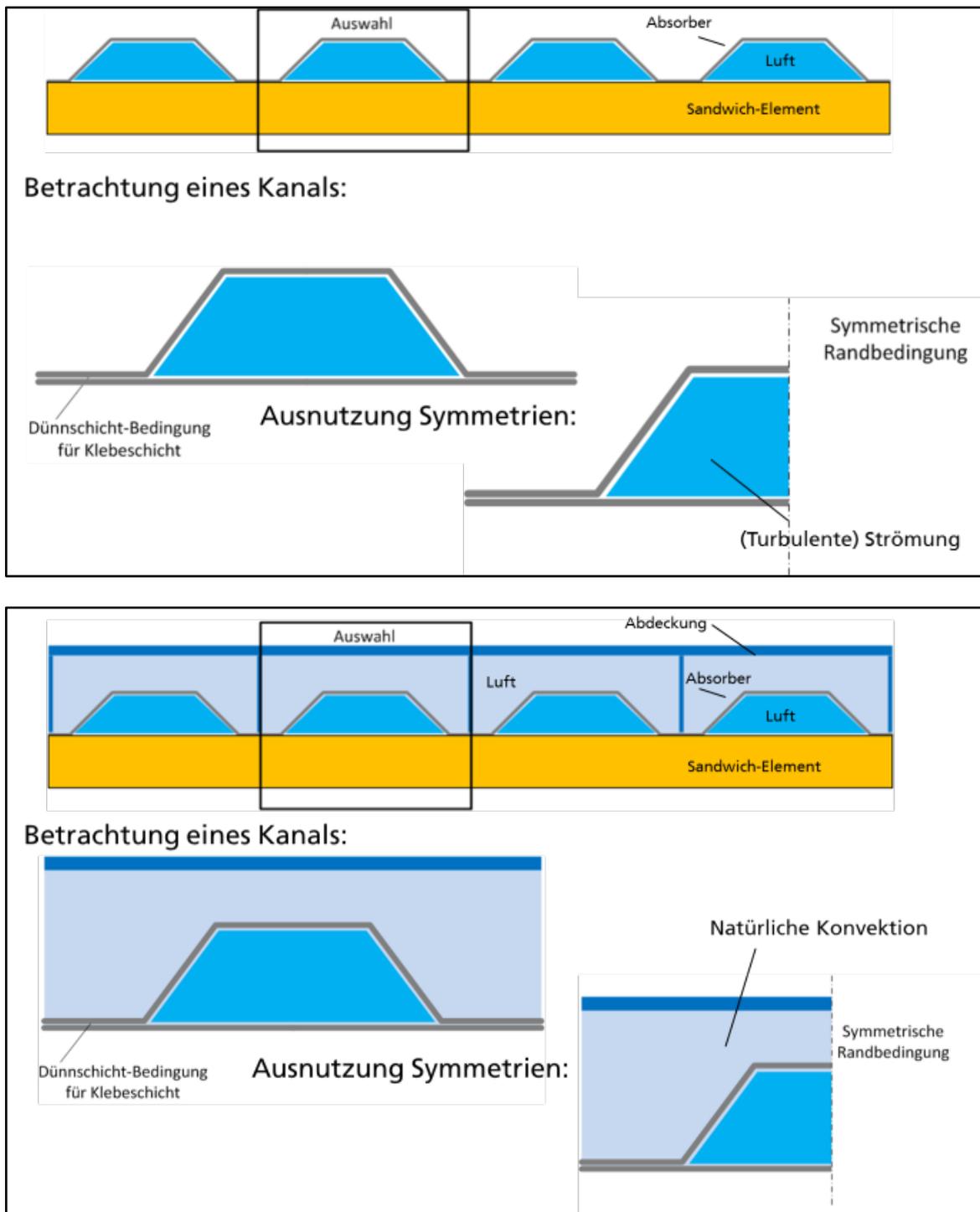


Abbildung 6-11: Annahmen für die FEM-Simulationen von SEA 2.1 (oben) und SEA 2.2 (unten)

Figure 6-11: Assumptions for the FEM simulations of SEA 2.1 (top) and SEA 2.2 (bottom)

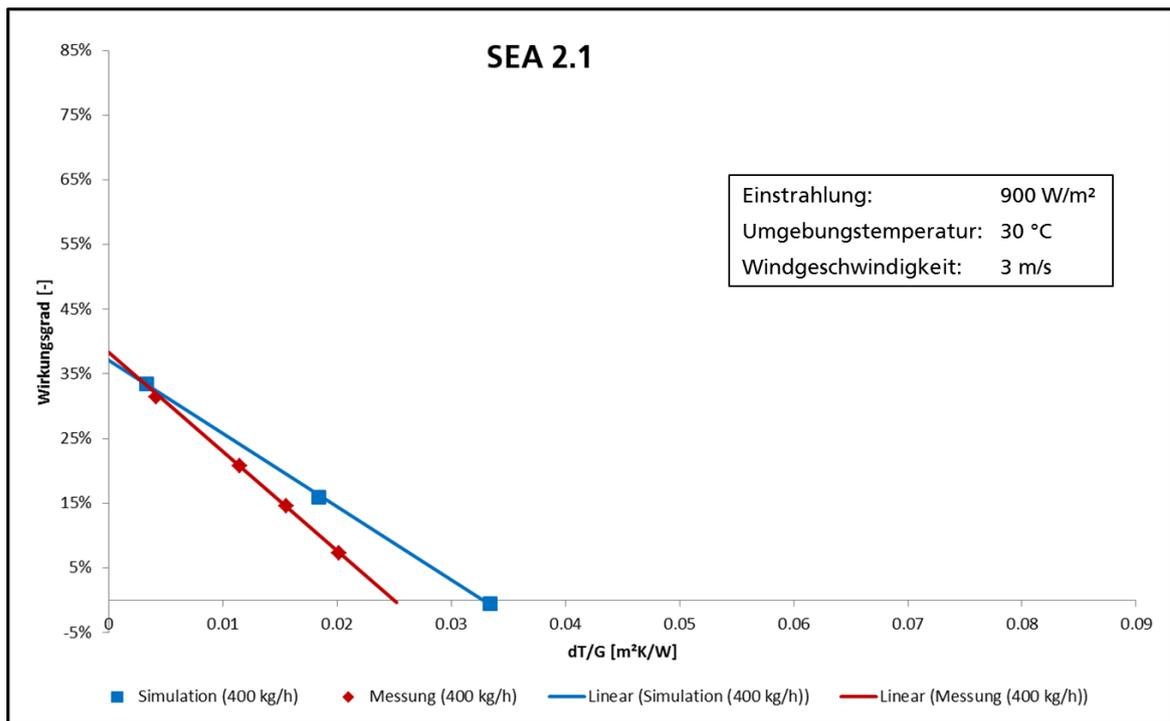


Abbildung 6-12: Simulierte (blau) und gemessene (rot) Wirkungsgradkennlinien des SEA-Kollektors 2.1
Figure 6-12: Simulated (blue) and measured (red) efficiency curves of the SEA collector 2.1

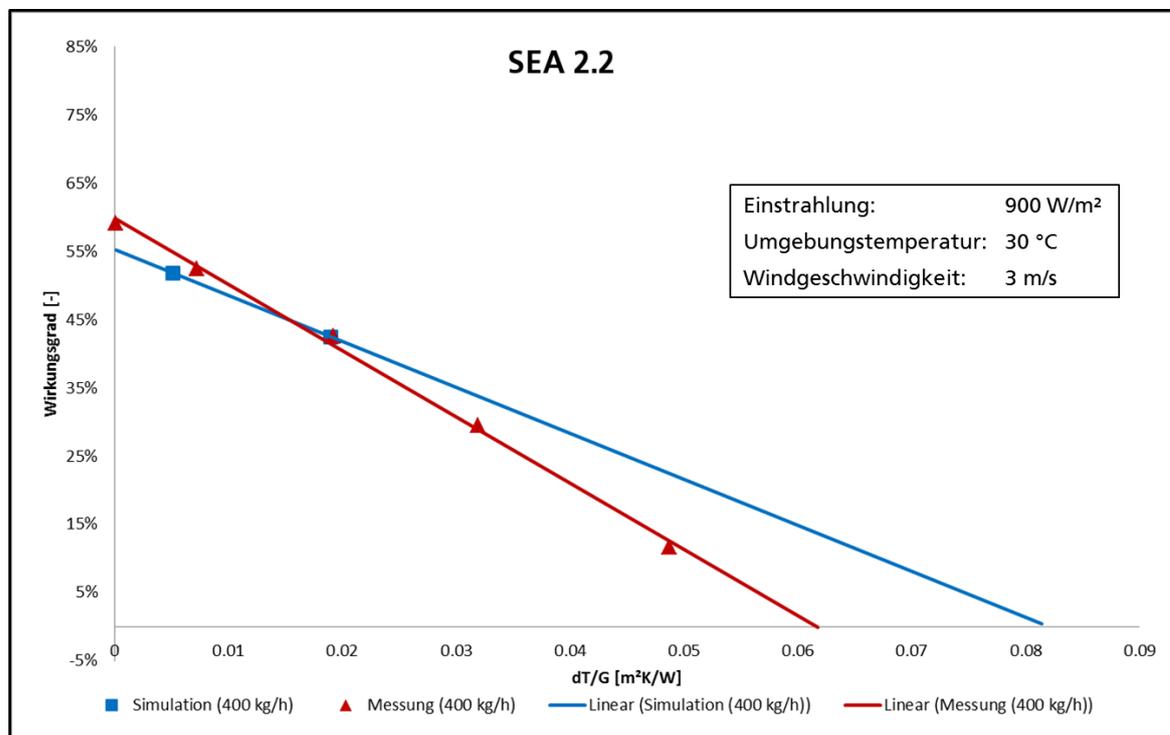


Abbildung 6-13: Simulierte (blau) und gemessene (rot) Wirkungsgradkennlinien des SEA-Kollektor 2.2
Figure 6-13: Simulated (blue) and measured (red) efficiency curves of the SEA collector 2.2

6.3 Kollektoren mit geringer Bauhöhe und flachen Absorbern Collectors with low profile and flat absorbers

6.3.1 Optimierung von Kanalhöhe und Massenstrom bei Variation typischer Randbedingungen Optimising air channel height and mass flow under the variation of typical boundary conditions

Für unbedeckte Luftkollektoren (Abbildung 6-14, links) und abgedeckte Luftkollektoren (Abbildung 6-14, rechts) mit flachem unterströmten Absorber wurden Kanalhöhe und Massenstrom für eine Vielzahl von Randbedingungen optimiert.

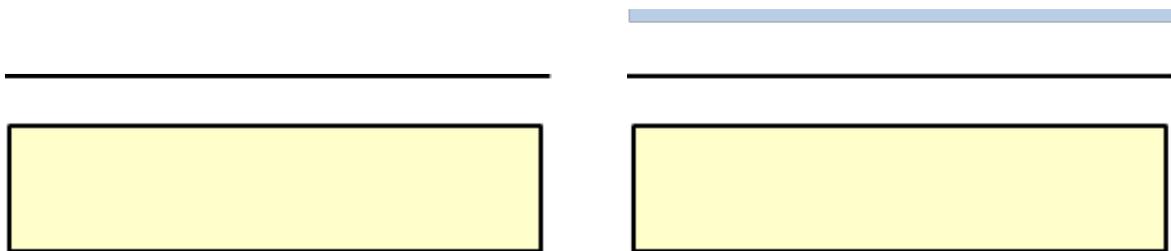


Abbildung 6-14: Schematische Darstellung untersuchter wesentlicher Kollektorkonstruktionen (gelb = Dämmkern, schwarz = Absorber, hellblau = transparente Abdeckung)

Figure 6-14: Schematic representation of investigated essential collector constructions (yellow = core insulation, black = absorber, light blue = transparent cover)

Dazu wurden Variationen der folgenden Randbedingungen in vielfältiger Weise zu 180 unterschiedlichen Kombinationen zusammengestellt:

- Luftkollektorkonstruktionen (mit/ohne transparente Abdeckung, Länge, Absorptionsgrade)
- Anwendungen (Temperaturniveau gegenüber Umgebung, Temperaturhub, Druckverlust)
- Klimabedingungen (Einstrahlung, Umgebungstemperatur)
- Montagepositionen (Wand, Dach)

Da die Kombination mit transparenter Abdeckung und grauem Absorber auf dem Dach bei flacher Sonne im Winter und bei einer Betriebstemperatur von 50 K über der Umgebungstemperatur keinen positiven Ertrag erbrachte, reduzierte sich die relevante Anzahl von Kombinationen auf 171. Die Ergebnisse können zur Wahl geeigneter Konstruktionsvarianten für gewünschte Anwendungen für jeden Fall einzeln betrachtet werden und geben die optimale Kanalhöhe in Hinblick auf Kollektoreffizienz für verschiedene Randbedingungen an.

An dieser Stelle sind sie in Abbildung 6-15 zusammengefasst, um einen Überblick zu geben. In der ersten Zeile "Alle Fälle" sind der Durchschnitt aller optimierten Kanalhöhen und der Durchschnitt der resultierenden thermischen Wirkungsgrade angegeben. In jeder weiteren Zeile sind die Kombinationen zusammengefasst, welche die betreffende Randbedingung quantitativ gemein haben.

Die erste Spalte gibt an, welche Randbedingungen variiert wurden. Die zweite Spalte untergliedert die Variationen der jeweiligen Randbedingung. Die dritte Spalte zeigt diese Untergliederung quantitativ. Die vierte Spalte gibt an, wie viele der 171 Möglichkeiten, die sich durch die Variation der jeweils anderen Randbedingungen ergeben, mit einer Variation der aktuell betrachteten Randbedingung belegt sind. Die fünfte Spalte gibt den Durchschnitt der optimierten Kanalhöhe wieder. Die sechste Spalte gibt den Durchschnitt der resultierenden thermischen Wirkungsgrade der betreffenden Möglichkeiten an. Geometrische Einflüsse wie der hydraulische Durchmesser wurden für diese Abschätzung nicht berücksichtigt.

Variation	Fallunterscheidung	Randbedingungen	Optim. Anzahl	Opt. Kanalhöhe [mm]	Wirkungsgrad [%]
	Alle Fälle		171	15	21
Anwendungsbezogene Eintrittstemp. gegenüber Umgebungstemp.	ULK, (unabgedeckter Luko (ohne transparente Abdeckung))	Ti-Ta = 5 K	72	14	23
	ALK, warm (abgedeckter Luko (mit transparenter Abdeckung))	Ti-Ta = 25 K	36	18	27
	ALK, heiß	Ti-Ta = 50 K	63	15	15
Temperaturhub	ULK, saisonal bevorzugte Fläche (Winter/Wand, Sommer/Dach)	$\Delta T = 25$ K	36	12	23
	ALK, warm, - " -	$\Delta T = 25$ K	18	12	31
	ALK, heiß, - " -	$\Delta T = 20$ K	36	16	19
	ULK, saisonal nicht bevorzugte Fläche (Winter/Dach, Sommer/Wand)	$\Delta T = 12,5$ K	36	16	23
	ALK, warm, - " -	$\Delta T = 12,5$ K	18	23	22
	ALK, heiß, - " -	$\Delta T = 10$ K	27	13	10
Einstrahlung	Winter, Wand	G = 700 W/m ² Luko	54	10	23
	Winter, Dach	G = 450 W/m ² Luko	45	19	18
	Sommer, Wand	G = 550 W/m ² Luko	36	14	19
	Sommer, Dach	G = 800 W/m ² Luko	36	18	22
Wärmeverluste, Transmission/Absorption	ULK, schwarz	UL = 15,5 W/m ² K; ($\tau\alpha$) _{eff} = 0,95	36	16	29
	ULK, grau	UL = 14,1 W/m ² K; ($\tau\alpha$) _{eff} = 0,7	36	12	17
	ALK, schwarz	UL = 5,8 W/m ² K; ($\tau\alpha$) _{eff} = 0,83	54	18	23
	ALK, grau	UL = 5 W/m ² K; ($\tau\alpha$) _{eff} = 0,61	45	13	15
Systemströmungswiderstand gegenüber Luko	ohne	R _{sys} = 0-fach	57	13	22
	klein	R _{sys} = 1-fach	57	15	20
	groß	R _{sys} = 2-fach	57	16	19
SE-Länge	Wand, kurz	L = 4 m	30	9	22
	Wand, mittel	L = 5 m	30	11	22
	Wand, lang	L = 6,8 m	30	15	21
	Dach, kurz	L = 6 m	27	14	21
	Dach, mittel	L = 8 m	27	18	20
	Dach, lang	L = 10 m	27	23	19

Abbildung 6-15: Zusammenfassung der Ergebnisse zu Variationen von Randbedingungen mit optimierten Kanalhöhen und Massenströmen (ULK = unabgedeckter Luftkollektor, ALK = abgedeckter Luftkollektor)

Figure 6-15: Summary of the results on variations of boundary conditions with optimized channel heights and mass flows (ULK = uncovered air collector, ALK = covered air collector)

Für die Variation der anwendungsbezogenen Eintrittstemperatur und des Temperaturhubes wurden mögliche Anwendungsfälle betrachtet und in drei Kategorien zusammengefasst:

- Der Fall **ULK** berücksichtigt im Wesentlichen die Hallenlüftung in den Varianten: nur Luftkollektoren, Luftkollektoren mit Wärmerückgewinnung in Reihe und Wärmerückgewinnung mit Luftkollektoren in Reihe sowie die Hallenheizung mit den Varianten mit Luft/Luft-Wärmepumpe und mit Fußbodenheizung mit Luft/Wasser-Wärmepumpe sowie Trocknung.
- Der Fall **ALK, warm** berücksichtigt die direkte Umluftheizung und die Fußbodenheizung (ohne Wärmepumpe).
- Der Fall **ALK, heiß** berücksichtigt die direkte Deckenstrahlheizung mit Luft, die Deckenstrahlheizung mit Luft/Wasser-Wärmeübertrager und die Prozesswärme gegebenenfalls mit Luft/Wasser-Wärmeübertrager.

- Bei der Variation der **Einstrahlung** ergeben sich die Unterschiede durch die jahreszeitlich unterschiedlichen Sonnenhöhen in Verbindung mit der Neigung von Dach oder Wand.
- Da der **Strömungswiderstand** des restlichen Systems einen Einfluss bei der Optimierung hat, wurde auch dieser variiert. Die Variation reicht vom Kollektor ohne weiteres System, wenn die Luft gleich nach dem Kollektor in die Halle geblasen wird, über den einfachen bis zum doppelten des Strömungswiderstands des Luftkollektors für das restliche System.

In dieser Studie wurden Mittelwerte von effizienten Kanalhöhen von 9 mm bis 23 mm ermittelt (flacher Absorber). Der Mittelwert davon beträgt 15 mm. Dabei resultieren gemittelte Wirkungsgrade von 10 % bis 31 %. Der Mittelwert davon beträgt 21 %.

6.3.2 Vergleich der Strömungsquerschnitte des Trapezprofils mit analytisch optimierten flachen Strömungskanälen Comparing flow areas of the trapezoidal profile with analytically optimised flat flow channels

Dieser Abschnitt baut auf der Studie des vorherigen Abschnitts auf, in welcher ein Mittelwert für die effiziente Kanalhöhe von 15 mm ermittelt wurde. Dabei wurde ein Temperaturhub von 18 K berücksichtigt (erste Zeile in Abbildung 6-16).

Werden die Optimierungen mit der Vorgabe des halben Temperaturhubs von 9 K wiederholt, ergibt sich für die Kanalhöhe ein Mittelwert von 30,9 mm mit einem gemittelten Wirkungsgrad von 25 %. Die Kanalhöhe verdoppelt sich etwa, da der Massenstrom circa verdoppelt werden muss, um den Temperaturhub zu halbieren.

Besonderheit	Temperaturhub	Kanalhöhe	Wirkungsgrad
		[mm]	[%]
Ursprünglich gewählte RB	$\Delta T = 18 \text{ K}$	14,9	21
Ursprünglich gewählte RB und halber Temperaturhub	$\Delta T = 9 \text{ K}$	30,9	25

Abbildung 6-16: Mittelwerte aus 171 Variationen von Randbedingungen mit 18 K und 9 K Temperaturhub

Figure 6-16: Mean values of 171 variations of boundary conditions with 18 K and 9 K temperature rise

In Kapitel 6.1 wurden bereits viele Profilkombinationen aus Stahlblech und Sandwichelement in Bezug auf deren Strömungsquerschnittsfläche eingeordnet. Die beiden grün gerahmten Varianten aus Abbildung 6-1 mit einem Trapezblech und demselben umgedrehten Blech sind noch einmal in Abbildung 6-17 dargestellt. Angegeben sind wieder die Kanalhöhen von flachen Kanälen, welche dieselbe Strömungsquerschnittsfläche aufweisen.

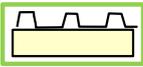
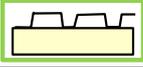
Kanalhöhe eines flachen Kanals, welcher demselben Strömungsquerschnitt entspricht		[mm]
Schmale Trapeze		16,2
Breite Trapeze		31,2

Abbildung 6-17: Kanalhöhen von flachen Kanälen mit gleicher Strömungsquerschnittsfläche wie jene der betrachteten vorhandenen Profilbleche

Figure 6-17: Channel heights of flat channels with same cross-sectional area as those of the considered existing profiled sheets

Die durchströmten schmalen Trapeze entsprechen der Strömungsquerschnittsfläche eines flachen Kanals mit 16,2 mm. Das kommt dem für 18 K Temperaturhub optimierten flachen Kanal mit 14,9 mm Höhe sehr nahe. Die durchströmten breiten Trapeze entsprechen der Strömungsquerschnittsfläche eines flachen Kanals mit 31,2 mm. Das kommt dem für 9 K Temperaturhub optimierten flachen Kanal mit 30,9 mm Höhe sehr nahe.

Der Vergleich zeigt, dass die Trapezprofile angemessene Strömungsquerschnitte für die angedachten Anwendungen aufweisen. Sobald die angedachte Anwendung und weitere Randbedingungen feststehen, können die Kanalhöhen beziehungsweise Strömungsquerschnitte der Profilkombinationen mit den optimierten Kanalhöhen der Variationen der Randbedingungen verglichen werden, und die Profilwahl kann weiter eingeschränkt werden.

Im Hinblick auf eine geringe Bauhöhe und ggf. auch andere Anwendungen erscheinen Varianten mit flachem Absorber interessant. Die zahlreichen Simulationen zeigen, dass flache, filigrane Bauweisen für SEA-Kollektoren realistisch erscheinen und daher eine Option darstellen. Außerdem konnte aufgezeigt werden, dass marktverfügbare Trapezprofile eine adäquate Dimensionierung aufweisen.

6.4 Vorsimulationen für SEA-Kollektor 2.3 Preliminary simulations for the SEA collector 2.3

Der Nachbau von SEA1, genannt SEA 2.1 diente als Referenz, SEA 2.2 zielte insbesondere darauf ab, den Einfluss einer transparenten Abdeckung auf die Wirkungsgradkennlinie quantitativ darzustellen. Insgesamt wurden höhere Wirkungsgrade und eine flachere Kennlinie erzielt, damit sind höhere Erträge und höhere Anwendungstemperaturen möglich. Bei der Entwicklung des Konzepts für den neuen SEA-Kollektor 2.3 sollte der Energieertrag nach Möglichkeit weiter verbessert werden, aus gestalterischen Gründen ein Wellprofil verwendet werden und außerdem bestand eine Zielsetzung darin, die Stagnationstemperaturen zu reduzieren, nachdem sich bei Stagnationsmessungen an SEA 2.2 gezeigt hatte, dass die maximal zulässigen Temperaturen für PU im Stagnationsfall überschritten werden. Es wurde daher beschlossen, dass kein Teil des Absorbers (heißester Teil des Kollektors) im direkten Kontakt mit der äußeren Stahldeckschicht des Sandwichelementes stehen

soll – anders als bei SEA 2.1 und SEA 2.2, bei denen der Untergurt direkt auf das Sandwichelement montiert war.

Das Konzept wurde aus einem Dachelement mit Trapezprofil und einem Wellprofil als Absorber sowie einer Polycarbonat-Abdeckung umgesetzt (siehe Kapitel 5.4.2 und 11). Das Wellprofil sollte mittels Verschraubung derart verbunden werden, dass das Wellprofil nicht direkt auf den Trapezen des Dachprofils auflag und die Polycarbonat-Platte wiederum nicht direkt auf dem Wellprofil, so dass eine möglichst wärmebrückenfreie Konstruktion entstand.

Es wurden zwei Varianten diskutiert: Die erste wies eine Orientierung des Wellprofils parallel (SEA 2.3a), die zweite senkrecht (SEA 2.3b) zum Trapezprofil auf (Abbildung 6-18 und Abbildung 6-19). Es war zunächst nicht klar, welche Variante vorteilhafter in Bezug auf die Leistungsfähigkeit des Kollektors ist. Es stellte sich die Frage, ob die Variante SEA 2.3b eventuell durch die Wellenstruktur senkrecht zur Strömungsrichtung Turbulenzen induzieren und damit den Wärmeübergangskoeffizienten erhöhen könnte, was sich positiv auf den Wirkungsgrad auswirken würde. Um die beiden Varianten zu untersuchen, wurden FEM-Simulationen mit COMSOL durchgeführt.

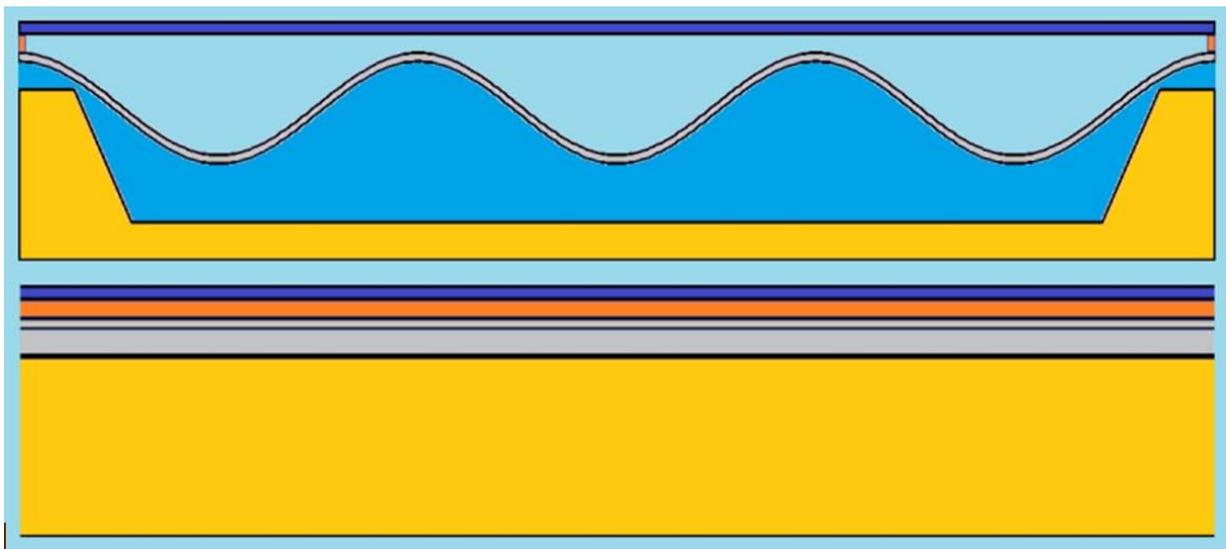


Abbildung 6-18: Kollektor SEA 2.3a (oben: Sicht von oben, unten: Seitenansicht)

Figure 6-18: Collector SEA 2.3a (top: top view, bottom: side view)

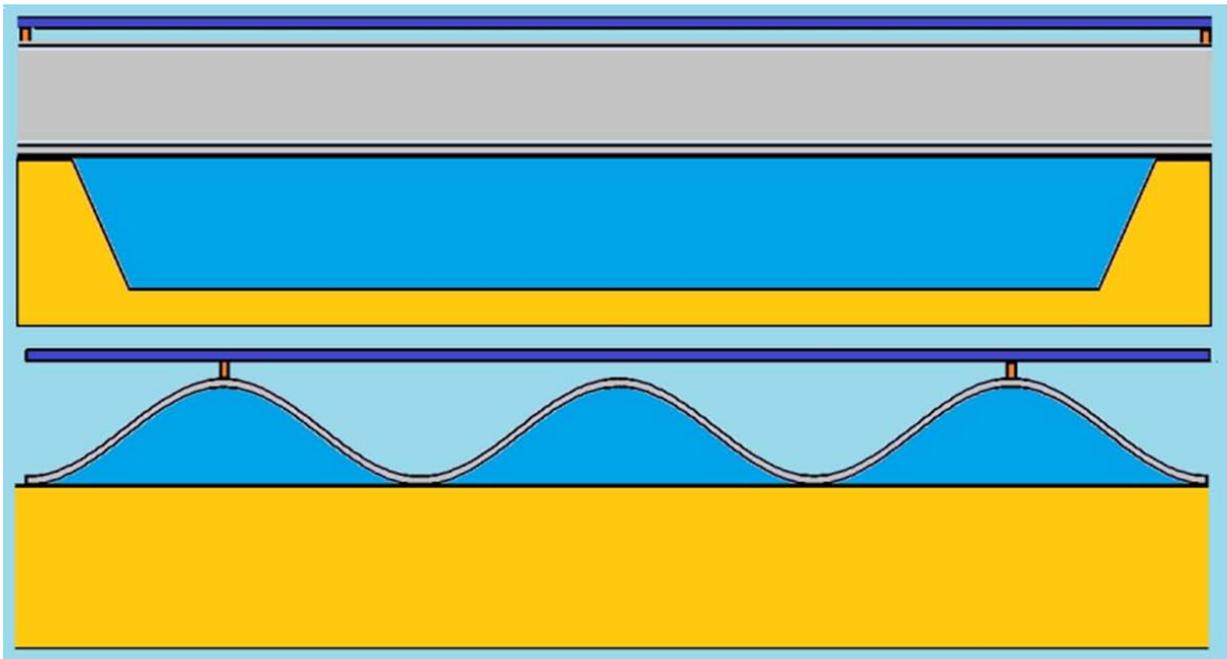
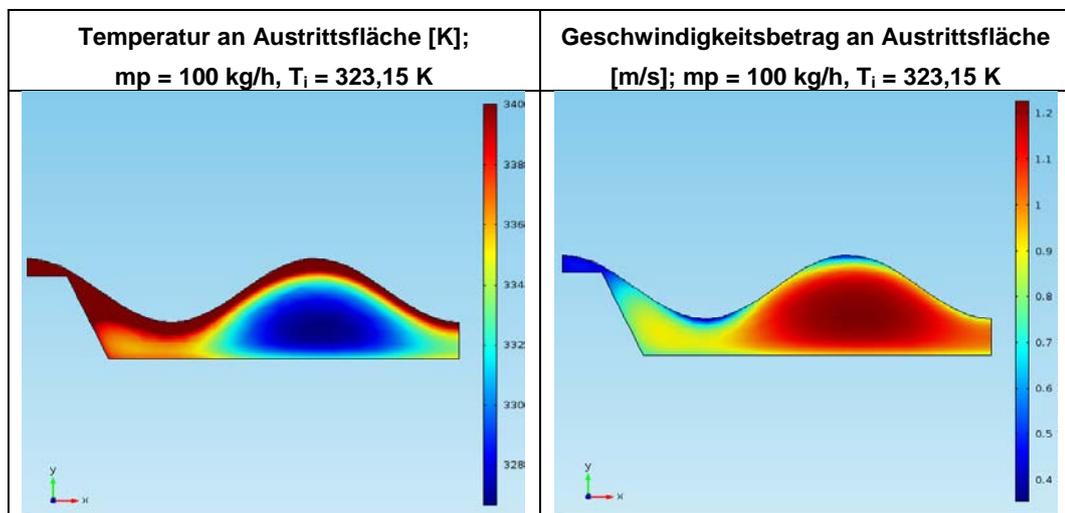


Abbildung 6-19: Kollektor SEA 2.3b (oben: Sicht von oben, unten: Seitenansicht)

Figure 6-19: Collector SEA 2.3b (top: top view, bottom: side view)

Die Ergebnisse der FEM-Simulationen (Abbildung 6-20 und Abbildung 6-21) zeigen, dass in den Wellbergen bei SEA 2.3b selbst bei einem Massenstrom vom 400 kg/h nur sehr geringe Strömungsgeschwindigkeiten auftreten und somit die Wärme nicht gut von der absorbierenden Oberfläche ins Fluid transportiert wird, sondern die Wellenberge vielmehr zu stehenden und somit wärmedämmenden Luftschichten führen. Es ist zwar nicht ausgeschlossen, dass sich bei anderen – realistischeren – Einströmbedingungen gegebenenfalls ein etwas anderes Bild ergäbe, jedoch ist anzunehmen, dass bei der gewählten Amplitude des Wellprofils dennoch stehende Luftschichten auftreten. Daher wurde beschlossen, die Variante SEA 2.3a als dritte Kollektorvariante zu bauen und zu vermessen.



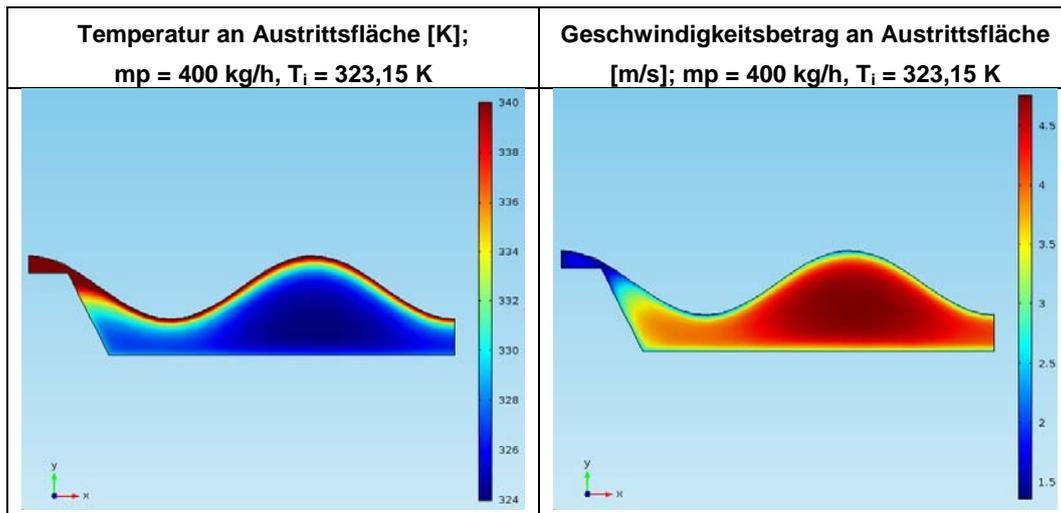


Abbildung 6-20: Temperaturen und Geschwindigkeiten des Kollektors SEA 2.3a bei 100 und 400 kg/h
 Figure 6-20: Temperatures and velocities of collector SEA 2.3a at 100 and 400 kg/h

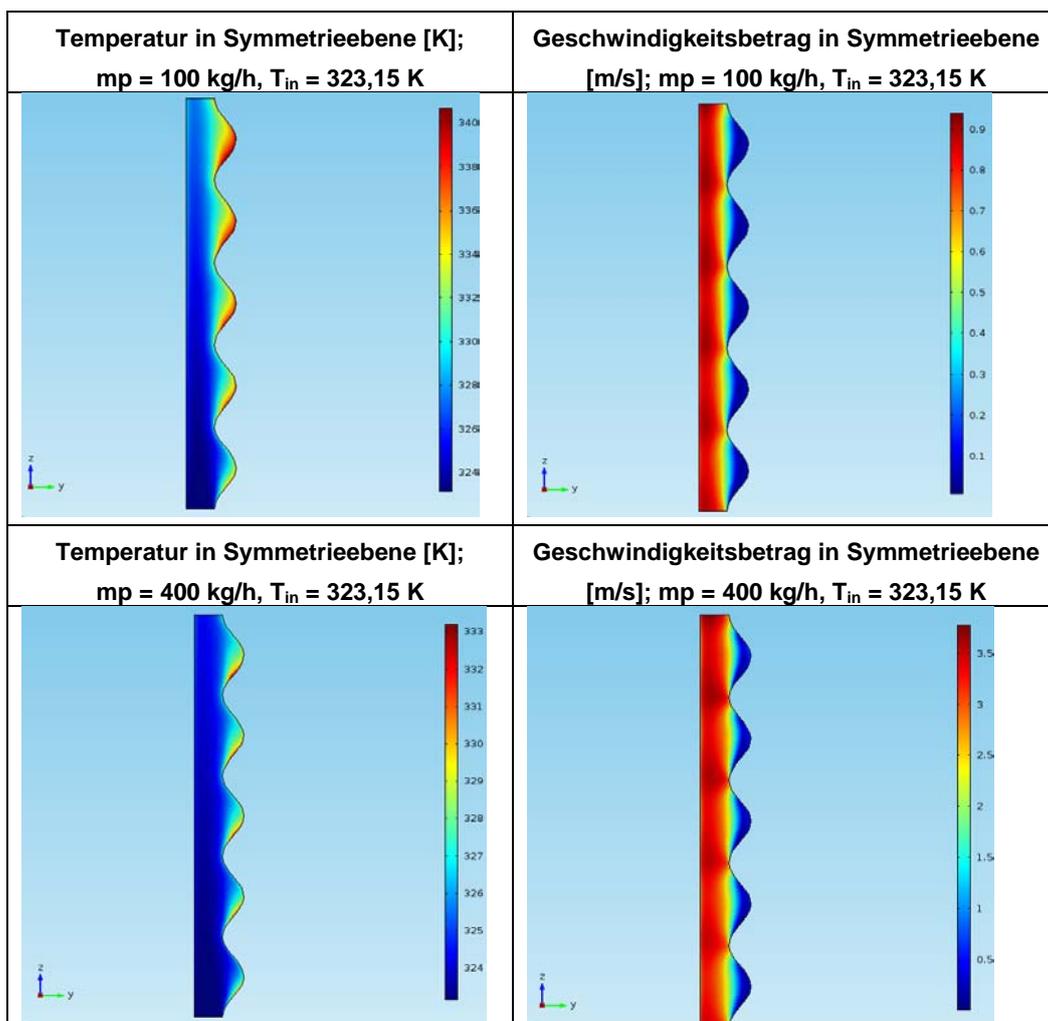


Abbildung 6-21: Temperaturen und Geschwindigkeiten des Kollektors SEA 2.3b bei 100 und 400 kg/h
 Figure 6-21: Temperatures and velocities of collector SEA 2.3b at 100 and 400 kg/h

6.5 SEA-Kollektor 2.3 ohne Abdeckung und mit anderen Farben SEA collector 2.3 without covering and different colours

Um den konkreten Einfluss der Abdeckung und der Farbgebung des Absorbers auf den Kollektor SEA 2.3 zu untersuchen, wurde ein physikalisches Knotenmodell, welches optische und thermische Energieflüsse bei unterschiedlichen Temperaturen berechnet, mit den gemessenen Kennwerten des abgedeckten Luftkollektors SEA 2.3 bei einem Windeinfluss von 3 m/s und einem Massenstrom von 100 kg/h kalibriert. Anschließend wurden die konstruktiven Parameter der Abdeckung sowie die Absorberfarbe variiert. So zeigt Abbildung 6-22, dass das Weglassen der transparenten Abdeckung erwartungsgemäß die thermischen Verluste des Kollektors erhöht, bzw. die möglichen Betriebstemperaturen reduziert, da das Gefälle der Wirkungsgradkennlinie (rote Linie) zunimmt. Bereits für geringere Werte der reduzierten Temperaturdifferenz $(T_m - T_a)/G$ sinkt somit der Momentanwirkungsgrad η auf null.

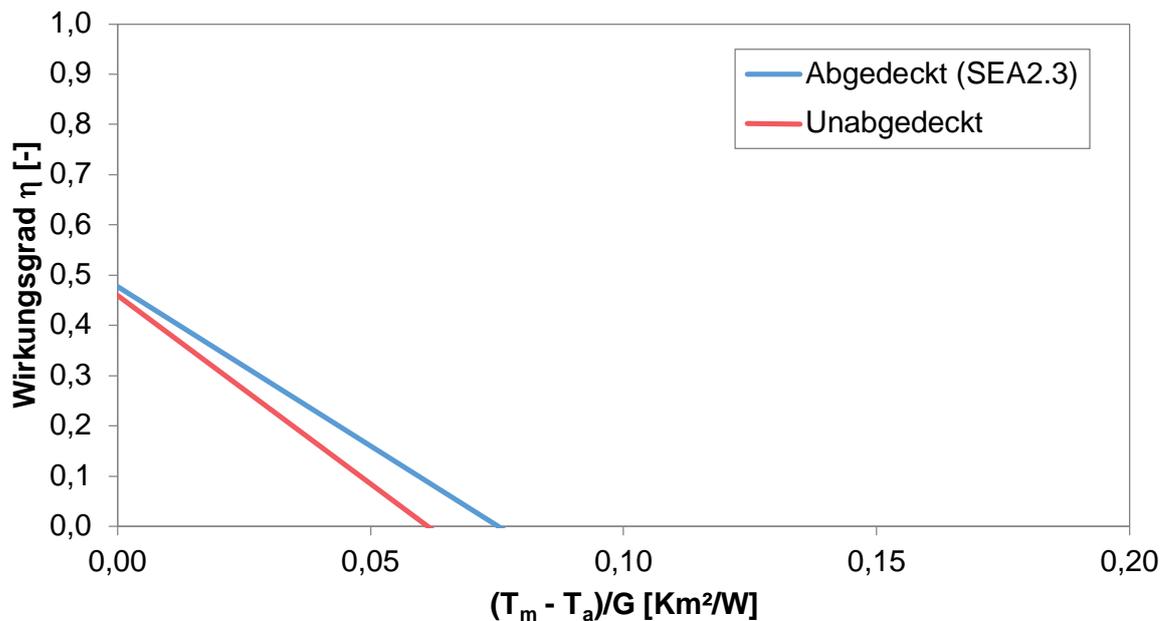


Abbildung 6-22: Wirkungsgradkennlinien des abgedeckten Kollektors SEA 2.3 bei 100 kg/h (berechnet nach Modellkalibrierung auf Basis von Messungen) und des gleichen Kollektors ohne transparente Abdeckung (berechnet)

Figure 6-22: Efficiency curves of the covered collector SEA 2.3 at 100 kg/h (calculated after model calibration based on measurements) and of the same collector without the transparent covering (calculated)

Die Abbildung 6-23 zeigt beispielhaft den Einfluss von alternativen Farben als Beschichtung des Absorbers auf. So führen diese zu anderen Absorptionsgraden der solaren Strahlung und dadurch zu einer veränderten (reduzierten) Energiekonversion der Strahlungsenergie in Wärmeenergie. Entsprechend zeigt sich dies durch einen reduzierten Konversionsfaktor η_0 für die reduzierten Absorptionsgrade, was zu einer Parallelverschiebung der Wirkungsgradkennlinien nach unten führt. Eine Veränderung in der Beschichtung, d. h. im Absorptionsgrad, kann daher für die

gemessenen SEA-Kollektoren durch eine lineare Anpassung der Wirkungsgradkennlinien bzw. -kennflächen simuliert und abgebildet werden.

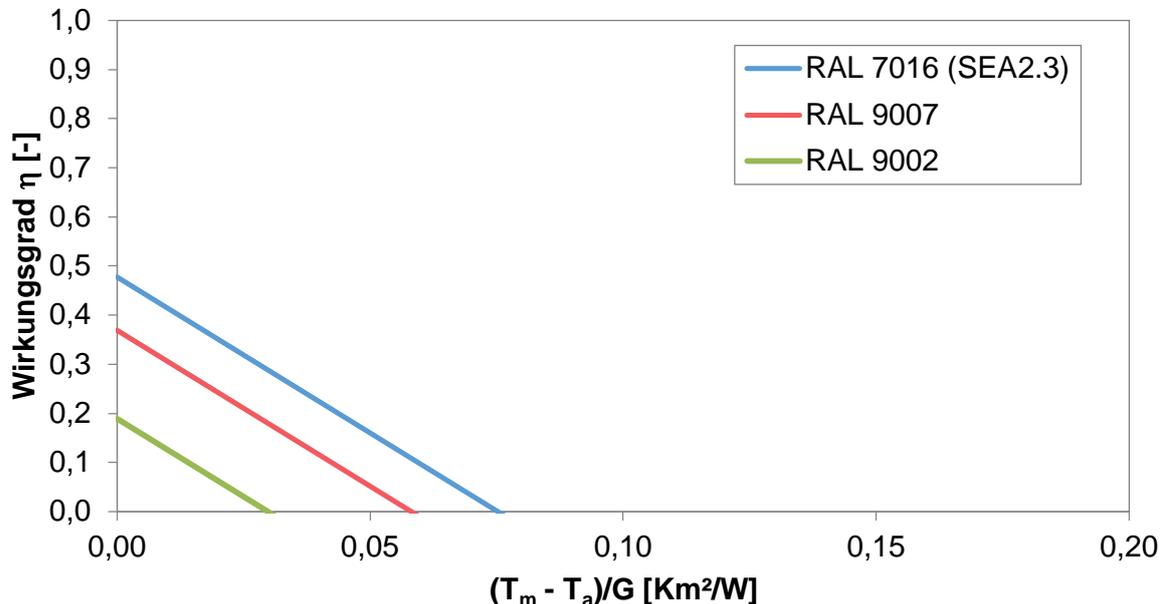


Abbildung 6-23: Wirkungsgradkennlinien des Kollektors SEA 2.3 bei 100 kg/h mit Farbe RAL 7016 (berechnet nach Modellkalibrierung auf Basis von Messungen) und des gleichen Kollektors mit den Farben RAL 9007 (Graualuminium) und RAL 9002 (Grauweiß)

Figure 6-23: Efficiency curves of the collector SEA 2.3 at 100 kg/h with color RAL 7016 (calculated after model calibration based on measurements) and of the same collector with colors RAL 9007 (aluminium grey) and RAL 9002 (grey-white)

6.6 Variation der Kollektorlänge Variation of the collector length

Wie in Kapitel 3.3.5 und 5.5 dargestellt, kann die spezifische Bruttoleistung pro Quadratmeter (ohne Ventilatorleistung) sowie der Temperaturhub des Kollektors auch von dessen Länge abhängen. So sind die Vergleichsbetrachtungen der drei SEA-Kollektoren im Kapitel 5.5 stets auf Basis eines 2 m langen Kollektormodules getätigt worden. Würde nun dessen Länge auf 4 m erhöht werden, würde unter Beibehaltung des Massenstroms für diesen Kollektor der Ertrag sinken, da der spezifische Massenstrom pro Quadratmeter sinkt, während das Temperaturniveau steigt. In Folge nehmen die Wärmeverluste des SEA-Kollektors zu. Um also bei einem doppelt so langen SEA-Kollektor den gleichen Energieertrag pro Quadratmeter zu erhalten, müsste der Massenstrom im SEA-Kollektor proportional erhöht werden, d. h. in diesem Falle verdoppelt, damit der spezifische Massenstrom konstant bleibt.

Da allerdings Bauteillängen im Industrie- und Gewerbebau von über 10 m oft üblich sind, ist es aus konstruktiven Gründen vorstellbar, dass auch die SEA-Kollektorlängen so lang sein müssen oder können. Dies kann nicht notwendigerweise mit einer Anpassung des Massenstroms kompensiert werden, da erhebliche Druckverluste sowie eine abträgliche Geräuschentwicklung entstehen könnten. Zudem kann es aus Anwendungssicht auch wünschenswert sein, über größere Kollektorlängen bei gleichbleibenden Massenströmen zu operieren, da dadurch zwar

der angesprochene Leistungsabstrich pro Quadratmeter erfolgt, allerdings auch höhere Temperaturniveaus möglich werden.

Mit Hilfe der Wirkungsgradkennlinien kann der Effekt sich ändernder spezifischer Massenströme, d. h. der Massenströme pro Quadratmeter Kollektorfläche, für den Energieertrag sowie das Temperaturniveau berechnet werden. Das wird beispielhaft am SEA-Kollektor 2.3 aufgezeigt. Bei einer Globalstrahlung von $G = 1000 \text{ W/m}^2$, einer Windgeschwindigkeit von 3 m/s , einer Umgebungslufttemperatur $T_a = T_i(2 \text{ m}) = 20 \text{ °C}$ wird Luft in den SEA-Kollektor 2.3 bei einem Massenstrom von 100 kg/h gesaugt (rote leere und ausgefüllte Kreise in Abbildung 6-24). Diese Luft erwärmt sich binnen der ersten 2 m des Kollektors um ca. $26,6 \text{ K}$ auf $46,6 \text{ °C}$, um sodann in die zweiten 2 m Kollektorlänge mit diesen $46,6 \text{ °C}$ zu gelangen. Das bedeutet arithmetisch, dass die Austrittstemperatur T_e (2 m) nach den ersten zwei Metern Kollektorlänge die Eintrittstemperatur T_i (4 m) für die zweiten zwei Meter Kollektorlänge ist (ausgefüllter roter Kreis für $x = 2 \text{ m} \rightarrow$ leerem roten Kreis für $x = 4 \text{ m}$). Nun findet nur noch ein reduzierter Temperaturhub von $46,6 \text{ °C}$ auf $63,4 \text{ °C}$ statt (leerer roter Kreis bei $x = 4 \text{ m}$ zu ausgefülltem roten Kreis bei $x = 4 \text{ m}$).

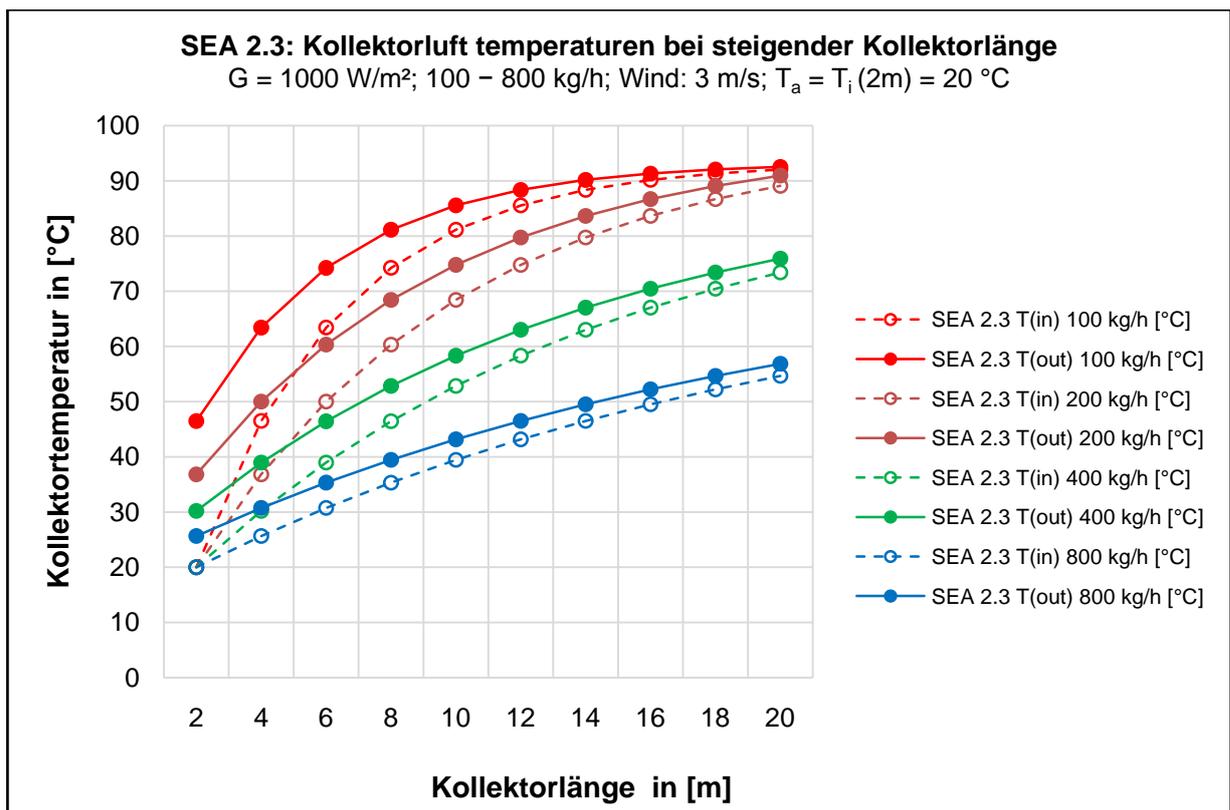


Abbildung 6-24: Erwärmung der Kollektorluft im SEA-Kollektor 2.3 für verschiedene Kollektormodul-längen und Massenströme dargestellt anhand der Eintrittstemperaturen T_i und Austrittstemperaturen T_e des jeweiligen Kollektorabschnitts bei einer Globalstrahlung von $G = 1000 \text{ W/m}^2$ und einer Windgeschwindigkeit von 3 m/s

Figure 6-24: Heating of the collector air in SEA collector 2.3 for different collector module lengths and mass flows depicted via the respective input temperatures T_i and output temperatures T_e of the corresponding collector section with global radiation of $G = 1000 \text{ W/m}^2$ and a wind influence of 3 m/s

Der zusätzliche Temperaturhub sinkt also mit jeder weiteren Wiederholung, wie in Abbildung 6-24 für die verschiedenen farbigen gestrichelten und durchgezogenen Linien leicht gesehen werden kann. Arithmetisch wandert man mit jeder Iteration der Berechnung in Zwei-Meter-Schritten für den Momentanwirkungsgrad η entlang der entsprechenden WKL (SEA 2.3 für den jeweiligen Massenstrom) nach unten rechts.

Der sinkende Temperaturhub für jeden Zwei-Meter-Kollektorabschnitt rührt von den zunehmenden thermischen Verlusten des Kollektors her und spiegelt sich in reduzierten spezifischen Wirkungsgraden und Kollektorleistungen für diese Abschnitte wider. Abbildung 6-25 zeigt diese sinkenden spezifischen Kollektorleistungen (durchgezogene Linien) bezogen auf eine jeweils gewählte Gesamtlänge des SEA-Kollektors 2.3 und die dazugehörige Austrittstemperatur T_e (gestrichelte Linien) unter identischen Rahmenbedingungen wie zuvor für verschiedene Massenströme.

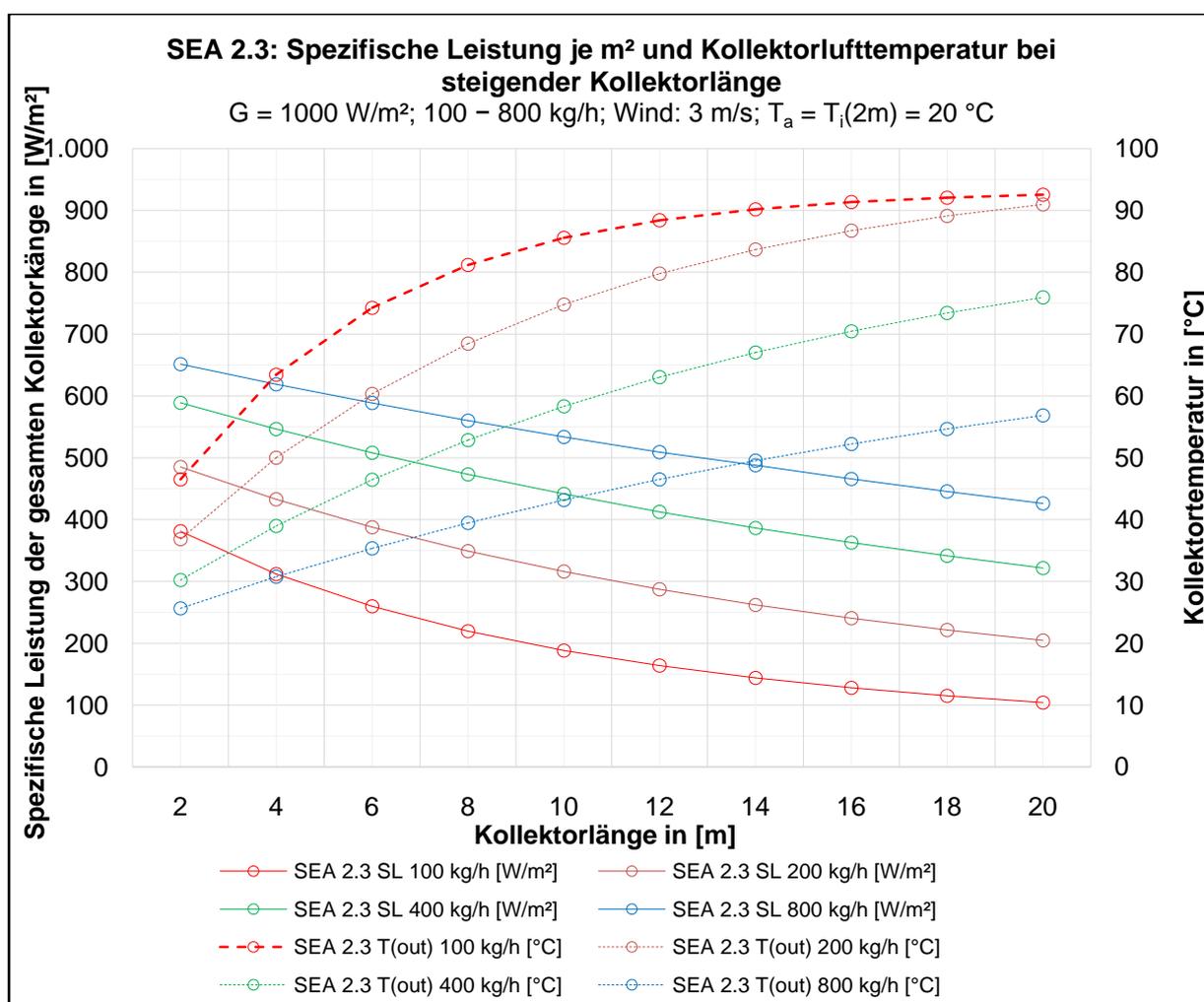


Abbildung 6-25: Spezifische Leistung pro m² für verschiedene Längen des SEA-Kollektors 2.3 sowie die jeweiligen Austrittstemperaturen T_e zu verschiedenen Massenströmen (100 kg/h – 800 kg/h) unter den gleichen Rahmenbedingungen wie bei Abbildung 6-24

Figure 6-25: Specific output per m² for different lengths of a SEA collector 2.3 and their corresponding output temperatures T_e based on different mass flows (100 kg/h – 800 kg/h) under the same environmental conditions as in figure 6-24

Diese spezifischen Leistungen pro m² (gestrichelte Linie) schlagen sich sodann nach gewählter Kollektorlänge des SEA-Kollektors 2.3 für die verschiedenen Massenströme zu den gleichen Rahmenbedingungen wie zuvor, in folgenden Flächenleistungen (durchgezogene Linien) nieder (Abbildung 6-26).

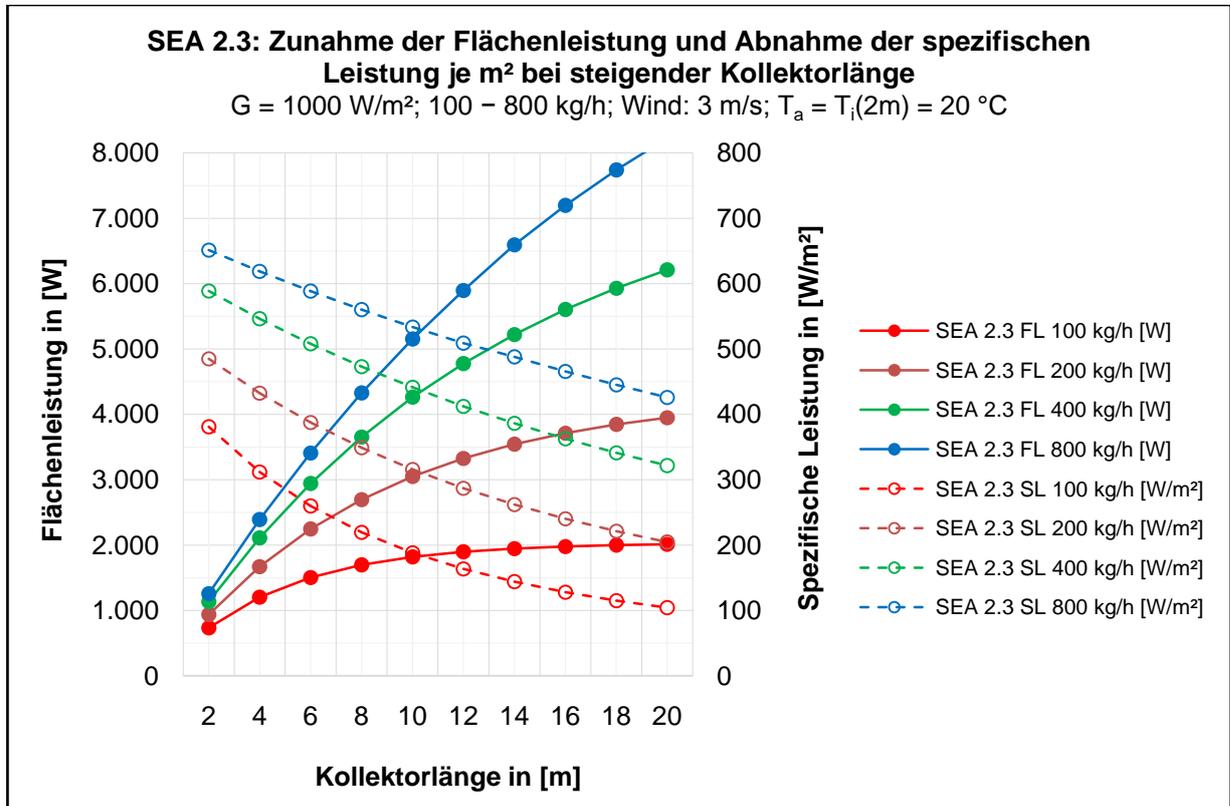


Abbildung 6-26: Spezifische Leistung pro m² und Flächenleistung (Gesamtleistung) für verschiedene Längen des SEA-Kollektors 2.3 und für verschiedene Massenströme unter den gleichen Rahmenbedingungen wie bei Abbildung 6-24

Figure 6-26: Specific output per m² and total output for different lengths of a SEA collector 2.3 and different mass flows under the same environmental conditions as in figure 6-24

Aus den vorhergehenden Abbildungen zum Beispielfall des SEA-Kollektors 2.3 zeigt sich, dass mit der richtigen Kombination aus Kollektorlänge und Massenstrom eine Optimierung der Energieerträge in Hinblick auf ein zu erreichendes Temperaturniveau möglich ist. Letztendlich kann mit einem SEA-Kollektor 2.3 über höhere Kollektorlängen ($\geq 10 \text{ m}$) und einen Massenstrom von bspw. 200 kg/h eine hohe Austrittstemperatur T_e der Luft erzielt werden ($\geq 74 \text{ }^\circ\text{C}$; Abbildung 6-25), wobei die spezifische Leistung immer noch bei Werten zwischen 200 und 320 W/m^2 liegt. Für die gewählte Globalstrahlung bedeutet dies einen mittleren Wirkungsgrad der gesamten SEA-Kollektorlänge von $20 - 32 \%$ bei einer jeweiligen Systembreite von einem Meter. So resultiert daraus für ein Kollektorbauteil eine Flächenleistung von $3000 - 4000 \text{ W}$. In Hinblick auf die Flächenausdehnung einer Halle werden so große Flächenleistungen zu hohen Endtemperaturen möglich. Allerdings müssen bei den Betriebstemperaturen auch die letztendlichen Maximaltemperaturen der PU-Kerndämmung bzw. des PU-Haftvermittlers bei MW-Dämmkernen berücksichtigt werden (Kapitel 5.6 und 8.3).

7 Systemsimulationen für Energienutzungskonzepte System simulations and case studies for energy use

Kurzfassung

Letztendlich soll die durch SEA-Elemente bereitgestellte thermische Energie auch einen konkreten energetischen Nutzen für das Gebäude haben. Daher wurde in diesem Kapitel auf Basis einer Musterhalle, die für Industrie- und Gewerbehallen allgemeinen Energiebedarfsszenarien Heizen und Kühlen analysiert. Die Fraunhofer ISE hat dafür das Berechnungsprogramm LukoCalc entwickelt. Dort wurden mit den Klimadaten für München und Hamburg, den Hallenmaßen und einem gängigen Nutzungsprofil aus der DIN V 18599 die Lastreihen für einen Kühl- und Heizfall eines Jahres stundenweise aufgelöst, den jeweils berechneten SEA-Erträgen der drei verschiedenen SEA-Kollektoren gegenübergestellt. So konnte festgestellt werden, dass mit allen drei SEA-Kollektoren bereits jetzt eine (beinahe – SEA 2.1) vollsolarthermische Deckung des Kühlbedarfs ohne Speicher möglich ist. Hinsichtlich des Heizens ist für die abgedeckten SEA-Kollektoren eine vollsolarthermische Deckung mit thermischen Speichern möglich.

Abstract

Eventually the thermal energy provided by SEA elements should fulfill a practical energetic benefit for the building. Therefore this chapter analyses the general scenarios heating and cooling in industrial and commercial buildings based on a reference hall. For this purpose Fraunhofer ISE has designed the calculation tool LukoCalc on the basis of ScenoCalc. Energy loads for heating and cooling of one year based on climate data of Hamburg and Munich, the hall's dimensions and a DIN 18599 usage profile were set against the respective SEA energy yields of the three different SEA collectors in an hourly examination. Thus it could be determined that all three collectors could provide (almost – SEA 2.1) full solar thermal coverage for the hall's cooling demand without use of an energy storage, while full solar thermal coverage in case of heating could be achieved for both SEA collectors 2.2 and 2.3 with the inclusion of a thermal energy storage.

7.1 Klimadaten und Standort Climate and locations

Das Ziel ist, dass die Berechnungen repräsentativ und eine anwendungsorientierte Gültigkeit für den Standort Deutschland haben. Daher wurden in den Berechnungen mehrere Standorte berücksichtigt. Die vom Deutschen Wetterdienst (DWD) bereitgestellten Testreferenzjahre (TRY) sind als Datengrundlage für eine Berechnung der eingestrahelten Energien auf von der horizontalen abweichenden Flächen nicht geeignet. Dies wurde bereits in [Pot96] gezeigt und in [Sch15] noch einmal detailliert dargestellt. Daher wurde auf die Datenbank METEONORM 7

zugegriffen [MET17]. In dieser wird mit Hilfe von Messwerten aus Messstationen ein flächendeckendes Klimamodell für die gesamte Welt modelliert. Die verlässlichsten Daten stellen dabei diese dar, welche basierend auf Messdaten direkt an dem Standort einer Messstation generiert worden sind. Bei den aus der Datenbank ausgegebenen Daten handelt es sich dann um solche, welche unter bestimmten Kriterien gemittelt worden sind. In den Berechnungen werden die folgenden drei Berechnungsmuster aus der Datenbank integriert:

- Typisches meteorologisches Jahr (TMY)
- Minimum monatliche 10-Jahres-Extreme für Temperatur und Strahlung (TMY-Min)
- Maximum monatliche 10-Jahres-Extreme für Temperatur und Strahlung (TMY-Max)

Es wurden die Standorte München-Flughafen (MUN) und Hamburg-Flughafen (HH) in die Berechnung integriert. Für diese wurden alle drei Berechnungsmuster für die Ausgabe angewendet und in das im folgenden Kapitel beschriebene auf ScenoCalc basierende Berechnungstool LuKoCalc integriert. Weiterhin sind Berechnungen für den im ScenoCalc bereits hinterlegten Klimastandort Würzburg (WB) in LuKoCalc möglich.

7.2 Berechnungstool ScenoCalc Calculation tool ScenoCalc

ScenoCalc, ein Programm zur Berechnung des Jahresenergieertrags eines Solarkollektors wurde vom Technical Research Institute of Sweden (SP) im Rahmen des EU-Projektes Quality Assurance in Solar Thermal Heating and Cooling Technologies (QAIST) veröffentlicht [RIS17]. Es besteht im Wesentlichen aus einem in VBA erstellten Programm mit MS-Excel als Ein- und Ausgabemaske. Ziel des Programmes ist es, den Kollektorsertrag (Bruttojahresenergieertrag des Kollektors ohne Berücksichtigung der Einbindung in ein heizungstechnisches System) für nach Solar Keymark zertifizierte Produkte zu berechnen und damit am Markt befindliche Kollektoren hinsichtlich deren Leistungscharakteristik vergleichbar zu machen. Dabei erfolgen die Berechnungen mittels Stundenwerten. Die Eingabeparameter werden dabei durch eine messtechnische Charakterisierung unter Berücksichtigung der DIN EN 12975 ermittelt. Das Tool stellt die Grundlage für die durchgeführten Berechnungen zu den energetischen Nutzungskonzepten dar.

7.3 Weiterentwicklung ScenoCalc zu LuKoCalc Development of LuKoCalc from ScenoCalc

An dem Programmcode von ScenoCalc wurden Änderungen vorgenommen, die insbesondere das Ausgabeformat betreffen. Dabei werden vornehmlich die Einstrahlungsdaten auf die Hüllflächen des zu betrachtenden Gebäudes umgerechnet und für jede einzelne dieser Flächen sodann die Erträge der Kollektorflächen berechnet. Weiterhin wurde für die Ertragsberechnung der Kollektoren die Außenluft als Eintrittstemperatur festgelegt, welche aus dem Klimadatensatz des definierten Standortes eingelesen wird. Es wurden ferner zwei Methoden zur Ertragsberechnung implementiert: Zum einen kann unter Variation des Massenstromes ein konstanter Temperaturhub über dem Kollektorfeld definiert werden, zum anderen kann ein konstanter Massenstrom vorgegeben werden. Wichtig ist dabei, dass sich die Berechnungen auf die am Leistungsteststand des Fraunhofer ISE ermittelten Parameter beziehen. Diese wurden für ein 2 m langes Kollektormodul erzeugt. Für eine Verschaltung von mehreren Kollektormodulen in Reihe wird davon ausgegangen, dass sich die Verlustleistung linear mit der Anzahl an seriell verschalteten Kollektoren verhält. Das bedeutet, dass hier die Annahme getroffen wird, dass die Leistungscharakteristik von einem Kollektor gleich der von zwei Kollektoren in Reihenschaltung ist, wenn der doppelte Massenstrom anliegt, also der spezifische Massenstrom konstant bleibt (siehe auch Kapitel 3.3.5 und 6.6). In den Berechnungen wurden dabei die im Folgenden dargestellten Änderungen vorgenommen. Die Ertragsberechnung erfolgt dabei mittels der quasi-stationären Berechnungsvorschrift aus Gleichung (7-1).

$$Q_{t1}(i, 1) = \eta_{0,b} \cdot (K_{\theta,b}(i, 1) \cdot G_{bT}(i, 1) + K_{\theta,d} \cdot G_{dT}(i, 1)) \quad \text{in W/m}^2 \quad (7-1) \\ - a_1 \cdot (T_m(i, 1) - T_a(i, 1)) \\ - a_2 \cdot (T_m(i, 1) - T_a(i, 1))^2$$

Mit:

Q_{t1} :	Kollektorbruttoertrag für Zeitschritt i
$\eta_{0,b}$:	Konversionsfaktor nach DIN EN 12975-2:2006-06
$K\theta_b$:	Einstrahlwinkel-Korrekturfaktor (IAM) für direkte Strahlung nach DIN EN 12975-2:2006-06
G_{bT} :	Globalstrahlung für Zeitschritt i
$K\theta_d$:	Einstrahlwinkel-Korrekturfaktor (IAM-D) für diffuse Strahlung nach DIN EN 12975-2:2006-06
G_{dT} :	Diffuse Strahlung für Zeitschritt i
a_1 :	Linearer Verlustkoeffizient nach DIN EN 12975-2:2006-06
a_2 :	Quadratischer Verlustkoeffizient nach DIN EN 12975-2:2006-06
$T_m(i, 1)$:	Mittlere Kollektorlufttemperatur im Zeitschritt i
$T_a(i, 1)$:	Umgebungslufttemperatur im Zeitschritt i

Für die Anwendung in LuKoCalc wurden die beiden folgenden Zusammenhänge in Gleichung (7-1) integriert. Mit Gleichung (7-2) erfolgt dabei eine Linearisierung der Wärmeverluste [Fis04]. Dies ist auf Grund der Tatsache, dass Außenlufttemperatur als Eintrittstemperatur für den Kollektor gilt, annehmbar.

$$U_{coll_loss} = a_1 / F_{coll_EffFactor} \quad \text{in W/m}^2\text{K} \quad (7-2)$$

Mit:

U_{coll_loss} :	Linearer Wärmeverlustkoeffizient für den Kollektor (= U_{Verlust})
$F_{coll_EffFactor}$:	Kollektorwirkungsgradfaktor (= F') nach DIN EN 12975-2:2006-06

Der zweite Zusammenhang wird mit Gleichung (7-3) wiedergegeben. Mit Hilfe dieser Gleichung kann nun der Zusammenhang aus Gleichung (7-1) schließlich von der mittleren Kolleortemperatur auf dessen Eintrittstemperatur und damit die Temperatur der Außenluft gebracht werden [Duf13]. Dabei wird auch eine Abhängigkeit vom Massenstrom mit in die Gleichung aufgenommen.

$$F_{coll_HeatRemoval} = mp_{coll_set} \cdot c_{p_air} / U_{coll_loss} \cdot (1 - \text{Exp}(- (U_{coll_loss} \cdot F_{coll_EffFactor}) / (mp_{coll_set} \cdot cp_{air}))) \quad - \quad (7-3)$$

Mit:

$F_{coll_HeatRemoval}$:	Heat removal coefficient [ASH78]
mp_{coll_set} :	Massenstrom des Wärmeträgerfluides durch den Kollektor
c_{p_air} :	Wärmekapazität des Wärmeträgerfluides durch den Kollektor
U_{coll_loss} :	linearer Wärmeverlustkoeffizient für den Kollektor siehe Gleichung (7-2) (= U_{Verlust})
$F_{coll_EffFaktor}$:	Kollektorwirkungsgradfaktor (= F') nach DIN EN 12975-2:2006-06

Die Zusammenhänge aus den Gleichungen (7-1), (7-2) und (7-3) führen mittels eines Koeffizientenvergleichs zu dem in Gleichung (7-4) dargestellten Zusammenhang.

in W/m^2 (7-4)

$$\begin{aligned} Q_{t1}(i, 1) = & F_{coll_HeatRemoval} / F_{coll_EffFactor} \\ & * (\eta_{0_b} * (K\theta_b(i, 1) * G_{bT}(i, 1) \\ & + K\theta_d * G_{dT}(i, 1)) \\ & - a_1 * (T_m(i, 1) - T_a(i, 1)) \\ & - a_2 * (T_m(i, 1) - T_a(i, 1))^2 \end{aligned}$$

Die Temperaturdifferenz von Außenlufttemperatur $T_a(i, 1)$ und mittlerer Kollektorlufttemperatur $T_m(i, 1)$ ist dabei relativ gering, so dass sich diese Terme näherungsweise zu null auflösen lassen. Die dabei eingesetzte Approximation der Kollektorgleichung gilt insbesondere für die Nutzung von Außenluft mit einem darüber geringen Temperaturhub als hinreichend genau. Für die Auslegung des Kollektorfeldes muss die hydraulische Auslegung in einem separaten Berechnungstool unter der Maßgabe von realistischen Druckverlusten und den daraus resultierenden Massenströmen erfolgen.

Die berechneten Kollektorbruttoerträge werden im nächsten Berechnungsschritt mit einem konstanten Nutzungsgradmodell für das Kollektorfeld sowie dem Kollektorkreis versehen, so dass sich der Kollektorfeldbruttoertrag ergibt.

Mit diesen Stundenwerten werden nun die Lastreihen verschränkt. Diese bestehen aus dem Heizwärmebedarf und dem Kühlbedarf der Halle. Der Heizwärmebedarf setzt sich aus den bauphysikalischen Gegebenheiten der Halle zusammen und wird über einen effektiven U-Wert in den Berechnungsprozess übergeben. Dieser Prozess ist abhängig von der Außentemperatur und wird entsprechend in der Berechnung eingegeben.

Die weiteren Prozesse unterliegen einem Fahrplan, der mittels Stundenwerten eine typische Arbeitswoche darstellt. Damit wird der Außenluftwechsel dargestellt, der als effektiver Außenluftwechsel den mechanisch geführten sowie den Infiltrationsluftwechsel berücksichtigt. Interne Quellen werden über zwei Ablaufpläne berücksichtigt, so dass unterschiedliche Quellen charakterisiert werden können. Die Raumtemperatur der Halle wird ebenfalls über einen entsprechenden Fahrplan dargestellt, so dass insbesondere eine Nachtabsenkung und ein Schichtbetrieb dargestellt werden können. Die Dynamik zur Aufheizung des Gebäudes kann durch im Vergleich zum Schichtbetrieb zusätzliche Betriebszeiten zur Beheizung annähernd dargestellt werden. Der Kühlbedarf der Halle berechnet sich aus der gleichen Prozedur. Die Komponenten der Berechnung sind in Abbildung 7-1 mit den Bilanzräumen dargestellt.

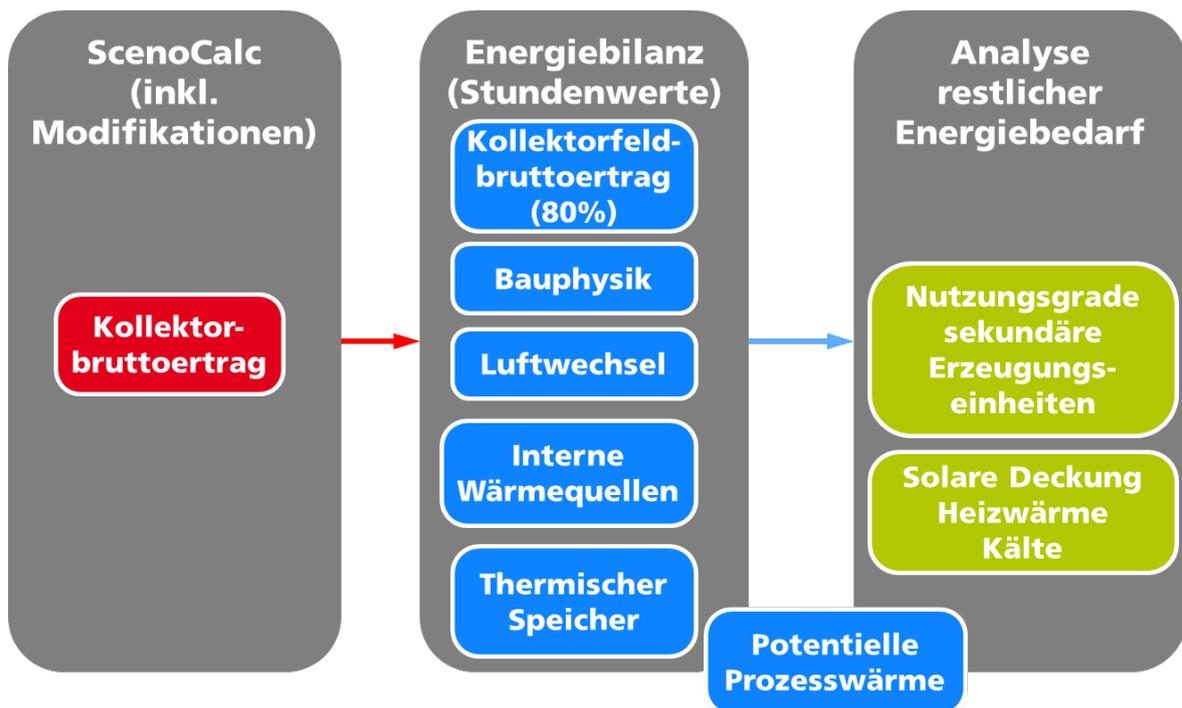


Abbildung 7-1: Berechnungsschritte und Bilanzgrenzen in LuKoCalc

Figure 7-1: Calculation steps and balance limits in LuKoCalc

Zur Berücksichtigung eines thermischen Speichers zur Speicherung von solarthermisch erzeugter Wärme wurde in dem Excel-Tool LuKoCalc ein Ein-Knoten-Modell integriert, welches über eine maximale und eine minimale Temperatur charakterisiert werden kann. Die thermische Kapazität berechnet sich aus Stoffdaten, die ebenfalls frei parametrierbar sind. Wichtig ist dabei, dass die Berechnungen auf Stundenwerten basieren und keine Leistungscharakterisierung erfolgt. Die Ausführung der Konstruktion zur Ein- und Auskoppelung der thermischen Leistung wird dabei nicht berücksichtigt.

Überschüssige Wärme wird als potentiell nutzbare Prozesswärme in dem Tool ausgegeben. Im nächsten Schritt erfolgt die Berechnung des zusätzlich zu erzeugenden Energiebedarfes, welcher für ein Erreichen des Fahrplanes der Raumtemperatur erforderlich ist. Hier kommen für unterschiedliche Wärme- und Kälteerzeuger Nutzungsgradmodelle zum Einsatz, wobei diese bei der betrachteten Wärmepumpe von der Temperatur der Außenluft abhängig sind.

In der finalen Analyse werden die Ergebnisse in einem Projektbericht zusammenfassend dargestellt. Dabei wird insbesondere auf den solarthermischen Deckungsanteil, wie er sich mit und ohne Speicherung ergibt sowie die noch zusätzlich zu erzeugende Energie eingegangen.

7.4 Die ECB-Industriehalle und Nutzungsprofil(e) nach DIN V 18599 The ECB industrial building and usage profile (DIN V 18599)

In den folgenden Betrachtungen wurde die Musterhalle des "EcoCommercial-Building"-Projektes (ECB) der Firma Bayer zu Grunde gelegt [Bay11]. Für diese Halle wurden schon Dämmstandards berechnet und sie bietet daher eine gute

Vergleichsbasis. Sie ist als modularer Baukörper ausgelegt und besitzt 1200 m² Nutzfläche, wobei von der 20 m breiten Version und zwecks energetischer Optimierung von einem Flach- statt von einem Giebeldach ausgegangen wird.

Basistyp:

- Breite: 20 m
- Länge: 60 m
- Grundfläche: 1.200 m²
(keine Brandschutzauflagen)
- Traufhöhe: 6 m
- BRI: 7740 m³

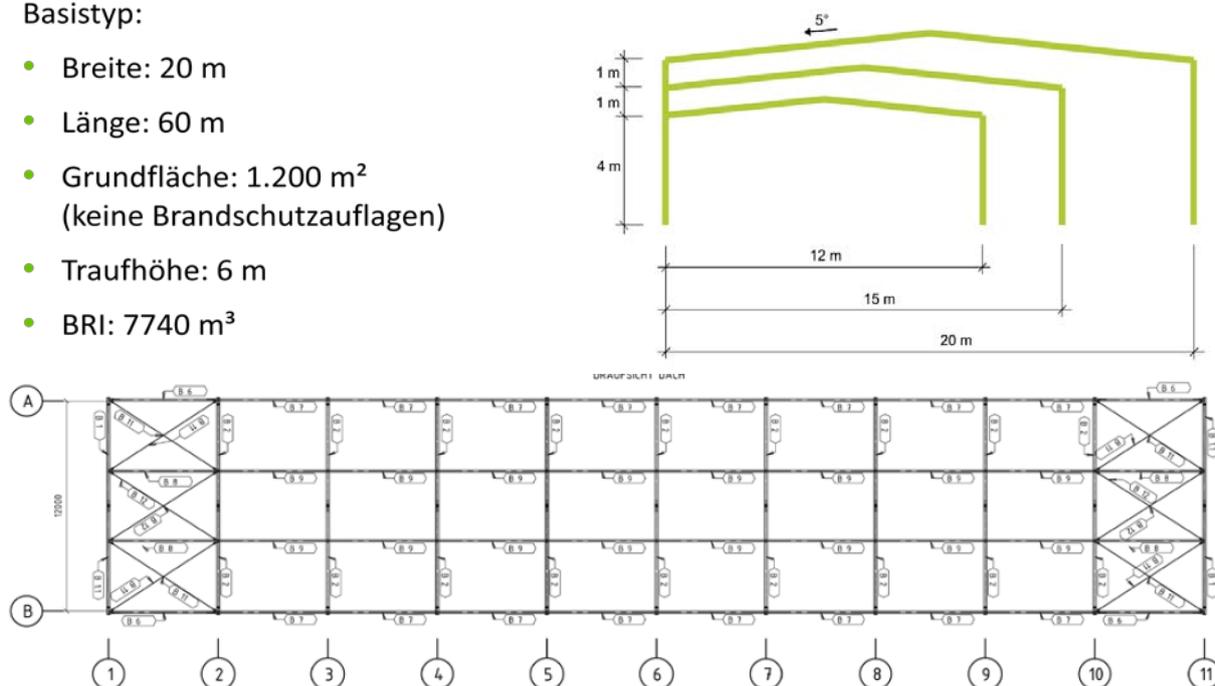


Abbildung 7-2: ECB-Musterhalle nach [Bay11]

Figure 7-2: ECB reference hall based on [Bay11]

Das Nutzungsprofil der Halle entspricht dem einer gewerblich genutzten, industriellen Halle mit grober Arbeit, wie es in DIN V 18599 T100 Nr 22-1 definiert wird. Die Randbedingungen zu Nutzung sind in Abbildung 7-3 zusammenfassend dargestellt.

Nutzungsprofil Werkstatt, Fertigung

(DIN V 18599 T100, Nr. 22-1, gewerbliche und industrielle Hallen – grobe Arbeit)

Tägliche Nutzungszeiten	7:00 bis 16:00 Uhr
Jährliche Nutzungszeiten	250 d/a
Tägliche Betriebszeiten RLT und Heizung	6:00 bis 16:00 Uhr
Raum-Soll-Temperatur Heizung	17°C
Minimaltemperatur Auslegung Heizung	15°C
Temperaturabsenkung reduzierter Betrieb	4 K
Mindestaußenluftvolumenstrom	10 m ³ /(h m ²)
Wartungswert der Beleuchtungsstärke	300 lx
Höhe der Nutzebene	0,8 m
Personenbelegung	20 m ² /Person
Interne Wärmequellen Personen	8 Vollnutzungsstunden mit 5 W/m ²
Interne Wärmequellen Arbeitshilfen	8 Vollnutzungsstunden mit 35 W/m ²

Abbildung 7-3: DIN-Nutzungsprofil der ECB-Musterhalle wie im ECB-Projekt definiert [Bay11]

Figure 7-3: DIN usage profile for ECB reference hall as defined by the ECB project [Bay11]

In der folgenden Tabelle 7-1 sind die Parameter der betrachteten Industriehalle zusammenfassend dargestellt. Die Raumtemperatur liegt dabei bei 17 °C mit einer Nachtabenkung auf 13 °C.

Komponente	Wert	Einheit	Kommentar
Baukörper			
Breite	60,0	m	
Tiefe	20,0	m	
Höhe	6,0	m	
Flächen			
Grund/Dachfläche, jeweils	1 200	m ²	
Seitenflächen N/S, jeweils	360	m ²	
Seitenflächen O/W, jeweils	120	m ²	
Fläche gegen Umgebungsluft	2 160	m ²	
Volumen Baukörper	7 740	m ³	
Kollektorfläche			
Dach	1 200	m ²	
Süd	360	m ²	
Ost	120	m ²	
West	120	m ²	
Summe	1 800	m ²	
Ausrichtung - Fassade Süd			
Anstellwinkel	90	°	
Azimut	0	°	
Ausrichtung - Fassade West			
Anstellwinkel	90	°	
Azimut	90	°	
Ausrichtung - Fassade Ost			
Anstellwinkel	90	°	
Azimut	-90	°	
Ausrichtung - Dach			
Anstellwinkel	0	°	Flachdach
Azimut	0	°	Flachdach
Bauphysik			
U-Wert _{ges}	0,36	W/(m ² .K)	inkl. Wärmebrückenzuschlag
Quellen			
interne Quelle 01	6,00	W/m ² NF	Licht: Natriumdampf
interne Quelle 02	40,00	W/m ² NF	35 Personen 5 Arbeitshilfen
Außenluftwechsel			
Außenluftwechselrate	1,60	h ⁻¹	inkl. Infiltration
Luftvolumenstrom	12 384	m ³ /h	
spez.	10,32	m ³ /(h.m ²)	

Komponente	Wert	Einheit	Kommentar
Außenluftwechselrate, reduziert	0,20	h ⁻¹	Infiltration
Luftvolumenstrom, reduziert	1 548	m ³ /h	
spez., reduziert	1,29	m ³ /(h.m ²)	

Tabelle 7-1: Wesentliche Parameter und Größen der betrachteten Industriehalle

Table 7-1: Important parameters and dimensions of the examined industrial building

Zusammenfassend werden die bauphysikalischen Parameter sowie die Fläche der Kollektorfelder in der folgenden Tabelle 7-2 dargestellt.

Geometrie		Bauphysik	Luftwechsel	Kollektor	Raumsolltemperatur
Grundfläche (60m x 20m)	Volumen	U-Wert inkl. Wärmebrücken	inkl. Infiltration (0,2)	Fläche	reduzierter Betrieb mit Absenkung auf 13°C
m ²	m ³	W/(m ² .K)	h ⁻¹	m ²	°C
1200	7740	0,36	1,60	1800	17

Tabelle 7-2: Charakteristika der berechneten Industriehalle und bauphysikalische Parameter

Table 7-2: Characteristics of the examined industrial building and important buildings physics

Die darin enthaltenen Betriebszeiten werden mittels für eine Woche stündlich aufgelösten Fahrplänen in die Berechnung integriert. Die Fahrpläne sind in der folgenden Tabelle 7-3 zusammenfassend dargestellt.

Interne Wärmequellen		
Arbeitszeit	Beleuchtung	Maschinen
7 Uhr		+ Personal
16 Uhr	(Arbeitszeit)	(Arbeitszeit)
h	W/m ²	W/m ²
9	6,0	40,0

Tabelle 7-3: Betriebszeiten und Aufteilung der internen Wärmegewinne in der Industriehalle

Table 7-3: Operating hours and distribution of heat gains in the industrial building

Damit ergibt sich eine energetische Charakterisierung der untersuchten Industriehalle aus dem obigen Nutzungsprofil laut DIN, den Hallenmaßen und bauphysikalischen Größen.

Für die beiden betrachteten Standorte Hamburg (HH) sowie München (MUN) wurde entsprechend der Beschreibung in Kapitel 7.1 jeweils ein Standarddatensatz (TMY) sowie ein Minimal (MIN) und Maximal (MAX) Datensatz in die Berechnung integriert. Im Folgenden werden die Ergebnisse für den Heizwärme- sowie Kühlbedarf für die insgesamt sechs Szenarien aufgezeigt. In den folgenden Tabellen wird der Kühlenergiebedarf als eine bilanzielle Größe berechnet. In diesen Bedarf gehen die über den Außenluftwechsel, die Bauphysik sowie den internen Lasten generierten Kühlmengen ein. Der ausgewiesene Kühlbedarf durch interne Quellen stellt den gesamten, theoretisch anfallenden Kühlbedarf durch interne Lasten dar. Diese internen Lasten decken jedoch bilanziell teilweise auch den Heizwärmebedarf, so

dass sich in der Bilanz eine in den Tabellen entsprechend ausgewiesene deutlich geringere Summe für den Kühlbedarf einstellt.

Heizwärmebedarf				Kühlbedarf			
Bauphysik	Luftwechsel	Summe	Summe inkl. interne Quellen MWh	Bauphysik	Luftwechsel	Interne Wärmequellen	Summe inkl. interne Quellen MWh
	inkl. Infiltration						
MWh	MWh	MWh	MWh	MWh	MWh	MWh	MWh
33	84	118	54	2	10	130	44

Tabelle 7-4: Wetterdatensatz HH TMY: Aus den Charakteristika der Industriehalle sowie deren Nutzungskonzept berechnete an Heizwärme- und Kühlbedarf. Es erfolgt eine Nachtabsenkung zwischen 16 Uhr und 7 Uhr mit keinem mechanischen Luftwechsel.

Table 7-4: Weather data HH TMY: Heating and cooling demand based on the characteristics of the industrial building and its usage concept. There is a night-time reduction between 16 h and 07 h with no mechanic air exchange.

Heizwärmebedarf				Kühlbedarf			
Bauphysik	Luftwechsel	Summe	Summe inkl. interne Quellen MWh	Bauphysik	Luftwechsel	Interne Wärmequellen	Summe inkl. interne Quellen MWh
	inkl. Infiltration						
MWh	MWh	MWh	MWh	MWh	MWh	MWh	MWh
45	107	152	77	1	6	130	27

Tabelle 7-5: Wetterdatensatz HH TMY-MIN: Aus den Charakteristika der Industriehalle sowie deren Nutzungskonzept berechnete an Heizwärme- und Kühlbedarf. Es erfolgt eine Nachtabsenkung zwischen 16 Uhr und 7 Uhr mit keinem mechanischen Luftwechsel.

Table 7-5: Weather data HH TMY-MIN: Otherwise as in Table 7-4

Heizwärmebedarf				Kühlbedarf			
Bauphysik	Luftwechsel	Summe	Summe inkl. interne Quellen MWh	Bauphysik	Luftwechsel	Interne Wärmequellen	Summe inkl. interne Quellen MWh
	inkl. Infiltration						
MWh	MWh	MWh	MWh	MWh	MWh	MWh	MWh
23	62	86	36	3	17	130	63

Tabelle 7-6: Wetterdatensatz HH TMY-MAX: Aus den Charakteristika der Industriehalle sowie deren Nutzungskonzept berechnete an Heizwärme- und Kühlbedarf. Es erfolgt eine Nachtabsenkung zwischen 16 Uhr und 7 Uhr mit keinem mechanischen Luftwechsel.

Table 7-6: Weather data HH TMY-MAX: Otherwise as in Table 7-4

Heizwärmebedarf				Kühlbedarf			
Bauphysik	Luftwechsel	Summe	Summe inkl. interne Quellen MWh	Bauphysik	Luftwechsel	Interne Wärmequellen	Summe inkl. interne Quellen MWh
	inkl. Infiltration						
MWh	MWh	MWh	MWh	MWh	MWh	MWh	MWh
38	90	129	67	3	15	130	55

Tabelle 7-7: Wetterdatensatz MUN TMY: Aus den Charakteristika der Industriehalle sowie deren Nutzungskonzept berechnete an Heizwärme- und Kühlbedarf. Es erfolgt eine Nachtabsenkung zwischen 16 Uhr und 7 Uhr mit keinem mechanischen Luftwechsel.

Table 7-7: Weather data MUN TMY: Otherwise as in Table 7-4

Heizwärmebedarf				Kühlbedarf			
Bauphysik	Luftwechsel	Summe	Summe inkl. interne Quellen	Bauphysik	Luftwechsel	Interne Wärmequellen	Summe inkl. interne Quellen
MWh	inkl. Infiltration MWh	MWh	MWh	MWh	inkl. Infiltration MWh	MWh	MWh
50	115	165	92	1	7	130	36

Tabelle 7-8: Wetterdatensatz MUN TMY-MIN: Aus den Charakteristika der Industriehalle sowie deren Nutzungskonzept berechnete an Heizwärme- und Kühlbedarf. Es erfolgt eine Nachtabsenkung zwischen 16 Uhr und 7 Uhr mit keinem mechanischen Luftwechsel.

Table 7-8: Weather data MUN TMY-MIN: Otherwise as in Table 7-4

Heizwärmebedarf				Kühlbedarf			
Bauphysik	Luftwechsel	Summe	Summe inkl. interne Quellen	Bauphysik	Luftwechsel	Interne Wärmequellen	Summe inkl. interne Quellen
MWh	inkl. Infiltration MWh	MWh	MWh	MWh	inkl. Infiltration MWh	MWh	MWh
28	69	97	46	5	26	130	80

Tabelle 7-9: Wetterdatensatz MUN TMY-MAX: Aus den Charakteristika der Industriehalle sowie deren Nutzungskonzept berechnete an Heizwärme- und Kühlbedarf. Es erfolgt eine Nachtabsenkung zwischen 16 Uhr und 7 Uhr mit keinem mechanischen Luftwechsel.

Table 7-9: Weather data MUN TMY-MAX: Otherwise as in Table 7-4

Es zeigt sich dabei, dass der Heizwärmebedarf signifikant von dem eingesetzten Wetterdatensatz des Standortes abhängig ist. In den weiteren Untersuchungen soll insbesondere darauf eingegangen werden, wie der Ertrag des thermischen Kollektorfeldes mit einem sich ändernden Heizwärmebedarf korreliert.

In den Berechnungen werden drei Kollektortypen betrachtet. Dies sind die Baumuster SEA 2.1, SEA 2.2 und SEA 2.3. Die Charakteristika, wie sie für die Berechnung eingesetzt werden sind in der folgenden Tabelle 7-10 aufgestellt.

Typ/Parameter	F'	KΘ _b (IAM)	η ₀	a ₁	a ₂	KΘ _d (IAM-D)
-/Einheit	-	-	-	W/(m ² K)	W/(m ² K)	-
SEA 2.1	0,377	0,950	0,358	15,365	0,000	0,850
SEA 2.2	0,729	0,950	0,596	8,634	0,000	0,850
SEA 2.3	0,777	0,950	0,635	8,963	0,000	0,850

Tabelle 7-10: Parameter der betrachteten Kollektortypen

Table 7-10: Parameters of the examined collector types

Die Konstruktion der Kollektoren sowie das Vorgehen, welches zu der dargestellten messtechnischen Charakterisierung der Kollektoren führt, werden in den vorangegangenen Kapiteln eingehend dargestellt.

7.5 Energienutzungskonzepte Energy Utilisation Concepts and Case Studies

Für eine umfassende Bewertung der Kollektorkonstruktionen werden diese in unterschiedlichen Nutzungsszenarien betrachtet. Dabei werden die im Folgenden beschriebenen Systemkonzepte in das Berechnungstool integriert. Die Varianten geben dabei an, mit welcher Technologie der zusätzliche Heizwärmebedarf erzeugt wird, der nach dem Einbinden der solarthermisch erzeugten Wärme noch erforderlich ist.

7.5.1 Nutzungskonzept Heizen Utilisation concept heating

Variante 1: Gaskessel als sekundärer Wärmeerzeuger

- Systemkonzept 1a:
Luftkollektor saugt Außenluft an und erwärmt diese zur direkten Beheizung der Industriehalle
- Systemkonzept 1b:
Wie 1a, jedoch wird hier solarthermisch erzeugte, überschüssige Wärme über einen thermischen Speicher geführt und dann zu einem späteren Zeitpunkt einer Nutzung zur Beheizung zugeführt

Variante 2: Luft-Wärmepumpe als sekundärer Wärmeerzeuger

- Systemkonzept 2a:
Luftkollektor saugt Außenluft an und erwärmt diese zur direkten Beheizung der Industriehalle
- Systemkonzept 2b:
Wie 2a, jedoch wird hier solarthermisch erzeugte, überschüssige Wärme über einen thermischen Speicher geführt und dann zu einem späteren Zeitpunkt einer Nutzung zur Beheizung zugeführt

Variante 3: Quellanhebung der Luft-Wärmepumpe als sekundärer Wärmeerzeuger

- Systemkonzept 3a:
Luftkollektor saugt Außenluft an und erwärmt diese zur Quellanhebung der Luft-Wärmepumpe
- Systemkonzept 3b:
Wie 3a, jedoch wird hier solarthermisch erzeugte, überschüssige Wärme über einen thermischen Speicher geführt und dann zu einem späteren Zeitpunkt einer Nutzung zur Quellanhebung der Luft-Wärmepumpe zugeführt

7.5.2 Nutzungskonzept Kühlen Utilisation concept cooling

In dem hier betrachteten Systemkonzept saugt der Luftkollektor Außenluft an und erwärmt diese zur Einbindung in eine einstufige Absorptionskältemaschine. Dabei erfolgt keine Zwischenspeicherung von thermischer Energie.

7.6 Ergebnisse der Systemsimulation Results of the system simulation

Im Folgenden werden die mittels des Berechnungstools LuKoCalc ermittelten Ergebnisse für eine systemische Betrachtung der entwickelten Luftkollektoren für einen Einsatz in der ECB-Musterhalle dargestellt. Dabei wird für jeden der betrachteten Kollektoren ein separater Abschnitt aufgebaut. Die systemische Betrachtung ist Grundlage für eine Bewertung von Kosten-Nutzeneffekten.

7.6.1 Einstrahlung auf die Hallenflächen Irradiation for the surface areas of the industrial building

In den folgenden Abbildung 7-4 bis 7-9 wird die flächenspezifisch eingestrahelte solare Energie – nicht die durch SEA gewonnene thermische Energie – für die vier Umfassungsflächen der betrachteten Industriehalle für jeden Monat eines Jahres für den Standort Hamburg und München dargestellt.

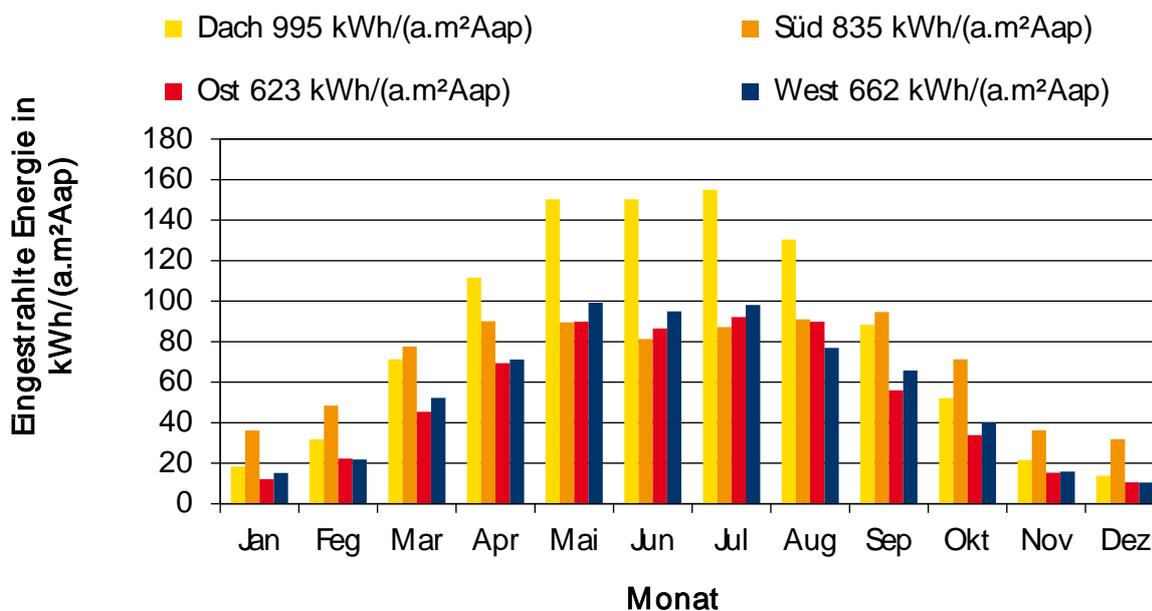


Abbildung 7-4: Eingestrahelte solare Energie auf vier Umfassungsflächen der betrachteten Industriehalle mit dem Wetterdatensatz für HH TMY

Figure 7-4: Irradiated solar energy for four surface areas of the observed industrial building with weather data HH TMY

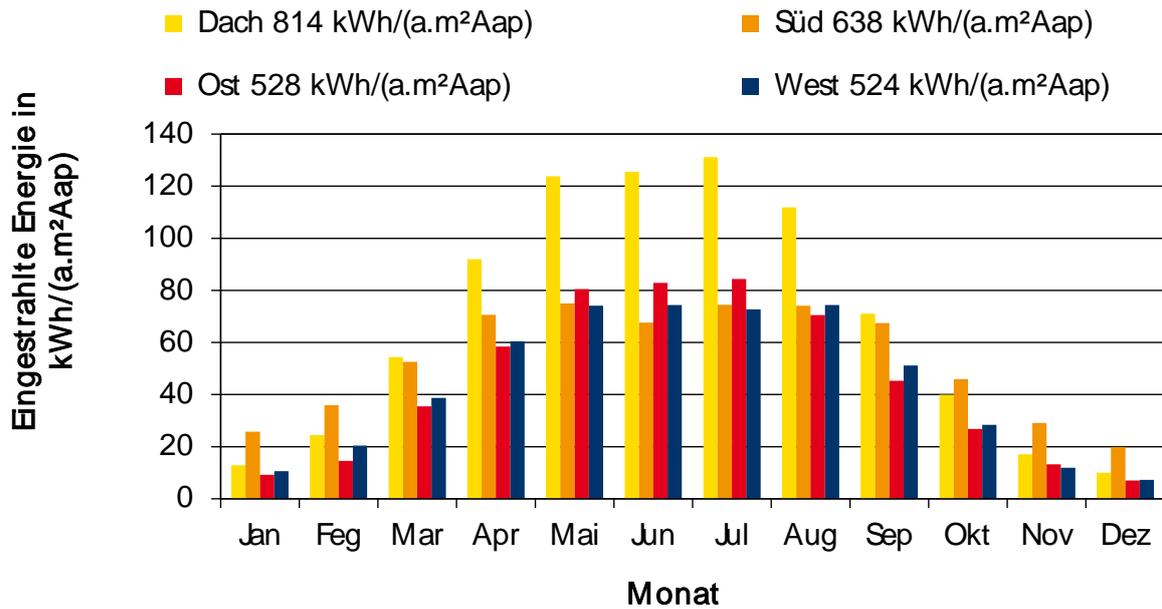


Abbildung 7-5: Eingestrahlte solare Energie auf vier Umfassungsflächen der betrachteten Industriehalle mit dem Wetterdatensatz für HH TMY-MIN

Figure 7-5: Irradiated solar energy for four surface areas of the observed industrial building with weather data HH TMY-MIN

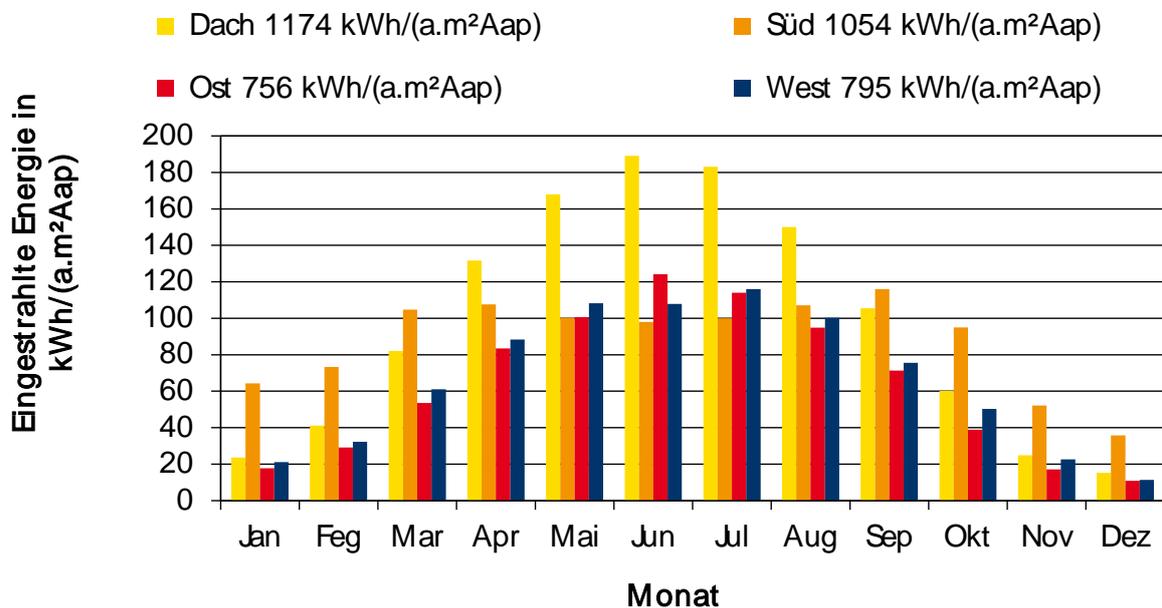


Abbildung 7-6: Eingestrahlte solare Energie auf vier Umfassungsflächen der betrachteten mit dem Wetterdatensatz für HH TMY-MAX

Figure 7-6: Irradiated solar energy for four surface areas of the observed industrial building with weather data HH TMY-MAX

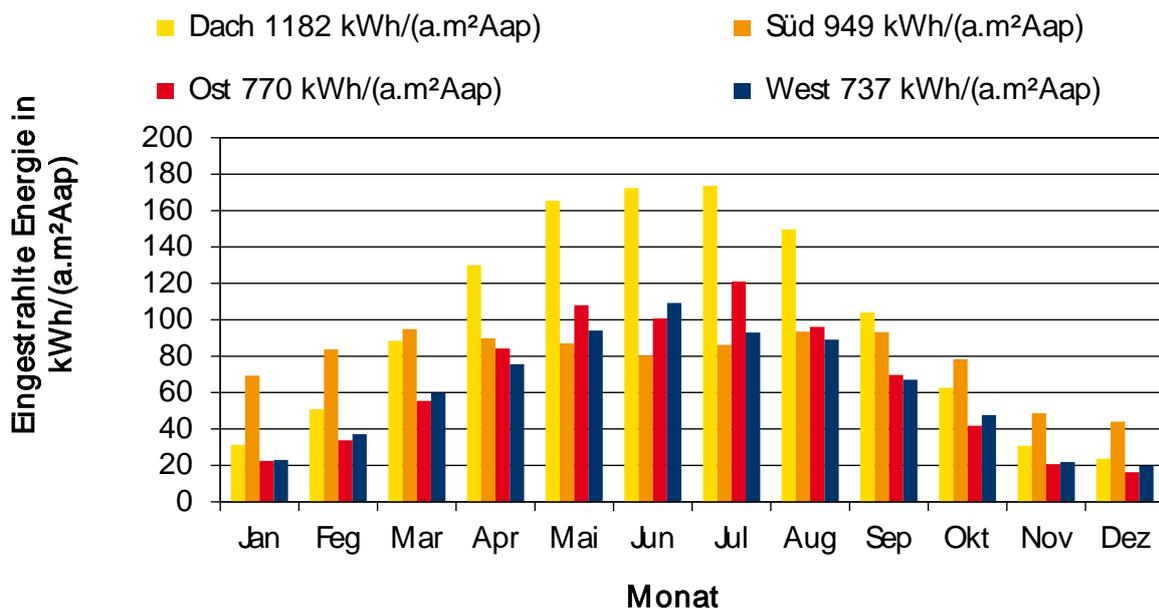


Abbildung 7-7: Eingestrahlte solare Energie auf vier Umfassungsflächen der betrachteten Industriehalle mit dem Wetterdatensatz für MUN TMY.

Figure 7-7: Irradiated solar energy for four surface areas of the observed industrial building with weather data MUN TMY

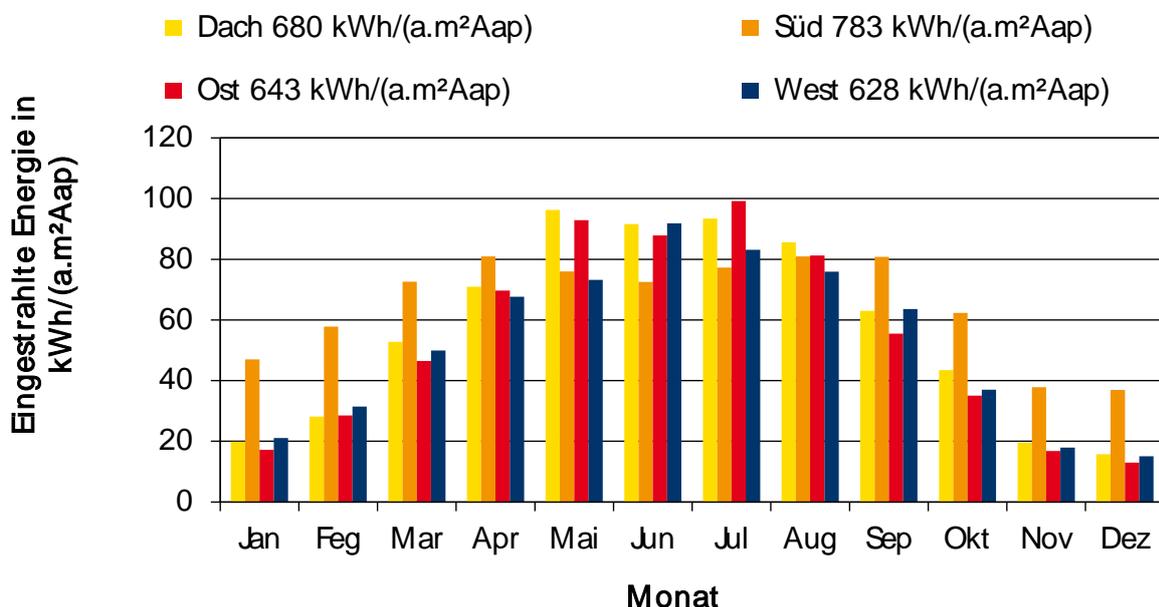


Abbildung 7-8: Eingestrahlte solare Energie auf vier Umfassungsflächen der betrachteten mit dem Wetterdatensatz für MUN TMY-MIN.

Figure 7-8: Irradiated solar energy for four surface areas of the observed industrial building with weather data MUN TMY-MIN

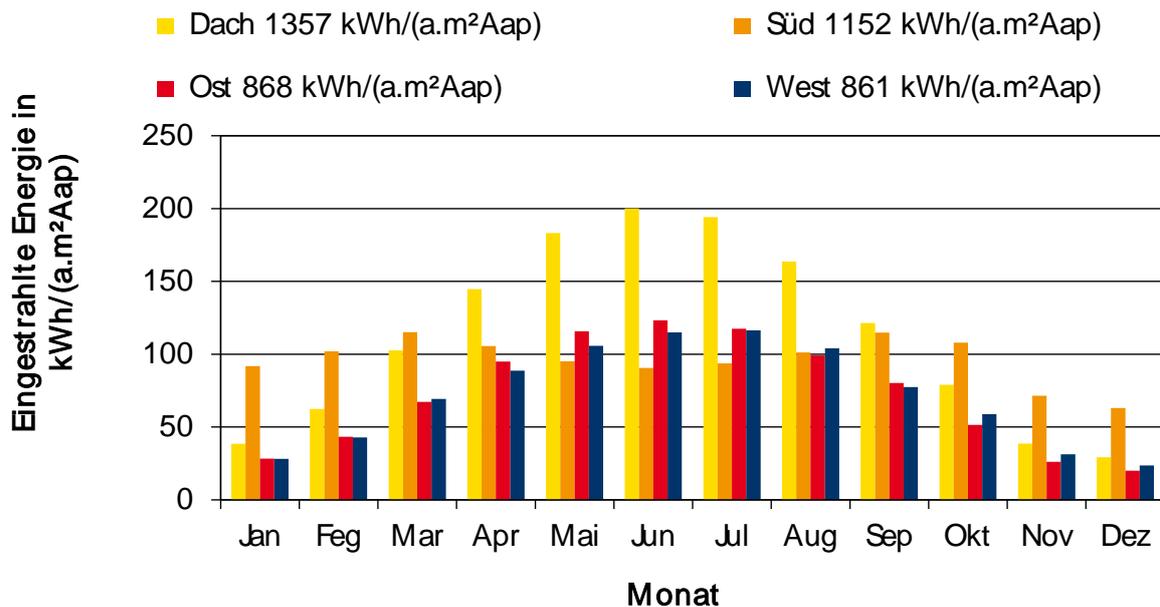


Abbildung 7-9: Eingestrahlte solare Energie auf vier Umfassungsflächen der betrachteten Industriehalle mit dem Wetterdatensatz für MUN TMY-MAX

Figure 7-9: Irradiated solar energy for four surface areas of the observed industrial building with weather data HH TMY-MAX

Zwischenfazit

Es zeigt sich dabei, dass die eingestrahlte Energie für die Dachfläche im Vergleich zu den senkrechten Fassadenflächen der Halle einen unterschiedlichen Verlauf über die Monate eines Jahres einnimmt. Die monatlich eingestrahlt Energiemengen sind für die nach Süden ausgerichtete Fassade über das Jahr betrachtet relativ konstant, während diese für die Dachfläche im Sommer deutlich größer als in der Winterzeit sind. Für eine Nutzung von eingestrahelter Energie zur Beheizung ist damit die Charakteristik der Fassadenflächen von Vorteil. Die Summe der eingestrahlt Energie kann in Abhängigkeit des verwendeten Datensatzes für einen Standort sehr große Unterschiede aufweisen. Diese Unterschiede gelten in etwa mit dem gleichen Größenverhältnis für alle dargestellten Monate, unabhängig, ob es sich um eine Heizperiode handelt oder nicht.

7.6.2 Ergebnisse SEA 2.1 Results for SEA 2.1

Der Kollektor SEA 2.1 ist nicht abgedeckt und weist damit die mit den anderen untersuchten Kollektoren geringste thermische Effizienz auf. Im System ergeben sich die im Folgenden dargestellten Charakteristiken.

7.6.2.1 Energieertrag über den Hallenflächen Energy yields for the building's surface areas

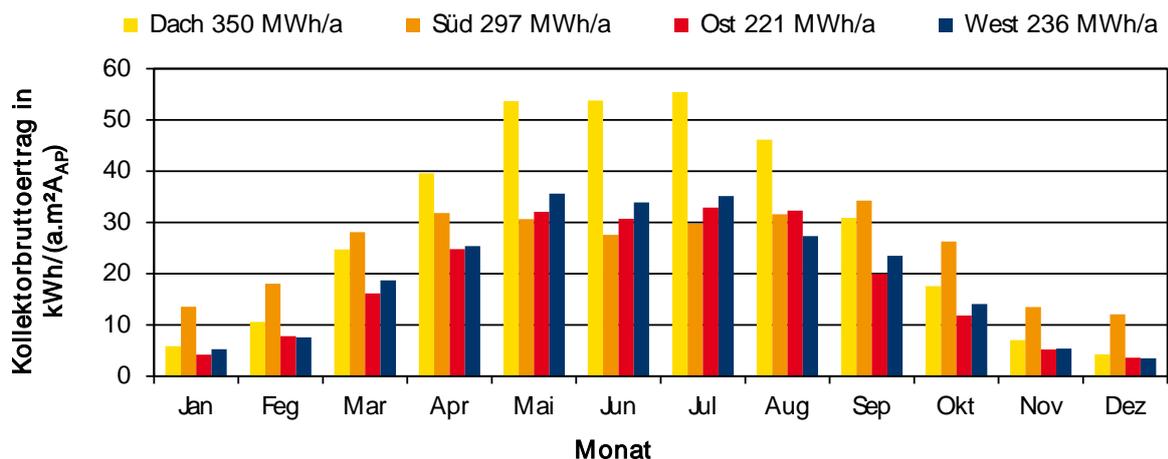


Abbildung 7-10: Kollektorbruttoertrag über die vier Umfassungsflächen der betrachteten Industriehalle mit dem Wetterdatensatz für HH TMY

Figure 7-10: Collector energy yields for the four surface areas of the observed industrial building with weather data of HH TMY

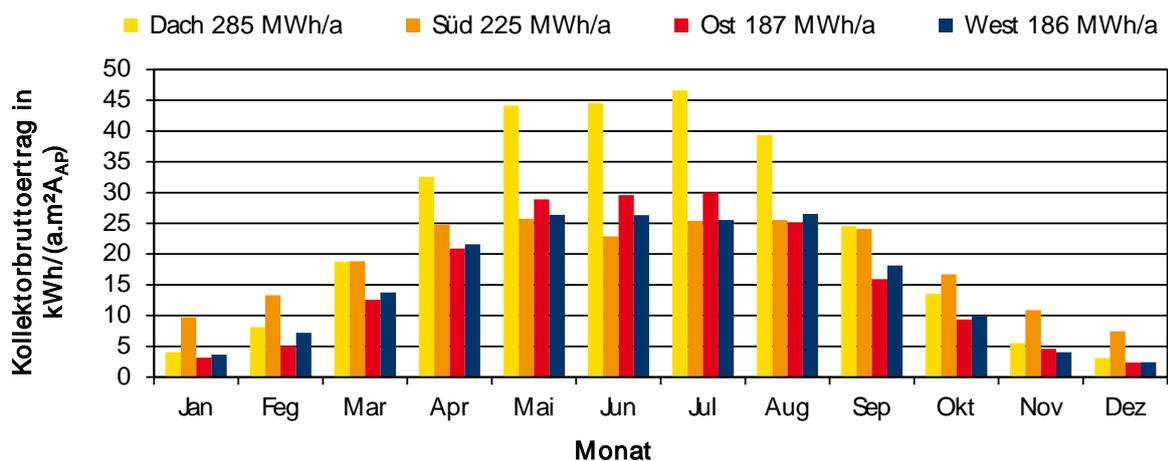


Abbildung 7-11: Kollektorbruttoertrag über die vier Umfassungsflächen der betrachteten Industriehalle mit dem Wetterdatensatz für HH TMY-MIN

Figure 7-11: As in Figure 7-10 with weather data for HH TMY-MIN

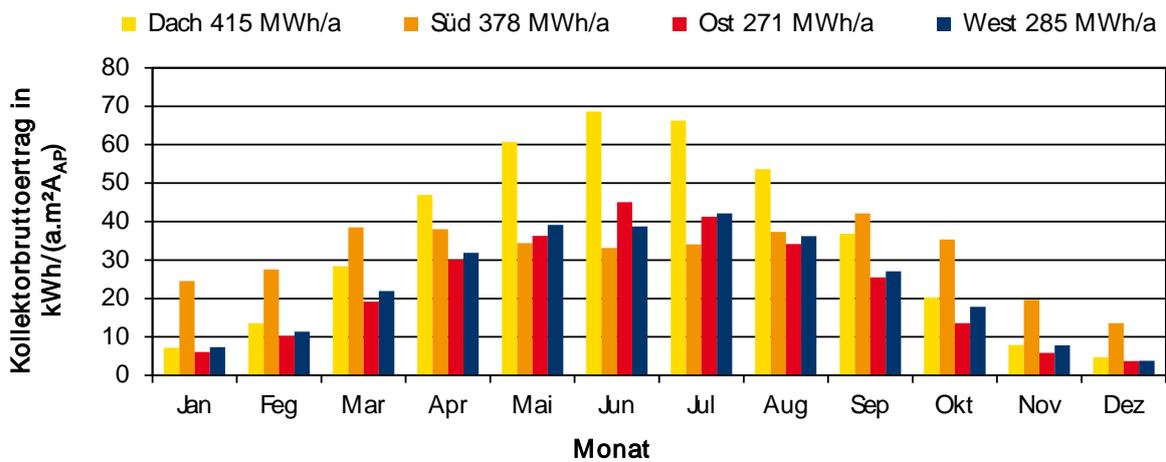


Abbildung 7-12: Kollektorbruttoertrag über die vier Umfassungsflächen der betrachteten Industriehalle mit dem Wetterdatensatz für HH TMY-MAX

Figure 7-12: As in Figure 7-10 with weather data for HH TMY-MAX

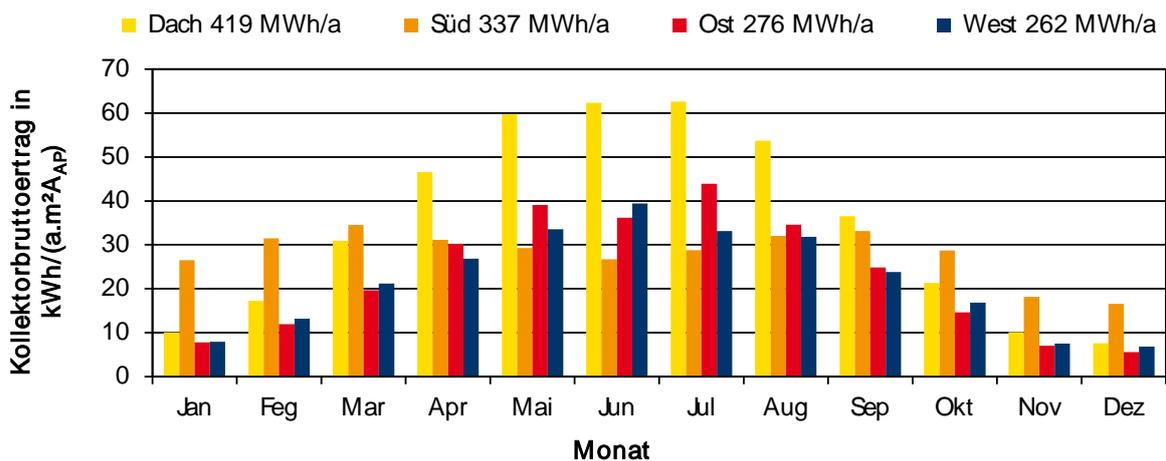


Abbildung 7-13: Kollektorbruttoertrag über die vier Umfassungsflächen der betrachteten Industriehalle mit dem Wetterdatensatz für MUN TMY

Figure 7-13: As in Figure 7-10 with weather data for MUN TMY

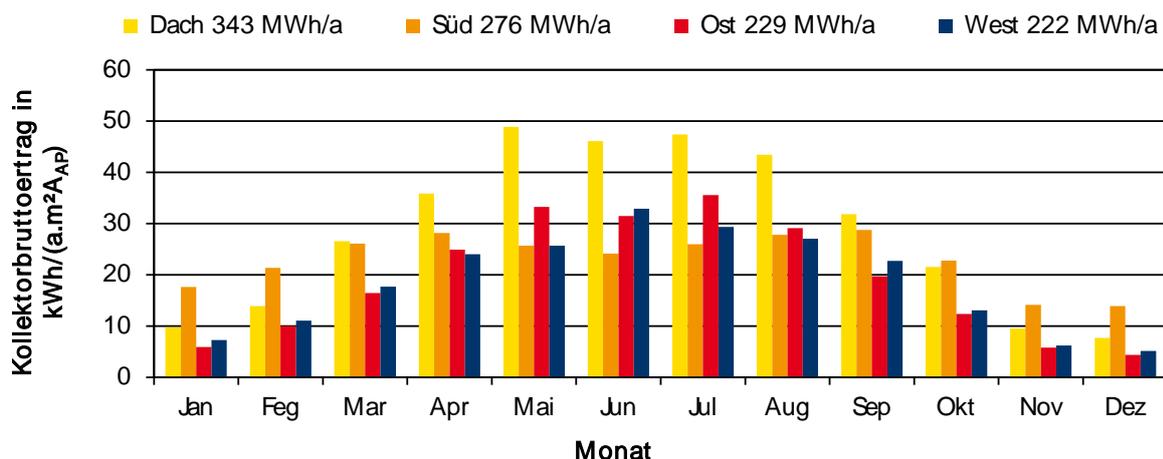


Abbildung 7-14: Kollektorbruttoertrag über die vier Umfassungsflächen der betrachteten Industriehalle mit dem Wetterdatensatz für MUN TMY-MIN

Figure 7-14: As in Figure 7-10 with weather data for MUN TMY-MIN

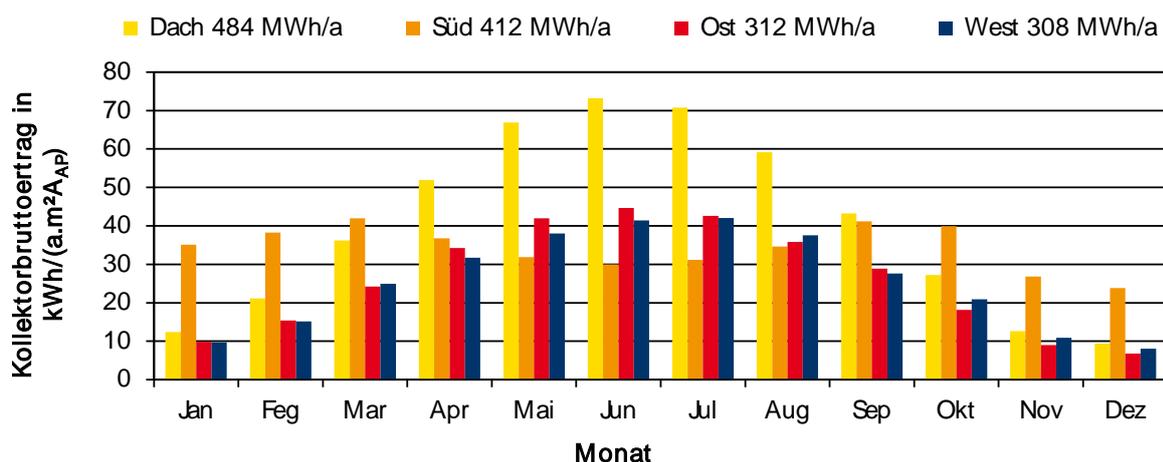


Abbildung 7-15: Kollektorbruttoertrag über die vier Umfassungsflächen der betrachteten Industriehalle mit dem Wetterdatensatz für MUN TMY-MAX

Figure 7-15: As in Figure 7-10 with weather data for MUN TMY-MAX

Zwischenfazit

Der dargestellte Bruttokollektorertrag unterliegt nicht nur der in Kapitel 7.6.1 aufgezeigten Abhängigkeit von der eingestrahlenen Energie, sondern auch noch von den dabei jeweils anliegenden Außenlufttemperaturen. Grundsätzlich zeigt sich eine, bezogen auf den monatlichen Einstrahlungsverlauf, ähnliche Charakteristik: Die nach Süden ausgerichtete Fassadenfläche zeigt einen fast konstanten Bruttokollektorertrag, der im Sommer sogar etwas geringer als im Winter ausfällt. Dies kommt dem außenluftbedingten Heizwärmebedarf der Halle sehr entgegen, wenn die solar erzeugte Wärme für kurze Zeiträume (insbesondere Tag-Nacht) zwischengespeichert werden kann. Hierfür sind Analysen für die systemtechnische Einbindung des Bruttokollektorertes erforderlich, bei der auch thermische Speicher in die Betrachtung integriert werden müssen.

7.6.2.2 Bilanz Nutzenergie Beheizung Balance of energy utilisation for heating

Kollektorfeld	solarer Deckungsanteil				
	Beheizung direkt	Beheizung mittels Speicher	Prozesswärme optional	ohne Speicher	mit Speicher
Ertrag maximal möglich MWh	MWh	MWh	MWh		
485	11	37	436	21 %	88 %

Tabelle 7-11: Maximal möglicher Kollektorfeldbruttoertrag (berechnet) und dessen Nutzung für die Anwendungen Beheizung und Prozesswärme mit dem Wetterdatensatz für HH TMY

Table 7-11: Maximum possible gross collector area energy yield (calculated) and its utilisation for heating and process heating with weather data of HH TMY

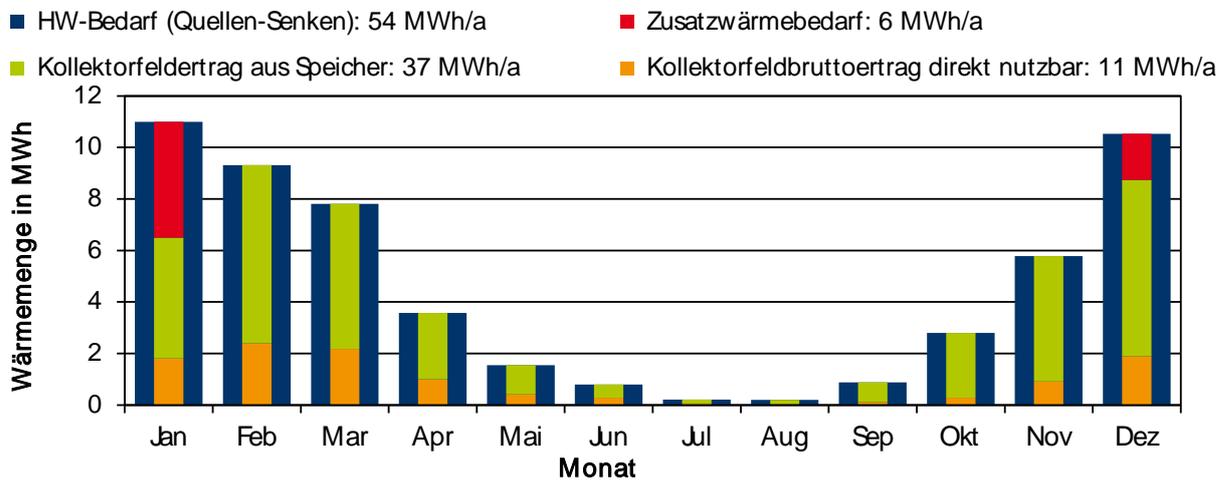


Abbildung 7-16: Monatliche Bilanzierung der Wärmemengen zur Beheizung der Industriehalle mit dem Wetterdatensatz für HH TMY

Figure 7-16: Monthly balance of heat energy amounts required for heating of the industrial building with weather data of HH TMY

Kollektorfeld	solarer Deckungsanteil				
	Beheizung direkt	Beheizung mittels Speicher	Prozesswärme optional	ohne Speicher	mit Speicher
Ertrag maximal möglich MWh	MWh	MWh	MWh		
390	16	39	335	21 %	71 %

Tabelle 7-12: Maximal möglicher Kollektorfeldbruttoertrag (berechnet) und dessen Nutzung für die Anwendungen Beheizung und Prozesswärme mit dem Wetterdatensatz für HH TMY-MIN

Table 7-12: As in Table 7-11 with weather data of HH TMY-MIN

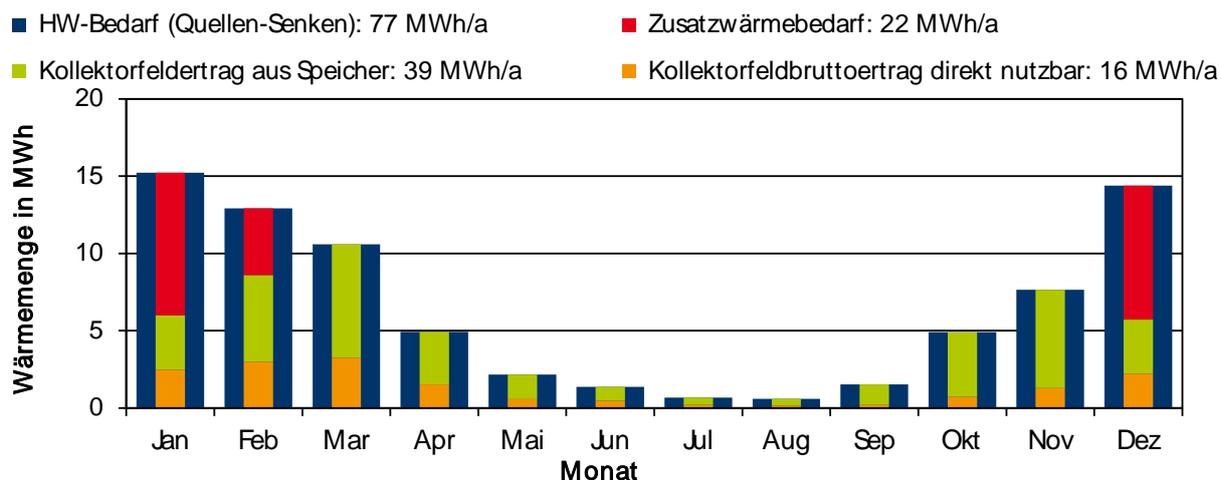


Abbildung 7-17: Monatliche Bilanzierung der Wärmemengen zur Beheizung der Industriehalle mit dem Wetterdatensatz für HH TMY-MIN

Figure 7-17: As in Figure 7-16 with weather data of HH TMY-MIN

Kollektorfeld	solarer Deckungsanteil				
	Beheizung direkt	Beheizung mittels Speicher	Prozesswärme optional	ohne Speicher	mit Speicher
Ertrag maximal möglich MWh	MWh	MWh	MWh	20 %	100 %
584	7	29	548		

Tabelle 7-13: Maximal möglicher Kollektorfeldbruttoertrag (berechnet) und dessen Nutzung für die Anwendungen Beheizung und Prozesswärme mit dem Wetterdatensatz für HH TMY-MAX

Table 7-13: As in Table 7-11 with weather data of HH TMY-MAX

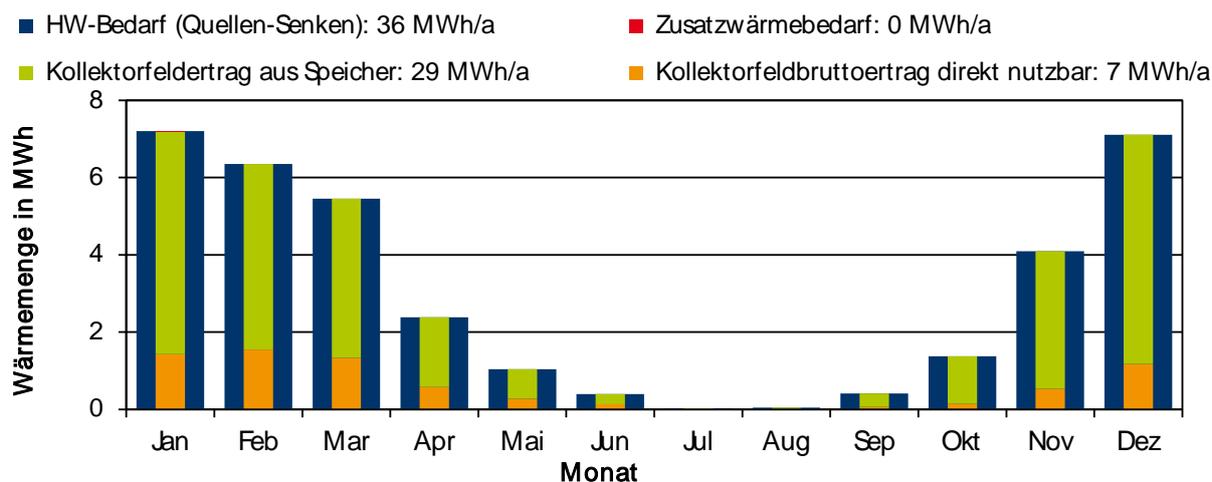


Abbildung 7-18: Monatliche Bilanzierung der Wärmemengen zur Beheizung der Industriehalle mit dem Wetterdatensatz für HH TMY-MAX

Figure 7-18: As in Figure 7-16 with weather data of HH TMY-MAX

Kollektorfeld				solarer Deckungsanteil	
Ertrag maximal möglich MWh	Beheizung direkt MWh	Beheizung mittels Speicher MWh	Prozesswärme optional MWh	ohne Speicher	mit Speicher
574	16	45	512	24 %	92 %

Tabelle 7-14: Maximal möglicher Kollektorfeldbruttoertrag (berechnet) und dessen Nutzung für die Anwendungen Beheizung und Prozesswärme mit dem Wetterdatensatz für MUN TMY

Table 7-14: As in Table 7-11 with weather data of MUN TMY

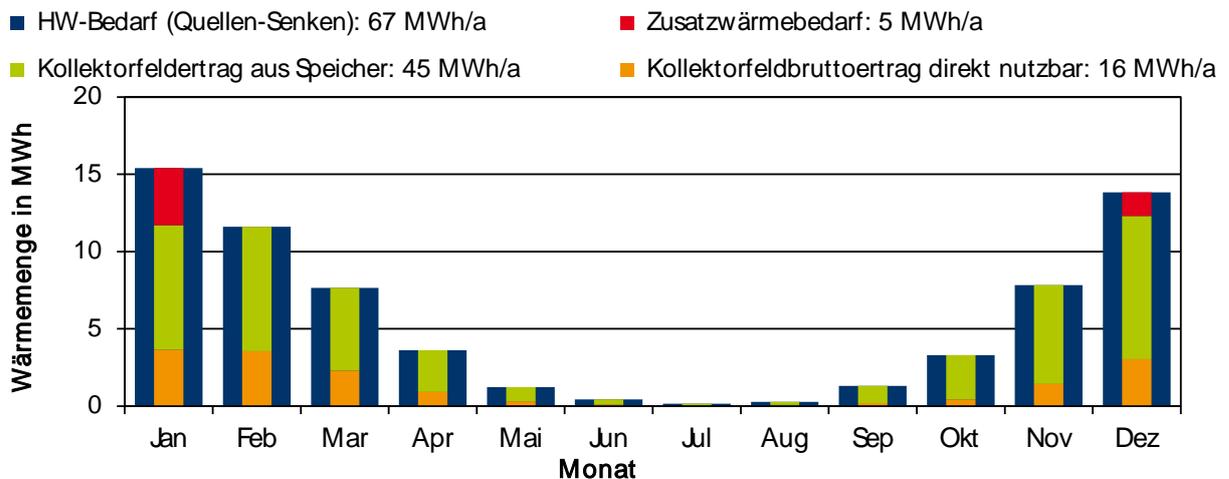


Abbildung 7-19: Monatliche Bilanzierung der Wärmemengen zur Beheizung der Industriehalle mit dem Wetterdatensatz für MUN TMY

Figure 7-19: As in Figure 7-16 with weather data of MUN TMY

Kollektorfeld				solarer Deckungsanteil	
Ertrag maximal möglich MWh	Beheizung direkt MWh	Beheizung mittels Speicher MWh	Prozesswärme optional MWh	ohne Speicher	mit Speicher
483	23	51	409	25 %	81 %

Tabelle 7-15: Maximal möglicher Kollektorfeldbruttoertrag (berechnet) und dessen Nutzung für die Anwendungen Beheizung und Prozesswärme mit dem Wetterdatensatz für MUN TMY-MIN

Table 7-15: As in Table 7-11 with weather data of MUN TMY-MIN

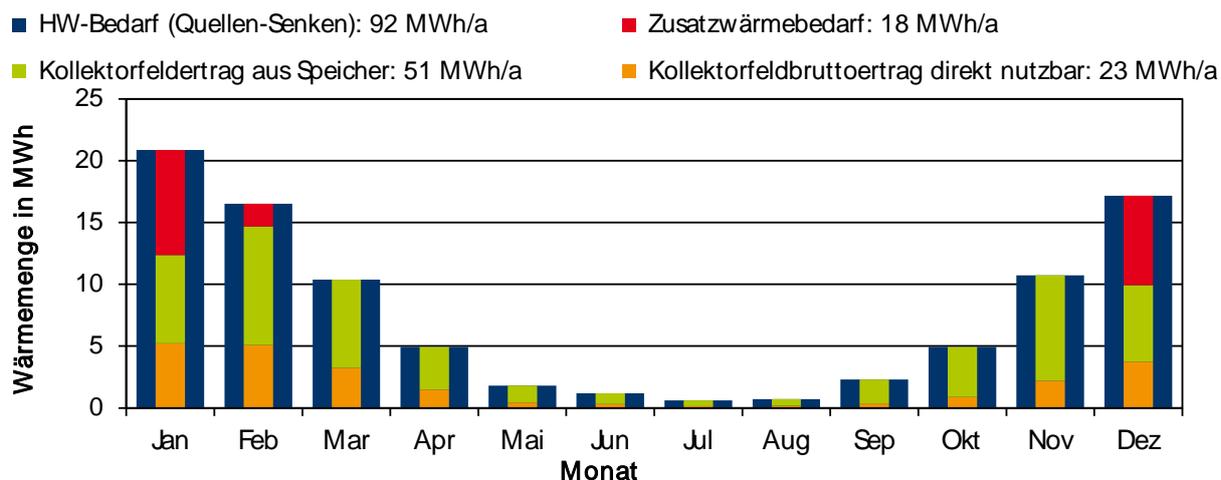


Abbildung 7-20: Monatliche Bilanzierung der Wärmemengen zur Beheizung der Industriehalle mit dem Wetterdatensatz für MUN TMY-MIN

Figure 7-20: As in Figure 7-16 with weather data of MUN TMY-MIN

Kollektorfeld	solarer Deckungsanteil				
	Beheizung direkt	Beheizung mittels Speicher	Prozesswärme optional	ohne Speicher	mit Speicher
Ertrag maximal möglich MWh	MWh	MWh	MWh	23 %	100 %
670	11	35	624		

Tabelle 7-16: Maximal möglicher Kollektorfeldbruttoertrag (berechnet) und dessen Nutzung für die Anwendungen Beheizung und Prozesswärme mit dem Wetterdatensatz für MUN TMY-MAX

Table 7-16: As in Table 7-11 with weather data of MUN TMY-MAX

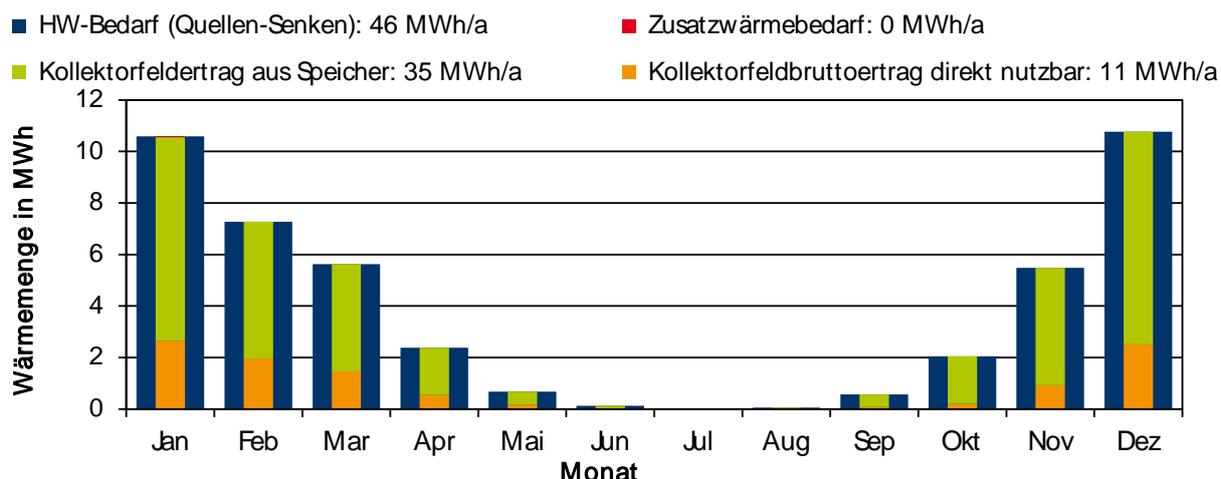


Abbildung 7-21: Monatliche Bilanzierung der Wärmemengen zur Beheizung der Industriehalle mit dem Wetterdatensatz für MUN TMY-MAX

Figure 7-21: As in Figure 7-16 with weather data of MUN TMY-MAX

Zwischenfazit

In den dargestellten Berechnungen werden die folgenden drei Zusammenhänge sehr deutlich. Erstens ist der Einsatz eines thermischen Speichers zum Erreichen von hohen solarthermischen Deckungsanteilen sehr entscheidend. Die Wärmemenge, welche über den Speicher geführt wird, leistet einen signifikanten Beitrag zum solarthermischen Deckungsanteil. Ohne einen thermischen Speicher liegt dieser bei ca. 25 %. Mit einem Speicher kann der Wärmebedarf rechnerisch komplett solar gedeckt werden. Zweitens hängt der solarthermische Deckungsanteil stark vom eingesetzten Wetterdatensatz ab. In dem Beispiel schwankt dieser von 70 % bis hin zu rechnerisch 100 %. In der Auslegung ist daher der Einsatz eines zusätzlichen Wärmeerzeugers für schlechte Wetterphasen zu berücksichtigen oder eine entsprechend hohe thermische Kapazität, die durch den solarthermischen Wärmeerzeuger beladen werden kann, bereitzuhalten. Es zeigt sich jedoch sehr deutlich, dass es, drittens, rechnerisch möglich ist, die betrachtete Industriehalle damit maßgeblich über den SEA-Kollektor 2.1 zu beheizen.

7.6.2.3 Dauerlinie Nutzenergie Beheizung Duration curve of energy utilisation for heating

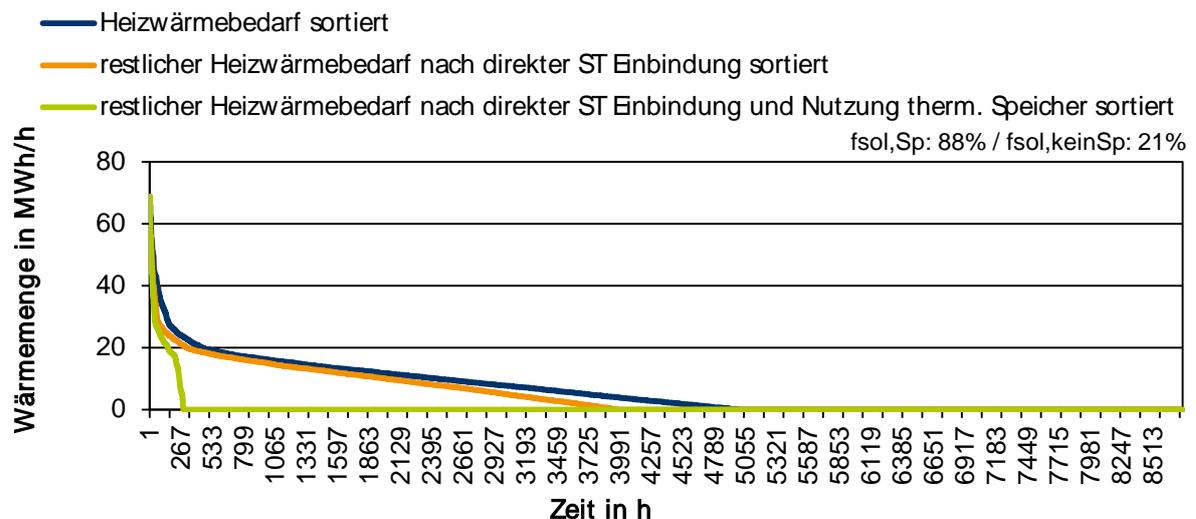


Abbildung 7-22: Geordnete Jahresdauerlinie für den Heizwärmebedarf der Industriehalle mit dem Wetterdatensatz für MUN TMY. Weiterhin ist der über einen zusätzlichen Wärmeerzeuger bereitzustellende Heizwärmebedarf nach der direkten Einbindung von solarthermischer Wärme sowie der unter Einbindung eines thermischen Speichers dargestellt.

Figure 7-22: Sorted annual duration curve for the heating demand (blue) of the industrial building with weather data of MUN TMY. Furthermore the required heating demand to be provided by a supplementary heat generator after direct input of solar thermal heat is shown (orange) as well as with the integration of a thermal storage (green).

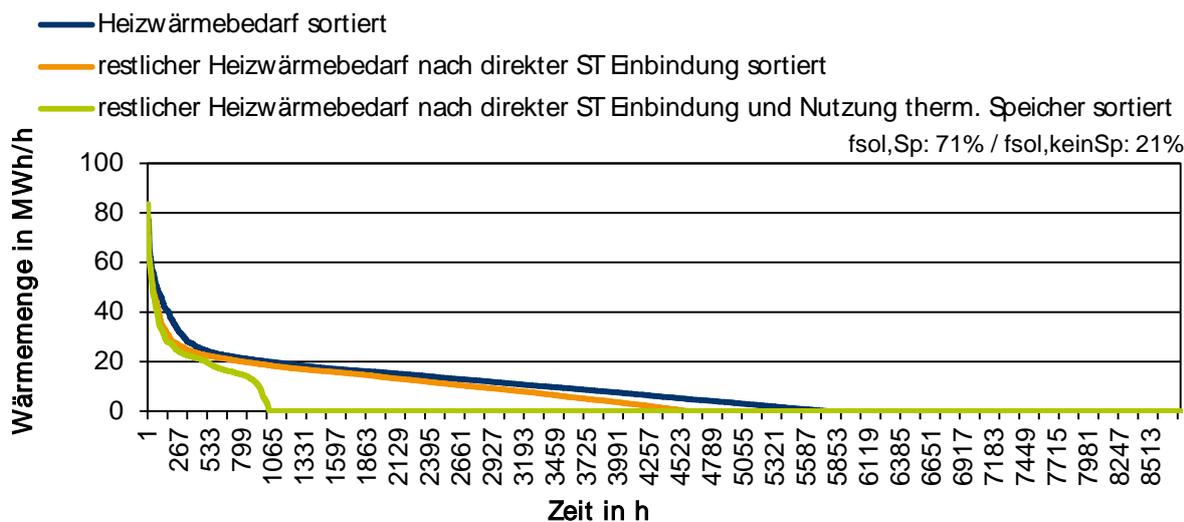


Abbildung 7-23: Geordnete Jahresdauerlinie für den Heizwärmebedarf der Industriehalle mit dem Wetterdatensatz für MUN TMY-MIN. Weiterhin ist der über einen zusätzlichen Wärmeerzeuger bereitzustellende Heizwärmebedarf nach der direkten Einbindung von solarthermischer Wärme sowie der unter Einbindung eines thermischen Speichers dargestellt.

Figure 7-23: As in Figure 7-22 with weather data of MUN TMY-MIN

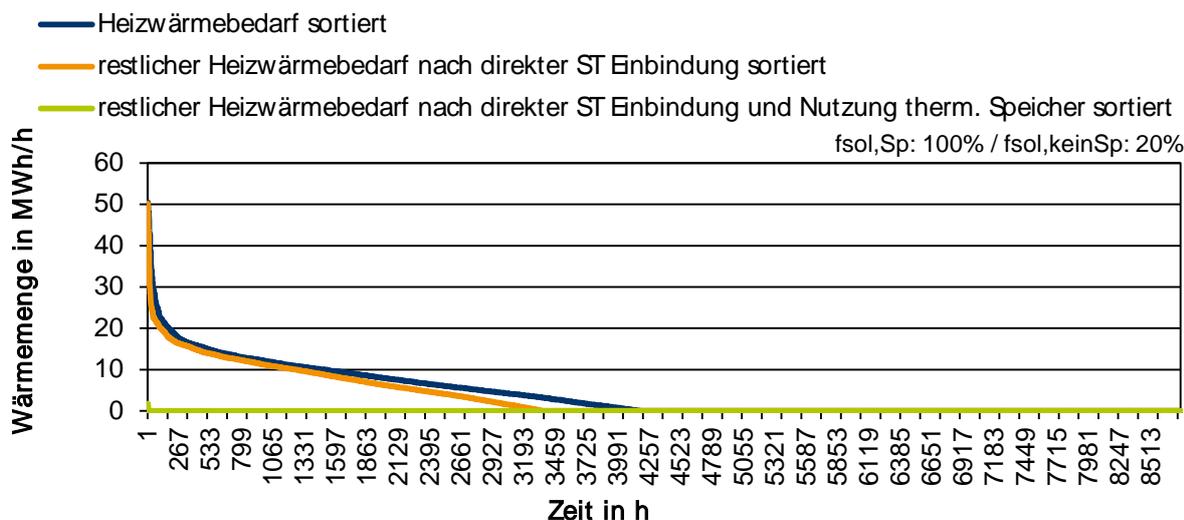


Abbildung 7-24: Geordnete Jahresdauerlinie für den Heizwärmebedarf der Industriehalle mit dem Wetterdatensatz für MUN TMY-MAX. Weiterhin ist der über einen zusätzlichen Wärmeerzeuger bereitzustellende Heizwärmebedarf nach der direkten Einbindung von solarthermischer Wärme sowie der unter Einbindung eines thermischen Speichers dargestellt.

Figure 7-24: As in Figure 7-22 with weather data of MUN TMY-MAX

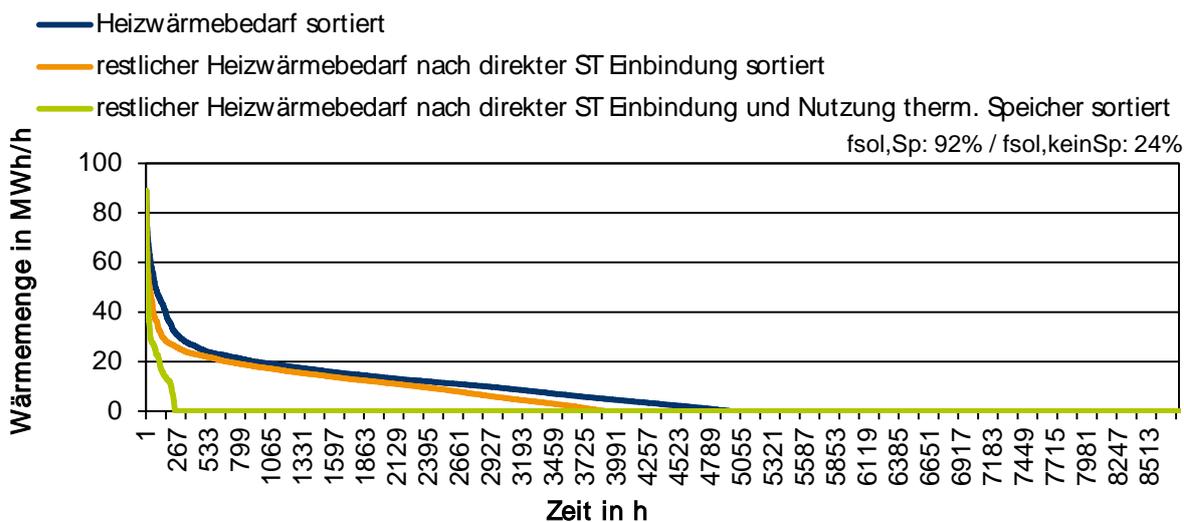


Abbildung 7-25: Geordnete Jahresdauerlinie für den Heizwärmebedarf der Industriehalle mit dem Wetterdatensatz für HH TMY. Weiterhin ist der über einen zusätzlichen Wärmeerzeuger bereitzustellende Heizwärmebedarf nach der direkten Einbindung von solarthermischer Wärme sowie der unter Einbindung eines thermischen Speichers dargestellt.

Figure 7-25: As in Figure 7-22 with weather data of HH TMY

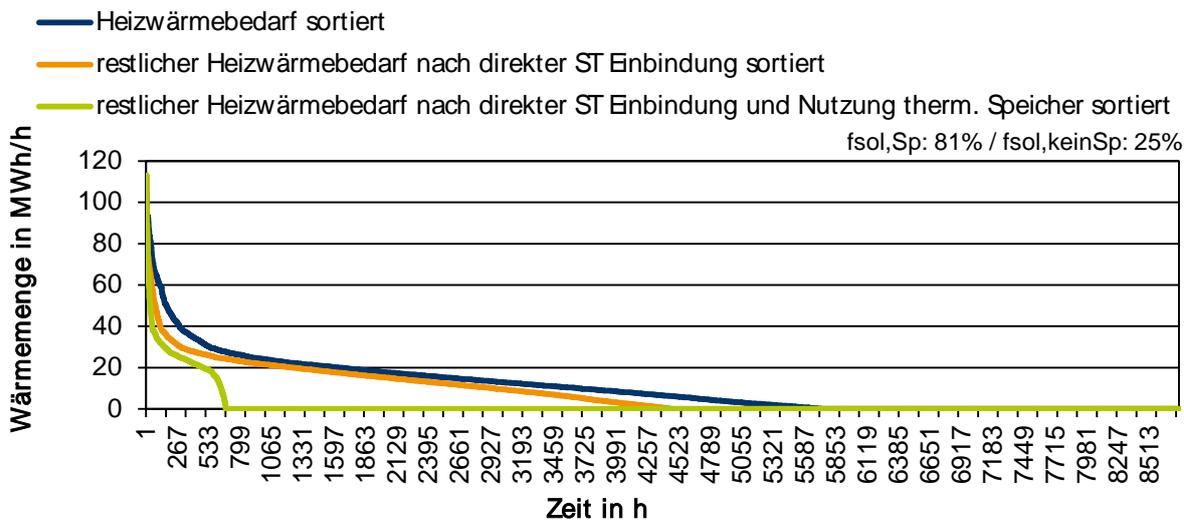


Abbildung 7-26: Geordnete Jahresdauerlinie für den Heizwärmebedarf der Industriehalle mit dem Wetterdatensatz für HH TMY-MIN. Weiterhin ist der über einen zusätzlichen Wärmeerzeuger bereitzustellende Heizwärmebedarf nach der direkten Einbindung von solarthermischer Wärme sowie der unter Einbindung eines thermischen Speichers dargestellt.

Figure 7-26: As in Figure 7-22 with weather data of HH TMY-MIN

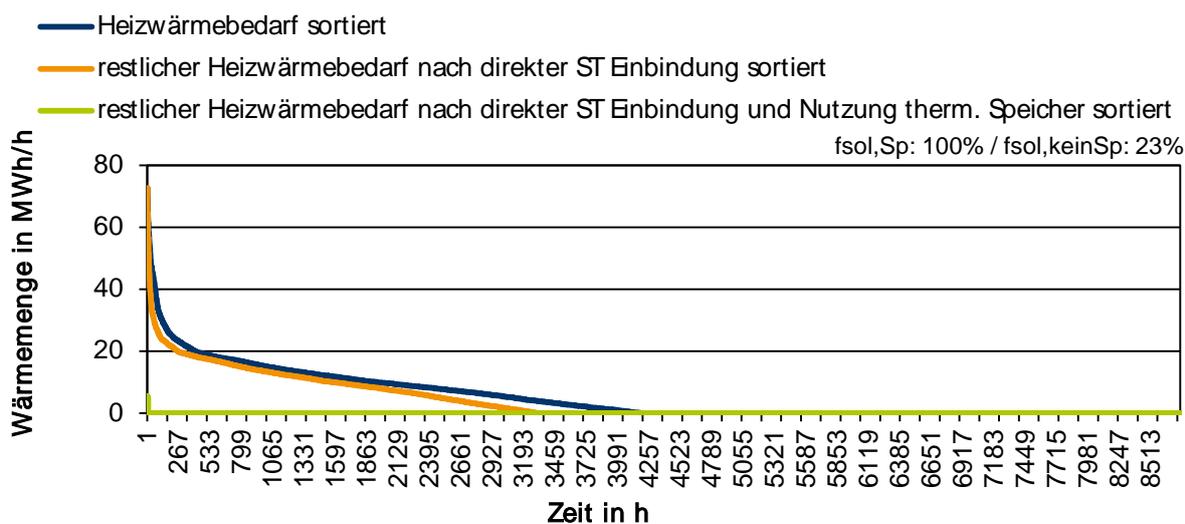


Abbildung 7-27: Geordnete Jahresdauerlinie für den Heizwärmebedarf der Industriehalle mit dem Wetterdatensatz für HH TMY-MAX. Weiterhin ist der über einen zusätzlichen Wärmeerzeuger bereitzustellende Heizwärmebedarf nach der direkten Einbindung von solarthermischer Wärme sowie der unter Einbindung eines thermischen Speichers dargestellt.

Figure 7-27: As in Figure 7-22 with weather data of HH TMY-MAX

Zwischenfazit

Mittels der dargestellten geordneten Jahresdauerlinien wird noch einmal deutlich, welche Energiemengen bei den unterschiedlichen Standorten mit ihren Wetterprofilen zu erzeugen sind. Entscheidend ist dabei die Erkenntnis, dass der Auslegungspunkt hinsichtlich der bereitzustellenden Leistung für den zusätzlichen Wärmeerzeuger vom solarthermischen Deckungsanteil unabhängig ist.

7.6.2.4 Bilanz Nutzenergie Kühlung Balance of energy utilisation for cooling

Kollektorfeld	KM	solarer Deckungsanteil	
Ertrag nutzbar	COP	Luft-Kollektor Thermische KM, einstufig Antriebstemperatur = 65 °C	ohne Speicher
MWh		MWh	
20	0,50	3	93 %

Tabelle 7-17: Kollektorfeldbruttoertrag (berechnet) zum direkten Antrieb einer einstufigen, thermischen Kältemaschine mit einer minimalen Antriebstemperatur von 65 °C und der resultierende solare Deckungsanteil am Kühlbedarf mit dem Wetterdatensatz für HH TMY

Table 7-17: Gross collector area energy yield (calculated) for direct powering a single-stage thermal cooling unit with a minimum operating temperature of 65 °C and the corresponding proportion of the cooling energy demand met by the solar energy yield based on weather data of HH TMY

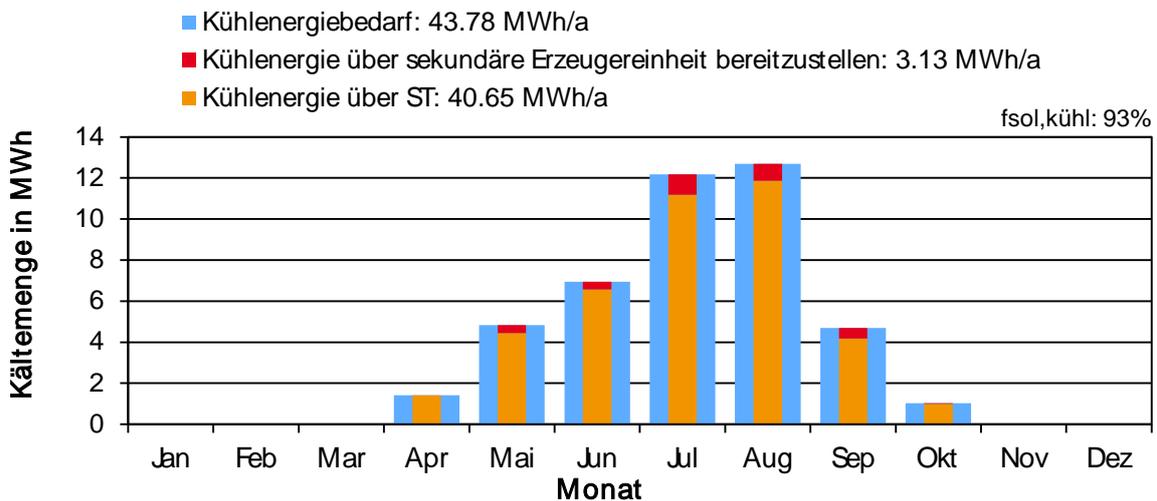


Abbildung 7-28: Monatliche Bilanzierung der Kältemengen zur Kühlung der Industriehalle mit dem Wetterdatensatz für HH TMY

Figure 7-28: Monthly balance of cooling energy amounts required for cooling of the industrial building with weather data of HH TMY

Kollektorfeld	KM	solarer Deckungsanteil	
Ertrag nutzbar	COP	Luft-Kollektor Thermische KM, einstufig Antriebstemperatur = 65 °C	ohne Speicher
MWh		MWh	
12	0,50	2	91 %

Tabelle 7-18: Kollektorfeldbruttoertrag (berechnet) zum direkten Antrieb einer einstufigen, thermischen Kältemaschine mit einer minimalen Antriebstemperatur von 65 °C und der resultierende solare Deckungsanteil am Kühlbedarf mit dem Wetterdatensatz für HH TMY-MIN

Table 7-18: As in Table 7-17 with weather data of HH TMY-MIN

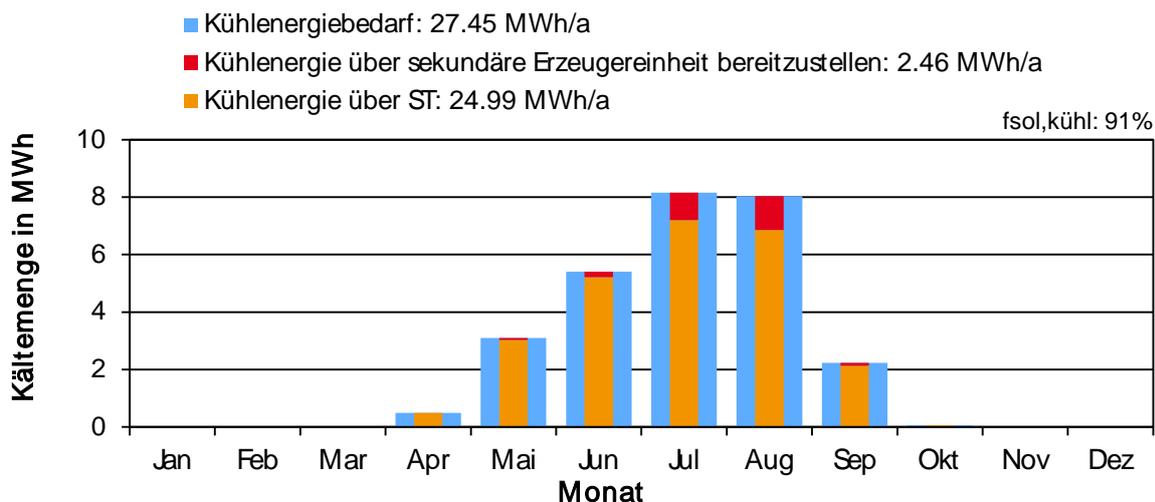


Abbildung 7-29: Monatliche Bilanzierung der Kältemengen zur Kühlung der Industriehalle mit dem Wetterdatensatz für HH TMY-MIN

Figure 7-29: As in Figure 7-28 with weather data of HH TMY-MIN

Kollektorfeld	KM	solarer Deckungsanteil	
Ertrag nutzbar	COP	Luft-Kollektor	ohne Speicher
MWh		Thermische KM, einstufig	
		Antriebstemperatur = 65 °C	
30	0,50	4	94 %

Tabelle 7-19: Kollektorfeldbruttoertrag (berechnet) zum direkten Antrieb einer einstufigen, thermischen Kältemaschine mit einer minimalen Antriebstemperatur von 65 °C und der resultierende solare Deckungsanteil am Kühlbedarf mit dem Wetterdatensatz für HH TMY-MAX

Table 7-19: As in Table 7-17 with weather data of HH TMY-MAX

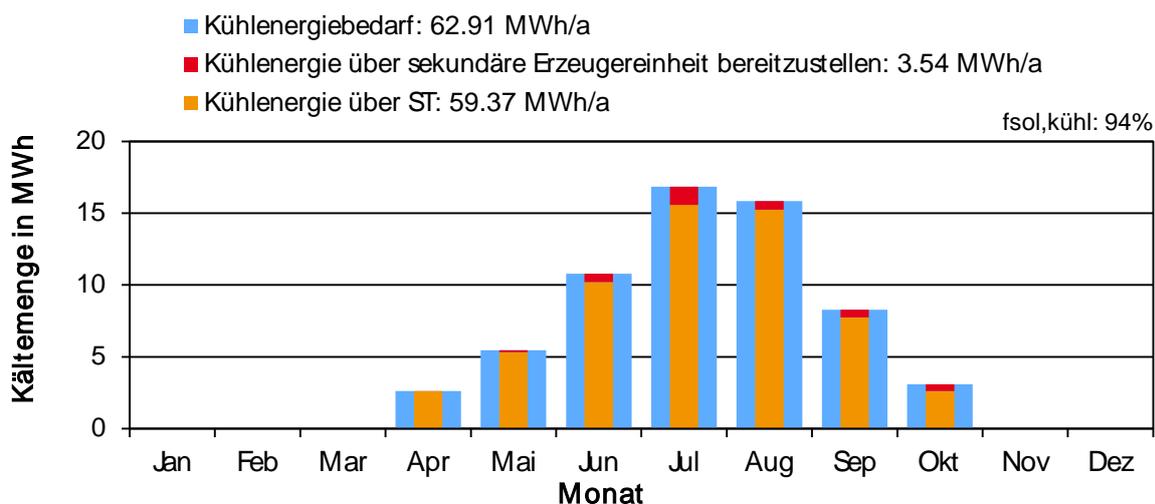


Abbildung 7-30: Monatliche Bilanzierung der Kältemengen zur Kühlung der Industriehalle mit dem Wetterdatensatz für HH TMY-MAX

Figure 7-30: As in Figure 7-28 with weather data of HH TMY-MAX

Kollektorfeld	KM	solarer Deckungsanteil	
Ertrag nutzbar	COP	Luft-Kollektor	ohne Speicher
MWh		Thermische KM, einstufig	
		Antriebstemperatur = 65 °C	
26	0,50	3	95 %

Tabelle 7-20: Kollektorfeldbruttoertrag (berechnet) zum direkten Antrieb einer einstufigen, thermischen Kältemaschine mit einer minimalen Antriebstemperatur von 65 °C und der resultierende solare Deckungsanteil am Kühlbedarf mit dem Wetterdatensatz für MUN TMY

Table 7-20: As in Table 7-17 with weather data of MUN TMY

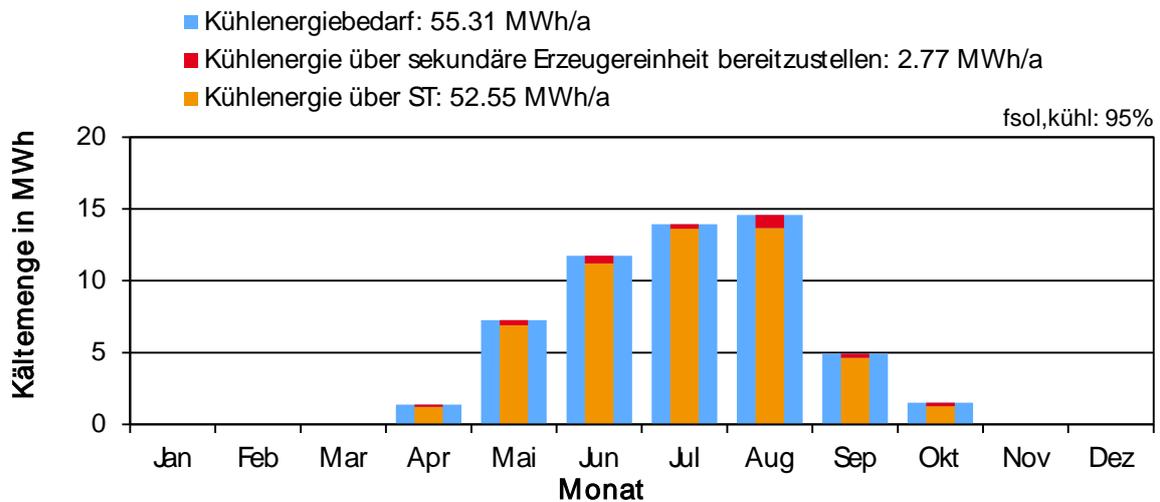


Abbildung 7-31: Monatliche Bilanzierung der Kältemengen zur Kühlung der Industriehalle mit dem Wetterdatensatz für MUN TMY

Figure 7-31: As in Figure 7-28 with weather data of MUN TMY

Kollektorfeld	KM	solarer Deckungsanteil	
Ertrag nutzbar	COP	Luft-Kollektor	ohne Speicher
MWh		Thermische KM, einstufig	
		Antriebstemperatur = 65 °C	
16	0,50	3	93 %

Tabelle 7-21: Kollektorfeldbruttoertrag (berechnet) zum direkten Antrieb einer einstufigen, thermischen Kältemaschine mit einer minimalen Antriebstemperatur von 65 °C und der resultierende solare Deckungsanteil am Kühlbedarf mit dem Wetterdatensatz für MUN TMY-MIN

Table 7-21: As in Table 7-17 with weather data of MUN TMY-MIN

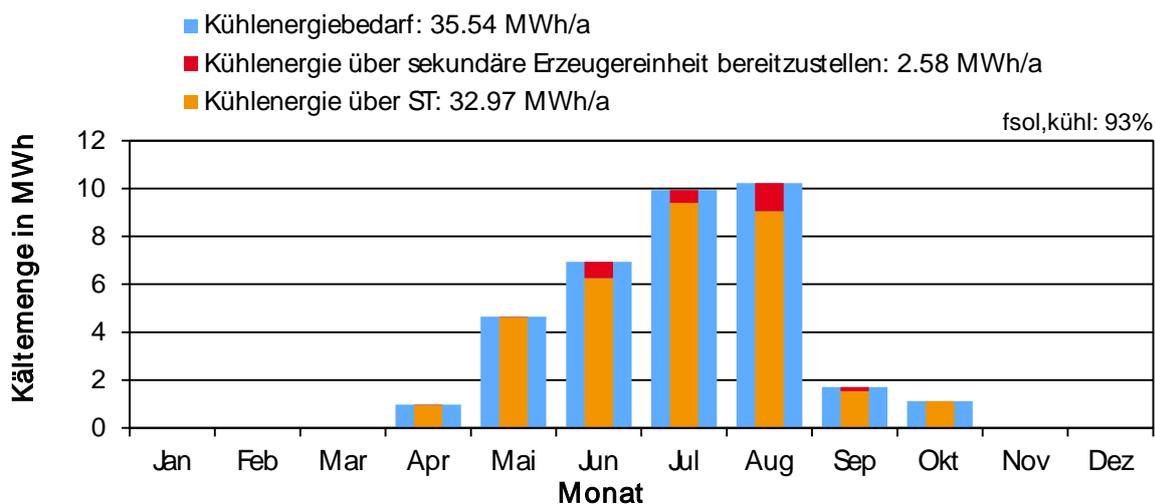


Abbildung 7-32: Monatliche Bilanzierung der Kältemengen zur Kühlung der Industriehalle mit dem Wetterdatensatz für MUN TMY-MIN

Figure 7-32: As in Figure 7-28 with weather data of MUN TMY-MIN

Kollektorfeld	KM	solarer Deckungsanteil	
Ertrag nutzbar	COP	Luft-Kollektor	ohne Speicher
MWh		Thermische KM, einstufig	
		Antriebstemperatur = 65 °C	
38	0,50	4	95 %

Tabelle 7-22: Kollektorfeldbruttoertrag (berechnet) zum direkten Antrieb einer einstufigen, thermischen Kältemaschine mit einer minimalen Antriebstemperatur von 65 °C und der resultierende solare Deckungsanteil am Kühlbedarf mit dem Wetterdatensatz für MUN TMY-MAX

Table 7-22: As in Table 7-17 with weather data of MUN TMY-MAX

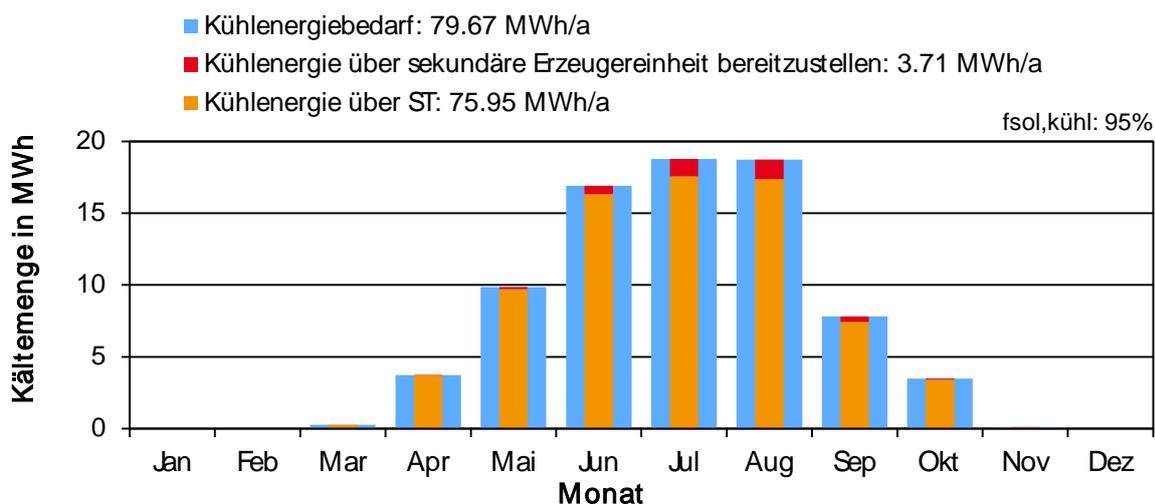


Abbildung 7-33: Monatliche Bilanzierung der Kältemengen zur Kühlung der Industriehalle mit dem Wetterdatensatz für MUN TMY-MAX

Figure 7-33: As in Figure 7-28 with weather data of MUN TMY-MAX

Zwischenfazit

In der hier vereinfacht angestellten Betrachtung kann auch der anfallende Kühlbedarf der Industriehalle maßgeblich über den SEA-Kollektor 2.1 bereitgestellt werden. Da die hierfür erforderlichen Temperaturniveaus zum Antrieb einer Kältemaschine mit mindestens 65 °C bezogen auf die Außenlufttemperatur trotz der hohen sommerlichen Temperaturen relativ hoch sind, ist es wichtig, an dieser Stelle noch einmal darauf hinzuweisen, dass die hier dargestellten Ergebnisse lediglich eine Grundlage zur Vorausplanung für ein Anlagendesign darstellen.

7.6.2.5 Dauerlinie Nutzenergie Kühlung Duration curve of energy utilisation for cooling

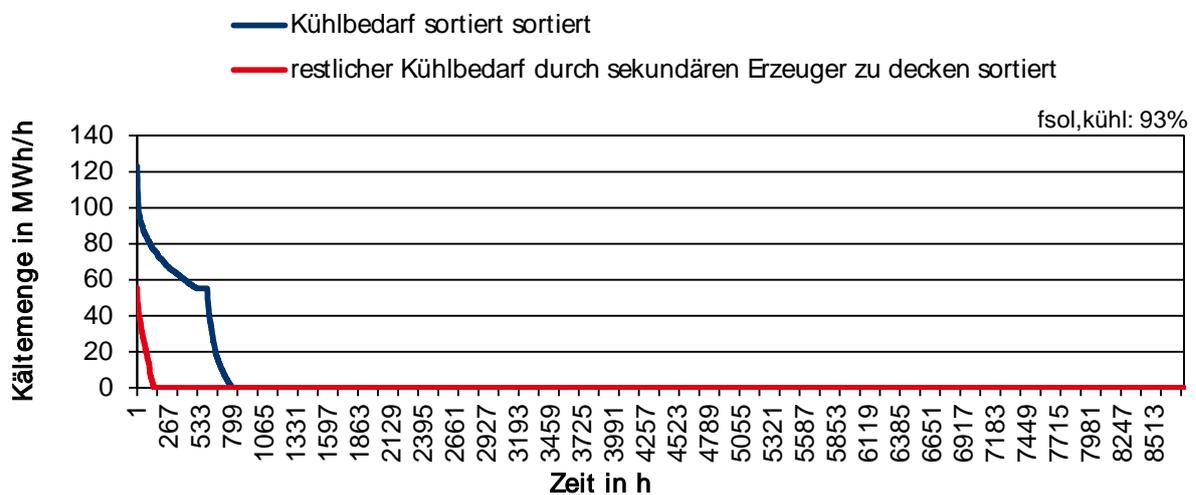


Abbildung 7-34: Geordnete Jahresdauerlinie für den Kühlbedarf der Industriehalle mit dem Wetterdatensatz für HH TMY. Weiterhin ist der über einen zusätzlichen Kälteerzeuger bereitzustellende Kühlbedarf nach der Einbindung von solarthermischer Wärme über eine einstufige solarthermisch angetriebene Kältemaschine dargestellt.

Figure 7-34: Sorted annual duration curve for the cooling demand (blue) of the industrial building with weather data of HH TMY. Furthermore the required cooling demand to be provided by a supplementary cooling generator after integration of the solar thermal heat via a single-stage cooling unit is shown (red).

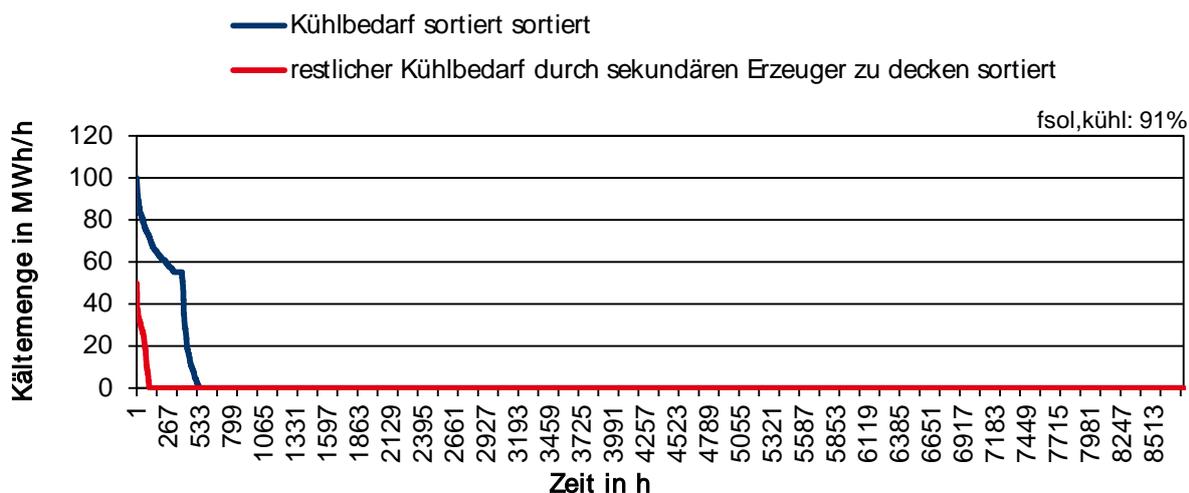


Abbildung 7-35: Geordnete Jahresdauerlinie für den Kühlbedarf der Industriehalle mit dem Wetterdatensatz für HH TMY-MIN. Weiterhin ist der über einen zusätzlichen Kälteerzeuger bereitzustellende Kühlbedarf nach der Einbindung von solarthermischer Wärme über eine einstufige solarthermisch angetriebene Kältemaschine dargestellt.

Figure 7-35: As in Figure 7-34 with weather data of HH TMY-MIN

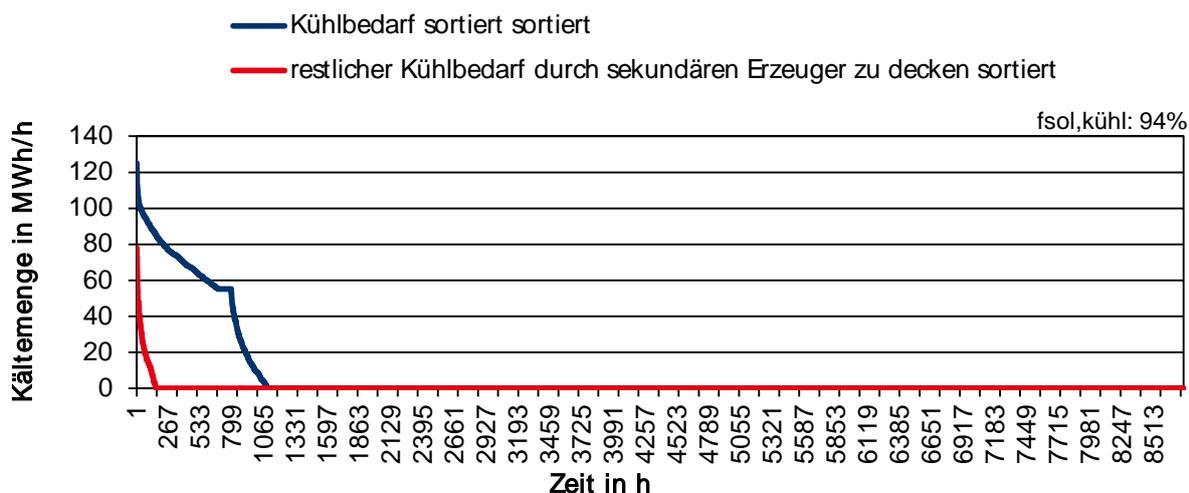


Abbildung 7-36: Geordnete Jahresdauerlinie für den Kühlbedarf der Industriehalle mit dem Wetterdatensatz für HH TMY-MAX. Weiterhin ist der über einen zusätzlichen Kälteerzeuger bereitzustellende Kühlbedarf nach der Einbindung von solarthermischer Wärme über eine einstufige solarthermisch angetriebene Kältemaschine dargestellt.

Figure 7-36: As in Figure 7-34 with weather data of HH TMY-MAX

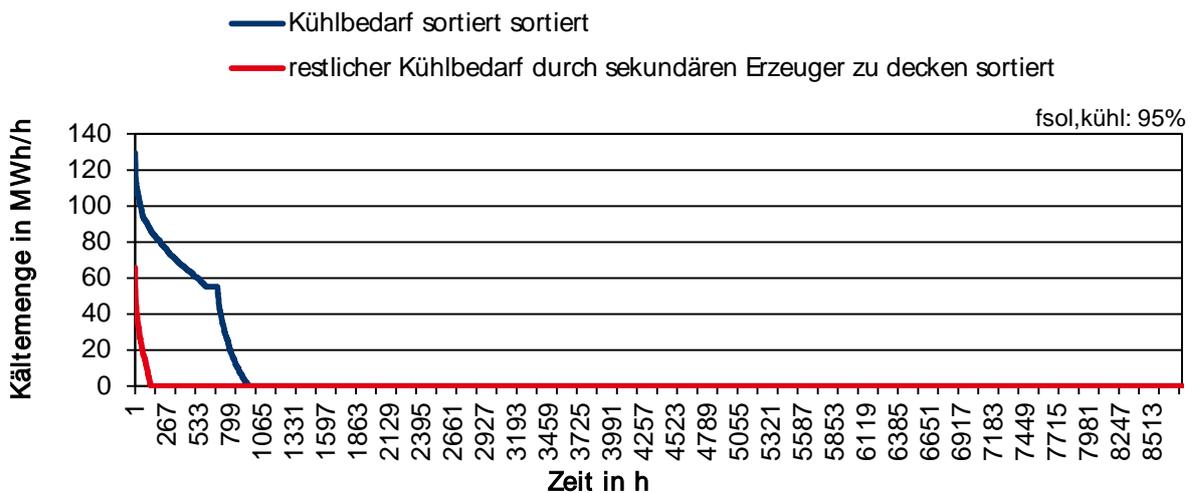


Abbildung 7-37: Geordnete Jahresdauerlinie für den Kühlbedarf der Industriehalle mit dem Wetterdatensatz für MUN TMY. Weiterhin ist der über einen zusätzlichen Kälteerzeuger bereitzustellende Kühlbedarf nach der Einbindung von solarthermischer Wärme über eine einstufige solarthermisch angetriebene Kältemaschine dargestellt. .

Figure 7-37: As in Figure 7-34 with weather data of MUN TMY

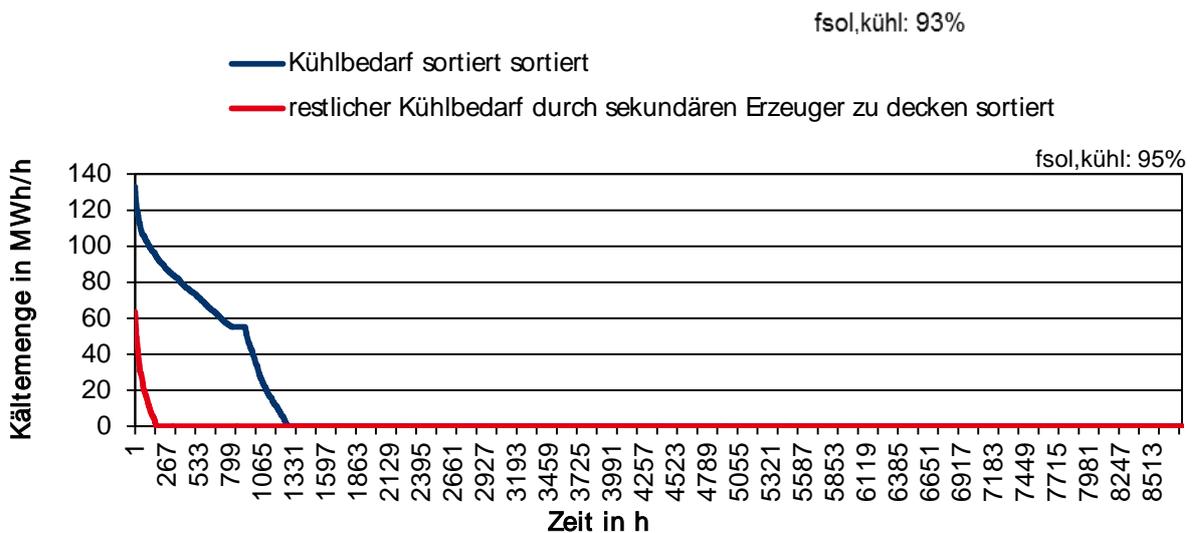


Abbildung 7-38: Geordnete Jahresdauerlinie für den Kühlbedarf der Industriehalle mit dem Wetterdatensatz für MUN TMY-MAX. Weiterhin ist der über einen zusätzlichen Kälteerzeuger bereitzustellende Kühlbedarf nach der Einbindung von solarthermischer Wärme über eine einstufige solarthermisch angetriebene Kältemaschine dargestellt. .

Figure 7-38: As in Figure 7-34 with weather data of MUN TMY-MAX

Zwischenfazit

In einem Versorgungssystem, welches aus einem solaren und einem konventionellen Wärme- bzw. Kälteerzeuger besteht, muss die Auslegung für den Heiz- und Kühllastfall unter Berücksichtigung der solaren Erträge an Heiz- und Kühlenergie erfolgen. Für die Auslegung des Heizfalls ist immer damit zu rechnen, dass keine Wärme über den solaren Wärmeerzeuger bereitgestellt werden kann (keine Einstrahlung bei Nacht bzw. hoher Bedeckungsgrad des Himmels über längere

Zeiträume). Dem entgegen korreliert der Kühlenergiebedarf mit der solaren Einstrahlung (er steigt bei steigender Einstrahlung), wobei auch die über den solaren Kälteerzeuger generierte Kältemenge ansteigt. Der Auslegungspunkt reduziert sich damit, wobei für die Versorgungssicherheit ein von der Leistung her reduziertes System zur Kälteerzeugung nicht zu empfehlen ist.

7.6.2.6 Varianten zur Endenergie Variations of supplementary energy requirement

a.) Wetterdatensatz HH TMY

Ohne Einbindung von solarthermisch erzeugter Wärme auf der Erzeugerseite

Um die Versorgungssicherheit gewährleisten zu können, müssen neben dem solarthermischen Wärmeerzeuger sekundäre Erzeugungseinheiten für Wärme und Kälte vorgehalten werden. Diese bemessen sich nach dem Auslegungspunkt für das Heiz- bzw. Kühlsystem. Mittels des solarthermischen Wärmeerzeugers kann deren Energiebedarf reduziert werden.

Wärmeerzeugung	Variante 1a	Variante 2a
Zusatzwärme	Kessel Gas eta = 0,8 MWh	Luft-Wärmepumpe Strom COP = F(T _a) MWh
	54	9

Tabelle 7-23: Endenergiebedarf der sekundären Erzeugungseinheiten, der durch den Einsatz des solarthermischen Wärmeerzeugers reduziert wird. Die solarthermisch erzeugte Energie wird dabei direkt ohne Speicherung eingebunden.

Table 7-23: Final energy demand of secondary (supplementary) generators, i.e. after being reduced by the usage of the solar heat generator. In these cases, solar thermal energy is being used directly without energy storage.

Wärmeerzeugung	Variante 1b	Variante 2b
Zusatzwärme	Kessel Gas MWh	Luft-Wärmepumpe Strom MWh
	8	1

Tabelle 7-24: Endenergiebedarf der sekundären Erzeugungseinheiten, der durch den Einsatz des solarthermischen Wärmeerzeugers reduziert wird. Die solarthermisch erzeugte Energie wird dabei zusätzlich über einen thermischen Speicher geführt und dort zwischengespeichert, so dass sich der Energiebedarf der sekundären Erzeugungseinheiten weiter reduzieren lässt.

Table 7-24: Final energy demand of secondary (supplementary) generators, i.e. after being reduced by the usage of the solar heat generator. In these cases, solar thermal energy is buffered in an energy storage allowing for a larger reduction of the secondary energy provision.

Mit Einbindung von solarthermisch erzeugter Wärme auf der Erzeugerseite

Die solarthermisch erzeugte Wärme kann auch zur Quellanhebung für eine Wärmepumpe benutzt werden. Dabei wird diese direkt auf der Quellseite eingebunden. Es wird davon ausgegangen, dass der solarthermische Kollektorfeldertrag einen Temperaturhub gegenüber der Außenluft von 10 K erzeugt. Die restliche zur Beheizung erforderliche Wärme wird über die Außenluft als Niedertemperatur-Energiequelle erzeugt.

Kollektorfeld		Variante 3a	Variante 3b
Ertrag maximal möglich	Einbindung Quelle WP Wärme	Luft-Luko-Wärmepumpe ohne Speicher Strom	mit Speicher Strom
MWh	MWh	MWh	MWh
485	11	11	10

Tabelle 7-25: Endenergiebedarf einer Luft-Wärmepumpe als sekundäre Erzeugungseinheit, wenn in diese solarthermisch erzeugte Wärme zur Quellenhebung eingebunden wird. Der COP ist dabei eine Funktion der Quelltemperatur der Außenluft, die bei Einbindung von ST um 10 K angehoben wird.

Table 7-25: Final energy demand of an air-water heat pump as secondary energy generator, if solar thermal energy is integrated for preheating. The COP is a function of the source temperature of the ambience being raised by 10 K by solar thermal energy.

b.) Wetterdatensatz HH TMY-MIN

Wärmeerzeugung	Variante 1a	Variante 2a
Zusatzwärme	Kessel Gas eta = 0,8	Luft-Wärmepumpe Strom COP = F(T _a)
	MWh	MWh
	76	13

Tabelle 7-26: Endenergiebedarf der sekundären Erzeugungseinheiten, der durch den Einsatz des solarthermischen Wärmeerzeugers reduziert wird. Die solarthermisch erzeugte Energie wird dabei direkt ohne Speicherung eingebunden.

Table 7-26: As in Table 7-23 with weather data of HH TMY-MIN

Wärmeerzeugung	Variante 1b	Variante 2b
Zusatzwärme	Kessel Gas	Luft-Wärmepumpe Strom
	MWh	MWh
	28	5

Tabelle 7-27: Endenergiebedarf der sekundären Erzeugungseinheiten, der durch den Einsatz des solarthermischen Wärmeerzeugers reduziert wird. Die solarthermisch erzeugte Energie wird dabei zusätzlich über einen thermischen Speicher geführt und dort zwischengespeichert, so dass sich der Energiebedarf der sekundären Erzeugungseinheiten weiter reduzieren lässt.

Table 7-27: As in Table 7-24 with weather data of HH TMY-MIN

Kollektorfeld		Variante 3a	Variante 3b
Ertrag maximal möglich	Einbindung Quelle WP Wärme	Luft-Luko-Wärmepumpe ohne Speicher Strom	mit Speicher Strom
MWh	MWh	MWh	MWh
390	16	16	15

Tabelle 7-28: Endenergiebedarf einer Luft-Wärmepumpe als sekundäre Erzeugungseinheit, wenn in diese solarthermisch erzeugte Wärme zur Quellenhebung eingebunden wird. Der COP ist dabei eine Funktion der Quelltemperatur der Außenluft, die bei Einbindung von ST um 10 K angehoben wird.

Table 7-28: As in Table 7-25 with weather data of HH TMY-MIN

c.) Wetterdatensatz HH TMY-MAX

Wärmeerzeugung	Variante 1a	Variante 2a
Zusatzwärme	Kessel Gas eta = 0,8 MWh	Luft-Wärmepumpe Strom COP = F(T _a) MWh
	36	6

Tabelle 7-29: Endenergiebedarf der sekundären Erzeugungseinheiten, der durch den Einsatz des solarthermischen Wärmeerzeugers reduziert wird. Die solarthermisch erzeugte Energie wird dabei direkt ohne Speicherung eingebunden.

Table 7-29: As in Table 7-23 with weather data of HH TMY-MAX

Wärmeerzeugung	Variante 1b	Variante 2b
Zusatzwärme	Kessel Gas MWh	Luft-Wärmepumpe Strom MWh
	0	0

Tabelle 7-30: Endenergiebedarf der sekundären Erzeugungseinheiten, der durch den Einsatz des solarthermischen Wärmeerzeugers reduziert wird. Die solarthermisch erzeugte Energie wird dabei zusätzlich über einen thermischen Speicher geführt und dort zwischengespeichert, so dass sich der Energiebedarf der sekundären Erzeugungseinheiten weiter reduzieren lässt.

Table 7-30: As in Table 7-24 with weather data of HH TMY-MAX

Kollektorfeld		Variante 3a	Variante 3b
Ertrag maximal möglich MWh	Einbindung Quelle WP Wärme MWh	Luft-Luko-Wärmepumpe ohne Speicher Strom MWh	mit Speicher Strom MWh
584	7	7	6

Tabelle 7-31: Endenergiebedarf einer Luft-Wärmepumpe als sekundäre Erzeugungseinheit, wenn in diese solarthermisch erzeugte Wärme zur Quellenhebung eingebunden wird. Der COP ist dabei eine Funktion der Quelltemperatur der Außenluft, die bei Einbindung von ST um 10 K angehoben wird.

Table 7-31: As in Table 7-25 with weather data of HH TMY-MAX

d.) Wetterdatensatz MUN TMY

Wärmeerzeugung	Variante 1a	Variante 2a
Zusatzwärme	Kessel Gas eta = 0,8 MWh	Luft-Wärmepumpe Strom COP = F(T _a) MWh
	63	11

Tabelle 7-32: Endenergiebedarf der sekundären Erzeugungseinheiten, der durch den Einsatz des solarthermischen Wärmeerzeugers reduziert wird. Die solarthermisch erzeugte Energie wird dabei direkt ohne Speicherung eingebunden.

Table 7-32: As in Table 7-23 with weather data of MUN TMY

Wärmeerzeugung	Variante 1b	Variante 2b
Zusatzwärme	Kessel Gas	Luft-Wärmepumpe Strom
	MWh	MWh
	7	1

Tabelle 7-33: Endenergiebedarf der sekundären Erzeugungseinheiten, der durch den Einsatz des solarthermischen Wärmeerzeugers reduziert wird. Die solarthermisch erzeugte Energie wird dabei zusätzlich über einen thermischen Speicher geführt und dort zwischengespeichert, so dass sich der Energiebedarf der sekundären Erzeugungseinheiten weiter reduzieren lässt.

Table 7-33: As in Table 7-24 with weather data of MUN TMY

Kollektorfeld		Variante 3a	Variante 3b
Ertrag maximal möglich	Einbindung Quelle WP Wärme	Luft-Luko-Wärmepumpe ohne Speicher	mit Speicher
MWh	MWh	MWh	MWh
574	16	14	12

Tabelle 7-34: Endenergiebedarf einer Luft-Wärmepumpe als sekundäre Erzeugungseinheit, wenn in diese solarthermisch erzeugte Wärme zur Quellenhebung eingebunden wird. Der COP ist dabei eine Funktion der Quelltemperatur der Außenluft, die bei Einbindung von ST um 10 K angehoben wird.

Table 7-34: As in Table 7-25 with weather data of MUN TMY

e.) Wetterdatensatz MUN TMY-MIN

Wärmeerzeugung	Variante 1a	Variante 2a
Zusatzwärme	Kessel Gas eta = 0,8	Luft-Wärmepumpe Strom COP = F(T _a)
	MWh	MWh
	86	16

Tabelle 7-35: Endenergiebedarf der sekundären Erzeugungseinheiten, der durch den Einsatz des solarthermischen Wärmeerzeugers reduziert wird. Die solarthermisch erzeugte Energie wird dabei direkt ohne Speicherung eingebunden.

Table 7-35: As in Table 7-23 with weather data of MUN TMY-MIN

Wärmeerzeugung	Variante 1b	Variante 2b
Zusatzwärme	Kessel Gas	Luft-Wärmepumpe Strom
	MWh	MWh
	22	4

Tabelle 7-36: Endenergiebedarf der sekundären Erzeugungseinheiten, der durch den Einsatz des solarthermischen Wärmeerzeugers reduziert wird. Die solarthermisch erzeugte Energie wird dabei zusätzlich über einen thermischen Speicher geführt und dort zwischengespeichert, so dass sich der Energiebedarf der sekundären Erzeugungseinheiten weiter reduzieren lässt.

Table 7-36: As in Table 7-24 with weather data of MUN TMY-MIN

Kollektorfeld		Variante 3a	Variante 3b
Ertrag maximal möglich	Einbindung Quelle WP Wärme	Luft-Luko-Wärmepumpe ohne Speicher Strom	mit Speicher Strom
MWh	MWh	MWh	MWh
483	23	20	18

Tabelle 7-37: Endenergiebedarf einer Luft-Wärmepumpe als sekundäre Erzeugungseinheit, wenn in diese solarthermisch erzeugte Wärme zur Quellanhebung eingebunden wird. Der COP ist dabei eine Funktion der Quelltemperatur der Außenluft, die bei Einbindung von ST um 10 K angehoben wird.

Table 7-37: As in Table 7-25 with weather data of MUN TMY-MIN

f.) Wetterdatensatz MUN TMY-MAX

Wärmeerzeugung	Variante 1a	Variante 2a
Zusatzwärme	Kessel Gas eta = 0,8	Luft-Wärmepumpe Strom COP = F(T _a)
	MWh	MWh
	44	7

Tabelle 7-38: Endenergiebedarf der sekundären Erzeugungseinheiten, der durch den Einsatz des solarthermischen Wärmeerzeugers reduziert wird. Die solarthermisch erzeugte Energie wird dabei direkt ohne Speicherung eingebunden.

Table 7-38: As in Table 7-23 with weather data of MUN TMY-MAX

Wärmeerzeugung	Variante 1b	Variante 2b
Zusatzwärme	Kessel Gas	Luft-Wärmepumpe Strom
	MWh	MWh
	0	0

Tabelle 7-39: Endenergiebedarf der sekundären Erzeugungseinheiten, der durch den Einsatz des solarthermischen Wärmeerzeugers reduziert wird. Die solarthermisch erzeugte Energie wird dabei zusätzlich über einen thermischen Speicher geführt und dort zwischengespeichert, so dass sich der Energiebedarf der sekundären Erzeugungseinheiten weiter reduzieren lässt.

Table 7-39: As in Table 7-24 with weather data of MUN TMY-MAX

Kollektorfeld		Variante 3a	Variante 3b
Ertrag maximal möglich	Einbindung Quelle WP Wärme	Luft-Luko-Wärmepumpe ohne Speicher Strom	mit Speicher Strom
MWh	MWh	MWh	MWh
670	11	9	8

Tabelle 7-40: Endenergiebedarf einer Luft-Wärmepumpe als sekundäre Erzeugungseinheit, wenn in diese solarthermisch erzeugte Wärme zur Quellanhebung eingebunden wird. Der COP ist dabei eine Funktion der Quelltemperatur der Außenluft, die bei Einbindung von ST um 10 K angehoben wird.

Table 7-40: As in Table 7-25 with weather data of MUN TMY-MAX

Zwischenfazit

Die dargestellten Varianten zeigen, welcher Endenergiebedarf für die betrachtete Industriehalle bei unterschiedlichen Systemkonzepten unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Standorte mit ihren Extrema noch besteht. Die hier berechneten Ergebnisse stellen eine wesentliche Grundlage zur wirtschaftlichen Bewertung des SEA-Kollektors 2.1 im Zusammenhang eines Wärmeversorgungssystems dar.

7.6.3 Ergebnisse SEA 2.2 Results for SEA 2.2

7.6.3.1 Ertrag über den Hallenflächen Energy yields for the building's surface areas

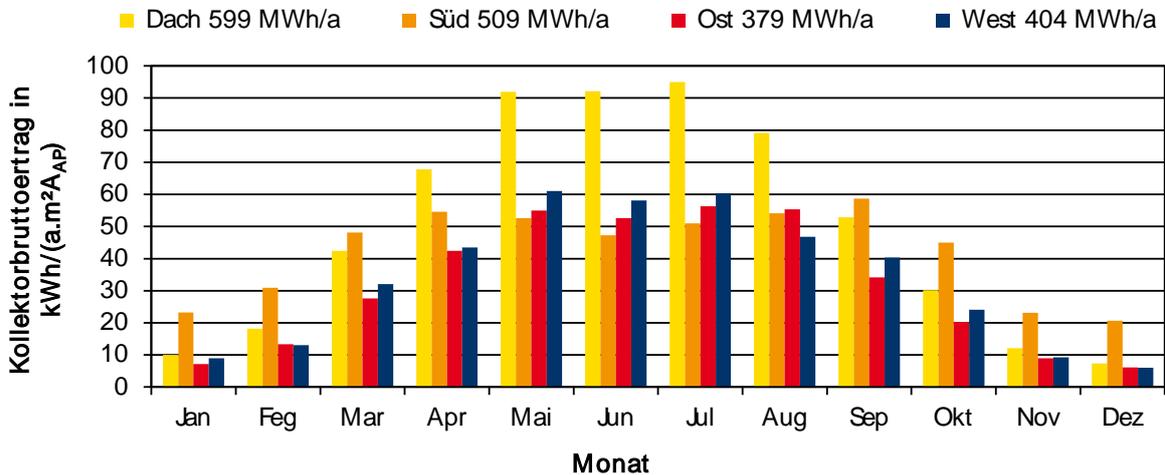


Abbildung 7-39: Kollektorbruttoertrag über die vier Umfassungsflächen der betrachteten Industriehalle mit dem Wetterdatensatz für HH TMY

Figure 7-39: Collector energy yields for the four surface areas of the observed industrial building with weather data of HH TMY

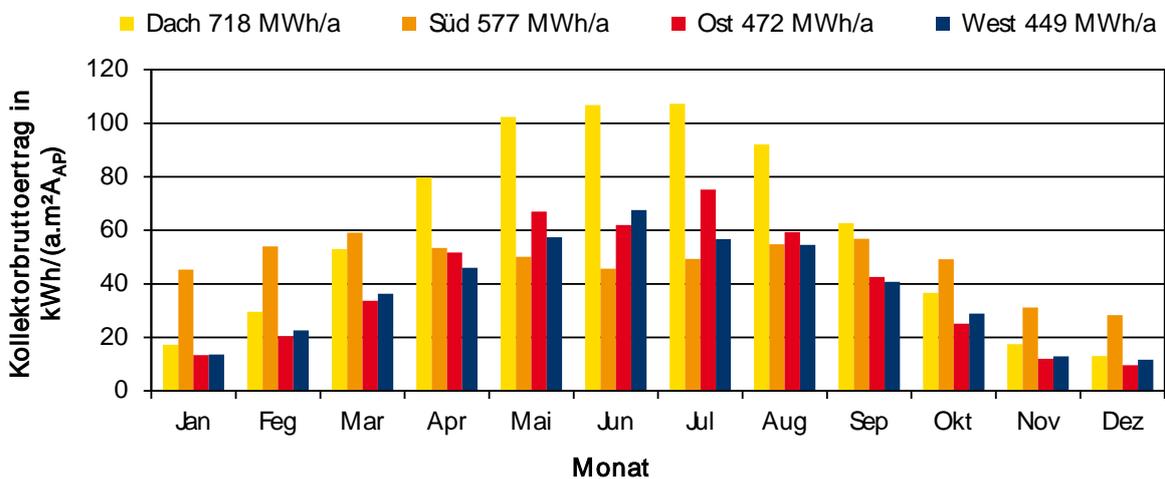


Abbildung 7-40: Kollektorbruttoertrag über die vier Umfassungsflächen der betrachteten Industriehalle mit dem Wetterdatensatz für MUN TMY

Figure 7-40: As in Figure 7-39 with weather data of MUN TMY

7.6.3.2 Bilanz Nutzenergie Beheizung Balance of energy utilisation for heating

Kollektorfeld					solarer Deckungsanteil	
	Beheizung direkt	Beheizung mittels Speicher	Prozesswärme optional	ohne Speicher	mit Speicher	
Ertrag maximal möglich MWh	MWh	MWh	MWh			
830	13	40	777	24 %	97 %	

Tabelle 7-41: Maximal möglicher Kollektorfeldbruttoertrag (berechnet) und dessen Nutzung für die Anwendungen Beheizung und Prozesswärme mit dem Wetterdatensatz für HH TMY.

Table 7-41: Maximum possible collector area energy yield (gross) and its utilisation for heating and process heating with weather data of HH TMY

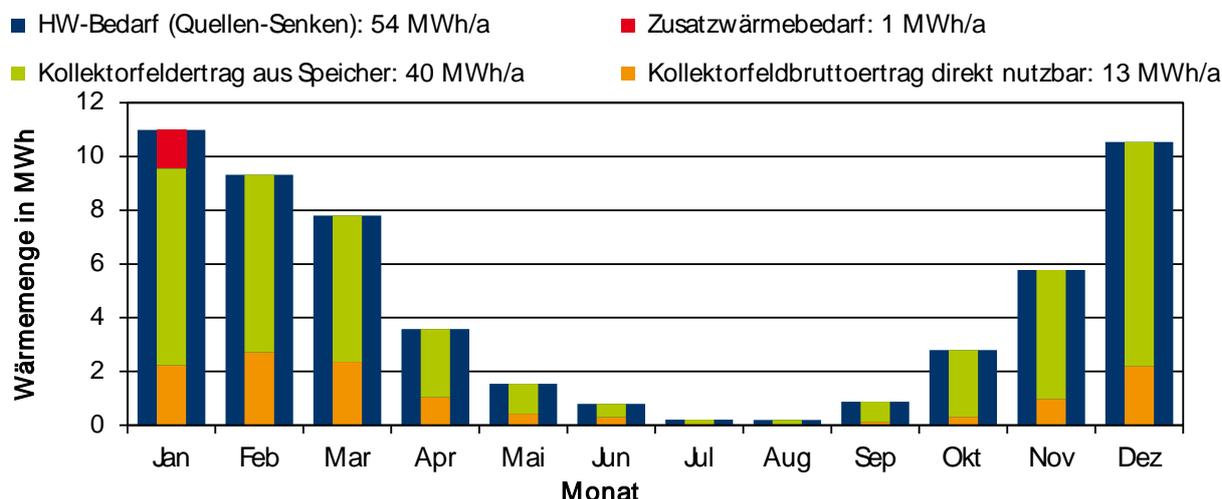


Abbildung 7-41: Monatliche Bilanzierung der Wärmemengen zur Beheizung der Industriehalle mit dem Wetterdatensatz für HH TMY

Figure 7-41: Monthly balance of heat energy amounts required for heating of the industrial building with weather data of HH TMY

Kollektorfeld					solarer Deckungsanteil	
	Beheizung direkt	Beheizung mittels Speicher	Prozesswärme optional	ohne Speicher	mit Speicher	
Ertrag maximal möglich MWh	MWh	MWh	MWh			
983	18	48	917	27 %	100 %	

Tabelle 7-42: Maximal möglicher Kollektorfeldbruttoertrag (berechnet) und dessen Nutzung für die Anwendungen Beheizung und Prozesswärme mit dem Wetterdatensatz für MUN TMY

Table 7-42: As in Table 7-41 with weather data of MUN TMY

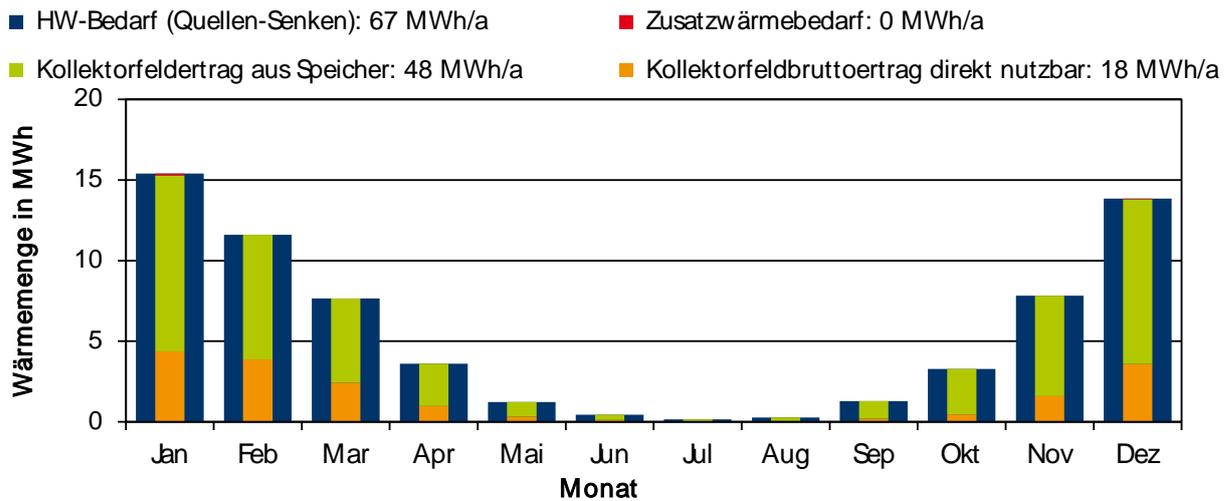


Abbildung 7-42: Monatliche Bilanzierung der Wärmemengen zur Beheizung der Industriehalle mit dem Wetterdatensatz für MUN TMY

Figure 7-42: As in Figure 7-41 with weather data for MUN TMY

7.6.3.3 Dauerlinie Nutzenergie Beheizung Duration curve of energy utilisation for heating

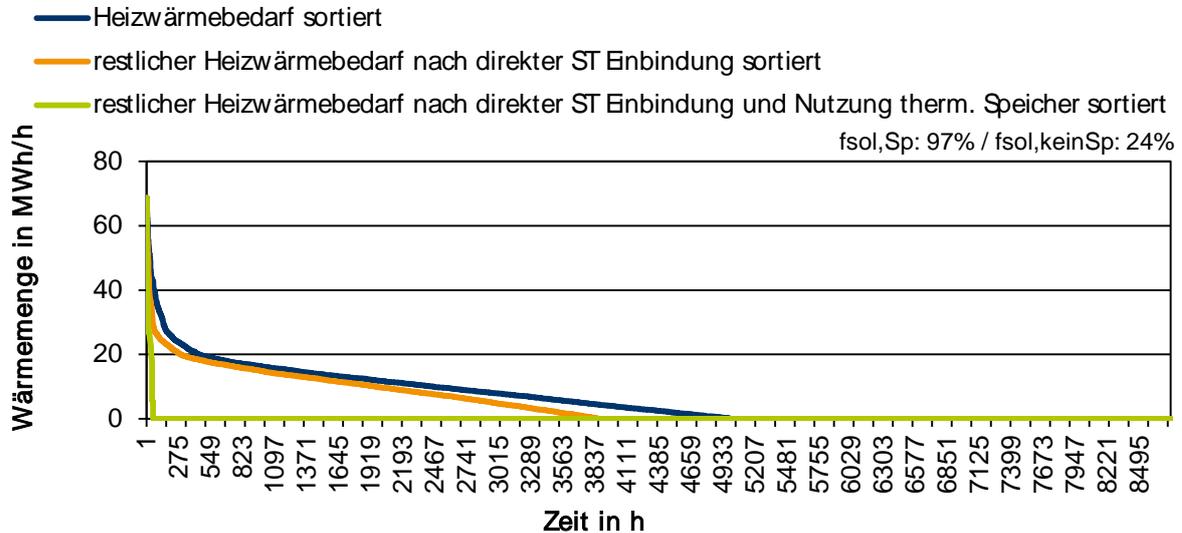


Abbildung 7-43: Geordnete Jahresdauerlinie für den Heizwärmebedarf der Industriehalle mit dem Wetterdatensatz für HH TMY. Weiterhin ist der über einen zusätzlichen Wärmeerzeuger bereitzustellende Heizwärmebedarf nach der direkten Einbindung von solarthermischer Wärme sowie der unter Einbindung eines thermischen Speichers dargestellt.

Figure 7-43: Sorted annual duration curve for the heating demand (blue) of the industrial building with weather data of HH TMY. Furthermore the required heating demand to be provided by a supplementary heat generator after direct input of solar thermal heat is shown (orange) as well as with the integration of a thermal storage (green).

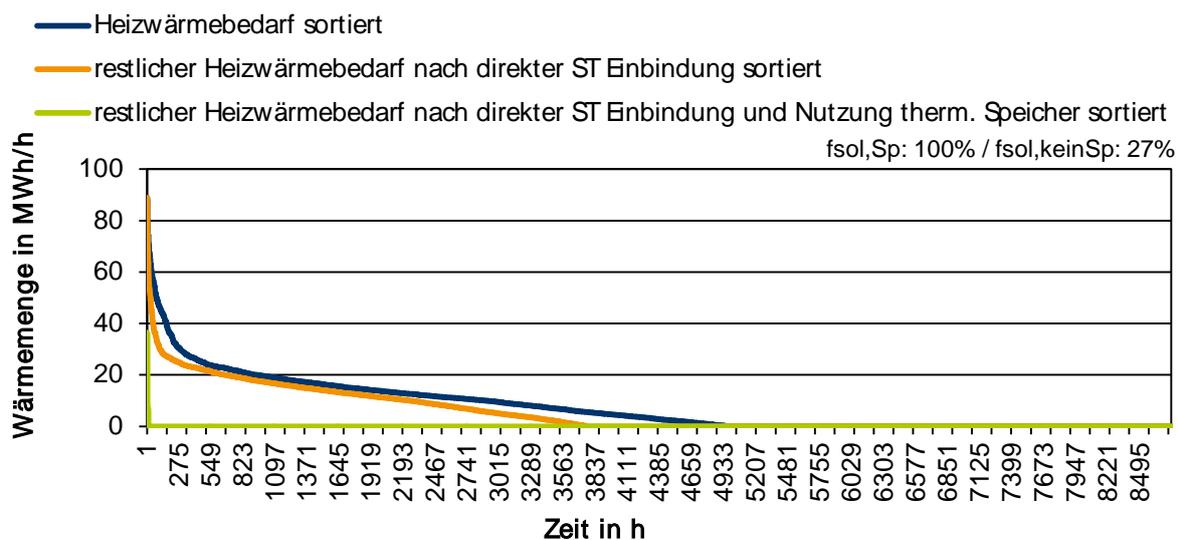


Abbildung 7-44: Geordnete Jahresdauerlinie für den Heizwärmebedarf der Industriehalle mit dem Wetterdatensatz für MUN TMY. Weiterhin ist der über einen zusätzlichen Wärmeerzeuger bereitzustellende Heizwärmebedarf nach der direkten Einbindung von solarthermischer Wärme sowie der unter Einbindung eines thermischen Speichers dargestellt.

Figure 7-44: As in Figure 7-43 with weather data for MUN TMY

7.6.3.4 Bilanz Nutzenergie Kühlung Balance of energy utilisation for cooling

Kollektorfeld	KM	solarer Deckungsanteil	
Ertrag nutzbar	COP	Luft-Kollektor Thermische KM, einstufig Antriebstemperatur = 65°C	ohne Speicher
MWh		MWh	
21	0,50	1	98 %

Tabelle 7-43: Kollektorfeldbruttoertrag (berechnet) zum direkten Antrieb einer einstufigen, thermischen Kältemaschine mit einer minimalen Antriebstemperatur von 65 °C und der resultierende solare Deckungsanteil am Kühlbedarf mit dem Wetterdatensatz für HH TMY

Table 7-43: Collector area energy yield for direct powering a single-stage thermal cooling unit with a minimum operating temperature of 65 °C and the corresponding proportion of the cooling energy demand met by the solar energy yield based on weather data of HH TMY

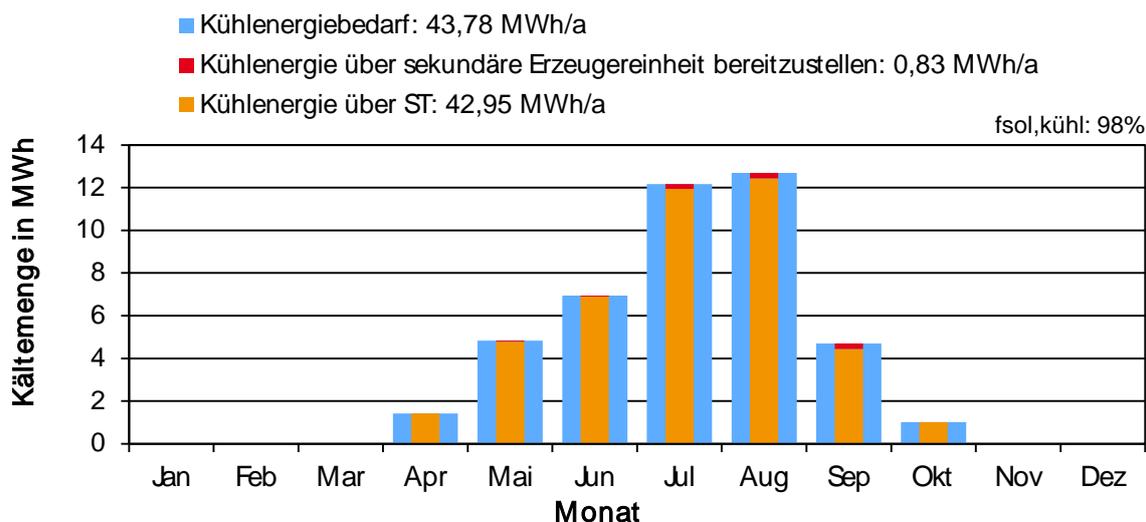


Abbildung 7-45: Monatliche Bilanzierung der Kältemengen zur Kühlung der Industriehalle mit dem Wetterdatensatz für HH TMY

Figure 7-45: Monthly balance of cooling energy amounts required for cooling of the industrial building with weather data of HH TMY

Kollektorfeld	KM	solarer Deckungsanteil	
Ertrag nutzbar	COP	Luft-Kollektor	ohne Speicher
MWh		Thermische KM, einstufig	
		Antriebstemperatur = 65°C	
27	0,50	1	99%

Tabelle 7-44: Kollektorfeldbruttoertrag (berechnet) zum direkten Antrieb einer einstufigen, thermischen Kältemaschine mit einer minimalen Antriebstemperatur von 65 °C und der resultierende solare Deckungsanteil am Kühlbedarf mit dem Wetterdatensatz für MUN TMY.

Table 7-44: As in Table 7-43 with weather data of MUN TMY

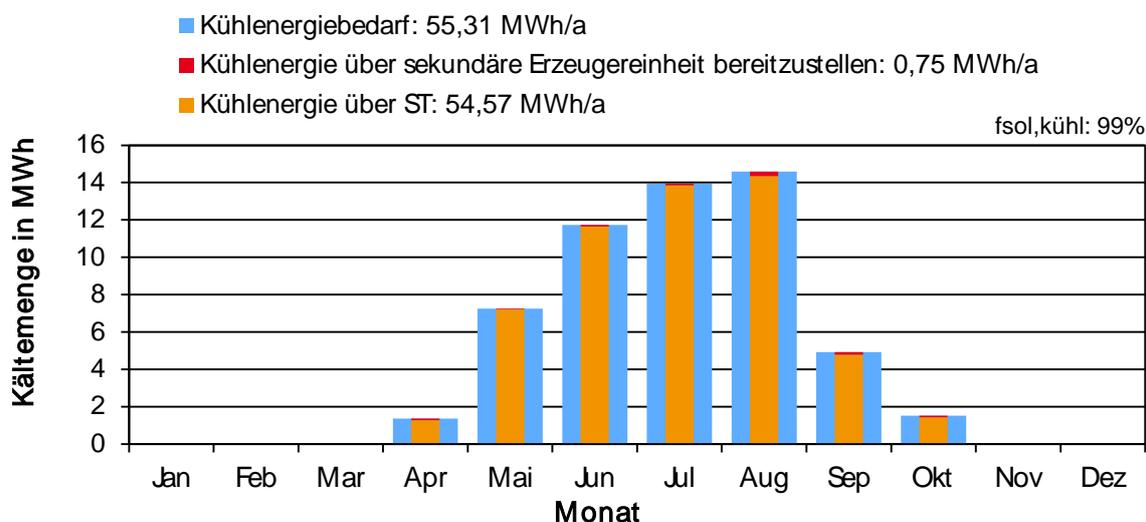


Abbildung 7-46: Monatliche Bilanzierung der Kältemengen zur Kühlung der Industriehalle mit dem Wetterdatensatz für MUN TMY.

Figure 7-46: As in Figure 7-45 with weather data for MUN TMY

7.6.3.5 Dauerlinie Nutzenergie Kühlung Duration curve of energy utilisation for cooling

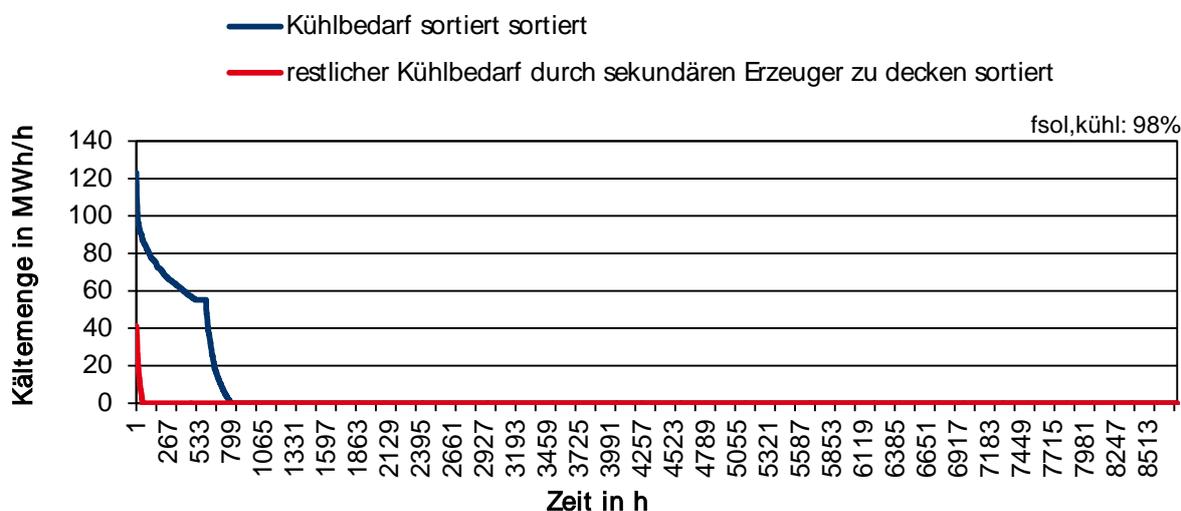


Abbildung 7-47: Geordnete Jahresdauerlinie für den Kühlbedarf der Industriehalle mit dem Wetterdatensatz für HH TMY. Weiterhin ist der über einen zusätzlichen Kälteerzeuger bereitzustellende Kühlbedarf nach der Einbindung von solarthermischer Wärme über eine einstufige solarthermisch angetriebene Kältemaschine dargestellt.

Figure 7-47: Sorted annual duration curve for the cooling demand (blue) of the industrial building with weather data of HH TMY. Furthermore the required cooling demand to be provided by a supplementary cooling generator after integration of the solar thermal heat via a single-stage cooling unit is shown (red).

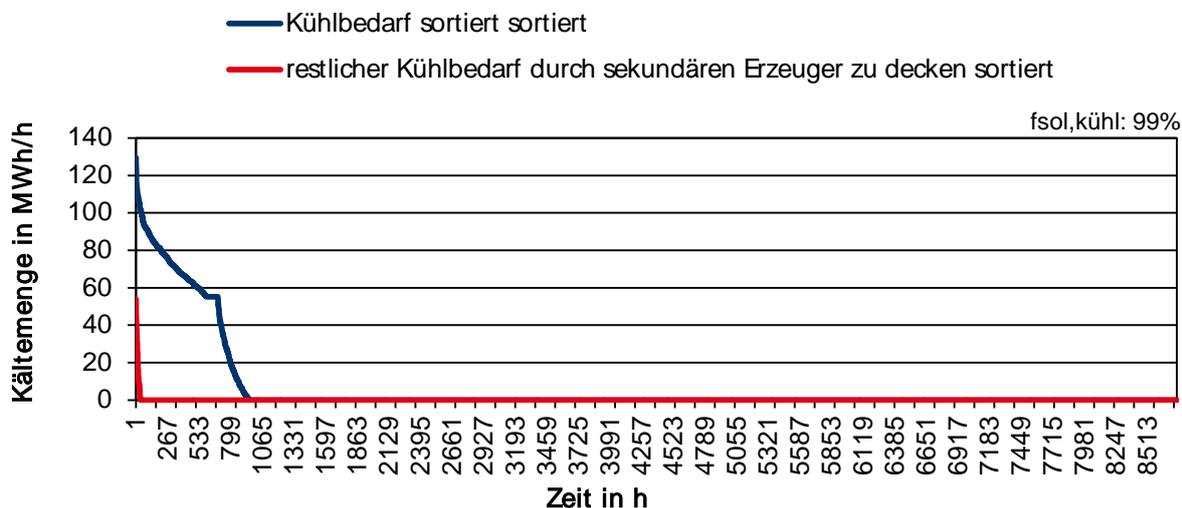


Abbildung 7-48: Geordnete Jahresdauerlinie für den Kühlbedarf der Industriehalle mit dem Wetterdatensatz für MUN TMY. Weiterhin ist der über einen zusätzlichen Kälteerzeuger bereitzustellende Kühlbedarf nach der Einbindung von solarthermischer Wärme über eine einstufige solarthermisch angetriebene Kältemaschine dargestellt.

Figure 7-48: As in Figure 7-47 with weather data for MUN TMY

7.6.3.6 Varianten zur Endenergie Variations of supplementary energy requirement

a.) Wetterdatensatz HH TMY

Wärmeerzeugung	Variante 1a	Variante 2a
Zusatzwärme	Kessel Gas eta = 0,8 MWh	Luft-Wärmepumpe Strom COP = F(T _a) MWh
	52	9

Tabelle 7-45: Endenergiebedarf der sekundären Erzeugungseinheiten, der durch den Einsatz des solarthermischen Wärmeerzeugers reduziert wird. Die solarthermisch erzeugte Energie wird dabei direkt ohne Speicherung eingebunden.

Table 7-45: Final energy requirement of secondary (supplementary) generators, i.e. after being reduced by the usage of the solar heat generator. In these cases, solar thermal energy is being used directly without energy storage.

Wärmeerzeugung	Variante 1b	Variante 2b
Zusatzwärme	Kessel Gas MWh	Luft-Wärmepumpe Strom MWh
	2	0

Tabelle 7-46: Endenergiebedarf der sekundären Erzeugungseinheiten, der durch den Einsatz des solarthermischen Wärmeerzeugers reduziert wird. Die solarthermisch erzeugte Energie wird dabei zusätzlich über einen thermischen Speicher geführt und dort zwischengespeichert, so dass sich der Energiebedarf der sekundären Erzeugungseinheiten weiter reduzieren lässt.

Table 7-46: Final energy requirement of secondary (supplementary) generators, i.e. after being reduced by the usage of the solar heat generator. In these cases the solar thermal energy is buffered in an energy storage allowing for a larger reduction of the secondary energy provision.

Kollektorfeld		Variante 3a	Variante 3b
Ertrag maximal möglich MWh	Einbindung Quelle WP Wärme MWh	Luft-Luko-Wärmepumpe ohne Speicher Strom MWh	mit Speicher Strom MWh
830	13	11	10

Tabelle 7-47: Endenergiebedarf einer Luft-Wärmepumpe als sekundäre Erzeugungseinheit, wenn in diese solarthermisch erzeugte Wärme zur Quellenhebung eingebunden wird. Der COP ist dabei eine Funktion der Quelltemperatur der Außenluft, die bei Einbindung von ST um 10 K angehoben wird.

Table 7-47: Final energy demand of an air-water heat pump as secondary energy generator, if solar thermal energy is integrated for preheating. The COP is a function of the source temperature of the ambience being raised by 10 K by solar thermal energy.

b.) Wetterdatensatz MUN TMY

Wärmeerzeugung	Variante 1a	Variante 2a
Zusatzwärme	Kessel Gas $\eta = 0,8$ MWh	Luft-Wärmepumpe Strom $COP = F(T_a)$ MWh
	61	11

Tabelle 7-48: Endenergiebedarf der sekundären Erzeugungseinheiten, der durch den Einsatz des solarthermischen Wärmeerzeugers reduziert wird. Die solarthermisch erzeugte Energie wird dabei direkt ohne Speicherung eingebunden.

Table 7-48: As in Table 7-45 with weather data of MUN TMY

Wärmeerzeugung	Variante 1b	Variante 2b
Zusatzwärme	Kessel Gas MWh	Luft-Wärmepumpe Strom MWh
	0	0

Tabelle 7-49: Endenergiebedarf der sekundären Erzeugungseinheiten, der durch den Einsatz des solarthermischen Wärmeerzeugers reduziert wird. Die solarthermisch erzeugte Energie wird dabei zusätzlich über einen thermischen Speicher geführt und dort zwischengespeichert, so dass sich der Energiebedarf der sekundären Erzeugungseinheiten weiter reduzieren lässt.

Table 7-49: As in Table 7-46 with weather data of MUN TMY

Kollektorfeld		Variante 3a	Variante 3b
Ertrag maximal möglich MWh	Einbindung Quelle WP Wärme MWh	Luft-Luko-Wärmepumpe ohne Speicher Strom MWh	mit Speicher Strom MWh
983	18	14	12

Tabelle 7-50: Endenergiebedarf einer Luft-Wärmepumpe als sekundäre Erzeugungseinheit, wenn in diese solarthermisch erzeugte Wärme zur Quellenhebung eingebunden wird. Der COP ist dabei eine Funktion der Quelltemperatur der Außenluft, die bei Einbindung von ST um 10 K angehoben wird.

Table 7-50: As in Table 7-47 with weather data of MUN TMY

Zwischenfazit

Wie in der Darstellung für SEA 2.1 zeigt sich, dass der Bruttokollektorsertrag nicht nur der in Kapitel 7.6.1 aufgezeigten Abhängigkeit von der eingestrahlten Energie, sondern auch noch der dabei jeweils anliegenden Außenlufttemperaturen unterliegt. Grundsätzlich deutet sich eine bezogen auf den monatlichen Einstrahlungsverlauf ähnliche Charakteristik ab: Die nach Süden ausgerichtete Fassadenfläche zeigt einen fast konstanten Bruttokollektorsertrag, der im Sommer sogar etwas geringer als im Winter ausfällt. Dies kommt dem außenluftbedingten Heizwärmebedarf der Halle sehr entgegen, wenn die solar erzeugte Wärme für kurze Zeiträume (insbesondere Tag-Nacht) zwischengespeichert werden kann. Hierfür sind Analysen für die systemtechnische Einbindung des Bruttokollektorsertrages erforderlich, bei der auch thermische Speicher in die Betrachtung integriert werden müssen.

Je nach Klimadatensatz (TMY) ergibt sich ein Bruttokollektorertrag von SEA 2.1 für das horizontale Dach von 285 MWh/a (237,5 kWh/m²a) bis 484 MWh/a (403 kWh/m²a) und für den SEA-Kollektor 2.2 von 599 MWh/a (499 kWh/m²a) bis 718 MWh/a (598 kWh/m²a).

Es wird weiterhin noch einmal sehr deutlich, dass sich durch den Einsatz eines thermischen Speichers der solarthermische Deckungsanteil wesentlich steigern lässt. Dieser liegt ohne den Einsatz eines thermischen Speichers bei maximal knapp 30 %. Mit einem möglichen thermischen Speicher als Systemkomponente kann dieser auf 100 % gesteigert werden. Es ist jedoch wichtig, dass auch hier zum Herstellen der Versorgungssicherheit ein zusätzlicher Wärmeerzeuger bereitzuhalten ist, der auch über eine größere thermische Kapazität, die solarthermisch beladen wird, dargestellt werden kann. Eine vollsolare Beheizung ist mit dem SEA Kollektor 2.2 für die betrachtete Industriehalle rechnerisch möglich.

Es ist hervorzuheben, dass der zusätzliche Wärmeerzeuger hinsichtlich des Auslegungspunktes unabhängig vom solarthermischen Deckungsanteil zu berechnen ist. Gleiches gilt im Allgemeinen auch für die hier dargestellten Berechnungen zur solarbasierten Kälteerzeugung über eine einstufige Kältemaschine.

Mit den aufgestellten Varianten an unterschiedlichen Systemkonzepten lässt sich ein Endenergiebedarf berechnen. Dieser stellt eine wesentliche Grundlage zur wirtschaftlichen Bewertung der untersuchten Systemkonzepte dar.

7.6.4 Ergebnisse SEA 2.3 Results for SEA 2.3

7.6.4.1 Ertrag über den Hallenflächen Energy yields for the building's surface areas

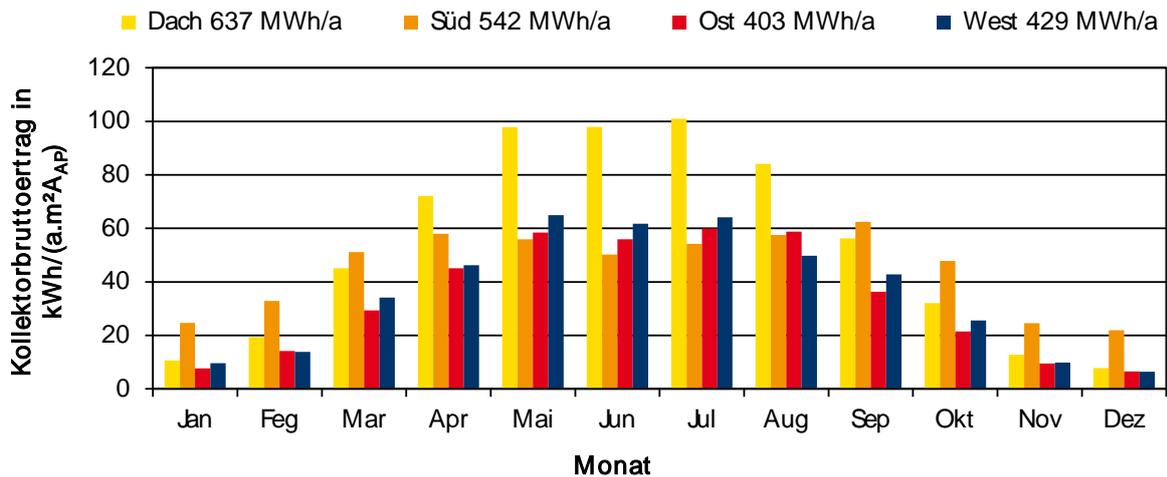


Abbildung 7-49: Kollektorbruttoertrag über die vier Umfassungsflächen der betrachteten Industriehalle mit dem Wetterdatensatz für HH TMY

Figure 7-49: Collector energy yields for the four surface areas of the observed industrial building with weather data of HH TMY

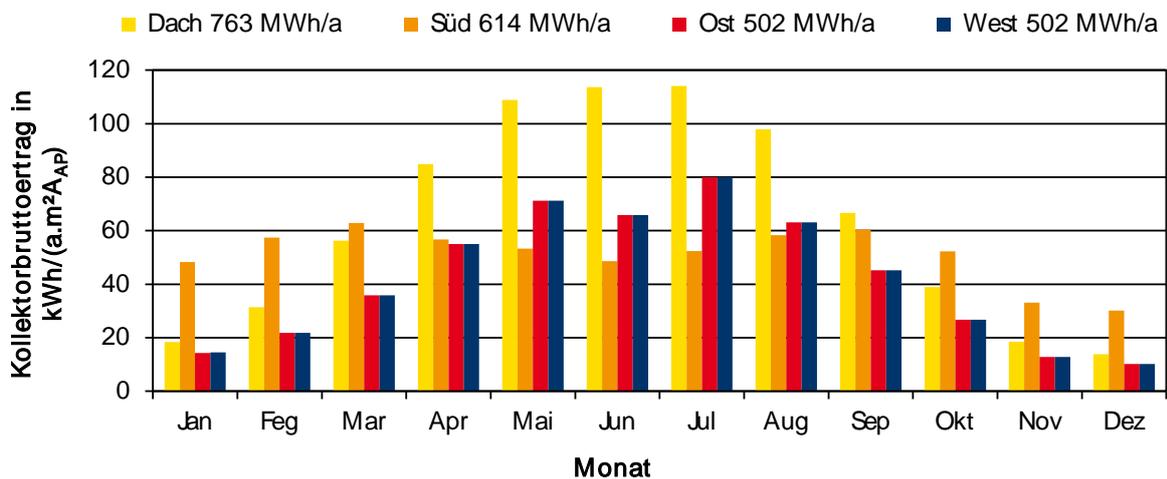


Abbildung 7-50: Kollektorbruttoertrag über die vier Umfassungsflächen der betrachteten Industriehalle mit dem Wetterdatensatz für MUN TMY

Figure 7-50: As in Figure 7-49 with weather data for MUN TMY

7.6.4.2 Bilanz Nutzenergie Beheizung Balance of energy utilisation for heating

Kollektorfeld				solarer Deckungsanteil	
	Beheizung direkt	Beheizung mittels Speicher	Prozesswärme optional	ohne Speicher	mit Speicher
Ertrag maximal möglich MWh	MWh	MWh	MWh		
883	13	40	829	24 %	98 %

Tabelle 7-51: Maximal möglicher Kollektorfeldbruttoertrag (berechnet) und dessen Nutzung für die Anwendungen Beheizung und Prozesswärme mit dem Wetterdatensatz für HH TMY

Table 7-51: Maximum possible collector area energy yield (gross) and its utilisation for heating and process heating with weather data of HH TMY

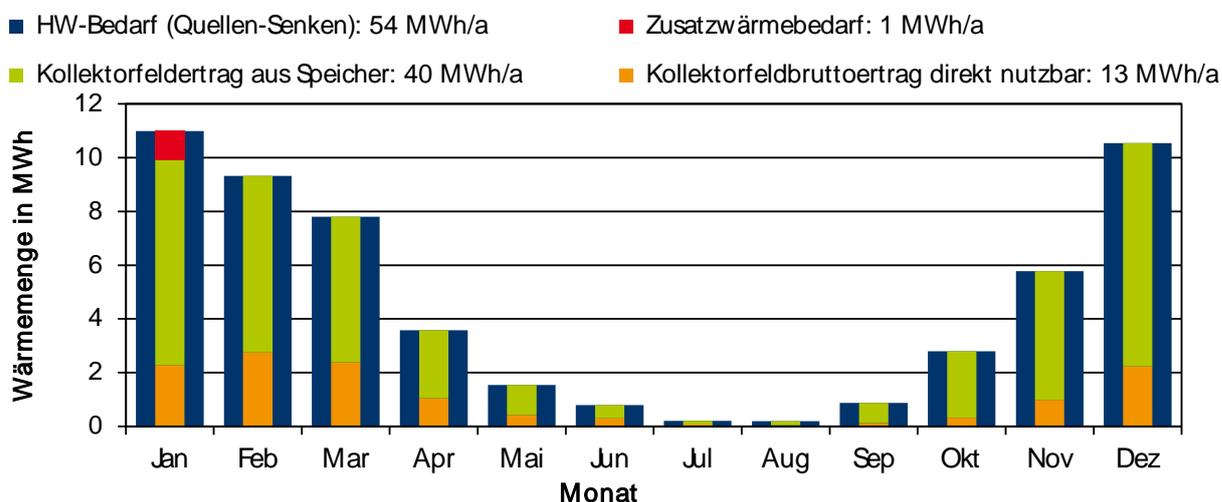


Abbildung 7-51: Monatliche Bilanzierung der Wärmemengen zur Beheizung der Industriehalle mit dem Wetterdatensatz für HH TMY

Figure 7-51: Monthly balance of heat energy amounts required for heating of the industrial building with weather data of HH TMY

Kollektorfeld				solarer Deckungsanteil	
	Beheizung direkt	Beheizung mittels Speicher	Prozesswärme optional	ohne Speicher	mit Speicher
Ertrag maximal möglich MWh	MWh	MWh	MWh		
1046	18	48	979	27 %	100 %

Tabelle 7-52: Maximal möglicher Kollektorfeldbruttoertrag (berechnet) und dessen Nutzung für die Anwendungen Beheizung und Prozesswärme mit dem Wetterdatensatz für MUN TMY

Table 7-52: As in Table 7-51 with weather data of MUN TMY

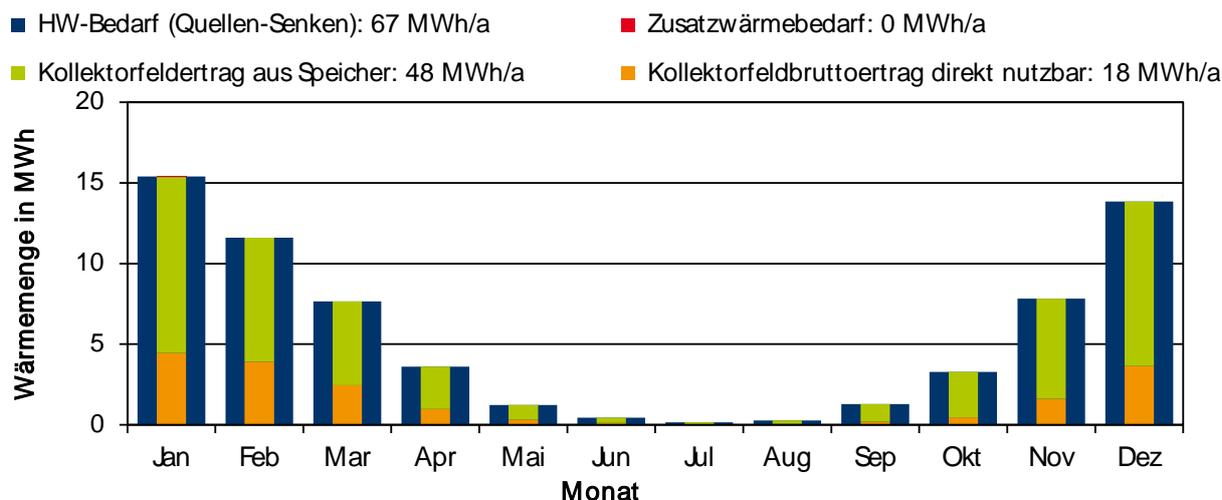


Abbildung 7-52: Monatliche Bilanzierung der Wärmemengen zur Beheizung der Industriehalle mit dem Wetterdatensatz für MUN TMY

Figure 7-52: As in Figure 7-51 with weather data for MUN TMY

7.6.4.3 Dauerlinie Nutzenergie Beheizung Duration curve of energy utilisation for heating

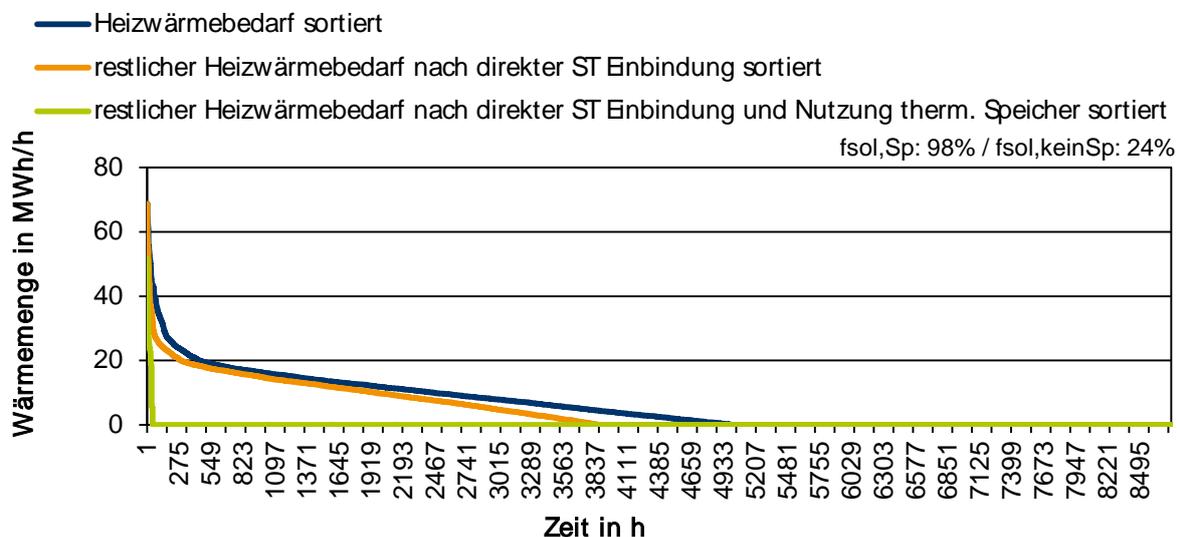


Abbildung 7-53: Geordnete Jahresdauerlinie für den Heizwärmebedarf der Industriehalle mit dem Wetterdatensatz für HH TMY. Weiterhin ist der über einen zusätzlichen Wärmeerzeuger bereitzustellende Heizwärmebedarf nach der direkten Einbindung von solarthermischer Wärme sowie der unter Einbindung eines thermischen Speichers dargestellt.

Figure 7-53: Sorted annual duration curve for the heating demand (blue) of the industrial building with weather data of HH TMY. Furthermore the required heating demand to be provided by a supplementary heat generator after direct input of solar thermal heat is shown (orange) as well as with the integration of a thermal storage (green).

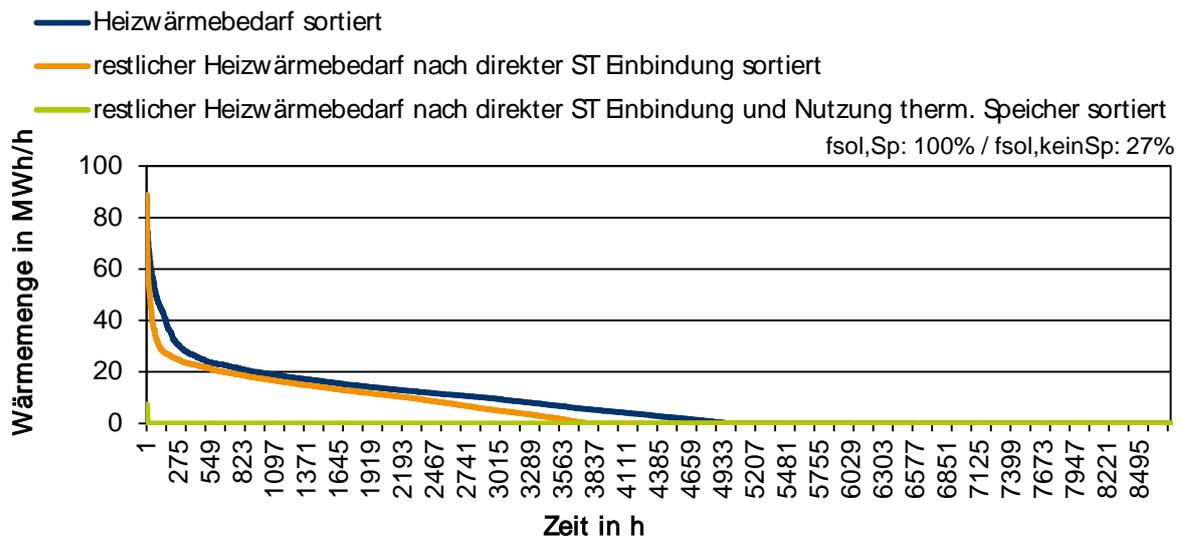


Abbildung 7-54: Geordnete Jahresdauerlinie für den Heizwärmebedarf der Industriehalle mit dem Wetterdatensatz für MUN TMY. Weiterhin ist der über einen zusätzlichen Wärmeerzeuger bereitzustellende Heizwärmebedarf nach der direkten Einbindung von solarthermischer Wärme sowie der unter Einbindung eines thermischen Speichers dargestellt

Figure 7-54: As in Figure 7-53 with weather data for MUN TMY

7.6.4.4 Bilanz Nutzenergie Kühlung Balance of energy utilisation for cooling

Kollektorfeld	KM	solarer Deckungsanteil	
Ertrag nutzbar	COP	Luft-Kollektor Thermische KM, einstufig Antriebstemperatur = 65°C	ohne Speicher
MWh		MWh	
22	0,50	1	98 %

Tabelle 7-53: Kollektorfeldbruttoertrag (berechnet) zum direkten Antrieb einer einstufigen, thermischen Kältemaschine mit einer minimalen Antriebstemperatur von 65°C und der resultierende solare Deckungsanteil am Kühlbedarf mit dem Wetterdatensatz für HH TMY.

Table 7-53: Collector area energy yield for direct powering a single-stage thermal cooling unit with a minimum operating temperature of 65 °C and the corresponding proportion of the cooling energy demand met by the solar energy yield based on weather data of HH TMY

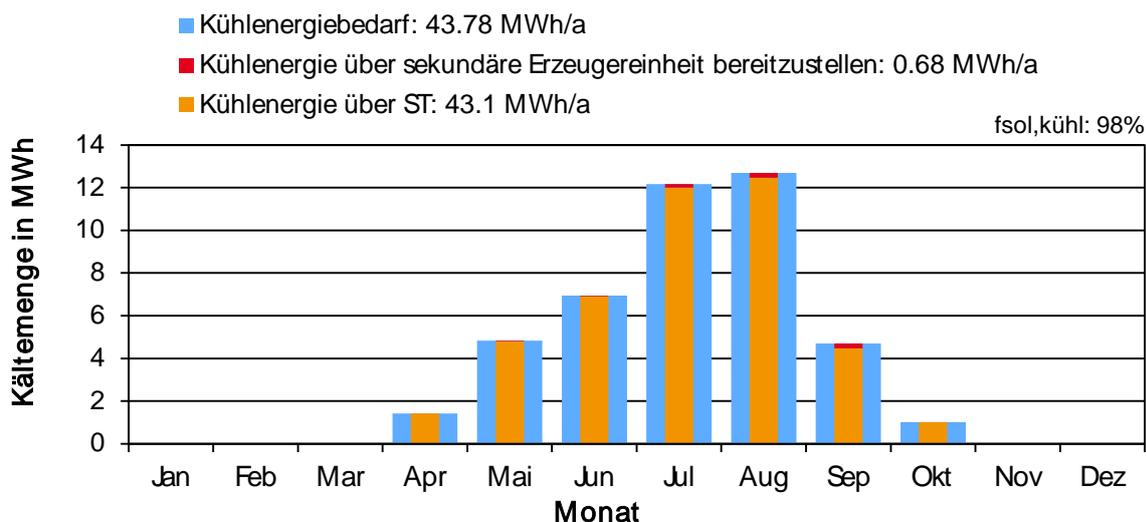


Abbildung 7-55: Monatliche Bilanzierung der Kältemengen zur Kühlung der Industriehalle mit dem Wetterdatensatz für HH TMY.

Figure 7-55: Monthly balance of cooling energy amounts required for cooling of the industrial building with weather data of HH TMY

Kollektorfeld	KM	solarer Deckungsanteil	
Ertrag nutzbar	COP	Luft-Kollektor	ohne Speicher
MWh		Thermische KM, einstufig	
		Antriebstemperatur = 65°C	
27	0,50	1	99 %

Tabelle 7-54: Kollektorfeldbruttoertrag (berechnet) zum direkten Antrieb einer einstufigen, thermischen Kältemaschine mit einer minimalen Antriebstemperatur von 65°C und der resultierende solare Deckungsanteil am Kühlbedarf mit dem Wetterdatensatz für MUN TMY.

Table 7-54: As in Table 7-53 with weather data of MUN TMY

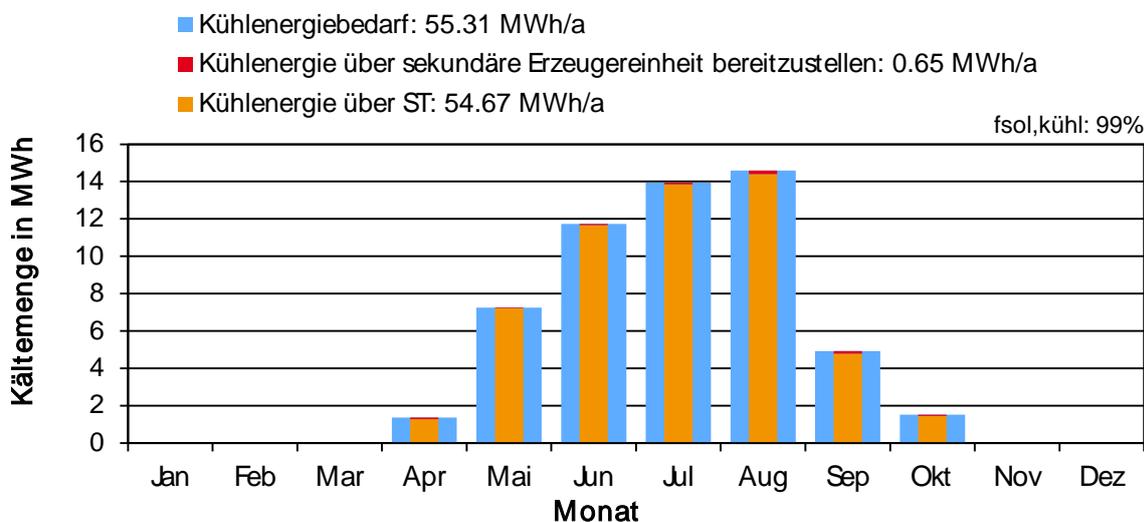


Abbildung 7-56: Monatliche Bilanzierung der Kältemengen zur Kühlung der Industriehalle mit dem Wetterdatensatz für MUN TMY

Figure 7-56: As in Figure 7-55 with weather data for MUN TMY

7.6.4.5 Dauerlinie Nutzenergie Kühlung Duration curve of energy utilisation for cooling



Abbildung 7-57: Geordnete Jahresdauerlinie für den Kühlbedarf der Industriehalle mit dem Wetterdatensatz für HH TMY. Weiterhin ist der über einen zusätzlichen Kälteerzeuger bereitzustellende Kühlbedarf nach der Einbindung von solarthermischer Wärme über eine einstufige solarthermisch angetriebene Kältemaschine dargestellt.

Figure 7-57: Sorted annual duration curve for the cooling demand (blue) of the industrial building with weather data of HH TMY. Furthermore the required cooling demand to be provided by a supplementary cooling generator after integration of the solar thermal heat via a single-stage cooling unit is shown (red).

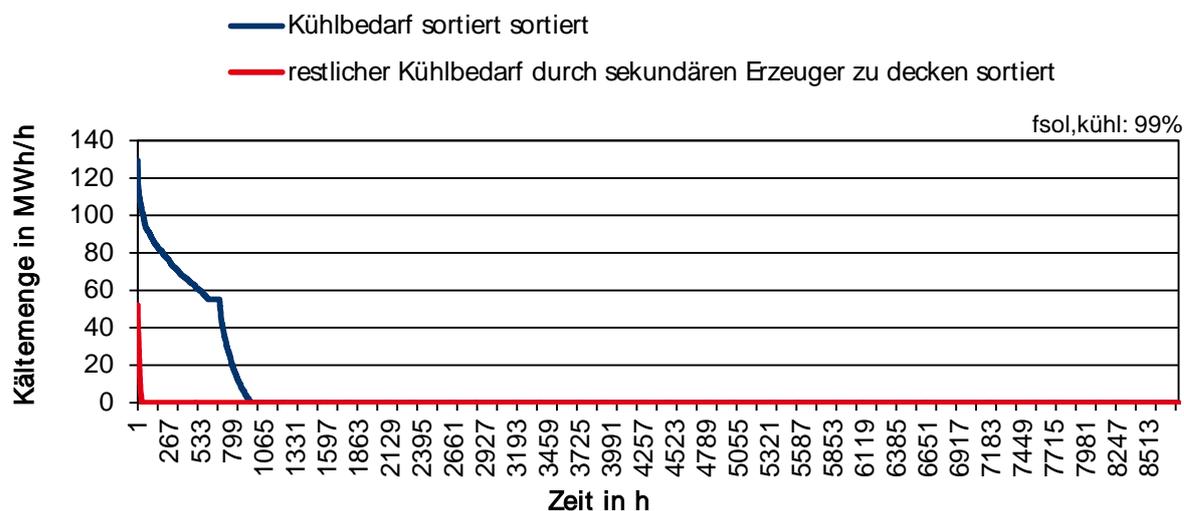


Abbildung 7-58: Geordnete Jahresdauerlinie für den Kühlbedarf der Industriehalle mit dem Wetterdatensatz für MUN TMY. Weiterhin ist der über einen zusätzlichen Kälteerzeuger bereitzustellende Kühlbedarf nach der Einbindung von solarthermischer Wärme über eine einstufige solarthermisch angetriebene Kältemaschine dargestellt.

Figure 7-58: As in Figure 7-57 with weather data for MUN TMY

7.6.4.6 Varianten zur Endenergie Variations of supplementary energy requirement

a.) Wetterdatensatz HH TMY

Wärmeerzeugung	Variante 1a	Variante 2a
Zusatzwärme	Kessel Gas eta = 0,8 MWh	Luft-Wärmepumpe Strom COP = F(T _a) MWh
	52	9

Tabelle 7-55: Endenergiebedarf der sekundären Erzeugungseinheiten, der durch den Einsatz des solarthermischen Wärmeerzeugers reduziert wird. Die solarthermisch erzeugte Energie wird dabei direkt ohne Speicherung eingebunden.

Table 7-55: Final energy demand of secondary (supplementary) generators, i.e. after being reduced by the usage of the solar heat generator. In these cases, solar thermal energy is being used directly without energy storage.

Wärmeerzeugung	Variante 1b	Variante 2b
Zusatzwärme	Kessel Gas MWh	Luft-Wärmepumpe Strom MWh
	1	0

Tabelle 7-56: Endenergiebedarf der sekundären Erzeugungseinheiten, der durch den Einsatz des solarthermischen Wärmeerzeugers reduziert wird. Die solarthermisch erzeugte Energie wird dabei zusätzlich über einen thermischen Speicher geführt und dort zwischengespeichert, so dass sich der Energiebedarf der sekundären Erzeugungseinheiten weiter reduzieren lässt.

Table 7-56: Final energy demand of secondary (supplementary) generators, i.e. after being reduced by the usage of the solar heat generator. In these cases, solar thermal energy is buffered in an energy storage allowing for a larger reduction of the secondary energy provision.

Kollektorfeld		Variante 3a	Variante 3b
Ertrag maximal möglich MWh	Einbindung Quelle WP Wärme MWh	Luft-Luko-Wärmepumpe ohne Speicher Strom MWh	mit Speicher Strom MWh
883	13	11	9

Tabelle 7-57: Endenergiebedarf einer Luft-Wärmepumpe als sekundäre Erzeugungseinheit, wenn in diese solarthermisch erzeugte Wärme zur Quellenhebung eingebunden wird. Der COP ist dabei eine Funktion der Quelltemperatur der Außenluft, die bei Einbindung von ST um 10 K angehoben wird.

Table 7-57: Final energy demand of an air-water heat pump as secondary energy generator, if solar thermal energy is integrated for preheating. The COP is a function of the source temperature of the ambience being raised by 10 K by solar thermal energy.

b.) Wetterdatensatz MUN TMY

Wärmeerzeugung	Variante 1a	Variante 2a
Zusatzwärme	Kessel Gas $\eta = 0,8$ MWh	Luft-Wärmepumpe Strom $COP = F(T_a)$ MWh
	60	11

Tabelle 7-58: Endenergiebedarf der sekundären Erzeugungseinheiten, der durch den Einsatz des solarthermischen Wärmeerzeugers reduziert wird. Die solarthermisch erzeugte Energie wird dabei direkt ohne Speicherung eingebunden.

Table 7-58: As in Table 7-55 with weather data of MUN TMY

Wärmeerzeugung	Variante 1b	Variante 2b
Zusatzwärme	Kessel Gas MWh	Luft-Wärmepumpe Strom MWh
	0	0

Tabelle 7-59: Endenergiebedarf der sekundären Erzeugungseinheiten, der durch den Einsatz des solarthermischen Wärmeerzeugers reduziert wird. Die solarthermisch erzeugte Energie wird dabei zusätzlich über einen thermischen Speicher geführt und dort zwischengespeichert, so dass sich der Energiebedarf der sekundären Erzeugungseinheiten weiter reduzieren lässt.

Table 7-59: As in Table 7-56 with weather data of MUN TMY

Kollektorfeld		Variante 3a	Variante 3b
Ertrag maximal möglich MWh	Einbindung Quelle WP Wärme MWh	Luft-Luko-Wärmepumpe ohne Speicher Strom MWh	mit Speicher Strom MWh
1046	18	14	12

Tabelle 7-60: Endenergiebedarf einer Luft-Wärmepumpe als sekundäre Erzeugungseinheit, wenn in diese solarthermisch erzeugte Wärme zur Quellenhebung eingebunden wird. Der COP ist dabei eine Funktion der Quelltemperatur der Außenluft, die bei Einbindung von ST um 10 K angehoben wird.

Table 7-60: As in Table 7-57 with weather data of MUN TMY

Zwischenfazit

Die Berechnungen decken sich mit dem für den Kollektor SEA 2.1 und SEA 2.2 dargestellten Fazit. Eine vollsolare Wärmeversorgung ist unter Einbindung eines thermischen Speichers rechnerisch möglich. Zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit muss ein zusätzlicher Wärmeerzeuger oder eine entsprechend größere Kapazität des thermischen Speichers berücksichtigt werden. Die Leistungsabgabe im Auslegungspunkt ist nicht abhängig vom solarthermischen Deckungsanteil.

7.7 Zusammenfassung Summary

In den folgenden Tabellen werden die Ergebnisse aus den vorangegangenen Kapiteln noch einmal zusammenfassend dargestellt. Die Betrachtung findet für den Standort HH mit dem Wetterdatensatz TMY statt. Für den thermischen Speicher wurde von einer effektiv nutzbaren thermischen Kapazität ausgegangen, die einem thermisch aktivierbaren Hallenboden aus Beton mit einem Aufbau von 30 cm entsprechen würde (Betonkernaktivierung). Diese gleiche effektiv nutzbare Kapazität kann auch durch z. B. Wasser bereitgestellt werden (Wasserspeicher statt Betonkernaktivierung), so dass sich hier ein geringeres Volumen ergibt (in etwa Faktor 1/2).

7.7.1 Ergebnisse SEA 2.1

Mit dem unabgedeckten Kollektor SEA 2.1 kann bereits ein sehr hoher solarthermischer Deckungsanteil generiert werden. Mit dem TMY-Wetterdatensatz von HH liegt dieser bei 21 %. Wenn hier ein thermischer Speicher eingebunden wird, dann kann dieser signifikant auf 88 % gesteigert werden.

Wärmeerzeugung	Variante 1b	Variante 2b
Zusatzwärme	Kessel Gas MWh	Luft-Wärmepumpe Strom MWh
	7,86	1,45

Tabelle 7-61: Zusätzlicher Energiebedarf für die Varianten 1b und 2b mit SEA 2.1 mit dem Wetterdatensatz HH TMY (siehe Tabelle 7-24)

Table 7-61: Additional energy requirement for variants 1b and 2b with SEA 2.1 and the weather data of HH TMY (s. Table 7-24)

Kollektorfeld		Variante 3a	Variante 3b
Ertrag Maximal Möglich MWh	Einbindung Quelle WP Wärme MWh	Luft-Luko-Wärmepumpe ohne Speicher Strom MWh	mit Speicher Strom MWh
485	11	11,02	9,7

Tabelle 7-62: Zusätzlicher Energiebedarf für die Varianten 3a und 3b mit SEA2.1 mit dem Wetterdatensatz HH TMY (siehe Tabelle 7-25)

Table 7-62: Additional energy demand for variants 3a and 3b with SEA 2.1 and the weather data of HH TMY (s. Table 7-25)

Der für eine Beheizung zusätzlich erforderliche Endenergieeinsatz liegt in diesem Berechnungsbeispiel bei 8 MWh Gas oder 1 MWh Strom. Wird der Luftkollektor zur Quellanhebung in die Wärmepumpe eingebunden, so ergibt sich ein höherer Bedarf von 11 MWh ohne Einbindung eines thermischen Speichers und 10 MWh mit der Einbindung eines thermischen Speichers.

7.7.2 Ergebnisse SEA 2.2

Mit dem abgedeckten Kollektor SEA 2.2 kann der solarthermische Deckungsanteil gegenüber der Version SEA 2.1 gesteigert werden. Mit dem TMY-Wetterdatensatz von HH liegt dieser bei 24 %. Wenn hier ein thermischer Speicher eingebunden wird, dann kann dieser signifikant auf 97 % gesteigert werden, so dass damit faktisch eine vollsolare Wärmeerzeugung umgesetzt werden kann.

Wärmeerzeugung	Variante 1b	Variante 2b
Zusatzwärme	Kessel Gas MWh	Luft-Wärmepumpe Strom MWh
	1,81	0,35

Tabelle 7-63: Zusätzlicher Energiebedarf für die Varianten 1b und 2b mit SEA2.2 mit dem Wetterdatensatz HH TMY (siehe Tabelle 7-46)

Table 7-63: Additional energy requirement for variants 1b and 2b with SEA 2.2 and the weather data of HH TMY (s. Table 7-46)

Kollektorfeld		Variante 3a	Variante 3b
Ertrag maximal möglich MWh	Einbindung Quelle WP Wärme MWh	Luft-Luko-Wärmepumpe ohne Speicher Strom MWh	mit Speicher Strom MWh
830	13	10,97	9,51

Tabelle 7-64: Zusätzlicher Energiebedarf für die Varianten 3a und 3b mit SEA2.2 mit dem Wetterdatensatz HH TMY (siehe Tabelle 7-47)

Table 7-64: Additional energy demand for variants 3a and 3b with SEA 2.2 and the weather data of HH TMY (s. Table 7-47)

Der für eine Beheizung zusätzlich erforderliche Endenergieeinsatz liegt in diesem Berechnungsbeispiel bei 1,8 MWh Gas oder 0,35 MWh Strom. Wird der Luftkollektor zur Quellanhebung in die Wärmepumpe eingebunden, so ergibt sich ein höherer Bedarf von 10,97 MWh ohne Einbindung eines thermischen Speichers und 9,51 MWh mit der Einbindung eines thermischen Speichers.

7.7.3 Ergebnisse SEA 2.3

Mit dem abgedeckten Kollektor SEA 2.3 kann der solarthermische Deckungsanteil gegenüber dem Kollektor SEA 2.2 noch einmal gesteigert werden. Mit dem TMY-Wetterdatensatz von HH liegt dieser bei 24 %. Wenn hier ein thermischer Speicher eingebunden wird, dann kann dieser wieder signifikant auf 98 % gesteigert werden, so dass damit ebenfalls faktisch eine vollsolare Wärmeerzeugung umgesetzt werden kann.

Wärmeerzeugung	Variante 1b	Variante 2b
Zusatzwärme	Kessel Gas MWh	Luft-Wärmepumpe Strom MWh
	1,35	0,25

Tabelle 7-65: Zusätzlicher Energiebedarf für die Varianten 1b und 2b mit SEA2.3 mit dem Wetterdatensatz HH TMY (siehe Tabelle 7-56)

Table 7-65: Additional energy demand for variants 1b and 2b with SEA 2.3 and the weather data of HH TMY (s. Table 7-56)

Kollektorfeld		Variante 3a	Variante 3b
Ertrag maximal möglich	Einbindung Quelle WP Wärme	Luft-Luko-Wärmepumpe ohne Speicher Strom	mit Speicher Strom
MWh	MWh	MWh	MWh
883	13	10,96	9,49

Tabelle 7-66: Zusätzlicher Energiebedarf für die Varianten 3a und 3b mit SEA2.3 mit dem Wetterdatensatz HH TMY (siehe Tabelle 7-57)

Table 7-66: Additional energy demand for variants 3a and 3b with SEA 2.3 and the weather data of HH TMY (s. Table 7-57)

Der für eine Beheizung zusätzlich erforderliche Endenergieeinsatz liegt in diesem Berechnungsbeispiel bei 1,35 MWh Gas oder 0,25 MWh Strom. Wird der Luftkollektor zur Quellanhebung in die Wärmepumpe eingebunden, so ergibt sich ein höherer Bedarf von 10,96 MWh ohne Einbindung eines thermischen Speichers und 9,49 MWh mit der Einbindung eines thermischen Speichers.

Es lässt sich damit schließen, dass sich die höhere thermische Effizienz der Kollektoren SEA 2.2 und SEA 2.3 gegenüber SEA 2.1 auch in der systemischen Betrachtung durchsetzt. Bei der direkten Einbindung der solarthermisch erzeugten Energie wird bei den Systemen mit SEA 2.2 und SEA 2.3 deutlich weniger zusätzliche Energie benötigt, als dies bei der Kombination mit SEA 2.1 der Fall ist. Bei einer Einbindung zur Quellanhebung bei einer Luft-Wärmepumpe sind die zusätzlich erforderlichen Energiemengen in etwa gleich groß.

Fazit:

Die hier aufgezeigten Berechnungen stellen die grundlegenden systemtechnischen Zusammenhänge zwischen Wärmeerzeugung, -speicherung und -verbrauch her. Der unabgedeckte Kollektor SEA 2.1 ist auf Grund der geringeren thermischen Effizienz für den Einsatz zur Quellanhebung einer Luft-Wärmepumpe zu empfehlen, während die beiden anderen betrachteten Kollektortypen tendenziell auch eher zur direkten Nutzung der solarthermisch erzeugten Wärme in Betracht kommen. Wichtig ist dabei, dass ein zusätzlicher Wärmeerzeuger in das System für die Gewährleistung der Versorgungssicherheit zu integrieren ist. Alternativ ist auch ein entsprechend größer dimensionierter thermischer Speicher vorstellbar. Der Auslegungspunkt hinsichtlich der Leistungsabgabe dieses zusätzlichen Wärmeerzeugers ist unabhängig von dem solarthermischen Deckungsanteil. Grundsätzlich berechnen sich mit den untersuchten Kollektoren sehr hohe solarthermische Deckungsanteile an der Wärmeversorgung für die betrachtete Industriehalle. Eine rechnerisch vollsolare Wärmeerzeugung ist mit den untersuchten Kollektoren in einer entsprechenden Systemumgebung möglich. Die vorgestellten Varianten an Systemkonzepten stellen eine wesentliche Grundlage für eine wirtschaftliche Bewertung des Kollektors in seine Systemumgebung dar.

8 Sonstige Erkenntnisse im Forschungsprojekt Other findings during the research project

Kurzfassung

Dieses Kapitel konzentriert sich auf Erkenntnisse, welche nicht oder nur peripher zur Zielsetzung des Forschungsprojektes gehörten, aber dennoch angemerkt werden sollten. Erstens wird verdeutlicht, dass der SEA-Kollektor 2.1 in windruhigem Umfeld bzw. Gebäudeseiten erheblich effizienter ist als im Basisfall einer Windgeschwindigkeit von 3 m/s. Zweitens zeigen die Forschungsstellen ein einfaches Havarie-Konzept auf, das in Tests den hohen Stagnationstemperaturen der abgedeckten SEA-Kollektoren erfolgreich entgegenwirkt. Drittens wird auf die thermische Entlastung der Gebäudehülle durch SEA-Elemente verwiesen. Darüber hinaus finden sich hier grundlegende Anmerkungen zur Auswahl der transparenten Abdeckung, Statik, Entsorgung und Wartung.

Abstract

This chapter focuses on findings which were tangential to or not objectives of this research project, but were deemed noteworthy. First, it is shown that SEA 2.1 proves considerably more efficient in windless environment and how this could be successfully exploited. Second, the research institutions show a simple damage prevention concept for stagnation, successfully countering the high stagnation temperatures of the covered SEA collectors in test runs. Third, the reduction of the building's thermal load by using SEA elements is explained. Moreover basic information regarding the selection of the transparent covering, statics, disposal and maintenance is presented.

8.1 Wind und Kollektoreffizienz Wind and collector efficiency

Mit den Messungen (Kapitel 5) wurde die Windsensitivität des SEA-Kollektors 2.1 durch den deutlichen Einfluss auf die WKL dieses SEA-Kollektors bereits angedeutet. Der Grund hierfür liegt an der unerwünschten Konvektionskühlung des Absorbers durch den Wind. Dadurch reduziert sich seine thermische Gesamteffizienz, da mehr Energie an die Umgebung statt an das Arbeitsfluid abgegeben wird.

Um die normgerechte Vermessung des SEA-Kollektors 2.1 zur Windsensitivität mit der Windsensitivität des abgedeckten SEA-Kollektors 2.2 vergleichen zu können, wurde der abgedeckte Kollektor zusätzlich zur normgerechten Vermessung abgedeckter Kollektoren bei einer Windgeschwindigkeit von 3 m/s, auch bei einer reduzierten Windgeschwindigkeit von 0,5 m/s für den Massenstrom von 100 kg/h vermessen.

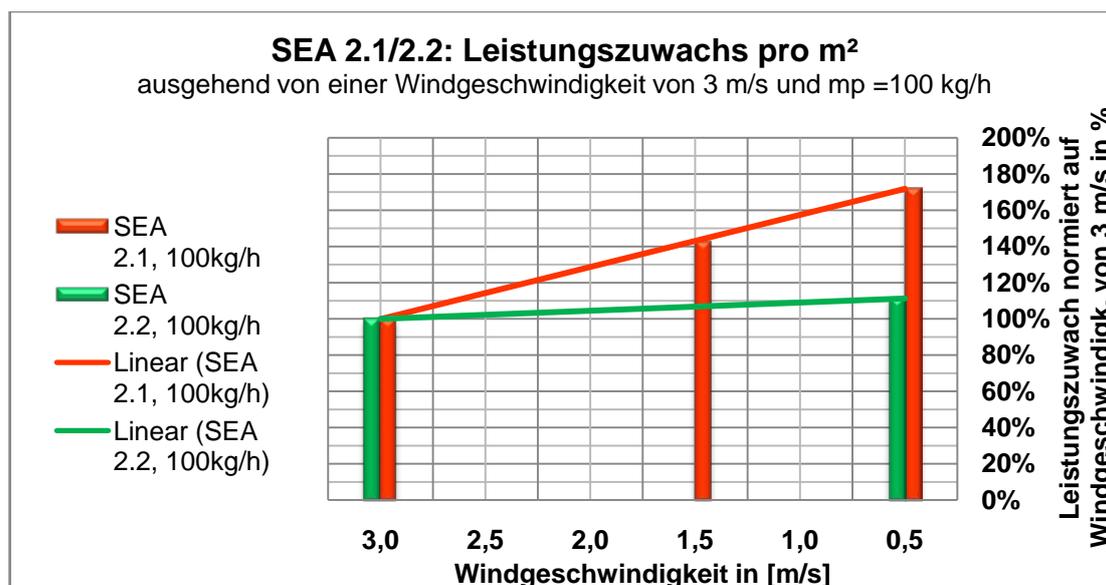


Abbildung 8-1: Leistungszuwachs pro m² für SEA 2.1 und 2.2 ausgehend von einer Windgeschwindigkeit von 3 m/s (100%) für geringere Werte bei einem Massenstrom von 100 kg/h

Figure 8-1: Output gain per m² of SEA 2.1 and 2.2 based on 3 m/s (100%) for lower values with a mass flow of 100 kg/h

So zeigte sich erwartungsgemäß, dass durch die transparente Abdeckung die Windsensitivität des Kollektors stark reduziert wurde. Die unterschiedliche Verbesserung der thermischen Effizienz beider SEA-Kollektoren 2.1 und 2.2 unter geringerem Windeinfluss wurde in Abbildung 8-1 auf Basis der prozentualen Verbesserung der Leistung pro m² wiedergegeben (normiert auf $v_{\text{Wind}} = 3,0 \text{ m/s}$).

Drei verschiedene Schlüsse lassen sich daraus ableiten. Erstens scheint der Einfluss der Windgeschwindigkeit für die betrachteten Bereiche des SEA-Kollektors 2.1 hinlänglich linear zu sein. Zweitens können die Erträge dieses SEA-Kollektors in windstiller Region bzw. Umfeld deutlich zu den im Kapitel 5.5 angegebenen Werten erhöht werden, da die dortigen Ertragsvergleiche aller drei SEA-Kollektoren bei einer angenommenen parallel zum Absorber verlaufenden Windgeschwindigkeit von 3 m/s durchgeführt wurden, und drittens wird die deutlich geringere Windsensitivität des abgedeckten SEA-Kollektors 2.2. offensichtlich.

Die Vergleichsbasis von 3 m/s für den Windeinfluss ist für Deutschland ein guter Mittelwert, allerdings kann es regional deutliche Abweichungen geben wie in Abbildung 8-2 zu erkennen.

Darüber hinaus kann der Wind in seiner Intensität auch lokalen Einflüssen der näheren Umgebung unterliegen. So können Windverschattungen oder Windschneisen, welche durch die umliegende Anordnung von Gebäude- oder Waldflächen entstehen, einen vorteilhaften oder abträglichen Einfluss auf die thermische Leistungsfähigkeit des SEA-Kollektors haben.

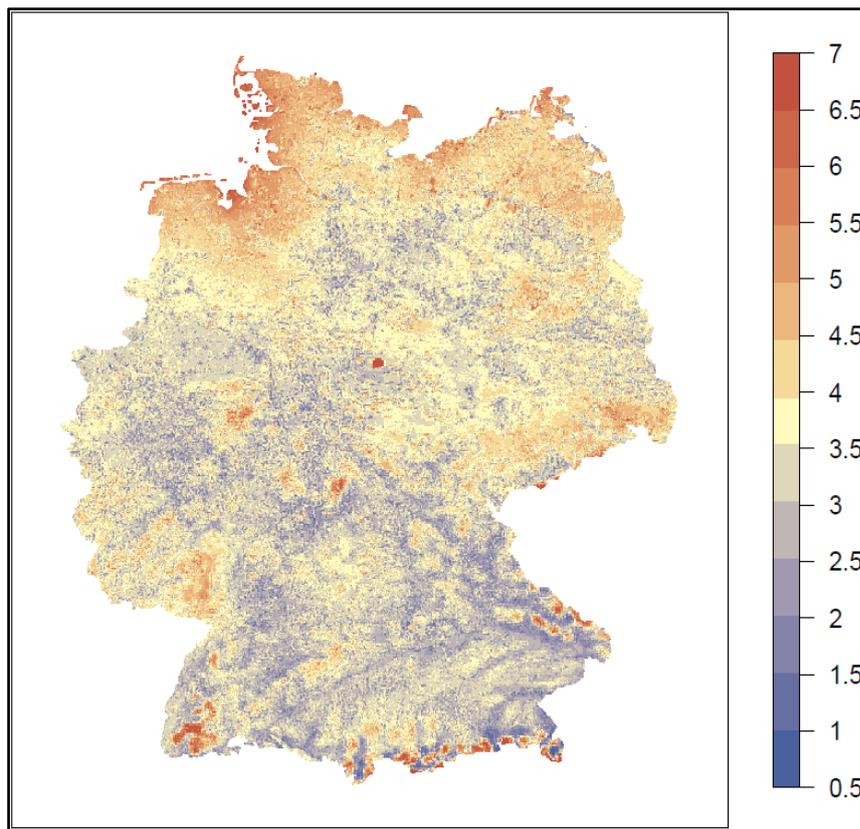


Abbildung 8-2: Klimakarte der Windgeschwindigkeit in m/s für den Zeitraum 1995 bis 2008 auf Basis stündlicher Werte; Quelle: [DWD17b]

Figure 8-2: Climate map of wind speeds in m/s for the period of 1995 - 2008 based on hourly observation; source: [DWD17b]

Ungeachtet dessen ist es aber einfach nachvollziehbar, dass ein Windeinfluss nicht gleichzeitig identisch auf alle Gebäudehüllflächen wirken kann, da angenommen werden kann, dass der Wind zu einem gegebenen Zeitpunkt bei den hier betrachteten Gebäudehöhen stets aus einer Richtung kommt. Während eine Fassadenseite bspw. dem Wind frontal gegenübersteht, liegt die gegenüberliegende im Windschatten, bzw. die restlichen Fassadenseiten sowie das Dach unterliegen streichendem Wind. Die Vermessung des Fraunhofer ISE zu den SEA-Kollektoren erfolgte nach Norm stets bei einem Windstrom parallel zum Absorber, d.h. streichendem Wind, da dieser konvektiv den stärksten Kühleffekt hat. Entsprechend kann die Kollektoreffizienz der nicht windbestrichenen Gebäudehüllflächen höher sein.

Die Frage nach dem Windeinfluss ist also für die Entscheidung zwischen unabgedeckten und abgedecktem SEA-Kollektor bedeutend und kann in diesen drei Überlegungen zusammengefasst werden:

1. Wie hoch sind die regionalen Windgeschwindigkeiten?
2. Gibt es nennenswerte lokale Windeinflüsse durch die unmittelbare Umgebung?
3. Welche Gebäudehüllfläche steht wie zur vorherrschenden Windrichtung auf Basis der Ergebnisse von 1.) und 2.)?

8.2 Transparente Abdeckung und konstruktive Spannungen **Transparent covering and constructional tensions**

8.2.1 Polycarbonat-Abdeckung **Polycarbonate covering**

Die Wahl der transparenten Abdeckung fiel für die SEA-Kollektoren 2.2 und 2.3 auf eine 3 mm starke Makrolon[®]-UV-Massivplatte der Firma Bayer MaterialScience bzw. Covestro. Vorwiegend wird zwar für abgedeckte solare Luftkollektoren Glas als transparente Abdeckung verwendet, jedoch erschien das in Hinblick auf den Anwendungsbereich der SEA-Kollektoren unvorteilhaft. Das spezifische Gewicht von Glas mit ca. 2500 kg/m³ ist mehr als doppelt so hoch wie das der Makrolon[®]-UV-Massivplatte (1200 kg/m³). Bei einer 3 mm starken und 2 m² großen Abdeckung bedeutet dies einen Gewichtsunterschied von 7,8 kg bzw. 3,9 kg pro m².

Da SEA-Kollektoren auf Sandwichelementen basieren und letztendlich neben ihrer Kollektorfunktion auch die Gebäudehülle darstellen, würden durch die Verwendung von Glas als transparenter Abdeckung deutlich größere statische Änderungen auf das Sandwichelement sowie die tragende Unterkonstruktion entstehen. Die Gewichtsersparnis ist in der Metallleichtbauweise also ein wichtiger Faktor.

Darüber bestehen bei der Makrolon[®]-UV-Massivplatte klare Vorteile in Elastizität, Bearbeitung (bspw. zur Befestigung), Verletzungsprävention bei Schäden sowie in der deutlich geringeren Wärmeleitfähigkeit im Verhältnis zu bspw. Kalk-Natron-Glas. In Hinblick auf eine alternative Ausführung des Kollektors besitzt Polycarbonat ebenfalls mehr Flexibilität in der Konstruktion. Im Gegensatz zu Glas könnten mit Polycarbonat ggf. auch noch dünnere Stärken Anwendung für SEA finden. Mit Werten von 87 % besitzt die transparente Makrolon[®]-UV-Abdeckung (clear 2099, 3 mm Massivplatte) auch eine hohe Transluzenz und ist UV-beständig bearbeitet. Für weitere Eigenschaften der gewählten transparenten Abdeckung wird auf das entsprechende Produktdatenblatt von Covestro verwiesen [Cov17]. Dennoch müssen bei einem Vergleich zwischen Glas und Polycarbonat auch weitere Aspekte wie Dauerbeständigkeit unter Beibehaltung des Transmissionsgrads sowie z. B. Hagelschlagbeständigkeit berücksichtigt werden.

8.2.2 Wärmeausdehnung und konstruktive Spannungen **Thermalexpansion and constructive tensions**

Da Polycarbonate Thermoplaste sind, muss den Temperatureinflüssen auf die transparente Abdeckung besondere Beachtung geschenkt werden. Laut dem Produktdatenblatt der Firma Covestro ist die verwendete Polycarbonat-Platte bis 128 °C unter einem Druck von 1,80 MPa formbeständig [Cov17]. Als Dauergebrauchstemperatur wird ein Maximalwert von 120 °C vom Hersteller angegeben. Diese Temperaturen werden selbst unter Stagnation für die transparente Abdeckung nicht erreicht. Allerdings besitzt Polycarbonat einen deutlich höheren linearen Wärmeausdehnungskoeffizient als Stahl. Laut dem Produktdatenblatt ist für die verwendete Makrolon[®]-UV-Massivplatte einen Wert von $0,65 \cdot 10^{-4}/K$ anzusetzen, wohingegen der von Stahl etwa bei $0,15 \cdot 10^{-4}/K$ liegt.

Material	Lin. WAD	Start-Tmp.	End-Tmp.	Temperatur-differenz	Bauteil-länge	Längenaus-dehnung
	α	T_0	T_1	ΔT	L	ΔL
	K^{-1}	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	K	m	mm
Polycarbonat	7,00E-05	27	130	103	2,00	14,4
Makrolon®	6,50E-05	27	130	103	2,00	13,4
Stahl	1,50E-05	27	130	103	2,00	3,1

Tabelle 8-1: Berechnung der Wärmeausdehnung der verschiedenen Materiale für 2 m Länge und ΔT von 103 K

Table 8-1: Calculation of the thermal expansion of the different materials for component lengths of 2 m and a ΔT of 103 K.

Entsprechend wurde von den beiden Forschungsstellen erwartet, dass es auf Grund der Fixierung zwischen Sandwichelement, Stahlwellprofil (Absorber) und der Polycarbonat-Platte zu konstruktiven Spannungen im SEA-Kollektor 2.3, insbesondere unter Stagnation, kommt sowie ggf. zu leichten Verformungen des Thermoplasts. Während sich im Betrieb keine Probleme zeigten, zeigten sich die erwarteten Verformungen der Polycarbonat-Platte im Stagnationsfall (Abbildung 8-3). Im Hinblick auf eine Produktentwicklung müssen die thermischen Ausdehnungen bei der Konstruktion berücksichtigt werden (Fest-Los-Lagerung).

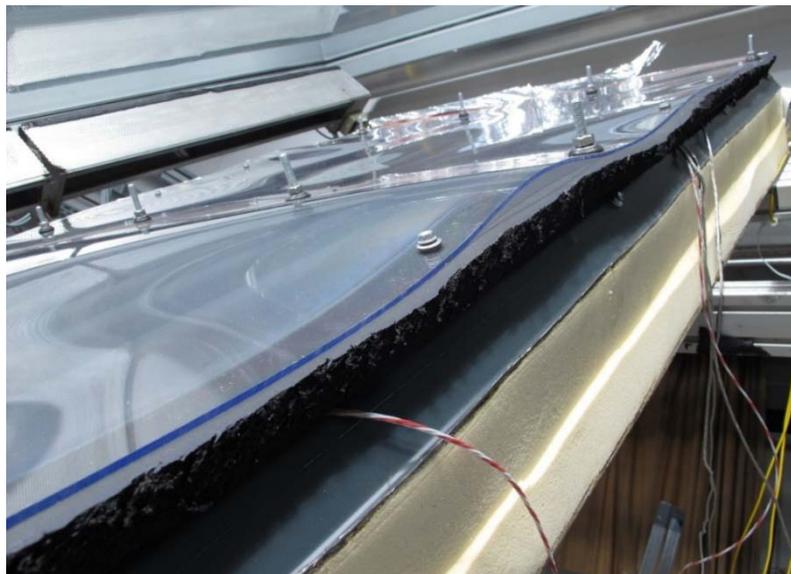


Abbildung 8-3: Foto der beobachteten Wellung der PC-Platte unter Stagnation (SEA 2.3)

Figure 8-3: Photo of the observed corrugation of the PC sheet under stagnation (SEA 2.3)

8.3 Havarie-Konzept Damage prevention concept

Im Rahmen des Projektes wurde auch untersucht, welche technischen Möglichkeiten es gibt, die Temperaturbelastung der im Kollektor verbauten Komponenten zu reduzieren. Durch die Stagnationsmessungen wurde gezeigt, dass die Optimierung der Kollektoren auch immer eine Erhöhung der Stagnationstemperaturen mit sich bringt. Weiter wurde im Kapitel 5.6.4 gezeigt, dass sich die Stagnationstemperaturen

wieder durch die Umrechnung auf die Einstrahlungsbedingungen in der Fassade deutlich reduzieren.

Um technisch oder regelungstechnisch auf die Gegebenheiten einwirken zu können, wurde untersucht, wie ein Havarie-Konzept aussehen kann, um so sicherstellen zu können, dass es bei der Realisierung einer Anlage mit diesen Kollektoren zu keinen Schäden an der Fassade aufgrund zu hoher Temperaturen kommt. Da erstens der Dämmkern aus Polyurethan-Hartschaum oder der PU-Haftvermittler in Sandwich-elementen mit Mineralwoll-Kerndämmung nicht für Dauerbelastungen jenseits 85 °C oder kurzzeitigen Extrembelastungen von über 120 °C ausgelegt ist und zweitens, um möglichen Verformungen der thermoplastischen Polycarbonat-Platte (Kapitel 8.2.2) entgegenzuwirken, sollten die Temperaturen unter Stagnation im Kollektor gesenkt werden. Detaillierte Angaben zu den maximalen Belastungstemperaturen des PU hängen von der verwendeten Rezeptur ab und die Forschungsstellen verweisen auf die beteiligten Industriepartner. Die angegebenen Werte wurden in den PBA als Richtwerte gesetzt.

Ein einfaches Havarie-Konzept könnte sein, dass im Falle eines Anlagenstillstandes Lüftungsklappen, die an den obersten Kollektor-Reihen angebracht sind, geöffnet und die Kollektoren hierdurch konvektionsgekühlt werden können. Die Öffnung dieser Klappen muss passiv bzw. dezentral erfolgen, weil ein Havarieschutz stets vom Worst-Case-Szenario ausgehen muss, bei dem keine Stromzufuhr mehr erfolgen kann. Etwas anders ist eine dezentrale Lösung mit Stromzufuhr durch ein PV-Modul bzw. eine von diesem beladene Batterie zu bewerten, wobei auch dort ein gewisses Ausfallrisiko zu berücksichtigen ist, das ggf. durch redundante Komponenten minimiert werden sollte.

Bei der Stagnationsmessung des SEA Kollektors 2.3 wurde auch eine Versuchsreihe aufgenommen, bei der alle Anschlüsse entfernt wurden und die Lüftungskanäle offen sind. Luft, die sich im Inneren des Kollektors erwärmt, steigt aufgrund der geringeren Dichte nach oben. Durch diesen „Kamineffekt“ bildet sich eine passive Strömung durch den Kollektor aus. Diese Strömung zieht Umgebungsluft von der Unterseite der Kollektoren nach und kühlt so den Kollektor.

Aus Tabelle 8-2 ist ersichtlich, dass sich die hohen Temperaturen auf dem Sandwichelement so stark reduzieren lassen. Die Temperaturen des Obergurtes z.B. lassen sich von 130,5 °C auf 85,7 °C reduzieren. Der optimierte SEA-Kollektor 2.3 erreicht durch dieses Havarie-Konzept ähnliche Temperaturbelastungsbereiche wie die des Ausgangskollektors SEA 2.1, d. h. dem Nachbau des SEA1-Kollektors, die als unproblematisch eingestuft werden. Wie die Temperaturmessungen der Referenzflächen im FOSTA-Forschungsprojekt P779 (SEA1) bereits zeigten, werden diese Oberflächentemperaturen auf der äußeren Metalldeckschicht bereits für in Sandwichbauweise errichtete Gebäude mit dunkler Farbgebung unter starker solare Einstrahlung in Deutschland erreicht und es zeigen sich keine Langzeitschäden [Fos14a]. Ebenso zeigte sich mit IR-Messungen von der transparenten Abdeckung, dass die Temperatur der Polycarbonat-Platte auf Maximalwerte von 70 °C und darunter sank, was auch laut der Produktbeschreibungen unproblematisch erscheint.

Position Sensoren	Gehäuse geschlossen		Konvektionsgekühlt	
	Messwerte in °C	Normiert in °C ($G = 1000 \text{ W/m}^2$ und $T_a = 30 \text{ °C}$)	Messwerte in °C	Normiert in °C ($G = 1000 \text{ W/m}^2$ und $T_a = 30 \text{ °C}$)
Rückseite 2/3 H	36,3	39,1	36,8	39,6
Rückseite 1/3 H	35,2	38,0	35,9	38,7
Obergurt 2/3 H	125,2	130,5	81,6	85,7
Obergurt 1/2 H	119,0	124,1	81,1	85,2
Untergurt 2/3H	122,7	128,0	69,2	73,0
Untergurt 1/3H	104,7	109,5	61,0	64,5
Absorber 2/3H	128,7	134,1	88,8	93,1

Tabelle 8-2: Stagnationstemperaturwerte in °C des SEA 2.3 Kollektors mit geschlossenem und offenem Gehäuse (Konvektionsgekühlt)

Table 8-2: Temperatures in °C during stagnation in a SEA collector 2.3 with closed and opened casing (convection cooled)

Der Aufstellwinkel des Kollektors betrug bei dieser Messung 45°. Eine Aufstellung des Kollektors auf 90° würde die Konvektionskühlung des Kollektors noch weiter verbessern.

8.4 Wartung Maintenance

Zu Fragen der Wartung können nur einige grundlegende Aussagen getroffen werden, da diese von der letztendlichen konstruktiven Umsetzung der SEA-Kollektoren sowie dem damit verbundenen Energiesystem abhängt. Luftkollektoren sind grundsätzlich wartungsfreundlich, d. h. insbesondere im Vergleich zu flüssigkeitsbasierten Solarkollektoren. Geringere Undichtigkeiten, Frostschutz oder Korrosion stellen keine Probleme für den SEA-Kollektor dar. Die verwendeten Halbzeuge des SEA-Kollektors sind ihrer Beschaffenheit und Ausführung nach für die dauerhafte Anwendung im Außenbereich ausgelegt. Sollte trotzdem der Bedarf entstehen, z. B. den Absorber (Stahlprofil) vom Sandwichelement zu lösen, hängt es von der letztendlichen konstruktiven Ausführung des SEA-Elementes ab – d. h. verklebt oder verschraubt –, ob dies einfach möglich ist.

Eine gewisse Verschmutzung der Kollektorluftkanäle durch Partikel der angesaugten Luft ist weitestgehend unproblematisch und bedarf keiner gesonderten Wartung. Allerdings kann es bei solaren Luftkollektoren von Zeit zu Zeit nötig sein, etwaige Luftfilter auszutauschen. Dabei hängt es von der letztendlichen Systemausführung ab, ob die Luftfilter an den Ansaugöffnungen des Kollektors oder im Lüftungssystem des Gebäudes integriert sind.

Die nachfolgenden Darstellungen basieren auf den Produktbeschreibungen [Cov17]. Für weitergehende Fragen verweisen die Forschungsstellen auf den Hersteller Covestro AG. Hinsichtlich der verwendeten transparenten Polycarbonat-Platte der abgedeckten SEA-Kollektoren (Kapitel 5.3 und 5.4) kann angemerkt werden, dass

diese sich seit vielen Jahrzehnten erfolgreich in der Außenanwendung bewährt hat, insbesondere auch für Dächer. Die verwendete Makrolon[®]-UV-Massivplatte ist auch speziell dafür ausgelegt worden. Sie ist robust, verhältnismäßig leicht und weist eine gute Schlagzähigkeit (Charpy/Izod) aus, sogar bei extrem niedrigen Temperaturen. So sollten Hagel oder ähnliche naturbedingte mechanische Schlägeinwirkungen für die verwendete PC-Abdeckung unproblematisch sein.

Durch die beidseitige UV-Beschichtung wird ein Vergilben der PC-Platte verhindert, was in Hinblick auf die erforderliche Beständigkeit der Transluzenz der Abdeckung eine wichtige und notwendige Eigenschaft ist. So ist die Witterungsbeständigkeit der verwendeten PC-Platte durch beinahe drei Jahrzehnte Außenanwendung sowie zahlreiche Testprogramme vom Hersteller überprüft worden. Daher wird für die optischen Eigenschaften und die Unzerbrechlichkeit vom Hersteller eine 10-Jahres-Garantie auf das Grundprodukt gegeben.

Da die Luftschicht zwischen Absorber und transparenter PC-Abdeckung weitestgehend ruhend ist und keiner kontinuierlichen Luftdurchströmung unterliegt, ist die Notwendigkeit eine Reinigung der Innenseite durch Verschmutzung nach Meinung beider Forschungsstellen eher nicht gegeben. Wie es sich hinsichtlich der Außenseite der Abdeckung verhält, d. h. ob die natürliche Reinigung durch Regenwasser ausreicht, kann hier nicht mit abschließender Gewissheit beantwortet werden. Laut Herstellerangaben ist die verwendete PC-Platte selbstreinigend.

Sollte es zur Notwendigkeit kommen, die transparente Abdeckung auszutauschen oder aus anderen Gründen zeitweise abzumontieren, hängt es von der letztendlichen konstruktiven Ausführung des abgedeckten SEA-Kollektors ab, ob dies möglich ist.

8.5 Statik, Brandschutz und Entsorgung **Statics, fire protection and disposal**

8.5.1 Statik **Statics**

Im Rahmen des Forschungsprojektes war es nicht Zielsetzung, eine Untersuchung zur Statik der entworfenen SEA-Kollektoren durchzuführen. Der Fokus lag auf der energetischen Untersuchung der Bauteile unter Laborbedingungen und es wurden dabei konstruktive Verbände der Einzelbauteile gewählt, die eine hinlängliche Stabilität für die Messungen aufwiesen, aber nicht notwendigerweise in dieser Form praxistauglich oder zulassungsfähig sind. Zudem musste die notwendige Anbringung der Temperatursensoren beim Zusammenbau der Kollektoren berücksichtigt werden. Eine grundlegende Überprüfung müsste im Rahmen einer Produktentwicklung und Zulassung der SEA-Kollektoren als Bauelement erfolgen.

Da es sich bei den einzelnen Komponenten um bereits zugelassene und marktgängige Bauteile handelt, wären folglich im Rahmen einer Statik-Überprüfung die Auswirkungen des Verbundes aller Komponenten im Bauteil sowie der Bauteile im Verbund mit der Unterkonstruktion zu bewerten. Die Auswirkungen der Gewichtsänderungen und die damit verbundenen veränderten Kräfte (Zug- und Schubmodule, Knitterspannung, Schubkriechen etc.) auf das zu Grunde liegende Sandwichelement

sind für sich sowie in ihren Auswirkungen auf die Unterkonstruktion (Stützweiten, Regel- und Sonderbefestigungen) zu prüfen (DIN EN 14509). Dabei sollten auch die verschiedenen Temperaturbelastungen im Betrieb berücksichtigt werden. Ebenso wäre im Rahmen einer Produktentwicklung und Zulassung der gewählten Befestigungsweise der Komponenten untereinander besondere Beachtung zu schenken – da hier nicht alleine statische Gesichtspunkte eine Rolle spielen, sondern auch die thermische Effizienz des Kollektors, die Stagnationstemperaturen, die letztendliche Kosteneffizienz und eine etwaige Wartungsfreundlichkeit.

Die Forschungsstellen beachteten beim Entwurf und Bau der SEA-Kollektoren, dass die Gewichtsanforderungen in der Metallleichtbauweise, also dem möglichen Anwendungsbereich der SEA-Kollektoren, einen wesentlichen Faktor darstellen und wählten die Komponenten und den Verbund entsprechend. Insbesondere bei der Wahl der transparenten Abdeckung in Form einer Polycarbonat-Platte war dies eine wesentliche Erwägung. Zudem sollte die PC-Abdeckung auf Grund ihrer höheren Elastizität gegenüber Windlasten vorteilhafter sein als beispielsweise eine Glasabdeckung.

In Besprechungen der Forschungsstellen mit Mitarbeitern der IS-engineering GmbH, die als Industriepartner am Forschungsprojekt beteiligt war und insbesondere in der statischen Überprüfung von Sandwichelementen langjährige Erfahrungen hat, wurden keine grundlegenden Ausschlusskriterien für die statische Zulassung der verschiedenen SEA-Kollektoren bemerkt, wenngleich letztendlich der konstruktive Verbund der Einzelbauteile natürlich genau geprüft werden muss. Für weitergehende Fragen verweisen die Forschungsstellen auf den Industriepartner IS-engineering GMBH, namentlich Dipl.-Ing. Oliver Raabe und Prof. Dr. Klaus Berner sowie auf die Ausführungen zur Statik von Sandwichelementen [Kos11a], [Kos11b].

8.5.2 Brandschutz Fire protection

Für den Brandschutz gelten ähnliche Aussagen wie für die Statik. Eine genaue Überprüfung wäre im Rahmen einer Produktentwicklung und Zulassung durchzuführen. Für Sandwichelemente schreibt die DIN EN 14509 vor, dass diese so weit wie möglich unter den Bedingungen der Endanwendungen zu prüfen sind, d. h. im Verhalten eines Verbundes aus mehreren Einheiten. Daher werden auch bspw. Dichtungen, genormte Fugen oder Abdeckbleche mit in die Betrachtung einbezogen. Es ist davon auszugehen, dass für die Zulassung von SEA-Elementen ähnliche Anforderungen gestellt werden [Kos11a], [Kos11b].

Es gibt aus Sicht der Forschungsstellen aber keine Gründe davon auszugehen, dass der in den SEA-Elementen realisierte modifizierte Verbund der Bauteile zu einer grundlegenden Änderung der Brandschutzbewertung des Bauelementes im Vergleich zum grundlegenden Sandwich-Bauelement führt. Eine nennenswerter brandschutzrelevanter Einfluss könnte lediglich durch die verwendete PC-Abdeckung entstehen, wobei diese allerdings wie die verwendeten PU-Sandwichelemente auch eine Brandschutzklasse B-s1,d0 nach Klassifizierung durch DIN EN 13501 hat.

8.5.3 Entsorgung und Recycling Disposal and Recycling

Wie bei Sandwichelementen sollte es auch bei SEA-Elementen möglich sein, diese bei sorgfältiger Demontage erneut einzusetzen. Scheidet dies aus und ist eine Entsorgung bzw. ein Recycling erwünscht, ist es sinnvoll, diese Betrachtung anhand der einzelnen Komponenten zu machen, da die SEA-Elemente ein Verbund aus verschiedenen Bauteilen sind.

Das Stahlprofil des Absorbers und die Befestigungen aus Metall bzw. Stahl können auf bekannte und gängige Weise recycelt werden. Beim Sandwichelement ist es notwendig, zuerst die Kerndämmung aus PU oder Mineralwolle mechanisch von den metallischen Deckschichten zu trennen. Für die metallische Deckschicht gilt sodann, was für das Stahlprofil galt. Bei PU gibt es grundsätzlich drei mögliche Arten der Verwertung: Erstens ein Energierecycling durch Verbrennen in modernen Müllverbrennungsanlagen, zweitens ein Rohstoffrecycling, bei dem PU-Hartschaumabfälle mit genau bekannten Rezepturen in Glykolysepolyol umgewandelt wird, das einen Teil der für die Herstellung von PU notwendigen Rohstoffe ersetzen kann, oder drittens ein Werkstoffrecycling, bei dem PU-Hartschaumabfälle durch z. B. Klebpressverfahren in für bestimmte Anwendungsgebiete gerichtete Werkstoffe weiterverarbeitet werden [Kos11a], [Kos11b].

Mineralwolle lässt sich abhängig von der Verklebung wieder- oder als Stopfwohle weiterverwenden. Das stoffliche Recyclingpotential von Mineralwolle ist allerdings niedrig und die energetische Verwertung der nicht-brennbaren Mineralwolle nicht möglich [NHB17].

Für die verwendete Polycarbonat-Platte gilt, da es ein Thermoplast ist, dass ein werkstoffliches Recycling möglich ist. Nach entsprechender Aufarbeitung kann es erneut aufgeschmolzen und zu neuen Formteilen verarbeitet werden [Bay12]. Voraussetzung für ein werkstoffliches Recycling ist materialspezifische Erfassung und sortenreine Verwertung.

Da die Entsorgung und das Recycling produktspezifisch sind und nicht Zielsetzung des Forschungsprojektes waren, lassen sich auch nur grundlegende Anmerkungen hinsichtlich der verwendeten Bauteile machen, wobei auch hier gilt, dass eine genaue Prüfung im Rahmen einer Produktentwicklung und Zulassung erfolgen müsste.

8.6 Thermische Entlastung der Gebäudehülle Thermal relief of the building envelope

SEA-Elemente haben neben der unbeeinträchtigten thermischen Dämmwirkung des zu Grunde liegenden Sandwichelementes (Wärme- und Kälteschutz der Kerndämmung) einen weiteren wichtigen Vorteil: Sie bieten eine thermische Entlastung des Gebäudes. Dies ist insbesondere für Gebäude mit Kühl- oder Kälteenergiebedarf relevant. Im Abschlussbericht zum FOSTA-Forschungsprojekt P779 (SEA1) wurde bereits auf die thermische Entlastung der Gebäudehülle durch die SEA-Elemente hingewiesen [Fos14a]. Durch die solare Einstrahlung erfolgt abhängig vom Absorptionsgrad der äußeren Metalldecksichten eine Erwärmung dieser und für eine in Metalleichtbauweise errichtete Halle führt dies entsprechend

dem Wärmestromgesetz von Fourier de facto zu einem Transmissionswärmeeintrag in das Gebäude.

Im Rahmen des oben genannten Vorgängerprojektes wurden Messdaten in Fünf-Minuten-Taktung für die Oberflächentemperaturen eines Referenz-SE, für das Trapezprofil (Absorber) und das darunter liegende SE an Dach und Wand der SEA1-Messzelle durch eine Vielzahl von Temperatursensoren erfasst (Kapitel 2.2). Das Referenz-SE diente als Vergleich zum SEA-Element. Alle Oberflächen hatten zudem die gleiche Beschichtung mit der Farbe RAL 7016. An Abbildung 8-4 lässt sich an einem sonnigen Beispieltag für das Dach der Messzelle der unterschiedliche Temperaturverlauf der drei Oberflächen sowie der Außenluft erkennen. Die Oberflächentemperatur der Außenschale des Referenz-SE (blaue Linie) liegt deutlich über der des Sandwichelementes unter dem Trapezprofil/Absorber (orange Linie). Die Gebäudehülle wird durch SEA also thermisch entlastet.

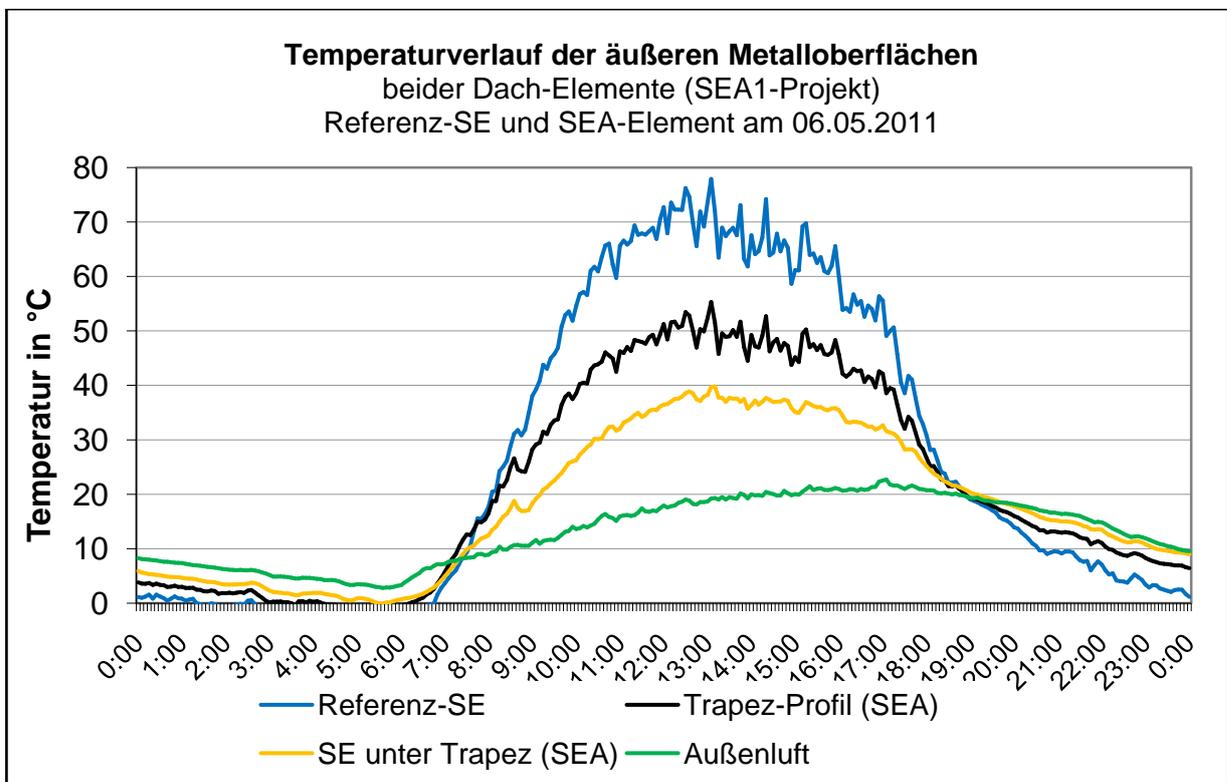


Abbildung 8-4: Temperaturverläufe der äußeren Oberflächen von Referenz-SE (blaue Linie), des SEA-Trapez-Profiles (= Absorber, schwarze Linie) und dem SE unter dem Trapezprofil (orange Linie) am Dach der SEA1-Messzelle sowie der Außenluft (grüne Linie) für einen sonnigen Beispieltag aus dem SEA1-Projekt mit einer gemessenen solaren Tagesstrahlungsenergie von 7.962 Wh/m² auf dem Dach.

Figure 8-4: Temperature profiles of the outer surfaces of the reference SE (blue line), the trapezoidal steel sheet (= absorber, black line) and the SE below the absorber (orange line) for the roof of the SEA1 measuring cell as well as of the outer ambient air as measured during a sunny sample day (daily sum of solar energy on the roof was 7,962 Wh/m²) within the SEA1 research project.

Dies ist auch naheliegend, da das SEA-Element als solarer Luftkollektor mittels der geführten Luft die thermische Energie von Absorber und darunter liegendem SE abführt und anderweitig nutzbar machen soll. Das bedeutet somit auch, dass die

Gebäudehülle luftgekühlt wird, da der Luftstrom in den SEA-Elementen als eine äußere Konvektionskühlung der Gebäudehülle fungiert.

Im hier dargelegten Forschungsprojekt konnte dieser Einfluss nicht weiter erforscht werden, da dies nicht Ziel war und der Messaufbau dafür auch nicht geeignet war. Für die neu entwickelten SEA-Kollektoren 2.2 und 2.3 mit transparenter Abdeckung ist dieser Effekt auch zu erwarten, wenngleich er durch die mit der Abdeckung absichtlich erhöhten Absorber- und Betriebstemperaturen voraussichtlich geringer als bei SEA 2.1 ausfallen wird.

Da diese Konvektionskühlung der Gebäudehülle für sich, ungeachtet der zusätzlichen energetischen Erträge der SEA-Kollektoren, allerdings ein interessanter und energetisch nennenswerter Bonuseffekt des SEA-Prinzips ist, man bedenke die reduzierten Kosten für Kühl- und Kältebetrieb, wurde er an dieser Stelle noch einmal dargestellt. Für weitere Informationen wird auf den Schlussbericht des FOSTA Forschungsprojektes P779 (SEA1) verwiesen [Fos14a].

8.7 Architektonischer Gestaltungsspielraum **Architectural design**

Da SEA-Elemente letztendlich die Gebäudehülle darstellen, wurde im Forschungsprojekt der gestalterische Spielraum mit unabgedeckten wie abgedeckten SEA-Elementen sowie den verschiedenen möglichen Profilgeometrien des Absorbers sondiert. Die Facade-Lab GmbH, welche im Projekt als Industriepartner mitwirkte, präsentierte hierbei durch Herrn Denz auf der 4. PBA am 07.04.2016 in Freiburg anhand von Beispielbauten die gestalterischen Spielräume, welche durch Fassaden und Dächer möglich sind, die optisch den verschiedenen Variationen von SEA-Kollektoren ähneln. So zeigte sich eine interessante Vielfalt von ansprechenden visuellen Effekten, auch in Hinblick auf die transparente PC-Abdeckung, die mit SEA-Elementen architektonisch umsetzbar sein sollte (Abbildung 8-5). Die Präsentation ist im 4. PBA-Zwischenbericht des Projektes bei den beteiligten Forschungsstellen und beim Forschungsträger verfügbar und auf Anfrage erhältlich [Fac16]. Für weitere Fragen wird auf den Projektpartner Facade-Lab GmbH verwiesen.



Abbildung 8-5: Beispielfotos aus der Präsentation von FACADE-LAB zu den architektonischen Gestaltungsmöglichkeiten mit SEA-ähnlichen Fassaden, links: Data Storage Center, Basel, Schweiz, Arch.: FFBK Architect; rechts: REISS Headquarter, London, UK, Arch.: Squire & Partners

Figure 8-5: Samples from the presentation by FACADE-LAB displaying architectonic design with SEA similar facades, left picture: Data Storage Center, Basel, Schweiz, Arch.: FFBK Architect; right picture: REISS Headquarter, London, UK, Arch.: Squire & Partners

9 Zusammenfassung Summary

Durch das vorherige FOSTA-Forschungsprojekt P779 (SEA1) wurde bestätigt, dass mit SEA-Elementen, d. h. zu solaren Luftkollektoren modifizierte Sandwichelemente serieller Herstellung, jährlich bis zu 160 kWh/m^2 thermische Energie in Form erwärmter Luft für die damit errichteten Gebäuden zur Verfügung gestellt werden können (Kapitel 2.2). SEA-Elemente sind dabei primär für den Industrie- und Gewerbebau angedacht. Wird das jährliche Bauvolumen solcher oft in Metallleichtbauweise errichteten Gebäude sowie ihre großen Fassaden- und Dachflächen berücksichtigt, könnten SEA-Elemente dazu beitragen, den Primärenergiebedarf solcher Hallen zu senken sowie die Klima- und Energieziele der EU zu unterstützen (Kapitel 2.1).

Dafür ist es allerdings nötig, den energetischen Endnutzen zu konkretisieren, die SEA-Kollektoren in Hinblick auf die Energieerträge sowie das Temperaturniveau zu optimieren und andere marktgängige Profilierungen als auch Farbbeschichtungen zu prüfen. Daher war es zum einen Ziel des Forschungsprojektes, verschiedene Optimierungspotentiale in Ihrem Einfluss auf die Effizienz des SEA-Kollektors zu prüfen und zum anderen, Energienutzungskonzepte auf Basis gängiger energetischer Nutzungsprofile von Industrie- und Gewerbehallen und den mit SEA-Kollektoren möglichen Energieerträgen zeitlich gegenübergestellt zu prüfen (Kapitel 2.3 und 2.4).

In einem ersten Schritt wurden von den beiden Forschungsstellen die verschiedenen Optimierungspotentiale identifiziert und in ihrem qualitativen Einfluss bewertet. Neben dem Einfluss alternativer Profilgeometrien, konstruktiver Merkmale und alternativer Farbbeschichtungen wurde eine transparente Abdeckung, der Einfluss des Massenstroms auf das Verhältnis zwischen Energieertrag und Temperaturniveau sowie die Länge des Kollektormoduls als wesentliche nützliche Änderungsmerkmale für den SEA-Kollektor definiert (Kapitel 3).

Um diesen Einflüssen quantitativ auf den Grund zu gehen, wurde von beiden Forschungsstellen ein kombinierter Forschungsansatz aus Messungen, Simulationen und Berechnungen gewählt. Einige Optimierungspotentiale sind in ihrem Einfluss auf den Kollektorwirkungsgrad nur durch Messungen ermittelbar, andere können über Simulationen oder Berechnungen approximiert werden. Gleichzeitig unterstützten die Simulationen die Planungen und den Entwurf eines energetisch optimierten SEA-Kollektors (Kapitel 4). Chronologisch erfolgten diese Schritte also nebeneinander, für die Darstellung im hier vorgelegten Bericht wurden sie der Übersicht halber getrennt.

Zuerst wurden durch einen möglichst exakten Nachbau des SEA-Kollektors (SEA 2.1) aus dem SEA1-Forschungsprojekt die Ergebnisse dieses Projektes im Labor überprüft und Wirkungsgradkennlinien für verschiedene Massenströme und Windeinflüsse auf den Kollektor gemessen. Es bestätigten sich hierbei die Ergebnisse des Vorgängerprojektes mit einem Bruttoenergieertrag von ca. $160 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ bei einer Solarstrahlung von $1100 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ (Kapitel 5.2) und einem geringen Massenstrom von 100 kg/h über verschiedene Berechnungsansätze. Mit höheren Massenströmen sind sodann auch höhere Energieerträge bei reduziertem Temperaturniveau möglich.

Ebenso offenbarte sich die für unabgedeckte Luftkollektoren übliche hohe Windsensitivität. So könnte der SEA-Kollektor 2.1 in windstilleren Regionen, Umfeldern oder Gebäudeseiten ($v_{\text{wind}} < 3 \text{ m/s}$) bis zu eineinhalbfach höhere Wirkungsgrade erzielen (Kapitel 8.1).

Um den Einfluss der transparenten Abdeckung genau zu ermitteln, wurde der zweite gebaute SEA-Kollektor (SEA 2.2) abgesehen von der Abdeckung in Form einer Polycarbonat-Platte baugleich mit dem SEA-Kollektor 2.1 belassen. Der gemessene Zuwachs an thermischer Effizienz und Temperaturniveau der Luft gegenüber dem SEA-Kollektor 2.1 war erheblich. In Folge dessen sind höhere Energieerträge und höhere erreichbare Temperaturniveaus der Luft mit diesem Kollektor möglich. Für einen Massenstrom von 100 kg/h und einer jährlichen Solarstrahlung von 1100 kWh/m²a errechnete sich ein Bruttoenergieertrag von ca. 350 kWh/m²a bei einer mittleren jährlichen Kollektorlufttemperatur von ca. 15 °C (Kapitel 5.3). Auch hier ermöglichen höhere Massenströme deutlich höhere Energieerträge.

Durch die transparente Abdeckung wurden aber nicht nur die Betriebstemperaturen, sondern auch die Stagnationstemperaturen, also jene, die bei Ausfall oder Abschaltung der Ventilatoren während starker Solarstrahlung entstehen, erhöht und erreichten für das Sandwichelement (PU-Kerndämmung) problematische Ausmaße (Kapitel 5.6).

Beim Entwurf und Bau des dritten SEA-Kollektors (SEA 2.3) flossen Erkenntnisse aus den vorherigen beiden Kollektoren sowie aus Simulationen ein. Ebenso wurde versucht, der hohen Stagnationstemperaturen des Vorgängers Herr zu werden. Aus der thermisch entkoppelten Kombination eines Sandwichelementes mit Trapezprofil, eines gewellten Stahlprofils (Absorber) sowie der bewährten transparenten Abdeckung durch eine PC-Platte wurde ein vollkommen neuer SEA-Kollektor entworfen und gebaut. So konnte insbesondere auch geprüft werden, wie das häufig im Markt verwendete Wellprofil sich als Absorber auf die Leistungsfähigkeit ausübt.

Relativ zum vorherigen SEA-Kollektor 2.2 zeigte der neue SEA-Kollektor 2.3 eine Verbesserung um etwa 10 %. Unter den oben gegebenen Rahmenbedingungen wurde ein jährlicher Bruttoenergieertrag von ca. 380 kWh/m²a errechnet. Die Reduktion der Stagnationstemperaturen gelang nur teilweise, d. h. die thermische Entkopplung bewirkte zwar, dass die Temperaturen des Absorbers selbst kein direktes Problem mehr für das Sandwichelement bedeuten, aber die gemessenen Temperaturen auf dem SE waren nach wie vor zu hoch (Kapitel 5.4 und 5.6). Daher wurde ein einfaches Havarie-Konzept mit mechanischen Entlüftungsklappen und einer Konvektionskühlung erfolgreich getestet, welches die Stagnationstemperaturen in einen für das PU, bzw. den PU-Haftvermittler bei MW-Kerndämmung, ungefährlichen Bereich (vergleichbar mit SEA1) senkte (Kapitel 8.3).

Die Simulationen und Berechnungen begleiteten die Messungen. So wurde der Einfluss von Reflexionen der transparenten Abdeckung über den IAM ermittelt und die für die thermische Effizienz des SEA-Kollektors optimalen Luftkanalhöhen bei ebenem Absorber und Sandwichprofil erarbeitet. Diese sind je nach den definierten Randbedingungen auf Werte zwischen 9 und 23 mm bestimmt worden. Sehr flache und filigrane SEA-Kollektoren sind also eine reale Option. Ein Vergleich mit den marktgängigen Querschnitten von Trapezprofilen zeigte, dass die gewählten Formate

angemessene Strömungsquerschnitte für die angedachten Anwendungen haben, d. h. für den benötigten Temperaturhub energetisch effiziente Querschnitte besitzen. Ebenso unterstützten FEM-Simulationen den thermisch effizientesten Aufbau des SEA-Kollektors 2.3. Über ein für SEA 2.3 kalibriertes Knotenmodell wurde gezeigt, welchen Einfluss das Fehlen einer transparenten Abdeckung bzw. die Änderung der Farbe (Absorptionsgrad) des Absorbers auf die Wirkungsgradkennlinie hat.

Mittels Berechnungen konnte auch bestimmt werden, welchen Einfluss größere und im Industrie- und Gewerbebau realistische Kollektormodullängen haben, wenn bspw. der spezifische Massenstrom, d. h. pro m^2 , nicht konstant gehalten werden kann oder soll. Zwar sinkt dabei die Leistung pro m^2 , bzw. der Wirkungsgrad mit steigender Kollektorlänge und gleichbleibenden Massenstrom (nicht spez.), aber es sind auch große Temperaturhübe von bis zu 70 K möglich. Die Leistungseinbußen pro m^2 könnten bei dem für SEA avisierten Einsatzgebiet gut über die großen Hüllflächen wettgemacht werden, während gleichzeitig die für manche Anwendungen nötigen hohen Lufttemperaturen erreicht würden (Kapitel 6).

Eine wichtige Stellung im Forschungsprojekt nahmen die Energienutzungskonzepte ein. Über diese sollte geklärt werden, welchen energetischen Beitrag SEA-Kollektoren für gängige Energienutzungsfälle wie Heizen oder Kühlen in einer Industrie- oder Gewerbehalle leisten können. Das Fraunhofer ISE hat dafür ein neues Excel-Programm LukoCalc auf Basis des bestehenden ScenoCalc entworfen.

In diesem wurden sodann die meteorologischen Daten der Referenzjahre aus der Datenbank METEONORM 7 für zwei Standorte (München und Hamburg) und eine Musterhalle samt einem DIN-Nutzungsprofil als Berechnungsbasis verwendet. Nun wurden die verschiedenen SEA-2.X-Kollektorfelddbruttoerträge auf Basis der Hallenmaße und der Klimadaten mit den Lastreihen zweier Nutzungskonzepte der Halle stundenweise verschränkt. Diese Lastreihen basieren auf dem Heizwärmebedarf und dem Kühlbedarf. Im Fall Heizen wurden in mehreren Systemkonzepten verschiedene sekundäre Wärmeerzeuger und die optionale Inklusion eines thermischen Energiespeichers berücksichtigt (Kapitel 7).

Im Kapitel 7.6 werden die Ergebnisse der Berechnung in Bilanzen und Dauerlinien für die verschiedenen Systemkonzepte der Heizung sowie für die Kühlung zu den drei SEA-Kollektoren und für die beiden Standorte aufgeführt. Dabei wird auch der berechnete Energiebedarf der jeweiligen Sekundärenergieerzeuger ausgewiesen und kann dort im Detail studiert werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass in Hinblick auf Kühlung für beide Standorte bereits mit SEA 2.1 und ohne Energiespeicher eine solarthermische Deckung von über 90 % erreicht werden kann. Für SEA 2.2 und 2.3 besteht eine Deckung von knapp unter 100 %, weswegen von der Möglichkeit einer vollsolaren Deckung ausgegangen werden kann. Bei der Beheizung kann bei SEA 2.1 für die verschiedenen Systemkonzepte mit einer solarthermischen Deckung von 20 – 25 % ohne Einbindung eines thermischen Energiespeichers und von 80 – 90 % mit Einbindung eines solchen ausgegangen werden. Für SEA 2.2 und 2.3 gelten ohne Speicher Werte von 24 – 27 % und mit Speicher Werte von knapp unter 100 %, was auch auf eine solare Volldeckung schließen lässt. Als Systemnutzungskonzepte wird für SEA 2.1 die Verwendung zur Quellenhebung einer Luft-Wärmepumpe empfohlen,

während für die beiden abgedeckten Kollektoren auch eine direkte Einspeisung der solarthermisch erzeugten Wärme sinnvoll erscheint (Kapitel 7.7).

Im Forschungsprojekt wurden die avisierten Ziele erreicht. Neben den Erkenntnissen zum Einfluss verschiedener Profilgeometrien (flach, Trapez, Welle) und einer alternativer Farbgebung des Absorbers, effizienter Luftkanalbreiten, der transparenten Abdeckung, der Einstrahlungswinkel, des Windes und größerer Kollektormodullängen, wurden belastbare Vermessungen der thermischen Effizienz der drei im Projekt gebauten Kollektoren an einem dafür zertifizierten Teststand durchgeführt. So liegen für diese drei SEA-Kollektoren genaue Werte zu den Wirkungsgradkennlinien bei verschiedenen Massenströmen vor. Diese wurden sodann benutzt, um im Industrie- und Hallenbau gängige Energienutzungskonzepte wie Heizen und Kühlen zur solarthermischen Deckung mit den SEA-Kollektoren zu untersuchen. Das dafür vom Fraunhofer ISE entwickelte Programm LuKoCalc kann auch für andere Kollektoren und alternative Nutzungsanforderungen verwendet werden und es ist grundsätzlich möglich, es in der Funktionalität weiterzuentwickeln.

10 Ausblick Perspective

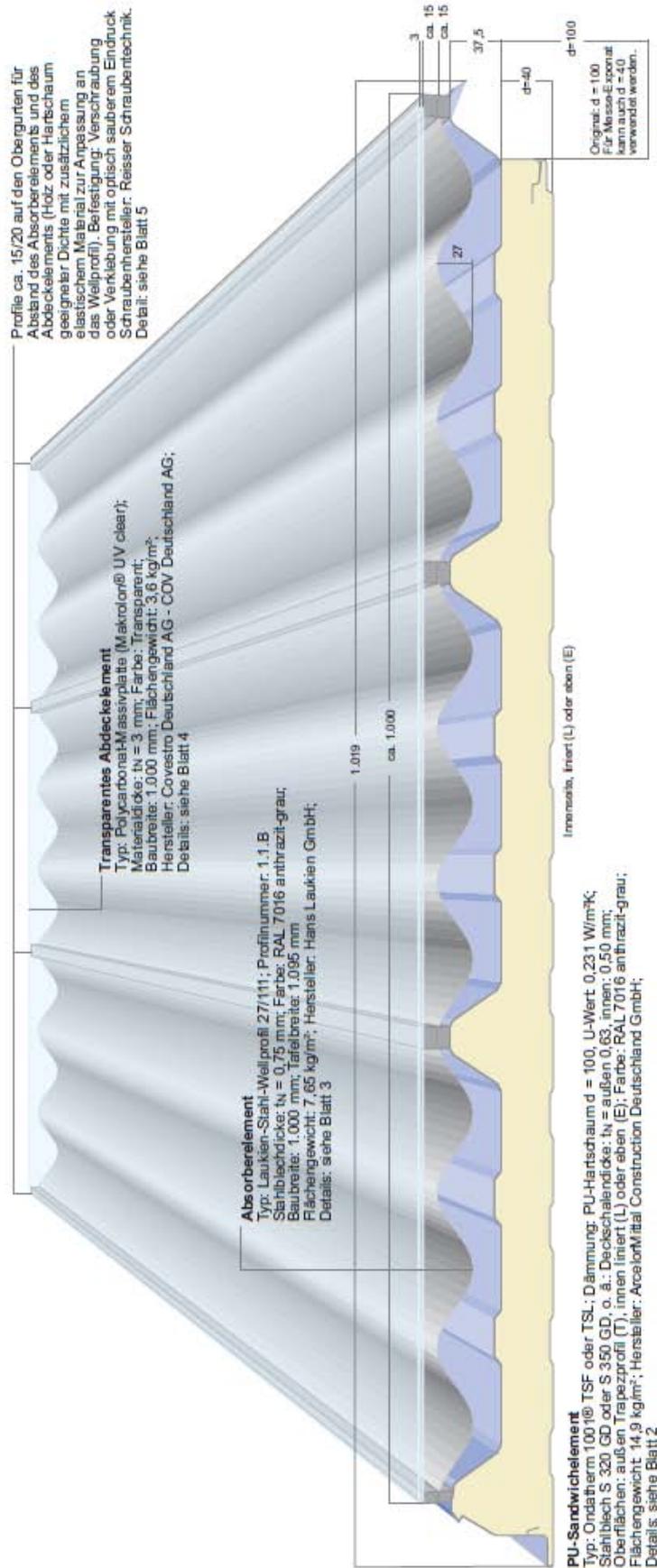
Durch das hier vorgestellte FOSTA-Forschungsprojekt P1041 (SEA2) wurden wichtige Schritte geleistet, um das SEA-Prinzip bald in ein Anlagenkonzept zu integrieren. Dafür gilt der FOSTA e.V. unser besonderer Dank. So beabsichtigt die Forschungsstelle 2 (ERK) alsbald eine Kombination des Konzeptes mit einem thermischen Energiespeichersystem. Dazu wurden schon in diversen Vorbesprechungen wichtige Vorbereitungen getroffen. Alternativ wäre es ebenso denkbar, einen Prototyp mit einem Anlagenbauer zu realisieren. Auch eine Zusammenarbeit mit SolarWall®, die sich insbesondere auf vorgehängte solare Luftkollektor-Fassade spezialisiert haben, wird derzeit eruiert.

Ungeachtet dessen erachten es die Forschungsstellen als unerlässlich, Pressearbeit in Fachzeitschriften im deutschsprachigen Raum zu leisten, um Bauherren und Architekten auf dieses neue Konzept aufmerksam zu machen und dafür zu interessieren. Daher haben die Forschungsstellen auch in Zusammenarbeit mit der Wirtschaftsvereinigung Stahl auf der BAU 2017 die SEA-Kollektoren durch kleine Muster und mit der tatkräftigen Unterstützung des Lehrstuhls von Prof. Dr. Hachul, Architektur und Metallbau, der FH Dortmund auf der Messe ausgestellt und dazu informiert. Es zeigte sich ein starkes Interesse der Messebesucher und eine hohe Resonanz.

Neben diesen Maßnahmen wären Vorträge an Hochschulen und Kongressen eine sinnvolle Ergänzung, um Studierende und Fachkundige auf die Potentiale der Solarthermie im Metallleichtbau aufmerksam zu machen, welche durch das SEA-Prinzip erschließbar sind. In diesem Zusammenhang möchten wir auch der Facade-Lab GmbH danken, die als Industriepartner dankenswerterweise zugesagt hat, dass SEA-Musterbauteile im hausinternen Fassaden-Showroom für zwei Jahre kostenfrei aufgestellt werden können.

Die Forschungsstellen hoffen, mit diesen Schritten die notwendige Aufmerksamkeit auf die Möglichkeiten des SEA-Prinzips zu ziehen, damit im Industrie- und Gewerbebau das große Potential für solarthermische Energie vollends erkannt und sodann auch mit dem SEA-Prinzip genutzt wird.

SEA-Kollektor 2.3, Perspektive mit Maßen in mm:



Zusammenstellung aller Arbeiten, die im Zusammenhang mit dem Vorhaben veröffentlicht wurden oder in Kürze veröffentlicht werden sollen
List of publications related to the project

12 Zusammenstellung aller Arbeiten, die im Zusammenhang mit dem Vorhaben veröffentlicht wurden oder in Kürze veröffentlicht werden sollen

List of publications related to the project

Bereits veröffentlichte Dokumente:

- [ISE17b] Fraunhofer ISE: SEA 2 – Entwicklung und Vermessung neuartiger Solarluftkollektoren sowie Untersuchung geeigneter Energienutzungskonzepte; [Online]; Internet:
<https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/sea-2.html>, Zugriff am 18.04.2017, Verweis im Jahresbericht 2016/2017 der Fraunhofer ISE auf diesen Online-Inhalt
- [ISE17c] Fraunhofer ISE: Fraunhofer ISE entwickelt Freeware »Aircow« zur Berechnung von solaren Luftkollektorfeldern; [Online]; Internet:
<https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/news/2017/fraunhofer-ise-entwickelt-freeware-aircow-zur-berechnung-von-solaren-luftkollektorfeldern.html>, Zugriff am 18.04.2017
- [Kos17] Koschade, R., Hermann, M., Kramer, K. et al.: Sandwichgebäude in effiziente Solarkollektoren verwandeln – aktuelle Ergebnisse aus der Stahlanwendungsforschung, Flyer zur BAU 2017 in München, Hrsg.: Wirtschaftsvereinigung Stahl, Januar 2017

Vorgesehene Veröffentlichungen:

- [ISE17a] Welz, C., Kramer, K., Hermann, M.: A new assessment tool for solar air heating collectors considering mass flow, leakage, pressure drop, and system impact. Solar Energy, 2017.

13 Literaturverzeichnis Bibliography

- [ASH78] ASHRAE 93-77: Methods for testing to determine the thermal performance of solar collectors, 1978
- [Bay11] Bayer Technology Services, EcoCommercial Building (ECB): Studie ECB-Industriehalle; Energietechnische Studie einer Muster-Industriehalle; Leverkusen, August 2011; <http://eu.ecocommercial-building-network.com>; Archiv: Musterhalle.ppt
- [Bay12] Bayer MaterialScience: Sicherheitsdatenblatt nach Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 Makrolon Platten [PDF, online]; Internet: <http://www.polymehr.com/wp-content/uploads/sicherheitsdatenblatt-makrolon.pdf>; Zugriff am 22.03.2017
- [Cov17] Covestro AG: Produktdatenblatt Makrolon® UV, Massivplatten aus Polycarbonat [PDF,Online]; Internet: <http://www.sheets.covestro.com/de/Products/Europe/Makrolon-Solid-Sheets/Makrolon-UV>; Zugriff am 22.03.2017
- [Duf13] Duffie, J.A., Beckman, W.A.: Solar engineering of thermal processes. Fourth Edition. John Wiley & Sons, 2013
- [DWD17a] Deutscher Wetterdienst [Online]; Globalstrahlung in der Bundesrepublik Deutschland; Internet: www.dwd.de, Zugriff am 23.02.2017
- [DWD17b] Deutscher Wetterdienst [Online]; Klimakarte der Windgeschwindigkeiten in der Bundesrepublik Deutschland; Internet: http://www.dwd.de/DE/forschung/klima_umwelt/klimaprojektionen/modelle/erstellung-windfeldern_node.html, Zugriff am 20.03.2017
- [Eic12] Eicker, U.: Solare Technologien für Gebäude. Grundlagen und Praxisbeispiele, 2nd ed. Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden, Wiesbaden, Online-Ressource, 2012
- [EUC10] European Commission: Richtlinie 2010/31/EU des Europäischen Parlaments und Rates vom 19. Mai 2010 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden; Amtsblatt der Europäischen Union
- [Fac16] Facade-Lab, Denz, P.-R.: Architektonisches Potential von SEA-Luftkollektoren; Präsentation zur 4. PBA des Forschungsprojektes P1041 der FOSTA – Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V: Optimierung der Energienutzung und des Wirkungsprinzips der Sandwichbauweise mit Energie-Akkumulation (SEA 2); Freiburg, 07.04.2016
- [Fis04] Fischer, S., Heidemann, W., Müller-Steinhagen, H., Perers B., Bergquist, P., Hellström B.: Collector test method under quasi-dynamic conditions according to the European Standard EN 12975-2, in: Solar Energy 76, 2004, 1-3, S. 117-123

- [Fos12] FOSTA - Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V.: Entwicklung eines Sandwichelements mit Energie-Akkumulation, Energieverteilung und Dämmung (SEA); Projektnummer P 779/02/2009 / S 24/10158/08; Hrsg.: FOSTA e.V.; Düsseldorf, 2012
- [Fos14a] FOSTA – Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V.: Forschung für die Praxis P 779; Sandwichbauweise mit Energie-Akkumulation, Energieverteilung und Dämmung (SEA); Düsseldorf, Mai 2014
- [Fos14b] FOSTA – Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V.: Forschungsvertrag P1041/06/2016/S 024/10212/14: Optimierung der Energienutzung und des Wirkungsprinzips der Sandwichbauweise mit Energie-Akkumulation (SEA 2); Düsseldorf, Juni 2014
- [IFBS16] Industrieverband für das Bauen im Metallleichtbau e. V. (IFBS) Auszug aus Geschäftsbericht 2011-2015; IFBS-Auftragseingangsstatistik 2011 und 2015; E-Mail des IFBS vom 15.06.2016, Krefeld
- [ISE12] Welz, C., Di Lauro, P., Thoma, C., Richter, J., Hermann, M., Stryi-Hipp, G., Maurer, C.: Physikalische Modellierung und Simulation sowie detaillierte Vermessung von Luftkollektoren, in: Thermische Solarenergie / 22. Symposium. Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI), Regensburg, 2012
- [ISE13] Welz, C., Knecht, M., Di Lauro, P., Maurer, C., Stryi-Hipp, G., Hermann, M.: Thermohydraulische Simulation von Luftkollektorsystemen, Systembezogene Bewertung von Luftkollektoren, in: Thermische Solarenergie / 23. Symposium. Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI), Regensburg, 2013.
- [ISE14a] Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE; Stryi-Hipp et al.: Abschlussbericht "Luko-E - Grundlagen zur Luftkollektorentwicklung" für BMU, Freiburg, Februar 2014
- [ISE14b] Welz, C., Maurer, C., Di Lauro, P., Stryi-Hipp, G., Hermann, M.: Mass flow, pressure drop, and leakage dependent modeling and characterization of solar air collectors. Energy Procedia 48, 250–263, 2014
- [ISE15] Fraunhofer ISE, Thoma, C.: Bau SEA 2.2, Zwischenbericht Forschungsprojektes P1041 der FOSTA – Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V: Optimierung der Energienutzung und des Wirkungsprinzips der Sandwichbauweise mit Energie-Akkumulation (SEA 2) zur 3. PBA in Dortmund, 15.09.2015
- [ISE17a] Welz, C., Kramer, K., Hermann, M.: A new assessment tool for solar air heating collectors considering mass flow, leakage, pressure drop, and system impact. Solar Energy, 2016.
- [Kos11a] Koschade, R.: ECS - Electronic Compendium Sandwich Panel Construction; Hrsg.: Verlag DETAIL - Institut für internationale Architektur-Dokumentation München, 2011
- [Kos11b] Koschade, R.: Sandwichbauweise; Hrsg.: Verlag DETAIL - Institut für internationale Architektur-Dokumentation München, 2011

- [MET17] Meteornorm; Einstrahlungsdaten für jeden Ort des Planeten [Online]; <http://www.meteororm.com/de/>; Programm zur Berechnung der effektiven Solareinstrahlung; Zugriff am 05.03.2017
- [NHB17] Medienstelle für nachhaltiges Bauen [Online]; Internet: <http://www.nachhaltiges-bauen.jetzt/recycling-und-entsorgungseigenschaften-von-daemmstoffen/> ; Zugriff am 22.03.2017
- [Nor14] Norton, B.: Harnessing solar heat, 1 online resource (xvii, 258), 2014
- [Pot96] Pottler, K., Beck, A., Benz, N.: ZAE Bayern: Testreferenzjahr – Unstimmigkeiten im Bereich der Globalstrahlung; Sonnenenergie, 04/1996
- [Ric13] Richter, C., Lincot, D., Gueymard, C.A.: Solar energy, Springer, New York, NY, 1 online resource, 2013
- [RIS17] RISE - Research Institutes of Sweden [Online]; Berechnungsprogramm ScenoCalc; Internet: <https://www.sp.se/en/index/services/solar/ScenoCalc/Sidor/default.aspx>; Zugriff am 27.02.2017
- [Sch15] Schäfer, K., Mangold, D., Pauschinger, T., Dezentral - dezentrale Einspeisung in Nah- und Fernwärmesysteme unter besonderer Berücksichtigung der Solarthermie; im: Teilbericht des Verbundpartners Solites, Mai 2015.
- [Sti12] Stieglitz, H.: Thermische Solarenergie. Grundlagen, Technologie, Anwendungen. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, Online-Ressource, 2012
- [STL17] Solarthermielexikon [online]; Konversionsfaktor; <http://www.solaranlagen-portal.com/solarthermie/lexikon/konversionsfaktor>; Zugriff am 16.03.2017.
- [StR17] Strom-Report: Stromerzeugung 2016 in Deutschland nach Energieträgern [Online]; <http://strom-report.de/strom/#strommix-2016-deutschland>, Zugriff am 26. Februar 2017

NORMEN:

- DIN EN ISO 9806 Solarenergie - Thermische Sonnenkollektoren - Prüfverfahren (ISO 9806:2014-03); Deutsche Fassung 2014-03
- DIN EN 12975-2 Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile - Kollektoren - Teil 2: Prüfverfahren; Deutsche Fassung 2006-06
- DIN EN 13501 Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten Teil 1-5; 2007 + A1:2009
- DIN EN 14509 Selbsttragende Sandwich-Elemente mit beidseitigen Metalldeckschichten - Werkmäßig hergestellte Produkte - Spezifikationen; 2013-12

- DIN V 18599-100 Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwasser und Beleuchtung, Teil 100:Änderungen zu DIN V 18599-1 bis -10; 2009-10