



DEUTSCHE
AMPHIBOLIN-WERKE
VON ROBERT MURJAHN

priedemann
facade lab

 **Fraunhofer**
ISE

ARKOL **Schlussbericht**

Förderkennzeichen: 0325857A/B/C

Danksagung

Das Forschungsprojekt »ArKol« wurde in der Zeit vom 01.01.2016 bis zum 29.02.2020 durch den Projektträger Jülich (PTJ) unter dem Förderkennzeichen 0325857A/B/C betreut. Die Finanzierung erfolgte aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, wofür wir uns herzlich bedanken.

Das Vorhaben wurde als Verbundprojekt vom Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg, der Priedemann Facade-Lab GmbH und DAW SE gemeinsam durchgeführt. Dieser Bericht beinhaltet eine Beschreibung aller Teilprojekte im Sinne eines Gesamtberichts. Dieser umfasst somit auch die folgenden Teilprojekte:
„Projektleitung, Entwicklung der Teilkomponenten und Simulation“ - Fkz: 0325857A
„Konstruktive und gestalterische Entwicklung integrativer Heat-Pipe-Solarthermiekollektoren in teiltransparenten und opaken Fassadenaufbauten“ - Fkz: 0325857B
„Integration des Streifenkollektors in Fassaden mit WDVS und deren Realisierung in Demonstratoren“ - Fkz: 0325857C

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Gefördert durch:



**aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages**

ARKOL

ENTWICKLUNG VON ARCHITEKTONISCH HOCH INTEGRIERTEN FASSADENKOLLEKTOREN MIT HEAT-PIPES

Autoren:

Simon Frederik Haeringer
Paul-Rouven Denz
Thomas Loewenstein
Michael Hermann
Katharina Morawietz
Hannes Seifarth
Christoph Maurer
Manuel Lämmle
Puttakhun Vongsingha

Koordination des Verbundprojekts:

Simon Frederik Häring
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
in Freiburg

Förderkennzeichen: 0325857A/B/C
Berichtszeitraum: 01.01.2016 – 29.02.2020

Verbundprojektpartner:

DAW SE
Priedemann Facade-Lab GmbH
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE

Inhalt

1	KURZFASSUNG	6
2	AUSGANGSSITUATION DES VORHABENS	7
2.1	EINLEITUNG UND AUFGABENSTELLUNG	7
2.2	PLANUNG UND ABLAUF DES VORHABENS	10
2.3	WISSENSCHAFTLICHER UND TECHNISCHER STAND VOR PROJEKTBEGINN	11
2.4	ZUSAMMENARBEIT INNERHALB DES KONSORTIUMS	14
3	ABLAUF UND ERGEBNISSE DES VORHABENS	18
3.1	VERWENDUNG DER ZUWENDUNG UND ERGEBNISSE	18
3.1.1	<i>Projektmanagement und Koordination</i>	<i>18</i>
3.1.2	<i>Architektonische Integration und Randbedingungen</i>	<i>19</i>
3.1.2.1	Baurechtliche Bestimmungen	19
3.1.2.2	Fallanalysen	21
3.1.2.3	Entwicklungsmethodik	24
3.1.2.4	Untersuchungen zur architektonischen Fassadenintegration	25
3.1.2.5	Visualisierung	28
3.1.2.6	Gebäudetypologien und Anwendungsmöglichkeiten	29
3.1.2.7	Bauprozesse & Arbeitsschritte - Montage des Streifenkollektors - Praxistauglichkeit 30	
3.1.2.8	Installationsleitfaden – Solarthermische Jalousie	31
3.1.3	<i>Entwicklung der Kollektoren und Einzelkomponenten und Vermessung von Testmustern</i>	<i>34</i>
3.1.3.1	Abschätzungen der Technologien	34
3.1.3.2	Beschreibung der Messinfrastruktur	44
3.1.3.3	Analyse und Entwicklung von Heat-Pipe-Konzepten	48
3.1.3.4	Entwicklung und Auslegung der stufenlosen Heat-Pipe-Anbindung an den Sammelkanal - Streifenkollektor	61
3.1.3.5	Entwicklung und Optimierung des Kollektorgehäuses, der Wärmedämmung und von Lösungen für Zwischenraumkonzepte - Streifenkollektor	67
3.1.3.6	Entwicklung und Herstellung der Testmuster des Streifenkollektors	83
3.1.3.7	Entwicklung der Wärmeübertragung von Absorber zum Sammelkanal mit beweglichen Lamellen - Solarthermische Jalousie	89
3.1.3.8	Entwicklung von transparenten Fassadenelementen mit Solarthermischer Jalousie - Labortestmuster	105
3.1.3.9	Vermessung der Labortestmuster beider Technologien	121
3.1.3.10	Marktverfügbarkeit der benötigten Komponenten	129
3.1.4	<i>Modellierung und Simulation der Gesamtkonzepte</i>	<i>132</i>
3.1.4.1	Simulationsmodell des Streifenkollektors	132
3.1.4.2	Energetische Jahressimulationen des Streifenkollektors	133
3.1.4.3	Simulationsmodell der Solarthermischen Jalousie	139
3.1.4.4	Energetische Jahressimulationen der Solarthermischen Jalousie	146
3.1.5	<i>Demonstratorfassade des Streifenkollektors und Demonstratorfassadenelement der Solarthermischen Jalousie</i>	<i>153</i>
3.1.5.1	Demonstratorfassade des Streifenkollektors	153
3.1.5.2	Demonstratorfassadenelement der Solarthermischen Jalousie	158
3.1.6	<i>Energetische, architektonische und wirtschaftliche Bewertung der Technologien</i>	<i>160</i>
3.1.6.1	Energetische und architektonische Bewertung	160
3.1.6.2	Wirtschaftlichkeitsanalyse	165

3.1.7	<i>Objektive Begleitung des Innovationsprozesses und Öffentlichkeitsarbeit zur Marktheranführung der Technologien.....</i>	167
3.1.7.1	Erfassung der Anwendungsszenarien	167
3.1.7.2	Geschäftsmodellentwicklung.....	167
3.1.7.3	Lead-User-Workshops zu beiden Gesamtkonzepten	167
3.1.7.4	Vermarktungsszenarien	170
3.1.7.5	Ausstellung der Konzepte auf Messen & weitere Öffentlichkeitsarbeit	172
3.1.7.6	Ausblick - Planung des Markteinstiegs über Referenzprojekte	175
3.1.8	<i>IEA SHC Task 56.....</i>	177
3.2	RELEVANTE ERGEBNISSE VON DRITTER SEITE	178
3.3	ERFOLGTE ODER GEPLANTE VERÖFFENTLICHUNGEN.....	178
4	LITERATURVERZEICHNIS	182
5	ANLAGEN.....	191

1

Kurzfassung

Im Projekt ArKol wurden zwei neuartige, architektonisch hoch integrierte solarthermische Fassadenkollektoren entwickelt und wissenschaftlich untersucht. Beiden Konzepten liegt die Verwendung von Heat-Pipes und einer trockenen thermischen Anbindung zwischen Heat-Pipe und Sammelkanal zugrunde. Das erste Konzept „Streifenkollektor“ besteht aus streifenförmigen Kollektoren unterschiedlicher Länge, die sich flexibel an der Fassade positionieren lassen und gleichzeitig eine klare Gewerketrennung bieten. Das zweite Konzept „Solarthermische Jalousie“ zielt auf die Integration von Solarthermie in transparente, d. h. verglaste, Fassadenbereiche ab. Sie soll dabei solare Wärme bereitstellen, gleichzeitig die Funktionen des Sonnenschutzes (u. a. schaltbare Transparenz, Blendschutz) erfüllen und durch Abführen der Wärme den g-Wert und damit den Kühlbedarf des Gebäudes verringern.

Da die winkelflexible, idealerweise auch horizontale, Einsetzbarkeit von Heat-Pipes und Zwei-Phasen-Thermosiphons eine wichtige Grundlage der beiden Konzepte ist, wurden neue Methoden zur experimentellen Charakterisierung und Bewertung von Heat-Pipes in horizontaler Ausrichtung entwickelt. Verschiedene Heat-Pipe-Typen wurden untersucht und auf ihre Eignung für die beiden Kollektorkonzepte bewertet (vgl. Abschnitt 3.1.3.3).

Beide Konzepte wurden in ArKol von der ersten Idee bis zu funktionalen Labortestmustern und ersten Demofassaden bzw. Demofassadenelementen entwickelt (vgl. Abschnitt 3.1.3). Hierbei wurde neben der technischen Entwicklung der Solarthermiefunktion, v. a. der Wärmeübertragung von Absorber zum Sammelkanal, insbesondere die Randbedingungen der Architektur und Baubranche in den Entwicklungsprozess einbezogen (vgl. Abschnitt 3.1.2). Für die Umsetzung der vollen Raff- und Drehbarkeit der Lamellen der Solarthermischen Jalousie bei gleichzeitiger Solarthermiefunktion wurde eine schaltbare thermische Kopplung entwickelt und untersucht. Der Streifenkollektor wurde darüber hinaus in einer realen Demonstrationsfassade umgesetzt und die Vorteile der Gewerketrennung im Bauprozess erprobt (vgl. Abschnitt 3.1.5).

Zur Bewertung des Potentials beider Technologien wurden Simulationsmodelle erstellt und Jahressimulationen durchgeführt (vgl. Abschnitt 3.1.4). Aus den Ergebnissen der Messungen der Labortestmuster („Demoflex“ und STJ-Labortestmuster) und der Simulationen wurde deutlich, dass es aktuell noch deutlichen Weiterentwicklungsbedarf beider Konzepte gibt. Die Simulationen zeigten jedoch auch, dass beide Konzepte technisches Potential haben und somit nach erfolgreicher Weiterentwicklung als funktionale Fassadenkollektoren in architektonisch anspruchsvollen Gesamtkonzepten zur Energieeffizienz bzw. -autarkie von Gebäuden beitragen können (vgl. Abschnitt 3.1.6).

Beide Konzepte wurden im Rahmen des Projekts bereits ausgiebig auf Messen, Konferenzen und in Zeitschriftenartikeln den relevanten Akteuren vorgestellt (u. a. Architekten, Bauherren, Fachplaner, Fassadenbauer, Handwerker und Hersteller). Darüber hinaus wurde der Innovationsprozess u. a. von Geschäftsmodellentwicklungen, Expertenfeedback durch Lead-User-Workshops und der Entwicklung von Vermarktungsszenarien begleitet (vgl. Abschnitt 3.1.7). Hieraus ergeben sich wichtige Anforderungen und Schritte, wie im Anschluss an das Projekt ArKol die beiden Konzepte erfolgreich in Richtung Markteinführung weiterentwickelt werden können.

2.1 Einleitung und Aufgabenstellung

Energieszenarien zeigen, dass auch die Solarthermie zur Energiewende, insbesondere zur sogenannten Wärmewende, beitragen muss und somit ein Ausbau der Solarthermie notwendig ist (Sterchele et al.). Gebäudefassaden stellen hier eine vielversprechende Option dar, da das Einstrahlungsprofil vor allem für die Heizungsanwendung besser dem Verbrauch angepasst ist. Eine Integration des Absorbers in ein Wandsystem bringt im Gegensatz zu vorgehängten Kollektoren weitere Synergien, da im Winter durch eine erwärmte Wand Transmissionswärmeverluste verringert und andere Baumaterialien eingespart werden können. Diese fassadenintegrierten Solarthermie-Kollektoren sind auch unter dem Oberbegriff bauwerkintegrierte bzw. gebäudeintegrierte Solarthermie (BIST, engl. *building-integrated solar thermal*) bekannt.

Ein großes Problem für eine erfolgreiche architektonisch-baukonstruktive Fassadenintegration ist die mangelnde Flexibilität der marktüblichen Kollektoren. Architekten, Ausführende und Bauherren müssen in diesem Fall oft auf kostspielige individuell gefertigte Lösungen zurückgreifen. Für die Hersteller wiederum stellt die individuell zu fertigende Hydraulik ein Hindernis dar. Solarthermische Lösungen für Fassaden haben deutlich andere Randbedingungen als jene, die klassisch auf dem Dach oder gar unabhängig von Bauwerken montiert werden. Insofern erscheint es sinnvoll, dass sich die Entwicklung der solarthermischen Komponente den Anforderungen von Architektur, Fassade und Handwerk anpasst. Bei der Entwicklung und dem späteren Vertrieb besteht die Herausforderung, dass ein Fassadenkollektor sowohl für die Bau- als auch für die Heizungsbranche relevant ist, jedoch nicht direkt in die etablierten Vertriebsschemata passt.

Ziel des Projekts „ArKol – Entwicklung von architektonisch hoch integrierten Fassadenkollektoren mit Heat-Pipes“ war die Entwicklung zweier architektonisch hoch integrierter Fassadenkollektoren. Neben dem äußeren Erscheinungsbild wird das hohe Maß der architektonischen Integration dabei durch einen modularen Aufbau der Kollektoren sowie eine konstruktiv bedingte klare Gewerketrennung bei Installation und Haftung erzielt. Heat-Pipe-Kollektoren, die die Wärme vom Absorber zum Sammelkanal mithilfe von Heat-Pipes (deutsch: Wärmerohren) transportieren, sind hierfür aufgrund der hydraulischen Trennung von Absorber- und Solarfluidkreislauf, v. a. bei trockener thermischer Anbindung, besonders gut geeignet. Der Anspruch an eine hohe architektonische Integration beinhaltet jedoch auch den Wunsch nach einer flexiblen, auch horizontalen Ausrichtbarkeit der Kollektoren bzw. der Absorberstreifen und einer entsprechend winkelflexiblen Einsetzbarkeit der Heat-Pipes. Die Verwendung von Heat-Pipes soll eine einfache Fertigung und Verschaltung unterschiedlich langer Kollektorstränge ermöglichen, womit die Kollektoren optimal an die Bedürfnisse der Architekten angepasst werden können. Der modulare Aufbau und die trockene Anbindung der Heat-Pipes an den Sammelkanal können zudem eine einfache Installation durch klare Gewerketrennung ermöglichen.

Heat-Pipes sind Bauteile zur Wärmeübertragung, die die Wärme mithilfe eines Verdampfungs-/Kondensationskreislaufs übertragen. In einem hermetisch abgeschlossenen Behälter befindet sich ein Arbeitsfluid. Wird dem Verdampfer – im solarthermischen Kollektor über den Absorber – Wärme zugeführt, verdampft das Arbeitsfluid. Der Dampf strömt entlang der adiabaten Zone zum Kondensator, wo der Dampf kondensiert und die latente Wärme an eine externe Wärmesenke – im solarthermischen Kollektor das Solarfluid im Sammelkanal – abgibt. Die zwei wichtigsten Charakteristika des Betriebs-

verhaltens von Heat-Pipes stellen ihr thermischer Widerstand sowie ihre Leistungsgrenzen dar. Während der thermische Widerstand beschreibt, wie gut eine Heat-Pipe Wärme überträgt, geben die Leistungsgrenzen darüber Aufschluss, ob eine Heat-Pipe unter den gegebenen Randbedingungen im „normalen“ Betriebszustand, also bei geordnetem Verdampfungs-/Kondensationskreislauf, Wärme überträgt.

Abbildung 1 und Abbildung 2 verdeutlichen Aufbau und Funktionsweise von Heat-Pipes bzw. Heat-Pipe-Kollektoren.

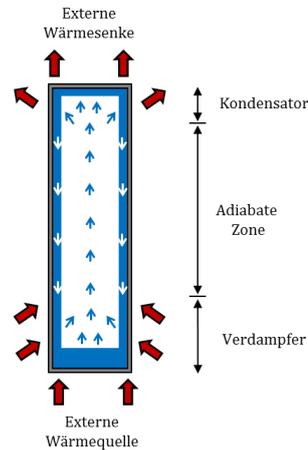


Abbildung 1: Schematische Darstellung von Funktion und Aufbau einer Heat-Pipe (Abbildung aus (Morawietz 2020)).

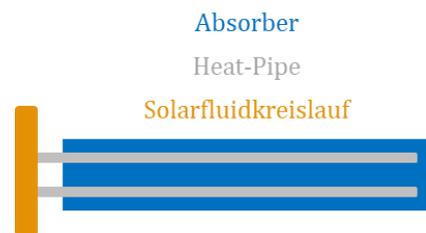


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Aufbaus eines Heat-Pipe-Kollektors (Abbildung in Anlehnung an (Morawietz 2020)).

Das erste Konzept in ArKol – genannt Streifenkollektor bzw. Solarthermischer Streifenkollektor (STSK) – besteht aus streifenförmigen Kollektoren unterschiedlicher Länge, die sich flexibel an der Fassade positionieren lassen (siehe Abbildung 1). Ermöglicht wird dies dadurch, dass die Kondensatoren der Heat-Pipes direkt oder mittels Adapter an dem Sammelkanal befestigt werden, wobei die Positionierung in Längsrichtung des Sammelkanals stufenlos frei gewählt werden kann. Die beliebig großen Zwischenräume können vom Architekten frei anderweitig mit marktüblichen Fassadenbekleidungsmaterialien gefüllt werden. Zudem ist die Gewerketrennung durch eine trockene Anbindung der Kollektoren an den Sammelkanal klar definiert. Der Fassadenbauer montiert die Kollektoren an der Fassade und befestigt sie rein mechanisch an den fluiddurchströmten Sammelkanälen, wodurch jedoch gleichzeitig automatisch eine thermische Anbindung realisiert wird. Der hydraulische Anschluss der Sammelkanäle erfolgt anschließend durch den Installateur.

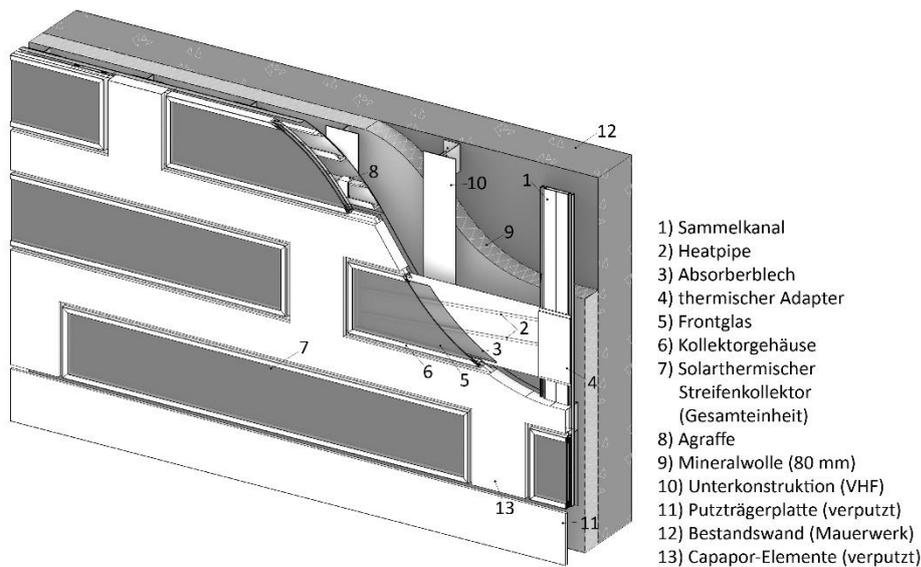


Abbildung 3: Aufbau eines horizontal montierten Streifenkollektors inklusive Unterkonstruktion (Umsetzungsvariante der Demonstrationsfassade, vgl. Abschnitt 3.1.5.1)

Das zweite Konzept ist eine Solarthermische Jalousie (STJ), die neben der Bereitstellung solarer Wärme auch den Gesamtenergiedurchlassgrad (g -Wert) der Fassade regeln soll. Dazu werden Heat-Pipes in die Lamellen integriert, um die Wärme von der Lamelle, die als Absorber dient, über eine schaltbare thermische Kopplung an einen seitlichen Sammelkanal zu übergeben (siehe Abbildung 4). Dies ermöglicht die Integration von Solarthermie in transparente, d. h. verglaste Fassadenbereiche und bietet gleichzeitig die volle Beweglichkeit und Funktionalität einer Jalousie. Adaptiver Sonnenschutz, wie Jalousien im Zwischenraum von Doppelfassaden und Closed-Cavity-Fassaden (CCF), sind gerade bei Hochhäusern zunehmend beliebt. Das Abführen des solarthermischen Ertrags, sozusagen das Kühlen der Lamellen, kann dabei zu einem geringeren Wärmeeintrag ins Gebäude und somit zu einem niedrigeren Kühlbedarf des Gebäudes führen, je nach Auslegung der STJ (Shen und Li 2016; Guardo et al. 2015; Velasco et al. 2017). Durch die Verringerung der Temperatur im Fassadenzwischenraum verringert sich außerdem die Anforderung an die Temperaturbeständigkeit der verwendeten Komponenten, z. B. der Motoren. Dies ist für die Anwendung der STJ in Doppelfassaden, insbesondere Closed-Cavity-Fassaden (CCF) interessant, bei denen eine Überhitzung des Zwischenraums vorkommen kann (Gratia und Herde 2007; Lutz 2012).

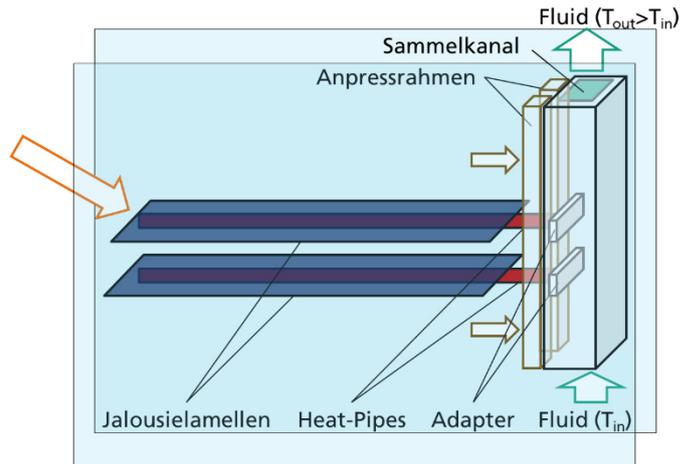


Abbildung 4: Funktionsprinzip der solarthermischen Jalousie.

Damit die erarbeiteten technischen Lösungen auch tatsächlich zu Produkten führen und damit zur Energiewende beitragen können, wurde die Entwicklung objektiv durch Innovationsmanagement mit Geschäftsmodellentwicklung und Erstellen von Vermarktungsszenarien begleitet. Somit sollen neben der reinen Technologieentwicklung auch gleichzeitig Aspekte aufgezeigt werden, die eine erfolgreiche Markteinführung ermöglichen.

2.2 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Entwicklung der Kollektoren erfolgte in mehreren Iterationen, angefangen bei der Untersuchung geeigneter Heat-Pipes, der trockenen thermischen Anbindung in verschiedenen Testständen, über Teilfunktionstestmuster, Montagemuster, funktionale Labortestmuster bis hin zu einer Demofassade des Streifenkollektors bzw. eines Demofassadenelements der Solarthermischen Jalousie. Die Entwicklung der Kollektoren wurde begleitet durch Modellierung und Simulation, die auch zur Bewertung des Potentials technischer Verbesserungen der Technologien verwendet wurde.

Begleitet wurde die technologische Entwicklung über die gesamte Projektlaufzeit durch die Arbeitspakete für architektonische Integration und Innovationsmanagement, damit ein späterer Erfolg dieser innovativen Entwicklungen sichergestellt werden kann.

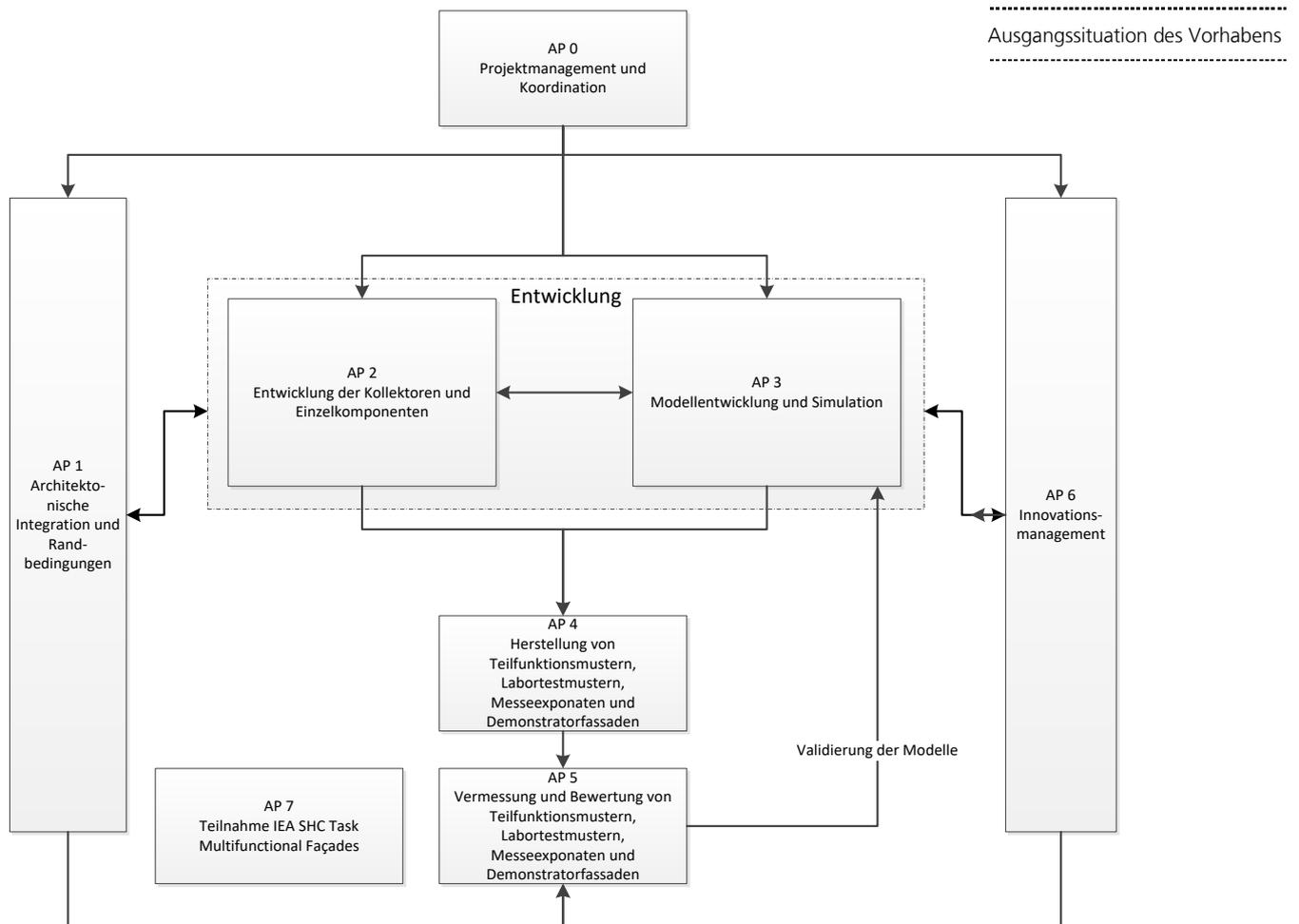


Abbildung 5: Übersicht der Arbeitspakete von ArKol.

2.3 Wissenschaftlicher und technischer Stand vor Projektbeginn

Die Integration eines solarthermischen Kollektors in die Gebäudefassade ist bislang noch recht selten anzutreffen. Die Hemmnisse und deren Lösungen wurden in dem Projekt Aktifas untersucht, das ebenfalls vom BMWi gefördert wurde (Cappel et al. 2015b). Um den Ansprüchen der Architekten gerecht zu werden und eine möglichst hohe architektonische Integration und damit gesellschaftliche Akzeptanz zu erreichen, ist ein weit höheres Maß an Flexibilität in Kollektorgöße und -form gefordert als dies bei der konventionellen Dachinstallation der Fall ist. Besonders im Falle der Gebäudesanierung, bei der die Fassadengeometrie fest vorgegeben ist, stellt die vollflächige Nutzung von Lochfassaden eine große Herausforderung sowohl im Hinblick auf die Gestaltung als auch auf die hydraulische Verschaltung des Kollektorfelds dar. Die im Rahmen von Aktifas durchgeführte Befragung unter Kollektorherstellern hat gezeigt, dass Maßanfertigungen möglich, allerdings immer mit einem Aufpreis verbunden sind. Ein herausragender Hersteller ist „AKS Doma Flex“, der Kollektoren in sehr unterschiedlichen Größen anbietet. „Siko Solar“ fokussiert sich vor allem auf den Bereich maßgeschneiderter Fassadenkollektoren und Forschung. Die hydraulische Verschaltung unterschiedlich langer Kollektorstränge stellt ebenfalls eine Herausforderung dar. Ein Lösungsansatz hierzu ist die Verwendung von nicht durchströmten Dummy-Elementen, was den Flächenertrag jedoch reduziert.

Bei der Untersuchung in Aktifas gaben die befragten Bauunternehmen an, in der Lage zu sein, solarthermische Fassaden realisieren zu können. Die Erfahrung zeigt allerdings, dass sich das Zusammenfinden von Bau- und Solarthermie-Branche in tatsächlichen Projekten bzw. Installationen als schwierig gestaltet. Daher wurde in ArKol durch ein objektives Innovationsmanagement frühzeitig die für die späteren Produkte relevanten Hauptakteure bezüglich Planung, Herstellung, Vertrieb und Nutzung identifiziert und in den Entwicklungsprozess durch Befragungen und Workshops eingebunden. Somit soll auch eine spätere erfolgreiche Vermarktung sichergestellt werden. Dazu wurden auch Methoden zur Geschäftsmodellentwicklung eingesetzt.

In aktueller Literatur wird der Einsatz von Wärmerohren (Heat-Pipes) in solarthermischen Fassadenkollektoren zur aktiven Solarenergienutzung vor allem von der National Technical University of Ukraine verfolgt (Khairmasov et al. 2013; Rassamakin et al. 2013a; Rassamakin et al. 2013b). Hier wurde ein Wärmerohrfassadenkollektorkonzept entwickelt, das ein hohes Maß an architektonischer Integration ermöglichen soll. Schlüsselfaktoren sind dabei die Flachkollektorbauweise sowie das hohe Maß an Modularität. Der Wärmerohrbehälterwerkstoff Aluminium und die Fertigung durch Extrusionsprozesse sollen zudem geringe Fertigungskosten sicherstellen. Absorberfinne und zylindrisches Wärmerohr sowie Kapillarrillenstruktur werden dabei aus einem Stück gefertigt. In ersten Tests konnte ein zu Standardwärmerohrkollektoren vergleichbarer Wirkungsgrad nachgewiesen werden. Der thermische Widerstand der Wärmerohre liegt mit 0,02 - 0,07 K/W (bei 50 - 300 W) im unteren Bereich der solaren Standardkupferwärmerohre mit Wasser, die in einer Vermessung durch das ISFH Widerstände zwischen 0,04 und 0,2 K/W aufweisen (Rassamakin et al. 2013b; Jack und Rockendorf 2013). Um die architektonische Integration zu erhöhen, wurden Absorberbeschichtungen unterschiedlicher Farbgebungen analysiert (Rassamakin et al. 2013a). Konzepte mit unterschiedlich langen Heat-Pipes sowie Absorberformen sind denkbar. Ein Betrieb bei Winkeln zwischen 0° und 90° wird als möglich propagiert (Rassamakin et al. 2013a; Rassamakin et al. 2013b), Messergebnisse sind jedoch nicht veröffentlicht. Über Füllgrad, Art des Arbeitsfluids sowie den Betrieb bei Winkeln kleiner 0° wird keine Aussage gemacht. Eine Weiterentwicklung der Kollektorkonzepte über den hier wiedergegebenen Stand ist nicht bekannt.

Im Bereich der transparenten Fassadenkollektoren wurden bisher nur wenige Lösungen bis zum verfügbaren Produkt oder zum Demonstrator entwickelt (z. B. "Solar Thermal Glass" von Robin Sun (Robin 2002), „TSTC“ von Permasteelisa (Maurer et al. 2014) und „Fassadenkollektor“ von Ritter XL Solar (Wolf und Molter 2012), siehe Abbildung 6), die jedoch aufgrund der permanenten Teilverschattung bisher hauptsächlich für den Einsatz in Bürogebäuden in Betracht gezogen werden. Für die solarthermische Nutzung der Fensterflächen von Wohngebäuden ist der Einsatz entsprechender Produkte aufgrund der hier vergleichsweise geringen Fensterfläche und des damit verbundenen hohen Verschattungsgrads nur bedingt geeignet.



Abbildung 6: (oben links) Teiltransparenter solarthermischer Kollektor „Solar Thermal Glass“ von Robin Sun, (unten links) Teiltransparenter Fassadenkollektor von Ritter XL Solar, (rechts) TSTC von Permasteelisa.

Die von Ritter XL Solar eingesetzten Vakuumröhren haben den Nachteil, dass sie kostengünstig nur in bestimmten Längen verfügbar sind (beschränkt durch ein bis drei vom Hersteller angebotene Rohrlängen für die Vakuumröhren). Individuelle Rastermaße lassen sich daher höchstens durch ein „Kammprinzip“ wie in Abbildung 7 dargestellt realisieren. Zudem lässt sich eine Fassade mit Vakuumröhren nicht zu voller Transparenz schalten, da sich Vakuumröhren nicht so platzsparend wie eine Jalousie zusammenstapeln lassen. Des Weiteren erschwert das mitunter technische Erscheinungsbild des Kollektors nach Aussage der ehemaligen Projektleiterin Prof. Tina Wolf (geb. Volz) die Akzeptanz bei Bauherren und Architekten.

Der Einbau von solarthermischen Kollektoren in ein Wandsystem erhöht allerdings den Anspruch nach einer einfachen und vor allem sicheren hydraulischen Verschaltung, um den Bedenken von Architekten und Bauherren gegenüber einer Durchströmung der Fassade und den damit bestehenden Risiken bei Leckagen entgegenzutreten. Der Einsatz von Heat-Pipe-Kollektoren mit trockener Anbindung der Heat-Pipe an den Sammelkanal kann hierbei das Leckagerisiko deutlich reduzieren, da eine direkte Durchströmung der gesamten Fassade damit vermieden wird.

Derzeit existiert kein marktverfügbarer Heat-Pipe-Kollektor, der explizit für die Fassadenintegration entwickelt wurde. Die verfügbaren Kollektoren können zwar vorgehängt an der Fassade installiert werden, bestehende Winkelrestriktionen schränken die Ausrichtung des Kollektors jedoch stark ein, mit negativen Auswirkungen auf erzielbaren Jahresertrag und ästhetisches Erscheinungsbild. Spezielle Kollektoren ermöglichen einen Betrieb unter kleinen Neigungswinkeln. Der Wärmerohrkollektor Vitosol 200-TM der Viess-

mann Werke GmbH & Co. KG ist laut Hersteller für die liegende Montage auf Flachdächern geeignet. Um eine Aufrechterhaltung des Verdampfungs-/Kondensationskreislaufs zu erhalten, muss der Neigungswinkel gemäß Datenblatt größer als 0° sein (Viessmann Werke GmbH & Co. KG 2019). Die SUNDA Solar GmbH bietet mit der Baureihe Seido8 Wärmerohrkollektoren an, die laut Hersteller in horizontaler Ausrichtung installiert werden können. Es wird ein Mindestneigungswinkel für das Wärmerohr von größer als $+1^\circ$ vorgegeben (positive Neigung: Kondensator oberhalb Verdampfer) (Beijing Sunda Solar Energy Technology Co., Ltd. 2017).

Die flexible, auch horizontale Ausrichtung und bei bestehenden Fertigungs- und Montage-toleranzen ggf. leicht negative Neigung ist jedoch eine wichtige Voraussetzung für eine gelungene Akzeptanz der solarthermischen Nutzung der Fassade von Seiten der Architekten und Bauherren.



Abbildung 7: Kammprinzip bei Vakuumröhrenkollektoren (Volz 2006).

2.4 Zusammenarbeit innerhalb des Konsortiums

Das Projektkonsortium vereinte Institutionen und Firmen aus den Kompetenzfeldern der Solarthermie, architektonisch anspruchsvoller Fassadengestaltung und Innovationsmanagement. Die Partner verfügen über große Branchen- und Markterfahrung sowohl im Bereich Solarthermie als auch in der Baubranche.

Fachlichen Kompetenzen und Arbeitsschwerpunkte der einzelnen Projektpartner und Unterauftragnehmer

Das **Fraunhofer ISE** verfügt über langjährige Erfahrung im Bereich Solarthermie, begleitet und initiiert solarthermische Kollektor- und Systementwicklungen und betreibt mit dem TestLab Solar Thermal Systems ein Labor zur Vermessung solarthermischer Kollektoren und Systeme. Mit einem Heat-Pipe-Teststand im Leistungs- und Temperaturbereich von Vakuumröhrenkollektoren ist zudem die Ausstattung und Expertise zur Vermessung von Heat-Pipes vorhanden. In der Gruppe „Solare Gebäudehüllen“ werden bauwerkintegrierte Solarsysteme entwickelt und im TestLab Solar Façades vermessen. Ebenfalls wurden bereits teiltransparente Kollektoren modelliert und simuliert. Die Arbeitsschwerpunkte von Fraunhofer ISE waren:

- Projektleitung und -koordination
- Entwicklung des Heat-Pipe-Konzepts und der hierfür erforderlichen Teststände und Befüllanlage
- Entwicklung, Konstruktion und Prüfung geeigneter Mechanikkonzepte und Wärmeübertragungskonzepte

- Herstellung von Heat-Pipe-Testobjekten und Labortestmustern der beiden Fassadenkollektor-Konzepte
- Vermessung der Heat-Pipe und der Heat-Pipe-Fassadenkollektorelemente (optisch, thermisch)
- Modellbildung und -parametrisierung sowie Validierung (Heat-Pipe, Kollektor, Gebäude)
- Durchführung von Jahresertragsberechnungen

DAW SE (Marken unter anderem **Caparol**) ist in Deutschland führend auf dem Gebiet der Bautenanstrichmittel. Das Produktportfolio umfasst hochwertige Farben, Lacke, Lasuren und Putze, für innen und außen sowie Wärmedämm-Verbundsysteme (WDVS). Dazu kommen Akustiksysteme und Bautenschutzprodukte, Bodenbeschichtungen sowie Produkte für Korrosionsschutz und Betonsanierung. Darüber hinaus werden Beratungs-, Planungs- und Weiterbildungsleistungen für Maler und Stuckateure, den Farbenfachhandel, Planer, Architekten und die Wohnungswirtschaft angeboten. Das Unternehmen hat über 300 Handelspartner. In früheren Forschungsprojekten wurde bereits eine innovative transparente Wärmedämmung entwickelt. Die Arbeitsschwerpunkte von DAW waren:

- Entwicklung von Zwischenraumkonzepten (Holz, Putz, Naturstein, Keramik, Feinsteinzeug etc.) für den Streifenkollektor
- Entwicklung von Dämmkonzepten für den Streifenkollektor
- Erstellung eines Leitfadens zur Installation für den Streifenkollektor
- Integration in Fassadenlösungen für den Streifenkollektor
- Realisierung von Demonstratoren und Exponaten für den Streifenkollektor,
- Optimierung bezüglich Verarbeitbarkeit und Kosten für den Streifenkollektor

Die **Priedemann-Gruppe** ist Vorreiter im nationalen und internationalen Markt in Bezug auf digitale und parametrische Fassadenplanungsprozesse. Dadurch können komplexe Großprojekte effektiv bearbeitet werden. Die **Priedemann Facade-Lab GmbH** wurde im Jahr 2010 gegründet mit der Zielsetzung, Forschung und Entwicklungsprojekte im Bereich der Gebäudehülle zu betreiben und für Investoren oder Architekten von Großprojekten ein attraktiver Partner zu werden. Die Priedemann Facade-Lab GmbH ist die F&E-Abteilung der Priedemann Gruppe und ist u. a. spezialisiert auf Fertigung von Prototypen. Der inhaltliche Schwerpunkt liegt darin, innovative Lösungen für die Außenhaut der kommenden Gebäudegenerationen zu entwickeln. Die Priedemann Facade-Lab GmbH entwickelt so auch zusammen mit Softwarefirmen notwendige Tools, um diese Prozesse lösungsorientierter zu gestalten. Das Know-how der Firma Priedemann Facade-Lab geht dabei vom Entwurfsprozess bis hin zur Maschinenansteuerung und zur Produktionsauslegung von Fabrikationsanlagen. Neben diesen fachlichen Kompetenzen bietet Priedemann Facade-Lab für Architekten, Entwickler, Investoren, Auftragnehmer, Hersteller und Verarbeiter außerdem eine inspirierende und interdisziplinäre Fachausstellung (Showroom), in der verschiedenste Fassadenmaterialien und -lösungen, sowie ihre Verarbeitungsmöglichkeiten, präsentiert werden. Auch Prototypen aus der Entwicklungsarbeit sowie Mock-Ups abgeschlossener Projekte können dort besichtigt werden. Im „Fassadenforum“ werden Schulungen, Workshops und Tagungen, auch von anderen Veranstaltern, durchgeführt. Die Arbeitsschwerpunkte von Priedemann Facade-Lab waren:

- Ingenieurtechnische Ausführung beider Konzepte
- Optimierung bezüglich Verarbeitbarkeit und Kosten
- Realisierung von Demonstratoren und Exponaten

- Erstellung eines Leitfadens zur Installation der Jalousie
- Bewertung der Konzepte aus architektonischer und Fassadentechnischer Sicht
- Visualisierung und Veröffentlichung der Arbeitsergebnisse

Die Arbeit der Verbundpartner wurde durch drei Unteraufträge unterstützt:

Das **Kompetenzzentrum für Ausbau und Fassade** (KomZet) ist in den Bereichen Putz, Stuck, Trockenbau, Wärmedämmung und Fassade, Bildungsdienstleistung und Technologiebeschleunigung als bundesweit verantwortliches Kompetenzzentrum vom Bundesministerium für Bildung und Forschung anerkannt. Zielgruppen sind Unternehmer, Fachkräfte und Auszubildende im Stuckateurhandwerk sowie Architekten/Planer, Industriepartner und Bauherren. Die Arbeitsschwerpunkte des Unterauftrags des Kompetenzzentrums waren:

- Prüfung von Verarbeitbarkeit und Leitfäden
- Erstellung von Schulungsunterlagen

Das **Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit gGmbH** ist in der Innovations- und Entrepreneurship-Forschung tätig und dem Leitbild einer Nachhaltigen Entwicklung verpflichtet. Als unabhängige und gemeinnützige Forschungseinrichtung führt Borderstep grundlagen- und anwendungsorientierte Forschungsvorhaben in den Feldern Umweltinnovationen, nachhaltige Zukunftsmärkte und nachhaltiges Unternehmertum durch und erstellt Studien für öffentliche Auftraggeber wie das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) oder das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Das Institut verfügt über umfangreiche Vorkenntnisse und Erfahrungen auf dem Gebiet der Innovationsforschung und Technologiebewertung. Es erarbeitet praxistaugliche, wissenschaftliche Konzepte z. B. für die Innovations- und Technologieplanung sowie die Politikentwicklung. Zu den dabei eingesetzten Methoden gehören Szenario- und Forecastingtechniken, Technologie- und Trendmonitoring sowie Methoden der Geschäftsmodellentwicklung. Die Arbeitsschwerpunkte des Unterauftrags des Borderstep Instituts waren:

- Objektive Begleitung des Innovationsprozesses
- Organisation von Workshops mit dem Ziel, die Fachwelt zu informieren und umgekehrt Feedback für die Entwicklung und spätere Vermarktbarkeit und Input für mögliche Geschäftsmodelle zu erhalten
- Geschäftsmodellentwicklung und darauf bezogene strategische Handlungsempfehlungen

Der **Lehrstuhl IBK2 - Baukonstruktion, Bautechnologie und Entwerfen** der **Universität Stuttgart** bildet im Projekt eine Schnittstelle zwischen Architekten, Fachingenieuren und Industrie. Im IBK2 wird die intrinsische Verflechtung von Entwurf und Konstruktion vermittelt und erforscht. Ausgangspunkt für die Entwicklung neuartiger Konstruktionsweisen sind die zukünftigen gesellschaftlichen und klimatischen Herausforderungen. Die Kompetenzen liegen im Fassadenentwurf, in der Fassadenentwicklung und in der Fassadenkonstruktion als Teil des architektonischen Entwurfs und der konstruktiven Umsetzung. Das IBK2 konnte bereits 2009 in einem vom BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) geförderten Forschungsprojekt eine vielversprechende Integration eines Solarthermie-Kollektors in Bürofassaden entwickeln (Wolf und Molter 2012). Ziel war es mit der gewonnenen, erneuerbaren Energie den Kühl-, Heiz- und Warmwasserbedarf des Gebäudes zu einem Großteil in Zukunft decken

zu können. Besondere Herausforderung bei der Entwicklung des fassadenintegrierten Solarthermie Kollektors waren die Lösung der baukonstruktiven Details, die die Integration in eine hochwertige Bürofassade erforderten, bei gleichzeitiger Gewährleistung größtmöglicher Transparenz der Fassade. Das IBK2 brachte Erfahrung bezüglich architektonischer Themen, insbesondere zu gebäudeintegrierten Solarkonzepten, und Studien zu Visualisierungen ein. Die Arbeitsschwerpunkte des Unterauftrags des ibk2 waren:

Ausgangssituation des Vorhabens

- Entwicklung von Konzepten zur architektonischen Integration des Streifenkollektors in verschiedene Fassadentypologien und deren architektonische Bewertung
- Definition der notwendigen technischen Schnittstellen des Streifenkollektors zu den verschiedenen Fassadensystemen
- Visualisierungen des Streifenkollektors und der Solarthermischen Jalousie

Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens

3.1 Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse

Die Struktur der Ergebnisdarstellung des Projekts ArKol folgt grob den Arbeitspaketen. Zur besseren Lesbarkeit wurden allerdings verschiedene Teile verschoben. Insbesondere wurde die Trennung von Entwicklung der Kollektoren (AP2), Herstellung (AP4) und Vermessung (AP5) entfernt. Die Struktur hat demzufolge folgende Hauptteile:

- Architektonische Integration und Randbedingungen
- Entwicklung und Vermessung der Technologien
- Modellierung und Simulation
- Demonstratorfassaden
- Ganzheitliche Bewertung der Technologien
- Innovationsmanagement und Öffentlichkeitsarbeit zur Marktheranführung

3.1.1 Projektmanagement und Koordination

Die Koordination und Leitung des Gesamtprojekts wurde vom Fraunhofer ISE übernommen. Die Zusammenarbeit aller Partner und Unterauftragnehmer verlief sehr positiv und konstruktiv.

3.1.2 Architektonische Integration und Randbedingungen

Ablauf und Ergebnisse des
Vorhabens

In diesem Kapitel werden die Grundlagen und Randbedingungen der hier untersuchten Technologien für Fassaden geklärt. Es wurden aufbauend auf der Erfahrung der Industriepartner und des Kompetenzzentrums die Schnittstellen zu herkömmlicher Fassadentechnik bestimmt. Umgekehrt wurden daraus die für die Entwicklung wichtigen technischen Parameter identifiziert. Dieses Thema begleitete die technische Entwicklung und stellte während der gesamten Projektlaufzeit sicher, dass die Entwicklungen einem integralen Ansatz folgen. D. h. die solarthermische Komponente wird integraler Bestandteil der Fassade und somit des architektonischen sowie konstruktivem Gesamtkonzepts.

3.1.2.1 Baurechtliche Bestimmungen

Streifenkollektor

Als ein potentiell geeignetes Trägermaterial für die Streifenkollektoren wurde zu Beginn des Vorhabens Capapor ausgewählt. Dieses Material wird üblicherweise für Dekorelemente eingesetzt (Abbildung 8). Es handelt sich dabei um einen epoxidharz-gebundenen mineralischen Stoff, der bisher mit bis etwa 150 °C noch bedingt temperaturstabil ist.

Die Vorteile von Capapor liegen darin, dass es leicht zu bearbeiten ist und in vorgegebene Form gefräst werden kann. Außerdem ist es stabil genug für Verschraubungen etc. Die derzeitige Brandschutzklassifizierung ist nach europäischer Norm EN 13501 mit B1, also schwerentflammbar, erreicht worden. Eine Klassifizierung als A, also nicht brennbar, wird angestrebt.



Abbildung 8: Beispiele von Capapor-Fassaden.

Dieses Material ist in der Bauregelliste enthalten. Mit einer Integration der Streifenkollektoren in das Capapor-Material wird eine gesonderte Zulassung nötig, da solche komplexen Aufbauten nicht Bestandteil der Bauregelliste werden können. Es sollte eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ) angestrebt werden, um den Kunden leichter von der Sicherheit des Systems überzeugen zu können. Die Tatsache, dass Capapor bereits in der Bauregelliste steht, führt zu einer guten Basis für die weitere Zulassung.

Bei der Umsetzung im weiteren Projektverlauf bzw. nach Abschluss des Projekts sind jedoch die Anforderungen des Zulassungsverfahrens zu berücksichtigen: Zum Start des Zulassungsverfahrens muss beim Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) ein Antrag eingereicht werden. Von dort erhält man Hinweise, welche weiteren Tests (in diesem Fall

z. B. für Brandschutz und Standsicherheit) nötig wären. In technisch anspruchsvollen Fällen wird hierfür der Sachverständigenausschuss (SVA) hinzugezogen. Danach legt das DIBt die erforderlichen Nachweise fest. Der Antragsteller legt die Nachweise dann vor, diese werden vom DIBt bewertet. Zumeist wird hierfür ebenso der SVA hinzugezogen. Sollten alle Nachweise erbracht worden sein, erteilt das DIBt die abZ. Da der SVA nur alle 6 Monate tagt, muss man für diese Prozedur folglich mindestens ein Jahr einplanen. Ein alternativer Weg führt über die Zulassungen im Einzelfall (ZiE). Diese sind einfacher und schneller zu erhalten als eine abZ. Allerdings werden diese von den einzelnen Bundesländern erteilt und sind damit nicht bundesweit gültig. Mit mehreren erhaltenen ZiE kann die Zulassungsprozedur für eine abZ erleichtert werden, da die Sicherheit des Systems durch diese ZiE und die damit einhergehenden umgesetzten Projekte bewiesen wurde.

Solarthermische Jalousie

Im Zuge der Entwicklung muss eine Vielzahl von in späteren Bauvorhaben einzuhalten- den Auflagen/Richtlinien berücksichtigt werden. Diese werden je nach Stand der Entwicklung mit dieser abgeglichen, um eine spätere Marktkonformität zu gewährleisten. Nachfolgend eine Auflistung von Normen, Richtlinien oder Leitlinien, die betrachtet werden sollten:

- Arbeitsstättenrichtlinie
- EnEV [2014]
- LEED, BREEAM, DGNB
- DIN 12365, 18540, 18545, 52452, 52455, 52460; DIN EN 12154, 15434 (Abdichtung)
- DIN 17611; DIN EN 573; 755 (Aluminium)
- DIN 5034; EN 12464; VDI 6011 (Belichtung)
- DIN 4102; DIN EN 1363, 1364; Muster-Hochhaus-Richtlinie (Brandschutz)
- DIN EN 485, 12810, 13119, 1364, 13830, 13947 (Fassade)
- VDI 2067, 2078, 3807, 3808, 4710, 6002; (Gebäudetechnik)
- DIN 18008; DIN EN 410, 572, 673 - 675, 1096, 1279, 12758, 13022, 13031 (Glas)
- DIN EN 12152, 12153, 12835 (Luftdurchlässigkeit)
- DIN 18550 (Putz)
- DIN EN 12154, 1255 (Schlagregendichtheit)
- VDI 2169_2012-10 (Solarthermie)
- DIN EN 13363, 13659, (Sonnenschutz)
- DIN 18202, 4172 (Toleranzen)
- DIN EN 13162 – 13172 (Wärmedämmstoffe)
- DIN EN 12179 (Windlast)
- DIN 18346; DIN EN 13497 – 13499 + 13500 (WDVS)

3.1.2.2 Fallanalysen

Fallanalyse Festo AutomationCenter - ACT Facade



Abbildung 9: Festo AutomationCenter Esslingen (Quelle: Festo AG).

In Bürobauten macht aufgrund interner Wärmequellen die Kühlung einen Großteil des Energiebedarfs aus. Hohe solare Einträge im Sommer oder bei niedrigstehender Winter-sonne kommen hinzu. Sonnenschutzverglasungen alleine reichen hier unter den gel-ten- den Bestimmungen für Wärme, Sonnen- und Blendschutzes nicht aus, um eine Ganz- glasfassade nach aktuellem Standard zu errichten.

Basierend auf der Idee der Abluftfassade, die von der Priedemann Fassadenberatung bereits erfolgreich umgesetzt worden war, entstand ein neues Konzept, die sogenannte ACT Facade, eines innenliegenden Blendschutzes, der als vollwertiger Sonnenschutz wirkt. Ein ohnehin notwendiger, innenliegender Blendschutz-Screen wird dabei aktiviert und dient im Gesamtsystem als Trennschicht zum Innenraum. Zwischen diesem Screen und der Verglasung entsteht ein Abluftkanal, über den die unter der Decke eingesaugte Abluft der Büros geführt wird. Im Zwischenraum wird an der Oberfläche des Screens die Sonneneinstrahlung aufgenommen und Wärme durch den Luftstrom abgeführt. Ein Auf- heizen des Innenraumes wird so verhindert.

Die zum Innenraum gerichtete Oberfläche des Screens weist dabei nahezu Raumtempe- ratur auf. Bei gleicher Oberflächentemperatur aller Raumflächen stellt sich im Innenraum Behaglichkeit ein: Es gibt keine Strahlungsasymmetrie im Raum; ein in der Nähe von Glasflächen häufig erlebtes Hitze- oder Kälteempfinden bleibt aus, der Kühlbedarf sinkt. Das Gesamtsystem kann darüber hinaus individuell gesteuert werden. Entstanden ist eine witterungsunabhängige Hülle mit dynamisch anpassungsfähigem g-Wert des Fassaden- aufbaus.

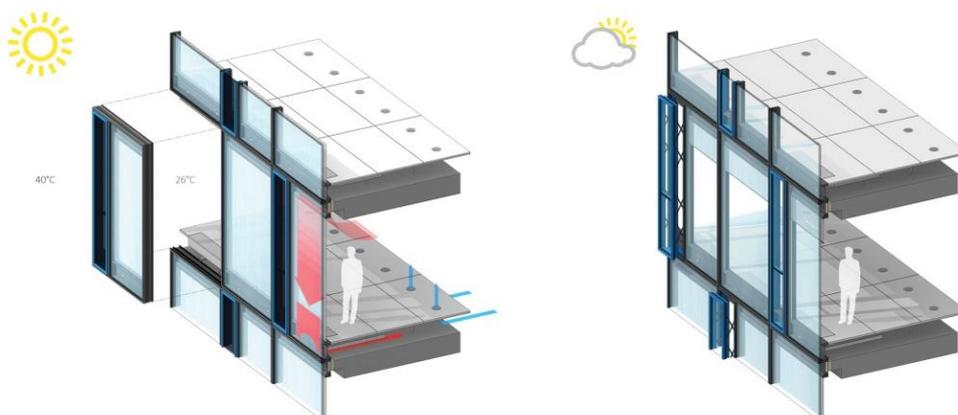


Abbildung 10: Funktionskonzept der Abluftfassade am AutomationCenter.

Für das Vorhaben ArKol, speziell den Ansatz der Solarthermischen Jalousie, können hieraus folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- Vor allem im Bereich des Hochhausbaus herrscht eine große Nachfrage nach Ganzglasfassaden, was nach aktuellen Energiestandards allerdings kaum zu realisieren ist. Im Speziellen sind damit verbundene Ganzglasecken unter Berücksichtigung des sommerlichen Wärmeschutzes schwer zu realisieren. Auf Grund des Ausscheidens von effektiven externen Sonnenschutzlösungen, wegen zu hoher Windlasten, sind neue integrierte Lösungen wie die Abluftfassade oder die Solarthermische Jalousie von großem Interesse für Bauherren und Architekten.
- Das Thema Sonnenschutz wird in Zukunft z. B. auf Grund des sommerlichen Wärmeschutznachweises eine zunehmende Rolle in Neubauten und Sanierungen einnehmen.
- In einem ganzheitlich gedachten und geplanten Gebäude/Energiekonzept kann die an der Fassade anstehende Energie sinnvoll aufgenommen werden, anstatt diese Energie zu reflektieren und somit mögliches Potential zu verschenken bzw. im urbanen Raum die Umgebung aufzuheizen.
- Für die Umsetzung eines solchen neuartigen Fassadensystems müssen alle Planer, der Bauherr, aber auch Hersteller und ausführende Firmen intensiv kooperieren und ein ganzheitliches Konzept entwickelt werden, um Fassade und Haustechnik intelligent zu verknüpfen.
- Eine aktive Fassade kann durch die dynamische Schaltung die Behaglichkeit im Raum intensiv beeinflussen und so zur Reduktion von z. B. benötigter Kühlenergie führen bzw. die Effizienz der Mitarbeiter steigern. Wichtige Themen dabei sind die Steuerung von natürlicher Belichtung in Abhängigkeit von einem ausreichenden Blendschutz und die Schaffung einer dem Raum angepassten Oberflächentemperatur der Fassade, um Strahlungsasymmetrien zu vermeiden.
- Eine innovative und energieeffiziente Fassade ist als Aushängeschild und für Zertifizierungen für Bauherren sehr wichtig und entsprechende Entwicklungen sollten dies aktiv adressieren.

Fallanalyse BIST im Mehrfamilienhaus

Als Fallbeispiel einer WDVS-Fassade zur Nutzung von Solarthermie wurde die Sanierung eines neunstöckigen Wohnhochhauses mit 36 Wohneinheiten in der Stadt Eschwege (Hessen) betrachtet und ausgewertet, die 2001 erfolgte. Dabei wurden maßgefertigte Solarthermie-Fassadenkollektoren zur Trinkwarmwasser-Vorerwärmung eingesetzt (s. Abbildung 11). Es handelte sich dabei um kommerziell verfügbare Kollektoren. Die insgesamt 60 m² große Solarfassade wurde auf einen Ertrag von 280 kWh pro m² Absorberfläche ausgelegt und sollte den Wärmebedarf der Warmwasserbereitung zu etwa 16 % decken. Dieser relativ niedrige Deckungsanteil wurde gewählt, damit die Kollektoren durch den Betrieb auf einem niedrigeren Temperaturniveau mit hohen Wirkungsgraden arbeiten.



Abbildung 11: Bild des sanierten Mehrfamilienhauses in Eschwege mit Solarthermie-Elementen an der Fassade.

Die Kollektoren wurden dabei mittels thermisch entkoppelten Wandhaltern an der Fassade befestigt. Hinter den Kollektoren wurde eine 5 cm dicke Wärmedämmung aus Mineralwolle angebracht. Zur Vermeidung von Wärmeverlusten und zur Steigerung des Ertrages sind die Kollektoren nicht hinterlüftet (s. Abbildung 12). Ein wichtiger ästhetischer Gesichtspunkt war der bündige Abschluss der Module mit der Wand bzw. der Putzoberfläche. Dies wurde realisiert, indem die Dämmstoffdicke der Wand hinter den Modulen reduziert wurde. Des Weiteren sind die Module einzeln austauschbar (ohne Beschädigung des WDVS), welches eine wichtige Voraussetzung für die Wartung darstellt.

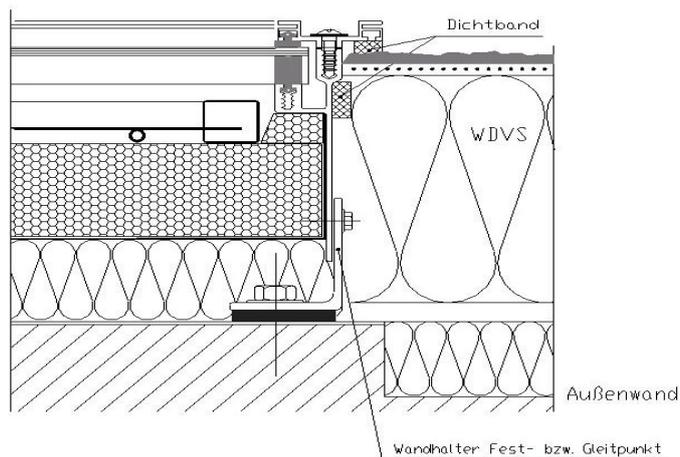


Abbildung 12: Schematischer Aufbau (Querschnitt).

Mit einer prognostizierten Wärmeleistung von etwa 13.600 kWh/a erbringt die Solaranlage im Vergleich zu alternativen Sanierungsmaßnahmen auf den ersten Blick nur einen kleinen Teil der insgesamt möglichen Energieeinsparung. Um die gleiche Energie aber über eine bessere Wärmedämmung einzusparen, hätte die Dämmdicke der 1.500 m² Wandflächen von 12 cm auf 26 cm erhöht werden müssen. Die Kosten für diese Variante

wären vergleichbar gewesen. Dieser Ansatz hätte jedoch die Nachteile aufgewiesen, dass es für derartig dicke Dämmsysteme aus Mineralwolle keine allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen gibt und die Wanddicke um weitere 14 cm angestiegen wäre. Dies zeigt deutlich, dass im Fall eines bereits guten Dämmstandards weitere Einsparungen geeigneter Weise durch die Nutzung von Solarenergie erzielt werden können. Weiterhin wurde das System mit einem Messsystem ausgestattet, das unter anderem die Globalstrahlung, die Temperaturen und Feuchtigkeit in der Wand sowie den Warmwasserverbrauch ermittelt und auf einem Display im Eingangsbereich anzeigt. Es folgte noch die Realisierung zweier weiterer Fassaden in Fulda (2003) und Kassel (2004). Die Rückmeldungen der Bewohner und Bauherren sind durchweg positiv. Die Anlagen laufen auch nach über 10 Jahren Betriebszeit absolut problemlos.

Für das Vorhaben ArKol, speziell den Ansatz des Streifenkollektors, können hieraus folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

Gerade Mehrfamilienhäuser, deren Dachfläche für die Versorgung aller Wohnungen mit Solarenergie nicht ausreicht, stellen einen bedeutenden Markt für Solarthermie an Fassaden dar. Solche Vorhaben werden üblicherweise im Objektgeschäft von größeren Bauherren durchgeführt. Durch deren Erfahrung ist die Skepsis vor neuen Technologien in der Regel weniger ausgeprägt als beispielsweise im Falle von Einfamilienhäusern. Außerdem verspricht sich der Bauherr durch diese innovativen Projekte in der Regel auch einen Prestigegegewinn.

Die Projekte in Hessen haben gezeigt, dass Solarthermie an der Fassade und WDVS vereinbar sind, obwohl die Kollektoren selbst nicht Teil des WDVS waren. Der Dämmwert der Module ist zwar deutlich schlechter als der der Mineralwolle, durch die verstärkte Erwärmung der Module bei Sonneneinstrahlung wird dies jedoch wieder kompensiert. Es wurde weiterhin nachgewiesen, dass die Installation an der Fassade Vorteile gegenüber einer Installation auf dem Dach hat, und zwar hinsichtlich des Ertragsprofils über das gesamte Jahr. Im Winter, wenn die meiste Wärme benötigt wird, ist bei tiefstehender Sonne der Winkel an der Fassade sogar günstiger als bei Aufdachanlagen. Dadurch wird auch die Lastspitze im Sommer reduziert, durch die – je nach Dimensionierung der Anlage – die Wärme nicht vollständig genutzt werden kann. Eine größere Dimensionierung der Anlage wird somit wirtschaftlich.

Ein weiterer Vorteil von Solarthermie an der Fassade ist, dass im Winter die Wirkung der Anlage nicht durch Schnee beeinträchtigt wird. Folglich zeigt sich, dass Solarthermie an Fassaden sowohl technologisch als auch energetisch sinnvoll vereinbar sind.

3.1.2.3 Entwicklungsmethodik

Im Rahmen des Aktifas-Projekts wurden die Kriterien

- Funktionalität
- Ästhetik
- Ökologie
- Ökonomie
- Machbarkeit

definiert, die allerdings im konkreten Fall angemessen spezifiziert werden müssen (Cappel et al. 2015b). Zur Bewertung der Ästhetik steht unter anderem die Methodik von (Munari Probst und Roecker 2013) zur Verfügung.

Vor der Entwicklung der solarthermischen Jalousie wurden zunächst die grundlegenden Funktionen definiert (Haeringer et al. accepted):

- Bereitstellen solarthermischer Wärme

- Sonnenschutzfunktionalität vergleichbar mit herkömmlichen Jalousien oder besser (Kuhn 2017)
- Fassadenfunktionalität vergleichbar mit einer Fassade mit herkömmlichen Jalousien

Um einen Überblick über die notwendigen Baugruppen und technischen Möglichkeiten der solarthermischen Jalousie zu erhalten wurde parallel zur Entwicklung der STJ (vgl. Abschnitte 3.1.3.7 und 3.1.3.8) ein Design-Parameter-Raum in Anlehnung an (Kuhn 2017) und (Maurer et al. 2015b; Cappel et al. 2015a) aufgestellt. Die detaillierte Beschreibung des Design-Parameter-Raums ist in (Haeringer et al. accepted) publiziert.

Um bei der solarthermischen Jalousie verschiedene Mechaniken zum Öffnen und Schließen der schaltbaren thermischen Kopplung zu vergleichen, wurden insbesondere folgende Kriterien definiert: niedrige Kosten, hohe Zuverlässigkeit, geringer Hilfsenergiebedarf, niedriger thermischer Widerstand, geringe opake Fassadenfläche und geringer Öffnungszeitbedarf, weiterhin die Systemgrenze einer homogenen Temperatur am Adapter (anstelle einer Heat-Pipe) und einer homogenen Temperatur des Sammelkanals.

Beim Solarthermischen Streifenkollektor basiert bereits das Grundkonzept auf der Idee, Architekten mehr Gestaltungsspielräume zu geben, weshalb die Wärmeübertragung per Heat-Pipe und die thermische Anbindung mit stufenloser Positionierbarkeit essenziell sind. Die funktionalen Aspekte der Heat-Pipe und der Wärmedämmung mussten sich diesen Randbedingungen unterordnen.

Von Beginn an war dem Konsortium bewusst, dass die horizontale Ausrichtung der Heat-Pipe in beiden Technologien eine Herausforderung darstellt und idealerweise eine eigene Entwicklung erfordern würde. Im Projektverlauf wurde dann erkannt, dass eine solche Neuentwicklung einer Heat-Pipe aus Zeit- und Budgetgründen den Rahmen des Projekts überstiegen hätte. Daher wurde entschieden, den Fokus auf die Realisierung des Grundkonzepts zu legen und kommerzielle Heat-Pipes zu verwenden, wohl wissend, dass diese nicht ideale Lösung zu geringeren Erträgen führen würde. Nach erfolgreicher Demonstration des Grundkonzepts wurden zum Projektende noch Versuche zur Herstellung einer flachen Heat-Pipe für den Streifenkollektor durchgeführt, um Möglichkeiten für den nächsten Entwicklungsschritt aufzuzeigen.

3.1.2.4 Untersuchungen zur architektonischen Fassadenintegration

Streifenkollektor

Von DAW wurde das Konzept der architektonischen Integration der Solarthermiemodule ausgearbeitet.

Dabei wurde u. a. die Fertigbarkeit der Fassadenelemente betrachtet und bewertet. Es zeigte sich, dass die Fertigung der Elemente komplex ist und später auf der Baustelle selbst nicht geeignet ausgeführt werden kann. Stattdessen ist vorgesehen, dass die Bauelemente aus den einzelnen Bestandteilen vorgefertigt werden. So soll später ein komplettes Fassadenelement aus Solarthermiemodul, Dämmung, stabiler Rückseitenplatte und Halterung ausgeliefert werden. Der Handwerker vor Ort arbeitet somit mit etablierten und weit verbreiteten Technologien und Materialien. So können als Rückseitenplatte beispielweise Putzträgerplatten eingesetzt werden.

Diese Elemente können dann wie andere, bereits auf dem Markt verfügbare Systeme, wie etwa Dekorelemente, in die Fassade integriert werden.

Weiterhin wurde ein alternatives Trägermaterial ermittelt, nachdem sich in den Untersuchungen gezeigt hatte, dass das zuvor ausgewählte „Capapor“ in seiner bisherigen Form

aufgrund mangelnder Temperaturbeständigkeit nicht geeignet ist (Tests mit erhöhten Temperaturen hatten gezeigt, dass bei Temperaturen von ca. 130 °C eine Zersetzung des epoxidharzgebundenen Systems einsetzt). Die Betrachtung der verfügbaren Technologien ergab, dass das Material „Liapor“ eine erfolgversprechende Alternative darstellt. Es handelt sich dabei um einen Leichtbeton basierend auf Blähtonperlen (Abbildung 13). Er enthält keine organischen Materialien und ist nicht brennbar (Brandklasse A1 nach DIN 4102). Die Wärmeleitfähigkeit beträgt 0,36 mW/(mK) bei einer Dichte von 800 kg/m³. Die Bearbeitung des Materials kann mit einer Fräse erfolgen, außerdem ist es verschraubbar. Das Material ist als Leichtbeton insbesondere für Hochhaus- und Brückenbau geeignet. Bekannte Beispiele sind der BMW Tower in München sowie das Deutsche Technikmuseum in Berlin.



Abbildung 13: Liapor-Leichtbetonplatte (Quelle: www.raumprobe.de).

Im Zuge einer Seminarveranstaltung an der Architekturfakultät der Universität Stuttgart im Sommersemester 2017 wurden mit Architekturstudenten verschiedene Gestaltungsmöglichkeiten des Streifenkollektors in der Fassade untersucht. Die Ergebnisse wurden anschließend vom IBK2 ausgewertet, kategorisiert und weiterentwickelt. Die so gewonnenen Erkenntnisse bilden wertvolle Anhaltspunkte für die zukünftigen Entwicklungsschritte des Streifenkollektors, sowohl in seiner technischen, systemischen wie auch gestalterischen Ausrichtung. Während sich ursprünglich angedachte Gestaltungsoptionen zum Teil als weniger relevant erwiesen, rückten neue, bisher noch nicht berücksichtigte Kollektoranordnungen in den Vordergrund.

Grundlage der Untersuchungen bildete das Szenario einer Fassadensanierung. Neben der Erhöhung des Dämmstandards der bestehenden Fassade sollten dabei die in der Entwicklung stehenden Streifenkollektoren integriert werden. In Absprache mit den Projektpartnern war der Entwicklungsstand des Streifenkollektors vom März 2017 hierfür die Basis. Für die Bearbeitung standen sieben prototypisch ausgewählte Fassaden unterschiedlicher Gebäudetypologien und Nutzungen wie Wohnen, Schule, Büro und Krankenhaus zur Auswahl. Zusätzlich konnte das Konstruktionssystem der Fassade mit Wärmedämmverbundsystem (WDVS) oder vorgehängter Fassade (VHF) frei gewählt werden.

Bewusst sollten bei der architektonischen Ausformulierung der Fassaden technische Fragen wie etwa die Führung der Sammelleitungen oder die hydraulische Auslegung nur zweitrangig behandelt werden. Im Vordergrund sollten die gestalterisch-architektonischen Gesichtspunkte und Möglichkeiten stehen, die sich beispielsweise aus der Anordnung der Fassadenkomponenten (z. B. Fenster, Kollektor, opake Bereiche), der Materialwahl der Fassadenoberfläche oder dem Fugenbild ergeben.

Die wesentlichen Parameter in der Beurteilung der mehr als vierzig untersuchten Lösungen waren:

- a) Eignung der verschiedenen Fassadenkonstruktionen (WDVS oder VHF)
 - Kontext: Oberflächen umgebende Fassade, Fugenbild
 - Führung der Sammelleitungen, Schnittstellen zwischen verschiedenen Fassadenkomponenten
- b) Kollektordesign/Optische Beurteilung
 - Farbe, Oberfläche, Tiefe
- c) Anordnung und Ausrichtung der Kollektorstreifen
 - Architektonischer Einbindung und Integration
 - bezogen auf verschiedene Anwendungsfälle

Sowohl aus ästhetischer als auch baukonstruktiver Sicht hat sich die Bündelung mehrerer Kollektoren beispielsweise im Bereich von Brüstungen oder als Fensterbänder als vorteilhaft erwiesen. Eine Vielzahl von Anschlusspunkten an die bestehende Fassadenkonstruktion lassen sich dadurch minimieren. Die Erscheinung einer bestehenden Fassade wird weniger durch viele kleine Kollektorflächen gestört, sondern vielmehr durch wenige größere Flächen aufgewertet und beruhigt. Weitere Elemente wie ein Umfassungsrahmen oder Ausgleichspaneele dienen zur besseren Integration der Kollektorflächen an bestehende Fassaden und schaffen eine zusätzliche Akzentuierung in der Fassade über ihre Schmuckfarbe oder eigene Materialität.

Die Anordnung von einzelnen Streifenkollektoren in der Fassade kann im Gegensatz zum Zusammenfassen von Kollektorflächen zu ganz individuell gemusterten Fassadenbildern führen, wie beispielsweise einem „Pixelverlauf“ oder variierenden Streifenmustern. Bestehende Fensteröffnungen in der Fassade sind in der Regel nicht flächengleich mit der äußeren Fassadenebene und können daher zu Einschränkungen im Gesamtbild führen. Diese Art der Gestaltung mit dem „expressiven“ Einsatz des Streifenkollektors ist am besten im Bereich geschlossener Fassadenflächen beispielsweise an der Stirnseite von Wohngebäuden oder im Bereich von Industriebauten geeignet.

Insgesamt fällt auf, dass aufgrund der kleinen Abmessung der einzelnen Streifenkollektoren im Vergleich zu anderen marktüblichen Kollektoren eine relativ große Bandbreite an Gestaltungsmöglichkeiten in unterschiedlichen Fassadentypen ermöglicht wird. Wie sich herausgestellt hat, lässt sich dies auch technisch mit einem vertretbaren Aufwand realisieren.

Solarthermische Jalousie

Folgende Erkenntnisse zur architektonischen Integration der solarthermischen Jalousie konnten gewonnen werden:

- Im Gegensatz zu einer Elementfassade mit einer konventionellen Jalousie ergibt sich durch die seitliche Anordnung des Sammelkanals eine eingeschränkte Transparenz der Fassade (Innenraumansicht)
- In der Außenansicht eines Fassadenelements wurden verschiedene Gestaltungs- und Anpassungsmöglichkeiten identifiziert und dargestellt:
 - a) Gestaltung der äußeren Deckscheibe, beispielsweise durch farbige, opake Bedruckung. Parkposition der Lamellen und Sammelkanal können versteckt werden, klare Unterscheidung in transparente und opake Bereiche,
 - b) Verblendung von Parkposition der Lamellen und Sammelkanal bei transparenter äußerer Deckscheibe. Insgesamt transparentere Erscheinung von außen,
 - c) Parkposition der Lamellen bleibt sichtbar, Rahmenelement mit Sammelkanal und vorgelagerten Lamellen. Passepartoutartige Anordnung der Schichten innerhalb des Fassadenelements, transparente Erscheinung und gute Tiefenwirkung der Fassade von außen (bevorzugte Variante für die Weiterentwicklung).

- Die Fassadenelemente mit solarthermischer Jalousie sind als geschlossene Einheiten zu betrachten. Durch die Kombination mit Fassadenelementen mit Lüftungsfunktion oder Einlassschlitzen in den horizontalen Elementstößen kann dennoch eine natürliche Lüftung innerhalb der Gesamtfassade erzielt werden. Diese Kombination kann auch gestalterisch flexibel genutzt werden, was in verschiedenen Darstellungen nachgewiesen wurde.
- Die einzelnen Lamellen innerhalb eines Elements erscheinen in der Ansichtsbreite (Dicke) verhältnismäßig stark, im Detail sollte eine Verfeinerung, insbesondere bei der Ausbildung der längsseitigen Kanten zur Verbesserung der optischen Qualität angestrebt werden.

3.1.2.5 Visualisierung

Die Entwicklungsschritte der beiden Konzepte wurden während der Projektlaufzeit fortlaufend mit Hilfe von Visualisierungen aufbereitet. Diese dienten zum einen zum internen Austausch sowie zur Überprüfung der architektonischen Umsetzung der Konzepte in der Fassade. Darüber hinaus spielten diese grafischen Darstellungen der STJ und des STSK im Kontext Fassade und Architektur eine wichtige Rolle, um externe Stakeholder auf Messen, Tagungen etc. an das Thema heranzuführen und mögliche Ausführungen aufzuzeigen.

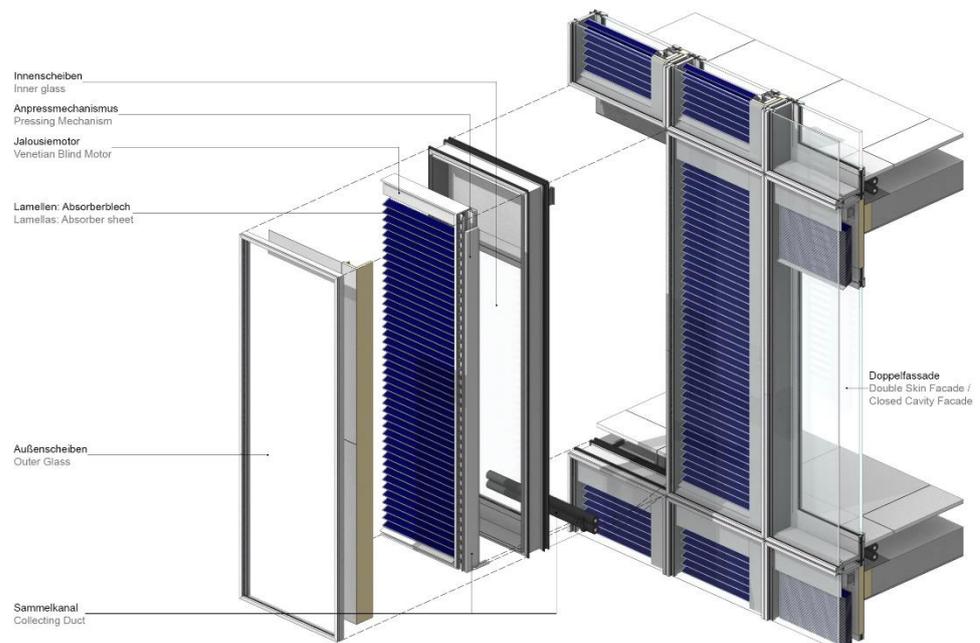


Abbildung 14: Solarthermische Jalousie als integraler Bestandteil einer elementierten Doppelfassade.

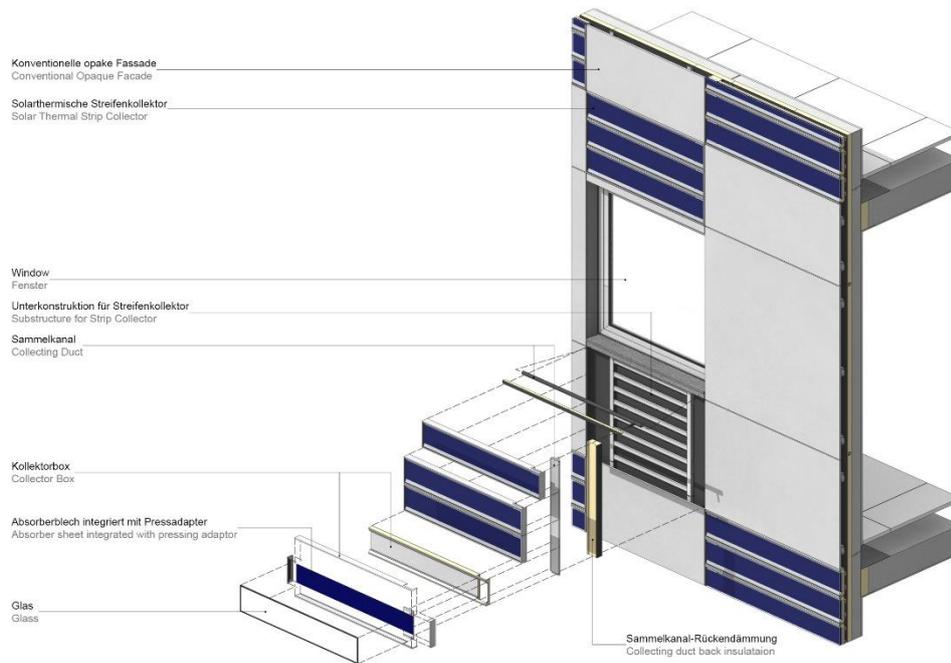


Abbildung 15: Solarthermischer Streifenkollektor als integraler Bestandteil einer vorgehängten-hinterlüfteten Fassade (VHF).



Abbildung 16: Visualisierung von STJ (links) und STSK (rechts) in exemplarischen Gebäudefassaden.

3.1.2.6 Gebäudetypologien und Anwendungsmöglichkeiten

Zusammen mit allen Projektpartnern wurden die zu untersuchenden Gebäudetypologien und Anwendungsmöglichkeiten konkretisiert und Referenzfälle definiert.

Für die solarthermische Jalousie (STJ) sind Gebäude mit folgenden Eigenschaften besonders gut geeignet:

- deutlicher Bedarf an Trinkwarmwasser
- Außenjalousie unerwünscht
- große transparente Gebäudehüllflächen

Die Entwicklung der solarthermischen Jalousie kann dabei zwei verschiedene Hauptziele verfolgen:

- a. Fokus hoher solarthermischer Ertrag

b. Fokus niedriger g-Wert

Als vielversprechender Fall für Hauptziel a wurde ein Hochhaus, das zumindest teilweise als Hotel genutzt wird (Trinkwarmwasserbedarf) oder an ein Nahwärmenetz angeschlossen ist, identifiziert. Die Referenzfälle für das Hotelhochhaus sind:

- das gleiche Hochhaus mit konventioneller Jalousie zwischen der Verglasung
- das gleiche Hochhaus mit konventionellen ST-Kollektoren an opaken Gebäudehüllflächen
- das gleiche Hochhaus mit stationären teiltransparenten ST-Kollektoren an opaken Gebäudehüllflächen

Als vielversprechender Fall für Hauptziel b wurde ein Bürohochhaus mit solarer Entfeuchtung oder mit Anschluss an ein Nahwärmenetz identifiziert. Die Referenzfälle für das Bürohochhaus sind:

- das gleiche Hochhaus mit konventioneller Jalousie zwischen der Verglasung
- das gleiche Hochhaus mit besserer Sonnenschutzverglasung und konventioneller Jalousie zwischen der Verglasung
- das gleiche Hochhaus mit weniger transparentem Anteil an der Gebäudehülle und konventioneller Jalousie zwischen der Verglasung

Für den Streifenkollektor sind Gebäude mit folgenden Eigenschaften gut geeignet:

- deutlicher Bedarf an Trinkwarmwasser, z. B.:
 - Einfamilienhäuser, Mehrfamilienhäuser, Hotels, Krankenhäuser, Sportanlagen
- Fokus Fassade
- Fokus Wärmedämmverbundsystem (WDVS) oder vorgehängte hinterlüftete Fassade (VHF)

Die Entwicklungshauptrichtung ist für den Streifenkollektor ein gutes Preis-Leistungsverhältnis und zu einem späteren Zeitpunkt weitere Variationen. Als exemplarischer Anwendungsfall wird eine Mehrfamilienhaussanierung, dessen Südfassade mit Streifenkollektoren ausgestattet wird, verwendet. Die Referenzfälle für den exemplarischen Anwendungsfall der Mehrfamilienhaussanierung sind:

- das gleiche Mehrfamilienhaus mit konventioneller WDVS/VHF-Fassade
- das gleiche Mehrfamilienhaus mit konventionellen ST-Kollektoren an den opaken Fassadenflächen, die den gleichen solarthermischen Ertrag liefern

das gleiche Mehrfamilienhaus mit konventionellen ST-Kollektoren an den opaken Dachflächen, die den gleichen solarthermischen Ertrag liefern

3.1.2.7 Bauprozesse & Arbeitsschritte - Montage des Streifenkollektors - Praxistauglichkeit

Das KomZet begleitete die Entwicklung des Streifenkollektors aus Sicht des Handwerks, v. a. der Stuckateure.

Der Streifenkollektor konnte nicht wie ursprünglich geplant in ein WDVS integriert werden. Hier wären die Montageaufwendungen extrem erhöht und die Schnittstellen nur mit hohem Aufwand so zu lösen, dass die Fassadenkonstruktion vor allem schlagregendicht ist. Aus diesem Grund hat man sich im Laufe des Projektes dafür entschieden, den

Streifenkollektor in eine vorgehängte hinterlüftete Fassade (VHF) zu integrieren. Die VHF wird bisher kaum vom klassischen Handwerker eingesetzt, da die Konstruktion vor allem bei größeren Gebäuden über vier Stockwerke verbaut wird. Die Ausführung wird dort vom industriell geprägten Fassadenbauer ausgeführt.

Im typischen Ein- und Zweifamilienhaus sowie im Mehrfamilienhaus wird die VHF bisher selten eingesetzt. Dies ändert sich gerade, da durch die Diskussion um das EPS, das klassische WDVS, in Verruf gekommen ist und so nach Alternativen gesucht wird.

Die Vorteile einer VHF liegen zum einen bei der bauphysikalischen Trennung der Dämmebene von der Wetterschale. Diese Konstruktion wird in Deutschland immer mit dem nichtbrennbaren Dämmstoff Mineralwolle ausgeführt. Der Dämmstoff und auch die gesamte Fassade werden nur mechanisch befestigt, so dass eine Demontage und Trennung der Materialien für eine nachhaltige Wiederverwertung besser geeignet ist. Der Rückbau kann sortenrein erfolgen, da keine Klebeverbindungen verwendet werden. Die eigentliche Fassadenverkleidung kann sehr vielfältig sein, von einer verputzten Ausführung oder als Glas, Keramik oder sogar Metallfassade ist alles möglich.

Als erster Schritt wurden vom KomZet die Ausbildungsmeister auf die Besonderheiten der VHF geschult und eingewiesen. Das Ziel ist, im Rahmen einer Zusatzqualifikation die VHF in die Gesellenausbildung zu integrieren. Diese Zusatzqualifikation wird jedoch gleich so entwickelt, dass sie auch im Weiterbildungsbereich als Fortbildungskurs eingesetzt werden kann. Diese Ausbildungsinhalte würden somit die Grundlage liefern, um den Streifenkollektor fachmännisch mechanisch an der Fassade zu montieren.

Die Ausbildungsmeister haben nach ihrer Grundschulung über die VHF gemeinsam geplant, wie der Arbeitsprozess am sinnvollsten aussehen muss, wenn in die VHF ein Streifenkollektor verbaut werden soll. Wichtige Punkte hierbei sind die Montage des Sammelkanals, der mit der Unterkonstruktion geplant und gebaut werden muss, da durch ihn die Lage und fertige Oberfläche des Kollektors bereits festgelegt werden muss. Der Kollektor muss dann hydraulisch abgedrückt werden, um zu prüfen, ob dieser dicht ist. Dies kann durch den Stuckateurbetrieb über ein Luftabdrückgerät erfolgen oder der Heizungsbauer übernimmt diese Aufgabe. Zudem wird die Fassade mit Mineralwolle gedämmt. Der Kollektor wird dann mit der eigentlichen Fassadenbekleidung montiert. Eine Hinterlüftung der Fassadenbekleidung muss sichergestellt werden. Deshalb ist oberhalb und unterhalb des Kollektors eine Be- und Entlüftung, da der Kollektor selbst nicht hinterströmt wird, um eine höhere Energieeffizienz zu erreichen.

Die detaillierten Ergebnisse aus Sicht des Handwerks, die aus der Umsetzung der Demonstrationsfassade des Streifenkollektors bei DAW gewonnen wurden, sind in einem separaten Bericht vom KomZet im Anhang „Praxisbericht vom Kompetenzzentrum für Ausbau und Fassade für architektonisch integrierte Fassadenkollektoren im Projekt ArKol“ zu finden.

3.1.2.8 Installationsleitfaden – Solarthermische Jalousie

Aufgrund der Vielzahl der auf dem Markt anzutreffenden Fassadenausführungen bedarf es für die STJ ein Installationskonzept, welches an unterschiedliche Bau- und Installationssysteme anpassbar ist. Die grundlegenden Installationsszenarien, die unter Berücksichtigung der Randbedingungen und Befestigungskomponenten untersucht werden, sind:

- Szenario 1: Die STJ wird vor Ort in ein Fassadensystem eingebaut, das eine ausreichende Tragstruktur zum Aufnehmen und Positionieren von STJ-Bauteilen bietet.

- Szenario 2: Die STJ ist eine vorgefertigte Einheit, die sich selbst trägt und in einem Fassadensystem installiert wird, das nur Befestigungspunkte bietet.

Szenario 1 dient hauptsächlich für die Anwendung von STJ in Kombination mit Fensterelementen (oder Kastenfenstern) in einer Lochfassade sowie für Pfosten-Riegel-Fassaden wie z. B. mehrgeschossige, belüftete Doppelfassaden (vgl. Abbildung 17). In dieser Situation wird die STJ an der vorhandenen Tragstruktur, die die Komponenten der STJ strukturell stützen, auf der Baustelle installiert. Während der Installation benötigt die STJ temporäre Stütz-/Transportsicherungen – z. B. um alle STJ-Komponenten während des Transports und der Montage in Position zu halten. Die temporären Elemente werden entfernt, wenn die STJ an der Primärstruktur angebracht und justiert wurde. Diese Methode würde einen langen Installationsprozess vor Ort erfordern. Je nach Wetter und Standort kann die Installation daher kostspielig und fehleranfällig werden.

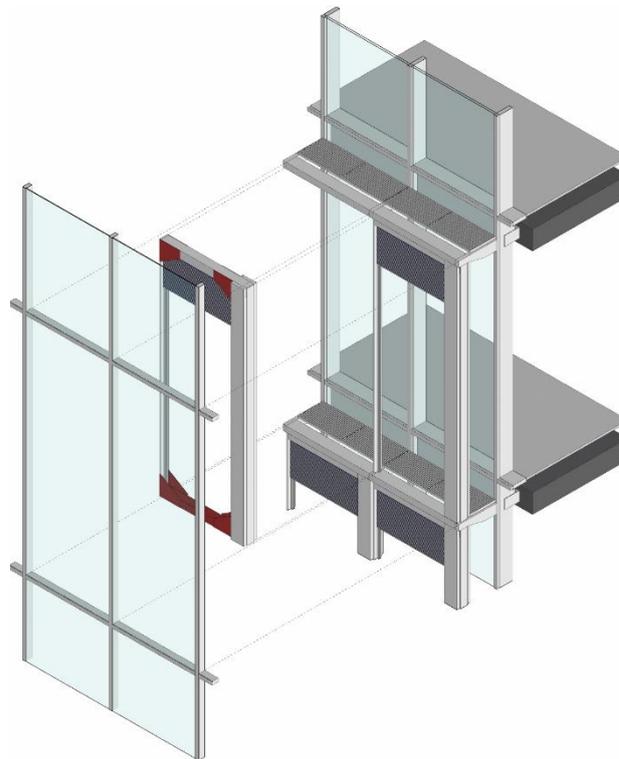


Abbildung 17: STJ-Installation entsprechend Szenario 1 in einer Pfosten-Riegel Doppelfassade.

In Szenario 2 wird die STJ selbst mit einem starren Rahmen als eigenständige Einheit gefertigt und -liefert, die zu einer vorhandenen Fassade oder als integraler Bestandteil eines einheitlichen Fassadensystems hinzugefügt werden kann. In diesem Szenario wird die STJ in der Werkstatt komplett montiert, um dann auf die Baustelle geliefert und am Gebäude montiert zu werden. Diese Methode ermöglicht eine bessere Qualitätskontrolle, da der entscheidende Prozess in einer kontrollierten Umgebung durchgeführt wird, wodurch der Installationsprozess vor Ort verkürzt wird.

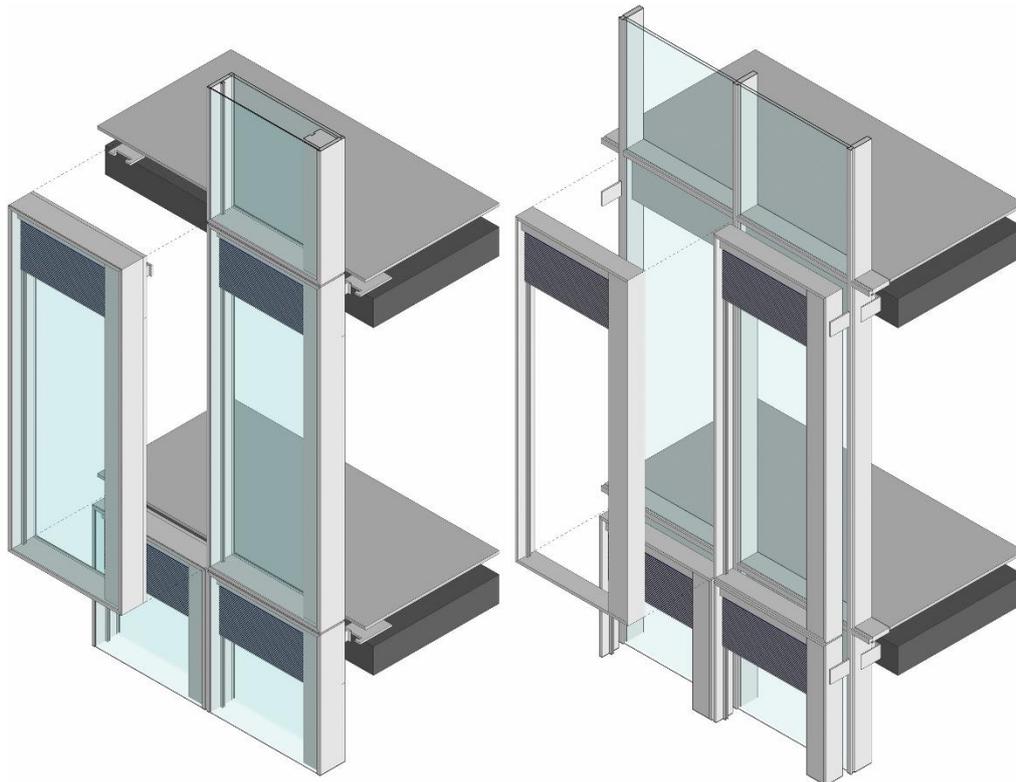


Abbildung 18: STJ-Installation entsprechend Szenario 2 als Teil einer elementierten Doppelfassade (links) und als eigenständiges Rahmenelement an einer vorhandenen Element- oder Pfosten-Riegel-Fassade (rechts).

Wie bei jedem Bauprozess müssen zuerst die Fassade und andere Außenflächen fertiggestellt werden, bevor mit dem Innenausbau inkl. Haustechnik begonnen werden kann. Die Installation der STJ muss als Teil beider Prozesse betrachtet werden: Fassadenbau sowie Haustechnikinstallation. Nach der Montage als Teil der Fassade muss die STJ von einem Anlagenbauer überprüft werden, der die hydraulischen Vor- und Rücklaufleitungen des Solarthermie-Systems überprüft und eine Dichtheitsprüfung durchführt. Nach dem Test müssen die Rohre abgedichtet werden, wenn die Installation der Haustechnik noch nicht begonnen hat. Sobald die Gebäudehülle vollständig geschlossen ist und der Innenausbau beginnt, kann die STJ an die Haustechnik angeschlossen und in Betrieb genommen werden.

3.1.3 Entwicklung der Kollektoren und Einzelkomponenten und Vermessung von Testmustern

Dieses Kapitel umfasst die Konzeptentwicklung der Einzelkomponenten, Testfunktionalitäten und die Entwicklung der beiden solarthermischen Fassadenkollektoren, sowie deren Vermessung. Dabei wurde durchgehend darauf geachtet, dass auch künftige Fertigungsstrategien (z. B. Vorfertigungsgrad) bereits mitgedacht wurden.

3.1.3.1 Abschätzungen der Technologien

Abschätzungen der maximalen Temperaturen der Wärmdämmung für den Streifenkollektor

Die maximalen Dämmtemperaturen treten im Kollektor an zwei Stellen auf: am Sammler, wo die Dämmung direkt auf dem Fluidkanal aufliegt und hinter dem Absorber. Erstere ist dabei stark von der Geometrie des Kollektors abhängig, weshalb eine detaillierte Analyse zum jetzigen Entwicklungszeitpunkt nicht sinnvoll erscheint. Kommen nicht-abschaltende Heat-Pipes zum Einsatz, kann vereinfacht die maximale Absorbertemperatur auch am Sammelkanal angenommen werden.

Zur Abschätzung der Stagnationstemperatur des Streifenkollektors hinter dem Absorber wurden die Maximaltemperaturen in einem 2D-symmetrischen Querschnitt durch den Kanal mittels eines einfachen FEM-Modells in Comsol untersucht (s. Abbildung 19). Es wurden folgende Randbedingungen angenommen:

Geometrische Randbedingungen		Physikalische Randbedingungen	
Absorberbreite	156 mm	Einstrahlung	900 W/m ²
Absorberdicke	1 mm	U-Wert für Verluste nach vorne	15,3 W/(m ² K)
Dicke der Luftspalte	20 mm	U-Wert für Verluste nach hinten	15,3 W/(m ² K)
Dämmstärke	50 mm	Umgebungstemperatur	30 °C
Glasdicke	4 mm		

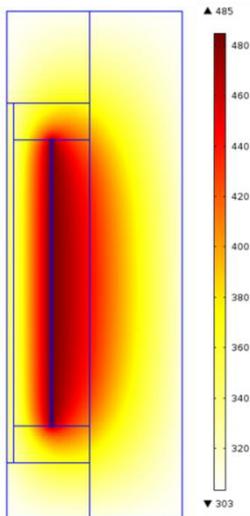


Abbildung 19: Temperaturprofil im Querschnitt (Temperatur in Kelvin)

Für einen konventionellen Kollektor mit einer 5 cm dicken rückseitigen Wärmedämmung würden sich folgende Maximaltemperaturen ergeben:

- am Absorber: $T = 485 \text{ K} = 212 \text{ °C}$
- Maximaltemperatur am Dämmmaterial: $T = 444 \text{ K} = 171 \text{ °C}$
- Maximaltemperatur im Glas: $T = 341 \text{ K} = 68 \text{ °C}$

Da die Wärmedämmung bei einer Fassadeninstallation jedoch höher ist, falls der Kollektor direkt von weiterer Wärmedämmung umgeben ist (Annahme: Einbettung in Wärmedämmverbundsystem), wurden darüber hinaus Variationsberechnungen mit unterschiedlichen Dicken der Wärmedämmung durchgeführt (siehe Abbildung 20).

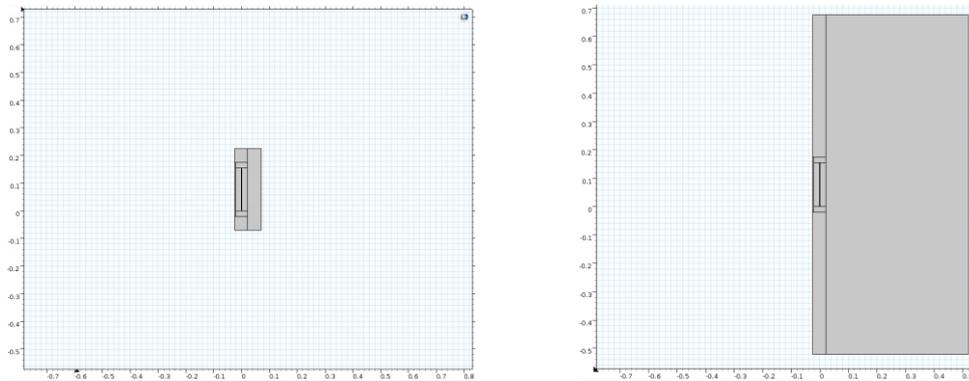


Abbildung 20: Variation der Dämmstärke: 50 mm (links) → 500 mm (rechts).

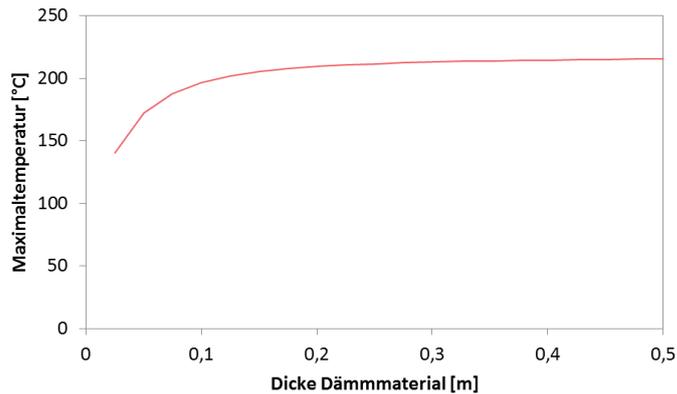


Abbildung 21: Abhängigkeit der Maximaltemperatur von der Dicke des Dämmmaterials.

Die Ergebnisse in Abbildung 21 und Tabelle 1 machen deutlich, dass die Maximaltemperatur an der Wärmedämmung gegenüber jener eines Standardkollektors noch einmal deutlich steigt; so liegt sie bei z. B. 15 cm Wärmedämmung bei 205 °C statt bei 172 °C bei 5 cm und damit 33 K höher. Die Temperaturbelastung des Wärmedämmmaterials ist demnach bei einer Fassadeninstallation bei der angenommenen Einstrahlung deutlich höher als bei einem konventionellen Kollektor in Aufdachmontage. Allerdings ist zu bedenken, dass die Sonne zu Zeiten hoher Außentemperaturen, d. h. im Sommer, hoch steht und somit durch den großen Sonnenhöhenwinkel die Einstrahlung auf die Fassade geringer ist als auf dem Dach. Insofern handelt es sich hier um eine konservative Betrachtung.

Tabelle 1: Abhängigkeit der Maximaltemperatur von der Dicke des Dämmmaterials

Dicke Dämmmaterial [m]	Wärmeübergangskoeffizient h [W/m²K]	Maximaltemperatur [°C]
0.025	1.48	140.37
0.05	0.74	172.21
0.075	0.49	187.7
0.1	0.37	196.33
0.125	0.30	201.65
0.15	0.25	205.13
0.175	0.21	207.56
0.2	0.19	209.3
0.225	0.16	210.56
0.25	0.15	211.57
0.275	0.13	212.34
0.3	0.12	212.96
0.325	0.11	213.45
0.35	0.11	213.86
0.375	0.10	214.24
0.4	0.09	214.53
0.425	0.09	214.75
0.45	0.08	214.98
0.475	0.08	215.15
0.5	0.07	215.29

Sensitivitätsanalyse hinsichtlich der thermischen Widerstände für den Streifenkollektor

Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens

Im Entwicklungsprozess von neuen Kollektoren kommt früher oder später die Frage auf: Welche Effizienz wird der zu entwickelnde Kollektor haben? Und welche Jahreserträge werden erwartet? Hierfür ist eine Abschätzung hilfreich, um eine quantitative Aussage zu treffen, welche Auswirkung eine konstruktive Änderung der optischen und thermischen Design-Parameter auf den Ertrag hat.

Im Streifenkollektor sind die zwei wichtigsten Auslegungswiderstände nach Abbildung 22:

- $R_{\text{AbsorberFluid}}$: der Widerstand zwischen der mittlere Absorbertemperatur T_{absorber} und der mittleren Temperatur des Wärmeübertragungsfluids T_m . Dieser Widerstand repräsentiert die Güte des Absorberaufbaus.
- R_{Loss} : der Verlustwiderstand zwischen Absorber und der Umgebungstemperatur T_a . Dieser Widerstand repräsentiert die Güte der thermischen Dämmung.

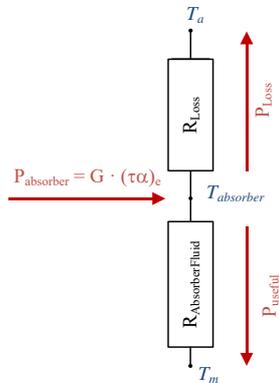


Abbildung 22: Thermisches Ersatzschaltbild des Dreiknoten-Modells eines Kollektors.

Als zentraler optischer Parameter geht das effektive Transmissions-Absorptions-Produkt $(\tau\alpha)_e$ in das Modell ein. Dieses wird in der Sensitivitätsanalyse allerdings nicht berücksichtigt.

Um den Zusammenhang der zwei Widerstände auf die zu erwartenden Jahreserträge zu untersuchen, wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Dabei kam zunächst die thermische Kollektormodellierung mittels des Kollektormodells in Modelica zum Einsatz. Anschließend wurden mit dem Excel-basierten Rechner ScenoCalc Bruttojahresenergieerträge für die einzelnen modellierten Kollektoren berechnet.

Das Vorgehen zur Berechnung der Bruttoerträge in Abhängigkeit der variierten Parameter ist in Abbildung 23 dargestellt. Innerhalb des Parameterraums wurden 30 Kombinationen für R_{Loss} und 46 Kombination für R_{AbsFluid} simuliert. Insgesamt wurden somit 1380 Kollektoren im Kollektormodell simuliert und anschließend in ScenoCalc die Erträge ausgewertet. Um die Temperaturabhängigkeit der thermischen Verluste zu reproduzieren, wurde R_{Loss} nicht exogen variiert, sondern stattdessen über eine Variation der drei Parameter d_{Gap} , ε und $d_{\text{Insulation}}$.

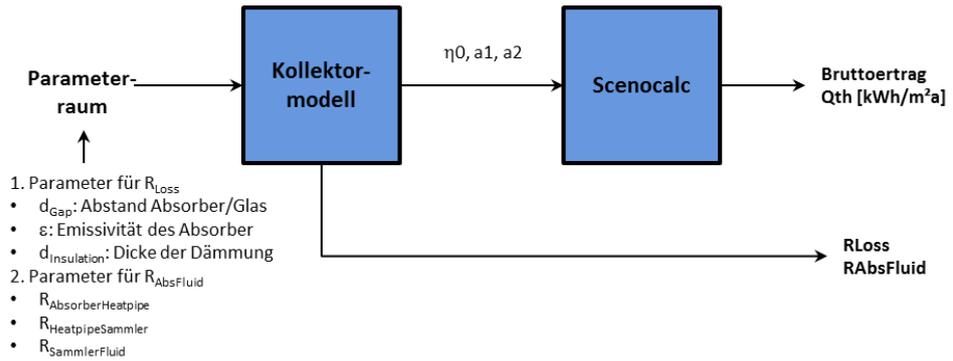


Abbildung 23: Methodik für die Berechnung der Bruttoerträge in Abhängigkeit der Widerstände R_{Loss} und $R_{AbsFluid}$.

Im Modelica-Kollektormodell wurde R_{Loss} folgendermaßen modelliert: Im Kollektor treten konduktive, konvektive und radiative Verluste auf. Diese werden basierend auf physikalischen Eintrittsparametern berechnet. Die Formeln der Einzelwiderstände (s. Abbildung 24) können (Lämmle et al. 2016) entnommen werden.

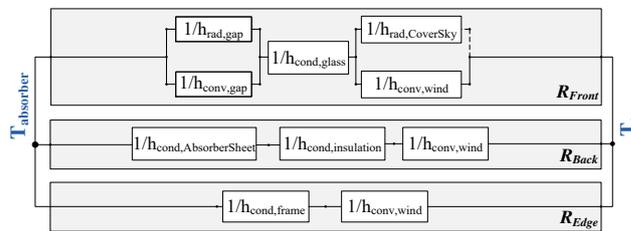


Abbildung 24: Thermisches Widerstandsnetzwerk für die Berechnung von R_{Loss} .

Der thermische Widerstand zwischen Absorber und Fluid $R_{AbsFluid}$ wird durch drei Einzelwiderstände entsprechend Abbildung 25 berechnet.

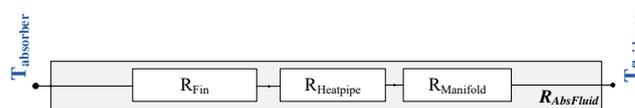


Abbildung 25: Thermisches Widerstandsnetzwerk für die Berechnung von $R_{AbsFluid}$.

Eine ausführliche Dokumentation der Modellparameter kann bei Bedarf zur Verfügung gestellt werden. Die wichtigsten Annahmen sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Zusammenfassung der Modellannahmen in Modelica für die Kollektorsimulation

Parameter	Variable	Value
Effektives Transmission-Absorptions-Produkt	$(\tau\alpha)_e$	0.91
Absorber Breite x Länge	$W \times L$	0.156 x 1 m ²
Aperturfläche	A_{aper}	0.156 m ²
Einstrahlung	G	1000 W/m ²
Umgebungstemperatur	$T_{ambient}$	25 °C

Mit ScenoCalc werden Bruttojahreserträge für einen Standort bei einer konstanten mittleren Fluidtemperatur berechnet. Das Tool ist frei zugänglich und kann in Excel ausgeführt werden. Die Berechnungsmethodik ist folgendermaßen: Als Input dienen die nor-

mierten Standardeffizienzparameter eines Kollektors. Sobald der Wirkungsgrad des Kollektors in jedem Zeitschritt positiv ist ($\eta > 0$), wird der Ertrag des jeweiligen Zeitschritts einem „unendlichen“ Speicher zugeführt und über das gesamte Jahr kumuliert. ScenoCalc wird als normiertes Berechnungstool für jeden Kollektor verwendet, der ein Solar-Keymark-Zertifikat erhält. Dabei werden für vier Standorte bei jeweils drei Temperaturen T_m die Bruttojahreserträge angegeben.

Annual collector output kWh												
Location and collector temperature (T_m)												
Collector name	Athens			Davos			Stockholm			Würzburg		
	25°C	50°C	75°C	25°C	50°C	75°C	25°C	50°C	75°C	25°C	50°C	75°C
Collector type	3 399	2 478	1 643	2 806	1 961	1 227	1 923	1 283	784	2 086	1 386	832

Abbildung 26: Auszug aus der zweiten Seite des Solar-Keymark-Datenblatts.

Die deutsche Förderung für Kollektoren des Bundesamts für Wirtschaft und Ausführungkontrolle (BAFA) schreibt im Rahmen des Marktanzreizprogramms (MAP), neben anderen Voraussetzungen, eine Solar-Keymark-Zertifizierung sowie ein Mindestenergieertrag von 525 kWh/m²a vor.

Dieser spezifische Jahresertrag Q_{th} wird aus dem zweiten Blatt des Solar-Keymark-Datenblatts folgendermaßen berechnet:

$$Q_{th} = \frac{0.38 Q_{25\text{ }^\circ\text{C}} + 0.71 Q_{50\text{ }^\circ\text{C}}}{A_{aperture}} - 1.09 c_{eff} \quad (1)$$

mit $Q_{25\text{ }^\circ\text{C}}$ dem Ertrag für den Standort Würzburg bei 25 °C in kWh, $Q_{50\text{ }^\circ\text{C}}$ dem Ertrag für den Standort Würzburg bei 50 °C in kWh, $A_{aperture}$ der Aperturfläche in m², und c_{eff} der flächenbezogenen effektiven Wärmekapazität in kJ/m²K.

Für die Berechnung in ScenoCalc wurden folgende Erfahrungswerte angenommen:

Tabelle 3: Annahmen für die Simulation in Scenocalc

Parameter	Variable	Value
IAM-Konstante	b_0	0.1
Effektive Wärmekapazität	c_{eff}	10 kJ/m ² K
Aperturfläche (für die Berechnung spezifischer Erträge)	A_{aper}	1 m ²

Mithilfe eines Entwicklungsnomogramms kann innerhalb des Entwicklungsprozesses zu jeder Situation überprüft werden, welchen Einfluss eine Änderung der beiden Widerstände R_{Loss} und $R_{AbsFluid}$ auf den Bruttojahresertrag hat. Dafür wurden zwei Auswertungen vorgenommen:

1. Für die geplante Fassadenanwendung am Standort Würzburg mit einem Neigungswinkel 90°
2. Für eine Vergleichbarkeit mit verfügbaren Kollektoren zusätzlich als Referenz mit Standort Würzburg, Neigungswinkel 35°, südliche Ausrichtung

Der thermische Ertrag, berechnet aus ScenoCalc mittels der MAP-Gewichtung nach Gleichung 1 für Fassadenanwendung unter 90°, ist in Abbildung 27 dargestellt.

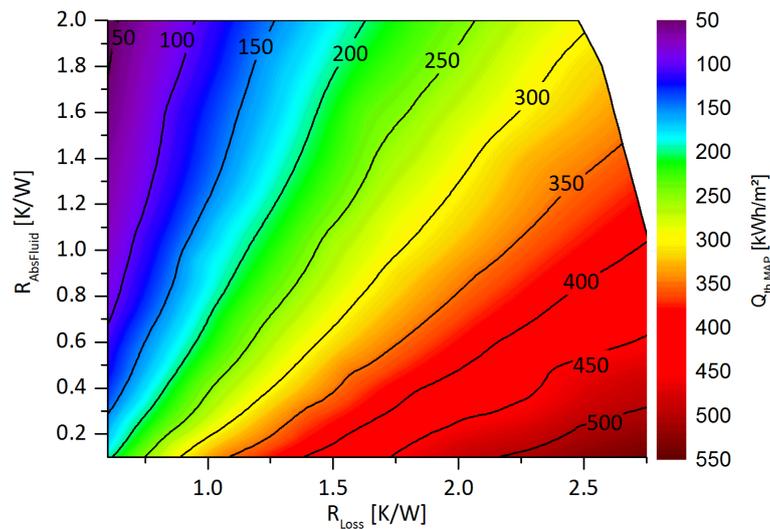


Abbildung 27: Nomogramm für die Fassadenanwendung. Thermischer Ertrag in Abhängig von R_{Loss} und $R_{AbsFluid}$

Beispielhaft soll ein Anwendungsszenario beschrieben werden:

Angenommen, die Widerstände der Absorber-Fluid-Strecke sind konstruktiv vorgegeben und folgendermaßen bestimmt worden:

$$R_{Fin}=0.08 \text{ K/W}, R_{HeatPipe} = 0.19 \text{ K/W}, R_{Manifold} = 0.22 \text{ K/W}$$

Damit ergibt sich ein $R_{AbsFluid}$ von

$$R_{AbsFluid} = R_{Fin} + R_{HeatPipe} + R_{Manifold} = 0.49 \text{ K/W}$$

Je nach Verlustwiderstand R_{Loss} können bei dieser Anbindung entsprechend Abbildung 27 thermische Erträge im Bereich 75 kWh/m^2 – 450 kWh/m^2 erwartet werden. Bei einem R_{Loss} von beispielsweise 2 K/W ergibt sich in diesem Beispiel ein Bruttoertrag von etwa 400 kWh/m^2 .

Die gleiche Auswertung wurde für eine geneigte Fläche von 35° durchgeführt. Diese Werte sind dadurch mit den Werten auf Seite 2 des Solar-Keymark-Datenblatts vergleichbar. Es sei allerdings darauf verwiesen, dass auf dem Solar-Keymark-Datenblatt die Erträge je Kollektor angegeben sind, im Diagramm hingegen spezifische Erträge bezogen auf die Aperturfläche.

Das Marktanzreizprogramm schreibt für förderfähige Kollektoren einen Mindestertrag von 525 kWh/m^2 vor, berechnet entsprechend Formel (1). Diese Linie ist in Abbildung 28 als blau gestrichelt dargestellt.

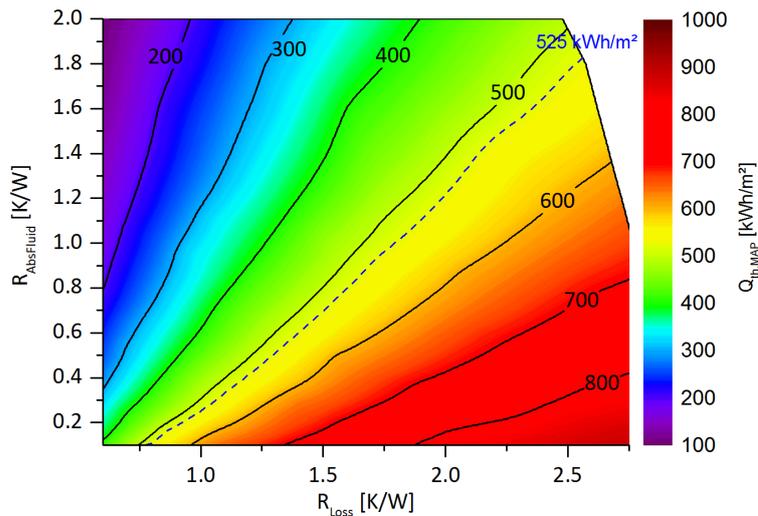


Abbildung 28: Nomogramm für geneigte Dachfläche. Thermischer Ertrag in Abhängig von R_{Loss} und $R_{AbsFluid}$

Erste Abschätzung der solarthermischen und Sonnenschutzfunktion der Solarthermischen Jalousie

Die Funktion der solarthermischen Jalousie als solarthermischer Kollektor und als Sonnenschutz wurde mit Hilfe eines thermischen Knotenmodells abgeschätzt, das in Abbildung 29 dargestellt ist. Es enthält Temperaturknoten (z. B. T_{int} , $T_{f,av}$, etc.) an den für die Wärmeübertragung relevanten Positionen. Alle Knoten sind über thermische Widerstände R1-R42 verbunden, die verwendeten Werte sind in Tabelle 4 zusammengefasst. Der Absorberblech-Temperaturknoten $T_{absorber}$, sowie die Glasscheiben ($T_{gl,int}$, $T_{gl,cav}$ & $T_{gl,ext}$) haben Wärmegewinne (Q_{abs} , Q_{a_gl3} , Q_{a_gl2} bzw. Q_{a_gl1}), die die absorbierte Sonneneinstrahlung repräsentieren. Die Absorption in anderen opaken Komponenten wie Blenden wurde für die erste Näherung vernachlässigt. Es gibt drei Wärmesenken im Knotenmodell:

- Wärme, die an das Fluid im Sammelrohr im Knoten $T_{f,av}$ übertragen wird und somit den solarthermischen Ertrag Q_{use} darstellt
- Wärme, die an die äußere Umgebungsluft übertragen wird T_{ext} als Q_{out} und an die Raumtemperatur T_{int} als Q_{in} .

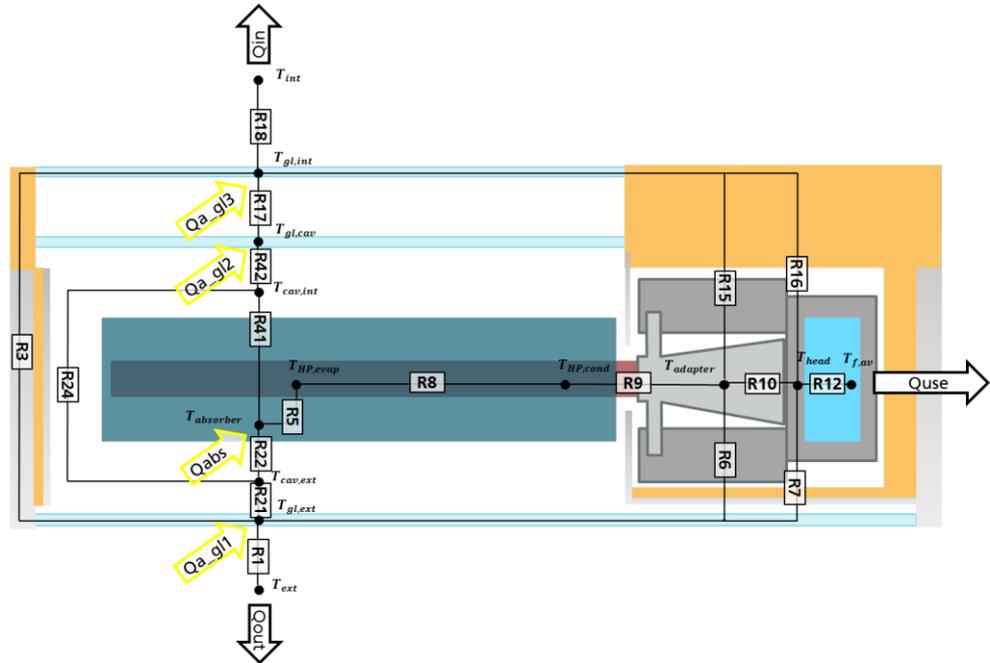


Abbildung 29: Schematische Zeichnung eines horizontalen Querschnitts eines STJ-Fassadenelements mit dem thermischen Knotennetzwerk, das für die erste Abschätzung der Performance verwendet wurde.

Tabelle 4: Werte für thermische Widerstände, die in der ersten Abschätzung verwendet wurden. Alle Werte in K/W.

Parameter	Wert	Parameter	Wert	Parameter	Wert
R1	0,4	R42	3,3	R10	0,3
R21	3,3	R5	0,1	R12	0,3
R22	3,3	R6	16,7	R15	16,7
R24	10,0	R7	33,3	R16	33,3
R3	10,0	R8	0,2	R17	6,0
R41	3,3	R9	0,2	R18	1,3

Für die Abschätzung wurde ein Schnitt durch das STJ-Fassadenelement von 100 mm Höhe verwendet, was in der Größenordnung einer typischen Lamellenbreite liegt. Das bedeutet, dass ein Abschnitt eine Lamelle enthält und die Werte für die thermischen Widerstände einer einzelnen Lamelle, eines Wärmerohrs und eines Adapters verwendet werden können. Temperaturunterschiede in unterschiedlichen Höhen innerhalb des Fassadenelements, zum Beispiel durch Luftkonvektion, werden in erster Näherung vernachlässigt. In detaillierteren Simulationsmodellen können sie mit Hilfe von Computational Fluid Dynamic (CFD)-Simulationen behandelt werden. Die Absorberfläche wurde mit 0,1 m² angenommen, d. h. 100 mm Breite gleich der Höhe des Querschnitts und 1 m Länge. Der verglaste, d. h. transparente Abschnitt des Fassadenelementes wurde auf 1 m gesetzt, was der Länge der Lamellen entspricht.

Die Werte für R1 und R18 sind von Wärmeübergangskoeffizienten abgeleitet, die aus (ISO 9050:2003-08) entnommen wurden ($h_1 = 23 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, $h_{18} = 8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$). Die Werte für R21 und R17 sind von typischen U-Werten für eine Einfach- und eine Doppelverglasung abgeleitet. Die Werte für R22, R41 und R42 wurden angenommen, um den kom-

binierten Konvektions- und Strahlungswärmedurchgang zu berücksichtigen. Der Strahlungswärmedurchgang ist jedoch gering, da der langwellige Emissionsgrad der STJ-Lamellen mit 0.05 angenommen wird. Der Wert für R24 wurde vor dem Hintergrund abgeschätzt, dass bei geschlossenen Lamellen nur ein geringer Wärmestrom durch die Luft zwischen den Lamellen zu erwarten ist. Die Werte für R5 und R8 wurden als typische Werte für Absorberlamellen und Heat-Pipes aus (Jack und Rockendorf 2013) übernommen.

Der thermische Gesamtwiderstand des Adapters R9 und der thermische Kontaktwiderstand R10 beschreibt den Wärmeübergang der schaltbaren thermischen Kopplung zwischen Heat-Pipe und Sammelkanal. Der thermische Widerstand des Adapters R9 zwischen Heat-Pipe-Kondensator und Kontaktfläche zum Sammelkanal wurde über die Wärmeleitfähigkeit für einen Aluminiumadapter abgeschätzt. Die Kontaktfläche zum Sammelrohr beträgt $A = t_a * w = 10 \text{ cm}^2$ bei einer Adapterdicke $t_a = 10 \text{ mm}$ und einer Adapterbreite $w = 100 \text{ mm}$. Zur Berechnung des thermischen Kontaktwiderstands R10 für koplanare Oberflächen werden die in (Bahrami et al. 2004) beschriebenen Formeln verwendet. Der thermische Kontaktwiderstand hängt hauptsächlich von der Anpresskraft zwischen den beiden Kontaktflächen und von Oberflächeneigenschaften wie der Oberflächenrauheit ab (siehe auch Abschnitt 3.1.3.7). Es wurde ein mittlere Wert für den thermischen Kontaktwiderstand $R10 = 0.3 \text{ K/W}$ angenommen.

Der Wert für R12, dem Wärmeübergang ins Fluid, wurde für ein rechteckiges Sammlerrohr auf der Grundlage von (VDI – Verein Deutscher Ingenieure 2013) berechnet. Für R3 wird ein Wert von 10 K/W angenommen und die Werte für R6, R7, R15 und R16 werden aus den Abmessungen und der Wärmeleitfähigkeit des Dämmmaterials abgeleitet.

Der Absorptionskoeffizient des Absorberblechs wird mit 95% als sehr hoch angenommen, während der Transmissionsgrad für den Fall geschlossener Lamellen auf 0% gesetzt wurde. Der Absorptionskoeffizient und der Transmissionsgrad der Außenverglasung werden mit 15% bzw. 80% angenommen, wobei eine Reflexion von 5% angenommen wird.

Basierend auf der Energiebilanz in jedem Temperaturknoten wurde der solarthermische Ertrag Q_{use} und der Wärmeeintrag ins Gebäude Q_{in} berechnet. Dies wurde in Excel unter Verwendung des Solvers umgesetzt. Der Kollektorwirkungsgrad wird als Verhältnis zwischen Q_{use} und der einfallenden Einstrahlung berechnet, die für einen klaren sonnigen Tag auf 1000 W/(m²K) festgelegt wurde. Der g-Wert wird als Verhältnis zwischen Q_{in} und einfallender Einstrahlung berechnet. Natürlich gibt es eine große Spanne von vernünftigen Eingabewerten, was zu einer hohen Unsicherheit dieser ersten Abschätzung führt.

Für $T_{\text{int}} = T_{\text{ext}} = T_{\text{f,av}} = 25^\circ\text{C}$ wurde ein Spitzenkollektorwirkungsgrad η_0 von 60% berechnet. Dieser Wert ist niedriger als bei einem typischen Flachkollektor, der z. B. 73% erreicht (DIN CERTCO 2015). Der g-Wert des STJ-Elements für diese Bedingung wurde mit 0,08 oder 8% ermittelt. In den Annahmen sind R10 und R12, d. h. der thermische Kontaktwiderstand der schaltbaren thermischen Kopplung und die Wärmeübertragung in das Fluid, die größten thermischen Widerstände zwischen dem Absorberknoten Tabs und dem Fluid $T_{\text{f,av}}$. Eine Erhöhung des Wärmeübergangs dieses Wärmepfades würde den Kollektorwirkungsgrad erhöhen und gleichzeitig den g-Wert senken. Angenommen, $R10 = R12 = 0,1 \text{ K/W}$ ergibt einen Kollektorwirkungsgrad von 67% und einen g-Wert von 5%.

3.1.3.2 Beschreibung der Messinfrastruktur

Heat-Pipe-Befüllanlage

Im Projekt wurde für die Herstellung eigener Heat-Pipe-Testkörper eine Vakuumanlage zur Heat-Pipe-Befüllung und Entgasung des Arbeitsfluids geplant und aufgebaut (s. Abbildung 30). Der Heat-Pipe-Behälter wird vor der Befüllung für mehrere Stunden evakuiert, wobei eine Heizschnur eine zusätzliche Temperaturerhöhung (Ausheizung) und damit leichtere Adsorption nicht-kondensierbarer Gase erlaubt. Um auch bei hohen Füllgraden und damit über das Arbeitsfluid eingebrachten hohen Mengen nicht-kondensierbarer Gase einen geringen Gehalt an nicht-kondensierbaren Gasen in der fertig hergestellten Heat-Pipe zu garantieren, wurde der Prozess des Freeze-Degassing implementiert. Hierbei wird die gewünschte Füllmenge an Arbeitsfluid mittels Flüssigstickstoff im Entgasungsbehälter der Anlage eingefroren und die darüber befindliche Gasmenge über die Vakuumpumpe abgezogen. Beim anschließenden Auftauen des Fluids stellt sich ein neues Gleichgewicht im Gasgehalt zwischen Flüssig- und Gasphase ein. Ein Teil des in der Flüssigphase enthaltenen nicht-kondensierbaren Gases geht in die Gasphase über. Wird der Zyklus von Einfrieren, Absaugen der Gasphase und Auftauen wiederholt, kann der Gehalt von nicht-kondensierbaren Gasen reduziert werden. Nach dem Entgasen wird das Arbeitsfluid in den Heat-Pipe-Behälter auskondensiert und dieser über einen Kaltschweißvorgang mit anschließendem Schweißvorgang verschlossen. Zur Qualitätskontrolle wird die hergestellte Heat-Pipe in einem eigens dafür konzipierten Schnelltest auf ihre Funktionsweise und den Inertgasgehalt getestet (s. Abbildung 31), bevor eine Vermessung im Heat-Pipe-Teststand erfolgt.

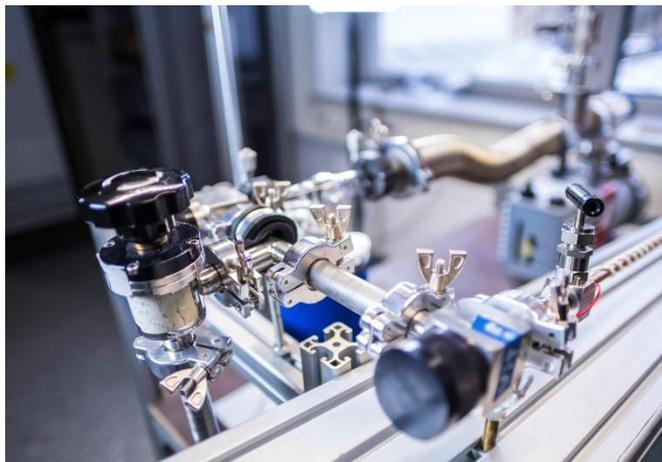


Abbildung 30: Heat-Pipe-Befüllanlage nach dem Vakuumverfahren am Fraunhofer ISE.



Abbildung 31: Schnelltest zur Funktionsprüfung der am Fraunhofer ISE hergestellten Heat-Pipes.

Heat-Pipe-Teststand

Im Rahmen des Projekts ArKol wurde der Heat-Pipe-Teststand für die Vermessung der Leistungsgrenzen horizontaler Heat-Pipes umgerüstet. Die zwei wichtigsten Eigenschaften des Teststands sind dabei die hohe erforderliche Neigungswinkelgenauigkeit, um auch kleine Abweichungen von der Horizontalen vermessen zu können, sowie die automatisierte und sichere Regelung und Abschaltung der Leistungsgrenztests, bei denen lokal hohe Temperaturen und starke Druckschwankungen auftreten können.

Der Aufbau des Heat-Pipe-Teststands zur Vermessung der Leistungsgrenze der Heat-Pipes ist in Abbildung 32 skizziert.

 Ablauf und Ergebnisse des
 Vorhabens

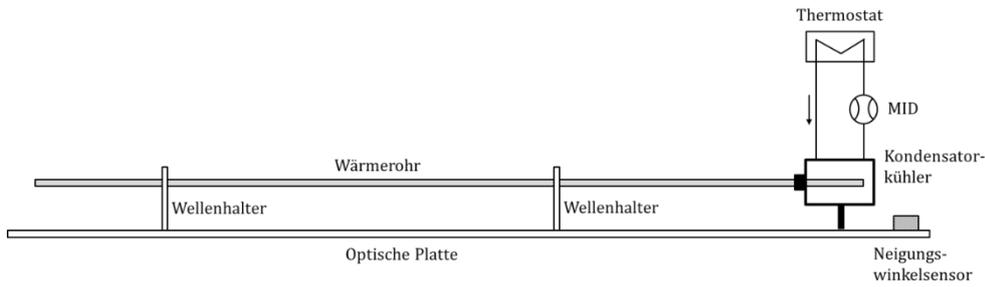


Abbildung 32: Schematische Skizze des Teststandaufbaus (Abbildung aus (Morawietz 2020)).

Die Halterung der Heat-Pipes erfolgt über zwei Wellenhalter aus Metall, in die ein Ring aus Silikon eingebracht ist, welcher der thermischen Isolation des Wärmerohrs von der Halterung dient. Die Wellenhalter sind auf einer optischen Platte installiert, auf der auch der Neigungswinkelsensor sitzt. Die optische Platte ist auf dem Gestell bzw. Unterboden mithilfe eines Rotationslasers ausgerichtet (s. Abbildung 33). Über einen Hubspindeltrieb wird die optische Platte in die gewünschte Neigung gebracht. Durch die hohe Genauigkeit der Wärmerohr-Halterung sowie des Neigungswinkelsensors kann eine Messunsicherheit des eingestellten Neigungswinkels von $\pm 0,037^\circ$ an der Position der Wellenhalter erzielt werden.

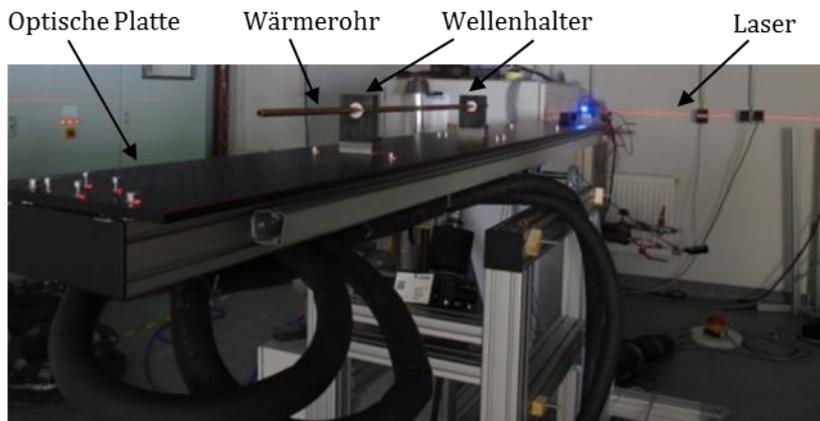


Abbildung 33: Ausrichtung der optischen Platte mithilfe eines Rotationslasers bei auf den Wellenhaltern gelagertem Wärmerohr. (Abbildung aus (Morawietz 2020))

Die Leistungszufuhr an den Wärmerohrverdampfer erfolgt über Heizschnüre. Die Wärme wird über einen Kondensatorkühler abgeführt, in den das Wärmerohr über eine Mutter eingeführt ist. Am Ein- und Austritt des Kondensatorkühlers wird die Temperatur des Kühlwassers gemessen, das von einem Thermostaten konditioniert und dessen Massenstrom von einem magnetisch induktiven Durchflussmesser (MID) erfasst wird. Der vom Wärmerohr übertragene Wärmestrom wird über eine Bilanzierung der dem Kühlwasser zugeführten Wärme gemessen. Die Temperatur des Wärmerohrs wird über mehrere Anlegefühler am Verdampfer und in der adiabaten Zone des Wärmerohrs erfasst.

Während der Leistungsgrenzttests wird die über die Heizschnur zugeführte elektrische Leistung schrittweise erhöht, während die Kühlwassereintrittstemperatur konstant gehalten wird. Bei Erreichen einer Maximaltemperatur von $200\text{ }^\circ\text{C}$ am Wärmerohr oder einer Maximaltemperatur der Heizschnur erfolgt zum Schutz der Infrastruktur eine auto-

matische Abschaltung der aufgeprägten elektrischen Leistung. Eine detaillierte Beschreibung des Messverfahrens sowie des Einflusses von Definition und Messmethodik der Leistungsgrenze auf das Messergebnis kann (Morawietz 2020) entnommen werden.

Sammlerteststand

Zur experimentellen Analyse des innovativen Sammelkanals (s. Kapitel 3.1.3.4) wurde ein Sammlerteststand entwickelt (s. Abbildung 34). Dieser wurde dabei so konzipiert, dass Druckverlust und Wärmeübergang unterschiedlich geformter Sammelkanalgeometrien vermessen werden können. Das Kühlwasser wird auf eine bestimmte Vorlauftemperatur eingestellt und durchströmt den Sammelkanal mit geringen bis hohen Durchflussmengen (30 – 120 kg/h). Die Wärmezufuhr einer oder mehrerer Heat-Pipes wird durch einen trocken angebundenen Heizblock (Aluminiumblock mit Heizstäben) simuliert. Über die Fluidseite wird der abgeführte Wärmestrom berechnet.



Abbildung 34: Sammlerteststand mit Rechteckssammelkanals (Referenz).

Kontaktwiderstandsteststand

Die schaltbare thermische Kopplung der solarthermischen Jalousie ist eine der wichtigsten Teilfunktionen zum Erreichen des Entwicklungsziels einer voll beweglichen und solarthermisch funktionalen STJ (vgl. Abschnitt 3.1.3.7). Um die Kontaktwiderstände dieser trockenen und schaltbaren thermischen Anbindung experimentell zu überprüfen, wurde ein Teststand entworfen (siehe Abbildung 35 und Abbildung 36). In diesem Teststand kann der Kontaktwiderstand zwischen einem Adapter und dem Sammelkanal bei verschiedenen Anpresskräften bestimmt werden. Der Teststand besteht aus einem Adapter, aufgeschlumpft auf einen Heat-Pipe-Dummy (Aluminium-Rohr), der von innen mit einer Heizpatrone beheizt wird. Der Adapter wird auf ein kurzes Stück des Sammelrohres gepresst. Das Sammelrohr wird an einen Kühlkreislauf angeschlossen. Die Anpressung erfolgt durch eine Schraube und die Kraft wird mittels Kraftmessdose gemessen. Im gesamten Aufbau werden Lufträume mit Isoliermaterial gedämmt, um die Wärmeverluste zu minimieren. In den Adapter, den Heat-Pipe-Dummy und auf die Oberfläche des Sammelrohres werden mehrere Temperatursensoren eingebracht, um mittels den Temperaturdifferenzen und der eingebrachten Leistung den Kontaktwiderstand zu bestimmen. Darüber hinaus könnten in dem Teststand verschiedene Adapterformen und Anpressrichtungen untersucht werden, was jedoch nicht durchgeführt wurde.

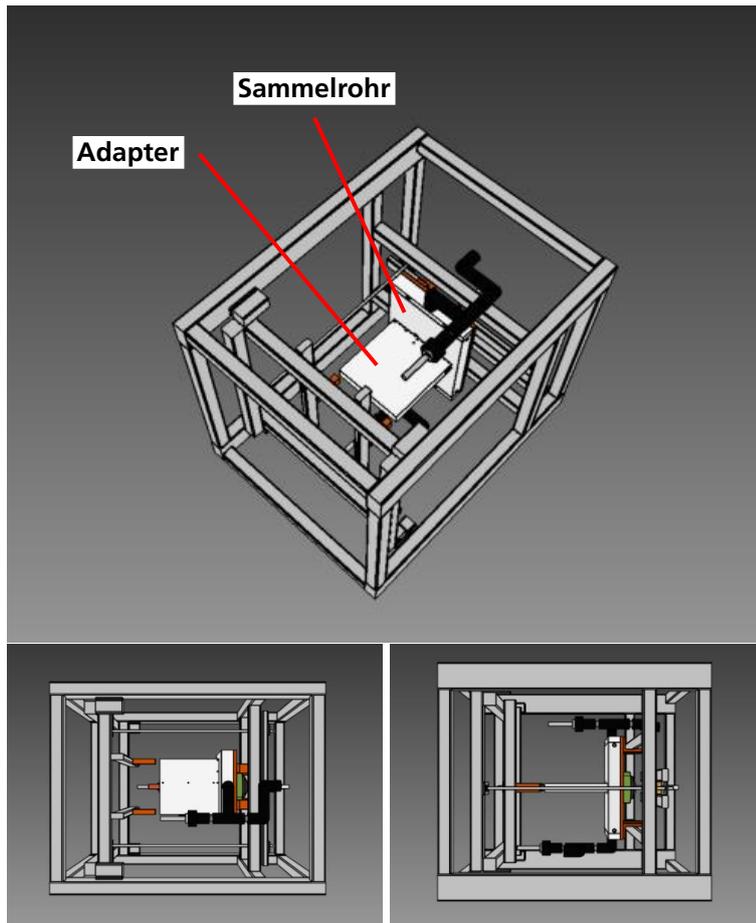


Abbildung 35: CAD-Modell des Teststands für thermische Messungen (unten-links: Draufsicht, unten-rechts: Seitenansicht)

Zur besseren Erfassung der Temperatur am Kontaktbereich zum Adapter kann außen auf den Sammelkanal ein zusätzliches Blech angesetzt werden, das rückseitig mit Temperatursensoren versehen ist. Es werden auch die Fluideingangs- und Ausgangstemperatur am Sammelkanal erfasst, was theoretisch eine Bilanzierung der im Fluid abgeführten Leistung ermöglicht. Auf Grund der nur geringen Erwärmung des Fluides bei nur einem Adapter und der damit verbundenen hohen Messunsicherheit wurde aus solch einer Bilanzierung aber keine hohe Aussagekraft erwartet und daher nicht durchgeführt.

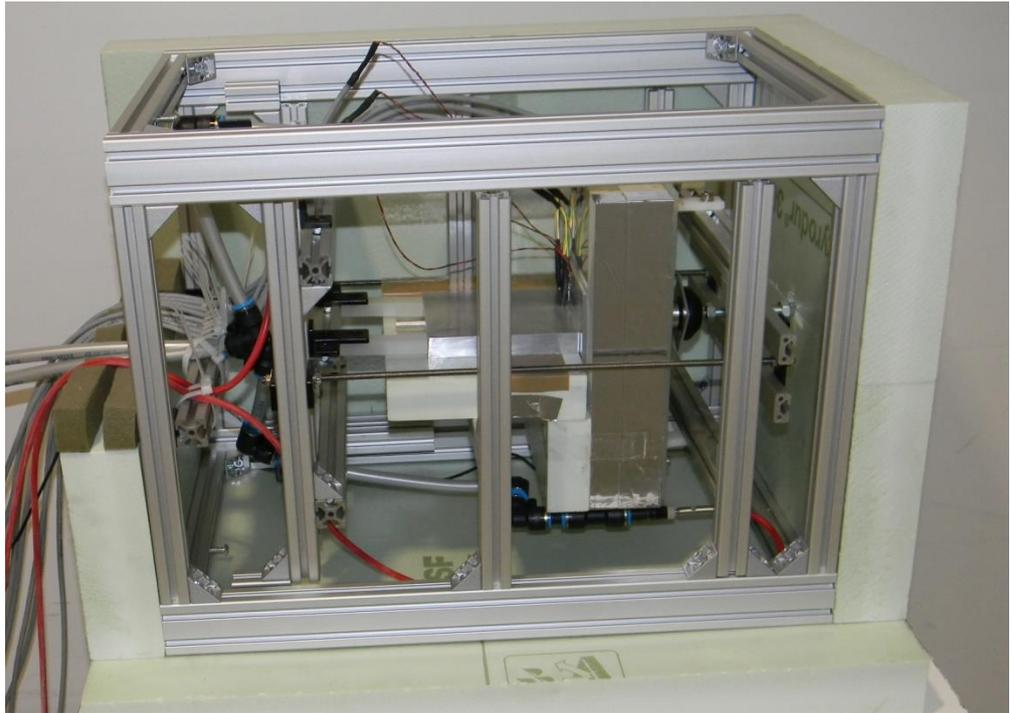


Abbildung 36: Prüfeinrichtung zur Bestimmung des thermischen Widerstandes im Adapter bzw. des Kontaktwiderstandes zum Sammelkanal. Zur besseren Ansicht ist die für die Versuche vorgesehene Dämmung um Adapter und Sammler sowie um die gesamte Testvorrichtung herum nur teilweise angebracht.

3.1.3.3 Analyse und Entwicklung von Heat-Pipe-Konzepten

3.1.3.3.1 Grundlagen und Auswahl der zu analysierenden Heat-Pipe-Konzepte

In solarthermischen Kollektoren vom Stand der Technik werden standardmäßig Zweiphasen-Thermosiphons (Heat-Pipes ohne Dochtstruktur) als Wärmerohre eingesetzt, die das Arbeitsfluid mithilfe der Schwerkraft vom Kondensator zum Verdampfer zurück transportieren. Die horizontale Ausrichtung ist folglich erschwert. Im Rahmen des Projekts ArKol wurden deshalb verschiedene Wärmerohrkonzpte für den winkelflexiblen Betrieb der Kollektoren in einer theoretischen Recherche beleuchtet, die im Folgenden zusammenfassend gegeben ist. Auf Grundlage der Recherche wurden vier Konzepte zur weiteren Analyse und Vermessung ausgewählt (s. Kapitel 3.1.3.3.2).

Kapillarkraftgetriebene Wärmerohre

Das kapillarkraftgetriebene Wärmerohr nutzt eine Dochtstruktur, um das Kondensat mithilfe der Kapillarkraft vom Kondensator zum Verdampfer rückzutransportieren. Damit ist das kapillarkraftgetriebene Wärmerohr im Betrieb nicht auf die Schwerkraft angewiesen. Die Integration einer Dochtstruktur führt gegenüber dem Zweiphasen-Thermosiphon jedoch zu einer aufwendigeren und kostenintensiveren Herstellung (Tsoi et al. 2011). Im Vergleich zum geneigt betriebenen Zweiphasen-Thermosiphon weisen kapillarkraftgetriebene Wärmerohre zudem einen erhöhten thermischen Widerstand und – bei Betrieb mit der Schwerkraft im Vergleich zum Zweiphasen-Thermosiphon – verringerte Leistungsgrenzen auf (Tsoi et al. 2011). Kapillarkraftgetriebene Wärmerohre werden seit Jahren erfolgreich eingesetzt (z. B. CPU-Kühlung im Satelliten oder im Laptop). Sie sind

Stand der Technik. Allerdings sind die Leistungsgrenzen beim Transport über „lange“ Strecken oder gegen die Schwerkraft gering.

Ablauf und Ergebnisse des
Vorhabens

Um die Dimensionen der Kapillarstruktur für den Rücktransport im Fassadenkollektor abzuschätzen, wurden beispielhafte Simulationen durchgeführt. Als Kapillarstruktur wurde eine Rillenstruktur gewählt. Abbildung 37 zeigt Berechnungsergebnisse der Leistungsgrenzen zweier unterschiedlicher Rillenstrukturen bei einer Wärmerohrlänge von 1 m und einem Durchmesser von 10 mm mit dem Arbeitsfluid Wasser für unterschiedliche Neigungswinkel. Es kommt die Berechnungsvorschrift des VDI Wärmeatlas zum Einsatz (VDI – Verein Deutscher Ingenieure 2013). Hierbei wurde eine Absorberbreite je Wärmerohr von 12 mm angenommen (Ansatz eines Heat-Pipe-Arraykonzeptes). Zum Vergleich sind die zu erwartenden Kollektor-Jahresleistungspunkte eines typischen Fassaden-Flachkollektors gegeben. Tabelle 5 gibt die geometrischen Charakteristika der beiden Rillenstrukturen wieder. Die Rillenstruktur 1 hat dabei einen deutlich kleineren Rillenquerschnitt als die Rillenstruktur 2. Dies führt dazu, dass die Rillenstruktur 1 auch bei positiven Winkeln (schwerkraftgetrieben) einen verhältnismäßig hohen Druckverlust und damit eine geringe Leistungsgrenze aufweist. Allerdings können auch bei negativen Winkeln von -1° noch Leistungen gegen die Schwerkraft übertragen werden (s. Abbildung 37 a). Die gröbere Rillenstruktur 2 weist einen weit geringeren Druckverlust und damit bei positiven Winkeln eine um Größenordnungen höhere Leistungsgrenze auf (s. Abbildung 37 b). Unter $-0,5^\circ$ wird jedoch praktisch keine Leistung mehr gegen die Schwerkraft übertragen. Die Kapillarkraft ist zu gering (s. Abbildung 37 c). Es wird deutlich, dass die Leistungsgrenzen von kapillarkraftbetriebenen Wärmerohren stark vom Neigungswinkel sowie der Auslegung der Kapillarstruktur abhängen. (Kaddar 2017) zeigte in seiner Bachelorarbeit dabei die hohe Sensitivität wichtiger, jedoch meist unbekannter Stoffparameter wie des Kontaktwinkels auf das Simulationsergebnis. Es wurde eine hohe Abweichung zwischen Simulation und Messdaten des untersuchten Rillen-Wärmerohrs erkannt. Da eine Angabe der Leistungsgrenzen kommerzieller Wärmerohre – wenn überhaupt – nur für vertikale Neigung und nicht temperaturabhängig vorliegt und die realitätsnahe Simulation wie dargelegt schwierig ist, ist eine Vermessung der Leistungsgrenzen unerlässlich, um die Eignung der Wärmerohre für ihren Einsatz in den zu entwickelnden Fassadenkollektoren zu prüfen.

Für den winkelflexiblen Einsatz erscheinen kapillarkraftgetriebene Wärmerohre die erste Wahl. Da im Rahmen des Projekts ArKol keine Optimierung und Eigenentwicklung der Dochtstruktur vorgesehen ist, werden kommerzielle kapillarkraftgetriebene Wärmerohre stichpunktartig auf ihre Leistungsgrenzen hin analysiert (s. Abschnitt 3.1.3.3.2).

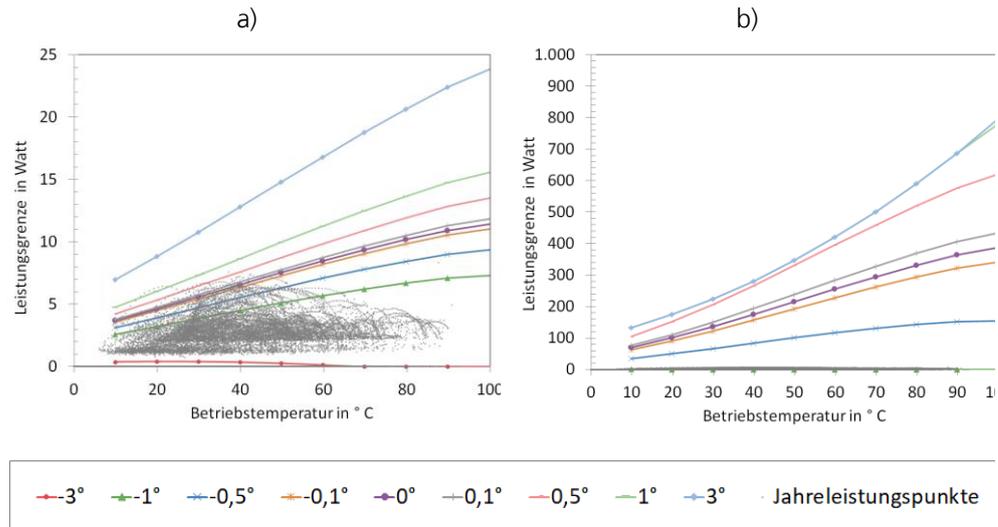


Tabelle 5: Geometrischen Charakteristika der Rillenstrukturen.

Parameter	Einheit	Rille 1	Rille 2
Rillenhöhe	mm	0,102	0,8
Rillenbreite	mm	0,152	0,5
Abstand zwischen den Rillen	mm	0,102	0,384
Resultierende Rillenzahl	-	121	30

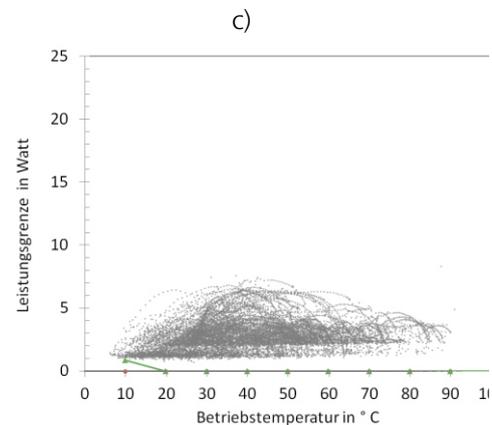


Abbildung 37: Leistungsgrenzen von kapillarkraftgetriebenen Wärmerohren zweier verschiedener Rillenstrukturen; Rille_1 (a), Rillen_2 (b bzw. c mit verschiedener Achsenskalierung).

Loop-Heat-Pipe

Das entscheidende Dilemma von kapillarkraftgetriebenen Wärmerohren liegt in der Problematik, dass die Kapillarkraft zwar mit kleinerem Kapillarradius steigt, jedoch auch der Druckverlust der Flüssigkeitsströmung zunimmt. Somit kann eine Verkleinerung des Kapillarradius bei langen Wärmerohren keine Erhöhung der Kapillarkraftgrenze mehr bedingen. In der Forschung wurde dieses Problem durch die Entwicklung der Loop-Heat-Pipe gelöst (Reay et al. 2014). Die Trennung von Flüssigkeits- und Dampfströmung ermöglicht es, die zum Transport erforderliche Druckdifferenz mit einer dünnen Kapillarstruktur zur Verfügung zu stellen, deren Druckverlust unabhängig von der Länge der Flüssigkeitsleitung ist. Somit können Höhendifferenzen von mehreren Metern überwunden werden. Es existiert ein Forschungsvorhaben, das sich mit dem Einsatz einer Loop-Heat-Pipe im Fassadenkollektor befasst (He et al. 2014; Wang et al. 2012; Wang und Yang 2014; Wang et al. 2013; Zhang et al. 2014; Zhang et al. 2013; Zhao et al. 2010; Wang und Zhao 2011; Wang 2011). Dabei wurden verschiedene, für Loop-Heat-Pipes typische, Probleme identifiziert. Neben einer langen Start-up-Phase (50 min) wurde ein stetiger Heat-Pipe-Temperaturanstieg trotz konstanter Einstrahlung verzeichnet. Auch unterlag der Kollektorwirkungsgrad starken Schwankungen. Aus der Literatur ist bekannt, dass besonders das Anfahren von Loop-Heat-Pipes einen komplexen Vorgang darstellt, was bei geringen Leistungen dazu führen kann, dass sich kein stationärer Betrieb einstellt (Wang 2011, Kaya et al. 2008, (Huang et al. 2009). Dem können zum Beispiel ein kontrolliertes Füllen der Dochtstruktur mit Arbeitsfluid und ein Start mit

Hilfsenergie gegenwirken. Damit gehen jedoch entscheidende Vorteile von Heat-Pipes (einfache Bauweise, keine beweglichen Teile, keine Hilfsenergie) verloren. Für die solare Anwendung, bei der die Wärmezufuhr großen Schwankungen unterworfen ist, ist der Einsatz von Loop-Heat-Pipes noch in einem frühen Laborstadium (Wang und Yang 2014). Für die in ArKol zu entwickelnden Kollektoren wird deshalb das Konzept der Loop-Heat-Pipe nicht weiter verfolgt.

Zwei-Phasen-Thermosiphons mit hohen Füllgraden

Zwei-Phasen-Thermosiphons kommen standardmäßig in solarthermischen Kollektoren als Wärmerohre zum Einsatz (Jack 2016), da die Dachneigung einen problemlosen Rückfluss des Kondensats mithilfe der Schwerkraft erlaubt. Doch auch die prinzipielle Funktionsfähigkeit von Zwei-Phasen-Thermosiphons im Horizontalen und unter geringen Neigungswinkeln ist in der Literatur bestätigt (Bezrodny und Podgoretskii 1994; Hahne und Gross 1981). Um ein Austrocknen des Verdampfers zu verhindern, sind hier jedoch deutlich höhere Füllgrade als in geneigten solarthermischen Standardkollektoren von Nöten.

Das Konzept des überfüllten Zweiphasen-Thermosiphons für die solarthermische Anwendung ist wenig erforscht. (Wang et al. 2015) führen Experimente zur optimalen Füllmenge und Installationssensitivität im kleinen Neigungswinkelbereich für das solare, horizontal arbeitende Wärmerohr durch. Es zeigt sich, dass die Wärmerohre mit einer Füllmenge im Bereich zwischen 19,1 und 22,4 % des Innendurchmessers die höchste Wärmeübertragungskapazität bei horizontaler Lagerung erzielen. Die Füllmenge ist in der Arbeit von Wang als Quotient von Füllhöhe bei horizontaler Lage und Innendurchmesser definiert. Um die Sensitivität zum Neigungswinkel zu untersuchen, wurden zusätzlich Messungen bei $+0,5^\circ$ und $-0,5^\circ$ Neigung durchgeführt. Bei positiver Abweichung von der horizontalen Lage (Kondensator über Verdampfer) wurden häufige Wasser/Dampfschläge im geneigten Wärmerohr beobachtet, was zu einem instabilen Verlauf, sprich starker Fluktuation der Wärmeübertragungskapazität führte. Gegenüber der horizontalen Lagerung konnte eine deutlich höhere Wärmeübertragungskapazität erzielt werden, die je nach Füllmenge das bis zu Sechsfache der Leistung im Vergleich zur horizontalen Lagerung betrug. Einzig das Wärmerohr mit einer Füllmenge von 45,9 % zeigte einen leichten Rückgang in der übertragenen Leistung. Es wird bemerkt, dass ein längeres Betreiben unter leichter Neigung aufgrund der Wasser/Dampfschläge zur Beschädigung des Wärmerohrs führen kann und somit vermieden werden sollte. Bei einer Ausrichtung von $-0,5^\circ$ (Kondensator unter Verdampfer) war die Wärmeübertragungskapazität für alle Wärmerohre unterschiedlicher Füllmenge deutlich reduziert, was auf den in dieser Position vollständig gefüllten Kondensator zurückgeführt wurde.

Ein ausführlicher Überblick über den Stand der Technik von horizontalen und leicht geneigten Zwei-Phasen-Thermosiphons ist in (Morawietz 2020) gegeben.

Auch wenn die prinzipielle Funktionsfähigkeit von Zwei-Phasen-Thermosiphons um die Horizontale der Literatur mehrfach bestätigt wird, sind widersprüchliche Angaben zu thermischem Widerstand und Leistungsgrenzen, insbesondere für den Einfluss von Füllgrad und Neigungswinkel, zu finden. Viele Quellen sind zudem alleinig als Machbarkeitsstudien einzustufen, die die Funktion des Thermosiphons für einen bestimmten Anwendungsfall analysieren. Auch wird in mehreren Literaturquellen (Bezrodny und Podgoretskii 1994; Jouhara et al. 2013; Morawietz et al. 2016; Morawietz et al. 2018; Negishi und Sawada 1983; Nguyen-Chi und Groll 1981) ein instationäres Betriebsverhalten um die Horizontale erkannt. Es wird vermutet, dass das instationäre Verhalten von Zwei-Phasen-Thermosiphons im Horizontalen gepaart mit einer erkannten breiten Definition und Methodik zur Bestimmung der Leistungsgrenze (Morawietz 2020) ihren Anteil an der offenen Datenlage hat. Eine alleine auf Literaturdaten beruhende Auslegung von Zwei-Phasen-Thermosiphons für die im Rahmen des Projekts ArKol zu entwickelnden Kollektoren ist folglich nicht möglich. Aufgrund ihrer einfachen und kostengünstigen

Bauweise sowie dem prinzipiell bereits erprobten Einsatz in solarthermischen Kollektoren stellen Zwei-Phasen-Thermosiphons dennoch eine interessante Option für den Betrieb in den im Rahmen des Projekts ArKol zu entwickelnden Fassadenkollektoren dar und werden für eine vertiefte Analyse ausgewählt.

Auswahl der Heat-Pipe-Konzepte

Auf Grundlage der Recherche werden vier Heat-Pipe-Konzepte ausgewählt, die im Rahmen des Projekts ArKol genauer analysiert und teilweise hinsichtlich ihrer Leistungsgrenzen vermessen werden sollen:

1. Geeignete angebrachte kommerzielle solare Standard-Heat-Pipe (Zweiphasen-Thermosiphon mit geringem Füllgrad)
2. Kommerzielle Docht-Heat-Pipe (kapillarkraftgetrieben)
3. Zweiphasen-Thermosiphons mit hohen Füllgraden im Horizontalen und kleinem Neigungswinkelbereich
4. Innovative Heat-Pipe (Eigenentwicklung)

Die vier Konzepte sind in Abbildung 38 visualisiert:

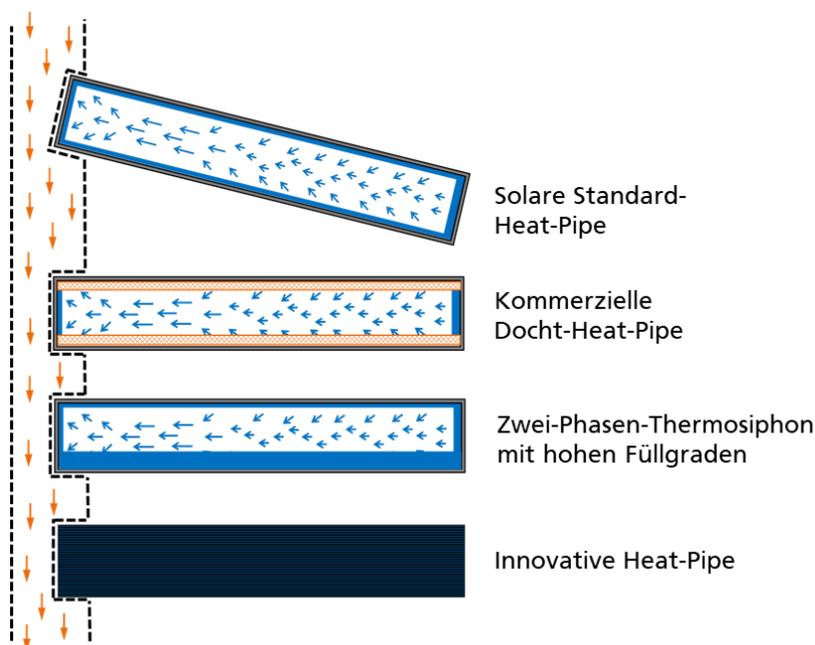


Abbildung 38: In Rahmen von ArKol analysierte Heat-Pipe-Konzepte für die winkelflexible, auch horizontale solarthermische Fassadenintegration.

3.1.3.3.2 Simulations- und Messergebnisse

Die Modellierung der Heat-Pipes erfolgte im Projekt für die kapillarkraftgetriebenen Heat-Pipes nach (VDI – Verein Deutscher Ingenieure 2013) und für die Zwei-Phasen-Thermosiphons nach (Jack 2016). Die Modellierung wurde dabei in der objektorientierten Programmiersprache Modelica in der Entwicklungsumgebung Dymola[®] umgesetzt. In einer Bachelorarbeit (Kaddar 2017) wurde unter anderem ein stichpunktartiger Vergleich von Simulation und Messung durchgeführt, der starke Abweichungen offenbarte (s. Abbildung 147). Ein Grund hierfür sind unter anderem unbekannte und schwer zu bestimmende Stoffparameter. Aber auch das komplexe Betriebsverhalten von Heat-Pipes, wie

im Weiteren dargestellt, erschwert die Modellierung und damit Auslegung, die zumeist auf empirischen Ergebnissen beruht.

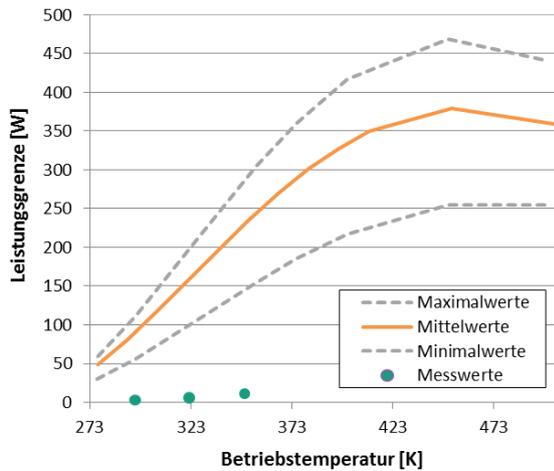


Abbildung 39: Leistungsgrenze in Abhängigkeit der Betriebstemperatur bei einer Neigung von 5° (Simulationswerte unter Angabe des Unsicherheitsbands (Min/Max-Werte) aufgrund von fehlenden Angaben zu Parametern der Kapillarstruktur)

Die Vermessung der Leistungsgrenzen stellt eine besondere Herausforderung dar. Dies ist zum einen damit begründet, dass der Eintritt der Leistungsgrenze mit starken Temperatur- und Druckschwankungen oder Temperatur- und Druckschwingungen einhergeht. Im Laufe der Vermessung der ausgewählten Heat-Pipe-Konzepte kam es deshalb für viele – sowohl kommerzielle als auch selbst hergestellte Heat-Pipes – zur Beschädigung der Heat-Pipe, so dass nicht jede Messkampagne zu Ende geführt werden konnte. Auch wiesen ein Teil der kommerziellen Heat-Pipes hohe Inertgasgehalte oder andere Arbeitsfluide als geordnet auf. Zudem existieren in der Literatur wie bereits erwähnt unterschiedliche Definitionen und Methoden zur Vermessung der Leistungsgrenze (Morawietz 2020), was die Vergleichbarkeit mit Literaturdaten sowie unterschiedlicher Messdaten erschwert. Viele Messungen sind deshalb als Stichproben zu sehen, die nicht immer eine geeignete Grundlage zur Auslegung der Heat-Pipe für die Testkollektoren liefern, jedoch eine Aussage über deren prinzipielle Eignung für den Kollektorbetrieb zulassen.

Im Folgenden ist eine Auswahl der Messergebnisse zusammengestellt. Weitere Ergebnisse sind den Veröffentlichungen (Morawietz et al. 2016; Morawietz et al. 2018) und (Morawietz 2020) zu entnehmen.

Kommerzielle solare Standard-Heat-Pipe (Zwei-Phasen-Thermosiphon)

Die Leistungsgrenze einer solaren Standard-Heat-Pipe wurde am Heat-Pipe-Teststand für verschiedene Winkel in Abhängigkeit der Heat-Pipe-Betriebstemperatur bestimmt. Die Leistungsgrenze ist dabei über einen „Take-off“ der Verdampfertemperatur (weitere Informationen zur Definition der Leistungsgrenze s. (Morawietz 2020)) bei Sensorpositionierung bei 31, 315, 715 und 1115 mm der Verdampferlänge definiert. Ein Vergleich der gemessenen Leistungsgrenze mit den zu erwartenden Kollektor-Jahresleistungspunkten sowie der maximal zu übertragenden Leistung $\dot{Q}_{Demoflex,max}$ bei einer Absorberbreite von 156 mm und einer Absorberlänge des Testkollektors Demoflex von 1220 mm ist in Abbildung 40 für Neigungswinkel von +5°, +7° und +8° (schwerkraftgetrieben) gegeben. Die Charakteristika der solaren Standard-Heat-Pipe sind

Tabelle 6 zu entnehmen. Es zeigt sich, dass ein Betrieb im Testkollektor „Demoflex“ nur bei einer Installation von mehr als +8° Neigung möglich ist. Solare Standard-Heat-Pipes, die für die geneigte Dach-Installation des Kollektors vorgesehen sind, sind für den Einsatz im winkelflexiblen Fassadenkollektor nicht geeignet. Dabei soll nicht unerwähnt bleiben, dass die Standard-Heat-Pipes von den Herstellern meist erst ab einem Betrieb von 15°

Neigung empfohlen werden und nicht für einen Betrieb in diesem geringen Neigungswinkelbereich vorgesehen sind.

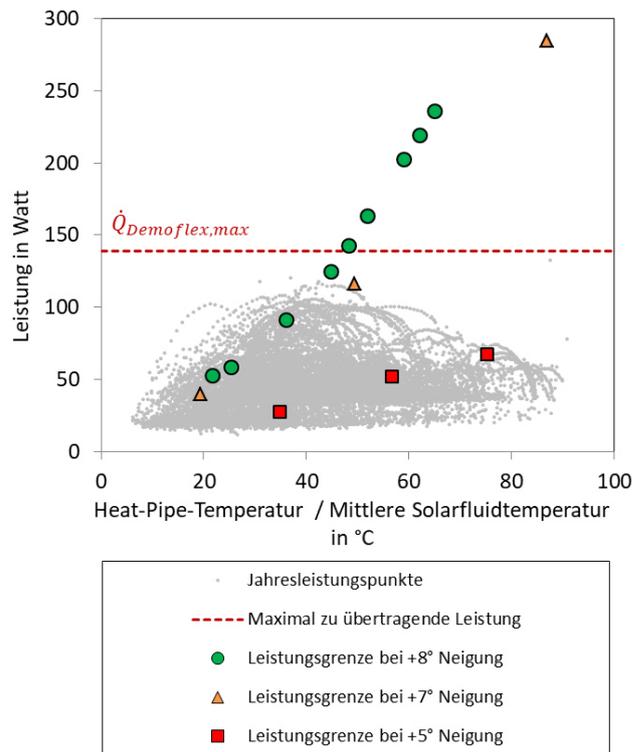


Abbildung 40: Leistungsgrenze einer solaren Standard-Heat-Pipe in Abhängigkeit von Neigungswinkel und Heat-Pipe-Temperatur im Vergleich mit zu erwartenden Jahresleistungspunkten und maximal zu übertragender Leistung $\dot{Q}_{Demoflex,max}$ des Testkollektors „Demoflex“.

Tabelle 6: Charakteristika einer solaren Standard-Heat-Pipe.

Behältermaterial	Kupfer
Kapillarstruktur	keine
Arbeitsfluid	unbekannt
Gesamtlänge	mm 1790
Verdampferlänge	mm 1580
Kondensatorlänge	mm 150
Außendurchmesser Verdampfer	mm 8
Außendurchmesser Kondensator	24
Innendurchmesser	mm unbekannt
Füllgrad	% unbekannt

Kommerzielle Docht-Heat-Pipe

Auf dem Markt existieren drei verschiedene Standard-Kapillarstrukturen für kapillarkraftgetriebene Heat-Pipes: Rillen-, Netz- und Sinter-Strukturen. Sinterstrukturen weisen dabei die höchste Kapillarkraft auf, Rillenstrukturen die geringste. Da Sinter-Heat-Pipes aus fertigungstechnischen Gründen nur in geringen Längen hergestellt werden, wurden kommerzielle Netz-Heat-Pipes in einer Länge von 1500 mm für eine Vermessung ausgewählt. In der ersten Vermessung der Leistungsgrenzen in Abhängigkeit von Betriebstemperatur, Neigungswinkel und Kondensatorlänge auf dem Heat-Pipe-Teststand kam es jedoch auch bei dieser kommerziellen Heat-Pipe zu einer Leckage, so dass die Vermessung abgebrochen werden musste. Eine zweite, aus Zeitgründen verkürzte Messkampagne, wurde als Grundlage zur Auslegung der Testkollektoren durchgeführt. Die Charakteristika der vermessenen Heat-Pipe können Tabelle 7 entnommen werden. Eine positive Neigung kennzeichnet einen Betrieb mit Schwerkraftunterstützung (Kondensator oberhalb Verdampfer). Ein Vergleich der gemessenen Leistungsgrenze mit den zu erwartenden Kollektor-Jahresleistungspunkten sowie der maximal zu übertragenden Leistung $\dot{Q}_{Demoflex,max}$ bei einer Absorberbreite von 156 mm und einer Absorberlänge des Testkollektors Demoflex von 1220 mm ist in Abbildung 41 gegeben. Es zeigt sich, dass bei der hier gegebenen Definition der Leistungsgrenze anhand eines Take-offs der Verdampfertemperatur (weitere Informationen zur Definition der Leistungsgrenze s. (Morawietz 2020)) bei Sensorpositionierung bei 100, 500 und 1000 mm der Verdampferlänge selbst ein Neigungswinkel von $+3^\circ$ nicht ausreicht, um einen ordnungsgemäßen Betrieb der Heat-Pipe im winkelflexiblen Fassadenkollektor zu garantieren.

Die vermessene Heat-Pipe war ursprünglich mit dem Arbeitsfluid Wasser bestellt worden. Aufgrund der verhältnismäßig geringen Leistungsgrenze bestanden entsprechende Zweifel. Auf erneute Nachfrage wurde das Arbeitsfluid nach der Messung vom Hersteller zu „Alkohol“ hin korrigiert. Für den am Außenteststand zu vermessenden Testkollektor der solarthermischen Jalousie wurde die vermessene Alkohol-Netz-Heat-Pipe ausgewählt, für den Testkollektor „Demoflex“ des Streifenkollektors wurde jedoch eine vergleichbare Netz-Heat-Pipe mit dem Arbeitsfluid Wasser ausgewählt, für die eine etwas höhere Leistungsgrenze zu erwarten ist (s. Kapitel 3.1.3.6 und 3.1.3.9).

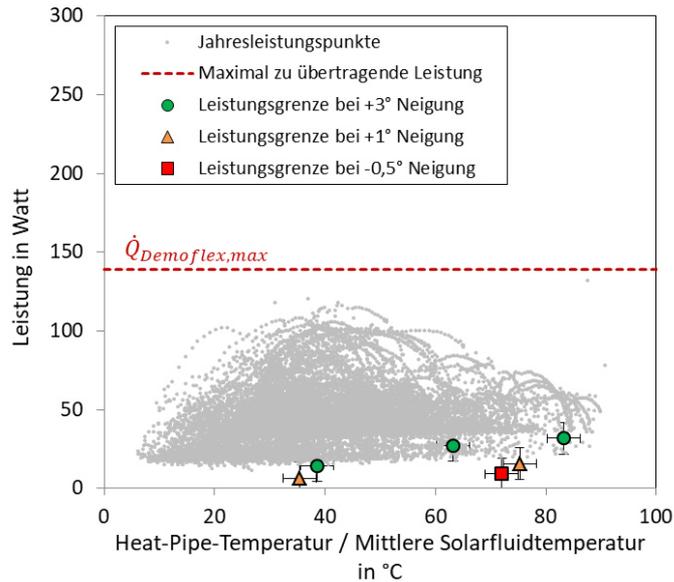


Abbildung 41: Leistungsgrenze der Netz-Heat-Pipe in Abhängigkeit von Neigungswinkel und Heat-Pipe-Temperatur im Vergleich mit zu erwartenden Jahresleistungspunkten und maximal zu übertragender Leistung $\dot{Q}_{Demoflex,max}$ des Testkollektors „Demoflex“.

Tabelle 7: Charakteristika der Netz-Heat-Pipe.

Behältermaterial	Kupfer
Kapillarstruktur	Netz
Arbeitsfluid	Alkohol
Gesamtlänge	mm 1500
Verdampferlänge	mm 1200
Kondensatorlänge	mm 130
Außendurchmesser	mm 8
Innendurchmesser	mm unbekannt
Füllgrad	% unbekannt

Kann die solare Leistung aufgrund des Erreichens der Leistungsgrenze von einer Heat-Pipe nicht übertragen werden, kann eine Verringerung der Absorberfläche (die eine Heat-Pipe zu bedienen hat) in Betracht gezogen werden. Dies kann beispielsweise mit einem Heat-Pipe-Arraykonzept wie in der Literatur bekannt erzielt werden (2014; 2014; 2014; Deng et al. 2015; Deng et al. 2013; Liu et al. 2015; Zhu et al. 2015a, 2015a; Zhu et al. 2015b). Wird der flache Array z. B. direkt spektralselektiv beschichtet, erhält jede Heat-Pipe die zu übertragende Wärme von einer deutlich geringeren Absorberfläche, womit auch die Anforderung an die Leistungsgrenze der Heat-Pipe sinken. Das Mikro-Heat-Pipe-Array erscheint als eine interessante Option für die ArKol-Heat-Pipe. Zu dem Konzept gab es Patentanmeldungen (Patentfamilie – 43161627 (US2011203777A)). Zudem war es innerhalb der Laufzeit des Projekts ArKol nicht gelungen, das Heat-Pipe-Array zur weiteren Vermessung am Fraunhofer ISE zu erwerben. In einem nachfolgenden Projekt könnte dieser Ansatz eine Möglichkeit sein, um die winkelflexible Ausrichtung der Heat-Pipe im Kollektor zu realisieren.

Zwei-Phasen-Thermosiphon mit hohen Füllgraden

Ablauf und Ergebnisse des
Vorhabens

Im Rahmen des Projekts ArKol wurden kommerzielle, selbst-hergestellte und nach Kundenwunsch extern gefertigte Zwei-Phasen-Thermosiphons mit hohen Füllgraden für den Einsatz im Fassadenkollektor im Horizontalen bzw. unter kleinen Neigungswinkeln vermessen. Alle Zwei-Phasen-Thermosiphons zeigten dabei eine prinzipielle Funktionstüchtigkeit unter horizontaler Ausrichtung und ein hohes Wärmeleistungspotenzial. Jedoch konnte auch ein breites Spektrum instationären Verhaltens beobachtet werden (Morawietz et al. 2016; Morawietz et al. 2018) und (Morawietz 2020). In (Morawietz 2020) wird erkannt, dass keine der in der Literatur vorhandenen Definitionen der Leistungsgrenze allein stehend für die Beschreibung dieses komplexen instationären Betriebsverhaltens von Zwei-Phasen-Thermosiphons um die Horizontale geeignet ist. Stattdessen wird die Analyse und Bewertung des Grenzbetriebsverhaltens von horizontalen und leicht geneigten Zwei-Phasen-Thermosiphons anhand von sogenannten „Temperatur-Phänomenkarten“ vorgeschlagen. Eine ausführliche Darlegung der Methodik ist (Morawietz 2020) zu entnehmen. Ausgewählte Ergebnisse der Vermessung der extern nach Kundenwunsch gefertigten Zwei-Phasen-Thermosiphons sind mithilfe der Methodik der Temperatur-Phänomenkarten in Abbildung 42 bis Abbildung 44 gezeigt. Jede Stufe der Leistungsgrenzttests (s. Abschnitt 3.1.3.2) wird auf das währenddessen auftretende Temperaturphänomen hin analysiert. Zudem erfolgt eine Auswertung der mittleren Temperatur der adiabaten Zone T_{ad} sowie der übertragenen Wärmerohrleistung \dot{Q}_{WR} während der letzten 10 Minuten einer Stufe. In den Phänomenkarten können die einzelnen Messpunkte $\dot{Q}_{WR}(T_{ad})$ anhand der Farbe dem auftretenden Temperaturphänomen zugeordnet werden. Zur Abschätzung der Eignung für einen Einsatz im Testkollektor „Demoflex“ ist in den Phänomenkarten zudem die maximal im Testkollektor zu übertragende Leistung $\dot{Q}_{Demoflex,max}$ gegeben. Die Charakteristika der vermessenen Test-Thermosiphons sind Tabelle 8 zu entnehmen. Der Füllgrad ist als Verhältnis von Fluidvolumen zu Gesamtvolumen des Wärmerohrs definiert.

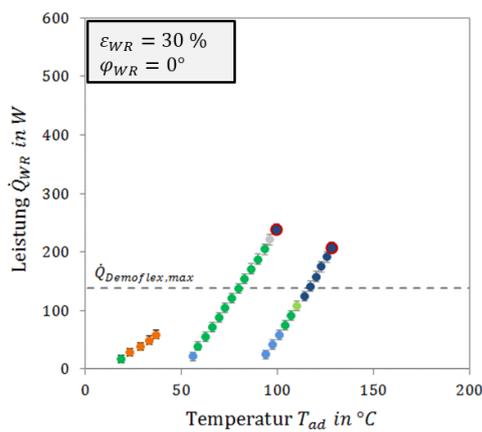


Abbildung 42: Phänomenkarte des Test-Thermosiphons mit 30% Füllgrad für einen Neigungswinkel von 0° im Vergleich mit der maximal im Testkollektor „Demoflex“ zu übertragenden Leistung $\dot{Q}_{Demoflex,max}$. (Morawietz 2020)

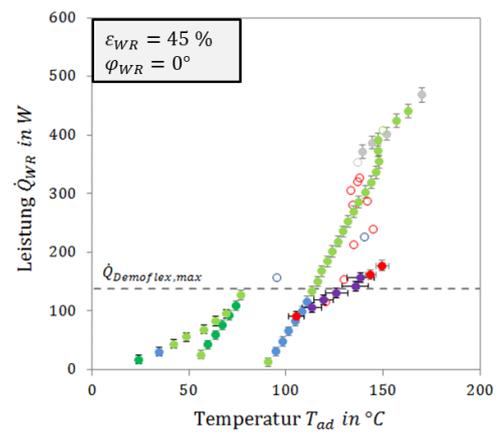
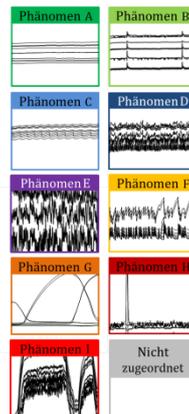


Abbildung 43: Phänomenkarte des Test-Thermosiphons mit 45% Füllgrad für einen Neigungswinkel von 0° im Vergleich mit der maximal im Testkollektor „Demoflex“ zu übertragenden Leistung $\dot{Q}_{Demoflex,max}$. (Morawietz 2020)

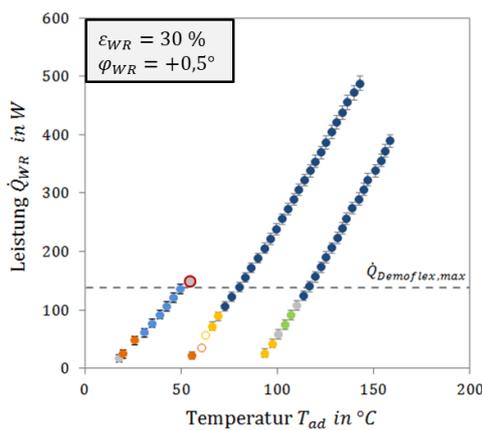


Abbildung 44: Phänomenkarte des Test-Thermosiphons mit 30% Füllgrad für einen Neigungswinkel von +0,5° im Vergleich mit der maximal im Testkollektor „Demoflex“ zu übertragenden Leistung $\dot{Q}_{Demoflex,max}$. (Morawietz 2020)

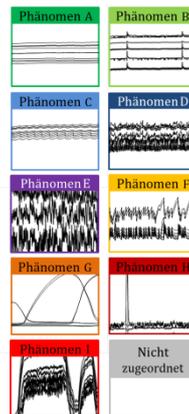


Tabelle 8: Charakteristika der Zwei-Thermosiphons mit hohen Füllgraden.

Behältermaterial	Kupfer	
Arbeitsfluid	Wasser	
Gesamtlänge	mm	1500
Verdampferlänge	mm	1220
Kondensatorlänge	mm	100
Länge adiabate Zone	mm	150
Außendurchmesser	mm	12
Innendurchmesser	mm	11
Füllgrad	%	30 bzw. 45

Ein Vergleich der Phänomenkarten bei horizontaler Ausrichtung für eine Füllgrad von 30 % (Abbildung 42) und 45 % (Abbildung 43) zeigt ein stationäres oder nur leicht instationäres Verhalten über weite Bereiche des Betriebsbereichs (grüne und hellblaue Farbmarkierung). Jedoch treten für 30 % Füllgrad im Bereich geringer Temperaturen und für 45 % Füllgrad im Bereich mittlerer Temperaturen auch starke Instationaritäten auf (orange und rote Farbmarkierung). Ein horizontaler Betrieb im Testkollektor „Demoflex“ ist folglich nicht ohne das Auftreten von den Wärmerohrbetrieb gefährdenden Temperaturphänomenen zu garantieren. Die Phänomenkarte für eine leicht geneigte Ausrichtung von +0,5° (schwerkraftgetrieben) ist in Abbildung 44 gegeben. Es treten über einen

weiten Betriebsbereich mäßige Instationaritäten auf. Ein stationäres Verhalten ist nur in wenigen Betriebspunkten zu beobachten.

Eine geneigte Installation ist aufgrund der vermehrten mäßigen Instationaritäten in Dauer- und Geräuschtests zu prüfen. Ein Vergleich der Messungen bei 0° (Abbildung 42) und $+0,5^\circ$ Neigung (Abbildung 44) zeigt auch, dass es von der Definition der Leistungsgrenze abhängt, ob eine geringere Leistungsgrenze für horizontale oder leicht geneigte Ausrichtung erkannt wird. Wird beispielsweise das Phänomen F als Leistungsgrenzkriterium herangezogen, liegt eine geringere Leistungsgrenze für geneigte Ausrichtung vor. Wird die Leistungsgrenze mit Phänomen H verknüpft, wird eine geringere Leistungsgrenze bei horizontaler Ausrichtung erkannt.

Detaillierte Informationen und weitere Messergebnisse sind (Morawietz 2020) zu entnehmen. Die Ergebnisse der Vermessung der kommerziellen und der selbst-hergestellten Zwei-Phasen-Thermosiphons sind den Quellen (Morawietz et al. 2016; Morawietz et al. 2018) zu entnehmen. Auf Grundlage aller Messergebnisse wird geschlussfolgert, dass aufgrund des komplexen (Grenz)Betriebsverhaltens von horizontalen und leicht geneigten Zwei-Phasen-Thermosiphons ein Betrieb in den Fassadenkollektoren nur mit einem erhöhten Entwicklungsaufwand realisierbar ist.

Innovatives Heat-Pipe-Konzept

Ein Grund für die geringere Leistungsgrenze sowie das komplexe Betriebsverhalten von Heat-Pipes mit hohen Füllgraden ist die erhöhte Wechselwirkung zwischen Dampf- und Flüssigphase. Gleichzeitig ist der hohe Füllgrad für eine Funktion um die Horizontale erforderlich, um ein Trockenfallen schon bei geringen Leistungen oder aufgrund von Montagetoleranzen auch ohne Leistungsaufprägung zu verhindern. Um die Wechselwirkung zu reduzieren, wurde ein Heat-Pipe-Konzept analysiert, dass die Wechselwirkung verhindern bzw. verringern soll. Einzelne, in sich hydraulisch abgeschlossene Heat-Pipes können dabei zu einem Array zusammengefasst werden. Um die Machbarkeit des Konzepts zu testen und dabei möglichst viele Parametervariationen vornehmen zu können, wurden Einzel-Heat-Pipes des Arrays mittels 3D-Sinterdruck am Fraunhofer EMI hergestellt (s. Abbildung 45) und am Fraunhofer ISE befüllt. Die hergestellten Heat-Pipes waren dabei am Kondensator mit einer Zickzackstruktur ausgeführt (s. Kapitel 3.1.3.4)



Abbildung 45: 3D-sintergedruckte Einzel-Heat-Pipe des innovativen Array-Konzepts mit Befülladapter.

Die prinzipielle Funktionstüchtigkeit der Heat-Pipe wurde in einer Bachelorarbeit am Fraunhofer ISE bestätigt (Schaffeld 2017). Aufgrund der speziellen Geometrie sowie fertigungsbedingt verhältnismäßig kurzen Gesamtlänge der Heat-Pipe konnte keine Vermessung der Leistungsgrenze am Heat-Pipe-Teststand erfolgen. Um die Fertigbarkeit von längeren und damit realitätsnahen Labortestmustern von Heat-Pipe-Konzepten mit flachen Geometrien und verschiedenen Innenstrukturen in einem möglichen Folgeprojekt sicherzustellen, wurden erste Test-Fertigungen durchgeführt (s. Abbildung 46). Verschiedene Fügeverfahren wurden auf Praktikabilität und Dichtigkeit getestet.

Bei dem final ausgewählten Herstellungsverfahren wird eine Maske aus Zinnfolie vorbereitet und mit dem Flussmittel Zinkchlorid in flüssiger Form bestrichen. Das entstehende Paket wird anschließend mithilfe einer Heizplatte auf 250°C erwärmt und entsprechend verlötet. Die Vorbereitung und der Fügeprozess werden als wenig aufwendig eingeschätzt. Flussmittelreste können bei der Reinigung leicht mit Wasser entfernt werden.

Dies ist erforderlich, um die Bildung von Inertgasen während der Vermessung der Testkörper zu verhindern.

Die gemessenen Leckraten lagen im Bereich $1,05 \cdot 10^{-6}$ und $4,4 \cdot 10^{-7}$. Daraus folgt ein ausreichend großer Zeitraum, in dem entsprechende Heat-Pipes-Konzepte zukünftig befüllt und vermessen werden könnten.



Abbildung 46: Prüfling der flachen Heat-Pipe nach Einlöten der Endstücke am Befüllrig des Fraunhofer ISE.

3.1.3.3 Zusammenfassung und Ausblick

Die Heat-Pipe ermöglicht durch die Trennung von Absorber- und Solarfluidkreislauf eine Modularität und Flexibilität der Fassadenkollektoren, die mit einem direkt durchströmten Konzept nicht realisierbar wäre. Zudem sichert sie die klare Gewerketrennung bei Installation und Haftung, was als einer der wichtigsten Eigenschaften marktfähiger Fassadenkollektorkonzepte erkannt wird. Gleichzeitig stellt der Anspruch an eine winkelflexible Ausrichtung des Kollektors die Heat-Pipe-Entwicklung vor Herausforderungen. Der im Projekt formulierte Wunsch einer flexiblen Länge der Kollektorstreifen, Montagetoleranzen im Fassadenbau, Winkeländerungen aufgrund von thermischen Ausdehnungen, Wolkendurchzüge und Verschattungen sowie die an der Fassade geforderte hohe Lebensdauer erweitern die Ansprüche an die Entwicklung (Morawietz 2020).

Im Projekt ArKol wurden verschiedene Heat-Pipe-Konzepte hinsichtlich der Eignung für den Betrieb im winkelflexiblen Fassadenkollektor analysiert und die Leistungsgrenzen vermessen. Dabei zeigte sich, dass nur wenige Heat-Pipes aufgrund des im kleinen Neigungswinkelbereich auftretenden instationären Betriebsverhaltens den Leistungsgrenzttests über eine Messreihe standhielten. Zudem wurde erkannt, dass die für geneigte Ausrichtung etablierte Methodik zur Bestimmung der Leistungsgrenze nicht für die Analyse des Betriebsverhaltens um die Horizontale geeignet ist. Eine entsprechende Methodik, die die Analyse und darauf aufbauende Auslegung und Optimierung von Heat-Pipes um die Horizontale ermöglicht, wurde mit den Temperatur-Phänomenkarten entwickelt (Morawietz 2020). Die Entwicklung einer Heat-Pipe, die den oben genannten Ansprüchen eines architektonisch hoch integrierten Fassadenkollektors genügt, konnte aufgrund der genannten Herausforderungen im Projekt ArKol noch nicht erfolgen. Die infrastrukturellen, fertigungstechnischen und methodischen Grundlagen wurden jedoch

gelegt und zudem mit dem innovativen Heat-Pipe-Konzept erste Schritte einer Neuentwicklung gegangen.

Für die Testkollektoren sowie die Demofassaden wurden im Projekt kommerzielle Docht-Heat-Pipes ausgewählt, die unter möglichst großer Neigung an den Absorber angelötet wurden (s. Abschnitt 3.1.3.6 und 3.1.3.7). Auf Grundlage der Messungen (s. Abschnitt 3.1.3.3.2) ist jedoch davon auszugehen, dass so kein optimaler Heat-Pipe-Betrieb zu realisieren ist. Die Messungen der Test-Kollektoren bestätigen diese Annahme (s. Abschnitt 3.1.3.9). Auch ist eine Neigung der Heat-Pipe für die Jalousie im Betrieb nicht unter allen Lammellenstellungen zu realisieren. Der Wunsch nach einer winkelflexiblen Heat-Pipe besteht fort. Auf Grundlage der im Projekt ArKol gemachten Erfahrungen und Analysen werden folgende Heat-Pipe-Konzepte (in Array-Ausführung oder einzeln) als vielversprechend gesehen, um ein winkelflexibel einsetzbares, architektonisch hoch integrierbares Heat-Pipe-Konzept doch noch zu realisieren:

- Pulsierende Heat-Pipe
- Heat-Pipe-Konzept mit Trennung von Dampf- und Flüssigphase (Inno-Konzept)
- Heat-Pipe mit geeigneter Dochtstruktur (längere Sinter-Heat-Pipe, Kombi-Dochtstruktur)
- Zwei-Phasen-Thermosiphon mit Fertigungskonzept, das Neigung zulässt

3.1.3.4 Entwicklung und Auslegung der stufenlosen Heat-Pipe-Anbindung an den Sammelkanal - Streifenkollektor

CFD-Simulationen des Sammelkanals des Streifenkollektors

Zur Optimierung der thermischen Anbindung des Fassadenkollektors an den Sammelkanal wurden CFD-Simulationen mit Comsol Multiphysics durchgeführt. Neben einem möglichst geringen thermischen Widerstand der Anbindung war die stufenlose Verschiebbarkeit des Fassadenkollektors in vertikaler Richtung weiteres Ziel. Ein mögliches Umsetzungsprinzip dieser konstruktiven Anforderung ist in Abbildung 47 dargestellt.

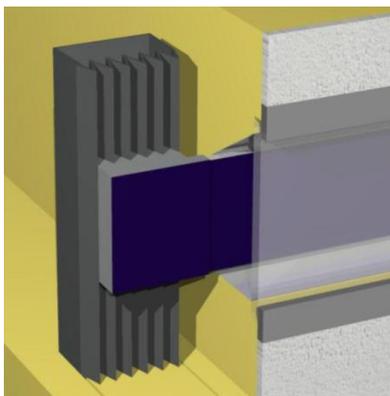


Abbildung 47: Ausführungsvariante der Anbindung zwischen Heat-Pipe und Sammelkanal.

Der Sammelkanal ist in dieser Variante als Zackenprofil angedeutet. Die Idee hinter diesem Design ist, durch die Zacken eine Vergrößerung der Oberfläche für die Wärmeübertragung von der Heat-Pipe des Kollektors in das Fluid im Sammlerkanal zu erreichen. Die Keilform ermöglicht gleichzeitig einen großen Anpressdruck der Anbindung. Weiterer Gegenstand der CFD-Simulationen war neben der Wärmeübertragung der Druckverlust im Sammlerkanal.

In Comsol Multiphysics wurde zunächst eine Zacke des Sammelkanals mit 1 mm Wandstärke abgebildet, wobei an den seitlichen Rändern Symmetrie angenommen wurde. Als Randbedingung wurde auf der Außenfläche der Wand eine konstante Temperatur vorgegeben. In Abbildung 48 sind exemplarisch das Geschwindigkeits- und das Temperaturprofil für eine Zacke dargestellt.

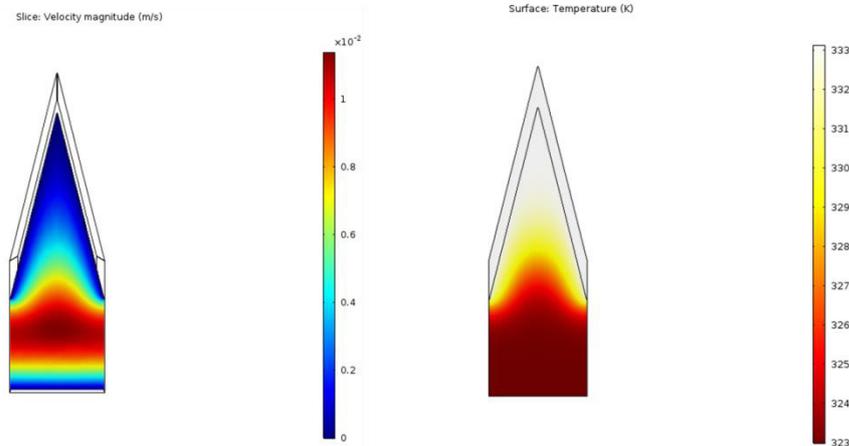


Abbildung 48: Geschwindigkeitsprofil (links) und Temperaturprofil (rechts) am Austritt im Querschnitt einer Zacke des Sammelkanals.

Wie die Darstellung verdeutlicht, bildet sich im unteren Bereich des Querschnitts eine Kernströmung aus, während nach oben hin die Geschwindigkeit deutlich abnimmt und im spitzen Bereich Null wird. Dies führt dazu, dass sich Temperaturspitzen ausbilden und die Wärme nicht abgeführt werden kann. Selbst wenn die untere Wand durch zwei zur oberen Wand parallele Wände ersetzt wird und das Fluid damit in einem Spalt fließt, bleiben die Bereiche sehr geringer Geschwindigkeiten in der Spitze der Zacke, in denen die Wärme nicht abgeführt werden kann, bestehen.

Auf Grundlage dieser Simulationsergebnisse wurde eine wellenförmige Geometrie entwickelt, in welcher der Spaltdurchmesser für die Fluidströmung konstant ist. In Abbildung 49 ist eine Welle des Sammelkanals dargestellt.

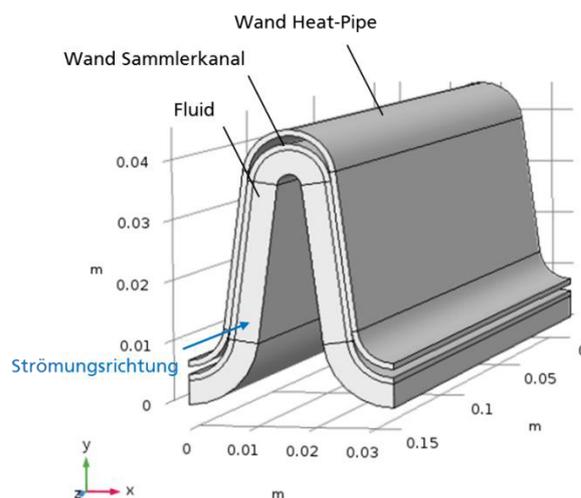


Abbildung 49: Dreidimensionale Darstellung einer Welle des Sammelkanals. Das Fluid strömt in Richtung der z-Achse.

Wie die Abbildung zeigt, ist in diesem Modell neben der Wand des Sammelkanals auch die Wand der Heat-Pipe abgebildet. Die Welle ist symmetrisch mit zwei unterschiedlich großen Radien aufgebaut. Durch diese Keilform soll gewährleistet werden, dass sich die Heat-Pipe ausreichend fest auf den Sammelkanal anpressen lässt und ein guter thermischer Kontakt sichergestellt wird.

Die Profile in Abbildung 50 am Austritt der Welle zeigen die gleichmäßige Geschwindigkeitsverteilung über den Querschnitt der Welle und die Temperaturverteilung. Die Temperaturrandbedingung wurde hier auf die Außenfläche der oberen Wand gesetzt, die der Kondensationsoberfläche in der Heat-Pipe entspricht.

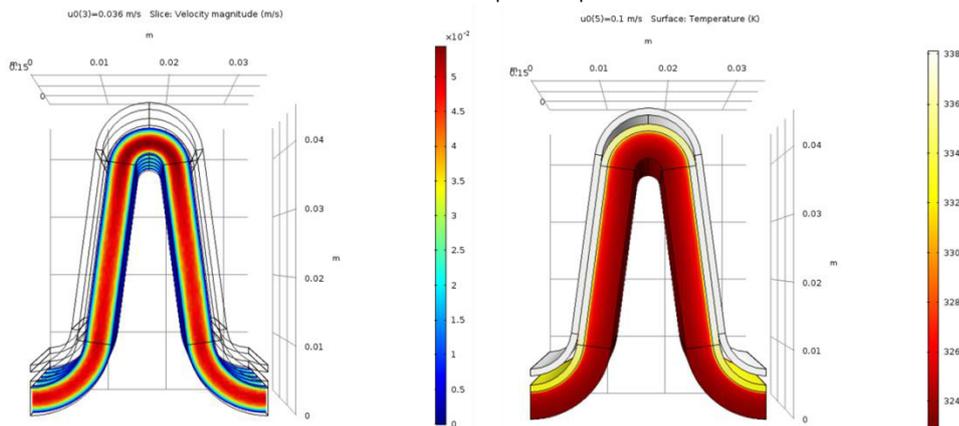


Abbildung 50: Geschwindigkeitsprofil (links) und Temperaturprofil (rechts) am Austritt im Querschnitt einer Welle des Sammelkanals.

Die Simulationsergebnisse zeigen im Vergleich zu einem Rechteckkanal gleicher Breite bei gleichen Strömungsbedingungen eine Verbesserung des Wärmeübergangs um den Faktor 2 bis 3. Gleichzeitig ist der Druckverlust etwa 7- bis 8fach so groß wie beim Rechteckkanal. Der Kontaktwiderstand zwischen den beiden Wänden ist in diesem Modell nicht berücksichtigt.

Sammelkanaltestmuster

Um die thermischen Widerstände in der Energieübertragungskette im Bereich der Heat-Pipe-Anbindung an den Sammelkanal zu bewerten, wurde ein Funktionsmuster für den Sammelkanalteststand geplant und hergestellt. Dieses Muster bestand im Wesentlichen aus einem handelsüblichen Rechteckrohr, einer Heizplatte und der benötigten Sensorik. Die Heizplatte besteht aus einer gefrästen Aluminiumplatte. Der Sammelkanal wurde aus Normteilen gefertigt.

Im Rahmen des Projekts wurden zudem weitere Fertigungsmöglichkeiten wie 3D-Druck, Rollformen oder Galvanoformen für die Sammelkanaltestmuster betrachtet. Jedoch konnten aufgrund der hierfür hohen Fertigungskosten der komplexen Geometrie keine weiteren Sammelkanaltestmuster hergestellt werden.

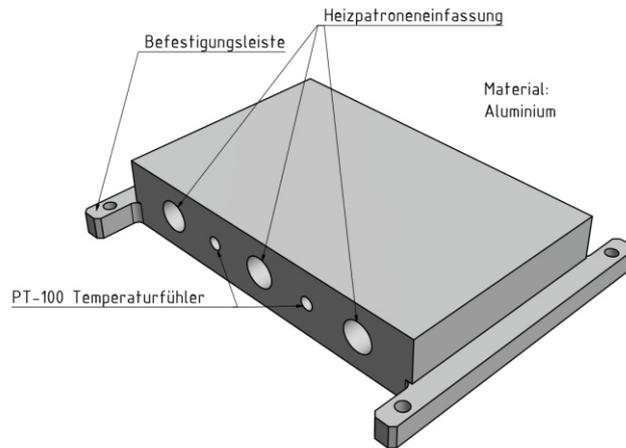


Abbildung 51: Heizadapter.

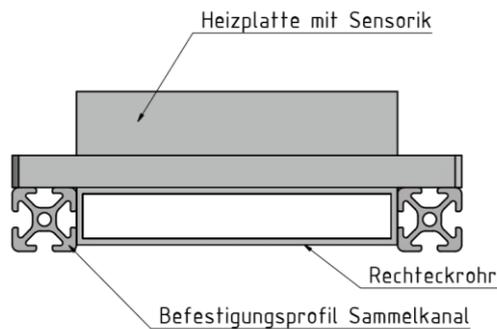


Abbildung 52: Heizadapter mit Sammelkanal.

Experimentelle Analysen des Sammlerkanal des Streifenkollektors

Ziel der experimentellen Untersuchungen am Sammlerteststand (s. Kapitel 3.1.3.2) war die Charakterisierung verschiedener Kanalgeometrien hinsichtlich des Gesamtwärmedurchgangs von der Heat-Pipe bis zum Wärmeträgerfluid, wobei die Heat-Pipe durch einen elektrisch beheizten Metallblock simuliert wird. Gleichzeitig sollen die experimentellen Ergebnisse zur Validierung der CFD-Simulationen herangezogen werden.

Eine erste Inbetriebnahme des Teststands erfolgte mit einer Rechteckkanalgeometrie (70 x 20 x 2 mm). Zur Erzeugung eines fluiddynamisch ausgebildeten Strömungsprofils wurde ein Diffusor konzipiert, der zusammen mit einem Strömungsgitter am Kanaleingang installiert wurde.

Die Ergebnisse zweier exemplarischer Messungen in Abbildung 53 zeigen, dass der Teststand prinzipiell ein reproduzierbares Messen des thermischen Widerstands ermöglicht. Der thermische Gesamtwiderstand beträgt etwa 0,16 K/W und liegt damit im unteren Bereich marktüblicher Sammler für Vakuumröhrenkollektoren (0,1–0,5 K/W) (Jack und Rockendorf 2013).

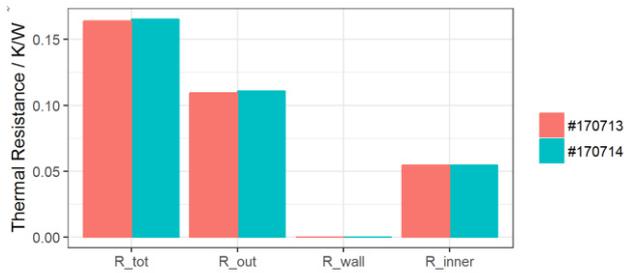


Abbildung 53: Am Sammlerteststand gemessene thermische Widerstände bei laminarer Strömung ($Re = 900$) und einer Heiztemperatur von $80^{\circ}C$.

Der thermische Widerstand R_{inner} zwischen der Wand des Sammelkanals und dem Fluid wurde auch über Korrelationen aus der Literatur berechnet (Shah und Sekulic 2003). R_{wall} ist der thermische Widerstand zwischen der inneren Oberfläche des Sammelkanals und der zum Heizblock zeigenden äußeren Oberfläche. Der thermische Widerstand R_{out} beinhaltet den Kontaktwiderstand zwischen Heizblock und Kanalwand und ist stark abhängig von Oberflächenbeschaffenheit und Anpressdruck.

Parallel zu den experimentellen Untersuchungen wurde der Aufbau in Comsol Multiphysics abgebildet. Abbildung 54 zeigt exemplarisch das in Comsol berechnete Strömungsprofil im Rechteckkanal.

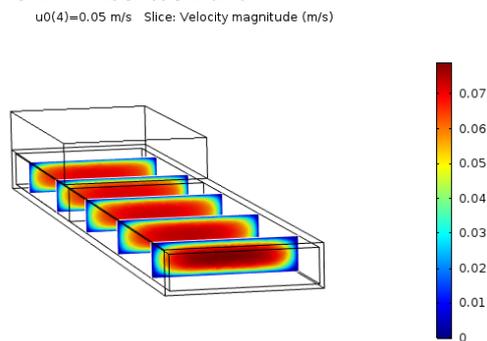


Abbildung 54: Strömungsprofil im Rechteckkanal des experimentellen Aufbaus.

Erste Simulationsergebnisse zeigten für Wärmeübergang und Druckverlust sehr große Abweichungen im Vergleich zu Literaturwerten. Durch Verwendung von mittleren Stoffwerten über die Temperatur konnte für den Druckverlust ein erfolgreicher Abgleich zwischen Simulations- und Literaturwerten erzielt werden. Wie Abbildung 55 verdeutlicht liegen die Abweichungen je nach Mesh-Größe im Bereich von 10–20 %, was als ausreichend angenommen wird.

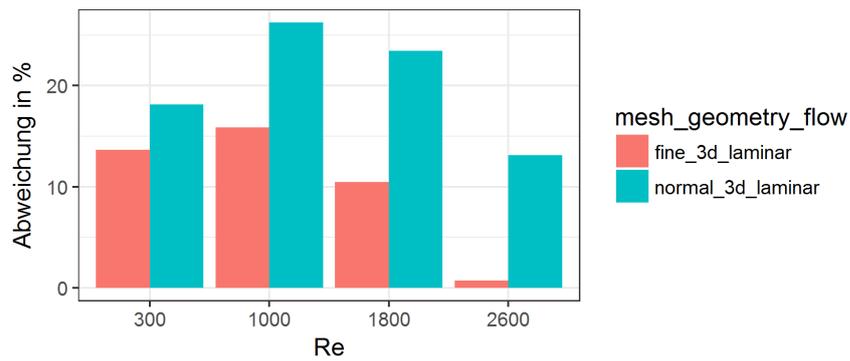


Abbildung 55: Abweichung der simulierten Widerstandsbeiwerte im Vergleich zu Literaturwerten, aufgetragen über verschiedenen Reynolds-Zahlen.

Weiterhin wurde am Sammlerteststand ein Rechteckkanal vermessen, der in seinen Abmessungen dem Sammler des Demoflex-Kollektors entspricht. Ein 3-D-gedruckter Diffusor zur Erzeugung eines ausgebildeten Strömungsprofils hatte sich als undicht erwiesen, so dass stattdessen eine längere Einlaufstrecke gewählt wurde. Ziel war es, den Rechteckkanal unter verschiedenen Betriebsbedingungen und Anpressdrücken hinsichtlich Wärmedurchgang zu charakterisieren und aus dem Abgleich zwischen Experiment, Simulation und Literatur Ergebnisse für den Kontaktwiderstand zu bekommen, die als Basis für komplexere Geometrien („Welle“, s. Abbildung 56) angesetzt werden können. Die Ergebnisse lieferten jedoch keine physikalisch sinnvollen Zusammenhänge, aus denen ein Kontaktwiderstand in Abhängigkeit der genannten Parameter hätte hergeleitet werden können.

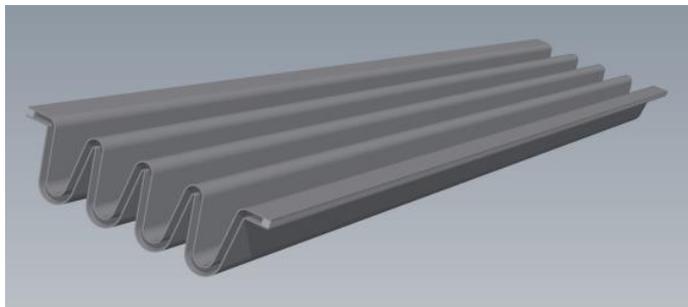


Abbildung 56: Innovatives Sammlerdesign „Welle“.

Aufgrund der für die komplexe Geometrie der Welle hohen Fertigungskosten für Testkörper konnte im Rahmen des Projekts keine experimentelle Analyse des Wellenprofils erfolgen. Eine Optimierung des Wellenprofils per Simulation war aus diesen Gründen nicht möglich.

3.1.3.5 Entwicklung und Optimierung des Kollektorgehäuses, der Wärmedämmung und von Lösungen für Zwischenraumkonzepte - Streifenkollektor

Fassadentypologie

Wärmedämmverbundsystem

Ein Wärmedämmverbundsystem ist ein mehrschichtiger Aufbau zur Dämmung von Fassaden. Das System besteht dabei aus Befestigung auf der tragenden Außenwand (Kleben, Kleben und Dübeln, mechanisch), Wärmedämmung, Armierungsschicht und Außenputz.



Abbildung 57: Beispiele WDVS-Fassade (Quelle: quick-mix / Knauf Gips KG).

WDVS ist ein kostengünstiges System für den Neubau, aber vor allem die Sanierung von Gebäuden. Der Streifenkollektor könnte hierbei in die Dämmschicht eingelassen werden und somit eine nahezu plane Fassadenoberfläche schaffen. Ein besonderes Augenmerk muss auf die Temperatur im Anschlussbereich und die Befestigung des Streifenkollektors im Fassadenaufbau gelegt werden.

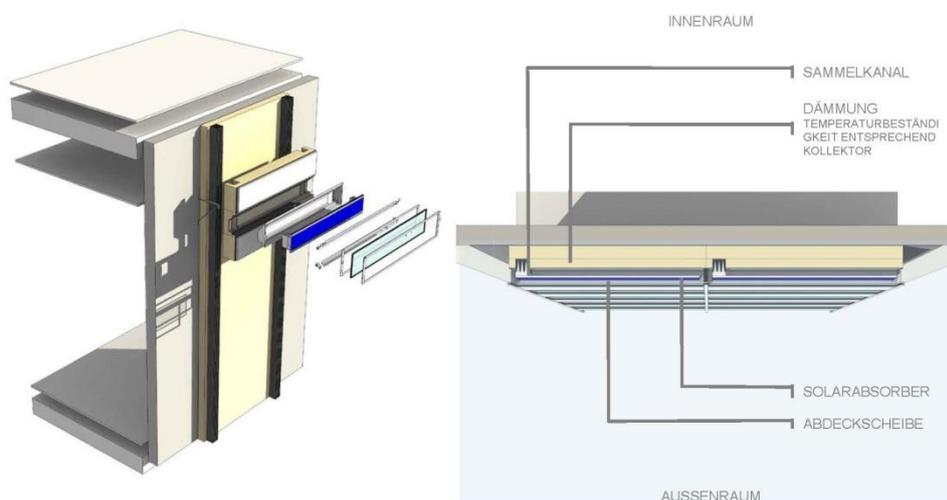


Abbildung 58: Möglicher Aufbau Streifenkollektor in WDVS-Fassade.

Vorgehängte hinterlüftete Fassade (VHF)

Die VHF ist durch ihren mechanisch-modularen und bauphysikalisch optimierten Aufbau gekennzeichnet. Das Fassadensystem besteht aus einer an der Wand (Rohbau) anliegenden Dämmschicht, einer offenen Luftschicht und einer außenliegenden Bekleidung. Die Bekleidung wird durch eine Unterkonstruktion gehalten, welche an tragenden Bauteilen hinter der Dämmebene befestigt wird. Als Bekleidung sind nahezu alle Materialien denkbar.



Abbildung 59: Beispiele vorgehängte hinterlüftete Fassade (Quelle: Moeding Keramikfassaden GmbH / Müller Reimann Architekten).

Vorgehängte hinterlüftete Fassaden sind durch ihren modularen Aufbau und die mechanische Befestigung für die Integration von Kollektoren sehr gut geeignet. Da die Luftschicht allerdings offen zum Außenraum ist, wird eine zusätzliche Dämmung des Kollektors notwendig. Mit der VHF sind den gestalterischen und materialtechnischen Wünschen nahezu keine Grenzen gesetzt, was eine architektonisch hochwertige Integration der Streifenkollektoren ermöglicht.

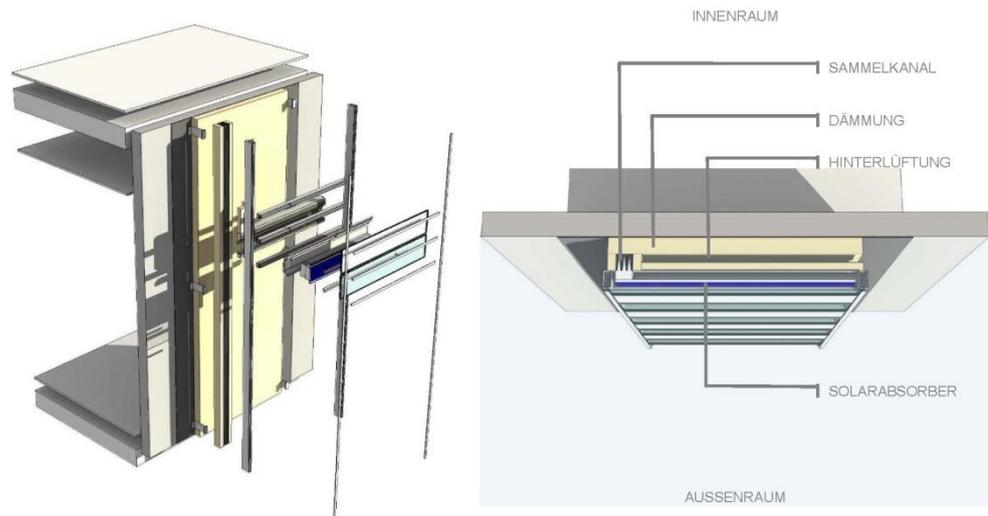


Abbildung 60: Möglicher Aufbau Streifenkollektor in VHF.

Konzept und Entwicklung von Gehäuse und Wärmedämmung

Konzept des Streifenkollektors

Die Grundidee des Streifenkollektors besteht darin, einen möglichst hohen Integrationsgrad mit hoher architektonischer Qualität und Flexibilität zu schaffen. Bei einem klassischen solarthermischen Kollektor liegt der Absorber in der Regel direkt auf der Wärmedämmung auf. Beide befinden sich in einem Gehäuse, das – bei abgedeckten Kollektoren – mit einer zusätzlichen transparenten Abdeckung (meist einer Glasscheibe) gegen hohe thermische Verluste (insbesondere durch Wind) auf der Vorderseite geschützt ist. Für den Streifenkollektor (Abbildung 61) ist dagegen vorgesehen, den Absorber (idealerweise eine flache Heat-Pipe mit spektralselektiver Beschichtung) möglichst wärmebrückenfrei mittig in einem Aluminiumgehäuse (z. B. Strangpressprofil) zu befestigen. So

wohl vor als auch hinter dem Absorber befindet sich ein Luftspalt, der bereits einen gewissen Wärmedämmeffekt aufweist. In einer späteren Ausbaustufe, die noch nicht Gegenstand dieses Forschungsprojekts war, kann gegebenenfalls darüber nachgedacht werden, die Luft im Gehäuse durch ein Edelgas, z. B. Argon, zu ersetzen, um die thermischen Verluste weiter zu reduzieren. Das gesamte Gehäuse ist wiederum von einer Wärmedämmung umgeben, die im Fall eines Wärmedämmverbundsystems gleichzeitig die Wärmedämmung der Gebäudehülle darstellt. Bei einer vorgehängten hinterlüfteten Fassade ist die Wärmedämmung des Kollektors allerdings getrennt von der Wärmedämmung des Gebäudes zu betrachten (s. u.).

Ursprünglich wurde vorgeschlagen, den Absorber 156 mm hoch zu gestalten, weil dies eine typische Größe für Solarzellen nach dem Stand der Technik darstellt und dadurch – ebenfalls in einer späteren Ausbaustufe – auch photovoltaisch-thermische Kollektoren (PVT-Kollektoren), die gleichzeitig Wärme und Strom erzeugen, ohne Änderung der Kollektormaße möglich wären. Die Luftspalte wurden zunächst mit ca. 10 mm angenommen. Um auch höhere Sonnenstände nutzen zu können, kann das Gehäuse im oberen Teil schräg gestaltet werden. Soll allerdings im Sommer Stagnation vermieden werden, ist andererseits eine Verschattung gewünscht, so dass sich auch hier eine geometrische Optimierungsfrage ergibt.

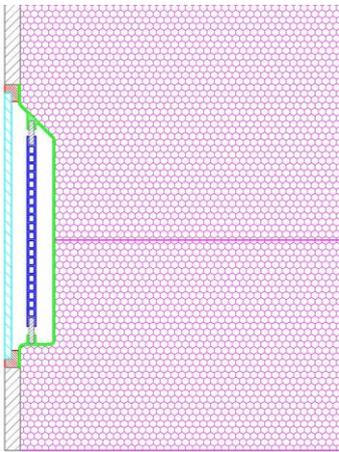


Abbildung 61: Schematischer Aufbau des Streifenkollektors.

Im Hinblick auf die spätere Montage (Abbildung 62) wurde geplant, dass der Kollektor (Gehäuse mit eingebrachtem Absorber und Verglasung) als vorgefertigtes, beidseitig verschlossenes Element auf die Baustelle kommt. Zu Projektbeginn war geplant, den Kondensator seitlich aus dem Gehäuse zu führen. Im weiteren Projektverlauf wurde entschieden, auf diese Durchführung zu verzichten, da sie eine enge horizontale Stapelung behindert. Der Kollektor wird dann auf dem Sammelkanal, der gleichzeitig als Montage-schiene fungiert, befestigt. Um ein architektonisch attraktives Erscheinungsbild zu erhalten, ist es weiterhin vorteilhaft, wenn der verglaste Kollektor bis über den Sammelkanal reicht, so dass möglichst nur minimale Spalte zwischen den Glasscheiben entstehen. Diese Anforderung ist mit dem aktuellen Konstruktionsstand erfüllt. Die verbleibenden 10 mm Abstand zu angrenzenden Elementen sind für vorgehängte und hinterlüftete Fassadenbekleidungen üblich.

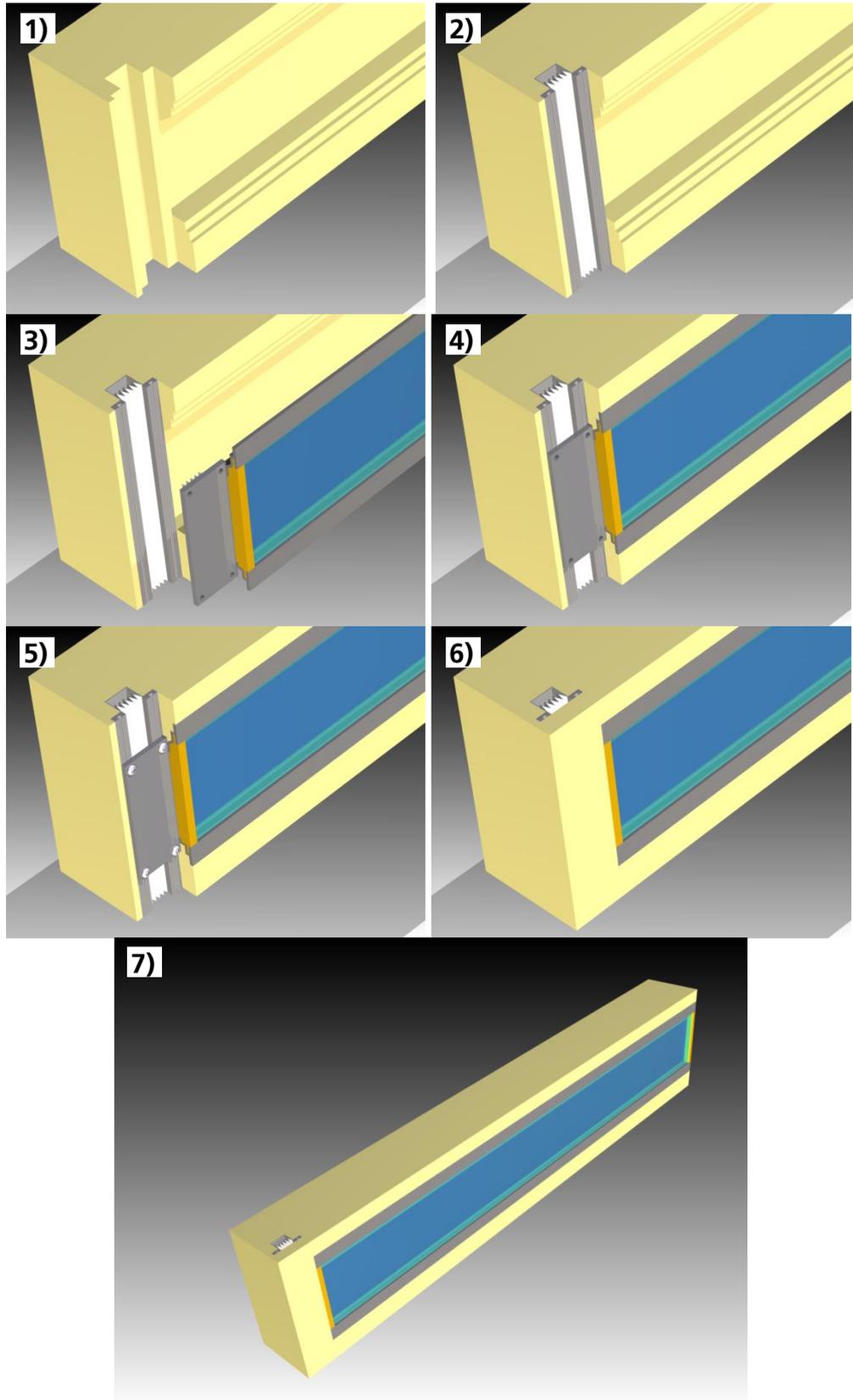


Abbildung 62: Montageprinzip des Streifenkollektors (schematisch): 1) Aufbringen der Wärmedämmung, 2) Einsetzen des Sammelkanals, 3) + 4) Einsetzen des Kollektors in Wärmedämmung und Sammelkanal, 5) Befestigen des Heat-Pipe-Kondensators am Sammelkanal, 6) Aufsetzen der Sammelkanal-Wärmedämmung, 7) eingebauter Streifenkollektor.

Konzeptionierung und Entwicklung der Integration des Streifenkollektors

Zu Projektbeginn wurden vier unterschiedliche Konzepte für die Integration des Streifenkollektors ausgearbeitet:

Variante A

Der Streifenkollektor wird in ein Fassadenelement, beispielsweise aus Liapor oder einer Putzträgerplatte mit Dämmputz, der Aerogel enthält, eingebracht. Dieses Fassadenelement wird wiederum über einen Unterputz oder Kleber, der ein Armierungsgewebe enthält, auf dem Dämmstoff angebracht, der sich auf der Wand befindet. Als Dämmstoff soll dabei Mineralwolle verwendet werden. Die umgebende Fläche wird mit Fassadendekorelementen aus Capapor oder einer Putzträgerplatte ausgestattet. Insbesondere in letzterem Fall könnte zusätzlich eine Oberputzschicht aufgetragen werden. Das Prinzip ist in Abbildung 63 dargestellt:

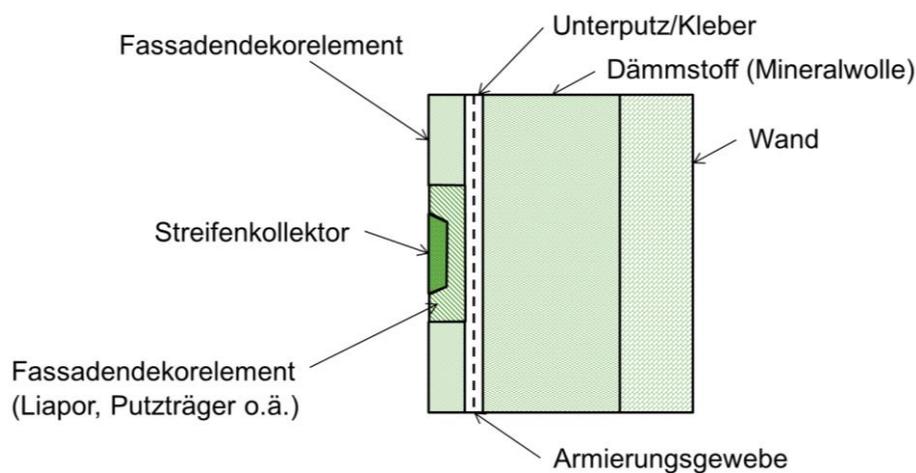


Abbildung 63: Integration des Streifenkollektors: Variante A.

Die Verbindung des Streifenkollektors zu dem Fassadenelement erfolgt dabei über eine Kleb- oder Schraubverbindung oder über eine Einfassung. Diese vorausgewählten Befestigungsvarianten des Streifenkollektors sind in Abbildung 64 dargestellt. Sollte ein Kleber verwendet werden, muss dieser eine hohe Temperaturbeständigkeit aufweisen. Geeignet scheinen Dämmputz, Hochtemperatursilikon, Aerogelmatten mit einem entsprechenden Kleber oder auch Polyimidschaum. Bei Schraubverbindung oder Einfassung des Kollektors war angedacht, die Wärmeleitung zu minimieren, indem der Kollektor nur an den Befestigungsstellen selbst in direktem Kontakt zum Fassadenelement steht und ein Luftspalt hinter dem Kollektor zur Isolierung beiträgt. Abschätzende Berechnungen ergaben jedoch, dass sowohl Kleber als auch Luftspalt die Temperaturbelastung der Dämmung nur um wenige Kelvin reduzieren würden. Somit ist bei Verwendung von Capapor in jedem Fall eine weitere temperaturbeständige Dämmung zwischen Kollektorgehäuse und Capapor einzufügen, die idealerweise auch tragende Funktionen aufweisen sollte.

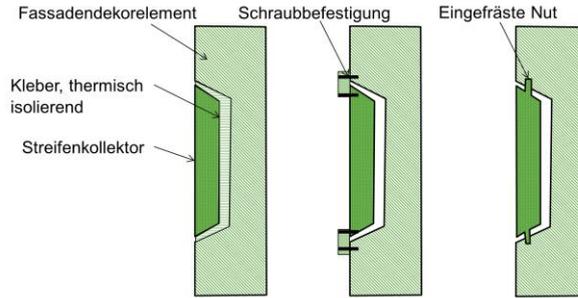


Abbildung 64: Integration des Streifenkollektors: Variante A – Befestigungsvarianten.

Variante B

Die zweite Variante ist in Abbildung 65 dargestellt. Sie sieht einen ähnlichen Aufbau wie in Variante A vor, allerdings wird das Armierungsgewebe über Schienen rechteckig um den Streifenkollektor herumgeführt. Weiterhin sieht sie einen Oberputz um den Kollektor herum vor. Der Vorteil hierbei liegt darin, dass die Aufbauhöhe des Systems reduziert wird und damit auch der Materialaufwand. Der Vorteil gegenüber Variante A wird daher gerade bei Fassaden deutlich, die nur eine geringe Belegungsdichte der solarthermischen Elemente vorweisen. Eine durch eine hohe Belegungsdichte resultierende Kleinteiligkeit würde die Kosten des Aufbaus erhöhen. Der Oberputz kann – nicht wie in der Abbildung gezeigt – auch bündig mit dem Streifenkollektor abschließen.

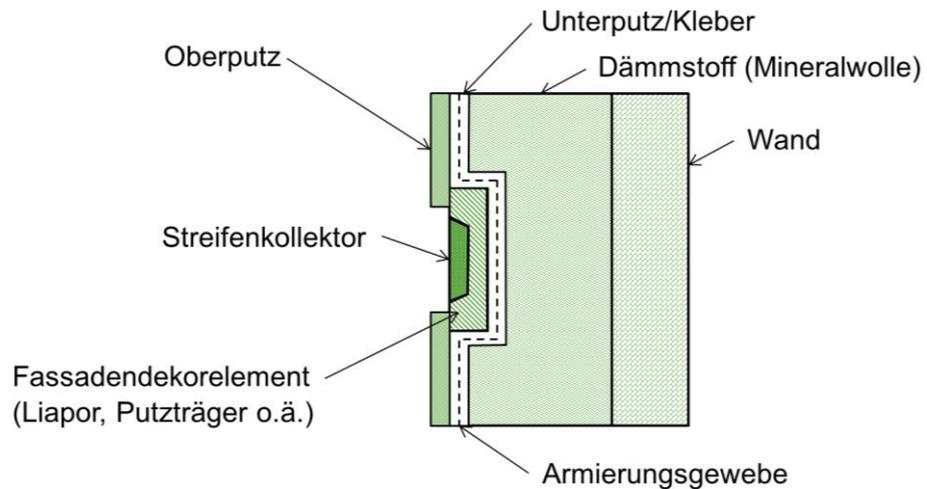


Abbildung 65: Integration des Streifenkollektors: Variante B.

Variante C

Abbildung 66 zeigt Variante C. In diesem Fall wird der Streifenkollektor direkt auf dem Unterputz bzw. Kleber angebracht und die Verbindung geklebt oder geschraubt. Der Vorteil dieses Ansatzes ist, dass keine zusätzlichen Fassadenelemente nötig wären. Die passgenaue Bearbeitung der Mineralwolle ist jedoch allgemein schwierig, so dass die Installation aufwändiger ist. Eine gute Verarbeitbarkeit ist allerdings wichtig für die Akzeptanz unter Handwerkern, die ja auch Werbung für das System bei ihren Kunden machen sollten.

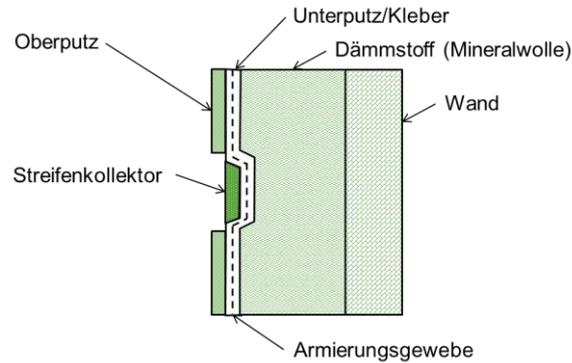


Abbildung 66: Integration des Streifenkollektors: Variante C.

Variante D

Sollten die weiteren Untersuchungen zeigen, dass eine Umsetzung dieser Konzepte nicht möglich ist, kann auf die Alternative einer hinterlüfteten Fassade zurückgegriffen werden, wie in Abbildung 67 zu sehen ist. In diesem Fall werden die Streifenkollektoren sowie die umgebenden Dekorelemente vorgehängt. Die Befestigung mit der Wand kann einfach über eine Unterkonstruktion erfolgen, die durch Dübel an einer Wand angebracht wird. Der Vorteil liegt darin, dass der Aufwand für die Integration geringer ist als in den vorherigen Varianten. Die Kosten solcher VHF liegen jedoch etwas höher als beim WDVS.

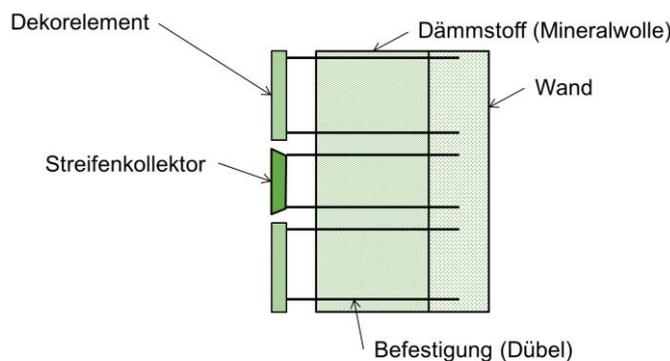


Abbildung 67: Integration des Streifenkollektors: Variante D.

Auf Basis dieser Konzepte wurden erste Versuche durchgeführt, um die Eignung der verschiedenen Ansätze zu überprüfen. Ziel der ersten Untersuchungen war es, die prinzipielle Machbarkeit eines Aufbaus, bei dem das Absorbermaterial auf Aluminium angebracht und dieses dann wiederum mit dem Hochtemperatursilikon auf das Capapor geklebt wird, zu untersuchen.

Im Mittelpunkt der bisherigen Versuche stand dabei die Frage, ob die geplanten Klebeverbindungen für die zu verwendenden Materialien grundsätzlich umsetzbar sind und die thermische Stabilität von Capapor unter den geplanten Einsatzbedingungen bzw. zu erwartenden thermischen Belastung ausreichend ist. Es wurden also die Eignung der Verbindung zwischen dem Aluminium und dem Capapor über Hochtemperatursilikon sowie die thermische Belastbarkeit von Capapor und die Haftung des Klebers unter Berücksichtigung der Erhitzung über die aufgeklebte Absorberoberfläche getestet.

Die Versuche wurden an stark vereinfachten Konstruktionen durchgeführt. Dazu wurden ein Aluminiumprofil sowie ein Metallblech, auf dem eine spektralselektive Absorberoberfläche aufgebracht war, auf eine Capapor-Oberfläche geklebt. Hierzu wurde der Kleber „Pattex Hochtemperatur Silicon“ eingesetzt (zu erkennen an der roten Farbe, Abbildung 68 und Abbildung 69).

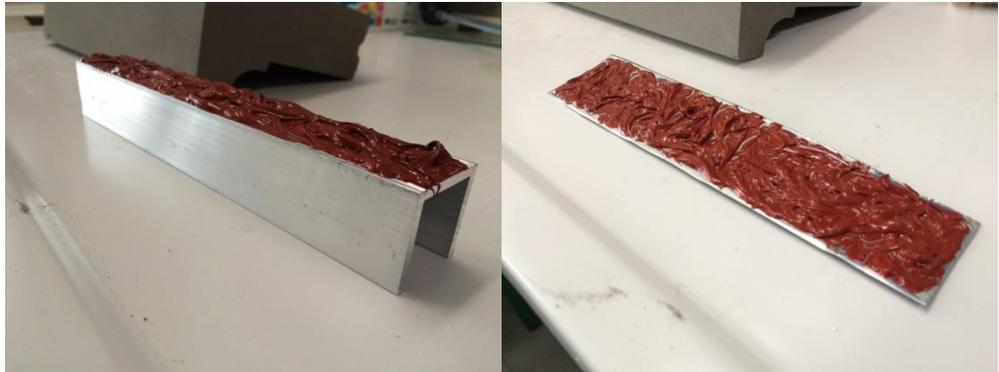


Abbildung 68: Auftragung des Hochtemperaturklebers auf Metallproben.

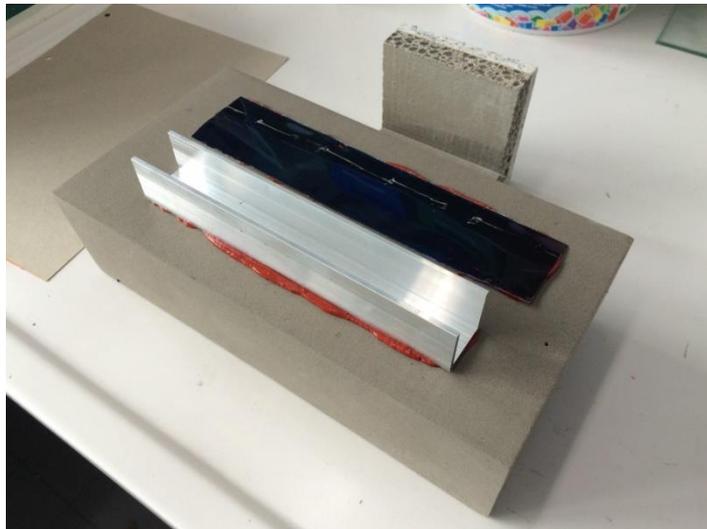


Abbildung 69: Anbringung des Aluminiumprofils und des Blechs mit dem Absorber auf Capapor mittels Hochtemperaturkleber.

Nach einer Woche Trocknungszeit des Klebers wurde das Muster einer künstlichen Bewitterung unterzogen, die aus Zyklen von 1 Stunde Beregnung, 2 Stunden Pause und 3 Stunden Wärme bestand. Die Wärme wurde mittels Halogenstrahlern eingebracht (Abbildung 70), die so eingestellte Temperatur auf der weißen Wand betrug 70 °C. Die Absorberoberfläche wurde etwas stärker erwärmt. Die Temperatur blieb jedoch relativ niedrig, da die Halogenstrahler bei wesentlich höheren Wellenlängen als die Sonne emittieren und der IR-Anteil wegen der spektralselektiven Schicht größtenteils reflektiert wird. Die genaue Temperatur konnte mit einem IR-Thermometer nicht bestimmt werden, weil der Absorber eine spektralselektive Beschichtung und daher einen niedrigen IR-Emissionsgrad aufwies. Die Probe wurde nach drei Tagen Testdauer entnommen. Es konnte keine Beschädigung der Materialien festgestellt werden. Auch die Haftung des Klebers hat nicht messbar nachgelassen.



Abbildung 70: Künstliche Bewitterung: Erhitzung der Proben durch Halogenstrahler.

Um die Temperaturverträglichkeit von Capapor detaillierter zu testen, wurde eine Probe in einem weiteren Versuch in einem Ofen erhitzt. Bei 120 °C startend wurde die Temperatur in 10-°C-Schritten auf 150 °C erhöht. Der Hochtemperatursilikonkleber ist bis 300 °C ausgelobt und sollte daher keine Begrenzung darstellen. Bereits bei 130 °C wurde ein leicht süßlicher Geruch wahrgenommen, der vom Ausgasen einer organischen Komponente zeugt. Auch wenn das Material zwar bezüglich der Stabilität auf den ersten Blick unverändert erschien, war dennoch eindeutig festzustellen, dass das Material durch die Hitze eine Veränderung erfahren hatte. Die Intensität des Geruchs nahm bei höheren Temperaturen zu, wobei ebenfalls keine offensichtlichen Veränderungen am Material auftraten.

Zunächst erscheint die Entwicklung des Streifenkollektors auf Grund seines „statischen“ Aufbaus mit weniger Risiken und Problemstellungen behaftet. Dennoch gibt es auch hier eine Vielzahl an Themen, die untersucht und für einen integrierten Einsatz in der Fassade weiterentwickelt werden müssen.

- Temperatur Fluid/Oberflächen außen/innen
- Wärmeübertrag in Wandaufbau/Innenraum
- Stoß zwischen einzelnen Elementen/Sammelkanal
- Integration Sammelkanal
- Beständigkeit der Komponenten bzgl. Temperatur/Verformung/Bewitterung
- Befestigung an tragenden Bauteilen (Rohbau)
- Übergang Streifenkollektor zu Fassadenoberfläche
- u. v. m.

Konzeptionierung und Entwicklung der Integration des Streifenkollektors

Im weiteren Projektverlauf wurde von DAW ein Konzept ausgearbeitet, das die Frage berücksichtigt, wie das Gewicht der Fassadenelemente abgeleitet werden kann. Dieses sieht eine Verankerung vor, die in der Wand befestigt wird. Die Realisierung kann mittels Schrauben erfolgen, über die das Element in der Wand eingehängt wird. Dabei kann der

Streifenkollektor auf das Fassadenelement aufgebracht werden und dieses verankert werden, wie in Abbildung 71 für Variante B dargestellt.

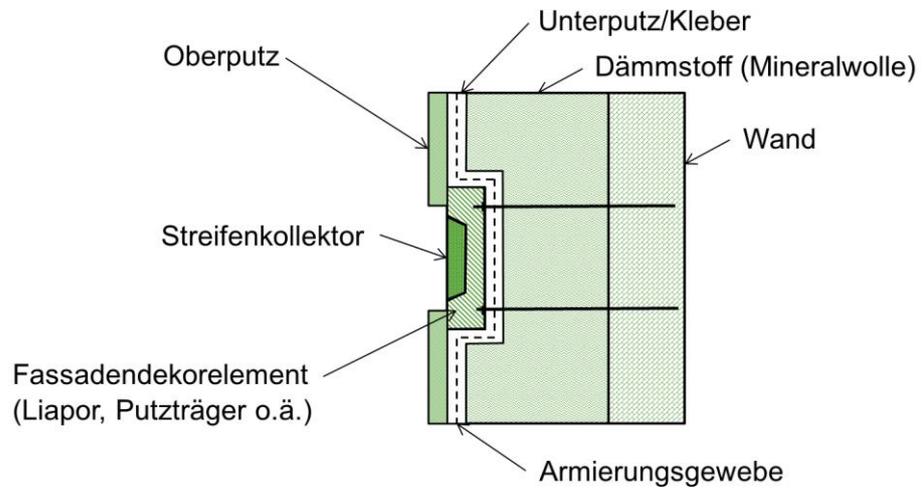


Abbildung 71: Verankerung des Dekorelementes in der Wand.

Eine weitere Möglichkeit ist es, den Streifenkollektor selbst über die Verankerung an der Wand zu befestigen und diesen zusätzlich direkt auf eine dahinter liegende Dämmschicht, beispielsweise Mineralwolle, aufzukleben. Das Dämmmaterial muss in diesem Fall jedoch infolge der Verankerung nicht die Last des Fassadenelements tragen, ähnlich wie es beispielweise bei Natursteinsockeln bereits Anwendung findet. Dieses Prinzip ist in Abbildung 72 für Variante B dargestellt. Denkbar ist auch die Übertragung auf Variante A ohne die Einbuchtung.

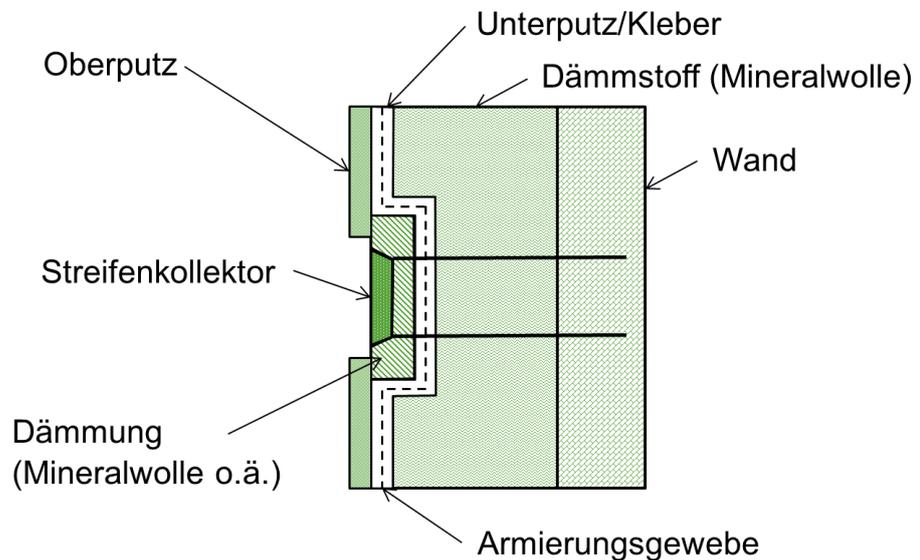


Abbildung 72: Verankerung des Streifenkollektors.

Streifenkollektorentwicklung

Nachdem erste Lösungen sowohl für Streifenkollektor als auch Solarthermische Jalousie entwickelt worden waren, beschäftigten sich die Partner intensiver mit der konstruktiven

und montagetechnischen Integration der „Kollektorsysteme“ in ein ganzheitliches Fassadensystem. Hierbei wurden neben zu untersuchenden architektonischen Gesichtspunkten in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern vor allem Materialwahl, Konstruktion, Toleranzausbildung etc. im Zuge von speziellen Anforderungen in der Fassade (vgl. auch 1.2) diskutiert und optimiert. Wichtige Punkte waren hierbei bspw. die Verformung der Komponenten und Bauteile im Zuge von statischer Belastung und thermischer Ausdehnung (vgl. bspw. Abbildung 73) und sich daraus ergebende konstruktive Lösungen und bzw. vorgegebene Fertigungs- und Montagetoleranzen.

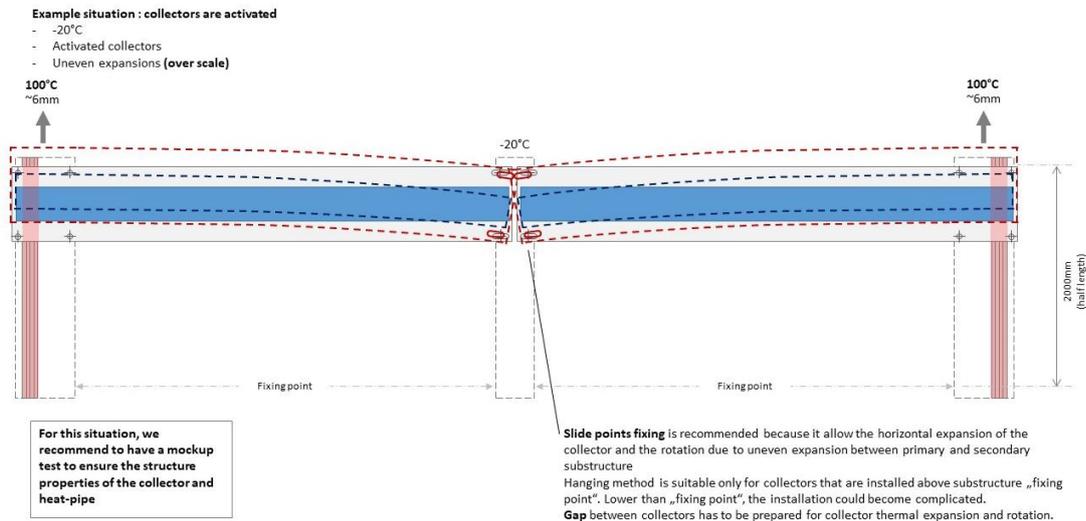


Abbildung 73: Verformungsbild und Befestigungskonzept für Streifenkollektor.

Um das Konzept für die Integration des Streifenkollektors in die Fassade weiter auszuarbeiten, wurde die erzielte Wärmedämmung näher analysiert. Dabei wurde angenommen, dass die Temperatur des Kollektorgehäuses bei 200 °C liegt, die Temperatur der Armierung aber infolge einer begrenzten Temperaturstabilität bei maximal 90 °C liegen darf.

Zunächst stand die in den vorherigen Berichten bereits beschriebene Variante mit einem Fassadendekorelement (Abbildung 74) im Mittelpunkt.

Als vielversprechendes Material für das Fassadendekorelement wurde Liapor (Abbildung 13) herangezogen. Dabei handelt es sich um einen Leichtbeton mit Blähtonperlen, der keine organischen Komponenten aufweist und die Brandklasse A erfüllt. Die Dichte dieses Materials beträgt 800 kg/m³, die Wärmeleitfähigkeit 0,36 mW/(mK). Das Material ist sowohl mit einer Fräse bearbeitbar als auch verschraubbar und ist für Hochhaus- und Brückenbau geeignet. Einsatzbeispiele sind der BMW Tower in München oder auch das Deutsche Technik Museum in Berlin.

Der Temperaturverlauf im Fall eines Streifenkollektors mit Liapor als Dämmmaterial wurde simuliert und bewertet.

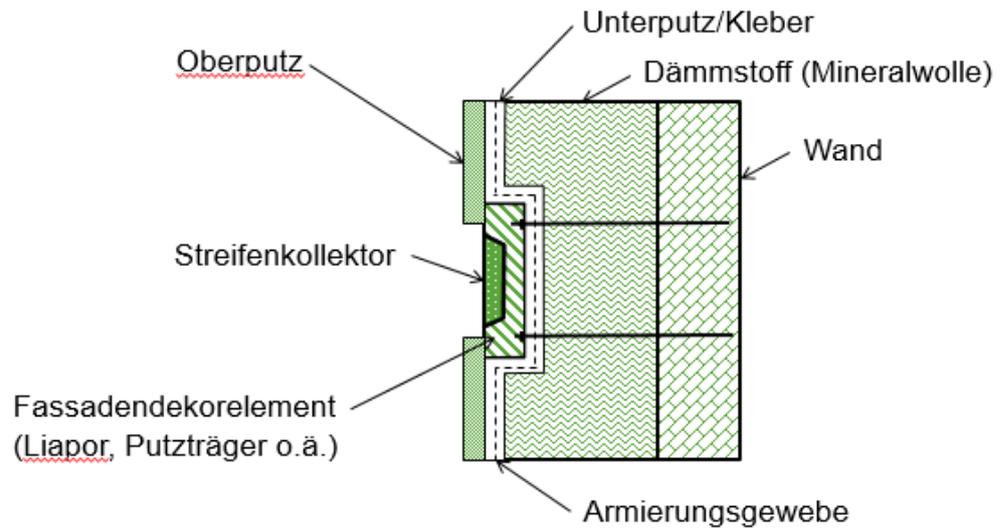


Abbildung 74: Variante des Streifenkollektors mit Fassadendekorelement.

Die vorgegebene Temperatur des Kollektorgehäuses lag dabei bei 200 °C, der Kleber wurde vernachlässigt. Die vorgegebene Dicke der Liaporschicht betrug 5 cm. Dahinter wurde die Oberputzschicht und eine 10 cm dicke Lage Mineralwolle modelliert. Die Ergebnisse zeigen, dass sich am Putz der Wand trotz der Dämmschicht eine Temperatur von etwa 150 °C einstellt (Abbildung 75).

Um die erlaubte Temperatur von 90 °C an dieser Putzseite nicht zu überschreiten, wäre demnach infolge der hohen Wärmeleitfähigkeit eine sehr hohe Schichtdicke der Liaporplatte nötig. Ein solche Platte weist jedoch bei einer Dicke von 5 cm bereits eine Masse von 40 kg/m² auf.-

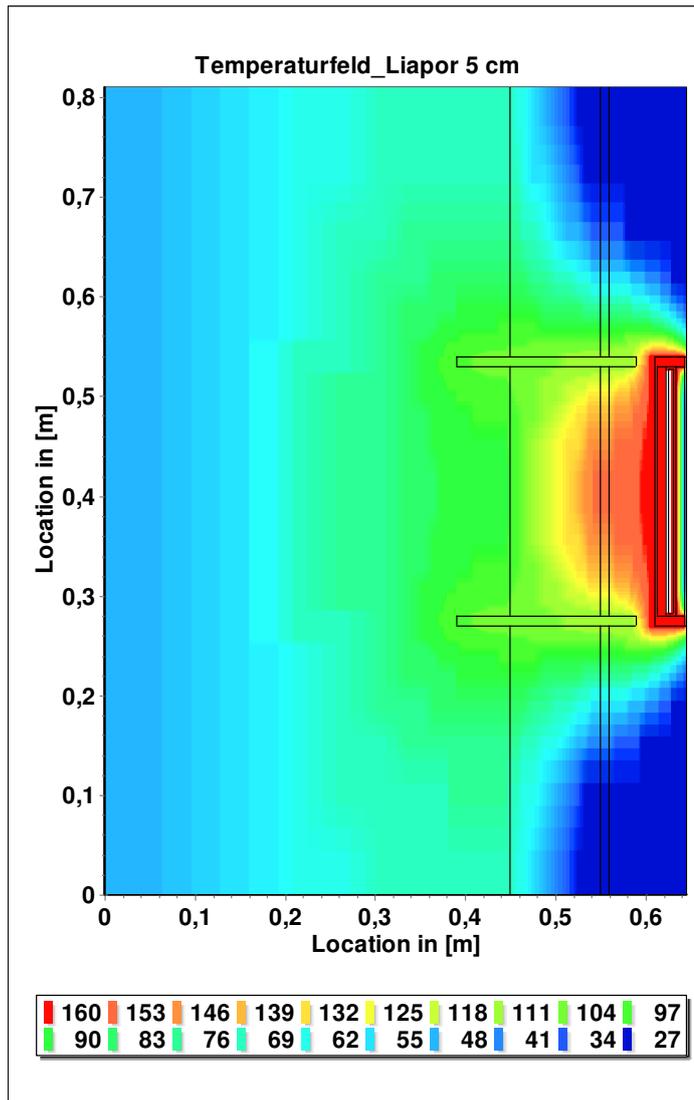


Abbildung 75: Simulierte Temperaturverteilung der Variante mit Liapor. Aufbau von links nach rechts mit Bereich der Position in Klammer: Mauerwerk (0–0,45 m), Mineralwollgedämmung (0,45–0,55 m), Putzschicht (0,55–0,56 m), Liapor (0,56–0,65 m), Kollektor.

Weiterhin wurde der Temperaturverlauf an der Putzschicht unter den jahreszeitlich bedingten Schwankungen der Umgebungstemperatur anhand von Wetterdaten nachgestellt. Die Simulation zeigt, dass bei der konstant vorgegebenen Temperatur des Kollektorgehäuses von 200 °C die Putztemperatur im Bereich von etwa 140 °C bis 160 °C schwankt (Abbildung 76).

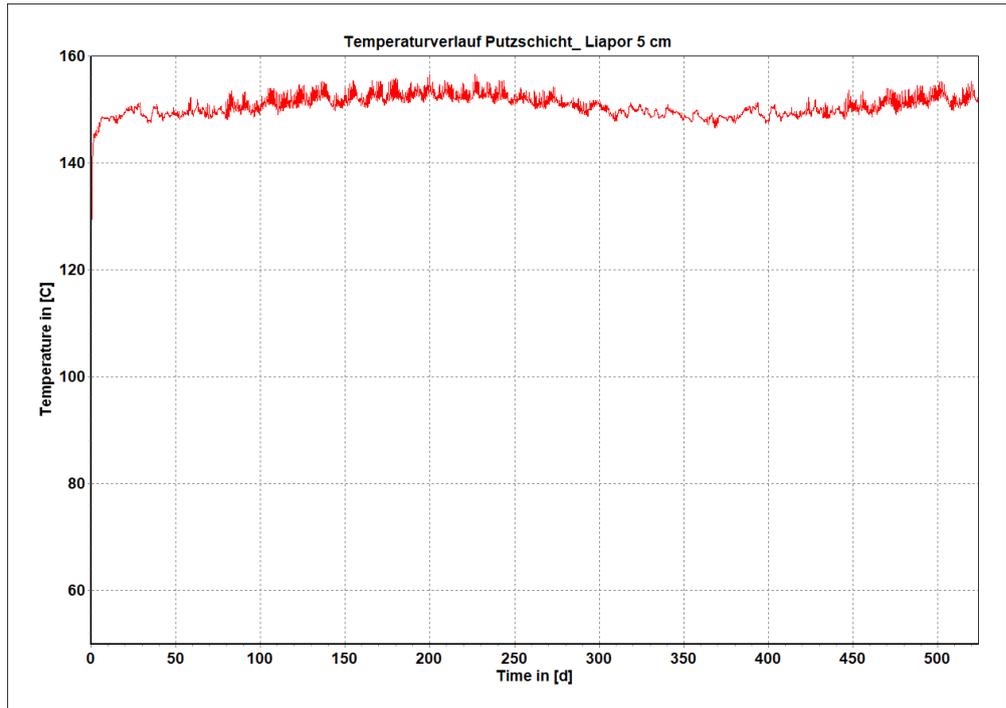


Abbildung 76: Temperaturverlauf im Fall der Liapor-Variante berechnet anhand von Wetterdaten.

Zusätzlich wurde auch die Variante, in der kein Fassadendekorelement, sondern anstelle dessen Mineralwolle als Dämmung verwendet wird, untersucht (Abbildung 77). Auch hier wurde untersucht, ob bei einer Kollektorgehäusetemperatur von 200 °C die Dauertemperaturverträglichkeit der Armierung von max. 90 °C eingehalten werden kann.

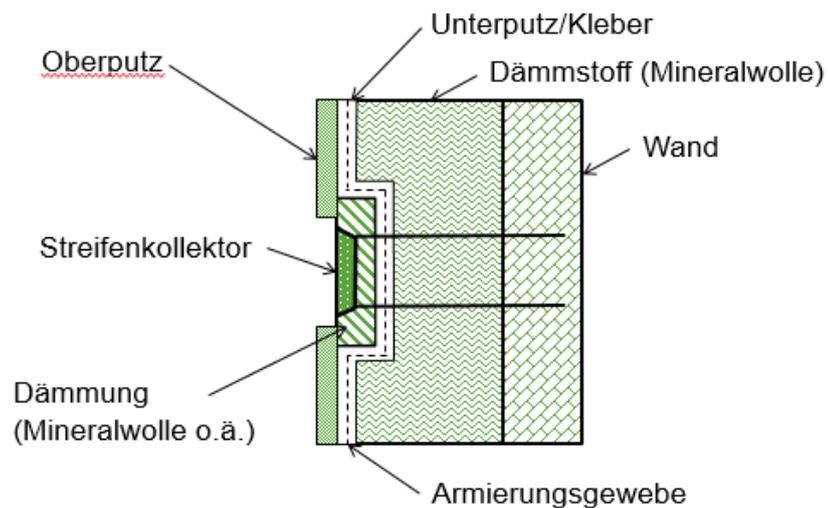


Abbildung 77: Variante mit Mineralwolle als Dämmung.

Auch hier wurde der Kleber vernachlässigt. Die Halterung bzw. Dübel wurden noch nicht berücksichtigt. Die Dicke der Mineralwolllage wurde auf 8 cm festgelegt. Hinter der Mineralwolle und der Oberputzschicht befand sich eine weitere Lage Mineralwolle, wie auch bei der ersten Variante.

Die Ergebnisse zeigen, dass in diesem Fall infolge der geringen Wärmeleitfähigkeit der Mineralwolle die Temperatur des Putzes nur auf 80 °C ansteigt (Abbildung 78). Somit ist es möglich, durch die Mineralwolle zwischen Kollektor und Oberputz den erlaubten Temperaturwert von max. 90 °C einzuhalten. Die Masse für die 8 cm dicke Schicht beträgt dabei nur 6 kg/m².

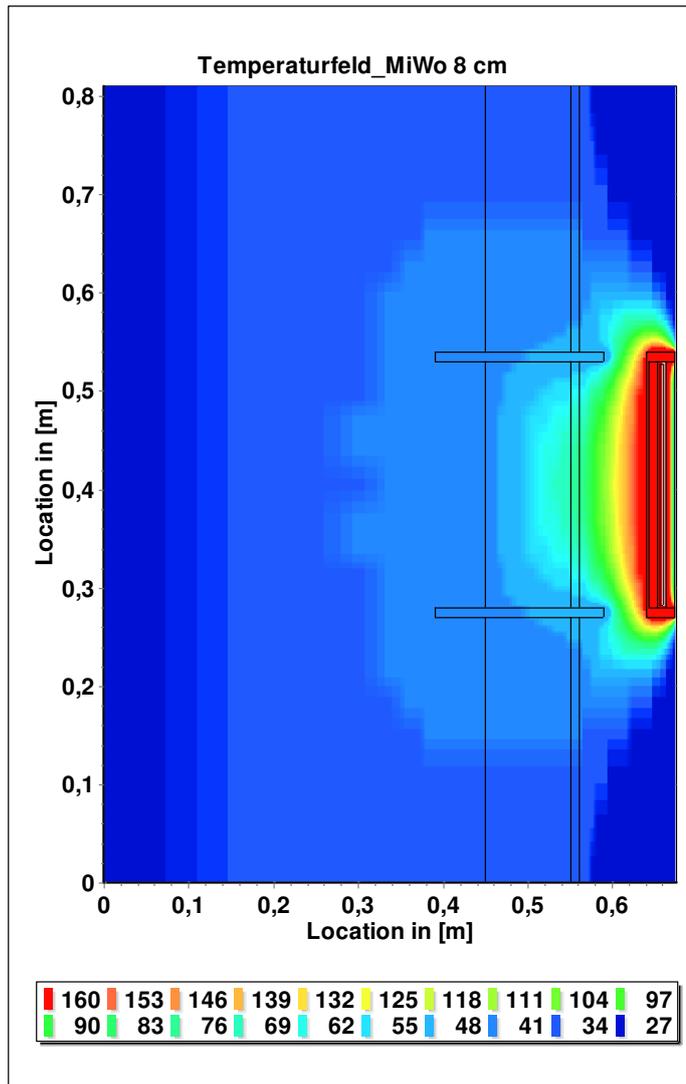


Abbildung 78: Temperaturverteilung der Variante mit Mineralwolle als Dämmung. Aufbau von links nach rechts: Mauerwerk (0–0,45 m), Mineralwolledämmung (0,45–0,55 m), Putzschiicht (0,55–0,56 m), Mineralwolle (0,56–0,68 m bzw. 0,62 m unter Kollektor), Kollektor.

Auch für diese Variante wurde der jahreszeitlich bedingte Temperaturverlauf anhand der Wetterdaten überprüft. Es zeigt sich, dass die Werte bei einer 6 cm dicken Mineralwolle-Schicht nur bei knapp über 80 °C liegen und der maximal erlaubte Wert von 90 °C zu keinem Zeitpunkt erreicht wird (Abbildung 79). Bei einer Erhöhung der Schichtdicke auf 8 cm beträgt die maximal erreichte Temperatur des Putzes nur etwa 70 °C (Abbildung 80).

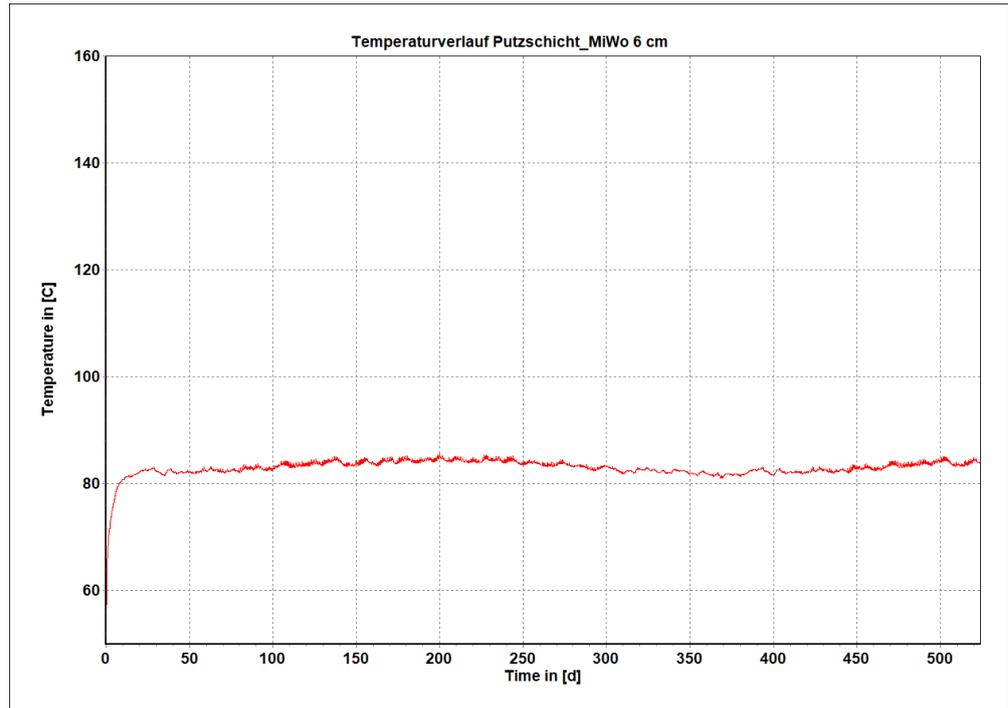


Abbildung 79: Temperaturverlauf der Variante mit Mineralwolle (Schichtdicke 6 cm) als Dämmung berechnet anhand von Wetterdaten.

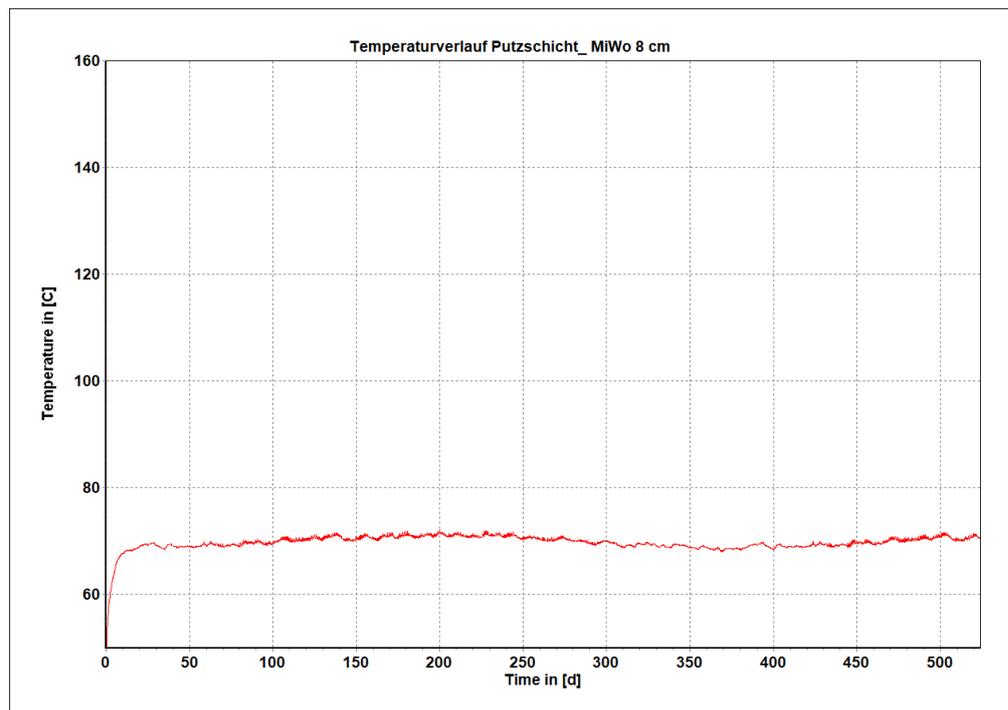


Abbildung 80: Temperaturverlauf der Variante mit Mineralwolle (Schichtdicke 8 cm) als Dämmung berechnet anhand von Wetterdaten.

Mit der Variante basierend auf Mineralwolle ist es somit möglich, den erlaubten Temperaturbereich zuverlässig einzuhalten. Jedoch muss auch hier die geeignete Dicke der Dämmlage berücksichtigt werden: Die Dämmung muss ausreichend effizient sein, um eine Aufheizung des Innenraums im Sommer zu vermeiden. Gleichzeitig erschwert eine zu dicke Dämmschicht die Integration des Kollektors in die Fassade.

Die weiteren Untersuchungen zeigten, dass die Anforderungen an die Fassade durch diese Variante nicht erfüllt werden konnten, daher wurde als Alternative auf das Prinzip der vorgehängt-hinterlüfteten Fassade zurückgegriffen. Hier ist der Integrationsaufwand geringer.

Es wurden außerdem erste Versuche zur Fertigung des Kollektorgehäuses mit Schaumglas durchgeführt, um dessen Vor- und Nachteile für eine zukünftige Fertigung des Kollektorgehäuses abzuschätzen. Dabei wurde das grundsätzliche Potenzial bestätigt (gute Formbarkeit, hochleistungsfähiger, zuverlässiger, langlebiger und umweltfreundlicher Dämmstoff). Eine Umsetzung im Streifenkollektor bedarf jedoch tiefergehenderer Analysen und Entwicklungsarbeit.

3.1.3.6 Entwicklung und Herstellung der Testmuster des Streifenkollektors

Erstes Montagemuster

Eine der wesentlichen Herausforderungen des Projekts war es, die verschiedenen Sichtweisen und Erfahrungswerte der unterschiedlichen Akteure zusammenzuführen. Um diesen Prozess zu unterstützen, wurde frühzeitig entschieden, ein kleines Handmuster des Streifenkollektors nach dem damaligen Wissensstand herzustellen. Dieses Modell sollte ein Gefühl für die Optik bieten und erste Lösungen für die verschiedenen Montage-schnittstellen aufzeigen. Geplant und gefertigt wurde dieses Handmuster am Fraunhofer ISE. Die Herstellung erfolgte mit Sonderbauteilen aus Aluminium, die teilweise gebogen und gefräst wurden. Die Begutachtung durch das Konsortium ergab diverse Änderungen insbesondere im Bereich der Glasbefestigung und der Fixierung des Absorberblechs.

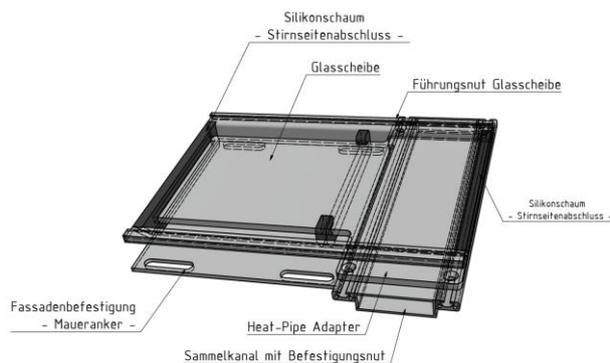


Abbildung 81: Konstruktionszeichnung des Montagemusters.

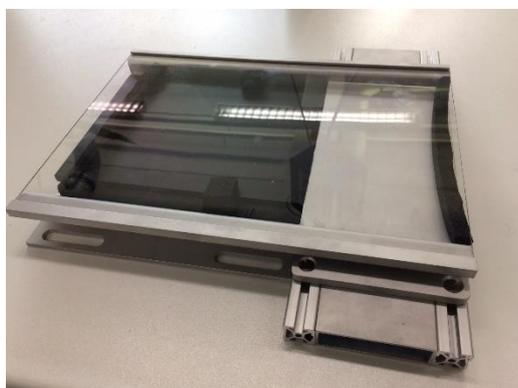


Abbildung 82: Erstes Montagemuster des Streifenkollektors.

Labortestmuster „Demoflex“

Für eine wichtige erste Bewertung der Lösungsansätze im Bereich der Fassadenintegration und der entstehenden optischen Gestaltungsmöglichkeiten wurde ein Labortestmuster entwickelt und umgesetzt. Ziel war es, den damaligen Erkenntnisstand einzufrieren und umzusetzen. Parallel dazu wurde weiter an Verbesserungen gearbeitet. Diese gingen dann nicht mehr in die Entwicklung des „Demoflex“ ein. Vorrangige Ziele bei der Entwicklung des „Demoflex“ waren eine deutliche Gewerketrennung und die erfolgreiche Verwendung marktüblicher Fassadentechnik, die als sehr wichtige Punkte für die erfolgreiche Umsetzung der Demonstrationsfassade gesehen wurden. Die thermische Optimierung stand in diesem Entwicklungsstadium an zweiter Stelle.

Wichtige Anforderungen an den „Demoflex“ waren

- Kompatibilität mit und Verwendung von marktüblicher Fassadenbautechnik
- Klare Trennung der Gewerke (Haustechnik, Fassadenbau, Kollektorbau, Architektur) mit deutlich erkennbaren Schnittstellen
- Volle Revisionierbarkeit der jeweiligen Module
- Erfüllung aller zu erwartenden baurechtlichen Anforderungen
- Anschlussmöglichkeiten für die Anbindung an den Teststand
- Relevante Größe, die Rückschlüsse auf eine spätere Demonstrationsfassade zulässt
- Mindestens 1 m² Absorberfläche
- Ansprechendes Erscheinungsbild

Umgesetzte Lösungsansätze

- Umsetzung einer vorgehängten hinterlüfteten Fassade. Verwendung von zugelassenen Bauteilen der DAW für vorgehängte hinterlüftete Fassaden.
- Das Traversen-Agraffen-System erlaubt den Austausch der Fassadenbekleidung und der Kollektoren.
- Alle Bauteile sind bis mindestens 200 °C zugelassen und bestehen aus unbrennbaren Werkstoffen. Die Glasscheiben sind vollständig eingefasst und bestehen aus gehärtetem Sicherheitsglas. Die Kollektoren wiegen unter 10 kg und sind leicht zu handhaben.
- Adapterstücke wurden nach Anforderung umgesetzt.
- Die Größe von 2 m x 1,6 m erlaubt einen ersten Eindruck des späteren Erscheinungsbilds.
- Es wurden 0,96 m² an Absorberfläche umgesetzt.
- Die Anzahl und die Anordnung der Elemente sowie die Farbgebung wurden innerhalb des Konsortiums abgestimmt.

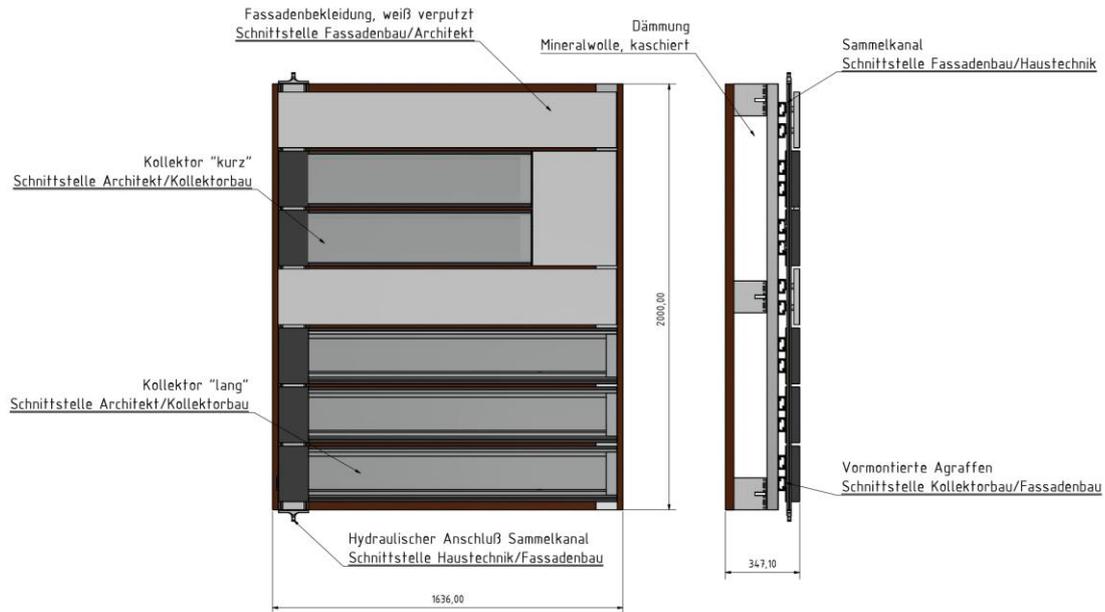


Abbildung 83: Konstruktionszeichnung des Labortestmusters des Streifenkollektors „Demoflex“.



Abbildung 84: Aufbau des „Demoflex“ in Gerstungen (links) und fertiggestellter „Demoflex“ am Fraunhofer ISE (rechts).

Eine überarbeitete Version des Streifenkollektors diente in der Folge als Basis für ein Ausstellungsmuster für den Auftritt auf den Messen glasstec 2018 und BAU 2019 (s. nachfolgender Abschnitt). Zu diesem Zeitpunkt wurden mehrere Kollektorhersteller in den Planungsprozess einbezogen, um eine spätere Fertigung für die geplante Demonstrationsfassade vorzubereiten.

Messeexponat

Nach Umsetzung des Labortestmusters „Demoflex“ wurden die Erkenntnisse und Anregungen gesammelt. Diese führten zu einem aktualisierten Stand des Streifenkollektors, der vor allem hinsichtlich Absorberfläche und Erscheinungsbild optimiert wurde. Nach erfolgter Umsetzung im CAD entschied sich das Konsortium dazu, diesen Konstruktionsstand zu verwenden, um die Messeauftritte zu unterstützen.

Dabei handelte es sich um ein „visual mock-up“ ohne Funktionalität, das die Gewerketrennung aufzeigt und das Prinzip des Streifenkollektors verdeutlicht. Dazu wurde entschieden, Teilbereiche freizuschneiden und eine Schnittansicht anzudeuten. Besondere Anforderungen waren hier eine saubere optische Erscheinung und eine Größe, die einen einfachen Transport ermöglicht.

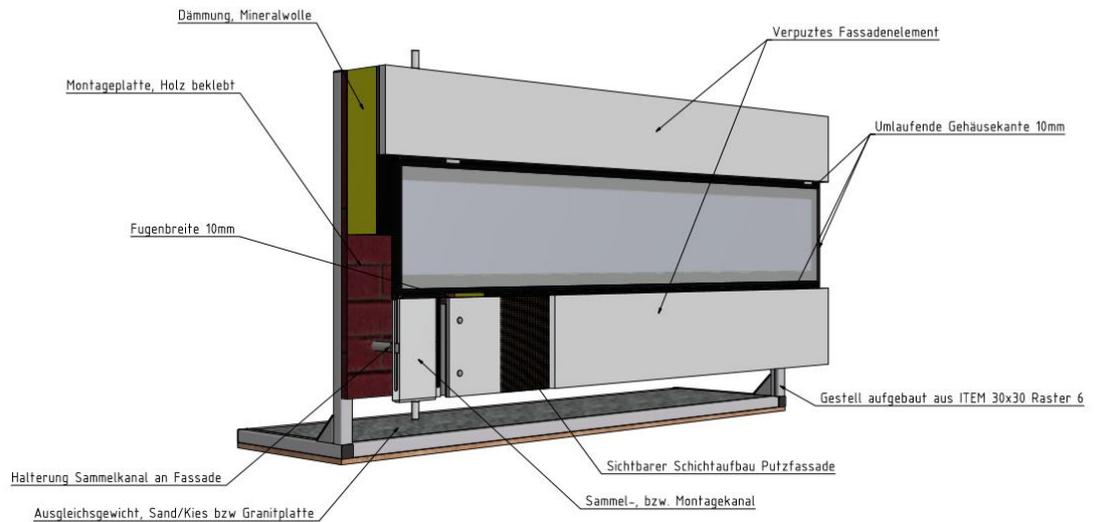


Abbildung 85: Konstruktionszeichnung des Messeexponats.



Abbildung 86: Messeexponat des Streifenkollektors auf der Messe BAU 2019. © Fraunhofer-Allianz Bau/Marc Müller

Zweites Montagemodell

Die notwendige Schulung von Fachkräften sollte von einer Demonstrationswand und entsprechenden – funktionsunfähigen – Montagemodellen unterstützt werden. Diese Montagemodelle sind in ihren Abmessungen, Gewicht und den Schnittstellen baugleich zu den realen Kollektoren der Demonstrationsfassade. Als Sammelkanal dient ein Reststück aus der Produktion der Demonstrationsfassade.

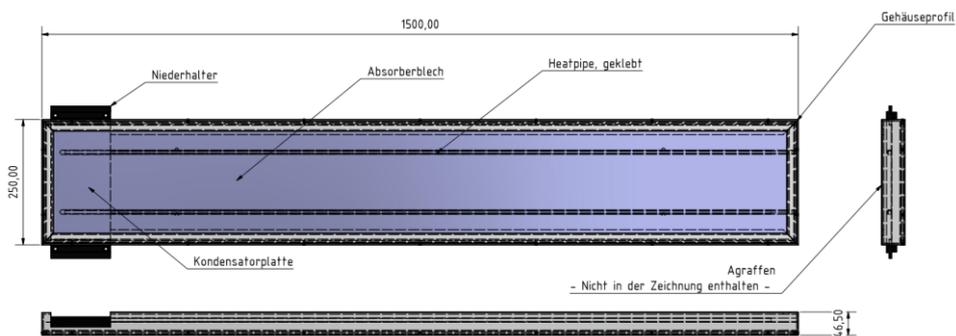


Abbildung 87: Konstruktionszeichnung des Montagemodells.



Abbildung 88: Montagemodell des Streifenkollektors.

Um die Montagemodelle innerhalb des Kostenrahmens möglichst realitätsnah abzubilden, wurde das beim Streifenkollektor geplante Gehäuseprofil mithilfe von vernieteten Standardprofilen nachgebaut. Bodenplatte und Glasscheibe sind baugleich zu den späteren Komponenten. Die Schnittstellen (Agraffen, Niederhalter, Kondensatorplatte) wurden baugleich zu den realen Kollektoren umgesetzt. Ein wichtiger Punkt war die Wartungsfreundlichkeit der Montagemodelle, da davon ausgegangen wurde, dass es bei häufiger Nutzung als Schulungsobjekt zu Glasbrüchen oder anderen Schäden kommen wird. Entsprechend lassen sich die Montagemodelle vergleichsweise leicht demontieren und defekte Bauteile austauschen.

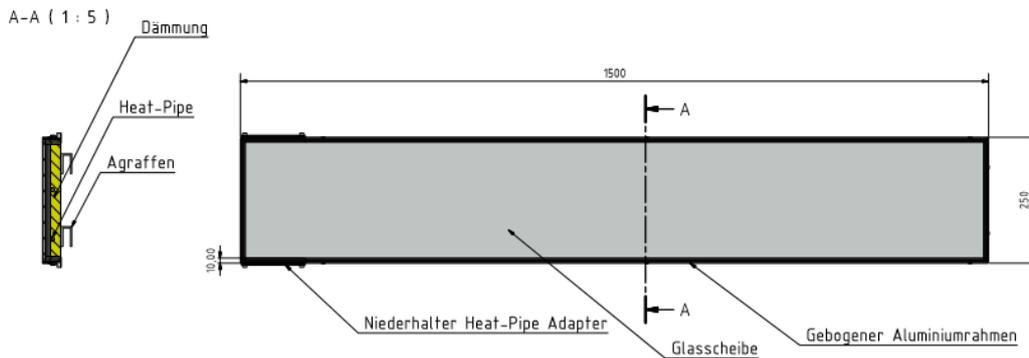
Streifenkollektor-Demonstrationsfassade

Für die Umsetzung der Demonstrationsfassade wurde der letzte Konstruktionsstand des Konsortiums eingefroren (Abbildung 89) und an den Kollektorbauer (Wagner Solar) übergeben. Aufgrund von langjähriger Erfahrung und einer Limitierung durch den bereits vorhandenen Maschinenpark bei Wagner Solar wurde dieser Konstruktionsstand noch einmal etwas überarbeitet (Abbildung 90).

Wesentliche Änderungen waren:

- Aufbau des Kollektorgehäuses aus Strangpressprofilen und einer genieteten Bodenplatte
- Breiterer Rand (10 mm → 17,5 mm)
- Nutzung einer Gummilippendichtung für die Glasscheibe
- Massiver Heat-Pipe-Adapterblock, um ein geschlossenes Gehäuse zu ermöglichen
- Abdichtungen im Bereich der Heat-Pipe-Adapter

Der Sammelkanal wurde unverändert übernommen.



.....
auf und Ergebnisse des
.....

Abbildung 89: Konstruktionszeichnung der Streifenkollektoren für die Demofassade.

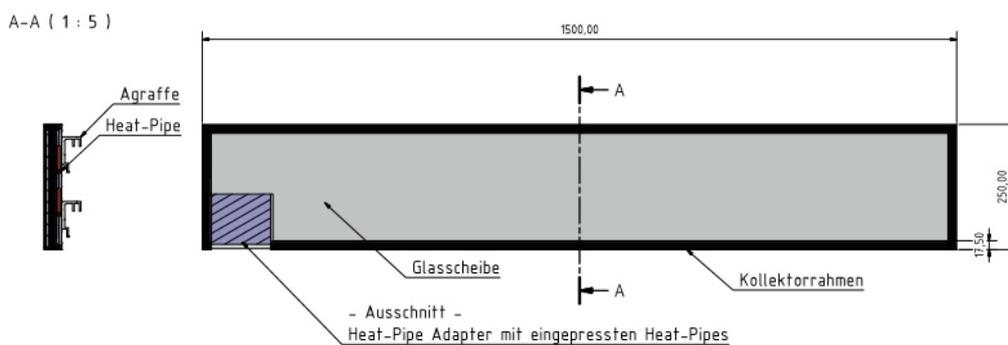


Abbildung 90: Schnittdarstellung der Streifenkollektoren für die Demofassade, modifiziert durch Kollektorbauer.

3.1.3.7 Entwicklung der Wärmeübertragung von Absorber zum Sammelkanal mit beweglichen Lamellen - Solarthermische Jalousie

Absorber

Die gewählte Lamellenoberfläche ist entscheidend für die solarthermische Funktion, beeinflusst aber auch die passiven solaren Wärmeinträge ins Gebäude (d. h. die g-Werte). In ArKol wurde zunächst die Maximierung der solarthermischen Erträge verfolgt. Daher wurde ein herkömmliches Solarabsorberblech aus Kupfer mit spektral-selektiver Beschichtung für das Testmuster verwendet. Durch eine Variation der Lamellenoberfläche – z. B. durch Verwendung einer Oberfläche mit geringerer Absorption und höherer Reflexion - könnte sowohl das Erscheinungsbild als auch die passiven solaren Wärmeinträge, d. h. der g-Wert, beeinflusst werden. Dafür könnte z. B. eine graue, diffus reflektierende Lamellenoberfläche, wie in herkömmlichen Raffstoren üblich, verwendet werden. Der Einfluss der Lamellenoberfläche auf den g-Wert ist in Abschnitt 3.1.4.4 per Simulation untersucht. Der genaue Einfluss der Variation der Lamellenoberfläche auf den g-Wert sollte jedoch in vergleichenden Experimenten untersucht werden, um abschließend bewertet werden zu können.

Heat-Pipe-Auswahl

Die horizontale Ausrichtung der Lamellen mit Kippwinkeln im Bereich von mindestens 0-80° stellt hohe Anforderungen an die Heat-Pipe. Wie in Abschnitt 3.1.3.3 beschrieben, wurden kommerzielle Docht-Heat-Pipes ausgewählt, die unter möglichst großer Neigung

an den Absorber angeschweißt wurden. Die Docht-Heat-Pipes ermöglichen eine Heat-Pipe-Funktion auch bei Heat-Pipe-Winkeln nahe der Horizontalen. Durch das Anbringen der Heat-Pipes diagonal entlang des Absorberblechs ergibt sich bei Lamellenkippwinkeln größer als 0° ein Neigungswinkel der Heat-Pipe, wodurch die Heat-Pipe-Funktion zusätzlich durch die Schwerkraft unterstützt wird (siehe Abbildung 91). Bei gekippter Lamelle besteht somit ein Höhenunterschied zwischen Verdampfer und Kondensator der Heat-Pipe.



Abbildung 91: Unterseite einer Lamelle der Solarthermischen Jalousie mit diagonal angebrachter Heat-Pipe zur Vergrößerung des Neigungswinkels der Heat-Pipe.

Als zusätzliche Anforderung sollte die Heat-Pipe einen möglichst kleinen Durchmesser haben, um eine dünne Lamelle zu ermöglichen. Lamellen konventioneller Raffstore haben häufig einen gebördelten Rand mit ca. 3-4 mm Dicke. Neben der Ansichtsbreite ist die Lamellendicke auch für die Stapelhöhe oder Pakethöhe der gerafften Lamellen entscheidend. Das geraffte Lamellenpaket wird üblicherweise vor opake Bereiche wie der Bodenplatte oder einer abgehängten Decke platziert, wodurch die Pakethöhe begrenzt ist. Durch Verwendung von Heat-Pipes mit 8 mm Durchmesser konnten sowohl verhältnismäßig dünne Lamellen realisiert, als auch die Heat-Pipe-Funktion sichergestellt werden. Mit dem Durchmesser der im Testmuster verwendeten Heat-Pipe von 8 mm kann eine Lamellendicke und somit Stapelhöhe von 10-12 mm erreicht werden.

Die Verdampferlänge der Heat-Pipe bestimmt sich durch die Lamellenlänge, die wiederum durch die Breite der verwendeten Fassadenelemente bzw. des Fassadenrasters bestimmt ist. Um die Lamellendicke gering zu halten, wurde kein verdickter Kondensator verwendet, wie in solaren Heat-Pipes sonst üblich (Jack und Rockendorf 2013). Der Durchmesser der Heat-Pipe ist daher durchgängig 8 mm. Die Kondensatorlänge wurde daher so gewählt, dass die Kondensatoroberfläche der marktüblicher solarer Heat-Pipes mit verdicktem Kondensator entspricht (Jack und Rockendorf 2013). Für 8 mm Durchmesser wurden 100 mm Kondensatorlänge gewählt.

Schaltbare thermische Kopplung

Die wohl wichtigste Teilfunktion der solarthermischen Jalousie ist die schaltbare thermische Kopplung. Die Entwicklung der Teilfunktionen der schaltbaren thermischen Kopplung und des Jalousiemechanismus für die solarthermische Jalousie wurden parallel verfolgt, da sich die Funktionen gegenseitig beeinflussen. Die Teilfunktionen wurden in einem ersten mechanischen Teilfunktionstestmuster getestet, um die Machbarkeit der gewählten Lösungen und die Zuverlässigkeit der gewählten Bauteile zu testen. Bei der Entwicklung wurde neben der thermischen Effizienz und geringen Kosten bereits im frühen

Stadium auch stark auf die Ästhetik und Zuverlässigkeit geachtet. D. h. insbesondere die Minimierung der opaken Fläche und die gute Wartbarkeit des Fassadenelements werden beachtet.

Für die schaltbare thermische Kopplung wurden zunächst verschiedene Varianten der Kontaktfläche zwischen Heat-Pipe-Kondensator und Sammelkanal entwickelt, sowohl mit Anpressung in Richtung der Heat-Pipe-Achse als auch radial von der Seite der Heat-Pipe. Zur Vergrößerung der Kontaktfläche der zylindrischen Heat-Pipe wurde hierbei in allen Varianten ein Adapter vorgesehen, wie z. B. in Abbildung 91 zu sehen.

Der Mechanismus der schaltbaren thermischen Kopplung, der für Anpressen und Öffnen des Kontakts zwischen Adapter und Sammelkanal verantwortlich ist, wurde mit einem beweglichen Anpressrahmen umgesetzt, der alle Lamellen gleichzeitig bewegt (vgl. Abbildung 4). Mit diesem soll es möglich sein bei Verwendung weniger Aktuatoren eine gleichmäßige Kraftübertragung auf jeden Adapter bzw. Lamelle zu gewährleisten. Dieser Ansatz kann für beide möglichen Anpressrichtungen verwendet werden (vgl. Abbildung 92).

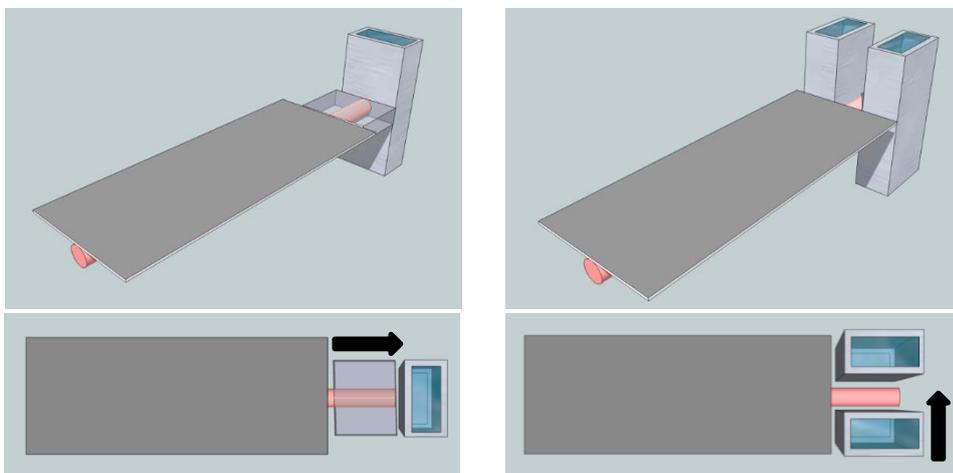


Abbildung 92: Möglichkeiten für die Anpressrichtung (schwarze Pfeile): Frontales (linke Seite) und seitliches Anpressen (rechte Seite). Adapter zur Verdeutlichung semitransparent dargestellt, Lamellenoberfläche optional spektral-selektiv beschichtet. (Haeringer et al. 2017a)

Des Weiteren wurden verschiedene Mechanismen für das Öffnen und Schließen entwickelt und im Hinblick auf Kosten, Zuverlässigkeit, Hilfsenergiebedarf, thermischen Widerstand, opake Fläche und Öffnungszeitbedarf analysiert (Haeringer et al. 2017a). Diese Mechanismen unterscheiden sich im Aktuator zur Bereitstellung der Kraft bzw. im Mechanismus zur Kraftübertragung auf den Anpressrahmen Tabelle 9.

Tabelle 9: Übersicht der untersuchten Mechanismen der schaltbaren thermischen Kopplung

	<i>Mechanismus zum Anpressen</i>	<i>Mechanismus zum Öffnen</i>
1	Federn	Pneumatisch mit Druckluftkissen
2	Federn	Hubmagnete
3	Nockenwelle (mit Elektromotor)	
4	Schubkurbelantrieb (mit Elektromotor)	
5	Zahnstangenantrieb (mit Elektromotor)	

Nach ihren Antriebsmechanismen können die fünf Mechanismen in drei Kategorien unterteilt werden: Variante 1: pneumatisch, Variante 2: elektromagnetisch, Varianten 3-5: motorgetrieben. In Variante 1 wird ein langes Druckluftkissen vertikal an den Anpressrahmen angebracht. Dieses arbeitet zum Öffnen gegen die Federn, die mittels Anpressrahmen den Kontakt zwischen Adapter/Heat-Pipe und Sammelkanal herstellen. Variante

2 funktioniert analog mit Hubmagneten entlang des Anpressrahmens. Variante 3 bis 5 verwenden sowohl zum Öffnen als auch Anpressen einen Elektromotor (z. B. Schrittmotor) mit Getriebe und unterscheiden sich im Mechanismus, der die Kraft auf den Anpressrahmen überträgt. Variante 3 nutzt hierfür ein oder zwei vertikal angebrachte Nockenwellen, deren Nocken direkt den Anpressrahmen bewegen. Variante 4 und 5 nutzen einen Schubkurbelantrieb, bzw. einen Zahnstangenantrieb, die entweder oben oder unten am Anpressrahmen angebracht sind und diesen bewegen.

Bezüglich des Wärmeübergangs ist eine große Anpresskraft vorteilhaft, um den thermischen Kontaktwiderstand zu verringern, wie im folgenden Abschnitt erläutert wird. Je größer die angestrebten Anpresskräfte sind, desto größer und teurer ist jedoch der Mechanismus und die Anforderungen an alle verwendeten mechanischen Bauteile steigen. Während einem üblichen Betrieb der solarthermischen Jalousie, ist die schaltbare thermische Kopplung den Großteil der Zeit im geschlossenen, d. h. im angepressten Zustand. Nur für das Verstellen der Lamellenposition muss die Kopplung geöffnet werden. Daher sollte der Mechanismus für das Anpressen möglichst wenig oder keine Energie verbrauchen, um den Hilfsenergiebedarf gering zu halten. Aus diesem Grund sind Federn (Variante 1 und 2) bzw. Motorantriebe mit einer selbsthemmenden Kraftübertragung (Varianten 3 - 5, z. B. in Kombination mit Schneckengetriebe) entworfen worden. Die Zuverlässigkeit, insbesondere Langzeitstabilität, stellt große Herausforderungen an die Mechaniken, da typische Lebensdauern von Fassadenelementen 20 bis zu 30 Jahre sind und diese möglichst wartungsfrei sein sollten. Bei Verwendung von Motoren und Getrieben (Varianten 3 - 5) sollten diese verschleiß- und schmiermittelfrei sein, um den Fassadenzwischenraum in dem die Jalousie montiert wird frei von Rückständen zu halten.

Die Zeit zum Öffnen, d. h. die Verzögerung bis die Jalousie verfahren werden kann, wird durch den Öffnungsmechanismus bestimmt. Durch die große Übersetzung ist ein Schneckengetriebe hierbei hinderlich. Hubmagnete scheinen diesbezüglich eine bessere Wahl. Allerdings kann durch die abrupte Bewegung der Hubmagnete eine störende Geräuschentwicklung entstehen (Knallen). Um die opake Fläche gering zu halten sind möglichst platzsparende Mechanismen vorzuziehen. Dabei gilt allgemein je mehr Kraft die Mechanismen aufbringen können, desto größer müssen sie ausgelegt werden. Außerdem hat die Positionierung der Mechaniken Einfluss auf die opake Fläche.

Der qualitative Vergleich der fünf untersuchten Mechanismen ist in (Haeringer et al. 2017a) dargestellt. Aufgrund der Bewertung wurde ein Mechanismus mit Nockenwelle und einer mit elektromagnetischem Hubmagnet in Kombination mit Federn als mechanische Testmuster ausgelegt.

Der Hauptunterschied dieser beiden Varianten ist die Art des Anpressmechanismus, der den Anpressrahmen bewegt (vgl. Abbildung 4). Die erste Variante nutzt zum Anpressen Federn. Zum Öffnen des Anpressmechanismus werden selbsthaltende Hubmagnete (Elektromagnete) verwendet. Die zweite Variante nutzt zum Anpressen und Öffnen eine Nockenwelle angetrieben von einem Schrittmotor. Beide Testmuster werden am Ende von Abschnitt 3.1.3.7 vorgestellt.

Bestimmung der Kontaktwiderstände

Da der Kontakt zwischen Adapter, der den Heat-Pipe-Kondensator umschließt und Sammelkanal kraftschlüssig durch Anpressen ist, besteht bei dem Wärmeübergang ein thermischer Kontaktwiderstand. Dieser Kontaktwiderstand ist auf dem Nutzwärmepfad zwischen Absorber und Fluid im Sammelkanal kritisch. Die Berechnung des thermischen Kontaktwiderstandes ist mit verschiedenen Modellen möglich (vgl. (Bejan und Kraus 2003)). Haupteinflussgrößen sind Anpressdruck und Oberflächenbeschaffenheit, insbesondere die Rauheit. Wichtige relevante Materialgrößen sind die thermische Leitfähigkeit und die Mikrohärtigkeit der Oberfläche. Der thermische Kontaktwiderstand

sinkt annähernd umgekehrt proportional mit zunehmender Kraft ($R \sim \frac{1}{F}$) und sinkt mit abnehmender Rauheit (vgl. Abbildung 93). Daher ist eine möglichst geringe Rauheit und eine möglichst große Anpresskraft anzustreben. Zudem müssen beide Flächen eine sehr gute Planarität haben, damit Kontakt über die gesamte Fläche besteht. Für zwei kontaktierende Flächen von $A = 10\text{ cm} \times 1.5\text{ cm}$ mit einer Rauheit $\sigma = 1,6\ \mu\text{m}$, einer Anpresskraft von 10 N erhält man für zwei kontaktierende Aluminiumflächen thermische Kontaktwiderstände in der Größenordnung von $R_c \approx 0,25\ \frac{\text{K}}{\text{W}}$. Die Oberflächenbeschaffenheit der Kontaktflächen (Rauheit und Planarität) muss bezüglich Kosten und thermischen Kontaktwiderstand optimiert werden.

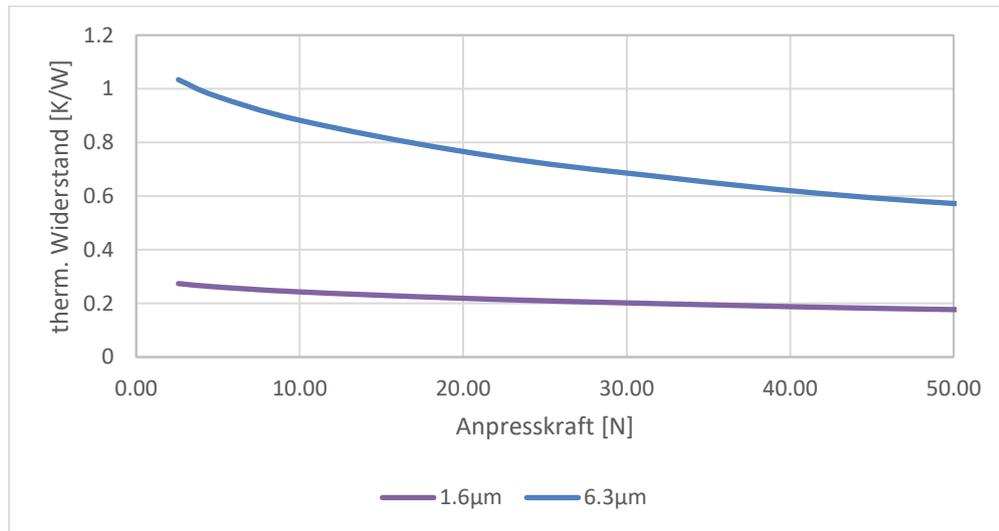


Abbildung 93: Thermischer Kontaktwiderstand zwischen zwei Aluminiumoberflächen mit Kontaktfläche von $10 \times 1.5\text{ cm}^2$ berechnet nach (Bahrami et al. 2004) in Abhängigkeit der Kraft und für verschiedene Oberflächenrauheiten.

Um die theoretischen Werte des thermischen Kontaktwiderstandes zu überprüfen, wurde eine Messreihe am Kontaktwiderstandsteststand durchgeführt (vgl. Abschnitt 3.1.3.2). Der untersuchte Testadapter besitzt eine einfache rechteckige Geometrie und dient zum Vergleich mit den theoretisch bestimmten thermischen Kontaktwiderständen und zum Vergleich mit thermischen Simulationsrechnungen des Adapters.

Die Experimente wurden über einen Bereich von Anpresskräften von 2 N bis 100 N und einer thermischen Leistung von 4 W und 16 W durchgeführt (Abbildung 94). Die Sensoren wurden auf der Adapterseite in der Nähe der Kontaktfläche platziert und eine Platte mit Sensoren wurde fest auf dem Sammelkanal angebracht. Es zeigte sich eine große Abweichung zwischen experimentellen Ergebnissen und den erwarteten theoretischen Werten für eine Oberflächenrauheit von $1.6\ \mu\text{m}$. Bei einer Anpresskraft von 10 N ergaben die theoretischen Berechnungen 0.24 K/W für den thermischen Kontaktwiderstand der thermischen Kopplung. Andererseits ergaben die experimentellen Ergebnisse einen thermischen Widerstand, der um eine Größenordnung größer war als die theoretischen Werte mit Werten zwischen 2 und 7 K/W , wie in Abbildung 94 dargestellt.

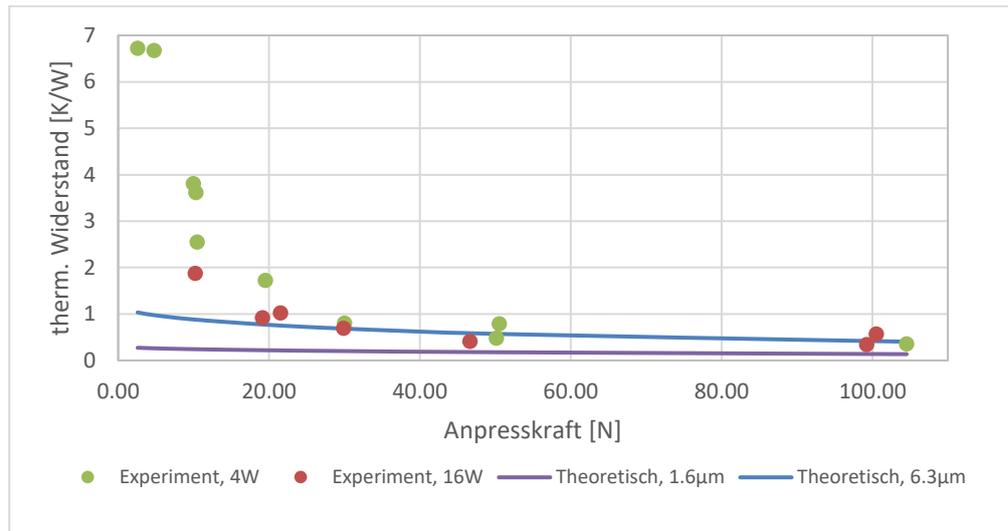


Abbildung 94: Experimentelle des thermischen Kontaktwiderstands bei verschiedenen thermischen Leistung im Vergleich zu theoretischen Ergebnissen mit verschiedenen Oberflächenrauheiten.

Die Werte bei niedrigen Anpresskräften zeigten in beiden Versuchsreihen mit unterschiedlicher Heizleistung große Unterschiede, bei Kräften von mehr als 20 N erzeugen beide Reihen jedoch vergleichbare Werte. Dies deutet darauf hin, dass bei diesen niedrigen Anpresskräften eine ungleichmäßige Belastung besteht, wobei die beiden Kontaktflächen nicht vollflächig in Kontakt sind (Linien- oder Punktkontakt). Dies würde zu Makro-einschnürungen und Lücken zwischen den Kontaktflächen führen, wie in Abbildung 95 dargestellt. Eine Erhöhung des Drucks würde es ermöglichen, einen verbesserten Kontakt herzustellen. Als weitere mögliche Erklärung für die gemessenen hohen thermischen Widerstände ist eine mangelnde Planarität der Kontaktfläche oder eine erhöhte Oberflächenrauheit durch Kratzer und Verschmutzungen. Der Vergleich der Messdaten zur theoretischen Berechnung bei einer erhöhten Oberflächenrauheit von 6.3 μm zeigte bei Anpresskräften oberhalb von 20 N eine bessere Annäherung an die Messwerte. Für kleine Kräfte genügt die Oberflächenrauheit jedoch nicht als alleinige Erklärung der Abweichung. Es bleibt festzuhalten, dass der Kontaktwiderstand ein entscheidender Parameter der schaltbaren thermischen Kopplung ist.

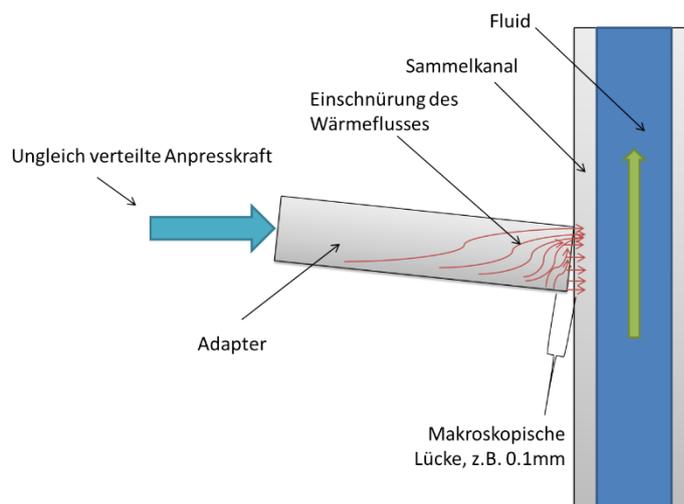


Abbildung 95: Mögliche Erklärung der Abweichung zwischen theoretischen Werte und experimentellen Werten des thermischen Kontaktwiderstandes. Adaptiert aus (Haidar 2017).

Außerdem wurden Messungen mit einer Wärmeleitfolie zwischen Adapter und Sammelkanal durchgeführt. Die Verwendung einer Wärmeleitfolie zeigte hierbei jedoch keine deutliche Verbesserung des thermischen Kontaktwiderstands (Abbildung 96).

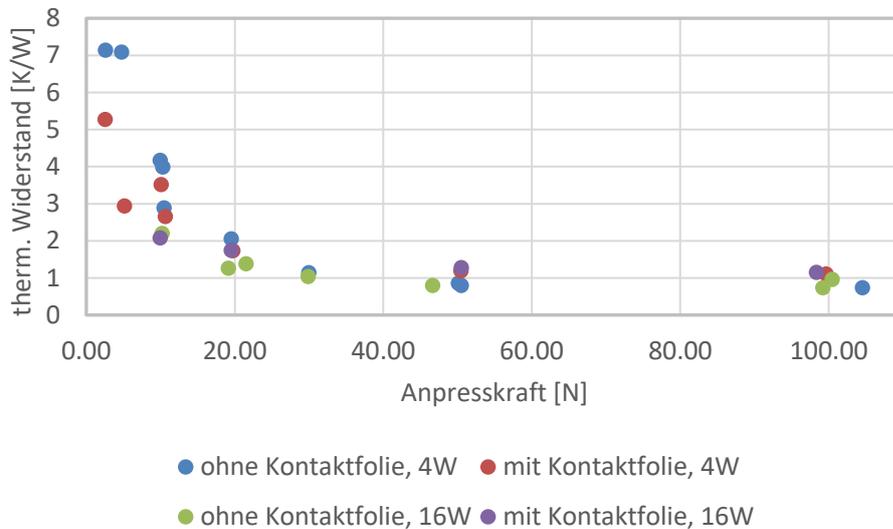


Abbildung 96: Vergleich des thermischen Kontaktwiderstandes mit und ohne Wärmeleitfolie bei Heizleistungen von 4W und 16W.

Entwurf und Optimierung des Adapters

Für die Verwendung von zylindrischen Heat-Pipes in der STJ und axialer Anpressung ist ein Adapter nötig, der den Kondensator der Heat-Pipe umschließt und die Wärme effizient an das Sammelrohr und dann auf das Fluid überträgt (vgl. Abbildung 4). Dies funktioniert primär über eine vergrößerte Kontaktfläche zwischen Adapter und Sammelkanal verglichen mit einem direkten Kontakt zwischen der zylindrischen Heat-Pipe und dem Sammelkanal. Zudem muss eine Rotation der Lamelle möglich sein. Die Anpresskraft, die vom Anpressrahmen auf den Adapter wirkt, muss unter allen Neigungswinkeln der STJ gewährleistet sein, was beim Entwurf der Adapter berücksichtigt werden muss. Um für die seitliche Anpressrichtung (vgl. Abbildung 92) einen Adapter zu ermöglichen, müsste sich dieser um die Heat-Pipe drehen lassen, dadurch entstünde ein zweiter Kontaktwiderstand. Da der thermische Kontaktwiderstand als kritisch im Nutzwärme pfad eingeschätzt wurde, wurde die seitliche Anpressrichtung nicht weiterverfolgt (Haeringer et al. 2017a). Der Fokus der Adapteroptimierung lag daher auf Anpressung in Richtung der Heat-Pipe-Achse.

Die genaue Form des Adapters wurde mit dem Simulationsprogramm COMSOL Multiphysics 5.0 und dem 3D-CAD Programm Autodesk Inventor Professional 2014 optimiert. Hauptanforderungen sind dabei:

- Hohe thermische Leitfähigkeit zwischen Heat-Pipe-Kondensator und Anpressfläche zum Header
- Anpressung unter allen Rotationswinkeln der Lamelle (~0-90°) gewährleistet

Als zusätzliche Anforderungen wurden geringes Gewicht, hohe Ästhetik (d. h. insbesondere geringe resultierende opake Fassadefläche) und geringe Kosten definiert. Um die Anpressung unter allen Rotationswinkeln zu gewährleisten, wird der Adapter um 45° gegenüber der Lamelle gedreht auf das Kondensatorende der Heat-Pipe angebracht. Wie in Abbildung 97 zu sehen, besitzt der Adapter seitlich Flächen zum Anpressen. Diese werden so entworfen, dass der Überlapp mit dem Anpressrahmen unter allen Winkeln

gewährleistet ist und ein Herausrutschen des Adapters aus dem Anpressrahmen nicht möglich ist, aber gleichzeitig die Breite, die mit der Tiefe des Fassadenelements zusammenhängt, minimal ist.

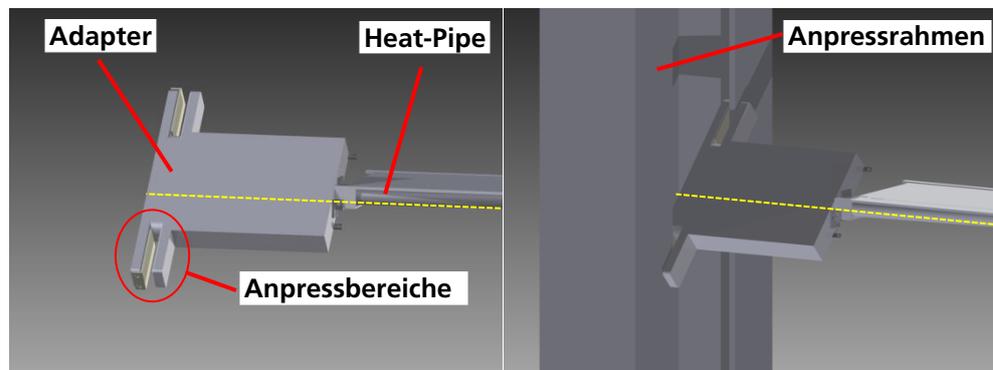


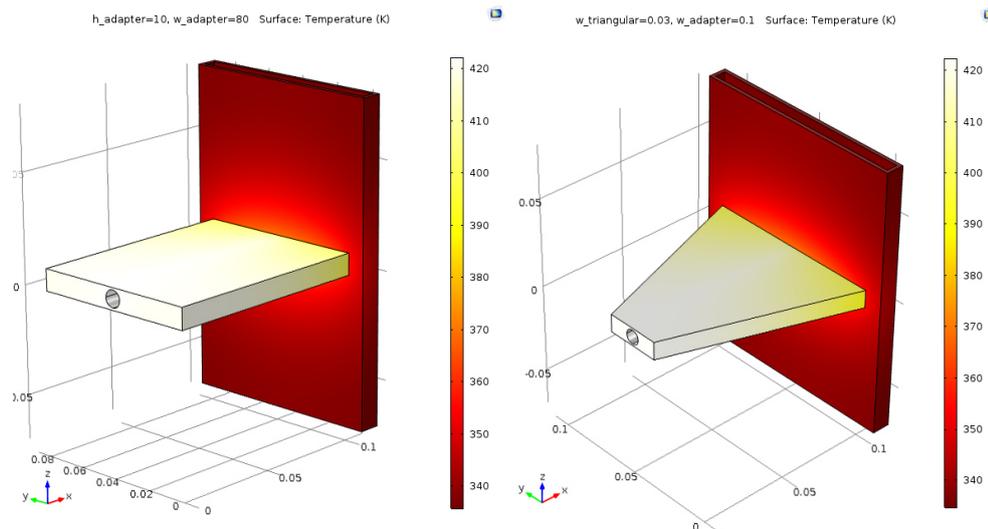
Abbildung 97: Erste Entwürfe des Adapters: CAD-Modell des Adapters (links), Adapter und Anpressrahmen (rechts) mit Rotationsachse (gelb-gestrichelt).

In COMSOL wurde ein 3D-Modell eines vereinfachten Adapters simuliert, um die thermische Leitfähigkeit zu untersuchen (Abbildung 98). Breite, Form und Material des Adapters wurden systematisch untersucht. Die Länge des Adapters muss der Länge des Kondensatorbereichs der Heat-Pipe von 100 mm entsprechen. Für 100 mm Adapterlänge ist eine breitere Adapterbreite sinnvoll, um den Adapterwiderstand zu minimieren (Abbildung 99).

Der Vergleich der Adaptermaterialien Kupfer und Aluminium zeigte erwartungsgemäß einen besseren Wärmetransport mit Kupfer. Vergleicht man das Gewicht der Adapter für vergleichbare effektive thermische Widerstände, so ist der Aluminiumadapter jedoch um ca. 30–40 % leichter. Da der Adapter zum Lamellengewicht beiträgt, ist ein größerer, aber leichter Adapter aus Aluminium einem schwereren aus Kupfer mit vergleichbarem thermischem Widerstand vorzuziehen. Nicht berücksichtigt ist hierbei der Wärmeverlust an die Umgebung durch unterschiedlich große Oberflächen. Da in den geplanten Fassadenelementen primär Aluminium verwendet werden soll, ist dieses Material auch bezüglich der Materialkompatibilität sowie aus Kostengründen vorzuziehen.

Weiterhin wurde die Adaptergeometrie ausgehend von einer rechteckigen Geometrie optimiert. Um das Gewicht zu minimieren, ist die Verwendung schmälerer Adapter möglich, allerdings auf Kosten der Wärmeübertragung (vgl. Abbildung 99). Die Herausforderung besteht darin, das Gewicht zu minimieren und gleichzeitig die Wärmeübertragung zu maximieren. Zu diesem Zweck wurde eine Trapezgeometrie untersucht.

Ein trapezförmiger Adapter mit kurzer Kante von 2–8 cm wurden simuliert, während die lange Kante mit 8 cm und die Höhe bei 10 mm konstant gehalten wurde (Abbildung 98). Die Ergebnisse in Abbildung 99 zeigen, dass sich der thermische Widerstand des trapezförmigen Adapters nur geringfügig mit Veränderung der kurzen Kantenlänge verändert. Im Vergleich zu einem rechteckigen Adapter mit gleichem Widerstand lässt sich daher das Gewicht durch die Trapezform deutlich verringern. Daher ist die Trapezform vorzuziehen.



 Ablauf und Ergebnisse des
 Vorhabens

Abbildung 98: Beispiel eines rechteckigen mit 8 cm Breite und eines trapezförmigen Adapters mit kurzer Kantenlänge von 3 cm und langer Kantenlänge von 10 cm – simulierte Temperaturverteilung. Dimensionen in [m], farbige Temperaturskala in [K].

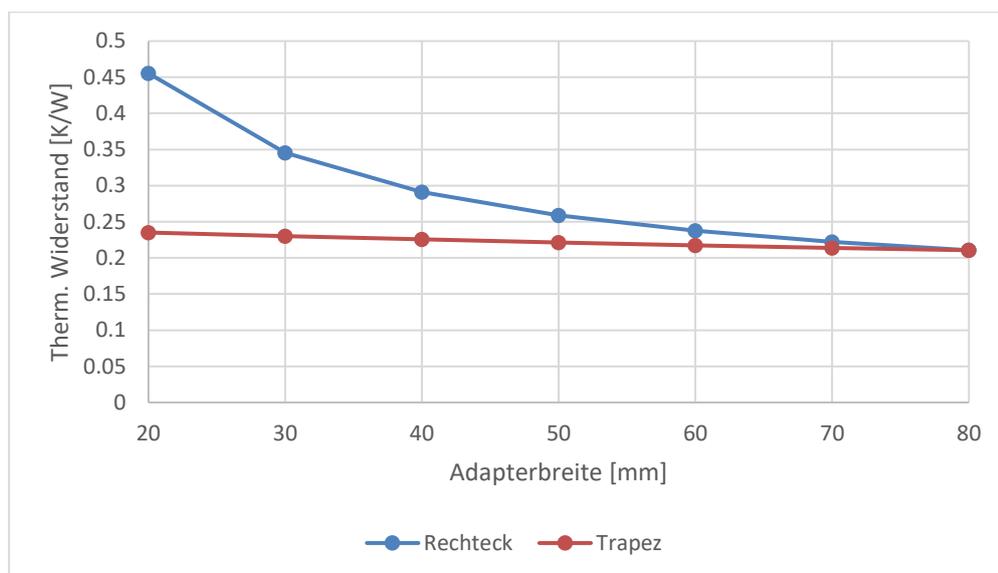


Abbildung 99: Adapterwiderstand (R_{adapter}) und Gesamtwiderstand der schaltbaren thermischen Kopplung (R_{total}) von trapezförmigen (Index tra) und rechteckigen (Index rec) Adapters vs. Breite des Adapters (Breite der kleinen Basis für die Trapezgeometrie).

Die Optimierung der Größe des Trapezes war der nächste Schritt zur Verbesserung der Wärmeübertragung. Die Auswahl geeigneter kurzer und langer Kantenlängen ist erforderlich. Es wurden kurze Kanten im Bereich 1-3 cm in Kombination mit langen Kanten im Bereich 4-20 cm untersucht (Abbildung 100). Die Änderung der Länge der kurzen Kante des Trapezes hat minimale Auswirkungen auf den Widerstand der schaltbaren thermischen Kopplung. Die Breite der langen Kante hatte einen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis. In Abbildung 100 ist zu sehen, dass der Adapterwiderstand bei 14 cm Breite der langen Kante ein Minimum besitzt, bereits ab 10 cm Breite ändert sich dieser nur noch wenig. Auch der Kontaktwiderstand sinkt mit der Breite und die Abnahmege-
 schwindigkeit verlangsamt sich deutlich bei etwa 10 cm Adapterbreite.

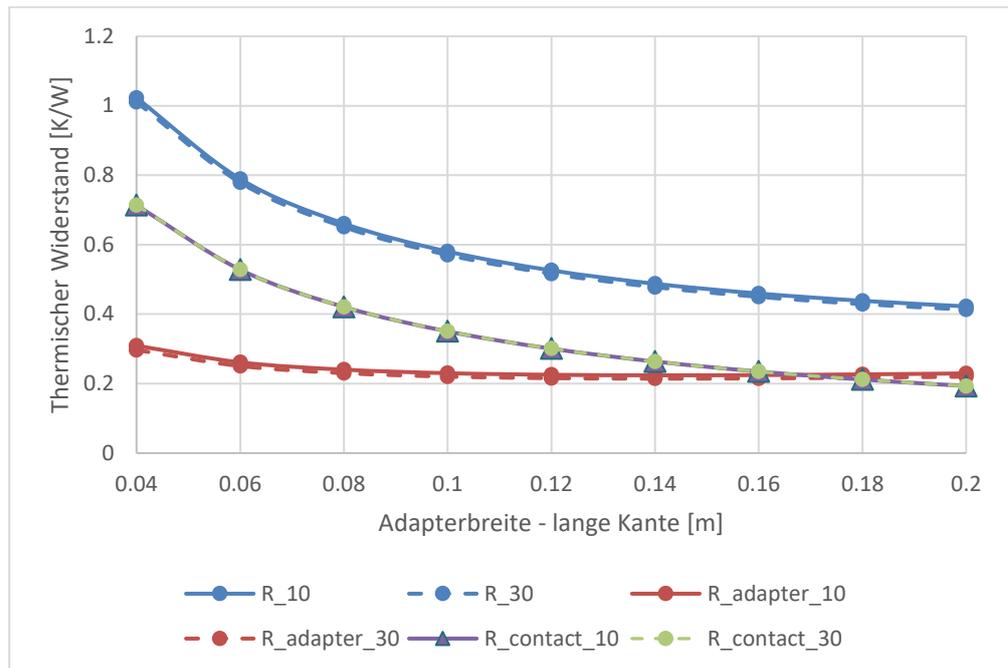


Abbildung 100: Thermischer Kontaktwiderstand (R_{contact}), Adapterwiderstand (R_{adapter}) und die Summe ($R_{\text{}}$) für verschiedene Längen der kurzen Kante des Trapezes (als Index: 10 bis 30 mm) vs. der Breite der langen Kante eines Trapezadapters.

Für das funktionale Testmuster (siehe 3.1.3.8) wurde eine Trapezform mit einer langen Kante von 10 cm und kurzer Kante von 3 cm gewählt. Durch die Trapezform mit der schmalsten Breite von 3 cm, können die Flächen, an denen der Anpressrahmen die Kraft auf den Adapter überträgt an diese Stelle verschoben werden und dadurch die Gesamtbreite des Adapters verringert werden. Der simulierte thermische Widerstand der schaltbaren thermischen Kopplung beträgt dann ca. 0.6 K/W, zusammengesetzt aus dem Adapterwiderstand von ca. 0.2 K/W und dem Kontaktwiderstand von ca. 0.3 – 0.4 K/W unter der Annahme, dass der Kontaktwiderstand zwischen Wärmerohr und Adapter vernachlässigbar klein ist, was eine plausible Annahme ist, da diese Verbindung mit hoher Kraft erfolgen kann (Aufschrumpfen oder Verschrauben zweier Adapterhälften).

Jalousiemechanismus

Der motorgetriebene Jalousiemechanismus einer klassischen Jalousie erfüllt zwei Funktionen:

- Auf- und Abfahren (Raffen) der Jalousie
- Kippen der Lamellen (ca. 0-90°)

In klassischen Jalousien werden textile Bänder bzw. Leiterkordeln für beide Funktionen verwendet, die von einem einzelnen Motor bewegt werden. Zwei Aufzugsbänder an gegenüberliegenden Enden der Jalousie dienen dem Raffen, indem sie die Unterschiene auf- und abbewegen. Die Lamellen liegen im gerafften Zustand auf der Unterschiene auf. Jedes Aufzugsband wird durch den Motor auf eine Rolle auf- und abgewickelt. Zum Kippen der Lamellen werden zwei Leiterkordeln an gegenüberliegenden Enden der Jalousie verwendet. Im heruntergelassenen Zustand liegt jede Lamelle auf einer „Stufe“ der Leiterkordel auf. Jede Leiterkordel ist mit einer speziellen Rutschkupplung mit der Rolle eines Aufzugsbandes verbunden. Durch diese spezielle Rutschkupplung werden die Leiterkordel und dadurch die Lamellen gekippt, sobald sich das Rad des Aufzugsbandes dreht. Durch die verschiedenen Drehrichtungen des Rades können die Lamellen in beide

Richtungen gekippt werden und der Lamellenwinkel eingestellt werden. Die Gleitschiene ist so konzipiert, dass die maximalen Winkel der Lamellen eingestellt werden können, z. B. 0-90°.

Ablauf und Ergebnisse des
Vorhabens

Um diesen erprobten Mechanismus auf die STJ übertragen zu können, muss beachtet werden, dass bei klassischen Jalousien der Schwerpunkt jeder Lamelle mittig auf der Lamelle liegt. Für den Mechanismus muss der Schwerpunkt auf der Rotationsachse liegen. Dadurch müssen zum Kippen nur sehr geringe Drehmomente aufgewendet werden. Durch die veränderte Geometrie der Lamellen bei der STJ, insbesondere durch den Adapter, liegt der Schwerpunkt nicht mittig auf der Lamelle, sondern nahe dem Rand der Lamelle, auf der Seite des Adapters. Die Rotationsachse wurde daher so gewählt, dass sie durch den Schwerpunkt der Lamelle - und nicht wie üblich durch die Mittelachse der Lamelle - geht (vgl. Abbildung 101).

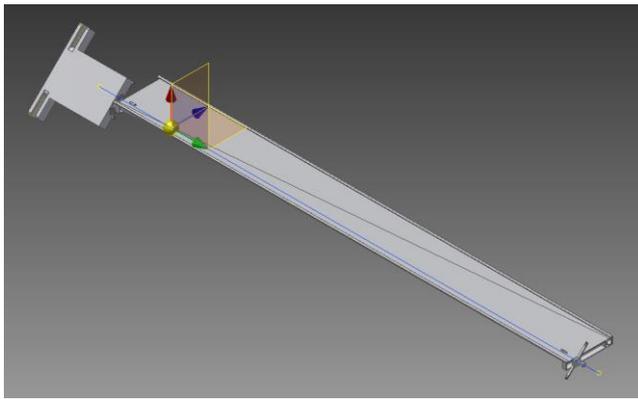


Abbildung 101: CAD einer Lamelle mit Verstärkung, Heat-Pipe, Adapter und Bauteile für Kippmechanismus. Reale Rotationslinie (blaue Linie) und Schwerpunkt (gelbe Kugel).

Die Leiterkordeln des Jalousiemechanismus können symmetrisch um die Rotationsachse an der Adapterstirnseite angebracht werden (siehe Anbringung für Leiterkordel in Abbildung 101). Am gegenüberliegenden Ende der Lamellen wird ein spezielles Bauteil benötigt, um die Leiterkordeln symmetrisch zum Adapter anzubringen wie in Abbildung 102 zu sehen ist. Das Aufzugsband wird durch die Lamelle nahe der Rotationsachse geführt. Als Alternative wurde ein Ansatz untersucht, bei dem insgesamt 4 Aufzugsbänder, 2 je Lamellenende, seitlich der Lamelle geführt werden. Dies hat den Vorteil, dass die Unterchiene durch insgesamt 4 Aufzugsbänder gehalten wird und somit stabilisiert ist. Zudem ist die Last je Aufzugsband geringer. Dieser Ansatz wurde in den Testmustern weiterverfolgt.

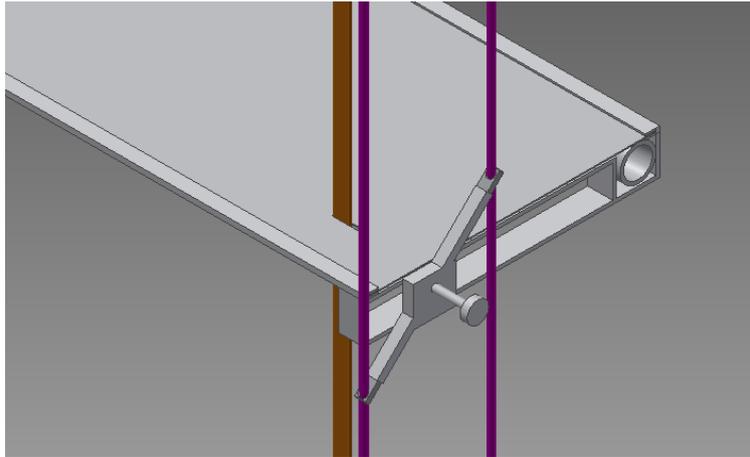


Abbildung 102: Jalousiemechanismusanbringung an Lamelle. Leiterkordel (schematisch) zum Kippen (lila) und Aufzugsband (orange). Die Leiterkordeln sind an einem speziellen Bauteil angebracht.

Alternative Ansätze, die untersucht wurden, benötigen entweder einen weiteren Motor oder speziellen Mechaniken zum Kippen (bei Anbringung der Leiterkordeln an der Lamelle selbst) oder sind durch die veränderte Geometrie mit Adapter und Sammelrohr nicht übertragbar (Raffen mittels Schiene und Kettenantrieb).

Mechanisches Teilfunktionstestmuster 1 - Überprüfen der schaltbaren thermischen Kopplung mit Hubmagneten und des Jalousiemechanismus

Um die entwickelte Mechanik mit Hubmagneten und Federn für die schaltbare thermische Kopplung zwischen den Lamellen und dem Sammelkanal und die entwickelte Mechanik, um die Lamellen raffen und kippen zu können, zu prüfen wurde ein mechanisches Muster gebaut und getestet. Die schaltbare thermische Kopplung wurde in diesem Testmuster über selbsthaltende Hubmagnete realisiert. Ein speziell entwickelter Adapter lässt sich in jeder Lamellenposition gut über den Anpressrahmen an den Sammelkanal anpressen.



Abbildung 103: Fotos des mechanischen Testmusters der STJ. Von oben nach unten: a) Foto des mechanischen Testmusters mit einer Breite und Höhe von jeweils einem Meter. Die roten und gelben Kabel versorgen die Hubmagnete beim Schalten mit Strom. b) Blickrichtung von unten auf die Lamellen diagonal montierten Heat-Pipes-Dummies (nicht-funktional). c) STJ im geschlossenen Zustand. Die Adapter sind an den Sammelkanal auf der rechten Bildseite angepresst. d) STJ im offenen Zustand, in dem sich die Lamellen bewegen können. Zwischen den Adaptern und dem Sammelkanal auf der rechten Bildseite ist ein Spalt zu erkennen. e) und f) Rotation der Lamellen. g) Raffens der Lamellen.

Das mechanische Testmuster der solarthermischen Jalousie hat die grundlegenden Funktionen erfüllt. Es zeigten sich jedoch die folgenden Optimierungsmöglichkeiten: Die Bänder für die Rotation sollten noch weiter auseinander positioniert werden, damit alle gewünschten Lamellenneigungswinkel erreicht werden. Die Adapter sollten statt einem Teflonstreifen für den Ausgleich von Toleranzen eine Blattfeder aufweisen, damit jeder

Adapter individuell an den Sammelkanal anpressbar ist. Die Bänder für die Rotation ließen sich nur schwer mit geringen Toleranzen montieren, wodurch ein Schrägzug des Lamellenpakets entstand. Zudem müssen sie auch ein deutlich größeres Gewicht tragen als Bänder konventioneller Jalousien. Deshalb wurde für den nächsten Entwicklungsschritt mit Bau eines funktionalen Labortestmusters eine geeignete Lösung des Jalousiemechanismus entwickelt.

Mechanisches Teilfunktionstestmuster 2 - Untersuchung der schaltbaren thermischen Kopplung mit Nockenwelle

Als Alternative für den Mechanismus der schaltbaren thermischen Kopplung mit Federn und Hubmagneten wurde ein Mechanismus mit Nockenwelle im Maßstab 1:3 ausgelegt und in einem separaten Versuchsaufbau untersucht (siehe Abbildung 104, Abbildung 105 und Abbildung 106) (Nungesser 2018). Der Versuchsaufbau umfasste dabei nur den Bewegungsmechanismus der schaltbaren thermischen Kopplung, d. h. primär die Nockenwelle mit Antrieb und ein U-Profil, dass von der Nockenwelle bewegt wird.

Die Nockenwelle wurde durch einen Schrittmotor und einem Schneckengetriebe angetrieben. Es wurde dabei ein hohes Übersetzungsverhältnis von 1:80 verwendet, um hohe Abtriebsdrehmomente und Selbsthemmung im angepressten Zustand zu erreichen, d. h. ohne zusätzliche Energie nach Erreichen des angepressten Zustands, wie auch beim Mechanismus mit Federn und Hubmagneten. Bei Rotation der Welle bewegen die Nocken die Schenkel eines U-Profiles, welches oben und unten mit Gleitschienen am Rahmen angebracht ist. Das U-Profil dient als Ersatz für den Anpressrahmen, welcher aus Kostengründen vereinfacht wurde. Mittels Kraftsensoren kann die auf das U-Profil ausgeübte Kraft im geschlossenen Zustand der schaltbaren thermischen Kopplung gemessen werden.

Hinsichtlich der Zahl der verbauten Komponenten wurde der Anpressmechanismus vereinfacht, da die Nockenwelle sowohl die Funktion der Druckfedern (Anpressen) als auch die der Hubmagneten (öffnen des thermischen Kontakts) erfüllt. Durch die Selbsthemmung des Schneckengetriebes kann die aufgebrachte Presskraft auch mit geringen Verlusten gehalten werden, wenn der Motor nicht mit Energie versorgt ist. d. h.

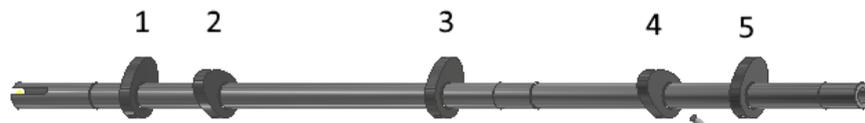


Abbildung 104: Nockenwelle - Die Nocken 1, 3 und 5 dienen zum Anpressen und die Nocken 2 und 4 zum Öffnen der thermischen Kopplung.

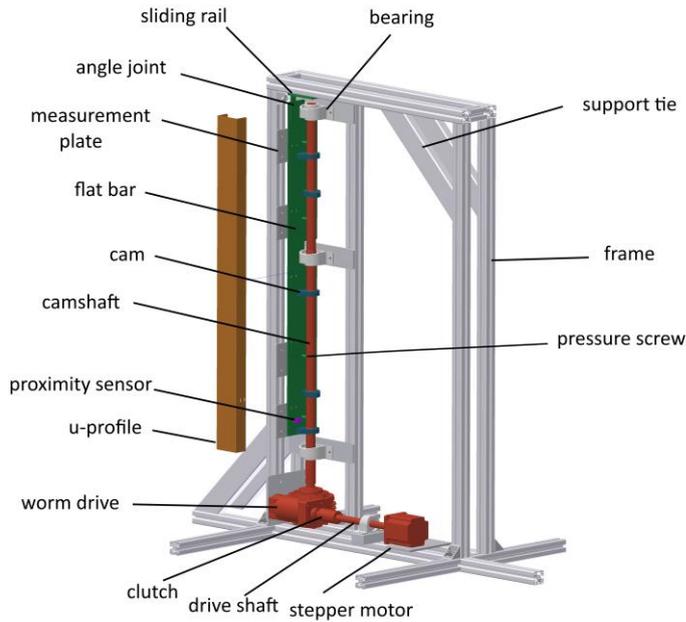


Abbildung 105: Explosionsansicht des Testmusters der Nockenwelle. Kraftsensoren (nicht abgebildet) werden auf der Messplatte (measurement plate) montiert.

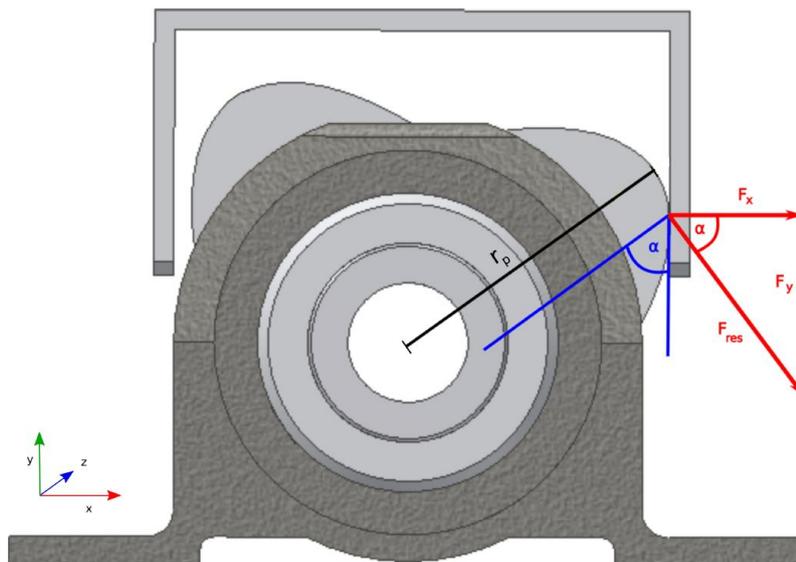


Abbildung 106: Draufsicht auf Nockenwellenmechanismus, mit U-Profil, das von den Nocken bewegt wird (Gleitschienen nicht dargestellt).

Die Untersuchungen zeigten ausreichend hohe Kräfte und eine gute Reproduzierbarkeit. Die höchste gemittelte Gesamtpresskraft wurde mit 741 N verteilt auf drei Kraftsensoren gemessen. Dies würde bei 37 Lamellen, wie später im Labortestmuster verwendet, einer Kraft von 20 N pro Adapter entsprechen. Da der Schrittmotor aufgrund kleiner mechanischer Schwachstellen des Testmusters nicht mit voller Leistung betrieben wurde, kann die Anpresskraft potentiell weiter erhöht werden. Die Kraftsensoren wurden jedoch ungleichmäßig belastet, was z. B. durch leichte Biegung und Torsion des U-Profiles und Präzisionsfehler in Fertigung und Montage zu erklären ist. Die Selbsthemmung des Mechanismus wurde durch induzierte Vibrationen im zeitlichen Verlauf untersucht (Abbildung 107).

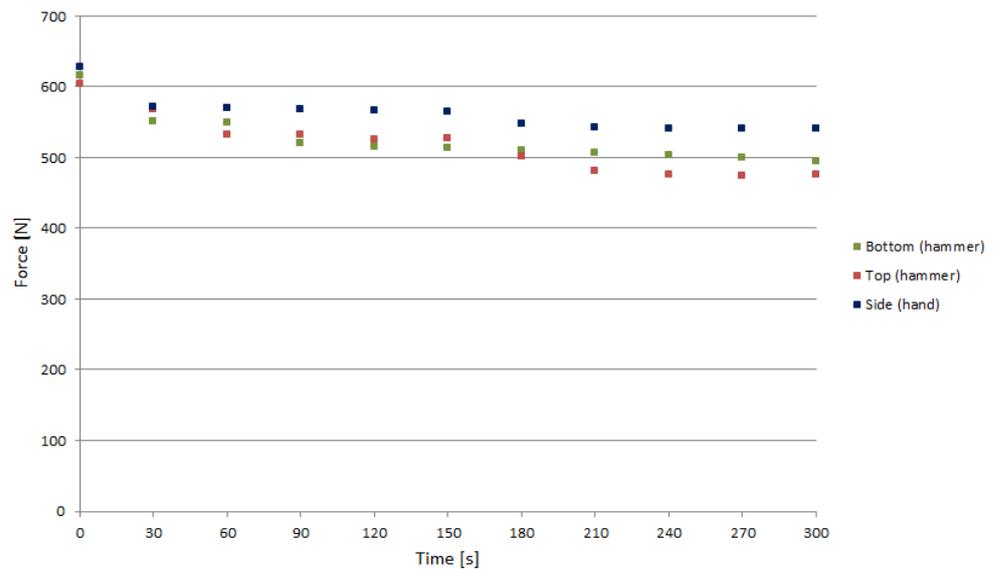


Abbildung 107: Summe aller Werte der vier Kraftsensoren, gemessen über einen Zeit von 5 min in Intervallen von 30 s mit auf den Rahmen induzierten Vibrationen aus verschiedenen Richtungen.

Im direkten Vergleich zum Teilfunktionstestmuster 1 mit Hubmagneten (vgl. Abschnitt oberhalb) wurde die Geräuschentwicklung durch den Mechanismus untersucht. Hierbei wurde festgestellt, dass die Hubmagnete eine kürzere, aber deutlich lautere Geräuschentwicklung haben. Allerdings benötigte der Nockenwellenmechanismus 4 Sekunden zum Öffnen der schaltbaren thermischen Kopplung, wohingegen die Hubmagnete in etwa 0.5-1 Sekunden den Zustand zum Verfahren der Lamellen ermöglichen. Dieser Wert ergibt sich für die Nockenwelle aus der Ansteuerung des Schrittmotors und ist nicht durch das System selbst bedingt. Die benötigte Zeit kann durch eine Erhöhung der Steuerefrequenz und somit der Antriebsgeschwindigkeit mit relativ geringem Aufwand verringert werden.

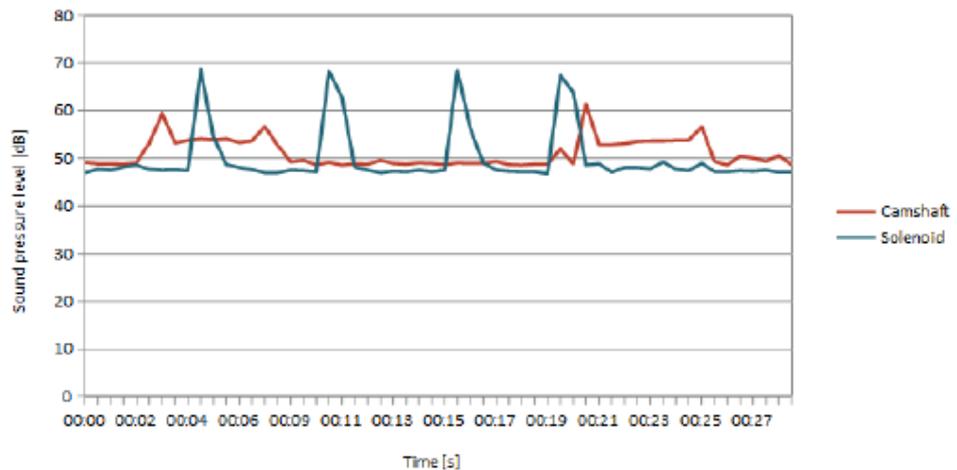


Abbildung 108: Vergleich der Schalldruckpegel für beide Mechanismen während des Betriebs. Die Hubmagnete (solenoids) wurden viermal betätigt, zweimal zum Anpressen und zweimal zum Lösen der schaltbaren thermischen Kopplung. Der Schrittmotor der Nockenwelle (camshaft) wurde zweimal aktiviert, einmal zum Anpressen und einmal zum Lösen.

Eine Marktrecherche und Preisanfragen bei verschiedenen Herstellern ließen eine Schätzung der Kosten des Nockenwellen-Mechanismus für größere Stückzahlen zu. Hierfür wurde sich auf die wesentlichen Komponenten beschränkt (vgl. Abbildung 109). Da die Fertigung von Nockenwellen mit drei Metern Länge nicht üblich ist, empfiehlt es sich in

einer STJ im Maßstab 1:1 zwei einzelne, miteinander verbundene Nockenwellen zu verbauen. Laut unverbindlichen Schätzungen eines marktführenden Nockenwellenherstellers könnten Nockenwellen mit einer Länge von 1,5 Metern für ca. 300 Euro pro Stück gefertigt werden ab einer Stückzahl von 2000. Bei größeren Mengen sind weitere Kostenreduktionen möglich.

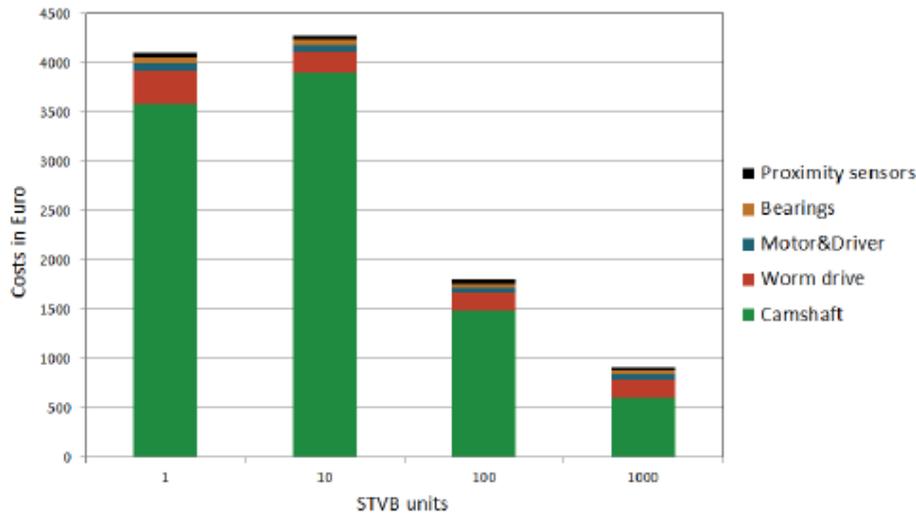


Abbildung 109: Geschätzte Kostendegression der Hauptkomponenten des Nockenwellenmechanismus. Die höheren Kosten für zehn STJ Einheiten im Vergleich zu einer sind durch unterschiedliche Angebote verschiedener Hersteller mit Spezialisierung auf Prototypenbau oder Klein-Serienfertigung zu erklären.

Trotz einiger Vorteile der Nockenwelle, wurde dieser Ansatz nicht weiterverfolgt, da Nockenwellen mit der erforderlichen Länge von drei Metern für STJ-Fassadenelement von 3-3.5 m Höhe nicht marktverfügbar sind. Der Einsatz von zwei gekoppelten kürzeren Nockenwellen ist eine Option, die weiterer Untersuchungen bedarf.

3.1.3.8 Entwicklung von transparenten Fassadenelementen mit Solarthermischer Jalousie - Labortestmuster

Die wichtigsten Baugruppen, aus denen ein Fassadenelement mit solarthermischer Jalousie besteht sind in Abbildung 110 dargestellt (Haeringer et al. 2018):

- *Slat Assembly* – die Lamellen inkl. Heat-Pipe und Adapter
- *Pressing Frame Assembly* – Anpressrahmen und –mechanismus, als Teil der schaltbaren thermischen Kopplung, sowie Sammelkanal
- *Motor System Assembly* – Jalousiemechanismus zum Raffen und Kippen der Lamellen
- *Bottom Bar Assembly* – Unterschiene, um die Lamellen rafften zu können. Teil des Jalousiemechanismus
- *Frame Assembly* - der äußere Rahmen, d. h. das Fassadenelement

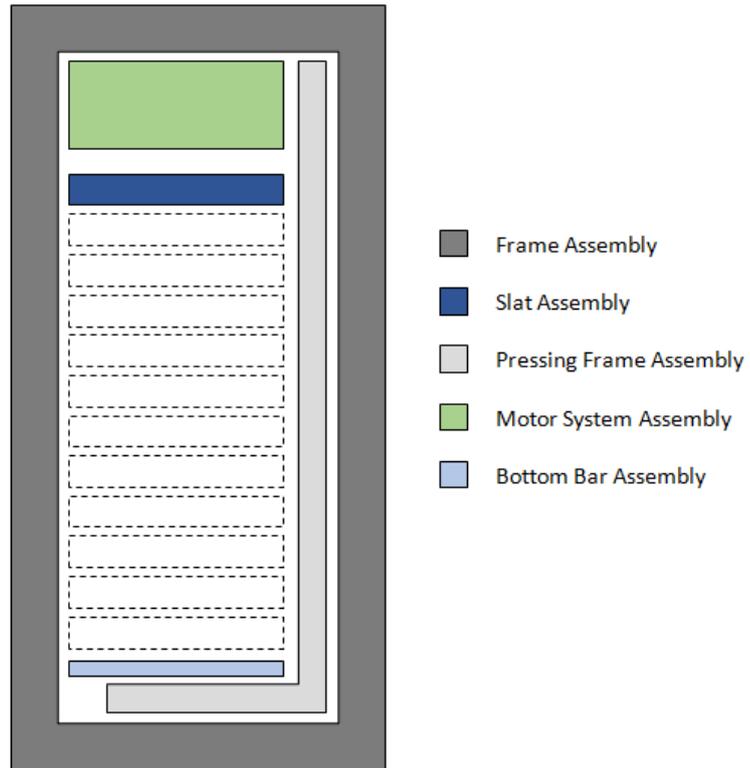


Abbildung 110: Baugruppen der STJ (Vorderansicht, schematisch) (Haeringer et al. 2018).

Dieser Abschnitt beinhaltet Auszüge aus (Haeringer et al. 2018).

Fassadentypologie

.....
Ablauf und Ergebnisse des
Vorhabens
.....

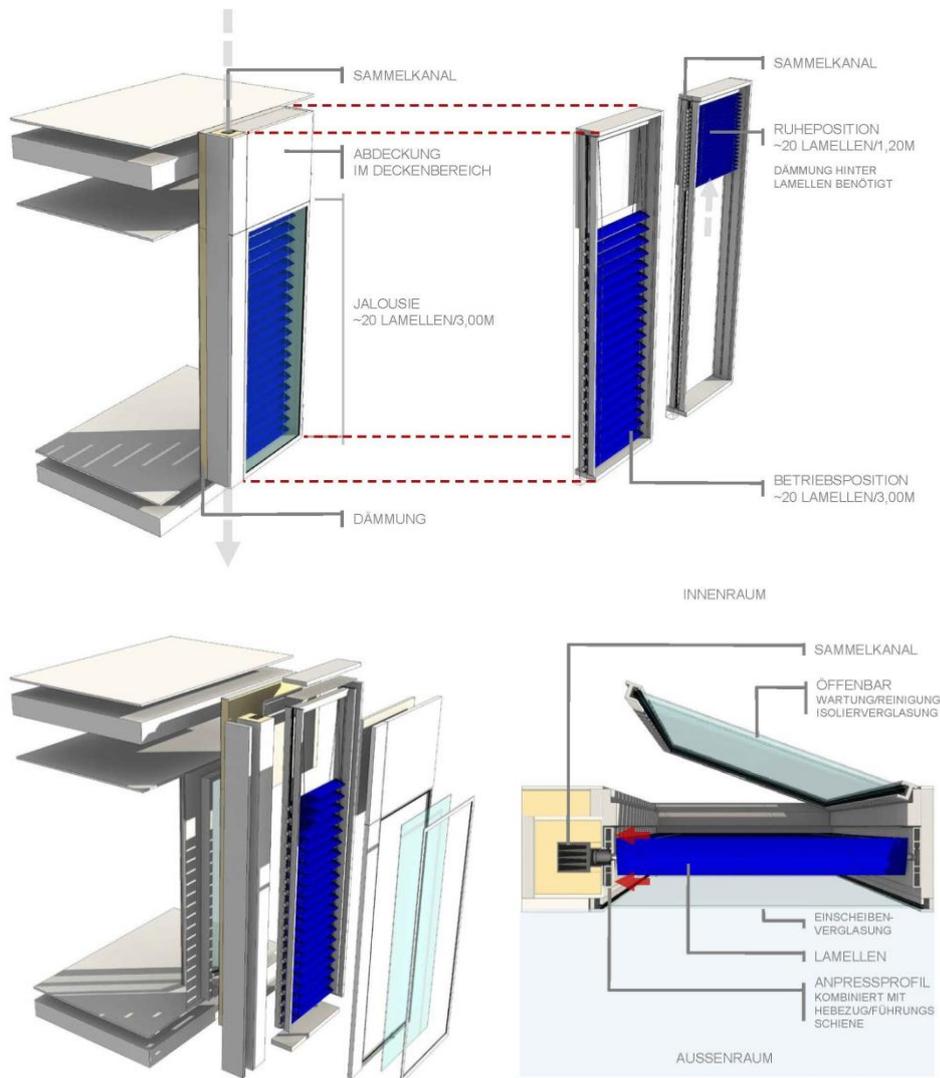


Abbildung 111: Möglicher Aufbau einer Solarthermischen Jalousie im Fassadenzwischenraum.

Zu betrachtende Fassadentypologien:

Zweite-Haut-Fassade

Die Zweite-Haut Fassade ist eine Art der Doppelfassade. Diese bestehen aus einer wärmedämmenden Glasfassade und einer zweiten Verglasungsebene. In der Zweite-Haut-Fassade ist der Fassadenzwischenraum gänzlich ungeteilt.



Abbildung 112: Beispiele Zweite-Haut-Fassade (Quelle: OskarDaRiz / Solarlux).

Im Falle einer Zweite-Haut-Fassade kann über einen Wartungsgang die Jalousie gewartet und gereinigt werden. In Kombination mit Öffnungselementen kann der gesamte Fassadenaufbau und auch Innenraum belüftet werden.

Zweite-Haut-Fassaden werden vor allem aus Schallschutz-Gründen oder zur Nutzung einer geschützten, dennoch außenliegenden Sonnenschutz-Jalousie angewendet. Zweite-Haut-Fassaden werden allerdings aus Kosten- und Platzgründen nach Möglichkeit vermieden.

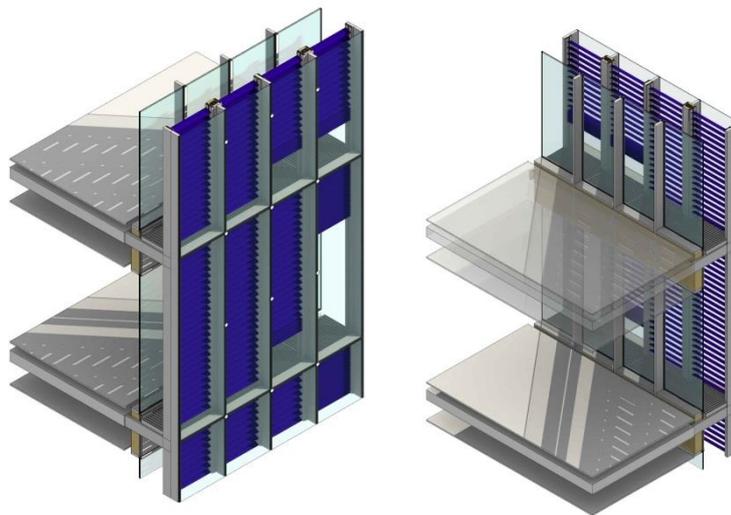


Abbildung 113: Mögliche Integration der STJ in Zweite-Haut-Fassaden.

Closed-Cavity-Facade

Die Closed-Cavity-Facade ist ebenfalls eine Art der Doppelfassade. Hierbei wird der Raum zwischen innerer und äußerer Glasebene vollständig verschlossen. Der „geschlossenen Kammer“ wird mit leichtem Überdruck getrocknete und gereinigte Luft zugeführt, die verhindert, dass sich auf den Fensterscheiben bzw. im Zwischenraum Kondensat oder Schmutz ablagern.



Abbildung 114: Beispiele Closed-Cavity-Facade (Quelle: Thomas Mayer / SOM).

In der Closed-Cavity-Facade kann eine Art abgedeckter Kollektor realisiert werden, da das Fassadenelement nahezu luftdicht verschlossen ist. Daher ist jedoch die Wartung der im Fassadenzwischenraum liegenden Jalousie mit hohem Aufwand verbunden. Darüber hinaus stellt die Closed-Cavity-Facade auf Grund der haustechnischen Komponenten spezielle Anforderungen an den Fassadenbauer. Dies kann u. U. jedoch eine Erleichterung darstellen, wenn mit der STJ weitere haustechnische Komponenten eingebracht werden sollen.

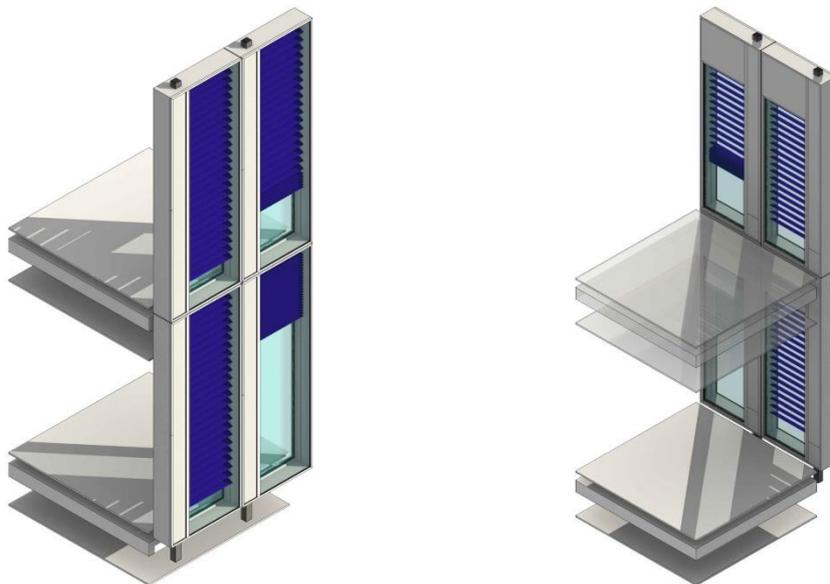


Abbildung 115: Mögliche Integration der STJ in Closed-Cavity-Facade.

Lochfassaden – Kastenfenster

Eine Lochfassade ist eine massive Wandkonstruktion mit Fensteröffnungen, die als Einzelelemente eine Ausparung (Loch) in der Rohbaukonstruktion schließen. Kastenfenster sind die Überführung der Doppelfassade in einzelne Fensterelemente.



Abbildung 116: Beispiele Kastenfenster und Lochfassade (Quelle: OSA / Adam Mørk).

Die Solarthermische Jalousie kann hier genauso wie bei den vorangegangenen Typologien zwischen innerer und äußerer Glasebene eingebracht werden. Je nach Aufbau kann das Kastenfenster mit öffnenbaren Flügeln zur Wartung und Reinigung oder als geschlossenes Element gleich der CCF ausgeführt werden.

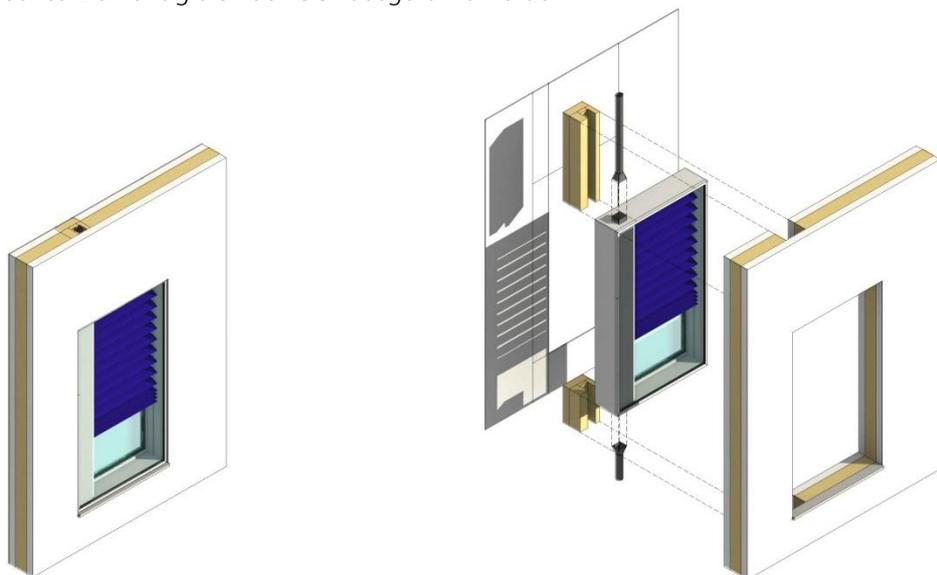


Abbildung 117: Mögliche Integration der STJ in Kastenfenster zur Nutzung in Lochfassaden.

Lamellen - Lamellengeometrie

Um bei einer späteren Anwendung der solarthermischen Jalousie dem Architekten und Bauherren die Möglichkeit einer individuellen Anpassung der Fassadenlösung zu ermöglichen, wurden verschiedene Varianten der Lamellengeometrie, d. h. der Lamellenquerschnitte, untersucht. Einfache geometrische Handmuster dienen dazu die gestalterischen Qualitäten und Wahrnehmung beim Nutzer zu untersuchen. Die Varianz bewegt sich hierbei zwischen den „einfachen rechteckigen“ Lamellenquerschnitten des Labortestmusters hin zu speziell abgerundeten Varianten, um optisch die Ansichtsbreite zu verringern. Komplexere Geometrien sind dabei in der Fertigung kostenintensiver anzusetzen, wobei auch Bearbeitungslimitierungen des spektral-selektiv beschichteten Absorberblechs zu beachten sind.

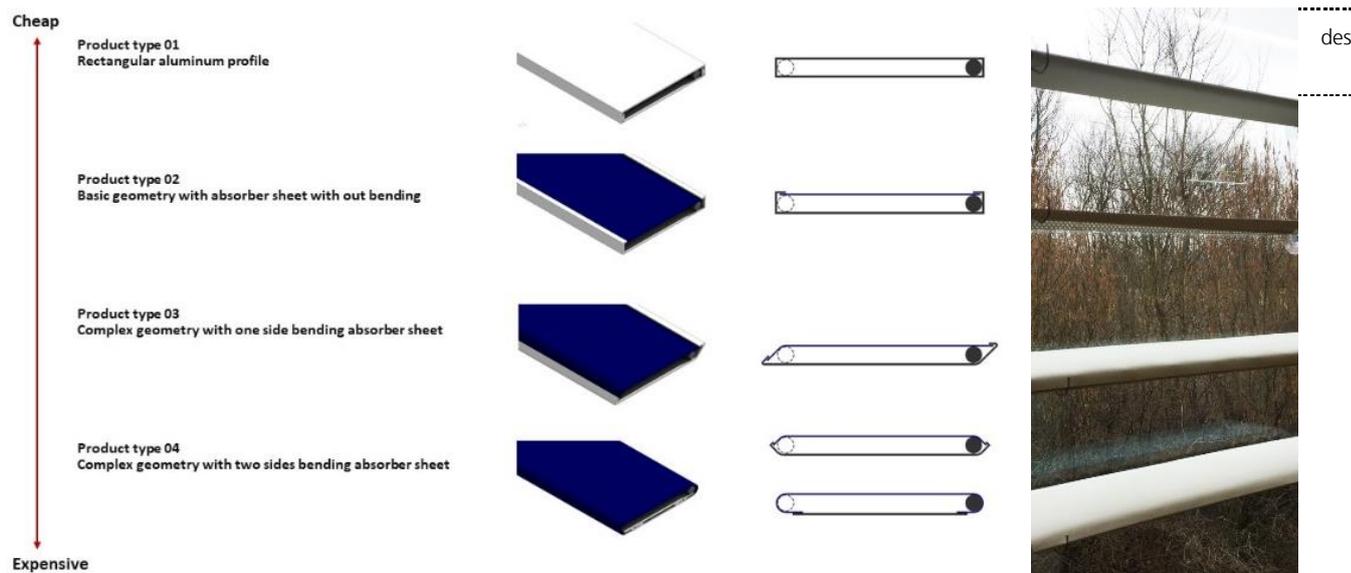


Abbildung 118: Untersuchung Lamellengeometrie und Handmuster.

Lamellen - Labortestmuster

Die Lamellen des Labortestmusters, dargestellt in Abbildung 120 und Abbildung 121, sind sowohl für Funktion als auch Aussehen ein entscheidendes Bauteil (Haeringer et al. 2018). Als Absorber dient ein herkömmliches Solarabsorberblech aus Kupfer mit spektral selektiver Beschichtung, an den ein kommerziell erhältliches Heat-Pipe mit Kapillarstruktur angebracht ist. Mit dem aktuellen Durchmesser der Heat-Pipe von 8 mm kann eine Lamellendicke und somit Stapelhöhe von 10-12 mm erreicht werden. Die Heat-Pipe ist diagonal am Absorberblech angebracht. Bei geneigter Lamelle besteht somit ein Höhenunterschied zwischen Verdampfer und Kondensator der Heat-Pipe, wodurch die Leistungsfähigkeit verbessert wird. Der Kondensator ist in einen zweischaligen Adapter aus Aluminium eingepresst, um die Wärmeübertragung an den Sammelkanal zu verbessern. Die Trapezform bildet einen guten Kompromiss zwischen Wärmeübertragung und geringem Gewicht, wie durch Simulationen gezeigt wurde. Die Kontaktfläche jedes Adapters zum Sammelkanal ist $12 \times 100 \text{ mm}^2$.

Der Adapter wurde aus zwei Adapterhälften ausgeführt, die miteinander verschraubt werden und den Heat-Pipe-Kondensator „einpressen“. Dadurch wird ein niedriger thermischer Kontaktwiderstand zwischen Adapter und Heat-Pipe erreicht. Der flächige Kontakt wurde mittels eines Vorversuchs mithilfe von Tuschiepaste verifiziert.

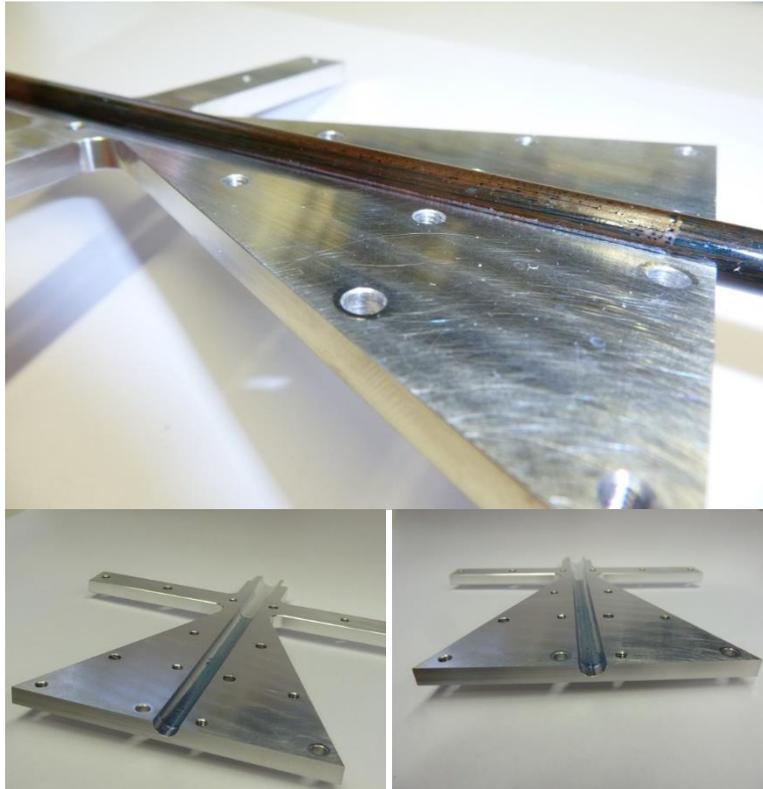


Abbildung 119: Überprüfen des Kontakts zwischen Heat-Pipe-Kondensator und Adapterhälften mittels Tuschiepaste (obere Adapterhälfte nicht dargestellt).

Für die nötige Stabilität der Lamellen sorgen Verstärkungsprofile („Reinforcement“), die an den Enden der Lamelle mit sogenannten „Spacern“ verbunden sind. Die Spacer dienen außerdem als Aufhängepunkte für den Jalousiemechanismus. Dort ist an einem Ende der Lamelle auch ein Führungsstift („Guiding pin“) für die vertikale Bewegung der Lamellen angebracht. Die Rückseite der Lamellen ist mit einem Abdeckblech verdeckt, wodurch Heat-Pipe und Absorberblech von dieser Seite nicht sichtbar sind. Insgesamt werden im Labortestmuster 37 Lamellen verwendet. Die verwendeten Lamellen sind 1,2 m breit und 94 mm tief mit einer Absorberfläche von 0,07 m². Dies entspricht einer Gesamtabsorberfläche von 2,7 m² für das gesamte Fassadenelement.

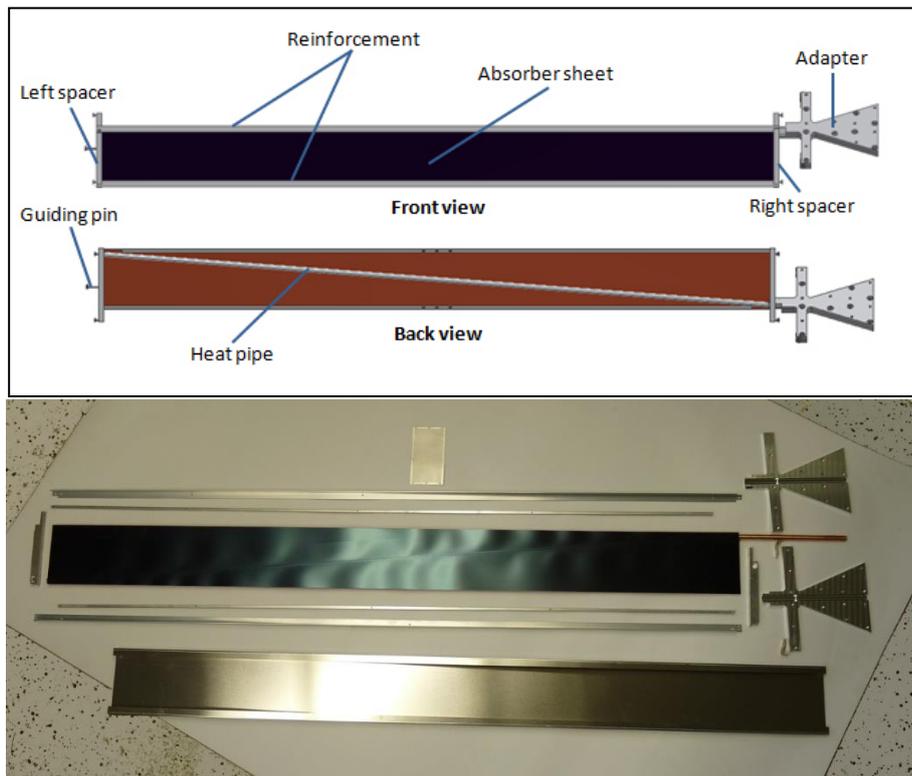


Abbildung 120: Bauteile der Lamelle (oben: schematisch, unten: real) (Haeringer et al. 2018).



Abbildung 121: Lamelle des Funktionsmusters (Draufsicht) mit spektral-selektiver Absorberoberfläche und Adapter zur Wärmeübertragung (rechter Bildrand) (Haeringer et al. 2018).

Schaltbare thermische Kopplung – Anpressmechanismus

Die schaltbare thermische Kopplung wurde, wie in Abschnitt 3.1.3.7 beschrieben, mittels Hubmagneten und Federn umgesetzt (Haeringer et al. 2018), deren Kraft mittels eines beweglichen Anpressrahmens („Pressing frame“ und „U profile pressing“) auf die Adapter der Lamellen übertragen wird (siehe Abbildung 122 und Abbildung 123). Die Hubmagnete und Federn sind an einem fest stehenden Profil („fixed L profile“) befestigt, das zur Versteifung mittels Querstreben („Header tube support“) mit dem Sammelkanal („Header tube“) verbunden ist. Adapter und Anpressrahmen wurde ausgelegt, um bei allen Lamellenkippwinkeln die Anpresskraft von ca. 10 N je Adapter übertragen zu können. Durch die Federn werden die Adapter an den Sammelkanal angedrückt. Durch Hubmagnete kann dieser Kontakt gelöst werden und die Lamellen sind frei beweglich. Da selbsthaltende Hubmagnete verwendet wurden, muss nach Erreichen der geöffneten Position keine zusätzliche Energie aufgewendet werden. Das Lösen der Hubmagnete zum Rückkehren in den angepressten Zustand erfolgt durch einen kurzen Stromimpuls.

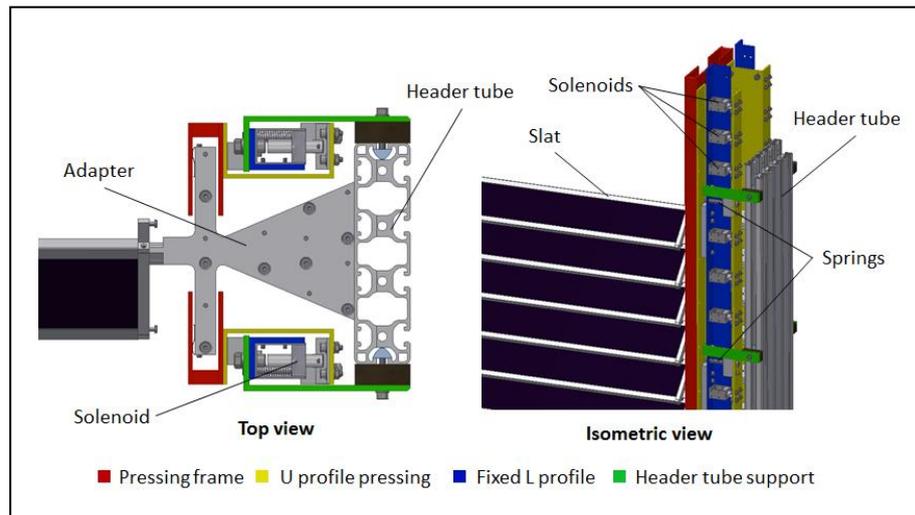


Abbildung 122: Anpressrahmen und -mechanismus mit Sammelkanal und Lamellen (Schema) (Haeringer et al. 2018).

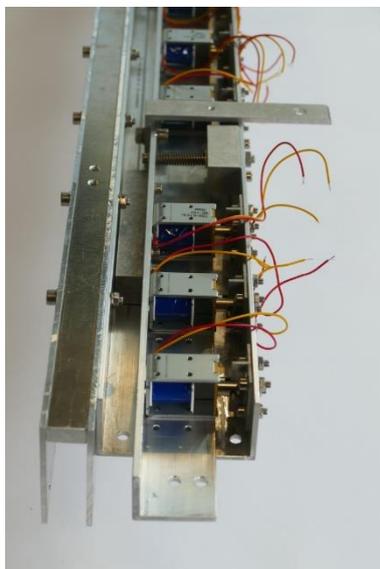


Abbildung 123: Eine Seite des Anpressrahmen – und mechanismus des Labortestmusters (Ausschnitt) (Haeringer et al. 2018).

Weiterentwicklung des Jalousiemechanismus

Die Untersuchung des Teilfunktionstestmusters 1 zeigte, dass der Jalousiemechanismus für die STJ weiterentwickelt werden musste. Dies wurde zeitgleich mit der Konstruktion des Labortestmusters durchgeführt. Da die im Labortestmuster verwendeten Lamellen je Stück etwa 1 kg schwer sind und die genaue horizontale Ausrichtung der Lamellen bei der STJ wichtig ist, konnte der übliche Jalousiemechanismus mit einem Motor, Bandspulen und textilen Aufzugsbändern und Kippkordeln nicht weiterverwendet werden. Stattdessen wurden Drahtseile aus Stahl als Aufzugsbänder verwendet und sogenannte Scherenketten zum Kippen der Lamellen (Abbildung 124 und Abbildung 125). Diese Scherenketten werden auch bei Raffstoren mit Ganzmetalllamellen verwendet (e.g. Metalunic von Griesser). Durch die verwendeten Elemente aus Stahl wird die Längendehnung durch das Gewicht der Lamellen minimiert. Dies ist insbesondere wichtig, da das Gewicht der Lamellen nicht gleichverteilt ist und die Lamellen schief hängen würden bei ungleichmä-

Biger Längenänderung der Kipp- bzw. Aufzugelemente. Die genaue horizontale Ausrichtung ist für einen guten, flächigen Kontakt zwischen Adapter und Sammelkanal essentiell.

 Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens

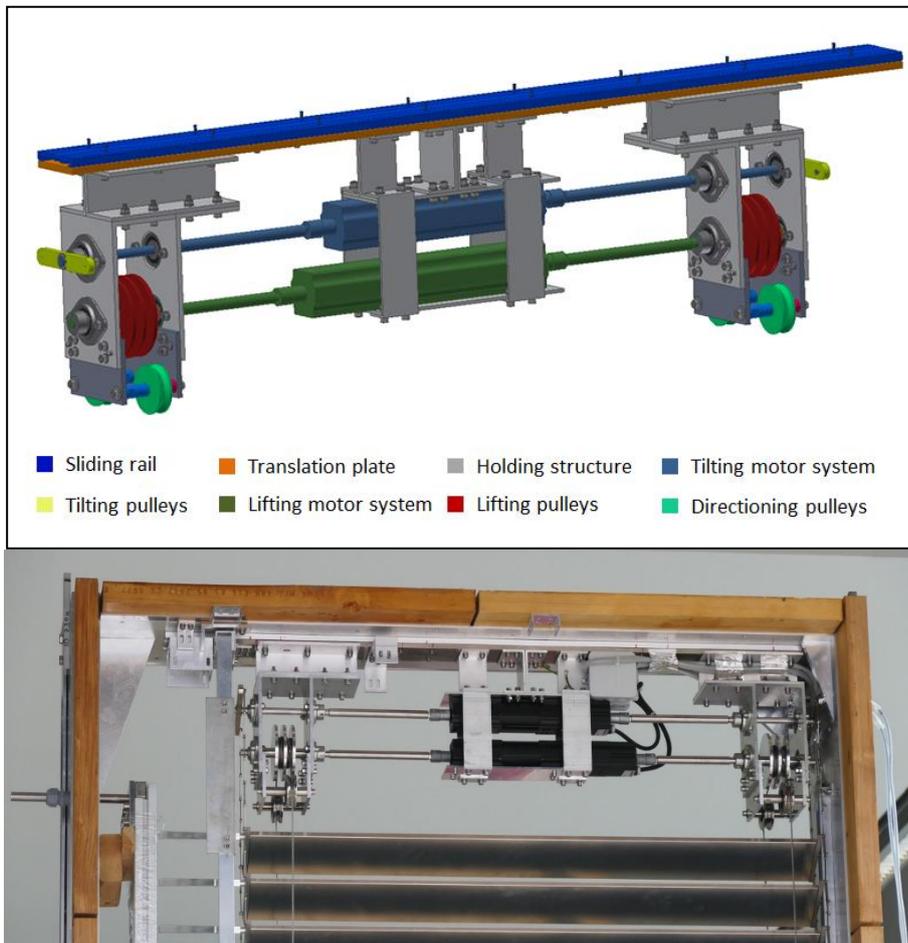


Abbildung 124: Jalousiemechanismus – schematisch (oben). Jalousiemechanismus im Fassadenelement montiert (unten). Scherenketten und Stahlseile am Rand der Lamellen sichtbar (Haeringer et al. 2018).

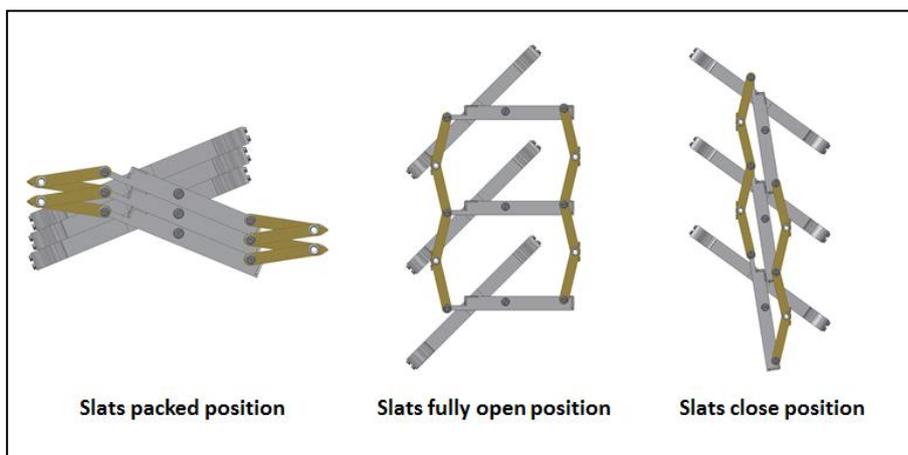


Abbildung 125: Lamellen und Scherenketten in verschiedenen Positionen (Haeringer et al. 2018).

Die Unterschiene wurde mit einem Winkel von 135° ausgeführt, um ein korrektes Stapeln der um 45° zueinander gekippten Lamellen und Adapter zu gewährleisten (Abbildung 126). Außerdem wird die Unterschiene, als auch die gesamte Motorbaugruppe vom Anpressrahmen bewegt um zu gewährleisten, dass sich der Lamellenstapel bei teil-ausgefahrener Jalousie mit den hängenden Lamellen bewegt, um Rückstellkräfte zu verhindern.

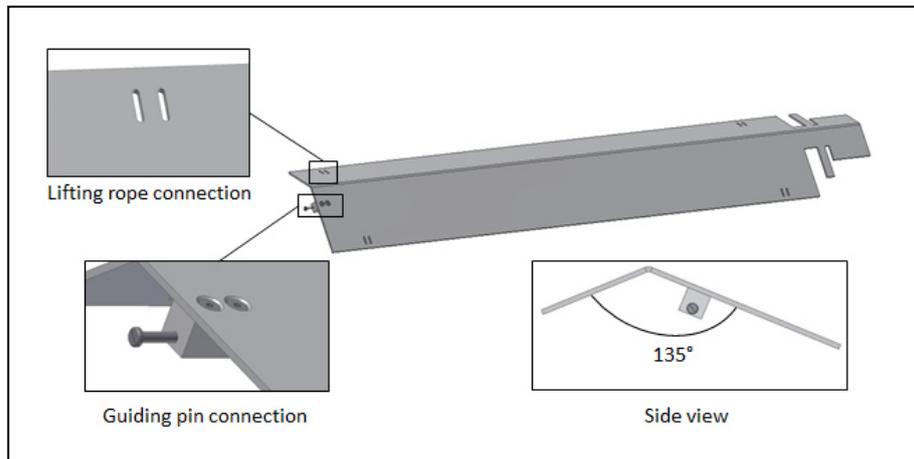


Abbildung 126: Unterschiene zum Raffen und Stapeln der Lamellen (Haeringer et al. 2018).

Für das Labortestmuster wurde der Mechanismus zum Kippen und Raffen durch zwei separate Jalousiemotoren realisiert, da dies kostengünstig zu realisieren ist. Nachteilig ist jedoch der zusätzlich nötige Bauraum, die Motoren sind übereinander platziert und vergrößern somit die opake Fläche. Für ein Produkt müsste der Antrieb daher verbessert und ggf. mit einer zu entwickelnden Lösung analog zu den Rutschkupplungen konventioneller Jalousie ersetzt werden.

Fassadenelement - Randverbund

Der Randverbund, d. h. in diesem Fall das Fassadenelement, in das die STJ integriert wird, muss zum einen die nötige Stabilität bieten, aber sollte zum anderen die thermischen Verluste geringhalten. Zusätzlich soll der Randverbund in geringen Stückzahlen preiswert zu fertigen sein. Deshalb wurden viele Normteile verwendet. In großen Bauprojekten kann der Randverbund durch speziell extrudierte Profile weiter optimiert werden. Abbildung 127 bis Abbildung 129 zeigen einen Überblick über die Ergebnisse der thermischen Simulationen der STJ (Haidar 2017). In Abbildung 127 ist zu sehen, dass keine stark ausgeprägten Wärmebrücken zwischen innen und außen bestehen. Die Dämmung von Anpressmechanismus und Sammelkanal verhindert zudem starke Wärmeverluste an den rahmen (vgl. Abbildung 128).

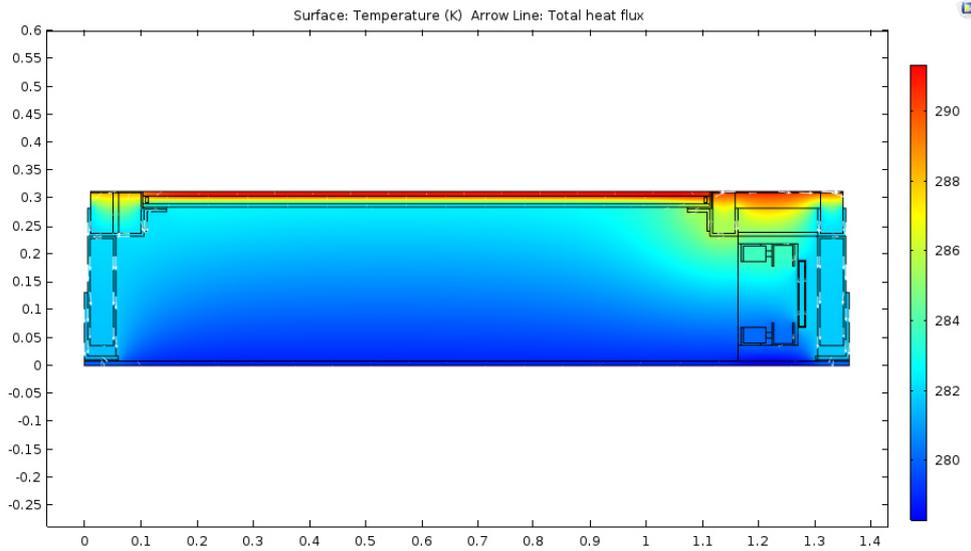


Abbildung 127: Ergebnisse einer thermischen Simulation eines horizontalen Querschnitts des STJ-Fassadenelements mit gerafften (d. h. ohne) Lamellen mit einer Raumtemperatur von 20 °C und einer Außentemperatur von 5 °C ohne Einstrahlung. Dimensionen in [m], farbige Temperaturskala in [K].

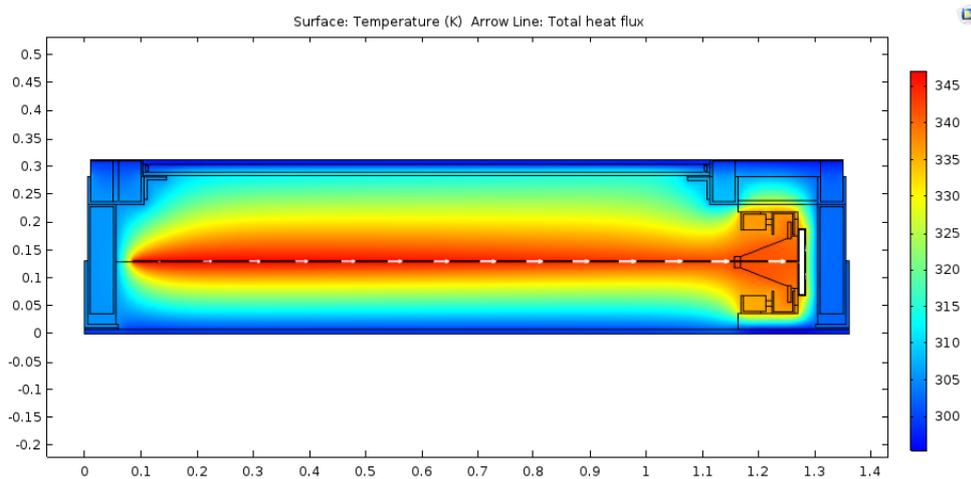


Abbildung 128: Ergebnisse einer thermischen Simulation eines horizontalen Querschnitts des STJ-Fassadenelements mit einer Außen- und Raumtemperatur von 20 °C, einer mittleren Fluidtemperatur von 50 °C und einer Einstrahlung von 1000 W/m². Dimensionen in [m], farbige Temperaturskala in [K].

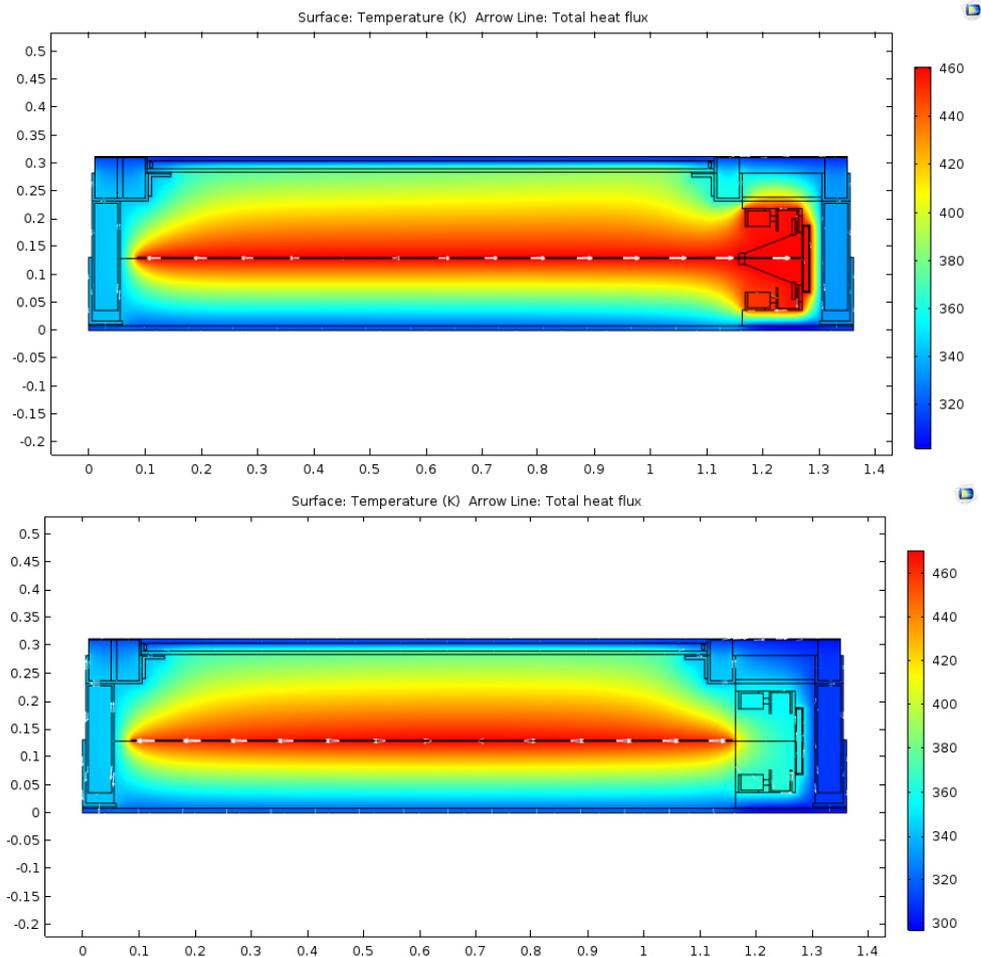


Abbildung 129: Ergebnisse einer thermischen Simulation mit einer Außen- und Raumtemperatur von 20 °C und einer Einstrahlung von 1000 W/m² ohne Solarthermiebetrieb (Stagnationsfall) für einen horizontalen Querschnitt mit Adapter und Heat-Pipe (oben) und ohne Adapter und Heat-Pipe (unten). Dimensionen in [m], farbige Temperaturskala in [K].

In Abbildung 129 sind die Ergebnisse im Stagnationsfall dargestellt. Der Absorber erreicht im Fall mit Adapter und Heat-Pipe eine maximale Temperatur von 187 °C. Bei konventionellen Flachkollektoren werden üblicherweise Stagnationstemperaturen von bis zu 200 °C erreicht. Aufgrund der 2D-Simulation werden Heat-Pipe und Adapter entlang der 3. Dimension als kontinuierlich modelliert, wodurch der Wärmetransport im Vergleich zum realen Fall überschätzt wird. Dieses Problem wird in einer zusätzlichen Simulation untersucht, in der Adapter und Heat-Pipes vernachlässigt werden. Die Ergebnisse zeigen hierbei eine Stagnationstemperatur des Absorbers von 196°C. Beide simulierten Absorbertemperaturen in Stagnation sind mit Werten eines Flachkollektors vergleichbar.

Abbildung 130 zeigt den Rahmen des Labortestmusters vor Montage der Abdeckbleche und Verglasungen.



Abbildung 130: Außenansicht des Fassadenelements. Links: Rahmen des Fassadenelements mit montierter Motorbaugruppe, Lamellen, und Sammelkanal, rechts im Rahmen. Nicht montiert sind Anpressrahmen, Abdeckbleche und Glasscheiben. Rechts: Fassadenelement mit montierten Abdeckblechen, ohne Verglasungen.

Labortestmuster der Solarthermischen Jalousie

Das 3,6 m hohe und 1,4 m breite Fassadenelement mit integrierter solarthermischer Jalousie besteht aus einem Hauptrahmen aus Aluminium-Hohlprofilen und Holz (Haeringer et al. 2018). Das Holz dient als thermische Trennung und reduziert mögliche Wärmebrücken zwischen Innen- und Außenseite. Auf der Außenseite ist das Element mit 8 mm dickem Einscheibensicherheitsglas vollverglast. Zur Innenseite sind die Bereiche des Jalousiemechanismus und des Anpressrahmens und –mechanismus, sowie der Bereich der gestapelten Lamellen mit Dämmung und Abdeckblechen opak ausgeführt. Der restliche Bereich ist mit einer 2,6 m hohen und 1,1 m breiten Isolierdoppelverglasung mit Verbundsicherheitsglas zum Innenraum ausgeführt. Zur Außenseite sind die Bereiche des Jalousiemechanismus und des Anpressrahmens und –mechanismus durch Abdeckbleche aus Aluminium verdeckt, die ca. 5 cm hinter der Scheibe angebracht sind, um damit die ästhetischen Vorteile einer „shadow box“ zu nutzen.

Ein Video über das Labortestmuster der solarthermischen Jalousie ist online auf der Projekt-Website sowie auf YouTube verfügbar (Fraunhofer ISE 2018).



Abbildung 131: Impressionen des Labortestmusters der Solarthermischen Jalousie.

3.1.3.9 Vermessung der Labortestmuster beider Technologien

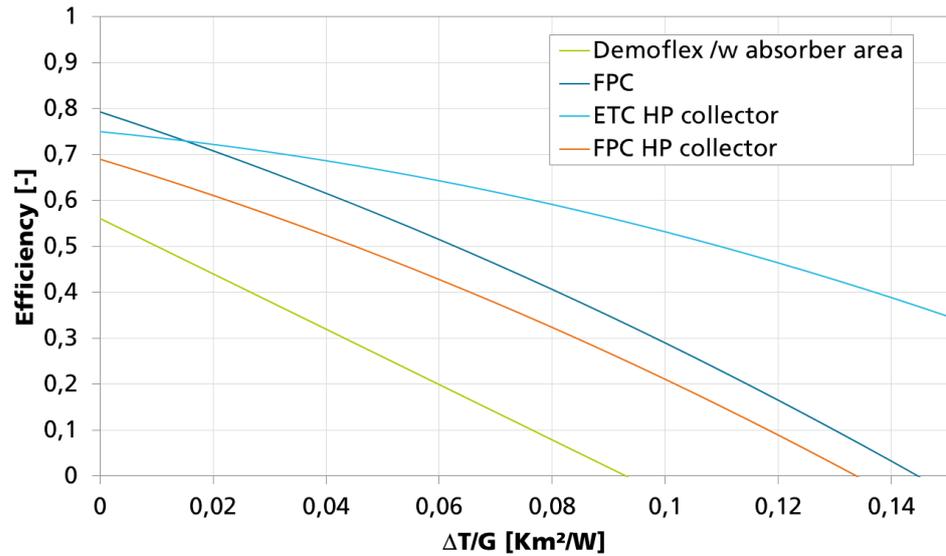
.....
Ablauf und Ergebnisse des
Vorhabens
.....

Streifenkollektor – Testkollektor Demoflex

Der Testkollektor Demoflex wurde auf dem Dach des Fraunhofer ISE vermessen (s. Abbildung 132). Es erfolgten eine Funktionsprüfung, ein Stagnationstest, eine Leistungsmessung sowie eine Vergleichsmessung in vertikaler Ausrichtung. Durch die Stagnation wurde ein Abfall des Konversionsfaktors η_0 von 0,42 auf 0,37 beobachtet. Diese Anfangsdegradation ist ein typisches Merkmal von Heat-Pipe-Kollektoren. In Abbildung 133 ist die Wirkungsgradkennlinie des Demoflex-Kollektors im Vergleich mit anderen typischen Kollektorwirkungsgradkennlinien gezeigt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Wirkungsgradkennlinie des Demoflex-Kollektors auf die Absorberfläche bezogen ist, jene der anderen Kollektoren jedoch wie üblich auf die Aperturfläche. Bei Bezug auf die Aperturfläche liegt die Wirkungsgradkennlinie des Demoflex aufgrund des ungünstigen Verhältnisses von Absorber- zu Aperturfläche noch niedriger. Abbildung 134 zeigt den Vergleich der Kennlinie bei horizontaler und vertikaler Ausrichtung des Kollektors.



Abbildung 132: Testkollektor „Demoflex“ während der Vermessung auf dem Dach des Fraunhofer ISE.



FPC = Flat plate collector, ETC = Evacuated tube collector, HP = Heat pipe

Abbildung 133: Vermessene Kollektorwirkungsgradkennlinie des Demoflex im Vergleich mit anderen Kollektoren.

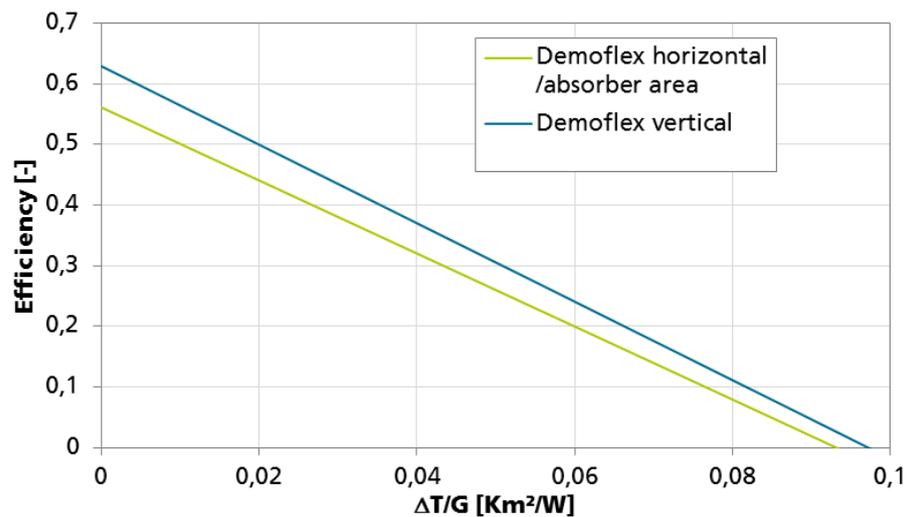


Abbildung 134: Vermessene Kollektorwirkungsgradkennlinie bei horizontaler und vertikaler Ausrichtung des Demoflex.

Wie zu erwarten war, zeigt der Testkollektor einen höheren Wirkungsgrad bei vertikaler Ausrichtung, was der besseren Funktion der Heat-Pipes unter diesem Winkel zugeschrieben werden kann. Der im Vergleich mit Standardkollektoren geringere Wirkungsgrad kann mit dem hohen Verhältnis von Gehäuse- zu Absorberfläche, dem relativ niedrigen Kollektorwirkungsgradfaktor F' durch die Heat-Pipe-Anbindung sowie der hohen thermischen Kapazität des Kollektors erklärt werden.

Es muss betont werden, dass der Schwerpunkt der Entwicklung auf der Demonstration des Konzepts eines Kollektors mit einem hohen architektonischen und konstruktiven Integrationsgrad in die Fassade lag, da diese beiden Aspekte als größte Hindernisse bei der solarthermischen Aktivierung der Fassade erkannt wurden. Die Erhöhung der Kollektoreffizienz trat hinter diesen beiden Zielen zurück. Diese Einschätzung wurde in vielen Gesprächen mit Kollektorbauern, Architekten und Bauherren geteilt. Die Erhöhung der Kollektoreffizienz ist dennoch ein wesentlicher Baustein des Kollektors auf dem Weg

zum Produkt und muss in einem möglichen Folgeprojekt oder einer entsprechenden Folgearbeit erfolgen. Dem Projektkonsortium ist auch bereits bewusst, welche Verbesserungsmöglichkeiten existieren, so dass dieser nächste Schritt in einem Folgeprojekt direkt angegangen werden kann.

Solarthermische Jalousie

Das Labortestmuster der solarthermischen Jalousie (vgl. Abschnitt 3.1.3.8) wurde mit kalorimetrischen Messungen am Freiluftteststand für solaraktive Gebäudehüllelemente OFREE (*Outdoor Test Facility for Real-size Building Envelope Elements*) des Fraunhofer ISE charakterisiert (Haeringer et al. 2019a; Haeringer et al. accepted). Zu den Möglichkeiten von OFREE gehören Messungen des g-Werts, Messungen des U-Wert, Messungen an gebäudeintegrierten photovoltaischen Systemen und Messung von gebäudeintegrierten solarthermischen Systemen (Maurer et al. 2015a). Die Messergebnisse der solarthermischen Jalousie sind solarthermischer Ertrag und solarer Wärmeeintrag durch die Fassade für verschiedene Kombinationen von Lamellenposition, Lamellenkippwinkel und Fluideingangstemperatur. Basierend auf diesen Ergebnissen wurde die technische Performance des Labortestmusters im Hinblick auf die solarthermische Leistung und die Sonnenschutzfunktionalität bewertet. Das Gesamtziel bestand darin, die technische Machbarkeit des gewählten STJ-Konzepts nachzuweisen, d. h. die gleichzeitige Funktion als Sonnenschutzeinrichtung und als solarthermischer Kollektor zu zeigen.

Das in Abbildung 135 dargestellte Messprinzip beruht auf einer "cooled plate-Methode", wie sie in (Kuhn 2014) für Laborbedingungen in Innenräumen ausführlich diskutiert wird. Ein Hauptbestandteil des Teststands ist die Wärmefluss-Messplatte, die aus einer isothermen Platte besteht, die mit einer Absorberschicht bedeckt ist. Die Temperatur der isothermen Platte wird per Fluid geregelt. Das Fluid selbst wird durch einen Thermostat auf eine gewünschte Temperatur eingestellt. Die Oberfläche der Absorberschicht ist so ausgelegt, dass sie ein hohes Absorptionsvermögen im solaren Wellenlängenbereich aufweist, um den größten Teil der durch die Probe transmittierten Strahlung zu absorbieren. Wärmeflussensoren und Temperatursensoren sind zwischen der isothermen Platte und der Absorberschicht eingebettet. Diese Sensoren können lokal die Temperatur $T_{abs,i}$ und die Wärmestromdichte $q_{abs,i}$ messen. Ein Foto der Messplatte ist in Abbildung 136 dargestellt.

Das Labortestmuster ist vor der Messplatte des OFREE-Teststands montiert. Die der Messplatte zugewandte Fläche stellt die dem Inneren eines Gebäudes zugewandte Fläche des Fassadenelements dar. Die Temperatur der Oberfläche der Messplatte T_{int} repräsentiert die Temperatur des Gebäudeinneren. Das Messprinzip eignet sich für Proben mit ebener Rückseite. Der Abstand zwischen der Messplatte und der Rückseite des Labortestmusters wird so gewählt, dass der gesamte interne Wärmeübergangskoeffizient h_{int} über diesen Luftspalt $8 \pm 1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ in Anlehnung an (ISO 19467) beträgt. Der äußere Wärmeübergangskoeffizient h_{ext} wird durch eine Bewicklung eingestellt, der unter oder seitlich von der Probe angeordnet werden kann. Die Ventilatorleistung wird so eingestellt, dass $h_{ext} = 25 \pm 1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ während einer Kalibrierungsmessung in Bezug auf (EN 410) und (EN 673) für die Wärmeflussensoren in der Mitte der Probe und für den Mittelwert aller Wärmeflussensoren erreicht wird (Kuhn 2014). Die Umgebungsbedingungen werden durch weitere Sensoren erfasst: zwei Pyranometer für die Bestrahlungsstärke, ein Pyrgeometer für langwellige atmosphärische Strahlung, mehrere Temperatursensoren, ein Schalenanemometer für die Windgeschwindigkeit und einen Regensensor. Eines der Pyranometer ist neben der Probe montiert und misst die gesamte hemisphärische Bestrahlungsstärke E_h auf der Ebene der Probenoberfläche. Ein weiteres Pyranometer mit Schattenring ist neben dem Teststand in horizontaler Ausrichtung angebracht und misst die diffuse Bestrahlungsstärke E_{dif} . Die Temperatursensoren messen die Umgebungsluft T_{amb} sowie die Temperatur der Luft der Bewicklung.

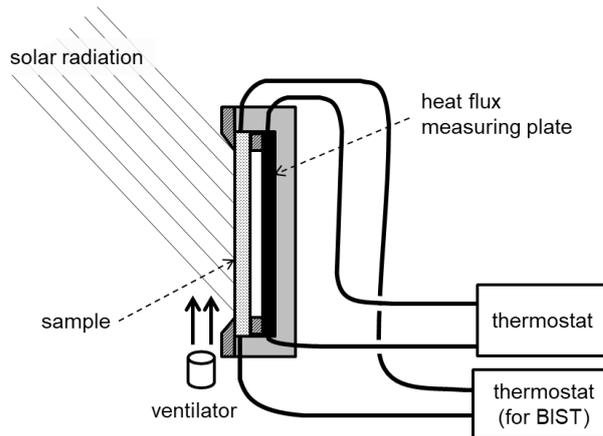


Abbildung 135: Messprinzip von OFREE für aktive Gebäudehüllelemente.



Abbildung 136: Links: OFREE-Teststand ohne Prüfling, schwarzer Absorberbereich der Messplatte sichtbar. Rechts: STJ-Labortestmuster auf dem OFREE montiert, rechts ist die Bewicklung zur Regelung des externen Wärmeübergangskoeffizienten sichtbar.

Bei Elementen mit bauwerkintegrierten solarthermischen Systemen (BIST) ist der solarthermische Kollektor mit einem zweiten Thermostat verbunden, der die Kollektorfluid-eintrittstemperatur $T_{f,in}$ regelt. Die Kollektorfluid-Austrittstemperatur $T_{f,out}$ wird ebenfalls gemessen. Der Massenstrom \dot{m} innerhalb des Hydraulikkreises wird ebenfalls gemessen.

Die gesamte Messplatte und die Probe sind auf einem Tracker montiert, der die Drehung der Messplatte samt Probe um eine vertikale und horizontale Achse ermöglicht. Dies ermöglicht die Nachführung der Sonne sowohl in Azimutrichtung als auch in zweiachsiger Nachführung, was zu senkrechten Einfallswinkeln auf die Probe führt. Das STJ-Labortestmuster wird immer in vertikaler Fassadenausrichtung platziert. Der Azimutwinkel der Fassade wird so nachgeführt, dass er der Sonne bei Tagesmessungen folgt. Das STJ-Labortestmuster bedeckt den größten Teil der Messplatte, und die restliche Fläche ist mit einer Dämmung mit der gleichen Dicke wie das Prüfmuster bedeckt, wie in Abbildung 136 zu sehen ist.

Die für die verschiedenen Messsituationen variierten Betriebsparameter sind:

- Lamellenposition BE (d. h. wie weit die STJ herunter gefahren ist), mit $BE = 1$ für vollständig ausgefahrene Jalousie und $BE = 0$ für vollständig geraffte Jalousie
- Lamellenkippwinkel β , mit $\beta = 82^\circ$ für vollständig geschlossene Lamellen
- Kollektorfluid-Eintrittstemperatur $T_{f,in}$

Auch die Sonneneinstrahlung E_h und die Umgebungstemperatur T_{amb} variieren, können aber nicht beeinflusst werden. Messungen ohne Sonneneinstrahlung, d. h. nachts, wurden durchgeführt, um den Gesamtwärmedurchgangskoeffizienten U des Fassadenelements für verschiedene Lamellenpositionen zu überprüfen.

Es wurden insgesamt 27 Messpunkte definiert. Aufgrund von ungünstigen Wetterbedingungen (v. a. stark schwankende Einstrahlung) sind nur 20 der 27 Messpunkte sinnvoll auswertbar. In Tabelle 10 sind die ausgewerteten Messpunkte der Tagesmessungen aufgezählt. Der Massenstrom wurde, wie in (ISO 9806) vorgeschlagen, auf $0,02 \text{ kg/s}$ pro m^2 Absorberfläche eingestellt, d. h. $\dot{m} \cong 0.054 \text{ kg/s}$. Für die Tagesmessungen wurde die Innentemperatur auf $T_{int} = 22^\circ\text{C}$ eingestellt, um in etwa der Umgebungstemperatur T_{amb} zu entsprechen. Die Probe wurde so nachgeführt, dass der Azimutwinkel der Fassade immer der Sonne zugewandt ist, d. h. die Probe erhält die Bestrahlungsstärke nur bei wechselnden Höhenwinkeln und konstantem Azimutwinkel von 0° .

Tabelle 10: Messplan für kalorimetrische Vermessung der Solarthermischen Jalousie.

Beschreibung	BE	β [°]	$T_{f,in}$ [°C]
Geraffte Lamellen bei niedriger Fluidtemp.	0	-	21
Halb-geraffte, geschlossene Lamellen bei niedriger Fluidtemp.	0.5	82	21
bei mittlerer Fluidtemp.	0.5	82	55
Halb-geraffte, 45° gekippte Lamellen bei niedriger Fluidtemp.	0.5	45	21
bei mittlerer Fluidtemp.	0.5	45	55
Halb-geraffte, geöffnete Lamellen bei niedriger Fluidtemp.	0.5	10	21
Ausgefahrene, geschlossene Lamellen bei niedriger Fluidtemp.	1	82	21
bei mittlerer Fluidtemp.	1	82	55
bei hoher Fluidtemp.	1	82	90
Ausgefahrene, 45° gekippte Lamellen bei niedriger Fluidtemp.	1	45	21
Ausgefahrene, geöffnete Lamellen bei niedriger Fluidtemp.	1	10	21

Eine beispielhafte Messkurve ist in Abbildung 137 dargestellt. Aufgrund der Azimutnachführung ist die Sonneneinstrahlung auf der Probenebene mit $G_h = 750 - 820 \text{ W/m}^2$ für die Zeit zwischen 8:45 und 16:30 Uhr relativ konstant, mit Ausnahme einer kurzen Bewölkungsperiode um 10:00 Uhr. Die Umgebungstemperatur steigt im gleichen Zeitraum von $T_{amb} \approx 19^\circ\text{C}$ auf $T_{amb} \approx 25^\circ\text{C}$ an. Unter Verwendung der solarthermischen Effizienz η und des g -Werts als Kriterien wurde die quasistationäre Periode für diese Messung zwischen 13:16 und 15:11 festgelegt.

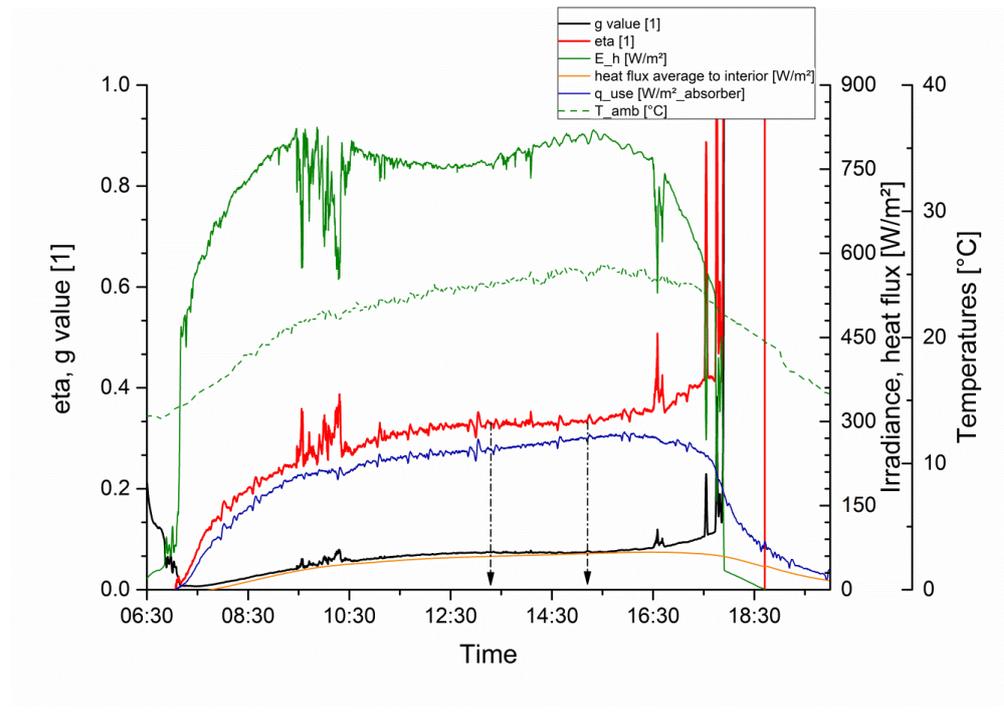


Abbildung 137: Messkurve des solarthermischen Ertrags q_{user} des Wärmeeintrags durch das Fassadenelement (heat flux average to interior) für vollständig ausgefahrene STJ (BE=1) mit geschlossenen Lamellen ($\beta=82^\circ$) und niedrigem $T_{f,in}=21^\circ\text{C}$ am 15.09.2018. Gestrichelte Pfeile zeigen Start- und Endzeit der zugewiesenen quasistationären Bedingungen auf der Grundlage von Wirkungsgrad η und dem g -Wert. Einstrahlung auf Probenebene bezeichnet mit E_h und Umgebungstemperatur T_{amb} . (Haeringer et al. 2019a)

In Abbildung 138 ist der Wirkungsgrad für verschiedene Betriebspunkte dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass diese bisher stark unterhalb derer von konventionellen Kollektoren sind und somit noch ein erhebliches technisches Weiterentwicklungspotential besteht. Der thermische Kontaktwiderstand der schaltbaren thermischen Kopplung wurde dabei als Nadelöhr mit dem größten Verbesserungspotential identifiziert. Eine verbesserte Isolierung auf Ebene der Lamellen, Adapter und Sammelkanal würde durch verringerte thermische Verluste ebenfalls die Wirkungsgrade erhöhen. Überschlägige Abschätzungen zeigen eine potentielle Verdopplung der Wirkungsgrade, wodurch die Wirkungsgrade näher an konventionelle Kollektoren herankommen.

Nichtsdestotrotz beweist das Testmuster die Machbarkeit des Konzepts der STJ mit Heat-Pipes und schaltbarer thermischer Kopplung. Da es das erste Mal war, dass eine solche STJ gebaut wurde, und da sie auf kommerziell erhältlichen Komponenten basierte, kann dies als Erfolg angesehen werden.

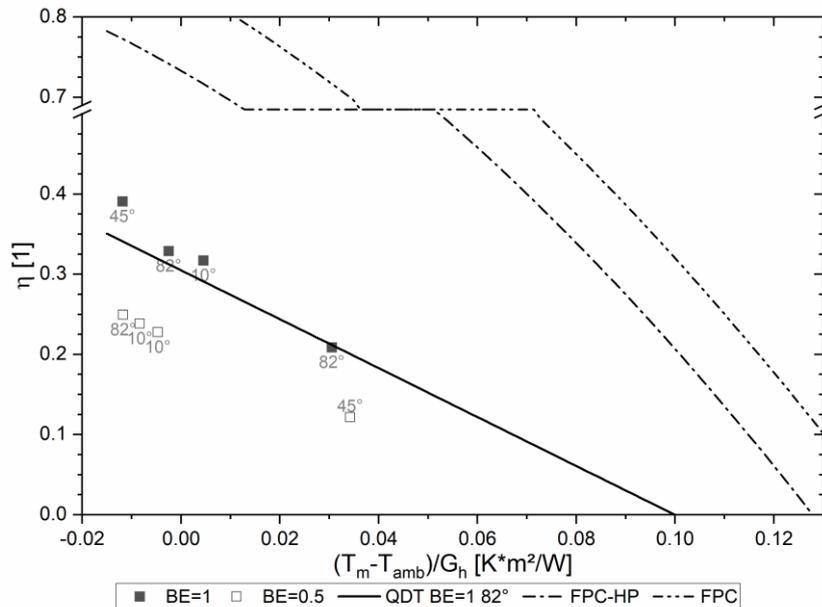


Abbildung 138: Gemessene solarthermische Wirkungsgrade η der STJ für $T_{amb} \approx T_{int}$ in Abhängigkeit von Temperaturdifferenz zwischen Fluidmitteltemperatur T_m und Umgebungstemperatur T_{amb} geteilt durch Einstrahlung auf der Probenebene G_h . Lamellenkippwinkel β als Beschriftung für jeden Datenpunkt notiert. Wirkungsgradkennlinien entsprechend der Kollektorparameter in Tabelle 11. Absorberfläche $A_{abs,total} = 2.67 \text{ m}^2$ zur Berechnung der Wirkungsgrade der STJ verwendet. (Haeringer et al. accepted)

Tabelle 11: Kollektorparameter der STJ für $T_{amb} \approx T_{int}$, ausgewertet mittels „quasi-dynamic testing“ (QDT) in Anlehnung an (ISO 9806) im Vergleich zu einem Flachkollektor mit Heat-Pipes - FPC-HP - aus einem Forschungsprojekt (Schiebler et al. 2018) und einem kommerziell erhältlichen Flachkollektor - FPC - (DIN CERTCO 2015). Referenzfläche $A_{abs,total} = 2.67 \text{ m}^2$ für die STJ verwendet. (Haeringer et al. accepted)

	STJ $BE = 1$ $\beta = 82^\circ$	FPC-HP	FPC
η_0 [1]	0.307 ± 0.010	0.733	0.842
a_1 [W/m²K]	3.07 ± 0.16	3.562	3.620
a_2 [W/m²K²]	0	0.017	0.016
a_5 [kJ/m²K]	138 ± 12	-	6.8
b_0 [1]	0.12 ± 0.11	-	0.13
K_d	0.88 ± 0.13	-	-

Bei der Auswertung der Wärmeflüsse durch das Fassadenelement zur Bestimmung der g-Werte wurde festgestellt, dass ein Teil der Wärmeflussensoren nachkalibriert werden muss, was im Projektzeitraum nicht erfolgreich abgeschlossen werden konnte. Die maximale Unsicherheit, die durch diese fehlende Nachkalibrierung, erwartet wird, ist basierend auf Vorversuchen zur Nachkalibrierung 20 % relativ. Da diese Rekalibrierung alle g-Werte in gleichem Maße und in die gleiche Richtung ändern würde, kann dennoch eine qualitative Auswertung der g-Werte und unter Berücksichtigung der Unsicherheit auch eine quantitative Bewertung durchgeführt werden.

In Abbildung 139 wird der g-Wert (center-of-glazing, d. h. in der Mitte der Verglasung) für geschlossene und abgesenkte Lamellen für unterschiedliche Kollektorfluidtemperaturen und für Stagnation, d. h. wenn die solarthermische Funktion nicht betrieben wird,

verglichen ($\dot{m} = 0$). Es ist deutlich zu erkennen, dass der g-Wert für die niedrigste Kollektorfluidtemperatur $T_{f,in} \approx 21 \text{ °C}$ am niedrigsten ist und für die höchste Kollektorfluidtemperatur $T_{f,in} \approx 90 \text{ °C}$ um 60 % relativ ansteigt. Im Vergleich zur Stagnation, d. h. wenn die STJ als konventionelle Jalousie ohne solarthermischen Betrieb arbeitet, ist der g-Wert auch für den Betrieb mit der höchsten Flüssigkeitseintrittstemperatur reduziert. Der Betrieb bei niedrigen Fluidtemperaturen kann zu einer relativen Abnahme des g-Werts um 30-40% im Vergleich zu Stagnationsbedingungen führen. Dies führt zu der Schlussfolgerung, dass der solarthermische Betrieb den Lamellen Wärme entziehen kann und beweist erneut die Machbarkeit des untersuchten STJ-Konzepts.

Der g-Wert für die Verglasung des Fassadenelements (d. h. $BE = 0$) wurde ebenfalls bestimmt. Es ist zu sehen, dass die STJ, die mit niedrigem $T_{f,in}$ betrieben wird, den solaren Wärmegewinn um bis zu 90% im Vergleich zur Verglasung selbst (d. h. mit geraffter STJ) reduzieren kann. Daten von Closed-Cavity-Facade-Elementen mit integrierten Jalousien aus (Rudolf 2015) zeigen eine ähnliche Reduktion des g-Werts bei einem geringeren visuellen Transmissionsgrad von 60 % im Vergleich zu 73 % der Verglasung des STJ-Labortestmusters. Den gleichen Optimierungsmöglichkeiten, wie sie für die solarthermische Leistung diskutiert wurden, folgend, kann der g-Wert weiter verringert werden, wodurch der Effekt auf die Senkung des Kühlbedarfs von Gebäuden verbessert wird. Ein weiterer interessanter Ansatz zur weiteren Verringerung des g-Werts ist die Verwendung herkömmlicher grauer Lamellenbeschichtungen anstelle der hoch absorbierenden spektral-selektiven Beschichtung des Labortestmusters. Zulaute einer geringeren solarthermischen Leistung könnte der solare Wärmeeintrag durch das STJ-Fassadenelement noch weiter verringert werden, wie in (Haeringer et al. 2017b) theoretisch diskutiert wurde. Dieser Effekt wird in Abschnitt 3.1.4.4 per Simulation untersucht und führte zu überraschenden Ergebnissen.

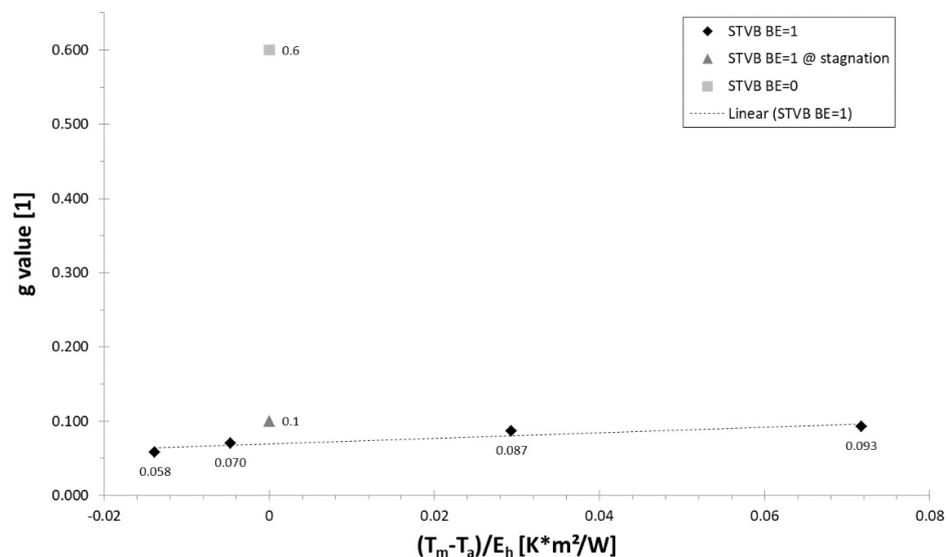


Abbildung 139: Ausgewählte gemessene g-Werte des STJ-Testmusters (Werte mit 20% Unsicherheit wg. ausstehender Nachkalibrierung der Wärmeflussensoren) als Funktion der mittleren Fluidtemperatur T_m , der Umgebungstemperatur T_a und der Einstrahlung auf der Probenebene E_h , mit $BE = 1$ und $\beta = 82^\circ$. Werte für Stagnation und $BE = 0$ an frei gewählter Position auf der x-Achse gezeigt, da T_m ohne solarthermischen Betrieb nicht definiert ist. (Haeringer et al. 2019a)

Als wichtigstes Ergebnis der Vermessung des STJ-Labortestmusters ist festzuhalten, dass die Funktionsfähigkeit in Bezug auf solarthermische Funktionalität und Sonnenschutz-Funktionalität gezeigt werden konnte, es aber noch großen Weiterentwicklungsbedarf gibt.

3.1.3.10 Marktverfügbarkeit der benötigten Komponenten

Ablauf und Ergebnisse des
Vorhabens

Heat-Pipes

Ein wichtiges Ziel des Projekts ArKol ist die winkelflexible, auch horizontale Ausrichtung der Kollektoren bzw. Absorberstreifen. So sollen in erster Linie das architektonische Erscheinungsbild und die Gestaltungsfreiheit erhöht werden. Durch ein entsprechendes Anstellen der Absorberfinne kann bei horizontaler Ausrichtung zudem der Kollektorertrag erhöht werden. Für eine horizontale oder auf Grund der gegebenen Fertigungs- und Installationstoleranzen mögliche leicht negative Neigung der Heat-Pipe (Kondensator unterhalb Verdampfer) ist keine Marktverfügbarkeit gegeben. Entsprechende Analysen sind Gegenstand des Projekts (s. Kapitel 3.1.3.2). Bei leicht positiver Neigung oder vertikaler Ausrichtung (Kondensator oberhalb Verdampfer) der Heat-Pipes – wie in den Demonstratoren im Projekt umgesetzt – ist eine prinzipielle Marktverfügbarkeit von Heat-Pipes gegeben. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass jede Abweichung in der Länge von den Rastermaßen zu einer Sonderanfertigung führt, die sich stark auf den Preis auswirkt. Bei größeren Bestellmengen sinken die Bestellpreise erheblich. Dennoch kann hier von Normteilen gesprochen werden, da hier nur die Länge der Heat-Pipes abweichend ist. Die im Projekt verwendeten Heat-Pipes wurden von etablierten Heat-Pipe-Herstellern (Quick-Ohm und CRS Engineering) bezogen.

Komponenten für den Streifenkollektor

Der Aufbau des Streifenkollektors unterscheidet sich von jenem eines marktüblichen Flachkollektors durch seine Dimensionen (geringe Bauhöhe), durch die Anbindung der Heat-Pipe an einen speziellen Sammelkanal sowie durch die Ausführung als Teil der Fassade. Im Projektverlauf wurde der Fokus auf eine Lösung als vorgehängte hinterlüftete Fassade (VHF) gesetzt, nachdem festgestellt worden war, dass eine Ausführung als WDVS schwieriger wäre als ursprünglich gedacht. Daher konnten marktübliche Unterkonstruktionen mit Traversen sowie zugehörige Agraffen verwendet werden. Beim Kollektor selbst konnte marktverfügbares spektralselektives Blech eingesetzt werden, auch bei der Verglasung mussten lediglich die benötigten Maße berücksichtigt werden. Für das Gehäuse sowie die Sammelkanäle wurden Strangpressprofile aus Aluminium verwendet; die Profile wurden teilweise eigens für die Muster als Kleinserie hergestellt. Bei der Wärmedämmung konnte auf marktübliche Produkte zurückgegriffen werden. Die ersten Muster wurden am Fraunhofer ISE gefertigt, die Kollektoren für die Demonstrationsfassade wurden von Fa. Wagner Solar im Unterauftrag von DAW SE auf Basis ihrer üblichen Kollektorfertigung hergestellt.

Kollektorspezifische Bauteile waren hierbei:

- Rahmenprofil
Das Rahmenprofil wurde von einem externen Dienstleister stranggepresst. Profile dieser und ähnlicher Form sind auf dem Markt verfügbar.
- Absorberblech mit angeschweißten Heat-Pipes in Winkellage
Die Winkellage der Heat-Pipes erforderte einen angepassten Schweißprozess, der auf einer üblichen Laserschweißanlage durchgeführt wurde. Die für die Demofassade verwendeten Heat-Pipes konnten dem Druck der Schweißwalze nicht standhalten und mussten durch eine zusätzliche Rohrwandung abgestützt werden. Die beim Testkollektor „Demoflex“ verwendeten Heat-Pipes waren bei diesem Prozess unkritisch. Diese Diskrepanz wird auf eine geringere Wandungsstärke bei den in der Demofassade verwendeten Heat-Pipes und eine andere Verschlussstechnik zurückgeführt und sollte bei Folgebestellungen berücksichtigt werden.

- Heat-Pipe-Adapter (zweiteilig)
Die benötigten Adapter aus Aluminium stellen Sonderbauteile dar, die auf CNC-Fräsen von Wagner Solar hergestellt wurden. Die Adapter können von jeder mechanischen Werkstatt bzw. jedem Lohnfertiger gefertigt werden.

Verfügbarkeit von Normteilen

Für die Demonstrationsfassade wurden die Streifenkollektoren von Wagner Solar hergestellt. Die dabei verwendeten Normteile waren:

- Glasscheiben
Die Glasscheiben bestehen aus Weißglas ohne Anti-Reflex Beschichtung und sind nicht vorgespannt. Baugleiche Glasscheiben können bei nahezu jedem Glaser bezogen werden. Die fehlende AR-Beschichtung sollte allerdings bei Folgebestellungen unbedingt hinzugefügt werden. Vorgespanntes Weißglas mit dieser Art der Beschichtung findet sich auch unter dem Begriff „Solarglas“. Eine Mindestbestellmenge ist dann einzuplanen.
- Glaseinfassung
Die Gläser werden mithilfe von Gummilippen eingefasst und mit diesen in das Rahmenprofil eingesetzt. Die verwendeten Gummilippen sind Standard Meterware aus dem Kollektorbau.
- Agraffen
Die verwendeten Agraffen sind Normteile aus dem Lieferprogramm von Lithodecor (DAW) und werden in ähnlicher Form auch von anderen Herstellern für VHF-UK angeboten.

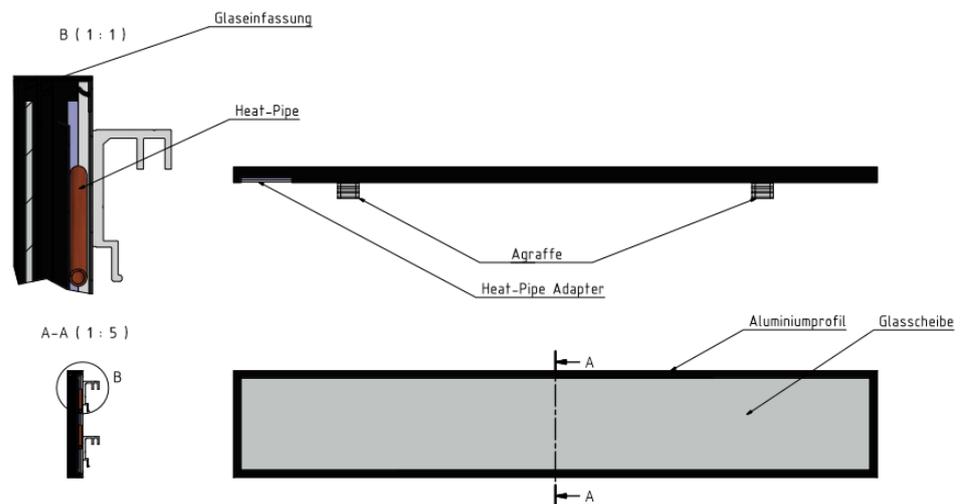


Abbildung 140: Bauteile des Solarthermischen Streifenkollektors.

Komponenten für die Solarthermische Jalousie

Die Labortestmuster und Demoelement der Solarthermischen Jalousie beinhalteten neben Normprofilen und Normbauteilen auch viele per CNC-Fräse selbst gefertigte Komponenten, wobei viele Analogien zum Streifenkollektor bestehen.

Die Bestandteile der Lamelle (Absorberblech mit angeschweißten Heat-Pipes in Winkel-lage, Lamellenrahmen, Heat-Pipe-Adapter), des Sammelkanals und des Mechanismus der schaltbaren thermischen Kopplung (Anpressmechanismus) wurden speziell angefertigt, entsprechen jedoch konventionellen Herstellungsmethoden und sind daher für größere Stückzahlen problemlos beziehbar. Bei größeren Stückzahlen bietet sich zudem an, spezielle Profile extrudieren zu lassen oder spezielle Formen als Gussteile herzustellen, z. B. Lamellenrahmen und Heat-Pipe-Adapter. Die Komplexität des Anpressmechanismus macht jedoch eine Weiterentwicklung und Vereinfachung notwendig.

Der Jalousiemechanismus musste durch die schweren Lamellen und die hohe Genauigkeit in der Positionierung speziell für die STJ entwickelt werden. Dabei wurde zwar auf Bauteile aus herkömmlichen Raffstoren (Motoren, Scherenketten) zurückgegriffen, er stellt jedoch einen hohen Grad an Sonderanfertigung dar. Vor einer Markteinführung bedarf es hier intensiver Weiterentwicklung um eine Vereinfachung des Mechanismus zu erreichen.

Das Fassadenelement, in dem die STJ integriert war, wurde aus Normteilen (Alu-Profile, Dämmung, Verglasung) hergestellt. Da sich die STJ in einem späteren Produkt in verschiedene Fassadensysteme verschiedener Systemanbieter (z. B. Schüco, Wicona o. a.) einbauen lassen sollte, ist die Herausforderung nicht das Fassadenelement selbst, sondern die Schnittstelle zwischen Fassadenelement und STJ – diese ist in Folgeprojekten zu lösen, wobei das entwickelte Labortestmuster als Basis dienen kann.

3.1.4 Modellierung und Simulation der Gesamtkonzepte

3.1.4.1 Simulationsmodell des Streifenkollektors

Um die möglichen thermischen Erträge des Streifenkollektors einschätzen zu können, wurden vom Fraunhofer ISE Systemsimulationen durchgeführt. Als Grundlage dafür wurden einerseits die gemessenen Kollektorparameter verwendet, andererseits auch Parameter für einen optimierten Kollektor angenommen, weil deutlich geworden war, dass der gemessene Kollektor bezüglich der Wärmeübertragung vom Absorber bis zum Solarfluid, der Wärmedämmung, der optischen Werte der Glasabdeckung und des Flächenverhältnisses von Apertur- zu Absorberfläche noch verbesserungswürdig ist. Über diese beiden Kollektoren – »Demoflex, gemessen« und »Demoflex, potential« – hinaus wurde auch ein marktüblicher Flachkollektor – »Referenz, FPC« – modelliert.

Für die Analyse und Bewertung wurden drei Kollektoren an der Fassade untersucht:

- **Kollektor 1 (Demoflex, gemessen):** Streifenkollektor mit den gemessenen Leistungsparameter entsprechend AP5
- **Kollektor 2 (Demoflex, potential):** Demoflex-Streifenkollektor der zweiten Generation mit verbesserter Leistung. Hierfür wurde eine Abschätzung des Potenzials zur Leistungssteigerung basierend auf dem gemessenen Kollektor und unter Verwendung eines physikalischen Zwei-Knoten-Kollektormodells (Lämmle et al. 2016) getroffen. Die Verbesserung der Leistung basiert auf folgenden Annahmen:
 - Geometrie: Flächenverhältnis $A_{\text{Apertur}}/A_{\text{Absorber}} = 1,1$ statt 1,5
 - Optik: Doppelseitige Antireflexbeschichtung: $\tau_{\text{Abdeckung}} = 0,95$ statt 0,9
 - Wärmeanbindung an Sammler: $F' = 0,85$ statt 0,73
 - Kollektor- und Sammlerdämmung: Wärmeverluste sinken um 30 %. $U_{\text{Loss}} = 6,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ statt $8,8 \text{ W/m}^2\text{K}$
- **Kollektor 3 (Referenz, FPC):** kommerzieller Flachkollektor mit einer marktüblichen, durchschnittlichen Leistung

Die Leistungsparameter der modellierten Kollektoren sind Tabelle 12 zu entnehmen.

Tabelle 12: Leistungsparameter der untersuchten Kollektoren für die Ertragssimulation

.....
Ablauf und Ergebnisse des
.....
habens

		Kollektor 1	Kollektor 2	Kollektor 3
Beschreibung		Demoflex, gemessen	Demoflex, potential	Referenz, FPC
Flächenbezug		Apertur	Apertur	Apertur
η_{0_beam}		0,41	0,70	0,793
c_1	W/m ² K	4,22	5,78	4,03
c_2	W/m ² K ²	0,00	0,00	0,0105
c_5	kJ/m ² K	55717	7800	5500
b_0		0,22	0,1	0,09
$K_{\tau d}$		0,99	0,99	0,9
Kommentare		Messung Demoflex, Vertikal-montage (vgl. Abschnitt 3.1.3.9)	Verbesserung der Geometrie, Optik, Wärmeanbindung und Wärmeverluste entsprechend Beschreibung im Text	Kommerzieller, durchschnittlicher Flachkollektor

3.1.4.2 Energetische Jahressimulationen des Streifenkollektors

Die Energieerträge der drei Kollektoren wurden exemplarisch für einen Neubau eines Mehrfamiliengebäudes mit zehn Wohneinheiten ausgewertet (Abbildung 141). Die beispielhaften Gebäudedaten stammten vom IBK2. Bei dem modellierten Energiekonzept versorgt die Solarthermiefassade das Gebäude mit Warmwasser und Raumwärme. Es handelt sich um eine so genannte Kombianlage zur Unterstützung der kombinierten Warmwasser- und Heizwärme (Abbildung 142). Den restlichen Energiebedarf kann beispielsweise eine Wärmepumpe oder ein Erdgaskessel decken.

Die Daten des Gebäudes (Heizbedarf, verfügbare Fassadenflächen) basieren auf einer Analyse des Gebäudebestands im Rahmen der im Projektverbund »Low-Ex im Bestand« durchgeführten Forschungsarbeiten (Ebert 2018). Die verwendeten Gebäudedaten und Energiekenndaten sind in Tabelle 13 aufgeführt.

Tabelle 13: Randbedingungen für die Gebäudesimulation

Parameter	Einheit	Wert
Anzahl Wohneinheiten		10
Anzahl Bewohner		19
Bewohnte Wohnfläche	m ²	839
Spez. Heizwärmebedarf	kWh/m ²	39
Heizbedarf	kWh/a	32 704
Fassadenfläche ohne Fenster	m ²	827
Fassadenfläche Süd	m ²	344
Fassadenfläche Ost	m ²	81
Warmwasserbedarf	l/d	1000
Energiebedarf Warmwasser	kWh/a	20 201
Spez. Speichergröße	l/m ² Koll	50
Standort		Würzburg
Neigungswinkel		90° (Fassade)

Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens

Ausrichtung Azimut		Süd Süd-West West
Belegung Fassadenfläche	%	10 25 50
Kollektorfeldfläche (Apertur)	m ²	34 86 172
Speichergröße	m ³	1,7 4,3 8,6



Abbildung 141: Neubau eines beispielhaften Mehrfamiliengebäudes mit 10 Wohneinheiten.

Der Aufbau, Funktionsweise, Implementierung und Regelung der solarthermischen Anlage basiert auf einer Kombination von System 2 (MFH) und System 4 (Kombisystem), die in (Lämmle 2018) beschrieben sind.

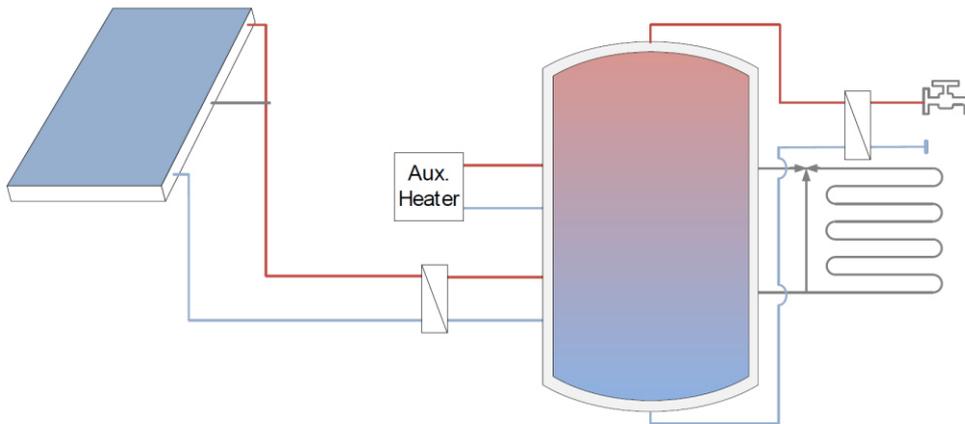


Abbildung 142: Prinzipschaubild der solarthermischen Kombianlage eines Mehrfamiliengebäudes.

Zunächst werden die jährlichen Wärmeerträge der Kollektoren verglichen (Abbildung 143 bis Abbildung 145). Der untersuchte »Standard«-Fall entspricht dabei:

- Fassadenbelegung von 25 %, d. h. 85 m² Aperturfläche
- Ausrichtung nach Süden

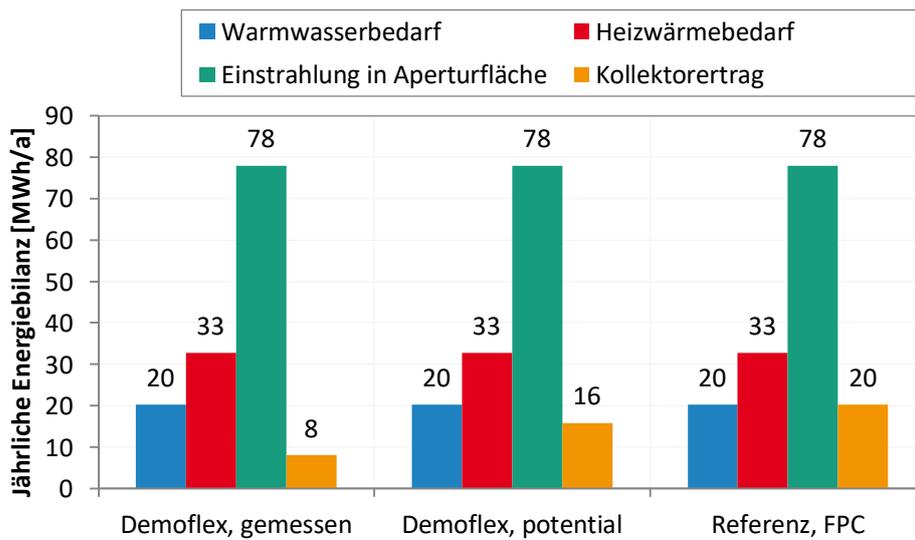


Abbildung 143: Jährliche Energiebilanz.

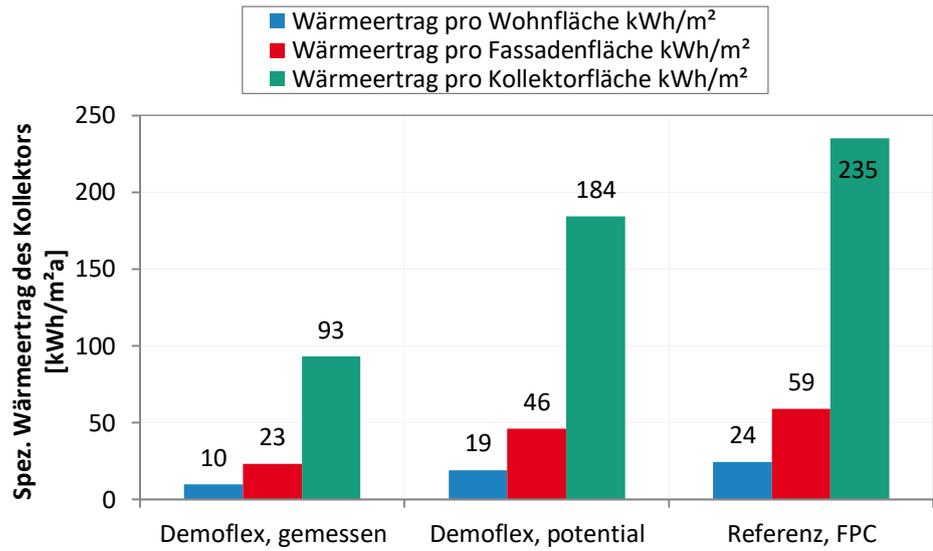


Abbildung 144: Jährlicher Wärmeertrag der Kollektoren mit unterschiedlichen Flächenbezügen.

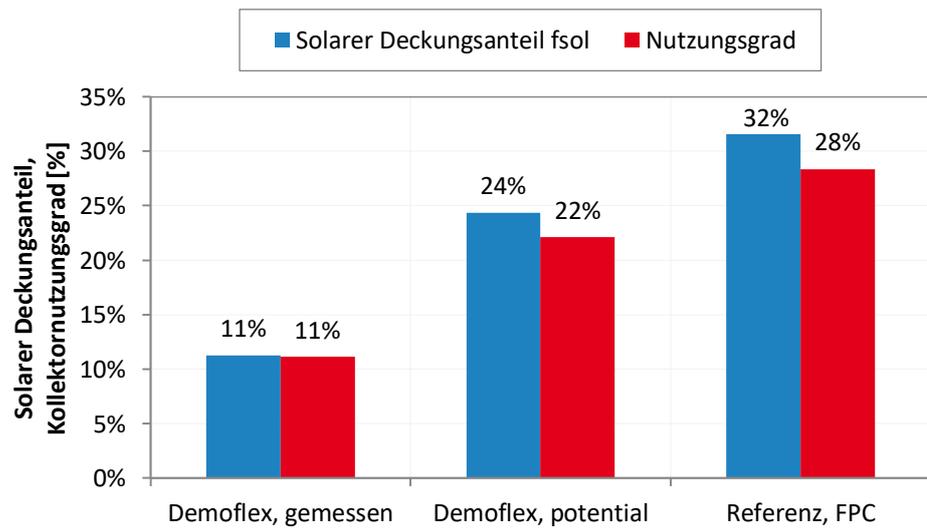


Abbildung 145: Solarer Deckungsanteil (Anteil der solaren Wärme an Heiz- und Warmwasserbedarf) und jährlicher Nutzungsgrad (jährlicher Wirkungsgrad = Kollektorertrag/Einstrahlung in Kollektorebene).

Darüber hinaus wurde der Einfluss der Fassadenorientierung untersucht (Abbildung 146 bis Abbildung 148). Für beide Demoflex-Kollektoren nimmt der nutzbare Ertrag in Süd-West-Ausrichtung geringfügig zu, obwohl die Einstrahlung dort 31 kWh/m² geringer ausfällt.

Der Flachkollektor erreicht seinen maximalen Ertrag in Süd-Ausrichtung.

.....
auf und Ergebnisse des
habens
.....

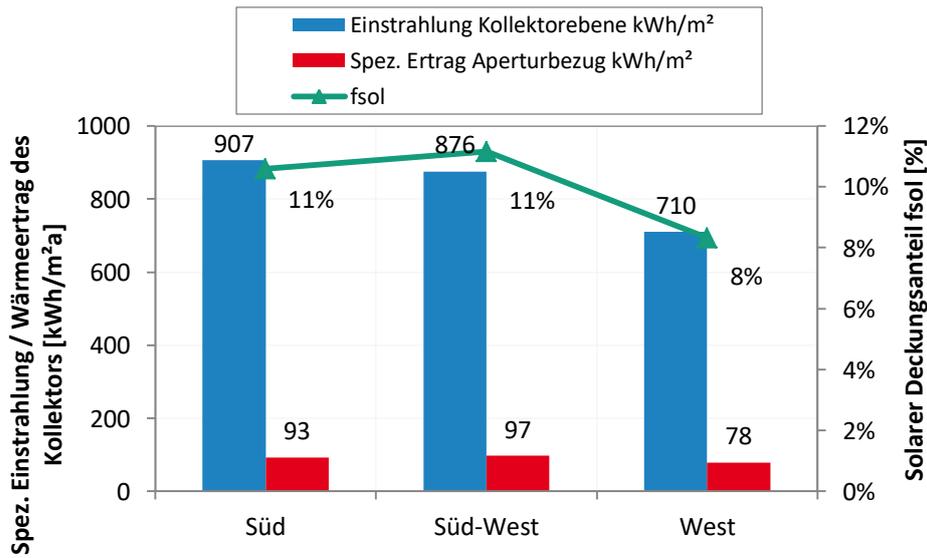


Abbildung 146: Auswirkung der Fassadenausrichtung für „Demoflex, gemessen“.

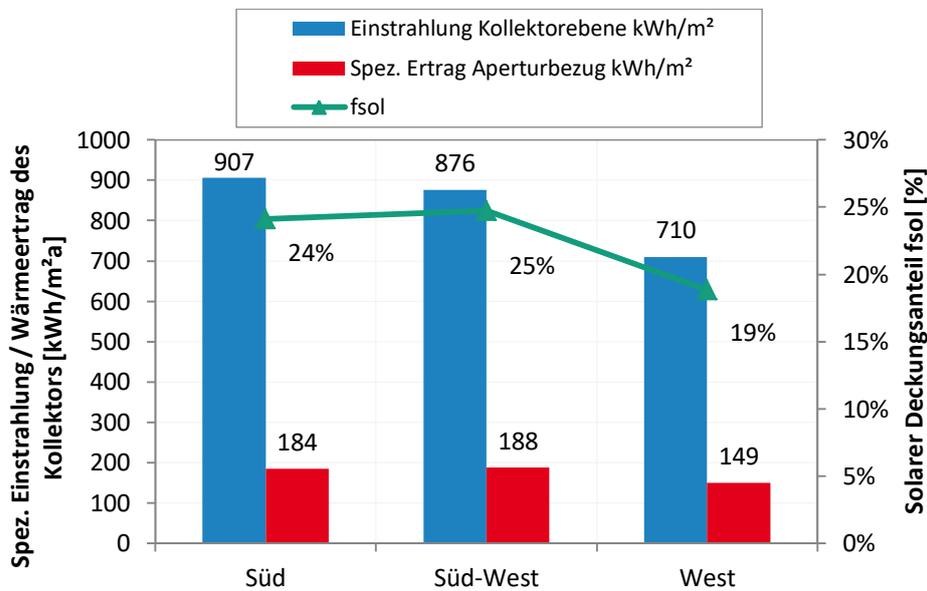


Abbildung 147: Auswirkung der Fassadenausrichtung für „Demoflex, potential“.

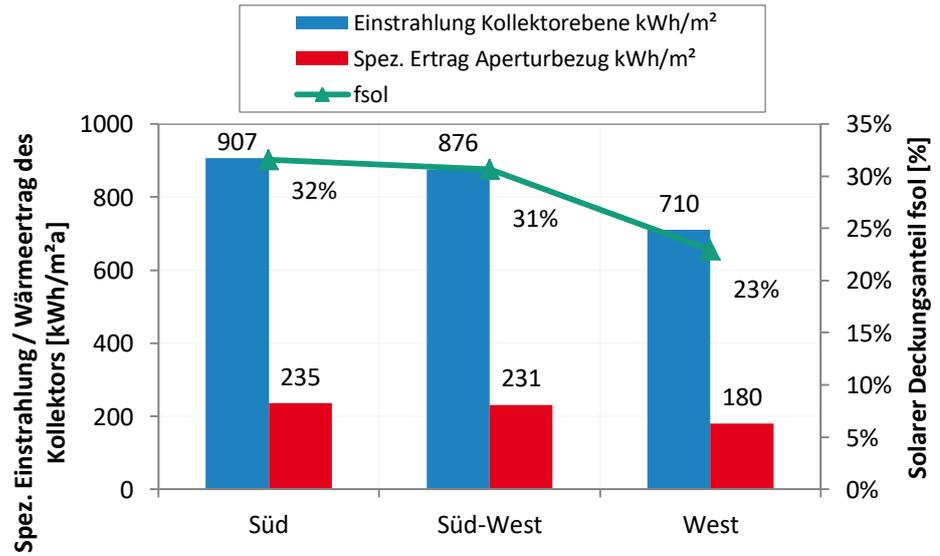


Abbildung 148: Auswirkung der Fassadenausrichtung für „Referenz, FPC“.

Abbildung 149 und Abbildung 150 zeigen den Einfluss der Kollektorfläche auf den spezifischen Ertrag. Bei Vergrößerung der aktiven Kollektorfläche nimmt zunächst der Gesamtertrag zu (Abbildung 149), während der spezifische Ertrag je Quadratmeter aktiver Kollektoraperturfläche abnimmt (Abbildung 150).

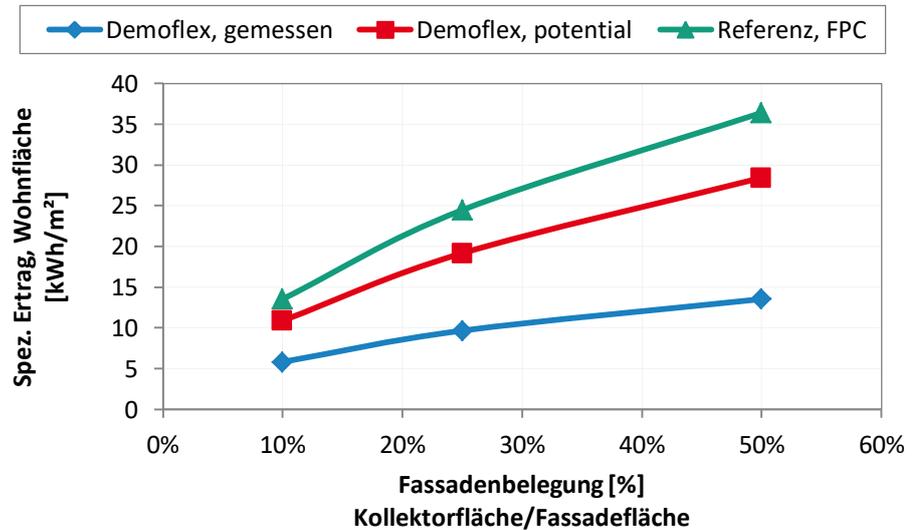


Abbildung 149: Auswirkung der Kollektorfläche auf spezifischen Ertrag (Wohnfläche).

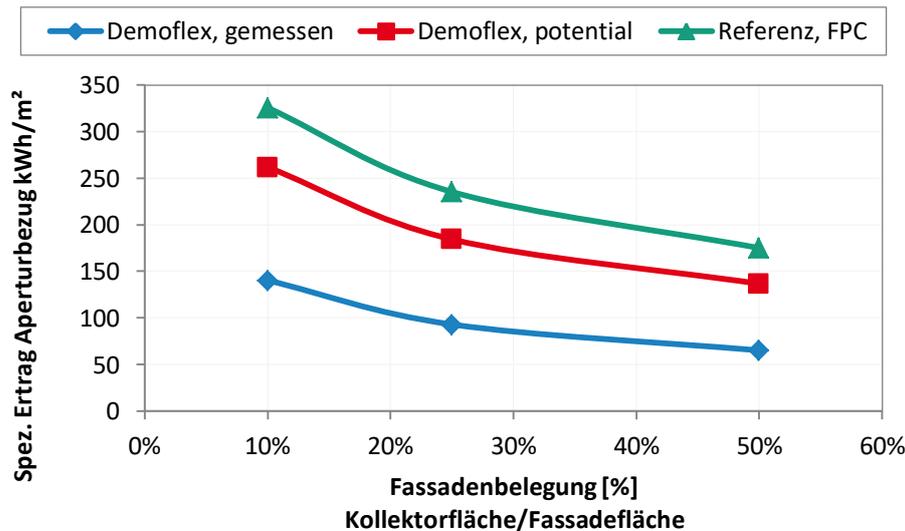


Abbildung 150: Auswirkung der Kollektorfläche auf spezifischen Ertrag (Aperturfläche).

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Erträge des bisher gemessenen Streifenkollektors inakzeptabel niedrig liegen, jene eines optimierten Streifenkollektors aber in etwa doppelt so hoch sein können, allerdings nach wie vor geringer sind als beim Referenzkollektor. So liegt der solare Deckungsanteil in einem Beispielfall (25 % Belegung der verfügbaren Fassadenfläche ohne Fenster) bei »Demoflex, gemessen« bei 11 %, bei »Demoflex, potential« bei 24 % und bei »Referenz, FPC« bei 32 %.

Auch die Ausrichtungen (Süd, Süd-West, West) sowie die Kollektorflächen wurden variiert. So führt eine Verdopplung der Fassadenbelegung auf 50 % je nach Kollektor zu einer Erhöhung des spezifischen Ertrags pro Wohnfläche um ca. 40 – 49 % und zu einer Verringerung des spezifischen Ertrags pro Aperturfläche um ca. 26 – 30 %.

Die Systemsimulationen machen die Notwendigkeit einer Optimierung des Streifenkollektors offensichtlich. Daher wurden bereits bei der Konstruktion der Kollektoren für die Demonstrationsfassade Verbesserungen vorgenommen.

3.1.4.3 Simulationsmodell der Solarthermischen Jalousie

Übersicht – Ablauf der Simulationen der STJ

Die Gebäudeenergiesimulationen der STJ umfassen mehrere Simulationsschritte, darunter optische Simulationen und Tageslichtsimulationen in FENER und schließlich Gebäudeenergiesimulationen in TRNSYS, die in den folgenden Abschnitten beschrieben sind. Der Ablauf der Simulationen mit den wichtigsten zwischen den Simulationsschritten ausgetauschten Werten ist in Abbildung 151 schematisch dargestellt (Haeringer und Bueno 2020).

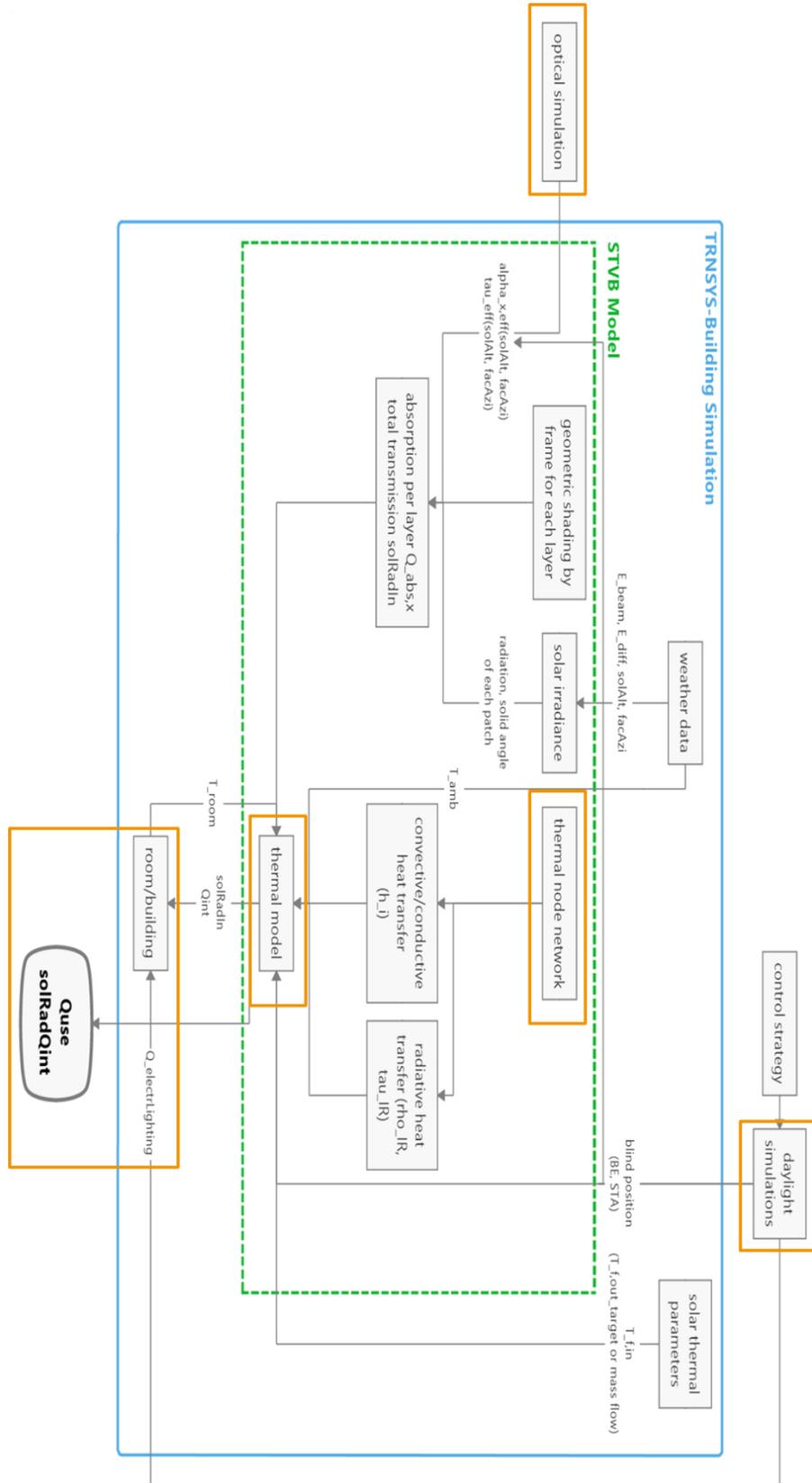


Abbildung 151: Flussdiagramm der Simulationen der STJ mit relevanten Inputs und Zwischen-Out-puts, die zwischen verschiedenen Simulationsschritten ausgetauscht werden. (Haeringer und Bueno 2020)

Optische Simulationen und Tageslichtsimulationen

Ablauf und Ergebnisse des
Vorhabens

Die optischen Eigenschaften jeder STJ-Konfiguration, d. h. unterschiedlicher Lamellenoberflächen & -geometrien, Gläser etc., sind effektiver Absorptionsgrad jeder Schicht und effektiver Transmissionsgrad des Fassadenelements jeweils in Abhängigkeit von der Einfallrichtung und der Lamellenkippwinkel β & -position BE . Diese optischen Eigenschaften werden durch den Klems-Matrixformalismus (Klems 1994) basierend auf den optischen Eigenschaften der einzelnen Schichten, d. h. der Gläser und der STJ-Lamellen, unter Berücksichtigung von Mehrfachreflektion berechnet. Der Klems-Matrixformalismus ist im FENER-Tool, das vom Fraunhofer ISE entwickelt wurde, implementiert (Bueno et al. 2015; Bueno et al. 2017). FENER wird anschließend auch für die Tageslichtsimulationen der STJ verwendet. FENER ist eine Simulations-Engine, die auf der Drei-Phasen-Methode (Ward et al. 2011) und einer detaillierten Energiebilanz auf Raumebene basiert. Es berechnet gleichzeitig den Heiz- und Kühlenergiebedarf des Raumes, Metriken für thermischen Komfort und Tageslichtnutzung, und Tageslichtblendungsindizes. Die Simulations-Engine FENER wurde speziell für die Bewertung und Auslegung komplexer Fenstersysteme und deren Regelung entwickelt, ermöglicht es bisher aber nicht bauwerkintegrierte solarthermische Kollektoren wie die STJ auf thermischer Ebene zu simulieren. Deshalb wurde FENER lediglich für die optischen und Tageslichtsimulationen verwendet.

Die optischen Eigenschaften für jede STJ-Konfiguration und Ergebnisse der Tageslichtsimulationen für jeden Anwendungsfall (Lamellenposition & -kippwinkel und Kunstlichtbedarf in jedem Zeitschritt) werden als Input für die TRNSYS-Simulationen verwendet, die auf der Grundlage des thermischen Modells der STJ die jährlichen Gebäudeenergiesimulationen durchführen.

Modellierung der Heat-Pipe für die Solarthermische Jalousie

Mittels der vorhandenen Messdaten der Vermessung der Leistungsgrenze der Mesh-Heat-Pipe sollte die Parametrisierung des Zusammenhangs zwischen der mittleren Temperatur T_{ad} in der adiabaten Zone der Heat-Pipe, dem Neigungswinkel α der Heat-Pipe und der maximalen Leistung Q_{HP} erfolgen. Es wurde die Annahme getroffen, dass die Kapillarkraftgrenze den gemessenen Leistungsgrenzen der Heat-Pipe zugrunde liegt. Mit dieser Annahme sollte ein physikalischer Zusammenhang hergeleitet werden, der folgend in die Messwerte „gefittet“ werden sollte. Als Modellgrundlage diente die Korrelation der Kapillarkraftgrenze aus (VDI – Verein Deutscher Ingenieure 2013). Für die anschließende Regression wurden zwei Modelle entwickelt. Es wurde die Entscheidung getroffen, die Stoffgrößen nicht über analytische Temperaturzusammenhänge zu modellieren. Stattdessen wurden die Stoffgrößen bei den gemessenen Temperaturen T_{ad} der Fluiddatenbank Refprop entnommen. Dazu war mit der Wahl des Fluids eine weitere Annahme zu treffen. Aufgrund der Produktangaben wurden (wahlweise) die Stoffgrößen von Methanol und Ethanol verwendet. Eine konkrete Angabe des verwendeten Fluids war vom Hersteller nicht erhältlich.

Leider konnte mit beiden Modellansätzen kein Fit der Messdaten erfolgen, der einen physikalisch sinnvollen Zusammenhang ergibt. Es wurde vermutet, dass die geringe Anzahl an Messpunkten bei gleichzeitig hoher Anzahl an Abhängigkeiten von Stoffgrößen für die großen Abweichungen der Regression verantwortlich ist.

Um für die STJ-Modellierung dennoch einen Zusammenhang der Leistungsgrenze von der Temperatur angeben zu können, wurde die Neigungswinkelabhängigkeit im kleinen Neigungswinkelbereich vernachlässigt. Für die Abhängigkeit der Leistungsgrenze Q_{grenz} von der Temperatur der adiabaten Zone T_{ad} im Winkelbereich $[0^\circ; +4.5^\circ]$ wird folgende

auf der Regression der Messpunkte der im Labortestmuster verwendeten Heat-Pipe basierende empirische Funktion als Abschätzung verwendet:

$$\dot{Q}_{grenz}(T_{ad}) = 0.36 \frac{W}{\text{°C}} \cdot T_{ad}$$

Für die Modellierung des thermischen Widerstands der Heat-Pipe R_{HP} im Gesamtmodell der solarthermischen Jalousie wird wie folgt vorgegangen:

- Fall 1: $\dot{Q}_{HP} < \dot{Q}_{grenz}$ und Neigungswinkel $\geq 0^\circ$:
 - $R_{HP} = 0.1 \text{ K/W}$ (thermischer Widerstand einer typischen gut funktionierenden Heat-Pipe (Jack und Rockendorf 2013))
- Fall 2: $\dot{Q}_{HP} \geq \dot{Q}_{grenz}$ (Leistungsgrenze überschritten) oder Neigungswinkel $< 0^\circ$ (Kondensator unterhalb Verdampfer):
 - $R_{HP} = R_{Kupferrohr} \rightarrow$ Heat-Pipe ist nicht mehr funktionstüchtig, thermischer Widerstand wie bei Wärmeleitung durch ein Kupferrohr)

Im Simulationsmodell wird die Heat-Pipe zuerst mit Fall 1, einer funktionierenden Heat-Pipe, simuliert ohne die Fallunterscheidung (entspricht einer Sprungfunktion) zu implementieren, um ein Konvergieren des Simulationsmodells zu gewährleisten. Ob die Annahme gerechtfertigt ist, wird in jedem Zeitschritt durch die Berechnung der Auslastung der Heat-Pipe im Vergleich zur Leistungsgrenze kontrolliert. Für den Fall dass die Leistungsgrenze überschritten wird, wird dieser Zeitschritt erneut mit Fall 2, einer nicht mehr funktionstüchtigen Heat-Pipe, berechnet. In den durchgeführten Messungen der solarthermischen Jalousie in Abschnitt 3.1.3.9 wurde diese Grenze jedoch in keinem Zeitschritt überschritten.

Physikalisches Simulationsmodell der STJ – Thermische Modellierung

Das Simulationsmodell der solarthermischen Jalousie basiert auf dem Modell für semitransparente solarthermische Fassadenkollektoren aus (Maurer 2012), das in TRNSYS für Gebäudesimulationen verwendet werden kann. Dort finden Sie eine umfassende Beschreibung des grundlegenden Simulationsmodells. Hier sollen nun die wichtigsten Grundlagen zusammengefasst werden und auf die Anpassungen für die Modellierung der STJ eingegangen werden.

Das Multilayermodell aus (Maurer 2012) ist in jedem Zeitschritt in die optische Berechnung der Einstrahlung, Absorption und Transmission und die thermische Simulation unterteilt. Die thermische Simulation modelliert den Infrarot-Strahlungsaustausch (vgl. Abbildung 152) und die konvektiven und konduktiven Wärmeflüsse zwischen den Schichten eines STJ-Fassadenelements, und verwendet die absorbierte solare Strahlung aus der optischen Berechnung als Eingangsgröße.

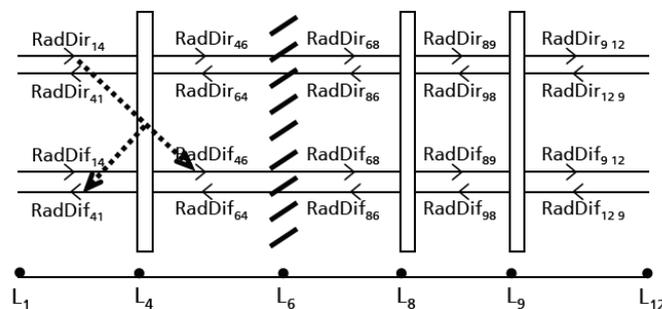


Abbildung 152: Schematische Darstellung des radiativen Strahlungsaustausches zwischen den Layern. (Maurer 2012)

Basierend auf den in der optischen Simulation in FENER berechneten winkelabhängigen, effektiven Absorptionsgraden der einzelnen Schichten der STJ wird die solare Absorption in jedem Layer sowie die Transmission durch das Fassadenelement berechnet. Für die Einstrahlungssimulation wird das Perezmodell zur Berechnung der Einstrahlung aus den verschiedenen „Himmelsregionen“ (engl. *sky patches*) verwendet (Perez et al. 1993).

Ein thermisches Knotenmodell mit der Darstellung der Hauptkomponenten der solarthermischen Jalousie (siehe Abbildung 153) wurde aufgestellt und die konduktiven sowie konvektiven Wärmeübergänge durch die physikalischen Gegebenheiten berechnet bzw. abgeschätzt. Parameter mit hoher Unsicherheit wurden anschließend an den Messwerten des STJ-Labortestmusters kalibriert.

Der IR-Strahlungsaustausch zwischen den Hauptlayern (T_3, T_4, T_6, T_8, T_9 und T_{10} in Abbildung 153) wie auch der konvektive Übergang von der Lamelle an die Luft wird bei der STJ mit der Veränderung des Lamellenkippwinkels beeinflusst. Der veränderte Strahlungsaustausch wird in dem STJ-Modell mittels sogenannter „Viewfaktoren“ beschrieben, welche die gegenseitige geometrische Lage und Orientierung der Flächen ausdrücken.

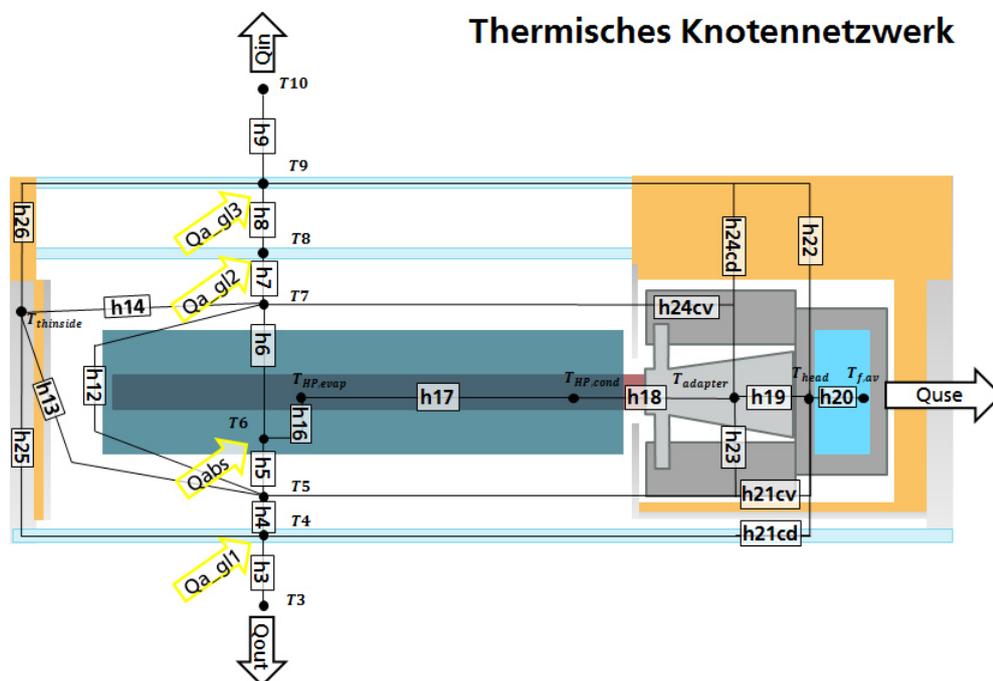


Abbildung 153: Horizontaler Querschnitt der solarthermischen Jalousie mit Darstellung des thermischen Knotennetzwerks. Die absorbierte solare Einstrahlung (Q_a) ist mit gelben Pfeilen dargestellt, die Wärmeübergangskoeffizienten in den weißen Kästen mit h_x . Nicht dargestellt ist der IR-Strahlungsaustausch zwischen den Schichten. Dieser wird nur zwischen den Hauptlayern T_3, T_4, T_6, T_8, T_9 und T_{10} berücksichtigt.

Die Parameter h_4 bis h_7 beschreiben dabei die Hauptkonvektion im Zwischenraum, in dem sich die Lamellen befinden. Diese Konvektion entsteht durch Temperaturunterschiede der einzelnen Layer. Die konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten in diesem Zwischenraum verändern sich mit der Änderung des Lamellenkippwinkels. Für ausgefahrene und geschlossene Lamellen ($BE = 1, \beta = 82^\circ$) bilden die Lamellen eine annähernd kontinuierliche vertikale Schicht, die den Zwischenraum in zwei Teile unterteilt. Die entsprechende Konvektion zwischen dem Lamellenlayer (T_6) und den Glasscheiben (T_4 und T_8) wird dafür mit der Formel für die Konvektion in vertikalen rechteckigen Hohlräumen berechnet (Rohsenow et al. 1998). Mit einem verringerten Lamellenkippwinkel trifft diese Formel nicht mehr zu und es wird angenommen, dass eine reduzierte Konvektion

(h_5 und h_6) von den Lamellen an die Luft stattfindet, da die Lamellenoberfläche von der Hauptkonvektionswalze abgeschottet ist. Der Gesamtwärmeübergang zwischen der Außenscheibe T_4 und der inneren Scheibe der Doppelverglasung T_8 nimmt dagegen durch eine offene Stellung der Lamellen zu, da der Luftdurchgang durch die Lamellen erleichtert wird. Dies wird durch den zusätzlichen Wärmeübergangskoeffizienten h_{12} beschrieben, welcher mit größerem Lamellenkippwinkel sinkt.

Modellkalibrierung und -validierung

Wärmeübergangskoeffizienten des Simulationsmodells, deren Abschätzung mit großer Unsicherheit behaftet ist, wurden mithilfe der quasi-stationären Zustände der Messungen des Labortestmusters (vgl. Abschnitt 3.1.3.9) kalibriert. Dabei wurde der Fokus auf die Kalibrierung der solarthermischen Erträge q_{use} bei komplett ausgefahrenen Lamellen ($BE = 1$) gelegt. Auf eine Kalibrierung anhand der Wärmeeinträge ins Gebäude q_{in} wurde verzichtet, da die Messwerte, wie in Abschnitt 3.1.3.9 beschrieben, eine höhere Unsicherheit durch eine bisher noch fehlende Nachkalibrierung der Wärmeflussensoren hatten.

Der Wärmetransport von der Lamelle (Absorber, Temperaturknoten T_6) zum Fluid im Sammelkanal ($T_{f,av}$) wurde über die Kalibrierung des thermischen Kontaktwiderstands zwischen dem Adapter und dem Sammelkanal, d. h. h_{19} , angepasst. Dieser Wärmeübergang wurde zuvor als der limitierende Faktor zwischen Lamelle und Fluid identifiziert. Der thermische Kontaktwiderstand wird dabei, wie aus den Messungen vermutet, als besonders hoch eingeschätzt. Nach der Kalibrierung von h_{19} entsprach der Wert einem thermischen Kontaktwiderstand von 2.8 K/W je Lamelle, was jedoch auch weitere erhöhte thermische Widerstände im Nutzwärmepfad von Lamelle ins Fluid enthalten kann.

Um den Einfluss des Lamellenkippwinkels auf den konvektiven Übergang anzupassen wurde eine Kalibrierfunktion eingefügt, die dieses Verhalten der verminderten Konvektion in der offenen Stellung repräsentieren soll.

Das Knotenmodell beinhaltet zudem Randverluste über den Rahmen des Fassadenelements an die innere, bzw. äußere Glasscheibe, wie auch von dem Adapter und dem Sammelkanal an die Luft im Zwischenraum des Fassadenelements. In dem letzten Schritt der Kalibrierung wurden die konvektiven thermischen Verluste h_{21cv} , h_{23} , h_{24cv} mit den Messungen bei hohen Fluidtemperaturen kalibriert.

Das Ergebnis der Kalibrierung des Simulationsmodells zeigt, sowohl für die verschiedenen Lamellenkippwinkel als auch für die Messungen bei hohen Temperaturunterschieden von dem Fluid zur Umgebungstemperatur, eine gute Übereinstimmung bei der Simulation des solarthermischen Ertrags (vgl. Tabelle 14).

Tabelle 14: Vergleich des solarthermischen Ertrags (q_{use}) des Simulationsmodells und der Messungen bei quasi-stationären Bedingungen. Ergebnisse für verschiedene Lamellenkippwinkel (β) und Fluideingangstemperaturen T_{fl-in} bei komplett ausgefahrenen Lamellen ($BE = 1$).

Betriebspunkt		Simulation	Messung	Statistik
β	$T_{fl-in} [^{\circ}C]$	$q_{use} \left[\frac{W}{m^2_A} \right]$	$q_{use} \left[\frac{W}{m^2_A} \right]$	Abweichung von q_{use} zwischen der Simulation & Messungen
82	21	259.3	260	0 % ($0.7 W/m^2_A$)
45	21	274.3	284	-3 % ($9.7 W/m^2_A$)
10	21	270.3	270	0 % ($0.3 W/m^2_A$)
82	55	154.0	151	2 % ($3 W/m^2_A$)
82	88	25.0	23	9 % ($2 W/m^2_A$)

Das kalibrierte Simulationsmodell wurde mit Tagesverläufen aus denen quasi-stationäre Messzeitpunkte für die Kalibrierung extrahiert wurden, sowie mit Tagesverläufen die keine quasi-stationäre Bedingung aufgezeigt haben, validiert. Die Repräsentation des Labortestmusters durch das Simulationsmodell hat sich für komplett ausgefahrene Lamellen als zufriedenstellend gezeigt.

Im verwendeten Simulationsmodell werden nur stationäre Zustände simuliert, da ohne thermische Massen und die dazugehörigen thermischen Kapazitäten gerechnet wird. Im Vergleich der Tagesverläufe sind daher größere Unterschiede zwischen der Simulation und der Messung zu Zeitpunkten dynamischer Bedingungen (insbesondere starke Änderungen der Einstrahlung, wie Sonnenauf- und -untergang) zu sehen. Für Zeiten mit annähernd stationären Bedingungen zeigt das Modell eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten (vgl. Abbildung 154). Der über den Tag kumulierte solarthermische Ertrag zeigt jedoch eine sehr gute Übereinstimmung zwischen dem Simulationsmodell und der Messungen an dem Labortestmuster. Als zukünftige Verbesserung des Simulationsmodells sollte der Einfluss von thermischen Kapazitäten untersucht werden.

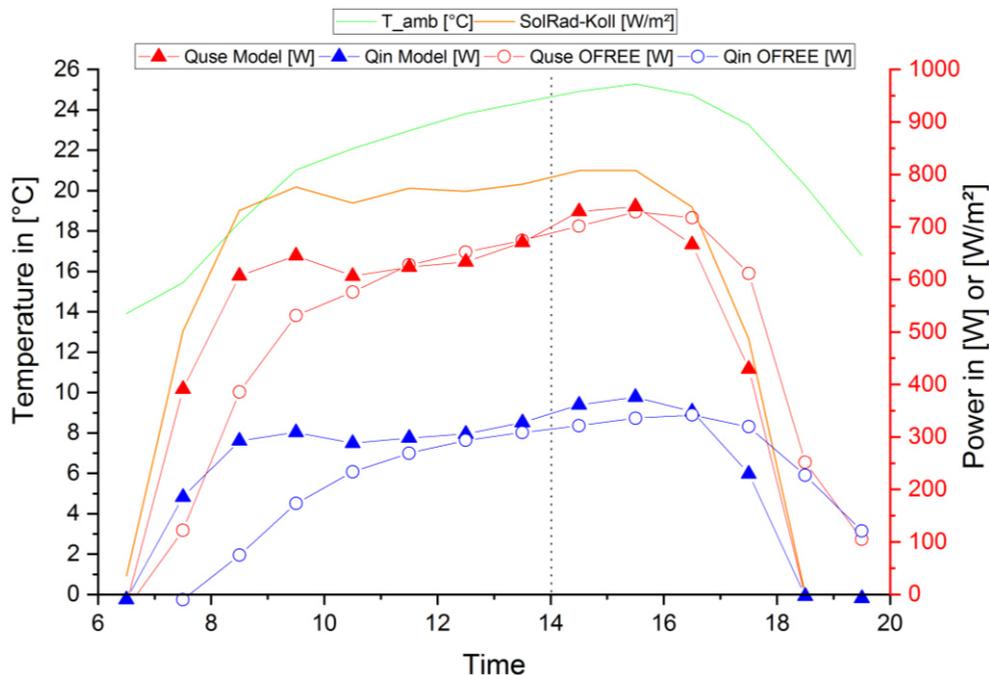


Abbildung 154: Beispiel eines Vergleichs eines Tagesverlaufs der gemessenen Werte (OFREE) und der simulierten Werte (Model) zur Validierung des Simulationsmodells. Die vertikale gepunktete Linie stellt den Zeitpunkt mit quasi-stationären Bedingungen dar, der für die Kalibrierung verwendet wurde. Solare Einstrahlung auf den Kollektor SolRad-Koll, solarthermischer Ertrag Quse, Wärmestrom nach Innen Qin und Umgebungstemperatur T_amb.

Die Messungen mit halb heruntergefahrenen Lamellen werden vom Simulationsmodell bisher nicht akkurat modelliert, die solarthermischen Erträge werden deutlich unterschätzt. Als mögliche Gründe wurden verschiedene Effekte identifiziert, die bisher im Simulationsmodell nicht abgebildet sind:

- der Stapel der eingefahrenen Lamellen, welcher ebenfalls Strahlung absorbiert und somit Beiträge zum solarthermischen Ertrag
- die Absorption der Aluminiumabdeckungen des Sammelkanals und der Motoren des Jalousiemechanismus, welche die Temperatur in dem Zwischenraum erhöhen kann
- ein direkter Wärmeübertrag von der erwärmten Luft des Zwischenraums an die Oberfläche des Sammelkanals

Insbesondere die Absorption des Stapels und hierbei v. a. die Absorption durch die oberste Lamelle des Stapels, die wenig bis gar nicht verschattet ist, scheint eine plausible Erklärung, die durch die Messungen bei halb heruntergefahrener ($BE = 0.5$) und geraffter STJ ($BE = 0$) gestützt werden. Für die Jahressimulationen werden daher einfache, aber robuste Jalousieregelungen verwendet, die nur die Zustände der komplett heruntergefahrenen STJ mit $BE = 1$ und der komplett gerafften STJ mit $BE = 0$ verwenden.

3.1.4.4 Energetische Jahressimulationen der Solarthermischen Jalousie

Der Hauptfokus der Jahressimulationen liegt im Vergleich von verschiedenen STJ-Varianten in verschiedenen, vielversprechenden Anwendungsfällen. Dafür wird das Simulationsmodell mit dem Gebäudesimulationsprogramm TRNSYS verknüpft. Der neu erzeugte TRNSYS-Type der das Simulationsmodell der solarthermischen Jalousie beinhaltet ist dabei mit einem Gebäude (Type 56) über ein modifiziertes Fenster verknüpft, wie in (Maurer 2012) beschrieben. Die Berechnung mittels dem STJ-Type liefert wie in Abbildung 151 dargestellt, neben dem solarthermischen Ertrag (Q_{use}), für jeden Zeitschritt den Energiestrom in den Innenraum ($solRadQ_{int}$), bestehend aus Wärmestrom (Q_{int}) sowie der solaren Transmission ($solRad$), der die Temperatur im Gebäudeinnenraum bzw. Heiz- und Kühlbedarf im Gebäude-Type 56 beeinflussen. Zur Analyse der Energieströme in den Innenraum wurde $solRadQ_{int}$ in positive und negative Energieströme unterteilt. Positiv ist hierbei die Richtung von außen ins Gebäude, d. h. Wärmegewinne im Gebäude, die den Kühlbedarf beeinflussen, bezeichnet mit $solRadQ_{int} - gain$.

Als Anwendungsfälle wurden, wie in Abschnitt 3.1.2.6 beschrieben, Gebäude mit Hotelnutzung und Büronutzung identifiziert. Zusätzlich wurde im Rahmen des Lead-User-Workshops auch die Nutzung der STJ in Krankenhäusern aufgrund ihres großen Wärmebedarfs vorgeschlagen und daher als Anwendungsfall aufgenommen (vgl. Abschnitt 3.1.7.3 und Anhang hierzu). Die Simulationen erfolgten auf Raumebene. Es wurden daher ein Hotelzimmer, ein Gruppenbüro (2 Personen) und ein Bettzimmer (Krankenhaus) als Gebäudenutzung gewählt und die Randbedingungen entsprechend Nr. 11, Nr. 2 und Nr. 10 in (DIN V 18599-10) gewählt. Als Standort wurde für die Fallstudie Frankfurt gewählt.

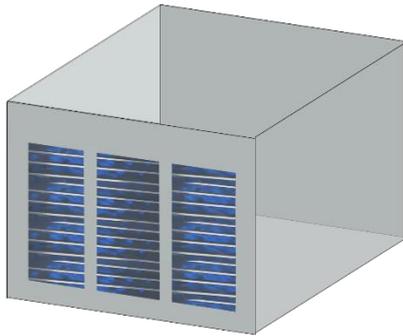


Abbildung 155: Schematische Zeichnung des modellierten Raumes mit STJ-Fassade.

Der Raum wurde mit $4 \times 3 \text{ m}^2$ (BxH) nach Süden ausgerichteter Fassade und 5 m Tiefe modelliert (vgl. Abbildung 155). Die für die Fallstudien simulierte STJ-Fassade enthält drei STJ-Elemente von jeweils $1 \times 2.5 \text{ m}^2$, was einem transparenten Fassadenanteil von etwa 60% entspricht. Der Kippwinkel β wurde mit einer Cut-Off-Regelung gesteuert. Normalerweise ist die Jalousie heruntergefahren (Lamellenposition $BE = 1$). Für das Büro und Krankenhaus wird die STJ bei Unterschreiten einer Mindesteinstrahlungsstärke an der Fassade von 150 W/m^2 eingefahren ($BE = 0$), im Hotel ist die STJ hochgefahren, solange der Raum belegt ist. Das Kunstlicht wurde nach Bedarf geregelt, um 300 Lux Beleuchtungsstärke zu gewährleisten. Es wurde als dimmbar angenommen, mit thermischen Wärmeeintrag von 5 W/m^2 bei 100%.

Als Systemgrenze für die Solarthermiefunktion wurde die Fassade gewählt, d. h. die Haustechnik und die solarthermische Anlage wird nicht explizit modelliert und die Analyse erfolgt auf Basis des solarthermischen Ertrages der STJ ohne Berücksichtigung von Übertragungs- und Speicherverlusten. Verschiedene solarthermische Betriebsarten werden durch die Verwendung unterschiedlicher fixierter Fluideintrittstemperaturen $T_{f,in}$ und (in den meisten Fällen) durch eine angepasste Durchflussregelung mit einer minimalen Fluidaustrittssolltemperatur $T_{f,out}$ (matched flow control) modelliert (Tabelle 15). Der Betrieb bei niedriger Temperatur und konstantem Massenstrom im Fall des Büros (*const15*) zielt in erster Linie auf die Senkung des g-Wertes und nicht auf die Bereitstellung von solarthermischer Wärme ab.

Tabelle 15: In der Analyse berücksichtigte solarthermische Betriebsarten.

Bezeichnung	const15	30to40	45to55	55to70
Massenstromregelung	konstant	Matched flow	Matched flow	Matched flow
Min. Massenstrom [kg/s]	0.054	0.002	0.002	0.002
Max. Massenstrom [kg/s]	0.054	0.06	0.06	0.06
$T_{f,in}$ [°C]	15	30	45	55
$T_{f,out}$ [°C]	> 15.5	> 40	> 55	> 70
Mögliche Nutzungsarten	Trinkwarmwasservorwärmung, Quelle für Wärmepumpe	Trinkwarmwasservorwärmung, Quelle für Wärmepumpe oder Nahwärmenetz, Nieder-temperaturheizung	Solare Entfeuchtung, Radiatorheizung	Trinkwarmwasservorwärmung
Betrachtete Gebäudenutzung	Büro	Hotel, Büro, Krankenhaus	Hotel, Krankenhaus	Hotel, Krankenhaus

Es wurden drei verschiedene Varianten der STJ verglichen:

- LTS - kalibriertes Modell des STJ-Labortestmuster

- *STJ-Potential* - unter Annahme technischer Verbesserungen
 - Verbesserte thermische Anbindung der Lamelle ans Fluid
 - verbesserter thermischer Kontaktwiderstand h_{19} (ca. Faktor 10 besser als *LTS*)
 - Heat-Pipe mit ausreichend hoher Leistungsgrenze
 - h_{16}, h_{18}, h_{20} jeweils verdoppelt gegenüber *LTS*
 - verringerte Verluste des Adapters und Sammelkanals ($h_{21} - h_{24}$ halbiert gegenüber *LTS*)
- *STJ-grau* - wie *STJ-Potential* aber mit grauer Lamellenoberfläche mit 42% Absorptionsgrad

Als Referenz (*Ref*) wurde die STJ mit einer konventionellen grauen Jalousie verglichen, die auf Basis des STJ-Simulationsmodells mit ausgeschalteter Solarthermiefunktion und Lamellenoberfläche wie *STJ-grau* modelliert wurde.

Der solarthermischen Ertrag je STJ-Fassadenfläche Q_{use} unterscheidet sich zwischen den simulierten Gebäudenutzungen nur minimal, wie beispielhaft für $T_f = 30 - 40^\circ\text{C}$ (*30to40*) in Abbildung 156 gezeigt. Die Erträge sinken wie bei solarthermischen Kollektoren üblich mit steigender Fluidtemperatur. In Abbildung 157 ist dies stellvertretend für den Fall Hotel gezeigt. Die Unterschiede zwischen der STJ-Variante *LTS*, die den Entwicklungsstand des Labortestmusters darstellt, und *STJ-Potential*, unter Annahme technischer Verbesserungen, ist deutlich. Eine Verdopplung bis Vervierfachung der Jahreserträge je nach Temperaturniveau könnte mit technischen Verbesserungen möglich sein. Neben Q_{use} , wurde auch der Kollektornutzungsgrad ausgewertet und in Abbildung 158 dargestellt. Dieser jährliche Nutzungsgrad beschreibt den jährlichen Wirkungsgrad des Kollektors für jeden Simulationsfall und berechnet sich mit dem jährlichen Kollektorsertrag geteilt durch die jährliche Einstrahlung in der Kollektorebene. Hier ist deutlich zu erkennen, dass mit dem Entwicklungsstand des Labortestmusters höhere Fluidtemperaturen, z. B. für Trinkwarmwassererwärmung oder solare Entfeuchtung, nicht sinnvoll erreicht werden können.

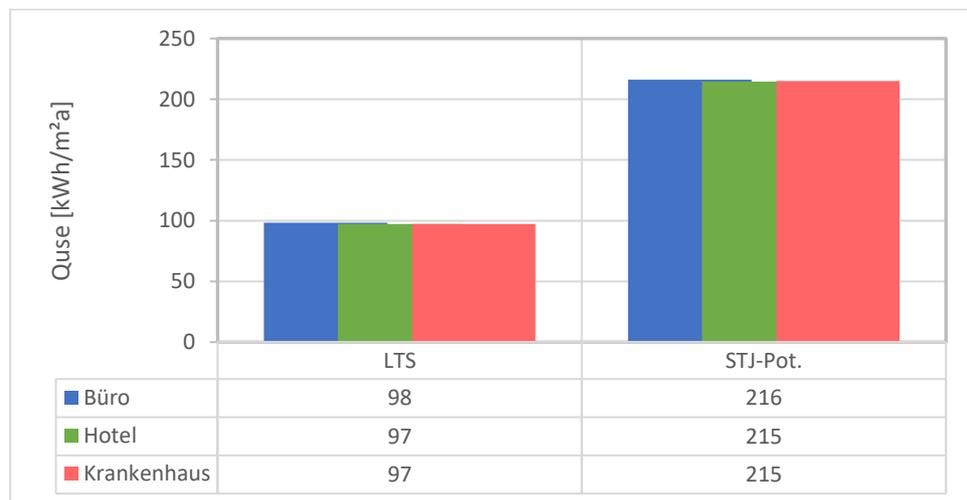


Abbildung 156: Solarthermische Erträge je Jahr und STJ-Kollektorfläche (7.5m^2) für zwei STJ-Varianten in drei Anwendungsfällen bei $T_f = 30 - 40^\circ\text{C}$ (*30to40*).

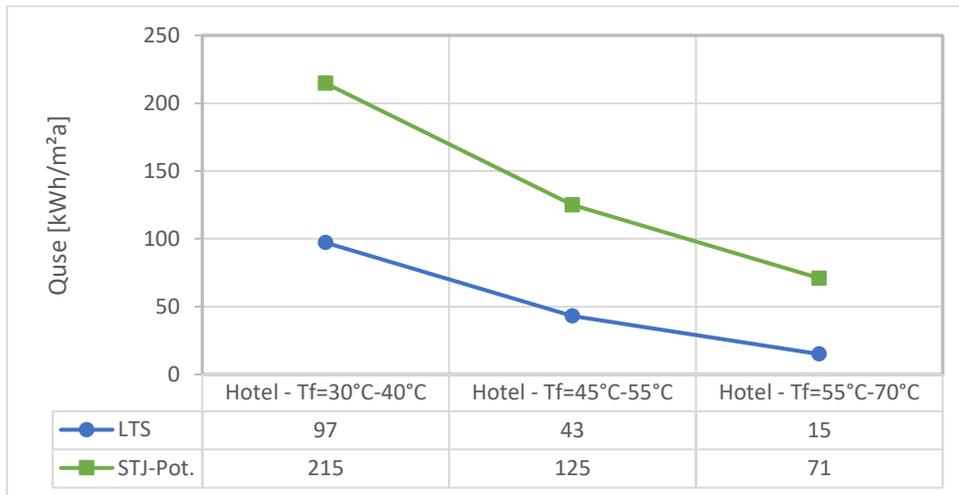


Abbildung 157: Einfluss der Fluidtemperatur auf die solarthermischen Erträge je Jahr und STJ-Kollektorfläche (7.5m²) für zwei STJ-Varianten im Anwendungsfall Hotel (ST-Betrieb vgl. Tabelle 15).

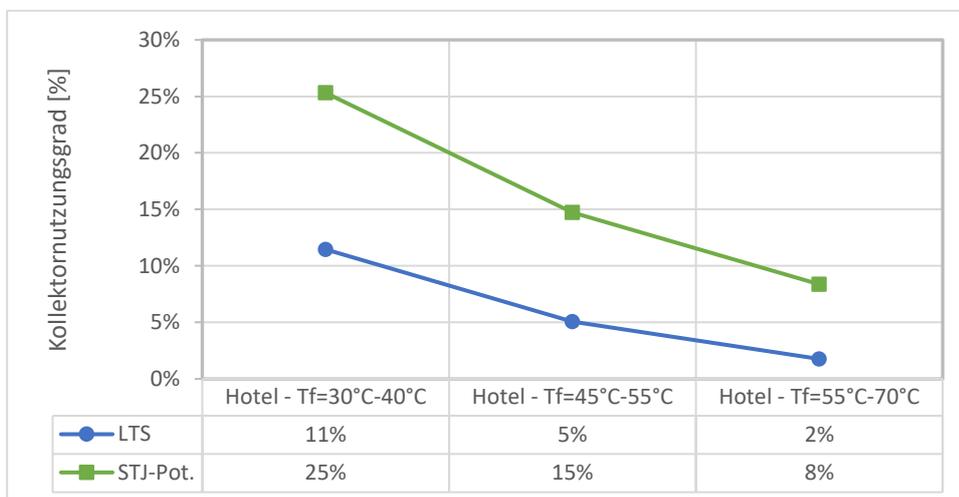


Abbildung 158: Einfluss der Fluidtemperatur auf den Kollektornutzungsgrad für zwei STJ-Varianten im Anwendungsfall Hotel (ST-Betrieb vgl. Tabelle 15).

Der positive Energiestrom durch die Fassade ins Gebäude *solRadQint* – *gain* unterscheidet sich leicht zwischen den verschiedenen Gebäudenutzungen, wie in Abbildung 159 zu sehen. Die Unterschiede zwischen den beiden STJ-Varianten und der simulierten Referenz-Jalousie ist jedoch deutlich stärker ausgeprägt. Der Energieeintrag ins Gebäude kann durch die STJ im Vergleich zu der Referenzjalousie deutlich reduziert werden, wie in Abbildung 160 abzulesen ist. Der Einfluss auf den negativen Energiestrom, d. h. Wärmeverluste, die für den Heizbedarf relevant sind, unterscheidet sich zwischen den STJ-Varianten und dem Referenzfall nur geringfügig und ist hier nicht dargestellt. Darüber hinaus wäre im realen Einsatz die STJ in der Heizperiode so zu betreiben und zu regeln, dass kein negativer Einfluss auf den Heizbedarf entsteht. In den Simulationen ist dies nicht abgebildet. Aus diesem Grund wird der Einfluss der STJ auf den Heizbedarf und auf die negativen Energieströme durch die Fassade nicht weiter analysiert.

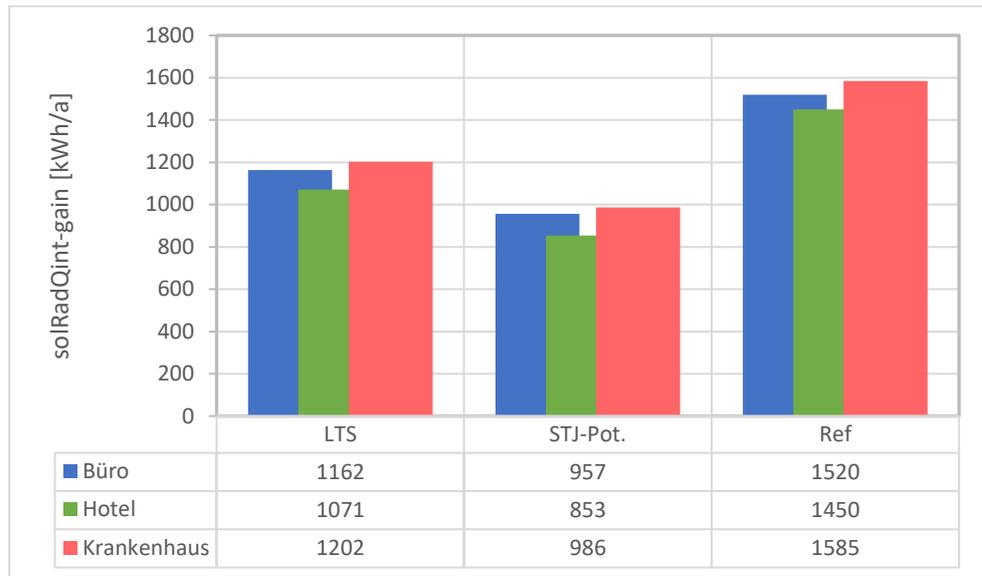


Abbildung 159: Jährliche, positive Energieströme durch die Fassade in den simulierten Raum $solRadQint - gain$ für zwei STJ-Varianten in drei Anwendungsfällen bei $T_f = 30 - 40^\circ C$ (30to40).

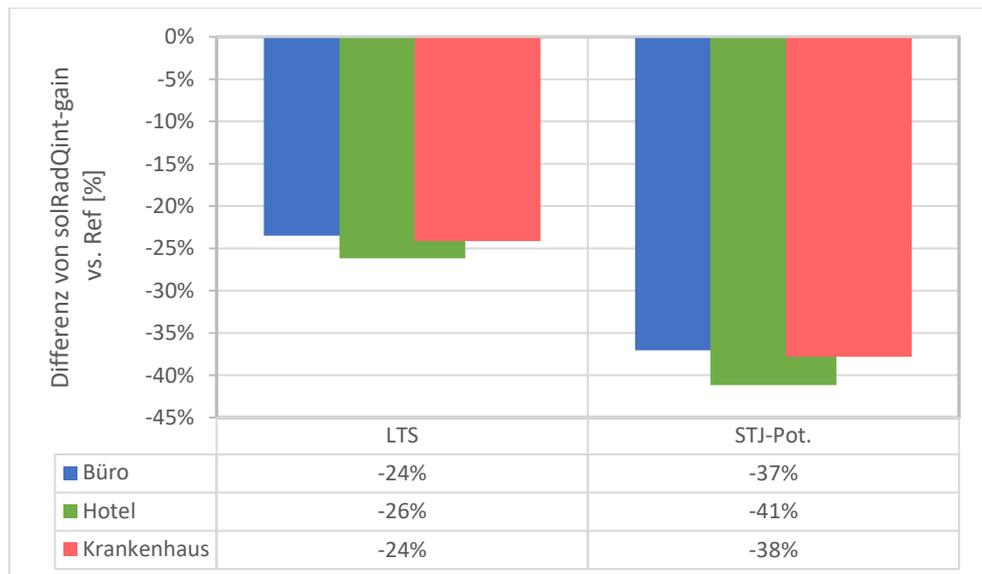


Abbildung 160: Reduktion von $solRadQint - gain$ für zwei STJ-Varianten verglichen mit dem Referenzfall in drei Anwendungsfällen bei $T_f = 30 - 40^\circ C$ (30to40).

Der Vergleich verschiedener STJ-Varianten und der Einfluss der Fluidtemperatur auf $solRadQint - gain$ und den Kühlbedarf des simulierten Raumes sind in Abbildung 161 und Abbildung 162 beispielhaft für den Anwendungsfall Büro dargestellt. Eine deutliche Reduktion beider Größen durch die STJ im Vergleich zur ReferenzalOUSIE ist sichtbar. Niedrigere Temperaturen verstärken diese Reduktion deutlich. Die STJ mit grauen Lamellen (STJ-grau) reduziert $solRadQint - gain$ und den Kühlbedarf weniger als die STJs mit spektral-selektiv beschichteten Lamellen (LTS und STJ-Potential).

Der Einfluss der Lamellenoberfläche wurde noch genauer analysiert. Der jährliche Wärmeeintrag durch transmittierte Strahlung $solRad$ reduziert sich im untersuchten Fall des Büros um 34% durch Verwendung der spektral-selektiven Beschichtung (LTS, STJ-Potential) im Vergleich zur grauen Beschichtung (STJ-grau, Ref). Dies entspricht 13% Reduktion von $solRadQint - gain$ in den untersuchten Fälle von LTS und STJ-Potential

in Abbildung 162. Für die *LTS*-Variante bei $T_f = 30 - 40^\circ\text{C}$ entspricht dies über der Hälfte der ermittelten Reduktion, für *STJ-Potential* bei $T_f = 30 - 40^\circ\text{C}$ etwa einem Drittel und bei $T_{f,in} = 15^\circ\text{C}$ immerhin einem Viertel. Damit trägt die Reduktion von *solRad* signifikant zur Reduktion von *solRadQint - gain* bei, ist jedoch nicht der dominierende Faktor. Es kann daher geschlussfolgert werden, dass das Abführen der Wärme aus der Fassade *solRadQint - gain* und somit den Kühlbedarf signifikant reduzieren kann.

Für die STJ mit grauer Lamellenoberfläche *STJ-grau* ist außerdem festzuhalten, dass bei höheren Fluidtemperaturen keine solarthermischen Erträge mehr erwartet werden können. Bei $T_{f,in} = 15^\circ\text{C}$ ist der Ertrag im Vergleich zu *STJ-Potential* etwa halbiert. Bei $T_f = 30 - 40^\circ\text{C}$ wird jedoch nur noch ein Kollektornutzungsgrad von 4% erreicht, verglichen mit 25% für die Variante *STJ-Potential*. Da auch die Reduktion des Kühlbedarfs deutlich temperaturabhängig ist, ist die Verwendung der Variante *STJ-grau* nur für einen Betrieb mit sehr niedrigen Temperaturen sinnvoll möglich. Die Variante mit dunklen, spektral-selektiven Lamellen *STJ-Potential* scheint deutlich größeres Potential zu haben, da sie über einen größeren Fluidtemperaturbereich die Doppelfunktion als solarthermischer Kollektor und Sonnenschutzelement mit Reduktion des Kühlbedarfs erfüllt. Der Vergleich von grauer zu spektral-selektiver Lamellenoberfläche sollte zur Bestätigung der Simulationsergebnisse experimentell überprüft werden.

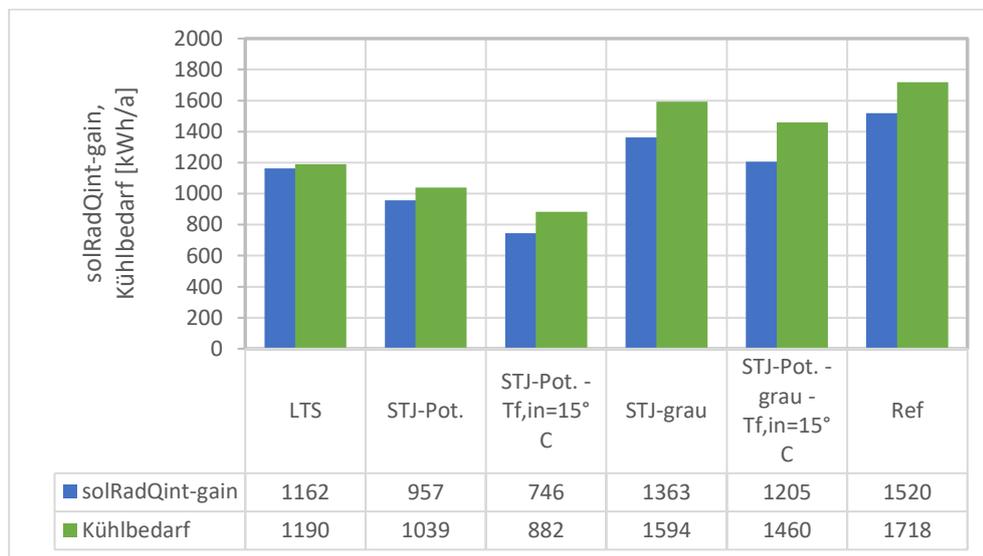


Abbildung 161: Einfluss verschiedener STJ-Varianten und Fluidtemperaturen auf *solRadQint - gain* und den Kühlbedarf des simulierten Raumes im Anwendungsfall Büro. ST-Betrieb mit $T_f = 30 - 40^\circ\text{C}$ (30to40), wenn nicht anders angegeben, vgl. Tabelle 15.



Abbildung 162: Einfluss verschiedener STJ-Varianten und Fluidtemperaturen auf die Reduktion von *solRadQint* – *gain* und des Kühlbedarf im Vergleich zum Referenzfall im Anwendungsfall Büro. ST-Betrieb mit $T_f = 30 - 40^\circ\text{C}$ (30to40), wenn nicht anders angegeben, vgl. Tabelle 15.

3.1.5 Demonstratorfassade des Streifenkollektors und Demonstratorfassadenelement der Solarthermischen Jalousie

Ablauf und Ergebnisse des
Vorhabens

Die Beschreibung der Teilfunktionsmuster und Labortestmuster und deren Messergebnisse sind unter Abschnitt 3.1.3 zu finden. In diesem Abschnitt werden die Demonstratorfassade des Streifenkollektors und das Demonstratorelement der Solarthermischen Jalousie beschrieben.

3.1.5.1 Demonstratorfassade des Streifenkollektors

Zur Entwicklung des Solarthermischen Streifenkollektors wurden in einem iterativen Prozess unter Beteiligung aller Projektpartner eine Vielzahl an Entwürfen für die Demonstratorfassade bei DAW erarbeitet, diskutiert und eine auszuführende Version festgelegt (Abbildung 163). Die Entscheidung basiert auf der Bewertung von architektonischer Gestaltung, konstruktiver Umsetzbarkeit, Ertrag und Repräsentativität in Bezug auf die möglichen Variationen des solarthermischen Streifenkollektors (Länge, Orientierung, Abstand etc.) und dessen Fassadenintegration im Zusammenspiel mit anderen Systemen.

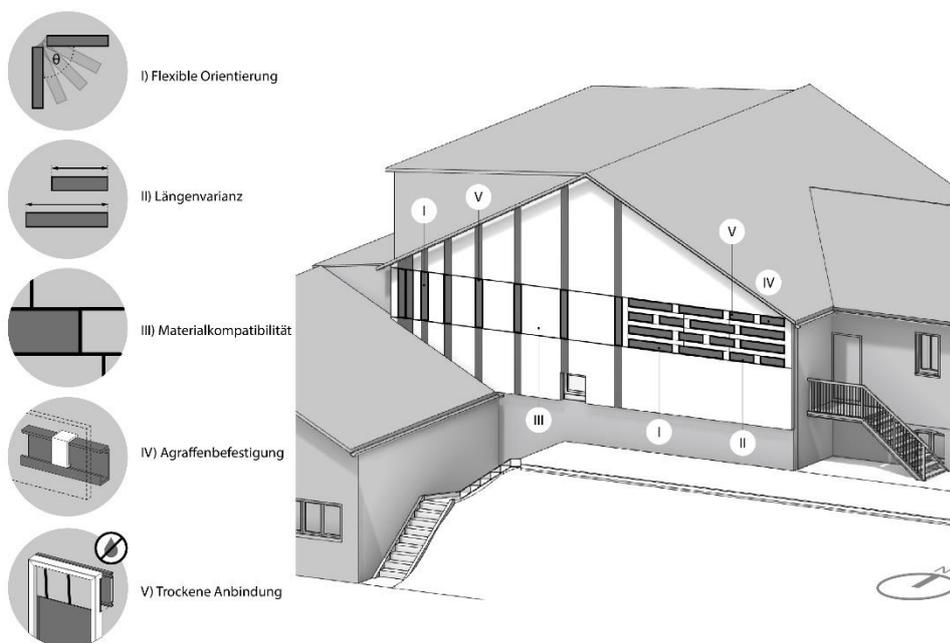


Abbildung 163: Entwurf für Demonstratorfassade des solarthermischen Streifenkollektors.

Die Fassade wurde vom Oktober 2019 bis Februar 2020 in Ober-Ramstadt errichtet, so dass diese auch für den Lead-User-Workshop zur Anschauung zur Verfügung stand. Die Fassade wurde bemaßt und per Konstruktionszeichnung detailliert geplant. Der Aufbau der horizontal montierten Streifenkollektoren mit der Unterkonstruktion ist in Abbildung 3 dargestellt. Die Verschaltung der Kollektoren wurde festgelegt (s. Abbildung 164).

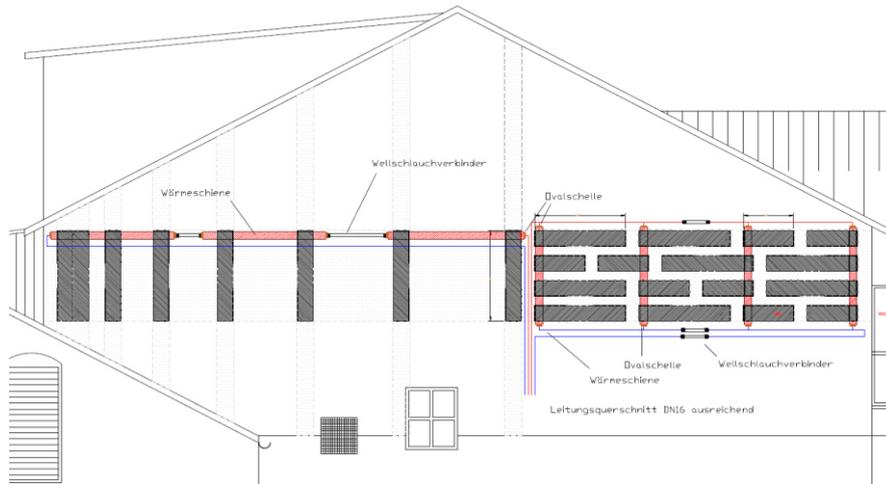


Abbildung 164: Verschaltung der Demofassade in Ober-Ramstadt (grau: Solarkollektor, rot: Sammelkanal, blauer Strich: Rücklaufleitung (kalt), roter Strich: Vorlaufleitung (warm)).

Die interne Verschaltung und Regelung wurde ebenfalls geplant (s. Abbildung 165). Es wurden Sensoren integriert, die eine Erfassung des Ertrags ermöglichen. Die vertikal und horizontal angebrachten Kollektoren werden hierbei separat erfasst. Der Speicher puffert die Wärme, die im Gebäude an einer Wandheizung benötigt wird.

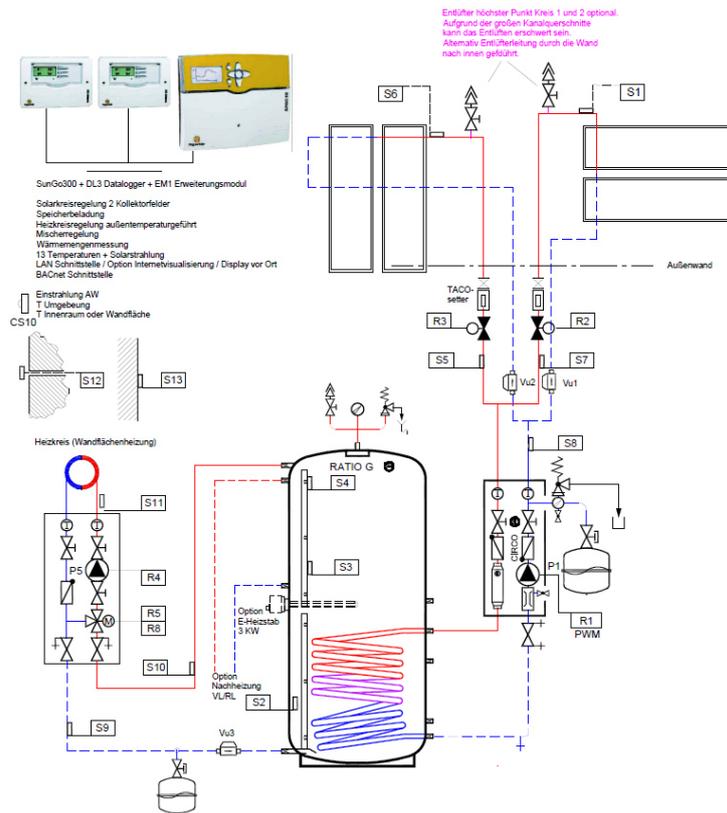


Abbildung 165: Schaltbild der hydraulischen Komponenten der Anlage.

Des Weiteren wurde mittels der aktuellen Parameter aus der Kollektorherstellung die Statik berechnet und so die nötigen Abstände der T-Profile bestimmt. Die Konstruktion der Fassade begann im Oktober 2019 mit dem Aufbringen der Unterkonstruktion und einer Mineralwollendämmung. Die Bilder in Abbildung 166 zeigen den Stand der Arbeiten am 6.12.2019, als die Fassade bereits teilweise mit Putzträgerplatten belegt war.



Abbildung 166: Stand der Bauarbeiten am 6.12.2019.

Das Komzet betreute den Aufbau der Musterfassade bei Caparol mit. Die Montage vor allem vom Sammelkanal hat sich seit den ersten Konstruktionen so deutlich weiter entwickelt.

Die vorläufige Montage des Sammelkanals ist in Abbildung 167 zu sehen. Die Schelle diente zur Halterung des Sammelkanals, die präzise Fixierung des Sammelkanals erfolgt über die Kollektoren, die am Sammelkanal verschraubt werden. Dann wird auch die hauptsächliche Last des Sammelkanals von den Kollektoren gehalten.



Abbildung 167: Vorläufige Befestigung der Sammelkanäle.

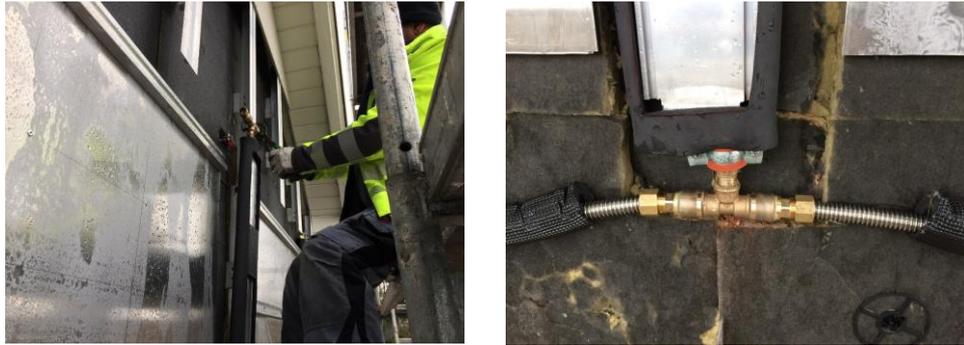


Abbildung 168: Hydraulischer Anschluss der Sammelkanäle durch den Heizungsbauer.

Nach erfolgter Befestigung der Sammelkanäle wurde die Verschaltung dieser durch den Heizungsbauer vorgenommen, der auch auf Dichtigkeit getestet hat. Dies ist ganz besonders wichtig, da die Fassade nicht dafür konzipiert wurde, bei eventuell auftretenden Undichtigkeiten wieder geöffnet zu werden.



Abbildung 169: Zwei Arten der Befestigung: 1) auf einem Vierkantrohr (links) oder auf einem Alu-Tafelblech mit Agraffenprofil für maximale Flexibilität im Capaporfeld (rechts).

Agraffenprofile wurden auf der Fassade ausgerichtet und an die Vierkantrohre und auf die Tafelbleche geschraubt (s. Abbildung 169). Die Tafelbleche bieten den Vorteil, dass die Profile flexibel angebracht werden können, speziell im Hinblick darauf, dass auch die Capapor-Elemente in den Zwischenräumen über diese Bleche befestigt werden müssen.



Abbildung 170: Einfaches Einhängen des Kollektors in die Agraffenhalterungen.

Das eigentliche Einhängen der Kollektoren ist dann sehr einfach (s. Abbildung 170). Die Kollektoren können anhand der Stellschrauben an den oberen Agraffenhaltern ausgerichtet werden.



Abbildung 171: Befestigung der Adapterplatten des Kollektors mit dem Sammelkanal, teilweise mit einer weiteren Adapterplatte (rechts).

Die Befestigung der Kollektoren an den Sammelkanälen erfolgte mittels Hammerkopfschrauben, die an Aussparungen an den Adapterplatten der Kollektoren angebracht wurden (s. Abbildung 171).



Abbildung 172: Nahezu fertige Fassade mit Capapor-Designelementen (links: dunkelgrau, rechts: weiß).

Im nächsten Schritt wurden Capapor-Designelemente zum einen aufgeklebt (s. Abbildung 172, links) als optische Verlängerung der vertikal installierten Kollektoren, und zum anderen eingehängt (s. Abbildung 172, rechts) zum Ausfüllen der Zwischenräume zwischen den horizontal hängenden Kollektoren.

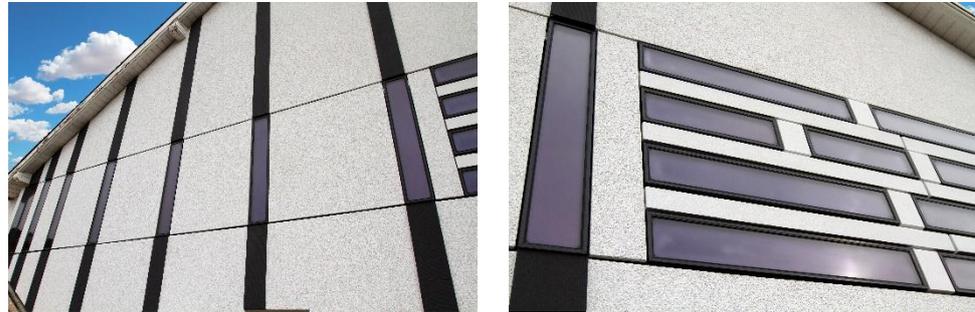


Abbildung 173: Details der fertigen Fassade der vertikalen (links) und horizontalen Kollektoranordnung (rechts).

Die fertige Fassade ist in Abbildung 173 und Abbildung 174 zu sehen.



Abbildung 174: Fertige Demonstratorfassade mit Streifenkollektoren.

3.1.5.2 Demonstratorfassadenelement der Solarthermischen Jalousie

Auf Basis des Labortestmusters der solarthermischen Jalousie wurde ein Ausstellungs-demonstrator für den Showroom des Priedemann Facade-Lab erstellt (Abbildung 175 und Abbildung 176). Dieser dient neben der öffentlichkeitswirksamen Präsentation der solarthermischen Jalousie zur Veranschaulichung und Diskussion des Ansatzes im Lead-User-Workshop. Außerdem wurden Erkenntnisse aus dem Bau und der Vermessung des Labortestmusters zur Weiterentwicklung der Mechanik, insbesondere der Stapelbarkeit der Lamellen im Hinblick auf Zuverlässigkeit und Stapelbarkeit, umgesetzt.



.....
 Ablauf und Ergebnisse des
 Vorhabens

Abbildung 175: Konzept zur Ausstellung der Solarthermischen Jalousie im Showroom des Priedemann Facade-Lab.



Abbildung 176: Fassadendemonstrator.

Zum anderen wurde ein kleines Anschauungsmuster (vgl. Abbildung 177) zur Ausstellung in der Magistrale des Fraunhofer ISE erstellt, um auch hier dauerhaft die Projektergebnisse und Technologiekonzept Besuchern präsentieren zu können.



Abbildung 177: Konstruktionsdemonstrator.

3.1.6 Energetische, architektonische und wirtschaftliche Bewertung der Technologien

3.1.6.1 Energetische und architektonische Bewertung

Streifenkollektor

Wie durch die Messungen in 3.1.3.9 und die darauf basierenden Simulationen in 3.1.4.4 verdeutlicht wurde, sind die Erträge des gemessenen Streifenkollektors noch sehr weit von jenen üblicher Flachkollektoren entfernt. Durch geplante bzw. bereits durchgeführte Verbesserungen des Kollektors lassen sich diese Erträge gemäß Simulationsergebnissen zwar erheblich steigern, jedoch liegen sie mit den getroffenen Annahmen nach wie vor unter jenen marktüblicher Flachkollektoren. Die Ursachen dafür wurden erörtert (Flächenverhältnisse, thermische Widerstandskette). Da der Kollektor einen gestalterischen Mehrwert bietet, muss er nicht zwangsläufig dieselben Erträge erzielen wie ein Standard-Flachkollektor, allerdings sollte angestrebt werden, die BAFA-Mindestanforderungen¹ an Kollektoren zu erfüllen: »Die eingesetzten Kollektoren müssen das europäische Zertifizierungszeichen Solar-Keymark tragen, nach EN 12975-1 oder EN ISO 9806 oder nach ISO 17025 geprüft worden sein, einen jährlichen Kollektorertrag von mindestens Q_{kol} 525 kWh/m² nachweisen. Der Nachweis von Q_{kol} erfolgt auf Basis der Kollektorerträge C_{eff} bei 25 °C und 50 °C am Standort Würzburg.« Selbst der verbesserte Kollektor wird gemäß Simulationen mit den getroffenen Annahmen den Mindestertrag von 525 kWh/m² voraussichtlich nicht erreichen. Daher wird es bei einer Weiterentwicklung des Streifenkollektors sehr darauf ankommen, die thermischen und optischen Verluste sowie den thermischen Widerstand vom Absorber bis zum Sammelkanal noch weiter zu reduzieren, z. B. durch eine nahezu rahmenlose Konstruktion mit Vakuumdämmung und direkt spektralselektiv beschichteter flachen Heat-Pipe (Konzeptidee).

Die bisherigen Betrachtungen basieren auf den Messungen des Demoflex-Kollektors. Über diese hinaus werden insbesondere die Messergebnisse der Demonstrationsfassade für die energetische Bewertung von Bedeutung sein. Insgesamt sollte der Streifenkollektor in all seinen Facetten vermarktet werden, also als Solarkollektor mit architektonisch überdurchschnittlicher Gestaltungsmöglichkeit. Letztlich muss der Markt entscheiden, inwiefern Kunden angesichts dieses Mehrwerts zu Zugeständnissen bei den Solarerträgen bereit sind. Allerdings stellen hier die BAFA-Vorgaben eine klar definierte Hürde dar, die über die Förderwürdigkeit entscheidet, was wiederum ein wesentliches Verkaufsargument bzw. -hindernis sein kann.

Die architektonische Integration wurde durch das ibk2 bewertet. Der abschließende Bericht des ibk2 „*Architektonische Integration von Fassadenkollektoren mit Heat-Pipes im Projekt ArKol (Streifenkollektor)*“ ist im Anhang zu finden. In Anlehnung an diesen Bericht lautet das Fazit zur Bewertung der architektonischen Integration wie folgt:

Unter Berücksichtigung der Erwartungen zu Beginn des Forschungsprojekts und der verschiedenen Entwicklungsstufen, sollen abschließend einzelne Aspekte bezüglich der architektonischen Integration des Streifenkollektors hervorgehoben werden:

a) Ästhetische Varianz

Entsprechend seiner Bezeichnung besitzt der Kollektor eine Streifen-Geometrie, die es ermöglicht ihn sowohl über seine Quer- als auch Längsseite zu kombinieren. Im Gegensatz zu einem großen zusammenhängenden Kollektorfeld, er-

¹ https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/ee_solarthermie_grundwissen.html

leichtert die relativ kleine Geometrie des Streifenkollektors den vielfältigen Einsatz in eine Fassade. Der Streifenkollektor, abhängig vom Verlauf der Sammelleitung, kann dabei horizontal und vertikal eingesetzt werden, was sein Einsatzgebiet zusätzlich vergrößert. Die Entscheidung bei dem Kollektor unterschiedliche Längendimensionen bei gleichbleibender Breite anzubieten, kann als guter Kompromiss zwischen individuellen Einsatzmöglichkeiten und wirtschaftlichen Überlegungen hinsichtlich einer Massenproduktion angesehen werden. Insgesamt wird die ästhetische Varianz des Streifenkollektors als hoch eingeschätzt.

b) Materialspezifische Varianz

Ausgehend von einem Haupteinsatzgebiet des Kollektors in vorgehängte hinterlüftete Fassaden-Systeme (VHF) lässt sich der Kollektor mit den unterschiedlichsten Fassadenmaterialien, wie Holz, Metall und Glas kombinieren. Der Kollektor verhält sich dabei so modular, wie jedes andere Fassadenpaneel und macht seinen Einsatz in unterschiedlichste Fassadendesigns möglich.

c) Konstruktive Integration

Die Integration sowohl in ein Wärmedämmverbundsystem (WDVS) als auch in eine vorgehängte hinterlüftete Fassade (VHF) ist möglich und wurde im Forschungsprojekt untersucht. Als präferierte Variante, unter Berücksichtigung des aktuellen Entwicklungsstands des Streifenkollektors, wird die Integration des Kollektors in ein VHF-System angesehen. Grund dafür ist die größere Modularität und die Tatsache, dass als Befestigungssystem des Kollektors ein übliches VHF-Unterkonstruktionssystem verwendet werden kann, welches wiederum mit anderen Fassadenpaneelen/-materialien kombiniert werden kann.

d) Revisionierbarkeit

Die Wartung und der leichte Austausch einzelner Bauteile, aufgrund zum Beispiel von Beschädigung, sind einer der wichtigsten Aspekte im Lebenszyklus einer Fassade. Der Unterhalt eines Gebäudes und die damit verbundenen Kosten sind Aspekte, die Bauherren meist genauso wichtig sind wie die Ästhetik des Gebäudes oder seiner Fassade. Diesen Aspekten trägt der Streifenkollektor sowohl aufgrund seiner trockenen Anbindung an die Sammelleitung als auch seiner „einfachen“ Integration in die VHF Rechnung.

e) Akzeptanz bei Nutzern und Bauherren

Mit einer zunehmenden Verschärfung von gesetzlichen Richtlinien zur Verbesserung der Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden, wächst auch das Bewusstsein in der Öffentlichkeit für die Wichtigkeit des globalen Klimaschutzes und der Reduktion von Treibhausgasen in der Atmosphäre. Dem sehen sich genauso Bauherren ausgesetzt und interessieren sich zunehmend für den Einsatz nachhaltiger Energiesysteme zur Nutzung der solaren Energieeinstrahlung. Nicht zu unterschätzen ist dabei der Prestigegewinn für einen Bauherrn durch den sichtbaren Einsatz solcher Systeme, zum Beispiel in die Gebäudefassade. Umso wichtiger ist es ein System am Markt anbieten zu können, das einen hohen ästhetischen Anspruch in der Gestaltung einer Fassade mit einem modular einsetzbaren Kollektor verbindet. Dies verspricht der Streifenkollektor in einem potentiellen Markt zu bieten.

f) Entwicklungspotential

Bei der Umsetzung der Demonstratorfassade wurde der letzte Entwicklungsstand der Kollektorkonstruktion eingefroren und an den Kollektorbauer (Firma Wagner Solar) zur Prototypenproduktion übergeben. Die Ausführung erfolgte dann in Überarbeitung des Entwicklungsstands auf Basis eigener Erfahrung der Firma auf dem Gebiet des Kollektorbaus sowie Einschränkungen durch den be-

stehenden Maschinenpark. Dieses nachvollziehbare Vorgehen, aufgrund der geringen Stückzahl der Kollektoren für die Demonstratorfassade, führte dabei zu einzelnen Details am Kollektor, die in Anbetracht einer zukünftigen Produktion in großen Stückzahlen verbessert werden könnte:

1. Rahmendetails: Die Ansichtsbreite des Kollektorgehäuses sollte so weit wie möglich minimiert werden. Idealerweise überblendet die Abdeckscheibe den Rahmen vollständig und ist in den Abdeckbereichen rückseitig mit dunkler Farbe bedruckt (ähnlich den Scheiben im Automobilbau). Damit lassen sich die einzelnen Kollektoren gleich einer Fassadentafel nur über eine schmale Fuge aneinanderfügen.
2. Abdichtungsprofile: Ähnlich wie bei den Rahmendetails, sollten Abdichtungsprofile hinter der Abdeckscheibe unsichtbar integriert werden, so dass Gehäuserahmen, Abdichtungsebene und Abdeckscheibe zum Beispiel mit Silikon in einem Klebeverbund kombiniert werden.
3. Farbvarianz: Die selektive Beschichtung des Absorbers prägt in Ihrer Farbigkeit maßgeblich den Kollektor. Die Untersuchung welche Farben für eine solche Beschichtung in Frage kommen, könnte den vielfältigen Einsatz des Kollektors erhöhen.
4. Oberflächengestaltung: Eine zusätzliche Varianz in der Erscheinung des Kollektors kann in verschiedenen behandelten Oberflächen der Abdeckscheibe liegen, die zum Beispiel unterschiedlich bedruckt, geätzt und geprägt sein kann.

Solarthermische Jalousie

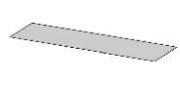
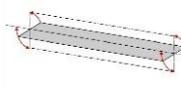
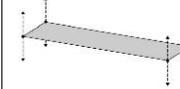
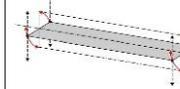
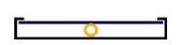
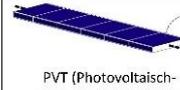
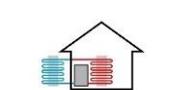
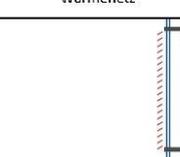
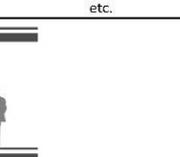
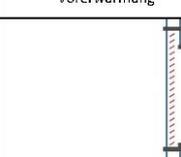
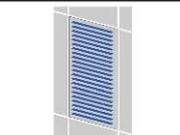
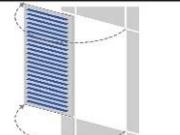
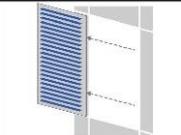
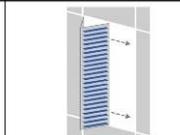
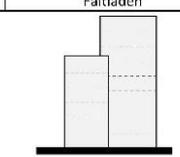
Die Messergebnisse des Labortestmusters der Solarthermischen Jalousie in Abschnitt 3.1.3.9 zeigt deutlich, dass die bisherige Umsetzung großen Weiterentwicklungsbedarf hat, um insbesondere die solarthermischen Wirkungsgrade zu verbessern. Positiv hervorzuheben ist der niedrige g-Wert, der gemessen wurde. Eine Optimierung in Richtung „niedriger g-Wert mit Solarthermieertrag als Nebenziel“ erscheint daher als spannende Option für die Weiterentwicklung im Folgeprojekt „DESTINI“. Dies ist vor allem bei Niedertemperaturanwendungen, wie Trinkwarmwasservorerwärmung (mit niedrigen solaren Deckungsgraden) oder als Quelle für Wärmepumpe, aussichtsreich, da hier die Reduktion des g-Werts durch Abführen der Wärme besonders gut funktioniert und gleichzeitig höhere solarthermische Wirkungsgrade erreicht werden, da die thermischen Verluste geringer sind.

Basierend auf den Ergebnissen der Jahressimulationen in Abschnitt 3.1.4.4 zeigt sich ein gutes Potential der solarthermischen Jalousie, sofern die technologische Umsetzung der Verbesserungen erreicht werden kann. Signifikante Energieeinsparungen durch Verringerung des Kühlbedarfs sind laut den Simulationsergebnissen gegenüber konventionellen Jalousien in einem Doppelfassadenelement möglich. Die Reduktion des Kühlbedarfs ist insbesondere in warmen Klimata interessant, aber auch in Mitteleuropa wird in vielen Bürogebäuden aktive Kühlung angewendet. In den simulierten Fällen für ein Büro in Frankfurt konnte der Energieeintrag durch die Fassade in den Raum und somit der Kühlbedarf um bis zu der Hälfte reduziert werden. Hierzu trägt zum größten Teil das Abführen der Wärme bei, aber auch die dunkle Lamellenoberfläche beeinflusst den Kühlbedarf. Ein Betrieb der STJ bei niedrigen Fluidtemperaturen ist für diese „Kühlfunktion“, wie auch für die Solarthermiefunktion deutlich von Vorteil. Bei der Anwendung der STJ ist daher zu beachten, dass auch im Sommer bei großer Einstrahlung und gleichzeitigem Kühlbedarf, ein ausreichend hoher Wärmebedarf vorhanden ist, um den Betrieb bei niedrigen Fluidtemperaturen sicherzustellen. Dies ist z. B. bei Gebäudenutzungen mit hohem Trinkwarmwasserbedarf (Hotel, Krankenhaus, Wohnen) oder durch die Einspeisung der Wärme in ein Nahwärmenetz sichergestellt. Eine technisch optimierte STJ könnte also gleichzeitig Wärme im Temperaturbereich von 30 – 40 °C für Trinkwarmwasservorerwärmung, Wärmepumpen oder Nahwärmenetze bereitstellen und gleichzeitig den Kühlbedarf deutlich reduzieren.

Das funktionale und architektonische Potenzial der STJ-Konzepte wurde auf mehreren Messen und Konferenzen vorgestellt und überprüft. Die Vielfalt aus der Entwicklung der STJ und die Integration der STJ in verschiedene Fassadensysteme führen zu vielen möglichen Anpassungen des STJ-Systems für einzelne Bauprojekte. Der Architekt, Fachplaner oder Bauherr kann somit unterschiedliche Gestaltungsentscheidungen treffen. Tabelle 16 gibt einen Überblick über die wichtigsten Entwurfsoptionen für das STJ-System und dessen Integration in das bauliche Gesamtkonzept. Diese Design Choice Matrix dient dazu, von Architekten in frühen Konzeptions- und Entwurfsphasen angewendet zu werden. Um den Anwendungsbereich zu erweitern, umfassen die Entwurfsoptionen auch Optionen wie vertikale Jalousien oder feste Lamellen, die die Komplexität auf Kosten einer reduzierten Funktionalität verringern.

Ablauf und Ergebnisse des
Vorhabens

Tabelle 16: Design Choice Matrix STJ

Design choice	Options					
Mechanik / Bewegungsgrad der Lamellen	 feststehend (Festlamellen)	 knickend / verformbar (Fin-Ray u.ä.)	 drehbar	 raffbar	 raffbar und drehbar	
Lamellenbauart /-typ	 Absorberlamelle (ohne Abdeckscheibe, nicht wetterfest)	 Kollektorlamelle (mit Abdeckscheibe oder wetterfester Oberfläche, Dämmung etc.)				
Lamellenbreite	Großlamellen (>150 mm)	Raffstor-Lamellen (~60-100 mm)				
Absorberoberfläche	 keine Beschichtung	 Farbbeschichtung (lackiert, eloxiert, pulverbeschichtet o.ä.)	 spektralselektive Beschichtung (Solarthermie-Absorberblech)	 PVT (Photovoltaisch-Thermischer Kollektor)		
Lamellengeometrie						
Fassadenraster & Lamellenlänge	Konventionell (~1.35 m)	Lang (>1.5 m)	Vertikal (~3 m)			
Lamellenausrichtung	 Vertikal	 Horizontal				
Nutzung der Energie (Beispiele)	 Niedertemperatur-Heizung / NT-Wärmenetz	 Wärmepumpe bzw. Regenerierung Erdwärmesonde etc.	 Trinkwarmwasser-Vorwärmung	 Heizung	 Trinkwarmwasser	 Solare Entfeuchtung/ Adsorptionskältemaschine
Positionierung der STJ und Fassadentyp	 Außenliegende Befestigung (beliebiger Fassadentyp)	 Zwischen Verglasungsebenen (mit Wartungsfenster) (Kastenfenster/ Doppelfassade)	 Zwischen Verglasungsebenen (ohne Wartungsfenster) (CCF)			
Fassadenanwendungen	 Festelement	 Klapppladen	 Schiebeladen	 Vertikalschiebeladen	 Faltiladen	 Louvre / Brise Soleil
Gebäudetyp		 Flachbau			 Hochhaus	
Gebäudefunktion	Industriegebäude	Wohnungsbau	Öffentliches Gebäude	Büro	Hotel	Krankenhaus

Basierend auf dieser Übersicht kann die STJ als ein System angesehen werden, das an unterschiedliche architektonische und bauliche Anforderungen angepasst werden kann. Diese Anpassung eröffnet Gestaltungsmöglichkeiten, wie sie für die Fassadenanwendung neu entwickelter Lösungen erforderlich sind. Darüber hinaus kann eine Reduzierung der Komplexität erreicht werden, um die Anwendung in ersten realen Bauprojekten

mit geringen Risiken zu ermöglichen, beispielsweise durch Konzentration auf kippbare Lamellen, die nicht eingefahren werden können. Der Lamellenmechanismus wird vereinfacht und die Anzahl der Komponenten reduziert. Die Wärmeübertragungskomponenten von der Lamelle zum Sammelrohr könnten modifiziert werden, da nicht mehr die volle Bewegung jeder Lamelle erforderlich ist. Dies könnte zu einer besseren Wärmeübertragung und damit zu einem höheren solarthermischen Wirkungsgrad führen. Ob die solarthermische Jalousie das Potential hat, als Produkt zu Energieeinsparungen in verglasten Gebäuden beizutragen, hängt nun vor allem davon ab, inwiefern die technologische Weiterentwicklung im Folgeprojekt „DESTINI – Demonstration des Nutzens solarthermischer Jalousien im Realbetrieb“, das zum 1.5.2020 gestartet ist, erfolgreich ist.

3.1.6.2 Wirtschaftlichkeitsanalyse

Streifenkollektor

Auf Basis der Kostenermittlungen von DAW und Fa. Wagner Solar wurden die Kosten von Streifenkollektorfassaden in Abhängigkeit der Stückzahl und des Anteils der Kollektoren an der Gesamtfassade ermittelt. Dabei wurde deutlich, dass sich die Kosten bei einer Fertigung bis 10 000 Stück gegenüber jenen bei einer Fertigung bis zu 50 Stück in etwa halbieren lassen. Bei den Kostenermittlungen wurden die Kollektoren, die Sammelkanäle, das Fassadenbekleidungsssystem inklusive Unterkonstruktion und Wärmedämmung sowie eine Gewinnmarge berücksichtigt. Bei einem Kostenvergleich ist zu beachten, dass die Gesamtfassade sowohl Kollektoren als auch klassische Fassadenbekleidungsmaterialien enthält. Ein reiner Vergleich der Kollektorkosten mit jenen marktüblicher Kollektoren zeigt, dass der gestalterische Mehrwert durch wesentliche Mehrkosten erkaufte werden muss. Allerdings sind bei der Betrachtung der Gesamtfassade der gestalterische und energetische Mehrwert zu berücksichtigen. Letztlich wird der Kunde entscheiden müssen, welchen Preis er für das Gesamtkonzept zu bezahlen bereit ist. Es ist jedoch offensichtlich, dass der deutlichen Verbesserung des Kollektors hinsichtlich seiner Erträge ein besonderes Augenmerk geschenkt werden muss – einerseits, um den energetischen Mehrwert zu erhöhen, andererseits, um die Mindesterträge für eine Förderung zu erreichen, wodurch sich die Wirtschaftlichkeit noch einmal wesentlich erhöhen kann.

Solarthermische Jalousie

Für die Kostenbetrachtung der Solarthermischen Jalousie wurden die Baugruppen des Entwicklungsstandes des Labortestmusters verwendet (vgl. Abschnitt 3.1.3.8). Die genaue Betrachtung der Kosten des Labortestmusters selbst ist aufgrund seines Forschungs- und Entwicklungscharakters nicht zielführend. Die Zielkostenrechnung wurde daher mit Abschätzungen der Kosten der wichtigsten Baugruppen gemacht und mit Erfahrungswerten der Partner abgeglichen.

Die aktuelle Abschätzung der Mehrkosten in der Herstellung liegen in einem Bereich von 180 – 280 €/m² für die Solarthermische Jalousie im Vergleich zu einer herkömmlichen Jalousie, wenn große Stückzahlen (20.000 m², d. h. Serie) zugrunde gelegt werden. Bei kleineren Stückzahlen (200 m²) ergeben die Kostenschätzungen etwa doppelt so hohe Mehrkosten. Die große Unsicherheit der Kosten bei großen Stückzahlen entsteht durch Unsicherheit in der Abschätzung einiger Bauteile. Für verschiedene Heat-Pipe-Typen von verschiedenen Herstellern wurden beispielsweise Preise zwischen 3 und 22 €/Stk. für gleiche Stückzahlen genannt. Kosten für Endkunden liegen markttypisch ca. 2,5 – 4-mal höher als die Herstellkosten. Dadurch ergeben sich Mehrkosten für die STJ für den Endkunden im Bereich von etwa 450 – 1100 €/m².

Die Lebenszykluskostenrechnung wurde für zwei Fallstudien der energetischen Simulation durchgeführt. Als erster Fall wurde der Einsatz der optimierten STJ in einem Hotel in Frankfurt an einer Südfassade mit Fluideingangstemperatur 30 °C mit Zielausgangstemperatur 40 °C untersucht. Die Endenergieeinsparung im Vergleich zur Referenz mit konventioneller Jalousie beträgt 349 kWh/m². Als Investitionsmehrkosten für die STJ, deren Installation und das solarthermische System wurden insgesamt 785 €/m² angenommen. Für eine Lebensdauer von 25 Jahren ergeben sich Kosten von 9,6 ct je eingesparter kWh Endenergie. Für den Standort Barcelona ergibt sich aufgrund der höheren Endenergieeinsparung von 671 kWh/m² eine Reduktion der Mehrkosten der Endenergieeinsparung auf 2 ct/kWh. Für eine finanzielle Amortisation über die Lebensdauer im Vergleich zur Referenzfassade im Fallbeispiel Barcelona müssten z. B. die Investitionsmehrkosten deutlich auf unter 500 €/m² sinken oder die Energieeinsparung um weitere 30 - 35 % steigen. Eine Erhöhung der Energieeinsparung wäre z. B. durch Betrieb bei niedrigeren Fluidtemperaturen möglich, sofern eine sinnvolle Nutzung der Wärme auf niedrigem Temperaturniveau vorhanden ist. Eine reine finanzielle Amortisation muss allerdings vor dem Hintergrund des größeren Nutzenversprechens durch die multifunktionelle Fassade kritisch betrachtet werden. Eine dadurch erhöhte Zahlungsbereitschaft kann bisher noch nicht quantitativ benannt werden.

3.1.7 Objektive Begleitung des Innovationsprozesses und Öffentlichkeitsarbeit zur Marktheranführung der Technologien

Ablauf und Ergebnisse des
Vorhabens

3.1.7.1 Erfassung der Anwendungsszenarien

Das Borderstep Institut hat im Unterauftrag zunächst die zwei Kollektoranwendungen (Streifenkollektor sowie Solarthermische Jalousie) in Anwendungsszenarien zusammengefasst. Für die beiden Anwendungsszenarien wurden ein Desk Research über mögliche Einflussfaktoren der Vermarktung und der praktischen Umsetzbarkeit der Szenarien durchgeführt. Die erfassten Faktoren (z. B. wirtschaftliche Umsetzbarkeit des Ansatzes, notwendige Produktions- und Fertigungstechnik für die Umsetzung sowie angestrebte Zuverlässigkeit und Lebensdauer der zukünftigen Produkte) wurden in die Anwendungsszenarien übernommen und detailliert ausgearbeitet.

Den Bericht des Borderstep Institut „*Erfassung von Anwendungsszenarien für Fassadenkollektoren im Projekt Arkol*“ ist im Anhang zu finden.

3.1.7.2 Geschäftsmodellentwicklung

Die erfassten Anwendungsszenarien dienten als Grundlage für die Ausarbeitung von Geschäftsmodellen, die in einem zweiten Bericht des Borderstep Institut „*Entwicklung von Geschäftsmodellen für Fassadenkollektoren im Projekt Arkol*“ dokumentiert sind. Dieser ist ebenfalls im Anhang zu finden.

3.1.7.3 Lead-User-Workshops zu beiden Gesamtkonzepten

LUWS Solarthermische Jalousie

Zur Solarthermischen Jalousie wurde ein Lead-User-Workshop mit Anbietern und Planern hochwertiger und multifunktionaler Fassaden durchgeführt. Als Teilnehmer konnten vor allem Partner von Priedemann Facade-Lab sowie des Fraunhofer ISE gewonnen werden. Der Workshop fand am 13.11.2020 bei Priedemann Facade-Lab in Großbeeren bei Berlin statt.

Nach einer Einführung in die Technik und die möglichen Anwendungsfelder der Solarthermische und einer Besichtigung des Demonstratorfassadenelements, wurde in einer anschließenden Diskussion mit den Teilnehmern Anforderungen (gestalterische, technische, wirtschaftliche, (bau-)rechtliche sowie Nutzer- bzw. Kundenanforderungen) an die weitere Entwicklung erarbeitet, differenziert und diese abschließend durch die Teilnehmer bewertet.

Eine der Kernempfehlungen der Teilnehmer ist, die mögliche Reduktion des g-Wertes bei gleichzeitiger Transparenz durch die STJ als Nutzen stärker in den Vordergrund zu stellen. Zudem sollte die Komplexität reduziert werden und das Kosten-Nutzen-Verhältnis wird nach aktuellem Stand kritisch eingeschätzt.

Die gesamten Ergebnisse des Workshops sind in einem dritten Bericht des Borderstep Instituts „*Auswertung von Produkt- und Vermarktungsoptionen für architektonisch integrierte Fassadenkollektoren im Projekt Arkol*“ dokumentiert. Dieser ist ebenfalls im Anhang zu finden. Er dient den Projektpartnern zur Weiterführung der Entwicklung der Solarthermischen Jalousie sowie zur optimalen Ansprache von wichtigen Entscheidern.



Abbildung 178: Vorstellung und Diskussion der Solarthermischen Jalousie während des Lead-User-Workshops im Priedemann Facade-Lab.

LUWS Streifenkollektor

Gemeinsam mit den Partnern DAW, Priedemann Facade-Lab und Fraunhofer ISE wurde ein Konzept für einen Lead-User-Workshop mit potenziellen Anwendern und Kunden zukünftiger Angebote des Streifenkollektors entwickelt. Dieser fand nach Fertigstellung der Demonstrationsfassade bei DAW in Ober-Ramstadt am 19.02.2020 statt.

Ziel des Workshops war es, Interessenten für den Streifenkollektor zu identifizieren, mit ihnen gemeinsam Anforderungen an zukünftige Produkte zu erfassen und ggf. Partner für die weitere Zusammenarbeit (z. B. in Form von Pilotprojekten oder auch der gemeinsamen Vermarktung) zu gewinnen. Der Streifenkollektor wurde daher als eine serien-nahe Anwendung präsentiert. An dem Workshop nahm auch der bereits identifizierte mögliche Fertigungspartner für den Streifenkollektor (Wagner Solar) teil. Damit sollte den Teilnehmern eine möglichst vollständige zukünftige Wertschöpfungskette für den Streifenkollektor dargestellt und zukünftige Einsatzmöglichkeiten diskutiert werden.

Die Teilnehmer des Workshops konnten aus dem Kontaktnetzwerk der DAW sowie aus der Interessentenliste, die vom Fraunhofer ISE auf der BAU 2019 erstellt worden war, gewonnen werden. Es handelte sich dabei schwerpunktmäßig um Architekten, Planer und Immobilienunternehmen mit Interessen an innovativen Fassadensystemen und regenerativer Energiegewinnung.

Der Workshop wurde in zwei Teilen durchgeführt. Im ersten Abschnitt wurden die Technik, das Konzept des Kollektors sowie Anwendungs- und Gestaltungsmöglichkeiten vorgestellt. Nach einer Besichtigung der Demonstrationsfassade bei DAW wurden dann in drei parallel verlaufenden Workshops mit den Teilnehmern Anforderungen in den Kategorien Montage/Konstruktion, Design/architektonische Gestaltung sowie Wirtschaftlichkeit/Vermarktung diskutiert.



Abbildung 179: Vorstellung der Demonstratorfassade in Ober-Ramstadt während des Lead-User-Workshops

Montage/Konstruktion

In Bezug auf das Montagesystem und die Konstruktion des Streifenkollektors wurden von den Teilnehmern folgende Anmerkungen gemacht:

- Das System der trockenen Anbindung (Schnittstelle zwischen Kollektor und Sammelkanal) wurde durchgängig als vorteilhaft angesehen, da es eine klare Trennung von Gewerken in der Bauphase sowie bei der Wartung und die Übernahme von Garantie ermöglicht.
- Das Kollektorprinzip wurde positiv bewertet. Wünschenswert wäre nach Ansicht der Teilnehmer ein weniger auffälliger Rahmen (ggf. eine rahmenlose Konstruktion) sowie eine verdeckte bzw. weniger auffällige Aufhängung des Kollektors (Vermeidung deutlich sichtbarer Schrauben). Diese Punkte sind bekannt und teilweise bereits gelöst.
- Weiterhin wurde diskutiert, ob es sinnvoll ist, zwei Produktlinien (einfacher Kollektor und höherwertiger Fassadenkollektor) für den Streifenkollektor zu entwickeln und ob eine Variante für die Integration in ein WDVS entwickelt werden soll. Hierzu gab es keine einhellige Auffassung. Zum einen erscheint ein einfacher Kollektor (z. B. für Dachanwendungen) ein ungeeigneter Vergleich für die auf architektonische Integration ausgelegten Streifenkollektoren zu sein. Zum anderen wurde die Abgrenzung von WDVS und vorgehängter hinterlüfteter Fassaden als schwierig angesehen, da die Systeme sich einander annähern, sobald man versucht, einen Streifenkollektor in ein WDVS zu integrieren.

Design/architektonische Gestaltung

In Bezug auf das Design und die architektonische Gestaltung wurden von den Teilnehmern folgende Anmerkungen gemacht:

- Als positiv bewertet wurde von den Teilnehmern, dass der Kollektor flexible Längenmaße ermöglicht und damit ein höheres Maß an Gestaltungsfreiheit erlaubt.
- Als Gestaltungshinweise wurden mehrere Punkte genannt und mit Prioritäten versehen. Diese sind mit abnehmender Priorität:
 - Möglichst rahmenlose Kollektoren
 - Farbigkeit (möglichst nicht dunkelblau/schwarz wie bei marktüblichen spektral-selektiven Beschichtungen)
 - Möglichst unsichtbares Befestigungssystem
 - Möglichst nahtloses Fugenbild bei größeren Kollektorfeldern
- Als weitere gestalterische Hinweise wurden genannt:

- Kollektorfelder, die sich in Größe und Proportion in Fensterraster einfügen
- Kollektoren, die in Verbundglassysteme integriert werden können

Wirtschaftlichkeit/Vermarktung

In Bezug auf die Wirtschaftlichkeit und eine zukünftige Vermarktung des Streifenkollektors wurden von den Teilnehmern folgende Anmerkungen gemacht:

- Eine Vermarktung sollte in erster Linie als Architekturfassade mit solarthermischer Funktion erfolgen.
- Für die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit und eine zukünftige Vermarktung ist es wichtig, spezifische Eigenschaften/Nutzen einer solarthermischen Architekturfassade zu definieren und ihnen einen Wert zuzuordnen. Ein Teilnehmer schlug vor, die Eigenschaften/ Nutzen wie folgt und mit abnehmender Priorität zu gliedern:
 - Wetterschutz
 - Wärmedämmung
 - Energiegewinnung
 - Gestaltung
- Eine frühzeitige Einbeziehung von Fachplanern in die Vermarktung wird als zentral angesehen, da die Fachplaner Einfluss auf die Auswahl von Fassadensystemen haben.
- Der Beitrag des Streifenkollektors zur Erfüllung bzw. Einhaltung von Standards (KfW 40, Energiehaus Plus, etc.) muss deutlich herausgearbeitet werden.

Die Ergebnisse des Workshops sind ebenfalls im dritten Bericht des Borderstep Instituts „Auswertung von Produkt- und Vermarktungsoptionen für architektonisch integrierte Fassadenkollektoren im Projekt ArKol“ dokumentiert. Dieser ist im Anhang zu finden.

3.1.7.4 Vermarktungsszenarien

Basierend auf den Ergebnissen der Lead-User-Workshops wurden die Produkt- und Vermarktungsoptionen beider Technologien bewertet. Diese sind ebenfalls im angehängten, dritten Bericht des Borderstep Instituts „Auswertung von Produkt- und Vermarktungsoptionen für architektonisch integrierte Fassadenkollektoren im Projekt ArKol“ dokumentiert.

Im Folgenden das Fazit dieses Berichts als Auszug:

Abschließend kann für die Produkt- und Vermarktungsoptionen der beiden Anwendungen folgendes Fazit gezogen werden:

Streifenkollektor

Für den Streifenkollektor ergibt sich eine gute und fortgeschrittene Produkt- und Vermarktungsoption. Die technischen und gestalterischen Ziele für die Optimierung des Streifenkollektors (Heat-Pipe, randloser Kollektor, Farbigkeit, etc.) sind dokumentiert. Die Partner einer zukünftigen Wertschöpfungskette sind mit Wagner Solar und DAW vorhanden und eine Demonstrationsfassade, mit der Messwerte und Erfahrungen ausgewertet werden können, existiert. Damit ist ein wichtiges Ziel von ArKol erreicht.

Eine Frage, die im weiteren Verlauf auftreten wird, ist z. B. die Entscheidung darüber, ob ein Streifenkollektor in das Portfolio von Lithodecor/DAW aufgenommen werden kann und soll, und ob das Unternehmen damit einen zentralen Platz in der Wertschöpfungskette einnimmt. Dies kann sicherlich erst nach der Realisierung eines oder mehrerer Pilotvorhaben mit signifikanten Stückzahlen des Streifenkollektors entschieden werden. Die Umsetzung von Pilotvorhaben besitzt daher eine hohe Priorität.

Unmittelbaren Einfluss auf diese Entscheidung und eine Vermarktungsstrategie hat auch der kommunizierbare Nutzen bzw. Mehrwert des Streifenkollektors. Wie bereits im Workshop deutlich wurde, wäre es sinnvoll, den Nutzen noch differenzierter herauszuarbeiten und spezifischen Funktionen des Kollektors einen Wert bzw. die Erfüllung eines Standards zuzuordnen. Dies sollte nach Projektabschluss bzw. in einem Folgevorhaben weiterverfolgt werden.

Ein weiterer Faktor, der sich auf eine unternehmerische Entscheidung auswirken wird, ist die Gesamtentwicklung des Marktes und der Förderung für Solarthermie. Derzeit wird diese Entwicklung eher positiv eingeschätzt, da sich der Handlungsbedarf erneuerbare Energien und Wärme in Gebäuden einzusetzen zusehends verschärft.

In der weiteren Zukunft, und falls die Fertigung größerer Stückzahlen des Streifenkollektors notwendig sein sollte, kann eine Entscheidung darüber notwendig sein, welche Position Wagner Solar in der Wertschöpfungskette einnimmt.

Solarthermische Jalousie

Für die Solarthermische Jalousie ergibt sich noch keine eindeutige Produkt- und Vermarktungsoption. Dies liegt zum einen daran, dass die hohe Komplexität der Anwendung noch zahlreiche Detaillösungen und Vereinfachungen erfordert (z. B. wartungs- und geräuscharmer Anpressmechanismus, Reduktion der Lamellendicke). Hierfür kann im Nachfolgevorhaben DESTINI gezielt nach Lösungen gesucht werden.

Zum anderen erfordert die Solarthermische Jalousie die gezielte Ansprache eines sehr kleinen Nutzer- bzw. Kundenkreises. Dies wurde auch schon bei der Entwicklung eines Geschäftsmodells für diese Anwendung deutlich (siehe Abschnitt 3.1.7.2). Dort wurde das potentielle Kundensegment mit Bauherren von repräsentativen Immobilien und das Nutzenversprechen mit einem ästhetisch einzigartigen und multifunktionalen Fassadenbauelement angegeben. Die Solarthermische Jalousie zielt damit nach Ansicht des Projektkonsortiums auf ein sehr kleines und hochwertiges Marktsegment ab, was die Gewinnung möglicher Anwender und Pilotkunden zu einer anspruchsvollen Aufgabe macht.

Zwei Punkte, die für die Weiterentwicklung des Geschäftsmodells sowie einer Vermarktungsstrategie relevant sind, wurden durch den Lead-User-Workshop zur Solarthermischen Jalousie jedoch nochmals deutlich. Erst nach ihrer Klärung kann eine weitere Entwicklung und Bewertung des Geschäftsmodells und der Vermarktungsstrategie erfolgen. Die Teilnehmer des Workshops betonten, dass die Reduktion des g-Wertes in Glasfassaden (Verringerung der Kühllast) bei gleichzeitiger Transparenz ein entscheidender Nutzen sein kann, der für den Einsatz der Solarthermischen Jalousie spricht. Dieser Nutzen sollte noch stärker herausgearbeitet werden. Außerdem wurde von den Teilnehmern betont, dass für den Einsatz der Solarthermischen Jalousie in großen, repräsentativen Fassaden die Garantie entscheidend ist. Gerade weil es sich oftmals um prestigeträchtige Projekte handelt, sollte bei einer ersten Umsetzung darauf geachtet werden, dass für mindestens 10 Jahre ein reibungsloser Betrieb der Jalousie gewährleistet

werden kann. Damit ist für das Nachfolgevorhaben DESTINI ein anspruchsvolles Ziel formuliert worden.

3.1.7.5 Ausstellung der Konzepte auf Messen & weitere Öffentlichkeitsarbeit

Messe BAU 2017

Ein wichtiger Meilenstein, um die Akzeptanz am Markt zu prüfen, stellte die Messe BAU 2017 in München dar. Das Konsortium hatte die Möglichkeit, auf dem Fraunhofer Stand „Allianz Bau“ das Projekt ArKol Interessenten zu präsentieren und Architekten, Bauherren und Hersteller für Anschlussprojekte anzusprechen. Um den damaligen Projektstand öffentlichkeitswirksam zu präsentieren, wurden von Priedemann Facade-Lab zwei Fassadenmodelle im Maßstab 1:50 gefertigt.



Abbildung 180: Projektpräsentation auf der Messe BAU 2017, Fassadenmodelle STJ und Streifenkollektor.

Um die Funktionsweise und Gestaltungspotentiale des Systems dem Besucher nahezubringen, wurde eine Slideshow erstellt. Diese besteht aus zwei Teilen je Entwicklungsansatz (Solarthermische Jalousie und Streifenkollektor). Zunächst ein erklärender Teil aus piktoagrammatischen Darstellungen in Form einer Stop-Motion-Animation, in dem die wichtigen Funktionen und Mehrwerte der entwickelten Komponenten visualisiert werden. Im zweiten Teil der Slideshow werden unterschiedliche Fassadendesigns anhand von Visualisierungen präsentiert. Diese sind an den physischen Modellen orientiert und zeigen eine Vielzahl an Integrationsmöglichkeiten in unterschiedliche Fassaden auf. Dies

zeigt dem Besucher die Möglichkeit der architektonischen Integration bzw. deren Gestaltungspotential auf. Die Besucherrückmeldungen waren ein voller Erfolg. Alle 1200 Flyer waren am Ende vergriffen und ca. 110 persönliche Kontakte durch den Austausch von Visitenkarten geknüpft.

Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens

Messen glasstec 2018 und BAU 2019

Um die wichtigen Erkenntnisse und Kontakte aus der Messe BAU 2017 weiterzuführen wurden die damaligen Ergebnisse aus ArKol auch auf den Fachmessen glasstec 2018 in Düsseldorf und BAU 2019 in München ausgestellt. Hierfür wurden die im Projekt erstellten Fassadenmodelle und Demonstratoren mit zusätzlichen Ausstellungstücken und Handmustern ergänzt um den Besuchern und gezielt eingeladenen Stakeholdern den aktuellen Stand der Entwicklung und zukünftige Schritte und Möglichkeiten zu präsentieren.

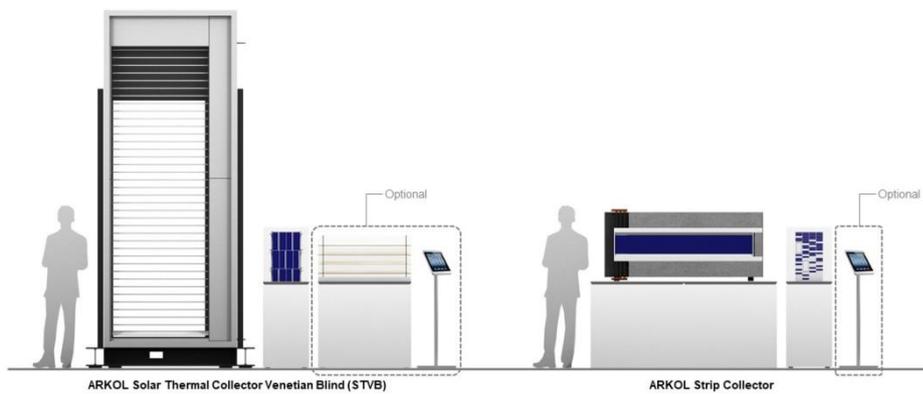


Abbildung 181: Planung Ausstellungselemente glasstec 2018 und BAU 2019.



Abbildung 182: Flyer zu den beiden ArKol-Konzepten für glasstec 2018 und BAU 2019.



Abbildung 183: Exponate auf der glasstec in Düsseldorf (Oktober 2018).

Die Resonanz auf den Auftritt auf der glasstec 2018 im Rahmen der „glass technology live“ war sehr gut; es gelang, zahlreiche Kontakte zu knüpfen und ein erstes breiteres Feedback zu erhalten.



Abbildung 184: Labortestmuster der solarthermischen Jalousie als Exponat auf der glasstec 2018 (links) und BAU 2019 (rechts).

Die Präsentation der Projektergebnisse mithilfe der realen Test- bzw. Messmuster der solarthermischen Jalousie und des Streifenkollektors auf der Leitmesse BAU im Januar 2019 in München auf dem Stand der Fraunhofer-Allianz BAU erlebte eine sehr positive Resonanz und wurde vor allem von Architekten gut aufgenommen. Hierbei konnten Planer vor allem dank der trockenen Anbindung der Heat-Pipe-Technologie von der Anwendung in der Fassade und den damit einhergehenden Möglichkeiten der Anpassung bzw. Gestaltung in der Fassade überzeugt werden. Ein kurzer Bericht mit Fotos wurde auf der ArKol-Webseite veröffentlicht (<https://arkol.de/de/streifenkollektor/streifenkollektor-und-solarthermische-jalousie-auf-der-messe-bau-2019>).

FAF 2019

Ablauf und Ergebnisse des
Vorhabens

Der Streifenkollektor wurde darüber hinaus auf der Fachmesse FAF („Farbe, Ausbau & Fassade“) ausgestellt, die die Leitmesse für Maler, Lackierer und Stuckateure ist. Mehrere Veröffentlichungen im Rahmen der Messe berichteten vom Streifenkollektor („Fassadenbau: Design trifft Funktion“, Deutsche Handwerks Zeitung am 12. April 2019 & „Optisch ansprechender Fassadenkollektor“ in der FAF-Messezeitschrift).

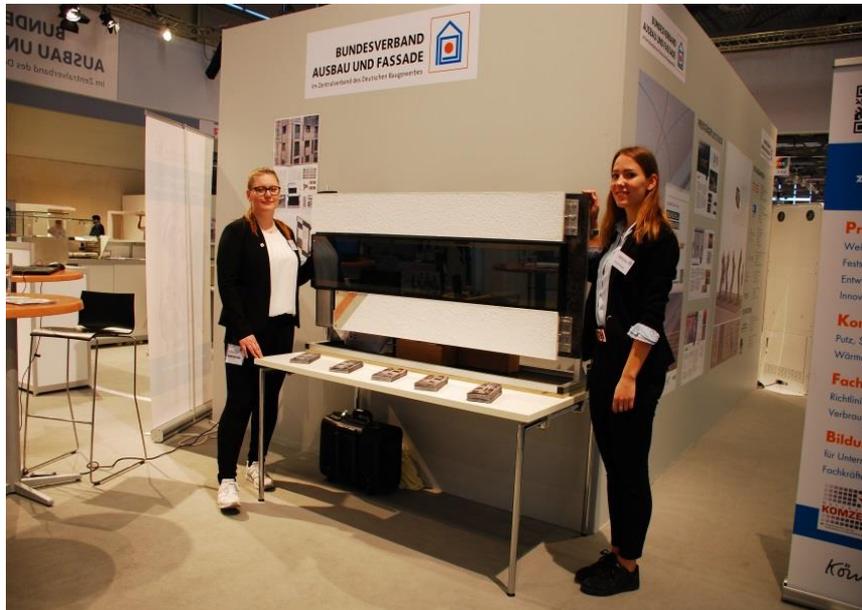


Abbildung 185: Ausstellung des Streifenkollektors auf der FAF 2019.

Die auf den Messen (auch die vorangegangenen glasstec 2018) gesammelten Kontakte dienen im weiteren Projektverlauf zur Bestimmung von Stakeholdern und Teilnehmern der geplanten Lead-User-Workshops. Darüber hinaus ist man mit diesen Interessenten in weiterem Austausch, um auch langfristig erste Umsetzungsprojekte anzustreben.

Präsentation der Konzepte auf Fachsymposien und Veröffentlichungen in Fachzeitschriften und Online-Portalen

Eine Übersicht aller Teilnahmen an Fachsymposien, Konferenzen und alle erfolgten Veröffentlichungen und Berichte über das Projekt und die Technologien sind in Abschnitt 3.3 zusammengefasst.

3.1.7.6 Ausblick - Planung des Markteinstiegs über Referenzprojekte

Folgeprojekt DESTINI zur Umsetzung der Solarthermischen Jalousie

Mithilfe der Design Choice Matrix (siehe Abschnitt 3.1.6.1) und anhand des Feedbacks und der Kontakte von Messen, Fachveranstaltungen und dem Lead-User-Workshop (siehe Abschnitt 3.1.7.3) konnten erste konkrete Anwendungsfälle angedacht werden. So gab es mit unterschiedlichen Herstellern, Architekten und Fachplanern Ansätze zur Weiterführung des STJ-Konzepts und die mögliche Überführung in reale Bauvorhaben – sowohl Neubau als auch Sanierung. So wurde bereits frühzeitig aus dem Konsortium heraus ein Konzept für ein Nachfolgeprojekt zur Umsetzung einer Demofassade inkl. Monitoring erarbeitet. Im Zuge intensiven Austausches mit weiteren möglichen Partnern

konnte schlussendlich sowohl ein Fassadenbauer als auch ein Bauherr und Investor gewonnen werden. Seit Mai 2020 erfolgt die Weiterführung des Konzepts „Solarthermische Jalousie“ zur Umsetzung in einem realen Bauvorhaben unter dem Projektakronym DESTINI.

Markteinstieg Streifenkollektor

Die positiven Rückmeldungen auf den Messen sowie beim Lead-User-Workshop zeigen, dass das Konzept des Streifenkollektors grundsätzlich auf hohes Interesse stößt und das Konsortium mit den bisherigen Überlegungen hinsichtlich Gestaltungsmöglichkeiten und Gewerketrennung offenbar auf einem guten Weg ist. Durch die Messungen und Simulationsergebnisse sowie insbesondere auch durch Rückmeldungen beim Lead-User-Workshop wurde jedoch auch deutlich, welche weiteren Entwicklungsschritte noch notwendig sind, um das Konzept zu einem vermarktbareren Produkt zu entwickeln. Insbesondere betrifft dies eine schlankere Bauweise der Kollektoren mit besserer Wärmedämmung, schmalen Rändern bzw. randloser Bauweise und optimierter Wärmeübertragungskette vom Absorber bis zum Sammelkanal (idealerweise direkt spektralselektiv beschichtete flache Heat-Pipe). Daher strebt das Konsortium ein Folgeprojekt an, um einerseits den Streifenkollektor in Richtung Produkt weiterzuentwickeln und andererseits durch weitere Demonstrationsfassaden in größerem Maßstab detailliertere Aussagen zur Akzeptanz bei allen Akteuren sowie zu den erreichbaren Energieerträgen erhalten zu können.

3.1.8 IEA SHC Task 56

Der IEA SHC Task 56 konzentrierte sich mit Subtask A auf die Verbreitung des Stands der Technik und die Analysen der Chancen und Risiken ausgewählter Technologien solarer Gebäudehüllen. Hier wurden Ergebnisse aus ArKol zur Solarthermischen Jalousie auch im Rahmen der „State-of-the-art and SWOT analysis of building integrated solar envelope systems“ eingearbeitet und veröffentlicht (Denz 2019a).

Subtask B konzentrierte sich unter der Leitung von Dr. Christoph Maurer, Fraunhofer ISE, zum einen auf die Analyse der Hemmnisse für solare Gebäudehüllen und Strategien für Akteure in diesem Umfeld (Maurer et al. 2018c). Als spezielle Innovation für innovative Unternehmen wurden das Konzept von vertraulichen Feedback-Workshops entwickelt und erfolgreich getestet (Maurer 2019a). Unter dem Schutz einer Geheimhaltungsvereinbarung können sich Unternehmen, die neue Technologien entwickeln und vertreiben, untereinander austauschen, wie man mit den aktuellen Hemmnissen kreativ umgehen kann. Um die Qualität von Simulationen zu erhöhen und die Kosten zu senken, wurde eine Übersicht der verschiedenen Simulationsmodelle für die speziellen Teilbereiche solarer Gebäudehüllen erstellt (Maurer et al. 2019b). Anhand von Beispielen wurde gezeigt, wie man in diesen Teilbereichen jeweils den für die Aufgabe am besten geeigneten Detailgrad finden kann. Dies sollte besonders für Mitarbeitende hilfreich sein, die noch nicht über jahrelange Erfahrung in der Modellierung verfügen. Schließlich wurden in Subtask B auch zahlreiche Normen daraufhin untersucht, ob sie ein Hemmnis für solare Gebäudehüllen darstellen könnten, da bei ihrer Erstellung nur an Komponenten gedacht wurde, die nicht in die Gebäudehülle integriert sind. Im Deliverable B5 wird empfohlen, diese Schwierigkeiten in der Weiterentwicklung der jeweiligen Normen aufzulösen (Bueno et al. 2020).

Subtask C konzentrierte sich auf die Erstellung und Auswertung von Simulationen auf Gebäudeebene. Dabei wurde in einer ersten Simulations-Fallstudie auch die solarthermische Jalousie präsentiert und untersucht (Haeringer und Bueno 2020; Haeringer 2020). In Subtask C wurden außerdem für zwei Gebäude Monitoringdaten gesammelt und ausgewertet.

Zusätzlich wurde die STJ als eines von sechs Forschungsprojekten aus 53 Einreichungen durch das IEA Committee on Energy Research and Technology (CERT) ausgewählt und im Rahmen eines Technology Reports der IEA zum Thema „Today in the Lab - Tomorrow in Energy?“ präsentiert (IEA 2020).

3.2 Relevante Ergebnisse von dritter Seite

Dem Projektkonsortium sind keine konkurrierenden Arbeiten und Ergebnisse Dritter auf dem Gebiet des Streifenkollektors sowie der Solarthermischen Jalousie bekannt.

3.3 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Die Projektergebnisse wurden wie geplant weitreichend durch die Projektpartner auf Messen, Symposien, Konferenzen, Online-Portalen, Fachzeitschriften und in weiteren Medien präsentiert und diskutiert, und in der Fachpresse aufgegriffen. Tabelle 17 zeigt eine Übersicht der Aktivitäten und Veröffentlichungen zu den Themen von ArKol.

Tabelle 17: Übersicht über Konferenzteilnahmen, Veröffentlichungen und Presseartikel in und über ArKol

ArKol Konzept	Art der Veröffentlichung	Veranstaltung / Herausgeber	Ort	Datum	Referenz
STJ + STSK	Projektwebsite	www.arkol.de	Online	fortlaufend	
STSK	Poster	Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgruppe Wärme- und Stoffübertragung	Kassel	03/2016	
STJ + STSK	Vortrag	Fach-Seminar Fassade	Stuttgart	10/2016	
STJ + STSK	Vortrag	New Energy Forum	Tsingtao	11/2016	
STJ + STSK	Messeexponat + Vortrag + Pressemitteilung	BAU	München	01/2017	(Fraunhofer ISE 2017)
STJ + STSK	Artikel	Enbausa		01/2017	(EnBauSa News: Energetisch Bauen und Sanieren 2020)
STJ + STSK	Poster + Paper	Symposium Solarthermie	Bad Staffelstein	05/2017	(Haeringer et al. 2017a; Morawietz et al. 2017)
STJ	Vortrag + Paper	PLEA	Edinburgh	07/2017	(Haeringer et al. 2017b)
STJ + STSK	Artikel	Xia		09/2017	(Maurer und Hermann 2017)
STSK	Poster	International Conference on Solar Heating	Abu Dhabi	10/2017	

ArKol Konzept	Art der Veröffentlichung	Veranstaltung / Herausgeber	Ort	Datum	Referenz
		and Cooling for Buildings and Industry			
STJ + STSK	Vortrag	Fassadentage	Würzburg	11/2017	
STJ	Vortrag + Paper	ne-xt facades	München	11/2017	(Denz et al. 2017)
STJ + STSK	Artikel	Industrieanzeiger		01/2018	(Maurer 2018b)
STSK	Poster	Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgruppe Wärme- und Stoffübertragung	Bremen	03/2018	
STJ + STSK	Vortrag	Faszination Gebäudehülle	Hamburg + Berlin	04/2018	
STJ + STSK	Artikel	Deutsches Architektenblatt		06/2018	(Maurer 2018a)
STSK	Poster	Joint 19th International Heat Pipe Conference and the 13th International Heat Pipe Symposium	Pisa	06/2018	(Morawietz et al. 2018)
STJ	Poster + Paper	Symposium Solarthermie	Bad Staffelstein	06/2018	(Haeringer et al. 2018)
STJ + STSK	Artikel	DETAIL		06/2018	(DETAIL 2018)
STJ	Video	Fraunhofer ISE		08/2018	(Fraunhofer ISE 2018)
STJ + STSK	Messeexponat	glasstec	Düsseldorf	10/2018	(glass technology live 2018)
STJ+STSK	Vortrag + Paper	engineered transparency	Düsseldorf	10/2018	(Denz et al. 2018b)
STJ + STSK	Vortrag + Paper	Advanced Building Skins	Bern	10/2018	(Denz et al. 2018a)
STJ + STSK	Vortrag + Workshop	Workshop Multifunktionale Fassaden	Berlin	11/2018	
STJ + STSK	Vortrag	Innovative Glazing Summit	Wien	11/2018	
STJ + STSK	Vortrag	Energieaktive Fassaden	Wien	12/2018	
STJ	Vortrag + Paper	PowerSkin 2019	München	01/2019	(Haeringer et al. 2019b)

Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens

ArKol Konzept	Art der Veröffentlichung	Veranstaltung / Herausgeber	Ort	Datum	Referenz
STJ + STSK	Messeexponat	BAU	München	01/2019	
STJ + STSK	Artikel	nachhaltige Technologien		02/2019	(Kuhn et al. 2019)
STSK	Messeexponat	Farbe, Fenster & Fassade	Köln	03/2019	
STJ + STSK	Artikel	FASSADE		03/2019	(Kuhn und Hermann 2019)
STSK	Poster + Paper	Symposium Solarthermie	Bad Staffelstein	05/2019	(Hermann et al. 2019)
STJ + STSK	Vortrag	InnoX	Wildau	09/2019	
STJ	Poster + Paper	Advanced Building Skins	Bern	10/2019	(Haeringer et al. 2019a)
STJ + STSK	Vortrag + Paper	FACADES	Lissabon	11/2019	(Denz et al. 2019b)
STJ + STSK	Vortrag	DGNB Immobilien-Workshop	Frankfurt	11/2019	
STJ	Buchbeitrag	IEA SHC TASK 56, SWOT analysis	Dublin	11/2019	(Denz 2019a)
STSK	Artikel	Haustec		02/2020	(Haustec 2020)
STSK	Pressemitteilung	DAW	Ober-Ramstadt	02/2020	
STJ + STSK	Pressemitteilung	Fraunhofer ISE	Freiburg	03/2020	(Fraunhofer ISE 2020)
STJ + STSK	Artikel + Newsletter	EnergieWendeBauen		03/2020	(EnergieWendeBauen 2020)
STSK	Artikel	applica	Wallisellen	04/2020	(Zimmer 2020a)
STSK	Artikel	Bauen im Bestand		04/2020	(Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co. KG 2020)
STSK	Artikel	Bau – Das bundesweite Baumagazin		04/2020	(Zimmer 2020b)
STSK	Artikel	Ausbau und Fassade		04/2020	

ArKol Konzept	Art der Veröffentlichung	Veranstaltung / Herausgeber	Ort	Datum	Referenz
STSK	Artikel	Innovative Fassadentechnik	Berlin	04/2020	(Zimmer 2020d)
STJ + STSK	Artikel	baunetzwissen	Online	04/2020	
STJ	Artikel	IEA SHC Task 56		04/2020	(Haeringer und Bueno 2020; Haeringer 2020)
STSK	Dissertation		Darmstadt	04/2020	(Morawietz 2020)
STSK	Artikel	Baustoff Partner		04/2020	(Baustoff Partner 2020)
STJ + STSK	Vortrag + Paper	Symposium Solarthermie	Bad Staffelstein / Online	05/2020	(Hermann et al. 2020)
STJ	Artikel	IEA – Technology Report	Online	07/2020	(IEA 2020)
STJ	Vortrag	Unitized Façade Seminar	Detmold / Online	07/2020	
STSK	Artikel	baulinks		08/2020	(baulinks 2020)
STSK	Artikel	Bauphysik		08/2020	(Zimmer 2020c)
STSK (Demofassade)	Wettbewerbsbeitrag	Architekturpreis Gebäude-integrierte Solartechnik	München	08/2020	
STJ + STSK	Artikel	Sonnenenergie	Berlin	Vorauss. 09/2020	
STJ	Journal-Paper	Journal of Facade Design and Engineering	Delft	Vorauss. 11/2020	(Haeringer et al. accepted)
STJ + STSK	Vortrag	Building Envelope Design Conference	Tel-Aviv	12/2020	

Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens

4 Literaturverzeichnis

- 2014, S. H.C.: Experimental investigation on the performance of a novel solar air heater based on flat micro-heat pipe arrays (FMHPA).
- 2014, S. H.C.: Experimental study of the thermal performance for the novel flat plate solar water heater with micro heat pipe array absorber.
- 2014, S. H.C.: Field study of the performance for a solar water heating system with MHPA-FPCs.
- Bahrami, M.; Yovanovich, M. M.; Culham, J. R. (2004): Thermal Joint Resistances of Conforming Rough Surfaces with Gas Filled Caps. In: *Journal of Thermophysics and Heat Transfer* 18 (3), S. 318–325. DOI: 10.2514/1.5480.
- baulinks (2020): ArKol - ein Forschungsprojekt zu Bauwerk-integrierter Solarthermie (BIST). Online verfügbar unter <https://www.baulinks.de/webplugin/2020/1133.php4>, zuletzt aktualisiert am 10.08.2020, zuletzt geprüft am 10.08.2020.
- Baustoff Partner (2020): DAW: Wenn Häuserfassaden Wärme erzeugen. In: *Baustoff Partner*. Online verfügbar unter <https://www.baustoff-partner.de/d/daw-wenn-haeuserfassaden-waerme-erzeugen/>, zuletzt geprüft am 10.08.2020.
- Beijing Sunda Solar Energy Technology Co., Ltd. (2017): SUNDA SEIDO8 series heat pipe vacuum tube solar collector. Online verfügbar unter http://www.sundasolar.com/product_seido8%20series%20collector.html, zuletzt aktualisiert am 30.06.2017, zuletzt geprüft am 06.08.2020.
- Bejan, Adrian; Kraus, Allan D. (2003): Heat transfer handbook. Hoboken, NJ: Wiley. Online verfügbar unter <http://www.loc.gov/catdir/description/wiley039/2002028857.html>.
- Bezrodny, M. K.; Podgoretskii, V. M. (1994): Flooding and heat transfer limits in horizontal and inclined two-phase thermosiphons. In: *Experimental Thermal and Fluid Science* 9 (3), S. 345–355. DOI: 10.1016/0894-1777(94)90037-X.
- Bueno, Bruno; Cejudo-Lopez, Jose M.; Kuhn, Tilmann E. (2017): A general method to evaluate the thermal impact of complex fenestration systems in building zones. In: *Energ. Buildings* 155, S. 43–53. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.08.055.
- Bueno, Bruno; Hubschneider, Carolin; Maurer, Christoph; Geisler-Moroder, David; Venus, David; Ochs, Fabian et al. (2020): Report on test methods and recommendations. Hg. v. Christoph Maurer.
- Bueno, Bruno; Wienold, Jan; Katsifaraki, Angelina; Kuhn, Tilmann E. (2015): Fener. A Radiance-based modelling approach to assess the thermal and daylighting performance of complex fenestration systems in office spaces. In: *Energy and Buildings* 94, S. 10–20. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.02.038.
- Cappel, Christoph; Kuhn, Tilmann E.; Maurer, Christoph (2015a): Research and development roadmap for façade-integrated solar thermal systems. Fraunhofer ISE. Online verfügbar unter <http://publica.fraunhofer.de/documents/N-349494.html>, zuletzt geprüft am 05.02.2016.
- Cappel, Christoph; Streicher, Wolfgang; Hauer, Martin; Lichtblau, Florian; Szuder, Thomas; Kuhn, Tilmann E.; Maurer, Christoph (2015b): "AktiFas" Fassadenintegrierte Solarthermie: Bestandsaufnahme und Entwicklung zukunftsfähiger Konzepte. Final Project Report. Fraunhofer ISE. Freiburg. Online verfügbar unter <http://publica.fraunhofer.de/dokumente/N-349495.html>.
- Deng, Yuechao; Zhao, Yaohua; Quan, Zhenhua; Zhu, Tingting (2015): Experimental Study of the Thermal Performance for the Novel Flat Plate Solar Water Heater with Micro Heat Pipe Array Absorber. In: *Energy Procedia* 70, S. 41–48. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.02.095.

- Deng, Yuechao; Zhao, Yaohua; Wang, Wei; Quan, Zhenhua; Wang, Lincheng; Yu, Dan (2013): Experimental investigation of performance for the novel flat plate solar collector with micro-channel heat pipe array (MHPA-FPC). In: *Applied Thermal Engineering* 54 (2), S. 440–449. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2013.02.001.
- Denz, Paul-Rouven (2019a): Solar Thermal Venetian Blinds. In: International Energy Agency (Hg.): State-of-the-art and SWOT analysis of building integrated solar envelope systems. Deliverables A.1 and A.2. IEA Solar Heating and Cooling Technology Collaboration Programme (IEA SHC), S. 93–95. Online verfügbar unter <https://doi.org/10.18777/ieashc-task56-2019-0001>.
- Denz, Paul-Rouven; Maurer, Christoph; Vongsingha, Puttakhun; Haeringer, Simon Frederik; Hermann, Michael; Seifarth, Hannes; Morawietz, Katharina (2018a): Solar Thermal Facade Systems – an interdisciplinary approach. In: Advanced Building Skins Conference. Advanced Building Skins Conference. Bern, Switzerland, 1.10.-2.10.2018.
- Denz, Paul-Rouven; Vongsingha, Puttakhun; Haeringer, Simon Frederik; Hermann, Michael; Maurer, Christoph; Seifarth, Hannes; Morawietz, Katharina (2019b): Façade integration variants of solar thermal systems - results from R&D project ArKol. In: Daniel Aelenei und Sara Brito-Coimbra (Hg.): FACADES19 – South Challenges and Beyond. Facades 2019 - European Façade Network Conference. Lissabon, 22.11.2019. FCT NOVA, S. 27–28.
- Denz, Paul-Rouven; Vongsingha, Puttakhun; Haeringer, Simon Frederik; Maurer, Christoph (2017): Solar thermal Venetian blinds – transparency, user comfort and solar energy in one! In: ne-xt facades. Adaptive Facade Network. Unter Mitarbeit von Philipp Lionel Molter, Moritz Mungenast, Matej Banozic, Oliver Enghardt und Tillmann Klein. ne-xt facades COST Action TU 1403 Adaptive Facade Network Mid-Term Conference. München, 7. November 2017, S. 35–36.
- Denz, Paul-Rouven; Vongsingha, Puttakhun; Haeringer, Simon Frederik; Maurer, Christoph; Hermann, Michael; Seifarth, Hannes; Morawietz, Katharina (2018b): Solar thermal energy from opaque and semi-transparent façades – current results from R&D project ArKol. In: Engineered Transparency 2018. Düsseldorf, 25.10.-26.10.2018. Berlin: Ernst & Sohn.
- DETAIL (2018): Innovationen für Solarthermie. Online verfügbar unter <https://www.detail.de/artikel/innovationen-fuer-solarthermie-32384/>, zuletzt aktualisiert am 11.08.2020, zuletzt geprüft am 11.08.2020.
- DIN CERTCO (2015): Summary of EN 12975 Test Results, annex to Solar KEYMARK Certificate. Licence number: 011-751404 F. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.dincertco.tuv.com/registrations/60072471?locale=en>, zuletzt geprüft am 12.06.2019.
- Ebert, Bernd (2018): LowEx-Bestand Analyse Abschlussbericht zu AP 1.1. Systematische Analyse von Mehrfamilien-Bestandsgebäuden. Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Karlsruhe.
- EnBauSa News: Energetisch Bauen und Sanieren (2020): Streifenkollektor und Jalousie sammeln Sonne. Nutzung solarer Wärme aus der Fassade soll architektonisch attraktiver werden. Online verfügbar unter <https://www.enbausade/solarenergie/aktuelles/artikel/streifenkollektor-und-jalousie-sammeln-sonne-5137.html>, zuletzt aktualisiert am 11.08.2020, zuletzt geprüft am 11.08.2020.
- DIN V 18599-10, 2018: Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten.
- EnergieWendeBauen (2020): Neue Kollektoren: Technik und Ästhetik in Einklang gebracht. Online verfügbar unter <https://projektinfos.energiewendebauen.de/forschung-im-dialog/neuigkeiten-aus-der-forschung/detailansicht/neue-kollektoren-technik-und-aesthetik-in-einklang-gebracht/>, zuletzt aktualisiert am 11.08.2020, zuletzt geprüft am 11.08.2020.

- Fraunhofer ISE (2017): Mit solaren Gebäudehüllen Architektur gestalten - Fraunhofer ISE. Online verfügbar unter <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2017/mit-solaren-gebaeudehuelen-architektur-gestalten.html>.
- Fraunhofer ISE (2018): Forschungsprojekt »Arkol« – Flexible Fassadenkollektoren für solare Architektur. Demonstration video on YouTube. Fraunhofer ISE. Freiburg. Online verfügbar unter <https://www.youtube.com/watch?v=6BlwtdDmkH8>, zuletzt aktualisiert am 18.06.2020, zuletzt geprüft am 18.06.2020.
- Fraunhofer ISE (2020): Projekt ArKol: Wärmepotenzial von Fassaden erschließen. Haeringer, Simon Frederik; Schneider, Karin. Online verfügbar unter <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2020/projekt-arkol-waermepotenzial-von-fassaden-erschliessen.html>, zuletzt geprüft am 10.08.2020.
- EN 673, 2011: Glas im Bauwesen - Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) - Berechnungsverfahren.
- EN 410, 2011: Glass in building - Determination of luminous and solar characteristics of glazing.
- glass technology live (2018): VISIONS - glass technology live 2018. The scientific documentation of the special show glass technology live. WOESTE DRUCK + VERLAG. Essen. Online verfügbar unter https://www.glasstec.de/de/glass_technology_live/Visions_auf_glass_technology_live.
- Gratia, Elisabeth; Herde, André de (2007): Greenhouse effect in double-skin facade. In: *Energy and Buildings* 39 (2), S. 199–211. DOI: 10.1016/j.enbuild.2006.06.004.
- Guardo, Alfredo; Egusquiza, Mònica; Egusquiza, Eduard; Alavedra, Pere (2015): Preliminary results on the assessment of using Venetian blinds as a solar thermal collector in double skin facades in Mediterranean climates. In: 10th Energy Forum on Advanced Building Skins. 10th Energy Forum on Advanced Building Skins. Bern; Switzerland, 3-4 November 2015, zuletzt geprüft am 21.11.2016.
- Haeringer, Simon Frederik (2020): Solar thermal Venetian blind as synergetic and adaptive sun protection device in double skin façades. In: International Energy Agency (Hg.): Design Guidelines. Deliverables C.3. IEA Solar Heating and Cooling Technology Collaboration Programme (IEA SHC), S. 28.
- Haeringer, Simon Frederik; Abderrahman, Ikbek; Vongsingha, Puttakhun; Camarena Covarrubias, Sofia; Amann, Ulrich; Kuhn, Tilmann E. et al. (2017a): Solar Thermal Venetian Blind - Development and Evaluation of a Switchable Thermal Coupling. In: OTTI e.V. (Hg.): 27. Symposium Thermische Solarenergie. Bad Staffelstein, Germany, 10. - 12. Mai 2017.
- Haeringer, Simon Frederik; Abderrahman, Ikbek; Vongsingha, Puttakhun; Kuhn, Tilmann E.; Denz, Paul-Rouven; Maurer, Christoph (2017b): Solar Thermal Venetian Blinds – Transparency, User Comfort and Solar Energy in one! In: Passive Low Energy Architecture (PLEA) (Hg.): Proceedings of 33rd PLEA International Conference - Design to Thrive. Unter Mitarbeit von Luisa Brotas, Susan Roaf und Fergus Nicol. Edinburgh, Scotland, 2. - 5. Juli 2017.
- Haeringer, Simon Frederik; Bueno, Bruno (2020): Solar thermal venetian blind as synergetic and adaptive sun protection device in double skin façades. In: International Energy Agency (Hg.): System Simulation Results. Deliverables C.2. IEA Solar Heating and Cooling Technology Collaboration Programme (IEA SHC), S. 79–86.
- Haeringer, Simon Frederik; Delgado, Alberto; Di Lauro, Paolo; Vongsingha, Puttakhun; Haidar, Mohamad; Panchal, Krutarth et al. (2018): Raumhohes Ganzglas-Fassadenelement mit solarthermischer Jalousie. In: Conexio GmbH (Hg.): Symposium Solarthermie. Bad Staffelstein, Germany, 13.-15. Juni 2018. Pforzheim.
- Haeringer, Simon Frederik; Denz, Paul-Rouven; Kuhn, Tilmann E.; Maurer, Christoph (2019a): Solar thermal venetian blind as synergetic and adaptive sun protection device in double skin façades - Characterization via calorimetric measurements. In: 14th Conference on Advanced Building Skins. Conference on Advanced Building Skins.

- Bern, Switzerland, 28-29 October 2019. Lucerne (Switzerland): Advanced Building Skins GmbH, S. 282–291.
- Haeringer, Simon Frederik; Denz, Paul-Rouven; Vongsingha, Puttakhun; Bueno, Bruno; Kuhn, Tilmann E.; Maurer, Christoph (accepted): Design and experimental proof-of-concept of a façade-integrated Solar Thermal Venetian Blind with heat pipes. In: *Journal of Facade Design and Engineering*.
- Haeringer, Simon Frederik; Denz, Paul-Rouven; Vongsingha, Puttakhun; Delgado, Alberto; Maurer, Christoph (2019b): Arkol – Development and Testing of Solar Thermal Venetian Blinds. In: Thomas Auer, Ulrich Knaack und Jens Schneider (Hg.): Powerskin Conference. Proceedings. München. Delft: TU Delft Open, S. 195–207. Online verfügbar unter https://books.bk.tudelft.nl/index.php/press/catalog/book/isbn_9789463661256, zuletzt geprüft am 07.02.2019.
- Hahne, E.; Gross, U. (1981): The influence of the inclination angle on the performance of a closed two-phase thermosyphon. In: *Journal of Heat Recovery Systems* 1 (4), S. 267–274. DOI: 10.1016/0198-7593(81)90037-0.
- Haidar, Mohamad (2017): Development, measurement and simulation of solar thermal venetian blinds. Master thesis. Albert-Ludwig-University, Freiburg.
- Haustec (2020): Solarthermie: Streifenkollektoren an der Hausfassade. Online verfügbar unter <https://www.haustec.de/heizung/waermeerzeugung/solarthermie-streifenkollektoren-der-hausfassade>, zuletzt aktualisiert am 10.08.2020, zuletzt geprüft am 10.08.2020.
- He, Wei; Hong, Xiaoqiang; Zhao, Xudong; Zhang, Xingxing; Shen, Jinchun; Ji, Jie (2014): Theoretical investigation of the thermal performance of a novel solar loop-heat-pipe façade-based heat pump water heating system. In: *Energ. Buildings* 77, S. 180–191. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.03.053.
- Hermann, Michael; Denz, Paul-Rouven; Haeringer, Simon Frederik; Morawietz, Katharina; Maurer, Christoph; Vongsingha, Puttakhun (2020): Fassade und Kollektor – Drei Konzepte zur Zusammenführung zweier Welten. In: Online-Symposium „Solarthermie und innovative Wärmesysteme“. 12.-14. Mai 2020. Auflage 1. Pforzheim: Conexio GmbH.
- Hermann, Michael; Morawietz, Katharina; Seifarth, Hannes (2019): ArKol – Solarthermische Architektur mit Heat-Pipe-Kollektoren. In: Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme. 21. - 23. Mai 2019. Auflage 1. Pforzheim: Conexio GmbH.
- Huang, B. J.; Huang, H. H.; Liang, T. L. (2009): System dynamics model and startup behavior of loop heat pipe. In: *Applied Thermal Engineering* 29 (14-15), S. 2999–3005. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2009.03.015.
- IEA (2020): Solar thermal venetian blinds: Energy-efficient, attractive, transparent. Part of Today in the Lab - Tomorrow in Energy? In: Today in the Lab – Tomorrow in Energy? IEA. Paris. Online verfügbar unter <https://www.iea.org/articles/solar-thermal-venetian-blinds-energy-efficient-attractive-transparent>.
- ISO 9050:2003-08, 01.08.2003: ISO 9050.
- Jack, Steffen (2016): Betrachtungen zum Nutzwärmestrompfad von solarthermischen Kollektoren mit Wärmerohren. Dissertation. Aachen: Shaker Verlag (Berichte aus der Energietechnik).
- Jack, Steffen; Rockendorf, Gunter (2013): Wärmerohre in Sonnenkollektoren - Wärmetechnische Grundlagen und Bewertung sowie neue Ansätze für die Integration. Abschlussbericht zum Vorhaben ; Kurzbezeichnung: HP-Opt ; Laufzeit: 01.06.2010 - 31.05.2013. Unter Mitarbeit von TIB - Technische Informationsbibliothek Universitätsbibliothek Hannover und Technische Informationsbibliothek.
- Jouhara, Hussam; Ajji, Zaki; Koudsi, Yahia; Ezzuddin, Hatem; Mousa, Nisreen (2013): Experimental investigation of an inclined-condenser wickless heat pipe charged with water and an ethanol–water azeotropic mixture. In: *Energy* 61, S. 139–147. DOI: 10.1016/j.energy.2012.09.033.

- Kaddar, Driss (2017): Objektorientierte Modellierung von Wärmerohren für die solarthermische Anwendung. Bachelorarbeit. Hochschule RheinMain, Wiesbaden.
- Khairnasov, S. M.; Zaripov, V. K.; Passamakin, B. M.; Kozak, D. V. (2013): The study of the heat-engineering characteristics of a solar heat collector based on aluminum heat pipes. In: *Appl. Sol. Energy* 49 (4), S. 225–231. DOI: 10.3103/S0003701X13040051.
- Klems, J. H. (1994): A New Method for Predicting the Solar Heat Gain of Complex Fenestration Systems I. Overview and Derivation of the Matrix Layer Calculation. In: *ASHRAE Transactions* 100, Part 1.
- Kuhn, Tilmann E. (2014): Calorimetric determination of the solar heat gain coefficient g with steady-state laboratory measurements. In: *Energ. Buildings* 84, S. 388–402. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.08.021.
- Kuhn, Tilmann E. (2017): State of the art of advanced solar control devices for buildings. In: *Solar Energy*. DOI: 10.1016/j.solener.2016.12.044.
- Kuhn, Tilmann E.; Hermann, Michael (2019): Solare Gebäudehüllen: Bauwerksintegrierte Photovoltaik und Solarthermie. In: *FASSADE* (3), S. 28–30.
- Kuhn, Tilmann E.; Hermann, Michael; Maurer, Christoph (2019): Solaren Gebäudehüllen den Weg in den Massenmarkt ebnen. In: *nachhaltige technologien*, S. 14–16.
- Lämmle, Manuel (2018): Thermal management of PVT collectors : development and modelling of highly efficient glazed, flat plate PVT collectors with low emissivity coatings and overheating protection. PhD Thesis. Albert-Ludwig-University, Freiburg.
- Lämmle, Manuel; Kroyer, Thomas; Fortuin, Stefan; Wiese, Martin; Hermann, Michael (2016): Development and modelling of highly-efficient PVT collectors with low-emissivity coatings. In: *Sol Energy* 130, S. 161–173. DOI: 10.1016/j.solener.2016.02.007.
- Liu, Huimin; Wang, Wei; Zhao, Yaohua; Deng, Yuechao (2015): Field Study of the Performance for a Solar Water Heating System with MHPA-FPCs. In: *Energy Procedia* 70, S. 79–86. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.02.101.
- Lutz, Martin (2012): Die Closed-Cavity-Fassade. In: *Stahlbau* 81 (S1), S. 268–278. DOI: 10.1002/stab.201290070.
- Maurer, Christoph (2012): Theoretical and experimental analysis and optimization of semi-transparent solar thermal façade collectors. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Freiburg. Fakultät für Architektur. Online verfügbar unter <http://publica.fraunhofer.de/documents/N-203747.html>.
- Maurer, Christoph (2018a): Innovative Solarkollektoren. In: *Deutsches Architektenblatt*. Online verfügbar unter <https://www.dabonline.de/2018/05/30/innovative-solarkollektoren-photovoltaik-entwicklung/>, zuletzt geprüft am 11.08.2020.
- Maurer, Christoph (2018b): Mehr Praxisnähe mit Heat-Pipes. Solarthermische Fassaden liefern Energie. In: *Industrieanzeiger* 140 (02), S. 54–55.
- Maurer, Christoph (2019a): Report on confidential feedback workshops as a method to foster innovation.
- Maurer, Christoph; Amann, Ulrich; Di Lauro, Paolo; Hanek, Johannes; Fahr, Sven; Kramer, Korbinian; Kuhn, Tilmann E. (2015a): "GWert-Tracker": Neues Verfahren zur Outdoor-Charakterisierung von Fassadenkollektoren und BIPV. Schlussbericht. Hg. v. Fraunhofer ISE. Freiburg. Online verfügbar unter <http://publica.fraunhofer.de/dokumente/N-366874.html>.
- Maurer, Christoph; Cappel, Christoph; Kuhn, Tilmann E. (2015b): Methodology and first results of an R&D road map for façade-integrated solar thermal systems. In: *Energy Procedia* 70, S. 704–708. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.02.179.
- Maurer, Christoph; Gasnier, D.; Pflug, T.; Plešec, P.; Hafner, J.; Jordan, S.; Kuhn, Tilmann E. (2014): First Measurement Results of a Pilot Building with Transparent Façade Collectors. In: *Energy Procedia* 48, S. 1385–1392. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.02.156.

- Maurer, Christoph; Hermann, Michael (2017): Solarthermische Gebäudehüllen - neue Konzepte für die Architektur. In: *Xia* 50, S. 95. Online verfügbar unter <http://publica.fraunhofer.de/documents/N-477421.html>.
- Maurer, Christoph; Hubschneider, Carolin; Taveres-Cachat, Ellika; Hollick, John; Lemarchand, Philippe; Garay, Roberto et al. (2018c): Report on Barriers for New Solar Envelope Systems.
- Maurer, Christoph; Taveres-Cachat, Ellika Ellika; Loonen, Roel C.G.M.; Eisenlohr, Johannes; Goia, Francesco (2019b): Report on Simulation Models of Solar Envelope Components.
- Morawietz, Katharina (2020): Experimentelle Analyse von horizontalen und leicht geneigten Zwei-Phasen-Thermosiphons für die solarthermische Fassadenintegration. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt.
- Morawietz, Katharina; Hermann, Michael; Schaffeld, Georg (2017): Wärmerohre für flexibel ausrichtbare solarthermische Kollektoren – Stand der Technik und neue Ansätze. In: OTTI e.V. (Hg.): 27. Symposium Thermische Solarenergie. Bad Staffelstein, Germany, 10. - 12. Mai 2017.
- Morawietz, Katharina; Paul, Theresa; Schnabel, Lena (2018): Experimental investigation of horizontal and slightly inclined closed two-phase thermosyphons and heat pipes for solar façade integration. In: Joint 19th International Heat Pipe Conference and the 13th International Heat Pipe Symposium. Joint 19th International Heat Pipe Conference and the 13th International Heat Pipe Symposium, 10.-14. June 2018. Pisa.
- Morawietz, Katharina; Röschl, Tobias; Halim, Ikhwan A. B. Abdul; Paul, Theresa; Hermann, Michael (2016): Effects of Measurement Conditions on Operating Limits of Solar Horizontal Heat Pipes. In: *Energy Procedia* 91, S. 366–375. DOI: 10.1016/j.egypro.2016.06.284.
- Munari Probst, Maria Cristina; Roecker, Christian (2013): Report T.41.A.2 Solar Energy Systems in Architecture - integration criteria and guidelines. IEA SHC Task 41 Solar energy and Architecture. Hg. v. IEA SHC Task 41. IEA SHC, zuletzt geprüft am 15.07.2016.
- Negishi, Kanji; Sawada, Teruo (1983): Heat transfer performance of an inclined two-phase closed thermosyphon. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 26 (8), S. 1207–1213. DOI: 10.1016/S0017-9310(83)80175-6.
- Nguyen-Chi, H.; Groll, M. (1981): Entrainment or flooding limit in a closed two-phase thermosyphon. In: *Journal of Heat Recovery Systems* 1 (4), S. 275–286. DOI: 10.1016/0198-7593(81)90038-2.
- Nungesser, Sören (2018): Design and validation of a mechanical test sample for a novel pressing mechanism of a solar thermal venetian blind. Bachelor thesis. Westfälische Hochschule, Bocholt.
- Perez, R.; Seals, R.; Michalsky, J. (1993): All-weather model for sky luminance distribution—Preliminary configuration and validation. In: *Solar Energy* 50 (3), S. 235–245. DOI: 10.1016/0038-092X(93)90017-1.
- Rassamakin, Boris; Khairnasov, Sergii; Musiy, Rostyslav; Alforova, Olga; Rassamakin, Andrii (2013a): Solar Collector Based on Heat Pipes for Building Façades. In: Anne Hakansson, Mattias Höjer, Robert J. Howlett und Lakhmi C. Jain (Hg.): Sustainability in Energy and Buildings, Bd. 22. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Smart Innovation, Systems and Technologies), S. 119–126.
- Rassamakin, Boris; Khairnasov, Sergii; Zaripov, Vladilen; Rassamakin, Andrii; Alforova, Olga (2013b): Aluminum heat pipes applied in solar collectors. In: *Solar Energy* 94, S. 145–154. DOI: 10.1016/j.solener.2013.04.031.
- Reay, D. A.; Kew, P. A.; McGlen, Ryan; Dunn, P. D. (2014): Heat pipes. Theory, design, and applications. Sixth edition: Amsterdam [u.a.] : Elsevier, 2014. - XXVII, 251 S. Online verfügbar unter <http://gateway-bayern.de/BV041440771>.

- Robin, Jean-Marc (2002): Fixed or mobile device of closure for openings in buildings, capable of capturing solar energy. Angemeldet durch Jean-Marc Robin am 28.06.2002. Anmeldenr: EP20030360078. Veröffentlichungsnr: EP1376026B1. Prioritätsdaten: 28.06.2002.
- Rohsenow, Warren M.; Hartnett, James P.; Cho, Young I. (1998): Handbook of Heat Transfer // Handbook of heat transfer. 3rd edition // 3rd ed. Chicago, Ill.: McGraw-Hill Education LLC (McGraw-Hill handbooks).
- Rudolf, Bernhard (2015): Closed Cavity Fassaden und D3-Fassaden: Geschlossene zwei- und dreischalige Fassaden für nachhaltige Gebäude. In: *Bauphysik* 37 (4), S. 244–249. DOI: 10.1002/bapi.201590034.
- Schaffeld, Georg (2017): Bewertung verschiedener Messmethoden zur Bestimmung der Inertgasentwicklung in einer Aluminium Heat-Pipe unter Verwendung von Aceton und Wasser als Arbeitsfluid. Bachelorarbeit. TH Köln, Köln.
- Schiebler, Bert; Giovannetti, Federico; Schaffrath, Wilfried; Jack, Steffen (2018): Kostengünstige und zuverlässige Solarsysteme durch neuartige Wärmerohr-Kollektoren. Abschlussbericht zum Vorhaben. Kurztitel: HP-Koll, Laufzeit: 01.09.2014-31.03.2018. Institut für Solarenergieforschung Hameln (ISFH). Emmerthal. Online verfügbar unter <https://www.tib.eu/de/suchen/id/TIBKAT%3A1048288684/Kosteng%C3%BCns-tige-und-zuverl%C3%A4ssige-Solarsysteme-durch/>.
- Shah, Ramesh K.; Sekulic, Dusan P. (2003): Fundamentals of Heat Exchanger Design. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Shen, Chong; Li, Xianting (2016): Solar heat gain reduction of double glazing window with cooling pipes embedded in venetian blinds by utilizing natural cooling. In: *Energy and Buildings* 112, S. 173–183. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.11.073.
- ISO 9806, 2017: Solar energy - Solar thermal collectors - Test methods (ISO 9806:2017). Online verfügbar unter <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-9806/274619229>, zuletzt geprüft am 18.10.2019.
- Sterchele, P.; Brandes, J.; Heilig, J.; Wrede, D.; Kost, C.; Schlegl, T. et al.: Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem. Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen. Freiburg. Online verfügbar unter <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/wege-zu-einem-klimaneutralen-energiesystem.html>.
- ISO 19467, 2017-04: Thermal performance of windows and doors - Determination of solar heat gain coefficient using solar simulator.
- Tsoi, Vadim; Chang, Shyy Woei; Chiang, Kuei Feng; Huang, Chuan Chin (2011): Thermal performance of plate-type loop thermosyphon at sub-atmospheric pressures. In: *Applied Thermal Engineering* 31 (14-15), S. 2556–2567. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2011.04.021.
- VDI – Verein Deutscher Ingenieure (Hg.) (2013): VDI-Wärmeatlas. 11., bearb. und erw. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer (VDI-Buch).
- Velasco, Abel; Jiménez García, Sergi; Guardo, Alfredo; Fontanals, Alfred; Egusquiza, Mónica (2017): Assessment of the Use of Venetian Blinds as Solar Thermal Collectors in Double Skin Facades in Mediterranean Climates. In: *Energies* 10 (11), S. 1825. DOI: 10.3390/en10111825.
- Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co. KG (2020): „ArKol“ bringt die Energiewände. In: *Bauen im Bestand*. Online verfügbar unter <https://www.bauenimbestand24.de/arkol-bringt-die-energiewaende/150/74811/>, zuletzt geprüft am 10.08.2020.
- Viessmann Werke GmbH & Co. KG (2019): Data sheet: Vitosol 200-TM Typ SPEA. Online verfügbar unter https://www.viessmann.de/content/dam/vi-brands/DE/Produkte/Solarsysteme/Vitosol-200-TM/DB-5624904_Vitosol_200-TM.pdf/_jcr_content/renditions/original.media_file.download_attachment.file/DB-5624904_Vitosol_200-TM.pdf, zuletzt geprüft am 12.06.2019.

- Volz, Bettina (2006): Glasprofile in der Fassade - Entwicklung einer solar optimierten Systemfassade. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart.
- Wang, Chunjing; Feng, Weijie; Jiao, Qingtai; Li, Shai; Cai, Dejun (2015): Experimental Research of Heat Transfer Capacity of.
- Wang, Z.; Duan, Z.; Zhao, X.; Chen, M. (2012): Dynamic performance of a façade-based solar loop heat pipe water heating system. In: *Solar Energy* 86 (5), S. 1632–1647. DOI: 10.1016/j.solener.2012.02.031.
- Wang, Zhangyuan (2011): Investigation of a Novel Facade-Based Solar Loop Heat Pipe Water Heating System. Dissertation. University of Nottingham, Nottingham.
- Wang, Zhangyuan; Yang, Wansheng (2014): A review on loop heat pipe for use in solar water heating. In: *Energy and Buildings* 79, S. 143–154. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.04.051.
- Wang, Zhangyuan; Zhao, Xudong (2011): Analytical study of the heat transfer limits of a novel loop heat pipe system. In: *Int. J. Energy Res.* 35 (5), S. 404–414. DOI: 10.1002/er.1697.
- Wang, Zhang-Yuan; Zhang, Xiang-Mei; Yang, Wan-Sheng; Chen, Zhi-wu (2013): Experimental Research on a Novel Solar Water Heating System by Using Loop Heat Pipe. In: ICEEP, International Conference on Energy and Environmental Protection, 2013, 724–725. Zürich: Trans Tech Publications (Advanced Materials Research), S. 163–170. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.724-725.163>.
- Ward, G.; Mistrick, R.; Lee, E. S.; McNeil, A.; Jonsson, J. (2011): Simulating the Daylight Performance of Complex Fenestration Systems Using Bidirectional Scattering Distribution Functions within Radiance. In: *LEUKOS* 7 (4), S. 241–261. DOI: 10.1080/15502724.2011.10732150.
- Wolf, Tina; Molter, Philipp (2012): Solar Thermally Activated Building Envelopes. In: Oliver Englhardt (Hg.): advanced building skins. International Conference on Building Envelope Design and Technology. advanced building skins. Graz, 14.06.2012. Technical University of Graz. Graz: Technical University of Graz Publishing, S. 206–214.
- Zhang, Xingxing; Shen, Jingchun; Xu, Peng; Zhao, Xudong; Xu, Ying (2014): Socio-economic performance of a novel solar photovoltaic/loop-heat-pipe heat pump water heating system in three different climatic regions. In: *Applied Energy* 135, S. 20–34. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.08.074.
- Zhang, Xingxing; Zhao, Xudong; Xu, Jihuan; Yu, Xiaotong (2013): Characterization of a solar photovoltaic/loop-heat-pipe heat pump water heating system. In: *Applied Energy* 102, S. 1229–1245. DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.06.039.
- Zhao, Xudong; Wang, Zhangyuan; Tang, Qi (2010): Theoretical investigation of the performance of a novel loop heat pipe solar water heating system for use in Beijing, China. In: *Applied Thermal Engineering* 30 (16), S. 2526–2536. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2010.07.002.
- Zhu, Ting-ting; Diao, Yan-hua; Zhao, Yao-hua; Deng, Yue-chao (2015a): Experimental study on the thermal performance and pressure drop of a solar air collector based on flat micro-heat pipe arrays. In: *Energy Conversion and Management* 94, S. 447–457. DOI: 10.1016/j.enconman.2015.01.052.
- Zhu, Ting-ting; Zhao, Yao-hua; Diao, Yan-hua; Li, Feng-fei; Deng, Yue-chao (2015b): Experimental Investigation on the Performance of a Novel Solar air Heater Based on Flat Micro-heat Pipe Arrays (FMHPA). In: *Energy Procedia* 70, S. 146–154. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.02.110.
- Zimmer, Peter (2020a): Solarthermie und Verputz ergänzen sich. In: *Applica - Sonderausgabe 2020: Dämmung, Putz und Farbe an der Fassade*. Online verfügbar unter https://www.applica.ch/Solarthermie_Fassade, zuletzt geprüft am 10.08.2020.

- Zimmer, Peter (2020b): Wenn Häuserfassaden Wärme erzeugen. In: *Bau – Das bundesweite Baumagazin* (4). Online verfügbar unter http://www.knaak-verlag.de/KNAAK_SITE/KNAAK-Material/BAU-Ausgaben%2016/BAU%2004-2020.pdf.
- Zimmer, Peter (2020c): Wenn Häuserfassaden Wärme erzeugen. In: *Bauphysik* 42 (4), S. 153–207.
- Zimmer, Peter (2020d): Wenn Häuserfassaden Wärme erzeugen - "ArKol" bringt die "Energiewände". In: *Innovative Fassadentechnik* (1). Online verfügbar unter <https://www.ernst-und-sohn.de/sonderhefte/innovative-fassadentechnik-i2020>.

5 Anlagen

.....
Anlagen
.....

- Falk, Roland; Wieland, Tilo; Schweizer, Frank (2020): „Praxisbericht vom Kompetenzzentrum für Ausbau und Fassade für architektonisch integrierte Fassadenkollektoren im Projekt ArKol“. Kompetenzzentrum für Ausbau und Fassade.
- Pellkofer, Johannes (2020): „Architektonische Integration von Fassadenkollektoren mit Heat-Pipes im Projekt ArKol (Streifenkollektor)“. IBK2 - Lehrstuhl IBK2 - Baukonstruktion, Bautechnologie und Entwerfen der Universität Stuttgart.
- Beucker, Severin; Morawietz, Katharina; Maurer, Christoph; Denz, Paul-Rouven (2017): „Erfassung von Anwendungsszenarien für Fassadenkollektoren im Projekt ArKol“. Borderstep Institut.
- Beucker, Severin (2018): „Entwicklung von Geschäftsmodellen für Fassadenkollektoren im Projekt ArKol“. Borderstep Institut.
- Beucker, Severin (2020): „Auswertung von Produkt- und Vermarktungsoptionen für architektonisch integrierte Fassadenkollektoren im Projekt ArKol“. Borderstep Institut.



Kompetenzzentrum im
**BRANCHENZENTRUM
AUSBAU UND FASSADE**

Praxisbericht vom Kompetenzzentrum für Ausbau und Fassade für architektonisch integrierte Fassadenkollektoren im Projekt ArKol

Autoren:

Dr. Roland Falk
Leiter Forschung und Entwicklung

Tilo Wieland
Fachleitung Seminar

Frank Schweizer
Leiter Ausbildungszentrum

Inhaltsangabe

1 Aufgabenstellung

2 Ausgangslage

3 Ausführung

4 Auswertung

1 Aufgabenstellung

Teilflächige Integration eines solarthermischen Kollektors flächenbündig in eine zu däm-mende Bestandsfassadenfläche mit Verputz.

Die Anforderungen vom Markt zeigen, dass auch technische Einbauten architektonisch zum Gesamtbild der Fassade passen müssen. Diese Anforderungen werden über den hier im System getesteten architektonisch herausragenden Kollektors voll bedient.

2 Ausgangslage

Die Bestandsfassadenfläche weist starke Unebenheiten und witterungsbedingte Abnützung auf.

Beleuchtet wurden im Vorfeld WDVS welche als derzeitiger „Standard“ im Wohnbereichs- sektor verwendet werden und VHF-Systeme, welche eher bei großflächigen Bauten ver- wendet werden.

Die Vorteile der WDVS sind:

- der günstige Kostenfaktor
- sie sind vielfach erprobt

Der größte Nachteil ist:

- die aufwändige Integration von technischen Einbauten mit flächenbündigen Oberflä- chen, welche oft Beeinträchtigungen der Dämmleistung und eine thermische Belastung in diesen Bereichen darstellen.

Die Vorteile der VHF-Systeme sind:

- bauphysikalisch optimiert, wie Feuchtigkeitsbelastung, Schallschutz, Brandschutz
- räumliche Fassaden möglich
- Integration von Installationen einfacher möglich
- Ausgleich von Unebenheiten möglich
- Materialvielfalt der Oberfläche (Glas, Metall, Holz, PV, Solarthermie, etc.)
- Nachhaltig durch gute Rückbaubarkeit und Trennung der Komponenten
- höhere Wertigkeit

Der Nachteil von VHF-Systemen ist:

- der Preis

Zur Ausführung ist eine VHF gekommen.

3 Ausführung

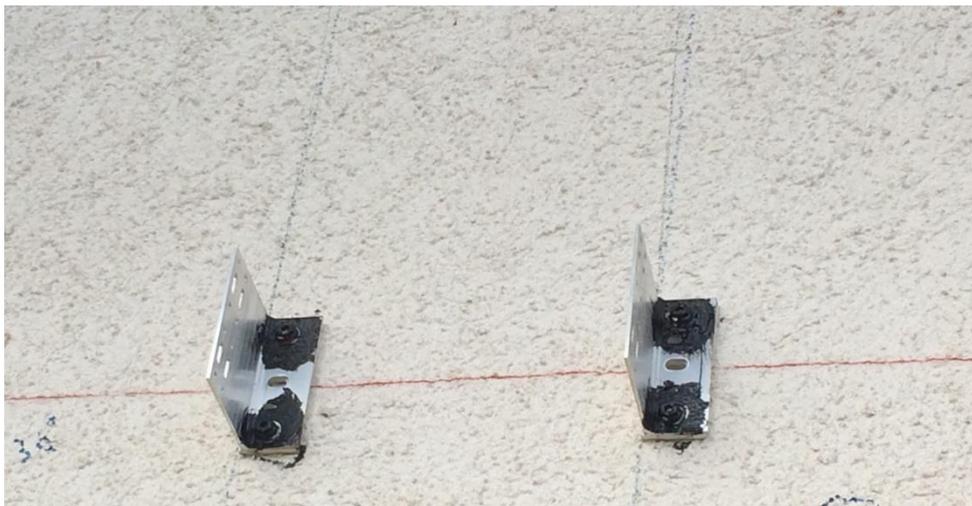
Die Technik der vorgehängten Fassade wird schon etwa 60 Jahre ausgeführt. Es gibt somit genug Erfahrung im Umgang mit dieser Technik. Allerdings sind diese Betriebe eher im Metallbau und im Großfassadenbau ansässig. Im Zuge der heutigen Anforderung geht es vermehrt auch in Richtung Kleinflächen (wie hier im Projekt eine Fassadenseite).

Grundsätzlich ist die Montage einer VHF im Bereich Trockenbau zu sehen. Die Ausnahme bilden hier verputzte Oberflächen, welche in den Bereich Stuckateur und Maler fallen.

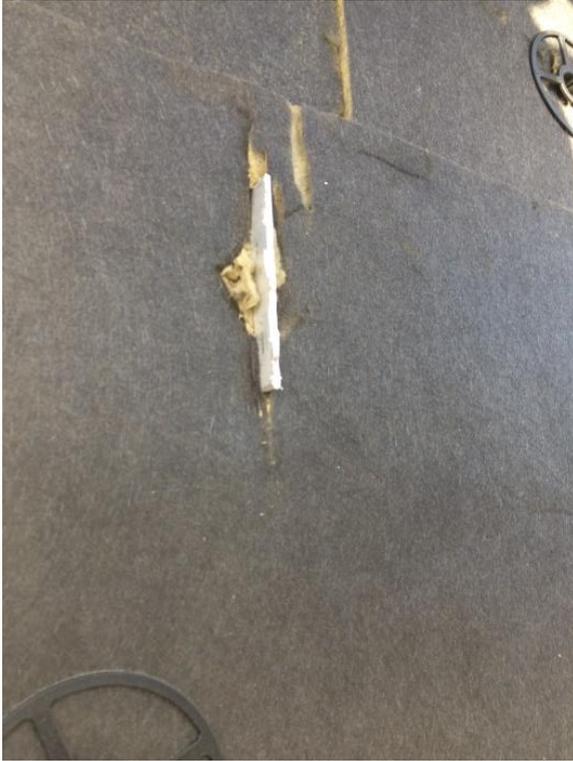
Eine VHF wird als Einzelausführung für jedes Objekt individuell geplant. Deshalb wird bei der Montage einer VHF, im Gegensatz zum Trockenbau, nach jedem Teilschritt die ausgeführte Arbeit geprüft und/oder abgenommen (Stand sicherheitsnachweis).

Das Gelingen einer Montage ist von der Genauigkeit der Ausführung abhängig. Deshalb ist es wichtig, dass die entsprechenden Arbeiter gründlich geschult werden (wie auf dem Bau bewährt „was ich gesehen habe verstehe ich besser“). Dazu eignen sich Anschauungsmodelle mit allen Details auf kleinem Raum und entsprechende Übungsmodelle.

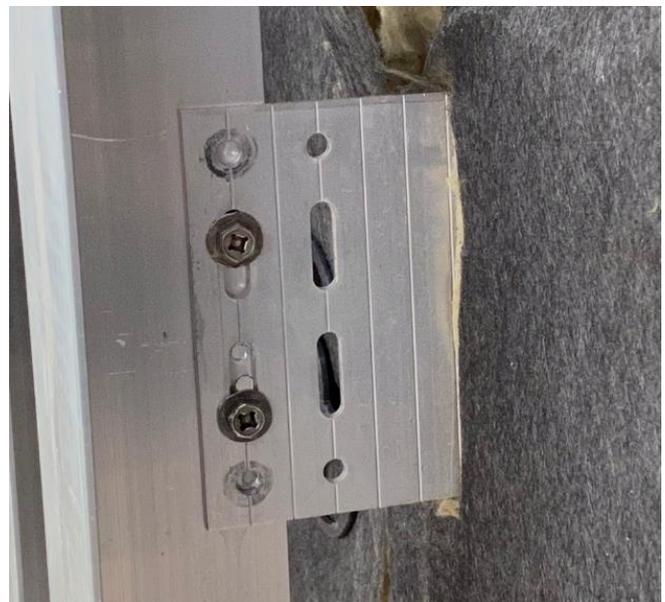
Zur Montage:



anzeichnen und montieren der Haltewinkel (hier wichtig der Dübelauszugstest und der Korrosionsschutz der Befestigung)



montierte Dämmung mit Haltewinkel



Wichtig ist bei der Montage der Tragschienen zu beachten, dass die Länge der Tragschienen ca. 3 Meter nicht überschreiten dürfen, wegen der Längenausdehnung der Profile. Ein Haltewinkel je Tragschiene wird als Festwinkel ausgelegt, die restlichen als Gleitlager, hierzu werden die Schrauben in die Langlöcher befestigt, so dass Sie sich bei Längenänderungen durch Temperatur verschieben können.



Montageschiene ausgerichtet mit seitlichem und unterem Abschluss
Abnahme der Konstruktion vor der Montage der Oberfläche



Montage der Sammler an Rohrschellen, welche an der Bestandswand befestigt sind,
anschließend Anschluss und Dichtigkeitsprüfung über den Heizungsbauer



montiertes Aufnahmeprofil
des Agraffensystems



Montiertes Solarelement
auf Agraffensystem



montierte Solarelemente und Platten
(teilweise mit Armierungsputz mit
Gewebeeinlage überzogen), mit Eck-
ausbildung und Anschluss an die
bestehende Holzverschalung



Montierte Dekor- und Solarelemente auf Agraffensystem



Aufbringen der Armierungsschicht mit Gewebeeinlage auf der Fläche



Fertig beschichtete Flächen und Dekorelemente ohne Farbgebung



Fassade komplett mit Farbgebung

4 Auswertung

Es ist sehr wichtig, dass diese Art von VHF als Einzelanfertigung anzusehen ist. Da jede Fassade somit einzigartig ist, müssen alle möglichen Details, wie Fenster-, Öffnungs-, Eckanschlüsse, usw., im Vorfeld planerisch erfasst und ausgestaltet werden. Die Messung der Ebenheit und der Maße der Bestandsfläche sind in diesem Fall also durch den Planer zu leisten. Aus allen Gegebenheiten wird eine VHF erarbeitet, welche mit einem Einzelnachweis nach Systemprüfzeugnissen zertifiziert wird.

Die Montage einer VHF Konstruktion kann von einem ausgebildeten Fachhandwerker aus dem Stuckateurhandwerk nach einer entsprechenden Einweisung gewährleistungssicher umgesetzt werden.

Bei der Montage sind jedoch einige Punkte zu beachten, damit die Montage reibungslos verläuft und keine Montageschäden entstehen.

Folgende Punkte sind bei einer fachgerechten Montage zu erfüllen:

- Genaues einmessen und befestigen der Montagewinkel (Halte- und Gleitpunkte) mit Kontrolle des Korrosionsschutzes und die geforderte Menge an Dübelauszugstests mit Eintragung im Plan (Abnahme)
- Halte- und Gleitpunkte an der Montageschiene richtig montieren, um die Bewegung der Montageschiene gewährleisten zu können (Abnahme)
- Alle für die Anschlüsse an Öffnungen und Abschlüsse (Sockel und Seiten) notwendigen Profile rechtzeitig anbringen
- Eventuelle Lüftungsbegrenzungsbleche an entsprechender Stelle einbauen
- Bei der Montage der Platten auf Schraubentyp, -abstände und Fugengröße achten (Fugen nicht zu groß, zwecks Stabilität)
- Die Dicke der Armierungsschicht einhalten (Rissgefahr)

Bei der Montage der Solarelemente zeigte sich, dass kleinere Nachjustierungen in der Befestigung der Solarelemente auf den Sammlern nötig waren, welche sich aber zügig anpassen ließen. (Sammler beweglich statt fest montiert zum einfacheren Anschließen der Solarelemente)

Die breite des Flansches zur Befestigung des Solarkollektors am Sammelkanal ist zu schmal. Für künftige Entwicklungen sollte die Befestigung überdacht werden. Verbreiterung des Flansches oder alternative Befestigung, um möglichst die Kollektoren mit schmaler Schattenfuge zu montieren.

Die handwerklichen Arbeiten zur Montage einer VHF können vom qualifizierten Fachhandwerk nach einer Schulung und Einführung fachgerecht montiert werden. Es sollten die ausführenden Arbeiter/Chefs (auch anderer Gewerke wie Heizungsbauer und Elektriker) über die Montagerichtlinien unterwiesen werden, damit Fehler/Beschädigungen in der Montage vermieden werden und die hochwertige Technik am Markt eingeführt werden kann. Unsachgemäße Montage mit „learning by doing“ können sehr große Kosten verursachen (Teiltrückbauten/Reparatur von Beschädigungen).

Die Schulungen sollten im geschützten Rahmen und nicht auf der Baustelle erfolgen, damit sich die Facharbeiter an die notwendigen Arbeitsschritte und Montagekniffe herantasten können. Praktische Übungen und die Arbeit mit Übungsmodellen fördern das Montageverständnis und die schadensfreie spätere Montage auf der Baustelle.

Die notwendige Schulung sollte folgende Ausbildungsinhalte vermitteln:

- die Konstruktion selbst, wie Bestandteile, Abmessungen, Plan lesen, Prüfungen/Abnahmen, Materialmöglichkeiten und Auswirkungen, etc.
- Schnittstelle zu angrenzenden Gewerken und Übergaben
- die Befestigung an verschiedenen Untergründen mit den entsprechenden Techniken und Materialien
- die Details, wie Anschlüsse an verschiedene Materialien und Konstruktionen, Sockelabschlüsse, etc.

Fazit

Die Vorgehängte Hinterlüftete Fassade VHF ist für den Handwerker nach entsprechenden Schulungen sehr geeignet. Auch eine Kombination der Ausführungen mit dem Wechsel von VHF und Wärmedämmverbundsystem WDVS kann an einem Gebäude sinnvoll sein. Nur dort wo die Kollektoren auch verbaut werden, ist die Fassade zwingend mit VHF Konstruktion auszubilden. Angrenzende Flächen ob horizontal oder vertikal können als WDVS ausgeführt werden. Wichtig ist bei einer Teilflächenbelegung die Übergänge der unterschiedlichen Konstruktionen zu anschließen, dass es nicht zu einem Feuchteintrag kommt.

Anhang:

Vortagsfolien zur Bewertung der Praxistauglichkeit für das Handwerk

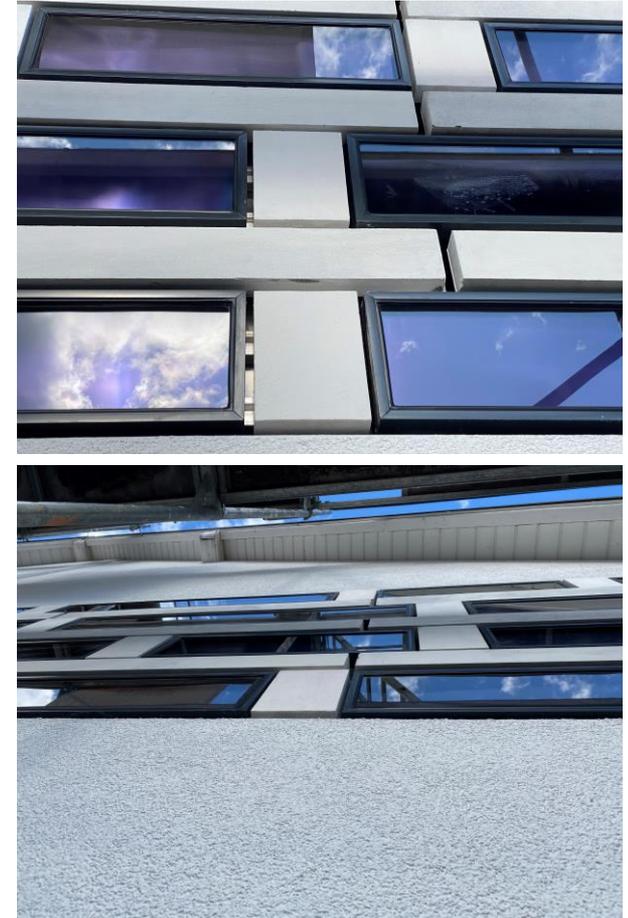
Bewertung der Praxistauglichkeit für das Handwerk



Dr. Roland Falk

Leiter Innovation und Entwicklung am
Kompetenzzentrum für Ausbau und Fassade

- Integration in eine VHF
 - Kombinationsfassade
 - WDVS
 - Montage einer VHF
- Planung
 - Berechnung
 - Vermessung der Fassade
 - Ablaufplanung
 - Fertige Oberfläche
- Montageablauf
 - Unterkonstruktion
 - Wärmedämmung
 - Sammelkanäle
 - Hydraulische Anbindung der Sammelkanäle
 - Montage der Kollektoren
 - Putzträgerplatten
 - Armierungs- und Oberputz



Integration in eine VHF

Vorgehängte hinterlüftete Fassade

- Unterkonstruktion
 - Möglichst Wärmebrückenarm
 - Fixpunkte / Gleitpunkte
 - Fassade braucht eine Statik / Berechnung notwendig
- Dämmung
 - Mineralisch – nicht brennbar
 - Rein mechanische Fixierung
 - Gute Rückbaubarkeit
 - Diffusionsoffen

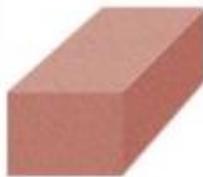


Statik für die Befestigung wird benötigt

- Die Tragfähigkeit des Wandgrundes ist durch Dübelauszugssversuche nachzuweisen
- Wahl des Dübels für Objektstatik verantwortlich
- Je nach Untergrund abgestimmte Dübeltechnik



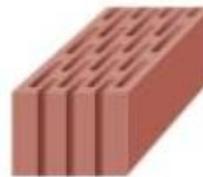
Beton



Vollziegel



Kalksandvollstein

Hautwerksporiger
Leichtbeton

Lochziegel

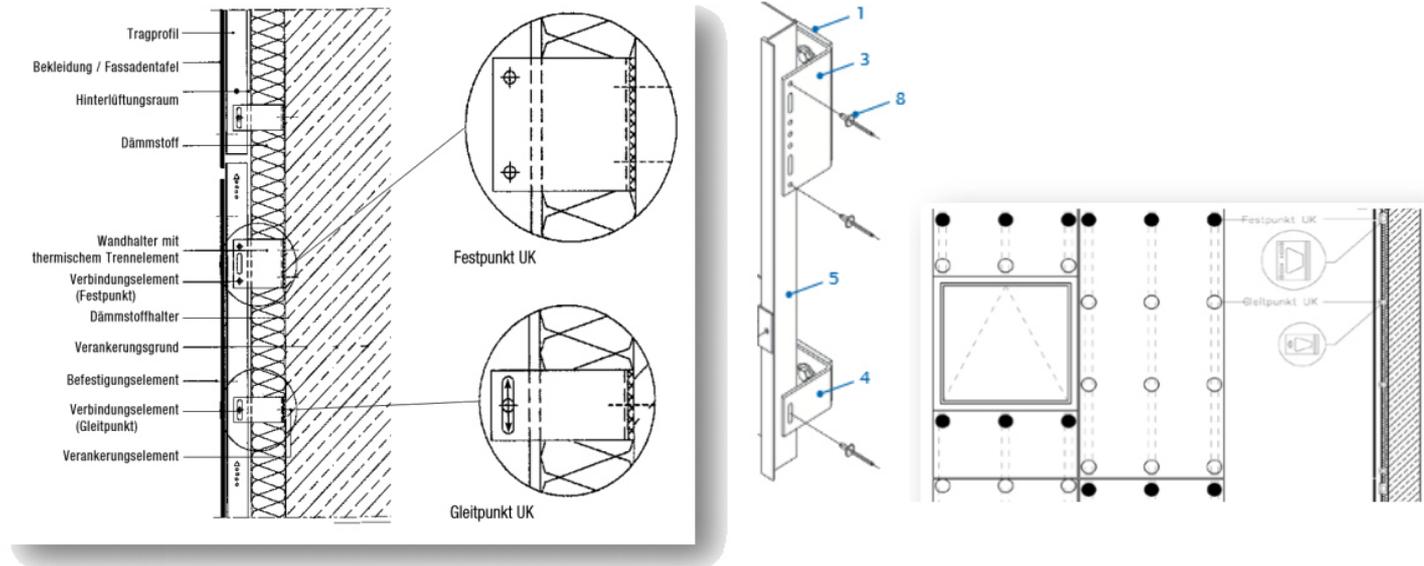


Kalksandlochstein

Hohblockstein
(Leichtbeton)

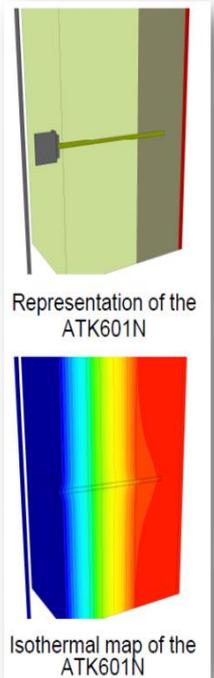
Statik und Verlegeplan

- Festlegen der Fest- und Gleitwinkel



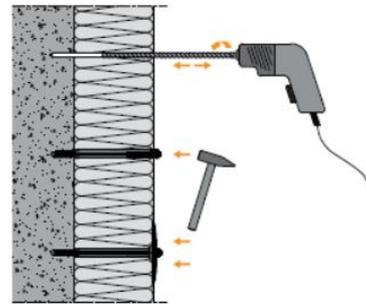
Wärmebrücke

- Je nach Anforderung unterschiedliche Befestigungsarten möglich
- Unterkonstruktion stellt eine Wärmebrücke dar
- Passivhaus Zulassung erreicht

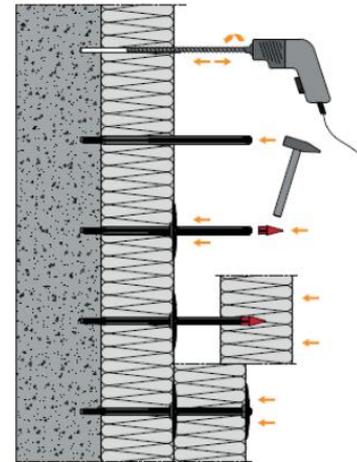


Befestigung der Dämmplatten

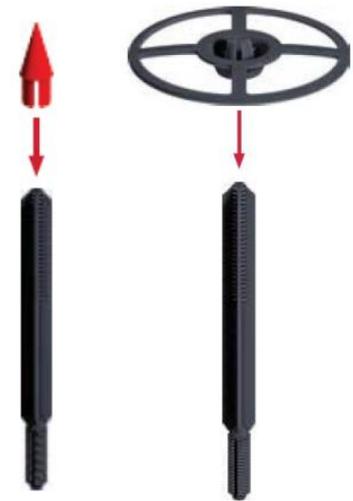
- Rein mechanische Befestigung der Dämmplatte
- Je nach Dämmanforderung auch zweilagig möglich



Wandmontage
Einlagige Dämmung

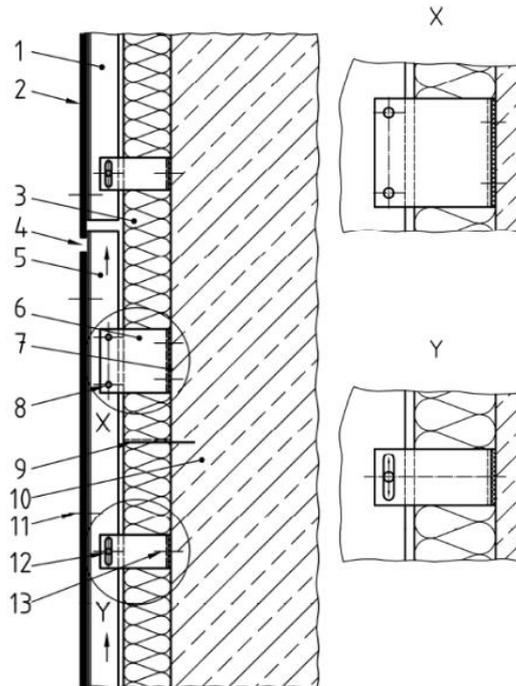


Wandmontage
Zweilagige Dämmung
mit Montagespitze



Hinterlüftung

Auszug aus der DIN 18516-1



4.2 Bauphysikalische Anforderungen

4.2.1 Beim Wärme-, Feuchte-, Schall- und Brandschutz ist das Zusammenwirken der Außenwand mit der Außenwandbekleidung zu berücksichtigen.

Wärmebrücken durch Verankerungen sind zu berücksichtigen. Die Energieverluste durch Wärmebrückenwirkung der Verankerungen sind bei der Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert/Energiebilanz) zu berücksichtigen; siehe „Richtlinie Wärmebrücken bei vorgehängten hinterlüfteten Fassaden“.

4.2.2 Zur Reduzierung von Baufeuchte, zur Ableitung von eventuell durch die offenen Fugen eindringendem Niederschlag, zur Trennung der Bekleidungen von der Dämmstoffschicht bzw. der Wandoberfläche und zur Ableitung von Tauwasser an der Innenseite der Bekleidung ist eine Hinterlüftung erforderlich.

Diese Anforderung wird in der Regel erfüllt, wenn die Bekleidungen mit einem Abstand von mindestens 20 mm von der Außenwand bzw. Dämmstoffschicht angeordnet werden. Der Abstand darf z. B. durch die Unterkonstruktion oder durch Wandunebenheiten örtlich bis auf 5 mm reduziert werden.

Bei vertikal angeordneten Trapez- oder Wellprofiltafeln darf die Bekleidung streifenförmig aufliegen, wobei sicherzustellen ist, dass der freie horizontale Hinterlüftungsquerschnitt mindestens 200 cm²/m beträgt.

4.2.3 Für hinterlüftete Außenwandbekleidungen sind Be- und Entlüftungsöffnungen zumindest am Gebäudefußpunkt und am Dachrand mit Querschnitten von mindestens 50 cm² je 1 m Wandlänge vorzusehen.

Im Sockelbereich müssen Öffnungen zur Hinterlüftung der Außenwandbekleidung mit einer Breite über 20 mm durch Lüftungsgitter gesichert werden.

Legende

- | | |
|--|------------------------------------|
| 1 Tragprofil der Unterkonstruktion (vertikal oder gegebenenfalls horizontal) | 9 Dämmstoffhalter |
| 2 Bekleidungs-element | 10 Verankerungsgrund |
| 3 Dämmstoff (gegebenenfalls vlieskaschiert) | 11 Befestigungselement |
| 4 Fuge | 12 Verbindungselement (Gleitpunkt) |
| 5 Hinterlüftungsraum | 13 Verankerungselement |
| 6 Wandhalter | |
| 7 thermisches Trennelement | X Detail Festpunkt |
| 8 Verbindungselement (Festpunkt) | Y Detail Gleitpunkt |

Vorteile einer VHF

- Gestaltungs- und optische Freiheit
- Vielfalt der Belegarten
- Auch problemlos bei schwierigen Untergründen
- Ausgleich von Toleranzen
- Thermische Trennung
- Keine Kondensat und Feuchteprobleme
- Sehr langlebig
- Einheitliche Unterkonstruktion
- Technisch aufrüstbar



Gestaltungsvielfalt bei VHF

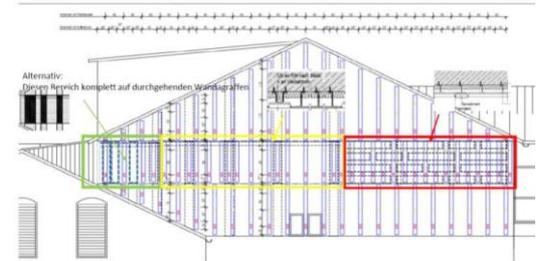
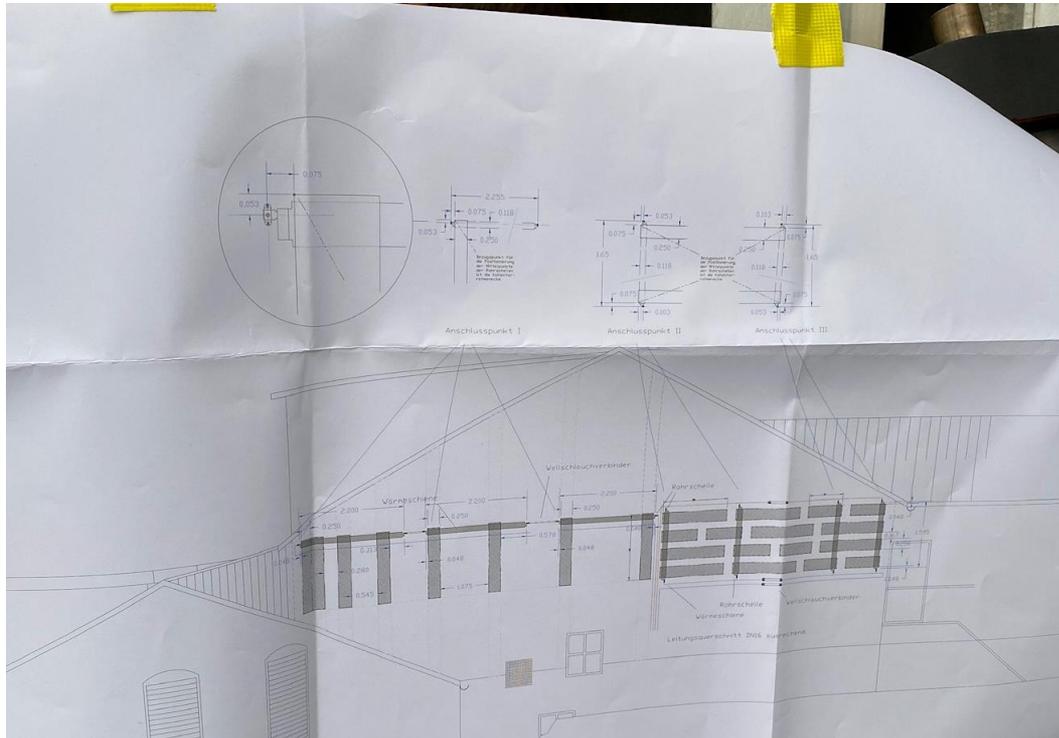


	Airtec Stone	Airtec Glass	Airtec Ceramic	LITHO Classic	LITHO PV	LITHO Metaboard	Airtec Render
Werkstoff	Naturstein	Glas	Keramik	Glas	Photovoltaik	Plattenwerkstoffe	Putz
Befestigung	Nichtsichtbar	Nichtsichtbar	Nichtsichtbar	Sichtbar	Sichtbar	Sichtbar	Nicht sichtbar
Brandschutzklasse	B1 A2 s1,d0	B1 A2 s1,d0	B1	A2	B s1,d0	A2	B1 oder A2
Zulassung	Z – 33.2-632	Z – 33.2-1132	In Anlehnung Z – 33.2-632	DIN 18008 – 3 DIN 18516 – 1	DIN 18008 – 3 DIN 18516 – 1	Z - diverse	Z – 31.1-131



Montageablauf an der Demofassade

Übertrag der Plandaten auf die Fassade



Montageablauf an der Demofassade

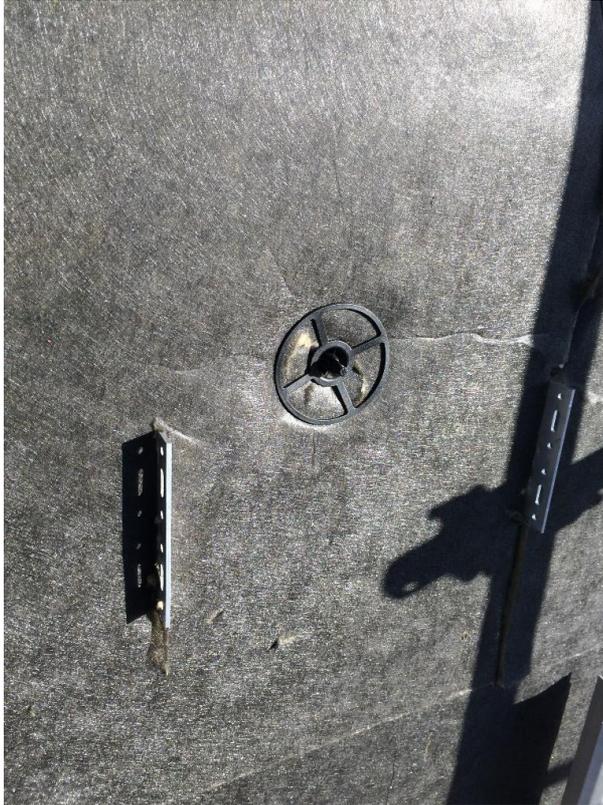
Montage der Haltewinkel für Fest- und Gleitlager



Montageablauf an der Demofassade

ArKol

Mechanische Befestigung der Mineralwolldämmung



Montageablauf an der Demofassade

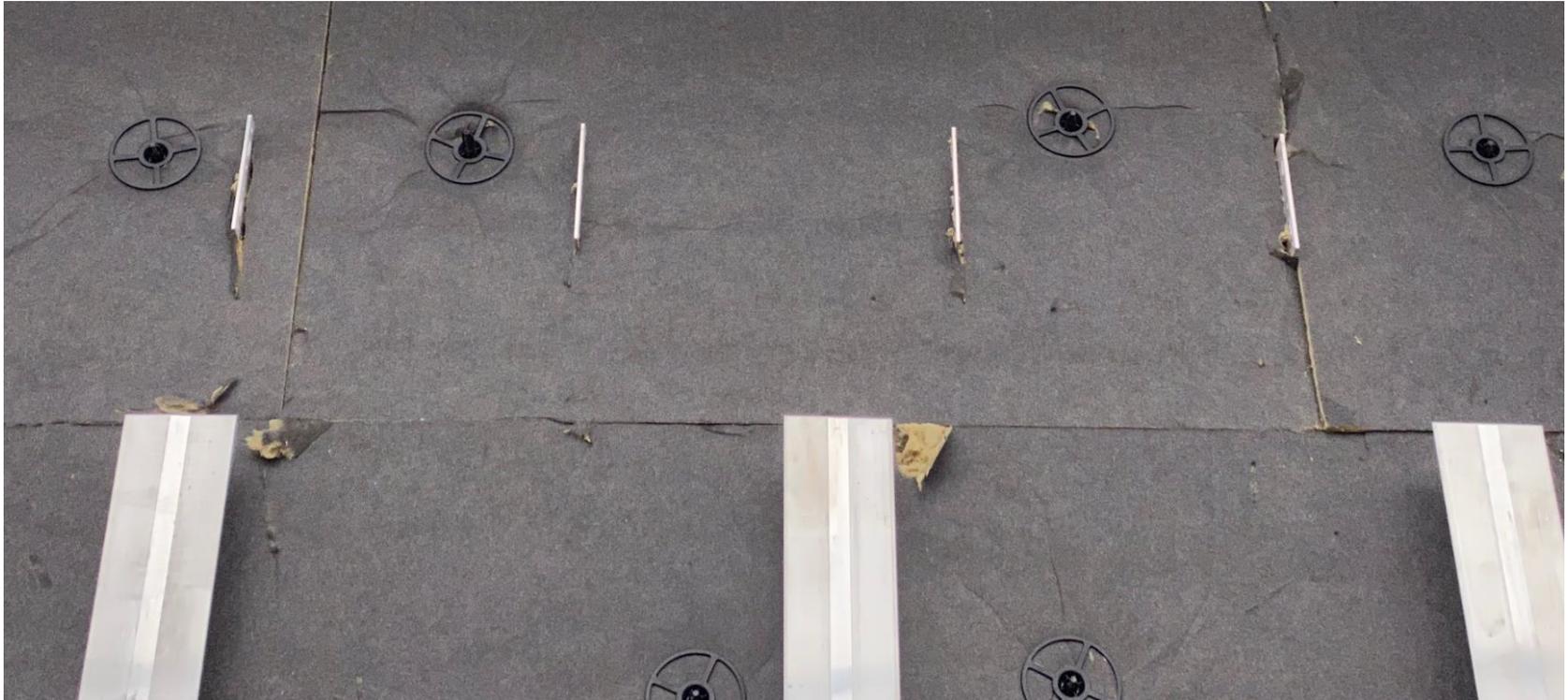
Festlager

Gleitlager



Montageablauf an der Demofassade

Festlegen der fertigen Oberfläche durch die Montage der Tragprofile



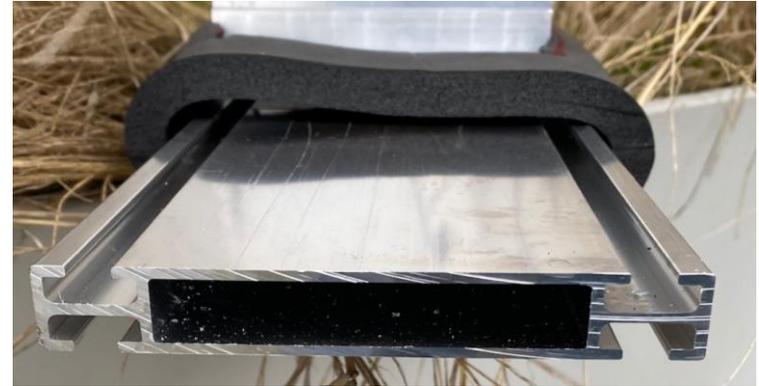
Montageablauf an der Demofassade

Unterschiedliche Niveaus der Tragkonstruktion muss beachtet werden



Montageablauf an der Demofassade

Sammelkanal zur „trockenen“ Anbindung der Kollektoren



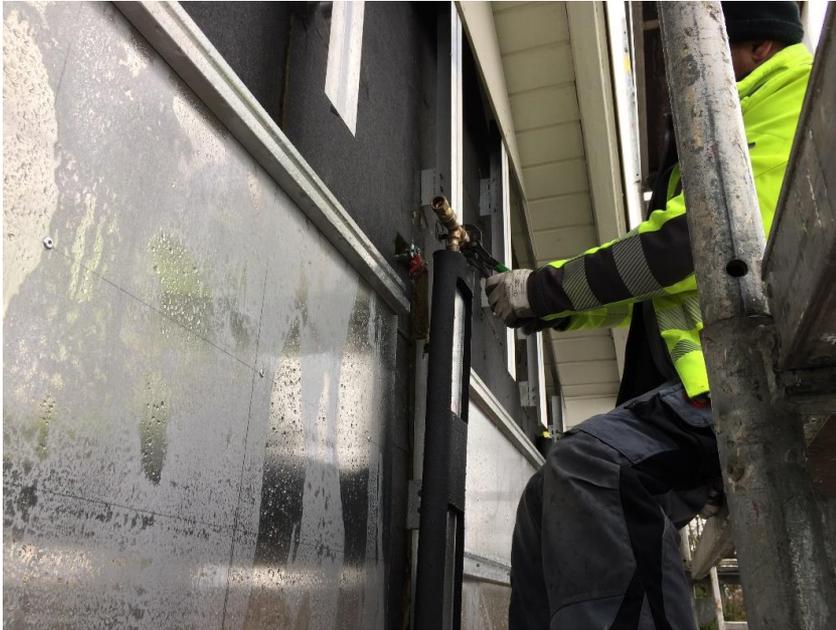
Montageablauf an der Demofassade

Fixierung der Sammelkanäle mit Rohrschellen



Montageablauf an der Demofassade

Fixierung der Sammelkanäle mit Rohrschellen und Hydraulischer Anschluss



Montageablauf an der Demofassade

Montage der Traversen für das Einhängen der Agraffen, die am Kollektor befestigt sind



Montageablauf an der Demofassade

Agraffen am Kollektor zur Befestigung mit Justierschraube, Montageplatte für Sammelkanal



Montageablauf an der Demofassade

ArKol

Montageplatte Kollektor wird mit Sammelkanal verbunden



Montageablauf an der Demofassade

ArKol

Putzträgerplatten werden angeschraubt und können mit Armierungsputz und Gewebe überarbeitet werden



Montageablauf an der Demofassade

Anbringen des Oberputzes



Montageablauf an der Demofassade

ArKol

Fertige Oberfläche



Fazit

- Tätigkeiten sind aus dem Trockenbau bekannt
- Erhöhter Planungs- und Berechnungsaufwand – Statik
- Hochwertige technisch und gestalterisch geprägte Konstruktion
- Schulung vor allem auch der VHF Kenntnisse und Arbeitsweisen
- Abstimmung mit dem SHK Betrieb – Hydraulischer Anschluss
 - Klare Schnittstelle definieren
- Bauphysikalisch sichere Konstruktion
- Anlagentechnik und Gebäudehülle wachsen zusammen

INSTITUT FÜR BAUKONSTRUKTION LEHRSTUHL 2 FÜR BAUKONSTRUKTION, BAUTECHNOLOGIE UND ENTWERFEN

ARCHITEKTONISCHE INTEGRATION VON FASSADENKOLLEKTOREN MIT HEAT- PIPES IM PROJEKT ARKOL (STREIFEN- KOLLEKTOR)

SCHLUSSBERICHT

Autor:

Dipl.-Ing. Johannes Pellkofer, MBA



Inhalt

1	Einführung	3
2	Architektonische Integration – Streifenkollektor	4
2.1	Ausgangssituation und Erwartungen zu Beginn des Forschungsprojekts	4
2.2	Technische und konstruktive Anforderungen	8
2.3	Ästhetische Anpassungs- und Gestaltungsmöglichkeiten	10
3	Untersuchungen der verschiedenen Einsatzmöglichkeiten des Streifenkollektors nach Gebäudetypologie - Seminar an der Uni Stuttgart	12
3.1	Fazit aus dem Seminar	39
4	Visualisierungen des Streifenkollektors nach ausgewählten Anwendungsfällen	40
5	Skizzenentwurf Demonstratorfassade des Streifenkollektors	45
6	Fazit	47
	Quellen- und Abbildungsverzeichnis	49

1 Einführung

Neben Industrie, Verkehr sowie Gewerbe, Handel und Dienstleistung spielen die privaten Haushalte eine wichtige Rolle im Energieverbrauch in Deutschland. Sie haben zu gut einem Viertel Anteil am Endenergieverbrauch. Dabei benötigen sie zirka 70 Prozent der Energie, um Räume zum Wohnen zu heizen. Mit Abstand zur Raumwärme folgen die Energieverbräuche für die Anwendungsbereiche Warmwasser und sonstige Prozesswärme (Kochen, Waschen, Kühlen et cetera). Zwar nimmt der Anteil der erneuerbaren Energieträger in diesem Sektor zu, dennoch besitzen fossile Energieträger immer noch den höchsten Anteil bei der Energieversorgung der privaten Haushalte. ¹ (siehe Abbildung 1)

Angesichts der Herausforderungen durch den globalen Klimaschutz und der Reduktion von Treibhausgasen in der Atmosphäre sieht sich der Gebäudesektor einer zunehmenden Verschärfung zur Verbesserung der Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden durch Richtlinien durch die Europäische Union gegenüber. Die Nutzung der solaren Energieeinstrahlung direkt an Gebäuden kann dabei einen wesentlichen Beitrag leisten, um die Treibhausgas-Emissionen sowohl der privaten Haushalte als auch im Gebäudesektor insgesamt zu reduzieren.

Im Forschungsprojekt Arkol wurde untersucht welche Rolle die Solarthermie in Zukunft bei Gebäuden spielen kann. Dabei wurden zwei neuartige Fassadenkollektoren entwickelt, die sowohl hohe Effizienz als auch größtmögliche Varianz bei Ihrer Integration in Gebäudefassaden bieten. Aufgabe des Instituts für Baukonstruktion, Lehrstuhl 2 für Baukonstruktion, Bautechnologie und Entwerfen an der Universität Stuttgart war es, neben der Beratung bei baukonstruktiven Fragen, zu untersuchen, welche Möglichkeiten sich im Falle des Streifenkollektors hinsichtlich Fassadengestaltung bei unterschiedlichen Gebäudetypologien bieten.

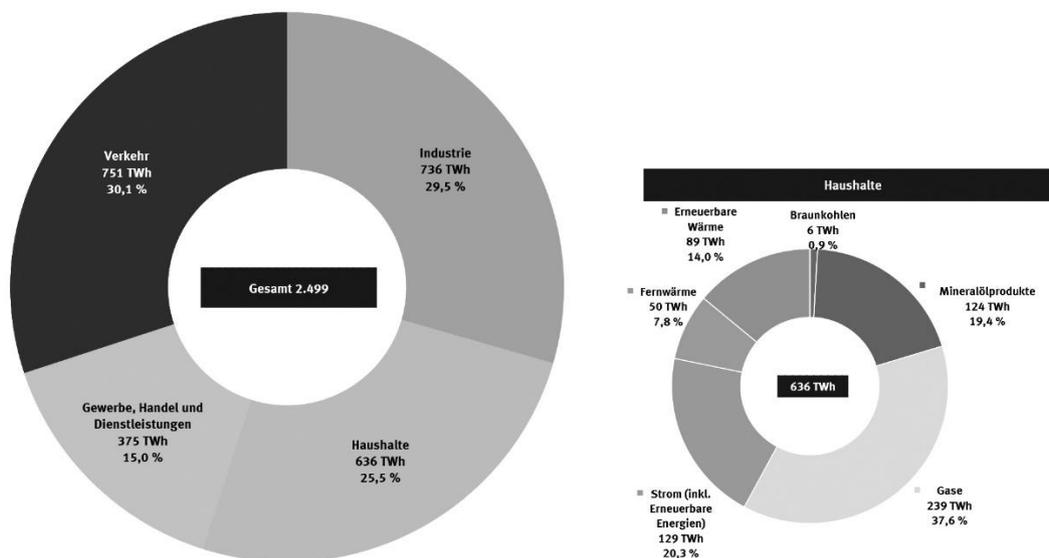


Abbildung 1: Endenergieverbrauch 2018 nach Sektoren und Energieträgern (Ausschnitt)

¹ Vgl. Umweltbundesamt [Internet 2020]: Endenergieverbrauch der privaten Haushalte

2 Architektonische Integration – Streifenkollektor

Auf dem Gebiet der solaren Technologien in Gebäuden spielen Solarthermie Kollektoren bisher nicht die gleiche Rolle wie zum Beispiel Photovoltaik Systeme. Folgende Gründe könnten dabei eine Rolle spielen:

- Geringere Förderung der Solarthermie seitens staatlicher Stellen und der EU.
- Problem der Standortabhängigkeit: Solarthermische Energie lässt sich nicht in gleicherweise wie Strom bei Photovoltaik Systemen transportieren, sondern muss am Ort des Kollektors gesammelt, beziehungsweise verbraucht werden.
- Es existieren zu wenige architektonisch anspruchsvolle Beispiele für eine ästhetische Integration von Solarthermie Technologien zum Beispiel in Gebäudefassaden.
- Alle marktüblichen Solarthermie Systeme werden erst nach Fertigstellung eines Gebäudes, in der Regel auf dem Dach, appliziert. Integrative Beispiele stellen immer nur Insellösungen dar und werden nur als Sonderanfertigungen mit hohem Aufwand für einzelne Gebäude erstellt.²

2.1 Ausgangssituation und Erwartungen zu Beginn des Forschungsprojekts

Neben den Solar-Luft-Kollektoren lassen sich die Solarthermie Kollektoren, basierend auf einem flüssigen Medium als Energieträger, üblicherweise in folgende drei unterschiedlichen Bauarten einteilen:

- Flachkollektoren (mit Gehäuse und Abdeckscheibe, weitverbreitetste kostengünstigste Variante)
- Vakuum Röhrenkollektor (erreicht höhere Temperaturen und besitzt einen höheren Wirkungsgrad, ist dafür in der Regel teurer als Flachkollektoren)
- Sonderkonstruktionen, wie Schwimmbadkollektoren (einfache und effiziente Konstruktion zur Warmwasserbereitung) und Hybridkollektoren (Kombination aus Photovoltaik Element und Solarthermie Kollektor)

Sucht man nach gebauten Beispielen in denen Solarthermie Kollektoren zum Einsatz kommen, so finden sich am häufigsten Kollektoranlagen als Aufdach-Konstruktionen ohne besondere Integration in die bestehende Gebäudestruktur. Die Gründe dafür können zum einen die relativ einfache Montageart mit Hilfe einer Unterkonstruktion sein, die nur über Ballastieren auf dem Dach gehalten ist und damit die Dichtungsebene des Daches an keiner Stelle durchstößt und zu potentiellen Bauschäden führen kann, zum anderen die relativ niedrigen Kosten einer solchen Konstruktion, die im Gegensatz zu einer Integration zum Beispiel in die Fassaden eines Gebäudes anfallen. Ein weiterer Grund kann aber auch im üblichen Ablauf des Entwurfsprozesses eines Gebäudes liegen, bei dem in der Regel am Ende des Entwurfs mit Beginn der Ausführungsplanung die TGA-Planer beauftragt werden und erst dann die Frage nach nachhaltigen Energiesystemen im Gebäude gestellt wird. Selten sind Architekten dann gewillt ihren Entwurf zu überarbeiten zu Gunsten der Integration zum Beispiel von Solarthermie Kollektoren.

² Vgl. Probst, Maria C. M.; Roecker, C.: Architectural Integration and Design of Solar Thermal Systems; Oxford: Taylor & Francis Ltd, 2011, S. 12 ff.



Abbildung 2: Kollektorintegration als Aufdach-Konstruktion/ Solites

Beispiele für eine „echte“ Integration von Solarthermie Kollektoren in die Gebäudestruktur stellen immer noch die Ausnahme dar. Ein Beispiel für eine Integration der Kollektoren in die Fassade im Rahmen einer energetischen Fassadensanierung stellt das Projekt eines 9-Stöckigen Wohngebäudes mit 36 Wohneinheiten in Eschwege (Hessen) dar. In dem Projekt wurden maßgeschneiderte Kollektoren eingesetzt, die in einem WDVS-System (Wärmedämmverbundsystem) so integriert wurden, dass eine Flächenbündigkeit zwischen WDVS-System und Solarthermie Kollektor gewährleistet wurde. Diese baukonstruktiv anspruchsvolle Integration der Kollektoren in eine WDVS-System hat sich mittlerweile seit 10 Jahre als schadensfreie konstruktive Lösung gezeigt. Dennoch ist das ästhetische Potential, das eine Kollektorfläche im Zusammenspiel mit der gesamten Fassade ausmachen könnte, aus architektonischer Sicht bei weitem noch nicht ausgeschöpft. Darüber hinaus basiert das genannte Beispiel auf einer sehr individuellen Lösung auf Basis maßgeschneiderter Kollektoren und ist damit nicht einfach übertragbar auf jeden üblichen mehrgeschossigen Wohnungsbau.

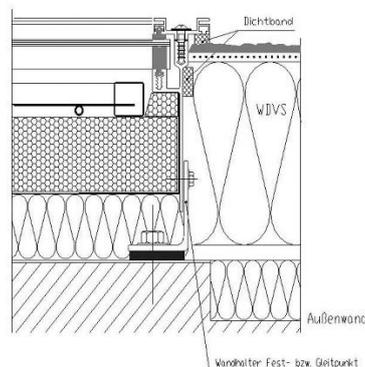


Abbildung 3: Mehrfamilienhauses in Eschwege mit Solarthermie-Elementen/ DAW

Das Institut für Baukonstruktion und Entwerfen Lehrstuhl 2 der Universität Stuttgart konnte bereits 2009 in einem vom BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) geförderten Forschungsprojekt eine vielversprechende Integration eines Solarthermie Kollektors in Bürofassaden entwickeln. Ziel des Forschungsvorhabens war die Entwicklung eines Fassadenelementes für Bürogebäude auf Basis von Vakuumglasrohren (ICR-Rohren) der Firma Schott zur Energiegewinnung. Die Kollektorelemente dienten dabei gleichzeitig auch zur Tageslichtnutzung und als Sonnenschutz. Da Bürogebäuden bestimmt sind durch Ihre großen Fassadenfläche im Gegensatz zu den geringen Dachflächen, macht eine solarthermische Aktivierung ihrer Fassaden Sinn. Ziel war es daher mit der gewonnenen, erneuerbaren Energie den Kühl-, Heiz- und Warmwasserbedarf des Gebäudes zu einem Großteil in Zukunft decken zu können. Besondere Herausforderung bei der Entwicklung des fassadenintegrierten Solarthermie Kollektors waren die Lösung der baukonstruktiven Details, die die Integration in eine hochwertige Bürofassade erforderten, bei gleichzeitiger Gewährleistung größtmöglicher Transparenz der Fassade. ³

Bei der Beantwortung der Frage warum sich die Bürofassaden integrierte Lösung bisher nicht stärker auf dem Markt für derartige Anwendungen durchsetzen konnte, lassen sich unterschiedliche Gründe anführen. Zum einen stellte die Firma Schott letztendlich die Produktion ihrer spezifischen Vakuum-Glasrohre aus firmeninternen Gründen ein, zum anderen konnte der Konflikt zwischen der gewünschten Transparenz einer architektonisch individuell gestalteten Bürofassade und dem davor montierten, die Transparenz teilweise einschränkenden, Vakuumglasröhren-Moduls nie zufriedenstellen gelöst werden. Kaum ein Bauherr einer teuren und aufwendig individuell gestalteten Büro Fassade akzeptiert die Einschränkungen durch ein vorgeschaltetes Fassadenmodul, das die Transparenz der teuren Glasfassade deutlich reduziert und dabei die Ästhetik seines Gebäudes mit allen andern Bürogebäuden vereinheitlicht, die das gleiche Produkt anwenden.

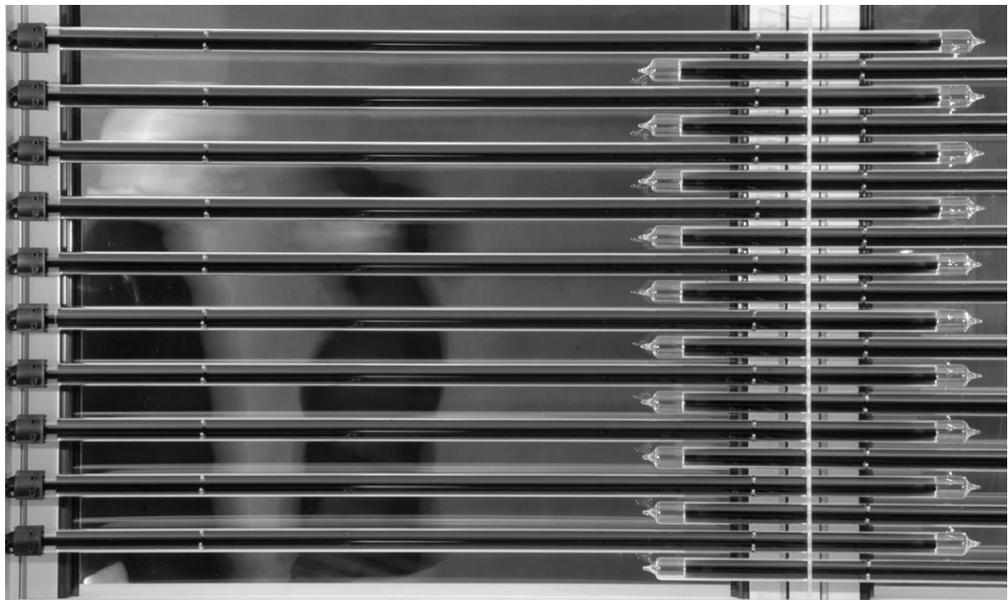


Abbildung 4: Mockup Vakuumröhren-Kollektor/ IBK2, Universität Stuttgart

³ Vgl. Behling, Stefan; Volz, Tina: Integration von Solarthermie in Glasfassaden von Bürogebäuden zur Energiegewinnung, Tageslichtnutzung und als Sonnenschutz; Forschungsbericht; Universität Stuttgart: Institut für Baukonstruktion Lehrstuhl 2, 2009, (0329278A)



Abbildung 5: Visualisierung Vakuumröhren-Kollektor/ IBK2, Universität Stuttgart

Unter Berücksichtigung der Vor- und Nachteile der geschilderten Beispielsprojekte und in Anbetracht der Situation, dass Solarthermie-Module immer noch selten als integrativer Fassadenbestandteil im Hochbau Anwendung finden, lassen sich folgende Bedingungen für die erfolgreiche Entwicklung und Integration eines neuartigen Solarthermie Fassadenkollektors feststellen:

- Der Kollektor muss größtmögliche Varianz, sowohl was seine Dimension als auch die Kombination mit anderen Materialien betrifft, beim Einbau in unterschiedlichste Fassaden ermöglichen.
- Das Design des Kollektors muss so gewählt sein, dass es sich verschiedenen Fassadenentwürfen unterordnet und damit in Größe, Anordnung und oberflächlicher Erscheinung optisch leicht integrieren lässt. Es sollte verhindert werden, dass mit dem Einsatz des Kollektors das Design einer Fassade weitestgehend festgelegt ist und sich zu anderen Kollektor integrierten Fassaden gleicht.
- Im Gegensatz zu einer reinen Individuallösung für die jeweilige Einbausituation, sollte der Kollektor erprobte und nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik überprüfte, baukonstruktive Details für die meistverbreiteten Fassadenkonstruktionen, wie vorgehängte hinterlüftete Fassaden (VHF) und Wärmedämmverbundsysteme (WDVS), anbieten.
- Der Kollektor muss, wie alle anderen Bauprodukten, allen notwendigen Richtlinien entsprechen und kann dadurch ohne besonderer Genehmigungsverfahren (ZiE) von Architekten und Bauherren eingesetzt werden.
- Aufgrund zunehmender Verschärfung von Richtlinien zur Verbesserung der Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden, konkurrieren Solarthermie Kollektoren mit anderen Systemen, wie zum Beispiel Photovoltaik, aber auch mit Fassaden- und Dachbegrünungen, um die Belegungsflächen (Fassade, Dach) von Gebäuden. Umso wichtiger ist es mit dem Kollektor ein technisches Gesamtsystem aus Kollektor, Sammelleitung und Anschluss an die Gebäudetechnik anzubieten, das den Einsatz eines solchen Systems erleichtert.
- Beim Einbau des Kollektors überschneiden sich unterschiedliche Gewerke (Fassadenbauer, Heizungsbauer, Gebäudeausrüster), entsprechend sind die Abgrenzungen und Übergabebereiche der unterschiedlichen Gewerke inklusive ihrer Haftungs- und Gewährleistungsbereiche zu definieren.

- Die erfolgreiche Markteinführung eines neuartigen Solarthermie Kollektors hängt nicht nur von dem überzeugenden Design und der Technik des Kollektors ab, sondern in gleicher Weise von der Bereitschaft der betreffenden Firmen und ihren Fachverbänden ein solches Produkt für Ihre Kunden einzubauen. Dies erfordert eine entsprechende Rückkopplung mit Handwerkern und Fachverbänden sowie ein ausreichendes Angebot an Schulungen zum Einbau der neuen Kollektor Technik.

2.2 Technische und konstruktive Anforderungen

Zur Integration des im Forschungsprojekt Arkol neu entwickelten Streifenkollektors wurden folgende zwei Fassadenprinzipien näher untersucht, die sich im Bereich geschlossener Außenwandkonstruktionen seit langer Zeit bewährt haben und Stand der Technik sind:

- Wärmedämmverbundsystem (WDVS)

Das WDVS-System basiert auf einem Mehrschichtigen Aufbau bestehend unter anderem aus Dämmung, Armierungsgewebe und Putz und stellt ein relativ preisgünstiges System zur Dämmung von Fassaden dar. Neben Neubauten wird das System häufig auch im Sanierungsfall von Fassaden eingesetzt. Vorteil bei einer Integration des Streifenkollektors in ein solches System sind gegebenenfalls die ebenfalls kostengünstigen Einbaudetails. Besonders zu berücksichtigen sind die hohen Temperaturen eines Kollektorgehäuses, das nur über hitzebeständige Materialien in das WDVS-System integriert werden kann.

- Vorgehängte hinterlüftete Fassade (VHF)

Das VHF-System kennzeichnet sich durch seinen modularen Aufbau, der die Außenwandbekleidung über eine luftdurchströmte Schicht von der eigentlichen Dämmung der Hauswand trennt. Die Befestigung des Systems erfolgt über eine Unterkonstruktion wahlweise aus Aluminium oder Holz. Das System ist in der Regel teurer als Wandbekleidungen in WDVS, allerdings in seiner Erscheinung auch hochwertiger und erlaubt größere Spielformen bezüglich Materialkombinationen. Am bekanntesten sind VHF-Systeme mit Plattenmaterialien, bei denen die Gestaltung der unterschiedlichen Plattengrößen und die Fugeneinteilung zur Architektonischen Gestaltung der Fassade gehören. Genauso lassen sich aber auch Putzfassaden mit Hilfe einer hinterlüfteten Trägerputzplatte umsetzen, die ein gleiches Erscheinungsbild wie ein WDVS-System oder einer kerngedämmten, monolithischen und verputzten Wand hat. Vorteil bei der Integration des Streifenkollektors liegt darin, dass der Kollektor hervorragend zum modularen Aufbau der VHF passt und das Konzept der Materialkombinationen in einer VHF hervorragend aufnimmt. Nachteil ist die zusätzliche Dämmung des Kollektors, die aufgrund der Hinterlüftung in dem System notwendig wird.

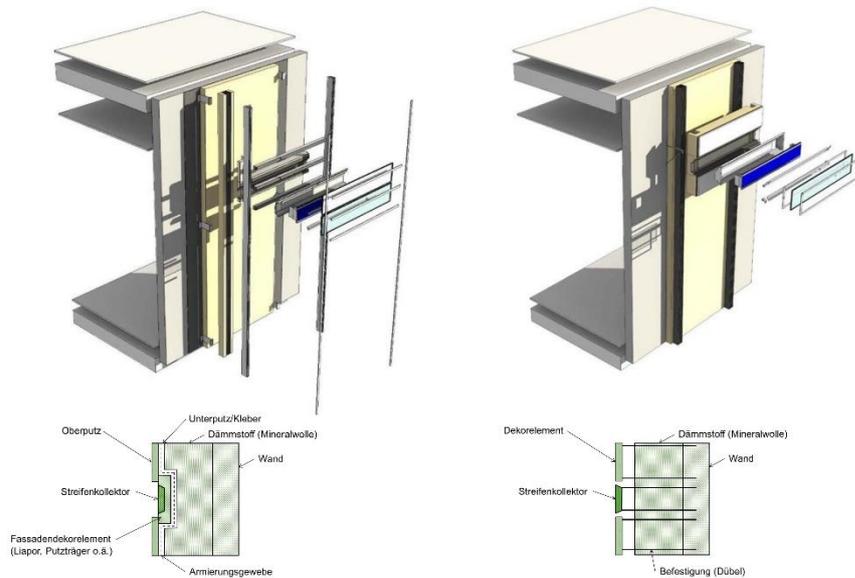


Abbildung 6: Aufbau und Integration Streifenkollektor in WDVS-System und VHF-System/ Priedemann Facade-Lab, DAW

Die Vor- und Nachteile einer Integration des Streifenkollektors in ein WDVS- im Vergleich zu der in ein VHF-System wurden im Arkol Forschungsprojekt ausführlich unter den beteiligten Forschungspartnern diskutiert und sind umfangreich im Abschlussbericht dargelegt.⁴ Unter anderem aus Gründen des modularen Prinzips des VHF-Systems, das sich für eine Integration des Streifenkollektors besser eignet, wurde im Verlauf der weiteren Untersuchungen zur architektonischen Integration des Kollektors ein Schwerpunkt auf das VHF-System gelegt.

Neben dem Streifenkollektor-Gehäuse selbst, stellt die Sammelleitung und der Anschluss des Kollektors daran einen wichtigen Aspekt bei der konstruktiven und ästhetischen Umsetzung der Fassadenintegration dar. Der trockene Anschluss des Kollektors an die Sammelleitung (nur über Anpresskontakt) ermöglichen die freie Positionierung des Kollektors entlang des Sammelkanals. Gleichzeitig ist Freiheit der Positionierung der Kollektoren limitiert durch die Richtung des Sammelkanals, der nur in einer Richtung verlaufen kann und innerhalb eines Strangs nicht verzogen werden kann. Eine Kreuzung unterschiedlich verlaufender Sammelkanäle innerhalb einer Fassadenkonstruktion ist ebenfalls nicht möglich, da dies die Hinterlüftung und damit den gesamten Fassadenaufbau um jeweils die Breite des Kanals vergrößern und die Fassade zu weit auskragen lassen würde.

Ein weiterer positiver Aspekt bei der trockenen Anbindung des Kollektors an die Sammelleitung über Anpressdruck, ist die klare Trennung der unterschiedlichen Gewerke der Technische Gebäudetechnik zur Fassadentechnik. Besonders im Hochbau ist dies aufgrund haftungs- und gewährleistungsrechtlicher Fragen wichtig, da kein Gewerk in der Regel die Verantwortung für die fachgerechte Ausführung eines anderen übernehmen möchte.

⁴ Vgl. Häringer, Simon [u. a.]: Arkol – Entwicklung von architektonisch hoch integrierten Fassadenkollektoren mit Heat-Pipes; Schlussbericht. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, 2020, (0325857A/B/C), S.67 ff.

2.3 Ästhetische Anpassungs- und Gestaltungsmöglichkeiten

Mit der Entwicklung des Arkol Streifenkollektors soll Architekten und Fassadenplanern ein Kollektor angeboten werden, der ähnlich wie ein Fassadenpaneel einzusetzen ist und sich durch seine Varianz, hinsichtlich Dimension und Ausrichtung, unterschiedlichsten Fassadenentwürfen unterordnet. Limitierend gegenüber einer größtmöglichen Vielfalt der Abmessungen des Streifenkollektors stehen dabei die Herstellungs- und Vertriebskosten sowie der baukonstruktive Aufwand für die Unterkonstruktion.



Abbildung 7: Visualisierung vertikale und horizontale Integration des Streifenkollektors in ein VHF-System/ IBK2

Folgende Parameter wurden als beste Lösung zwischen Gestaltungsvielfalt und ökonomischen Überlegungen festgelegt und in verschiedenen Entwurfsszenarien (siehe Kapitel 2.2) untersucht:

- Die Ausrichtung des Streifenkollektors kann sowohl horizontal als auch vertikal erfolgen. Der Wechsel der Ausrichtung kann auch innerhalb einer Fassade erfolgen, wenn der Verlauf der Sammelleitung berücksichtigt wird und es zu keinen Leitungskreuzungen kommt.
- Die Länge des Kollektors kann prinzipiell in einer großen Varianz angeboten werden und ist letztendlich abhängig vom abschließenden Design des Kollektors. Überlegungen zum Prinzip einer endlosen Strangproduktion des Kollektors und des individuellen Zuschneidens des Kollektors mittels einer Kappsäge würde die Längenvariabilität gegenüber einer klassischen Gehäusefertigung deutlich erhöhen. Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde dieses Produktionsprinzip jedoch nicht ausführlich untersucht.
- Die Breite des Kollektors ist auf eine Standardbreite limitiert und würde bei unterschiedlich gewünschten Breiten den Produktionsaufwand entsprechend stark erhöhen. Die Breite des Absorbers, der die Gesamtbreite des Kollektors bestimmt, wurde für die erste Umsetzung in der Demonstrationsfassade auf

215 mm und 250 mm Gesamtbreite festgelegt. Die gewählte Standardbreite kann aber für ein späteres Produkt angepasst werden. Die Breite des Absorbers, der die Gesamtbreite des Kollektors bestimmt, kann z.B. auf 156 mm verringert werden, da dies auch eine typische Größe für Solarzellen nach dem Stand der Technik darstellt. Dadurch wird gewährleistet, dass in einer späteren Ausbaustufe der Kollektor mit anderen Systemen (z. B. PVT-Kollektoren) kombiniert werden kann.⁵

- Das Design des Kollektorgehäuses soll so minimalistisch wie möglich hinsichtlich des sichtbaren Gehäuserahmens, Abdichtungsprofilen etc. sein, so dass eine Addition mehrerer Kollektoren nur durch eine schmale Fuge möglich wird.
- Um den unterschiedlichsten Geometrien in einer Fassade gerecht zu werden kann bei Bedarf mit Zwischenelementen zwischen den Kollektorstreifen gearbeitet werden. Sie können mit einer ganz anderen Materialität als die des Kollektors die Ästhetik einer Fassade vervollständigen oder auch als eine Art Blindpaneel in gleicher Erscheinungsform wie die des Kollektors fungieren.

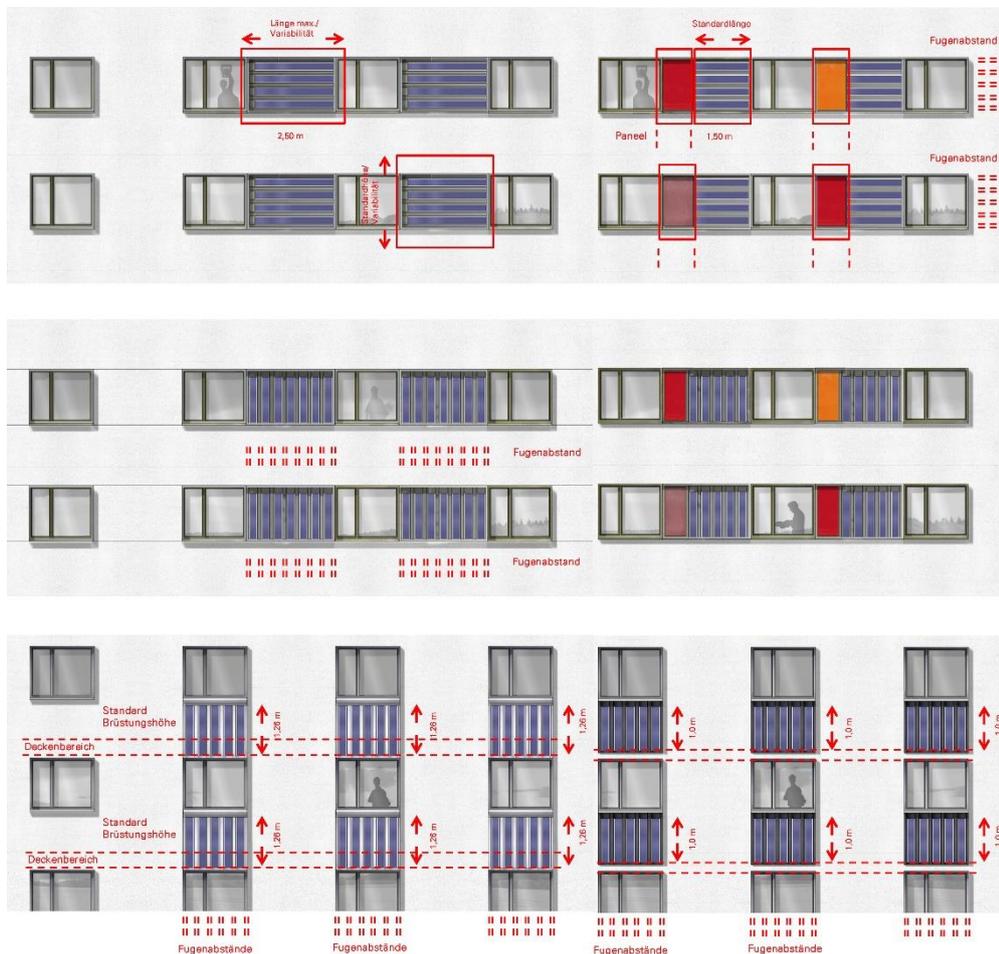


Abbildung 8: Zeichnung typischer Einbausituation in einem Wohnungsbau und den möglichen variablen Gestaltungsparametern im Bereich a.) Bandfassade b.) Brüstungselement / IBK2

⁵ Vgl. ebd., S. 67 ff.

3 Untersuchung der verschiedenen Einsatzmöglichkeiten des Streifenkollektors nach Gebäudetypologie – Seminar an der Uni Stuttgart

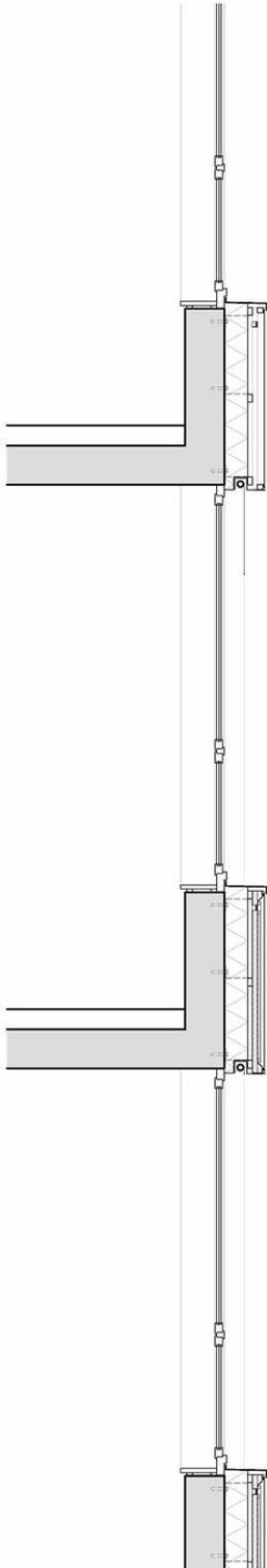
Im Zuge einer Seminarveranstaltung an der Architekturfakultät der Universität Stuttgart im Sommersemester 2017 wurden mit Architekturstudenten verschiedene Gestaltungsmöglichkeiten des Streifenkollektors in der Fassade untersucht. Die Ergebnisse wurden anschließend vom IBK2 ausgewertet, kategorisiert und weiterentwickelt. Die so gewonnenen Erkenntnisse bilden wertvolle Anhaltspunkte für die zukünftigen Entwicklungsschritte des Streifenkollektors, sowohl in seiner technischen, systemischen wie auch gestalterischen Ausrichtung. Während sich ursprünglich angedachte Gestaltungsoptionen zum Teil als weniger relevant erwiesen, rückten neue, bisher noch nicht berücksichtigte Kollektoranordnungen in den Vordergrund.

Grundlage der Untersuchungen bildete das Szenario einer Fassadensanierung. Neben der Erhöhung des Dämmstandards der bestehenden Fassade sollten dabei die in der Entwicklung stehenden Streifenkollektoren integriert werden. In Absprache mit den Projektpartnern war der Entwicklungsstand des Streifenkollektors vom März 2017 hierfür die Basis.

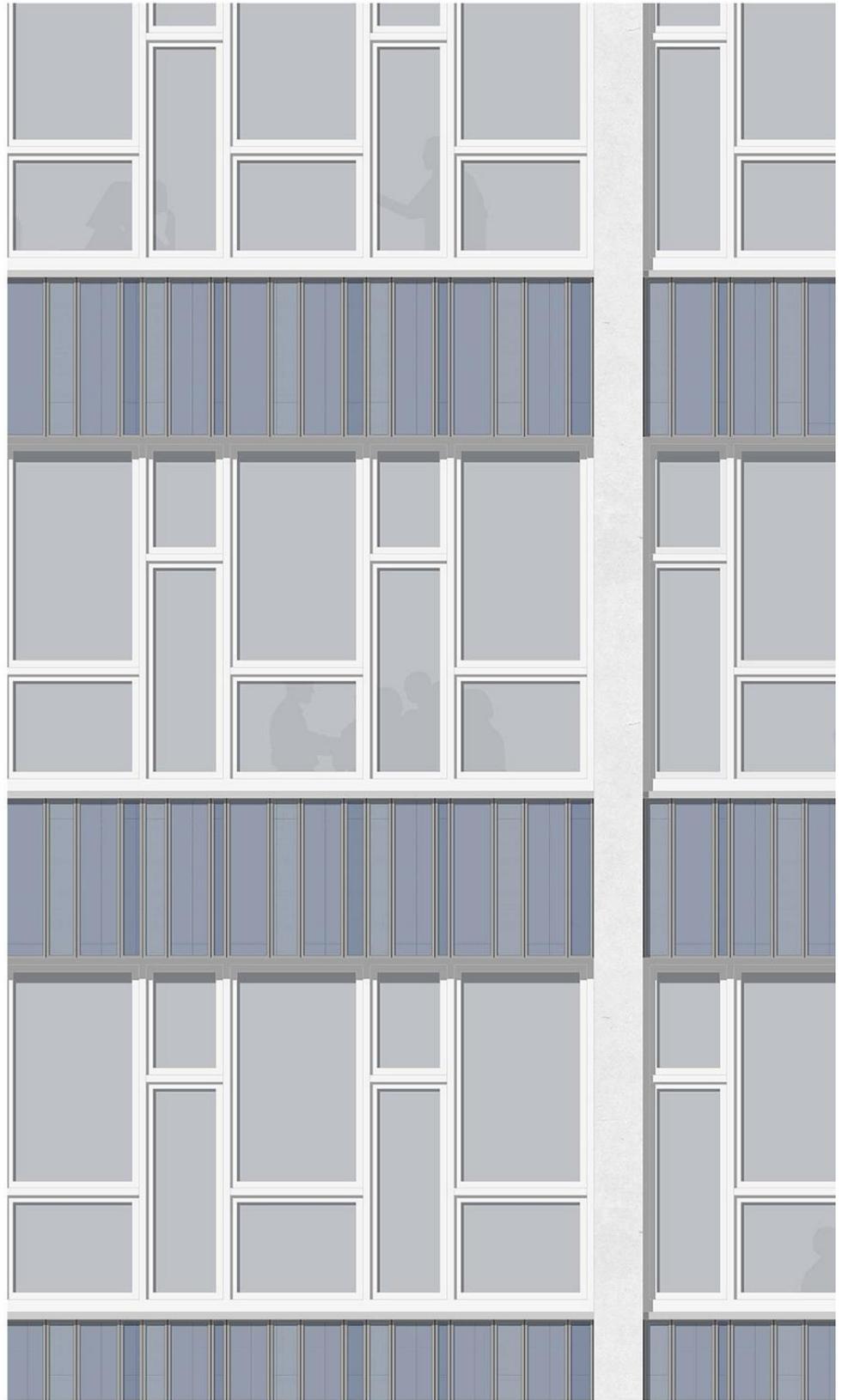
Für die Bearbeitung standen sieben prototypisch ausgewählte Fassaden unterschiedlicher Gebäudetypologien und Nutzungen wie Wohnen, Schule, Büro und Krankenhaus zur Auswahl. Zusätzlich konnte das Konstruktionssystem der Fassade mit Wärmedämmverbundsystem (WDVS) oder vorgehängter Fassade (VHF) frei gewählt werden. Bewusst sollten bei der architektonischen Ausformulierung der Fassaden technische Fragen wie etwa die Führung der Sammelleitungen oder die hydraulische Auslegung nur zweitrangig behandelt werden. Im Vordergrund sollten die gestalterisch-architektonischen Gesichtspunkte und Möglichkeiten stehen, die sich beispielsweise aus der Anordnung der Fassadenkomponenten (z. B. Fenster, Kollektor, opake Bereiche), der Materialwahl der Fassadenoberfläche oder dem Fugenbild ergeben.

Die wesentlichen Parameter in der Beurteilung der untersuchten Lösungen waren:

- Eignung der verschiedenen Fassadenkonstruktionen (WDVS oder VHF)
 - Kontext: Oberflächen umgebende Fassade, Fugenbild
 - Führung der Sammelleitungen, Schnittstellen zwischen verschiedenen Fassadenkomponenten
- Kollektordesign/Optische Beurteilung
 - Farbe, Oberfläche, Tiefe
- Anordnung und Ausrichtung der Kollektorstreifen
 - Architektonischer Einbindung und Integration
 - bezogen auf verschiedene Anwendungsfälle



Fassadenschnitt 1:20



Fassadenansicht 1:20

Abbildungen 9 - 10: Seminarentwurf – Hendrik Nagel/ IBK2

Streifenkollektor in einer vorgehängten Fassade

Beschreibung:

Die vorhandene Fassade des Wilhelms-Gymnasiums in Stuttgart-Degerloch ist ein typisches Zeugnis der 1960er-Jahre. Die großzügigen Fensterbänder lassen viel Licht in die Klassenräume und werden in ihrer ursprünglichen Form belassen.

Die Streifenkollektoren werden im Brüstungsbereich im Wechsel mit opaken, bedruckten Glaspaneelen angebracht. So werden sie ein selbstverständlicher Teil der Fassade. Die Glaspaneel werden mit changierenden dunklen Blautönen bedruckt und ergeben im Zusammenspiel mit den Streifenkollektoren ein dezent farbiges Muster.

Vor die bestehende Stahlbetonkonstruktion wird eine Wärmedämmung aus Holzfaserdämmplatten aufgebracht, die das Bestandsgebäude bauphysikalisch ertüchtigt. Mithilfe von handelsüblichen Stahlprofilen, die zuvor direkt an der Tragstruktur verschraubt wurde, wird zunächst eine horizontale Konterlattung erstellt, auf der die Kollektoren direkt befestigt werden können. Im Bereich der übrigen Glaspaneel wird auf die Konterlattung eine vertikale Lattung aufgebracht, die die Hinterlüftung der gesamten Fassade sicherstellt. Die Glaspaneel selbst können mit der gleichen Metallfassung gerahmt werden wie die Decke des Kollektors, sodass ein homogenes Erscheinungsbild über die gesamte Fassade entsteht. Sie werden mit Abstandhaltern auf die Lattung aufgeschraubt, sodass die Vorderkanten von Kollektor und Glaspaneel stets bündig verlaufen.

Der Sammelkanal des Kollektors kann recht unkompliziert horizontal in der Ebene der Lattung geführt werden. Da die bestehenden Stahlbetonstützen ohnehin bauphysikalisch ertüchtigt werden müssen, kann ein zentraler Sammelkanal für jeweils zwei benachbarte Fassadenfelder in Stützebene nach unten bzw. oben geführt werden.

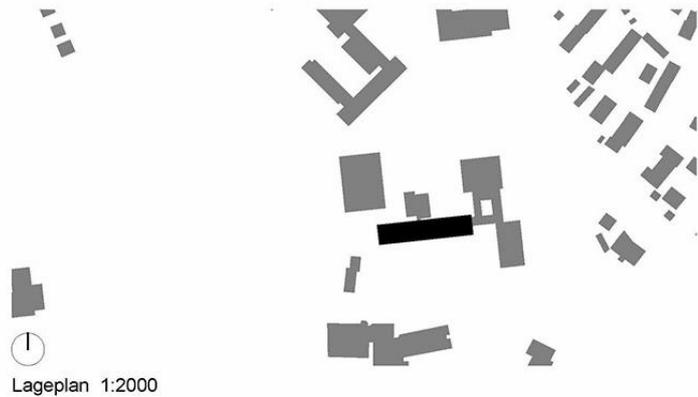
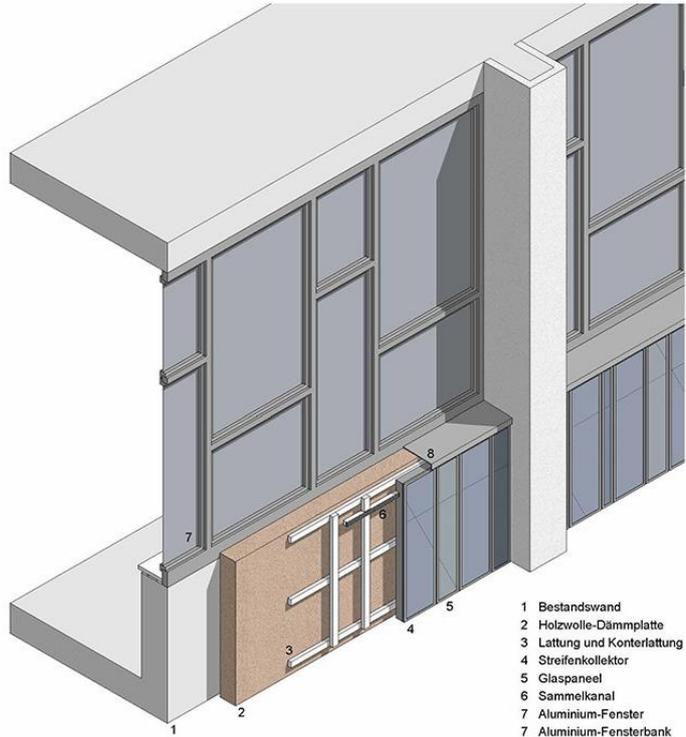
Insgesamt entsteht so ein zeitgemäßes Erscheinungsbild, das die Bestandsfassade aus den 1960er-Jahren respektiert, aber dennoch in die heutige Zeit überführt. Der Streifenkollektor wird in dieser Variante so weit es geht in die Fassadengestaltung integriert und bewusst nicht offen zur Schau gestellt.

Aufbau:

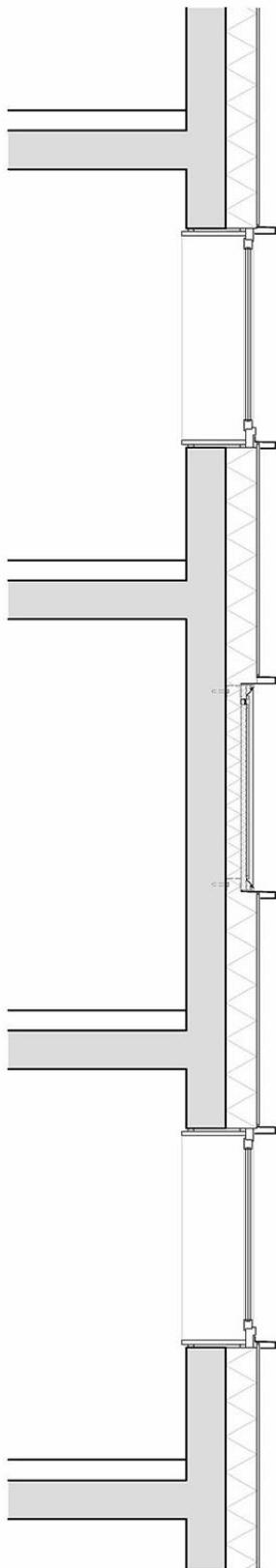
Oberfläche(Material): Bedrucktes Glas

Wandaufbau:
 Bestehende Stahlbetonwand
 Wärmedämmung - 15cm
 Hinterlüftung/Konterlattung - 3cm
 Lattung - 3cm
 Streifenkollektor/Glaspaneel

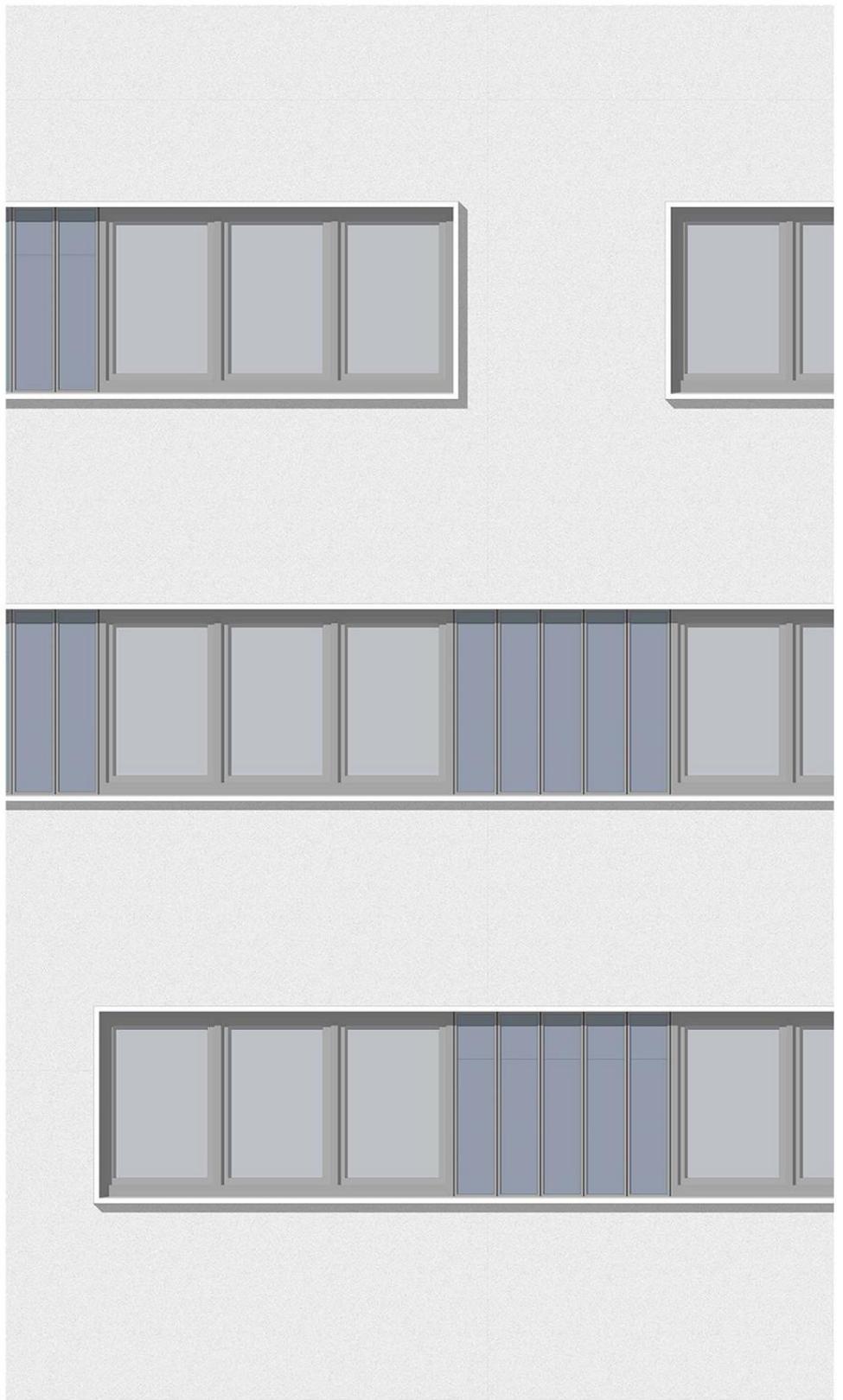
Anteil Fenster: 61,88 % / m²
 Anteil opak: 22,54 % / m²
 Anteil Kollektor: 15,58 % / m²



Ansicht 1:200



Fassadenschnitt 1:20



Fassadenansicht 1:20

Abbildungen 11 - 12: Seminarentwurf – Hendrik Nagel/ IBK2

Streifenkollektor im WDVS

Beschreibung:

Der Wohnblock in der Karl-Marx-Allee in Berlin ist ein typischer Plattenbau, wie er häufig in der ehemaligen DDR zu finden ist. Er wird geprägt durch die stetige Wiederholung immer gleicher Elemente, die entscheidend für die Gestaltung der Fassade ist, gleichzeitig aber auch Monotonie entstehen lässt. Der Streifenkollektor wird daher vertikal zwischen die bestehenden Öffnungen gesetzt, sodass zusammenhängende Fensterbänder gebildet werden. Durch unregelmäßiges Aussparen von Kollektoren wird darüber hinaus eine starke Auflösung der Monotonie erreicht.

Da das Bestandsgebäude bauphysikalisch ertüchtigt werden muss, wird es vollständig mit einer 20cm starken Wärmedämmung eingepackt und letztlich verputzt. Bei der Auswahl des entsprechenden Wärmedämmverbundsystems soll in jedem Fall darauf geachtet werden, recyclebare oder aber nachwachsende Materialien zu verwenden. Die Kollektoren werden direkt in die Wärmedämmung eingebunden. Hierdurch entstehen zwar punktuell weniger stark gedämmte Bereiche, die aber in der Betrachtung des gesamten Gebäudes vernachlässigt werden können. Damit die Kollektoren in Verbindung mit den Fenstern als durchgehendes Band wahrgenommen werden, sollen die Fenster nach außen in die Dämmebene versetzt werden, sodass sie bündig mit den Kollektoren in der Fassade sitzen. Darüber hinaus werden die Bänder mit einem allseitig umlaufenden Metallrahmen, das im unteren Bereich gleichzeitig als Fensterbank funktioniert.

Die Sammelkanäle verlaufen horizontal und müssen im Bereich der Fenster in die Dämmebene umgeleitet werden. Eventuell ist es notwendig, die beiden äußeren Kollektoren jeweils als Blindpaneele auszuführen, falls es nicht gelingt, den Sammelkanal umzuleiten.

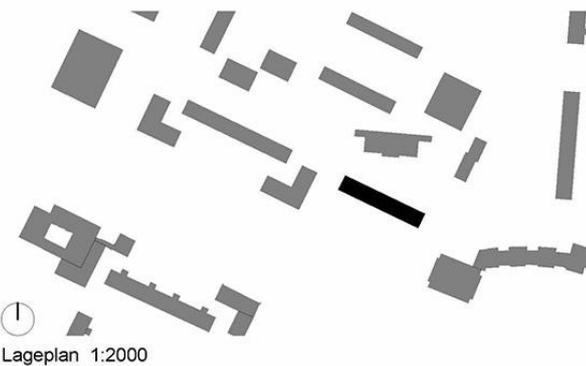
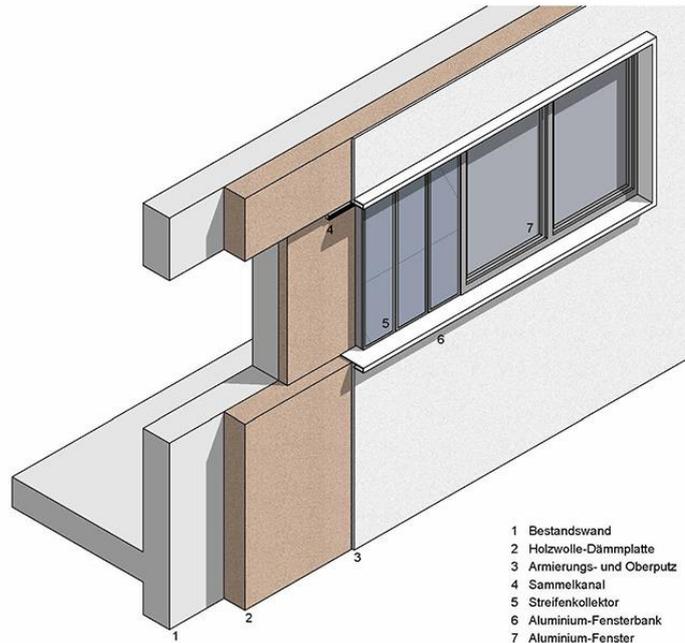
Insgesamt entsteht so eine zeitgemäße Fassade, die zwar konsequent aus dem bestehenden Fensterraster entworfen wurde, aber die vielerorts ungeliebten Plattenbauten dennoch in die heutige Zeit überführen kann.

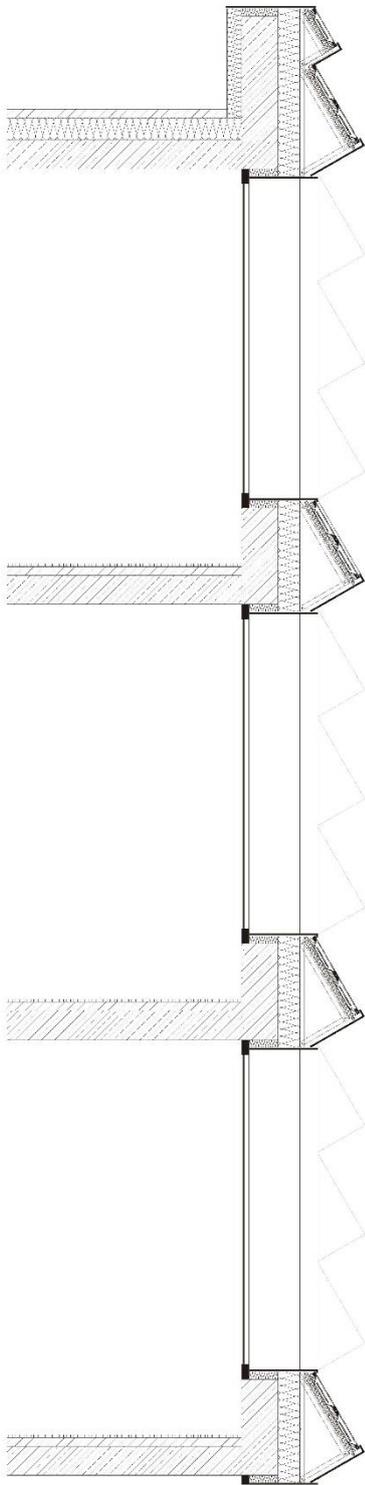
Aufbau:

Oberfläche(Material): Putz

Wandaufbau:
 Bestehende Außenwand
 Holzwolle-Dämmplatte - 10-20cm
 Armierungsputz mit Armierungsgebebe
 Oberputz und Farbansrich

Anteil Fenster:	23,37 % / m ²
Anteil opak:	72,15 % / m ²
Anteil Kollektor:	5,27 % / m ²





Fassadenchnitt 1:20



Fassadenansicht 1:20

Abbildungen 13 - 14: Seminarentwurf – Zhitao Cong/ IBK2

Streifenkollektor in VHF

Beschreibung:

Um die klassische Ordnung zu erhalten, betont diese Fassader die horizontale Linien. Durch die schräge Stellung von Kollektor passt die Einheit von Kollektor dem Modul der Fassade. Gleichzeitig können die Leute auf der Straße nur die Steinplatte sehen.

Diese Bauweise ist gleich effizient in 10 Monaten jedes Jahr wie normale vertikale Stellung der Kollektor, aber 12% der Kollektor sind reduziert.

Aufbau:

Oberfläche(Material): Aluminiumplatte, Kollektor

Wandaufbau:

Schicht 1: Steinplatte, Kollektor

Schicht 2: bituminöse Dickbeschichtung

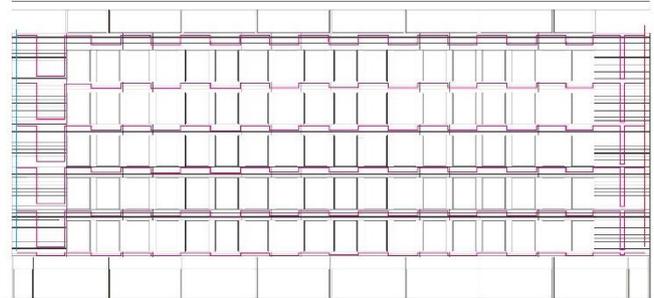
Schicht 3: Wärmedämmung

Schicht 4: Trägende Schale, Beton

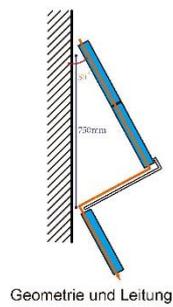
Anteil Fenster: 45% / m²

Anteil Aluminium: 26% / m²

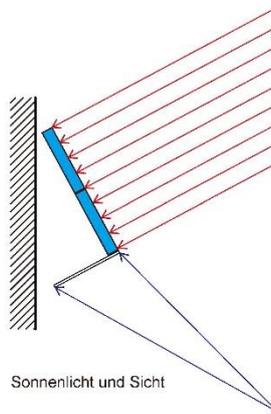
Anteil Kollektor: 29% / m²



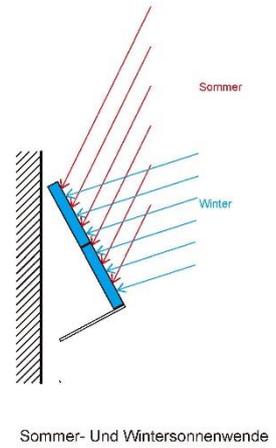
Kollektor-Leitung



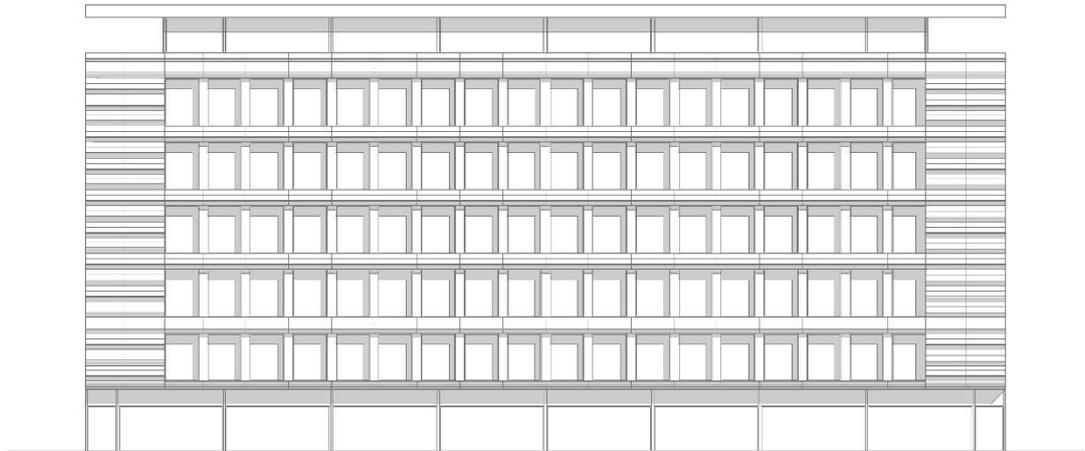
Geometrie und Leitung



Sonnenlicht und Sicht



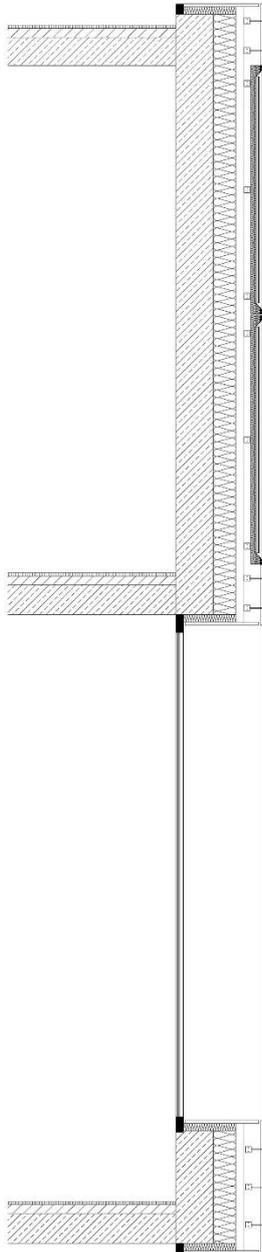
Sommer- Und Wintersonnenwende



Ansicht 1:150



Fassadenschnitt 1:20



Fassadenchnitt 1:20



Fassadenansicht 1:20

Abbildungen 15 - 16: Seminarentwurf – Zhitao Cong/ IBK2

Streifenkollektor in VHF

Beschreibung:

Bei dieser Fassade betone ich vertikale Linien. Durch den Kontrast zwischen der Verglasung und Kollektor erhöht sich der Rhythmus der Fassade. Bei horizontaler Linien benutze ich die helle Steinplatte, um ihre Wichtigkeit zu reduzieren. Die ganze Fassade ist ungleichmäßig. Deshalb zeigt sie mehr Dynamik.

Durch diesen Versuch können wir sehen, dass die Energiesparung nicht mit der Schönheit widersprüchlich ist. Durch die geeignete Bedienung können die Kollektor als die Dekoration der Fassade, sich mit dem ganzen Stil zu vereinen.

Aufbau:

Oberfläche(Material): Steinplatte, Kollektor

Wandaufbau:

Schicht 1: Steinplatte, Kollektor

Schicht 2: bituminöse Dickbeschichtung

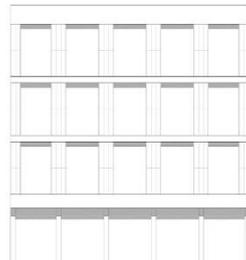
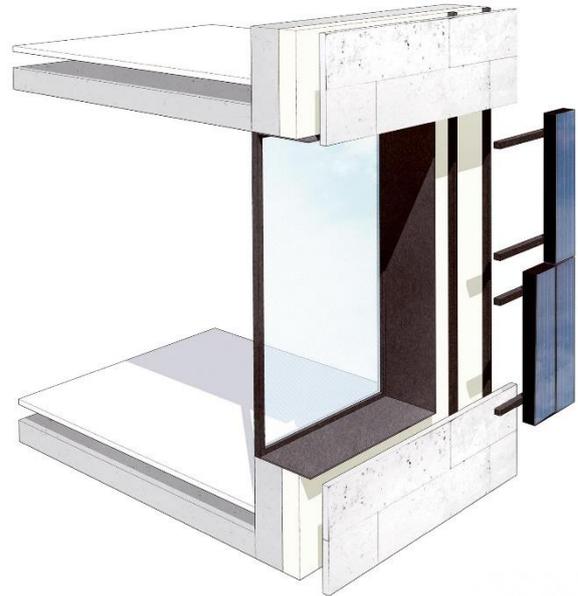
Schicht 3: Wärmedämmung

Schicht 4: Trägende Schale, Beton

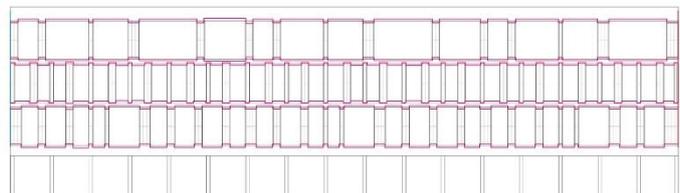
Anteil Fenster: 44% / m²

Anteil Steinplatte: 20% / m²

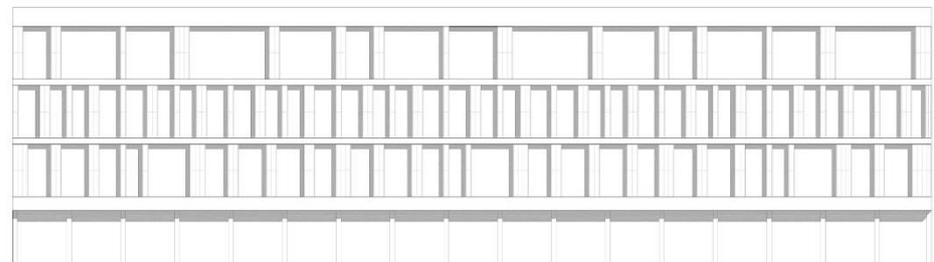
Anteil Kollektor: 36% / m²



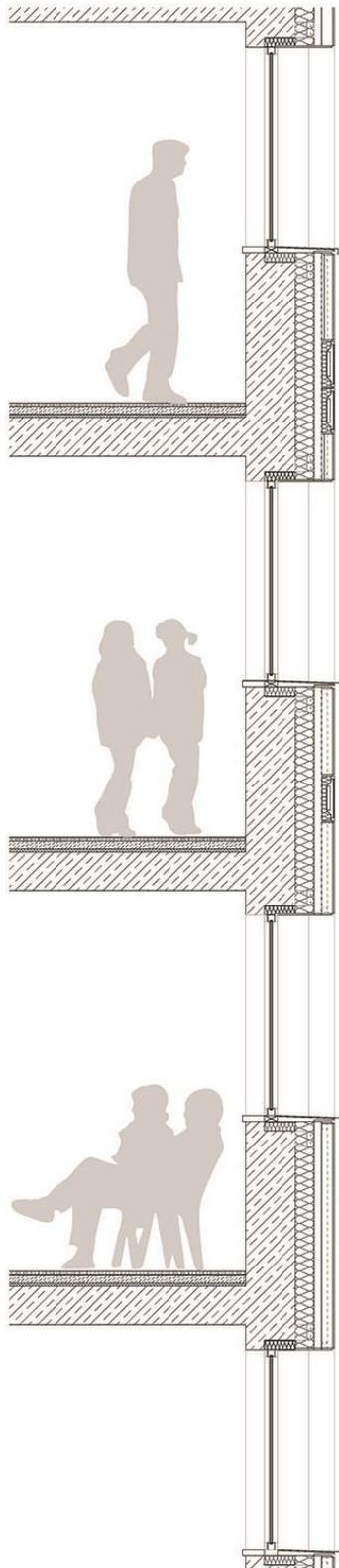
Ansicht 1:200



Kollektor-Leitung



Ansicht 1:200



Fassadenschnitt 1:20



Fassadenansicht 1:20

Abbildungen 17 - 18: Seminarentwurf – Jonas Cziki/ IBK2

Streifenkollektor im VHF der Max Kade Wohnheim

Beschreibung:

Die bestehende Fassade des Max Kade Wohnheims verstärkt die horizontale Aufteilung der Geschossebenen. Diese Aufteilung sollte durch die freie Anordnung von solarthermische Kollektoren aufgelöst werden um die Höhe und Vertikalität hervorzuheben. Die strenge Vertikaleaufteilung der neue Fassade ermöglicht den Integration der Kollektoren in einer harmonischerweise mit die restlichen Fassadenanteile. Mit einen diagonalen Riss in der gesamte Fassade, gewinnt das Gebäude durch die Prägnanz und Kontrast der Kollektoren eine bildhafte Komposition. Die ständige Verdichtung der Kollektoren in Richtung der zenitale Diagonale führt zu einen weicheren Übergang zwischen die kontrastierende Oberflächen.

Um eine glatte und langlebige Fassade zu erschaffen kommen HPL-Platten zum Einsatz, die hohe Witterung- und Einstrahlungsbeständigkeit aufweisen. Gekoppelt mit die Ausführung in den Farbton der bestehende Fassade, bekommt das Wohnheim eine moderne und umweltfreundliche Erfrischung.

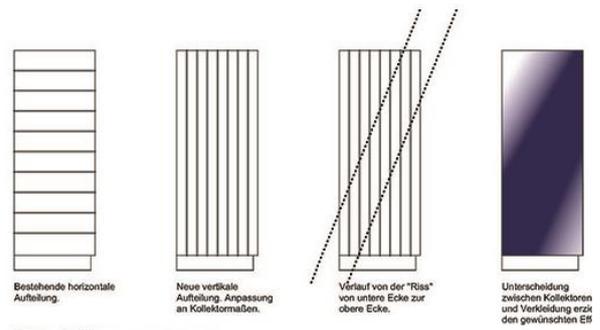
Aufbau:

Oberfläche(Material): HPL-Platten in Großformat

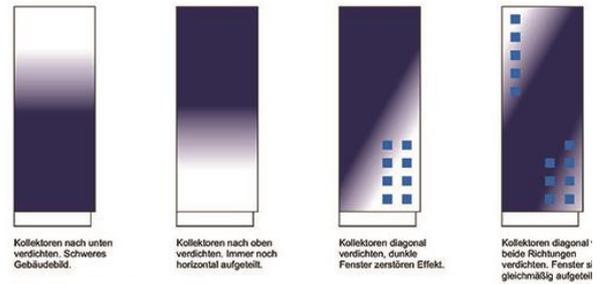
Wandaufbau (von Innen nach Außen):
 Rohbau aus Stahlbeton
 Wärmedämmung
 Abdichtung
 Luftschicht und Unterkonstruktion
 Heat-Pipe Kollektoren
 Hochdruck-Laminat Platten

Süd- und Westfassade

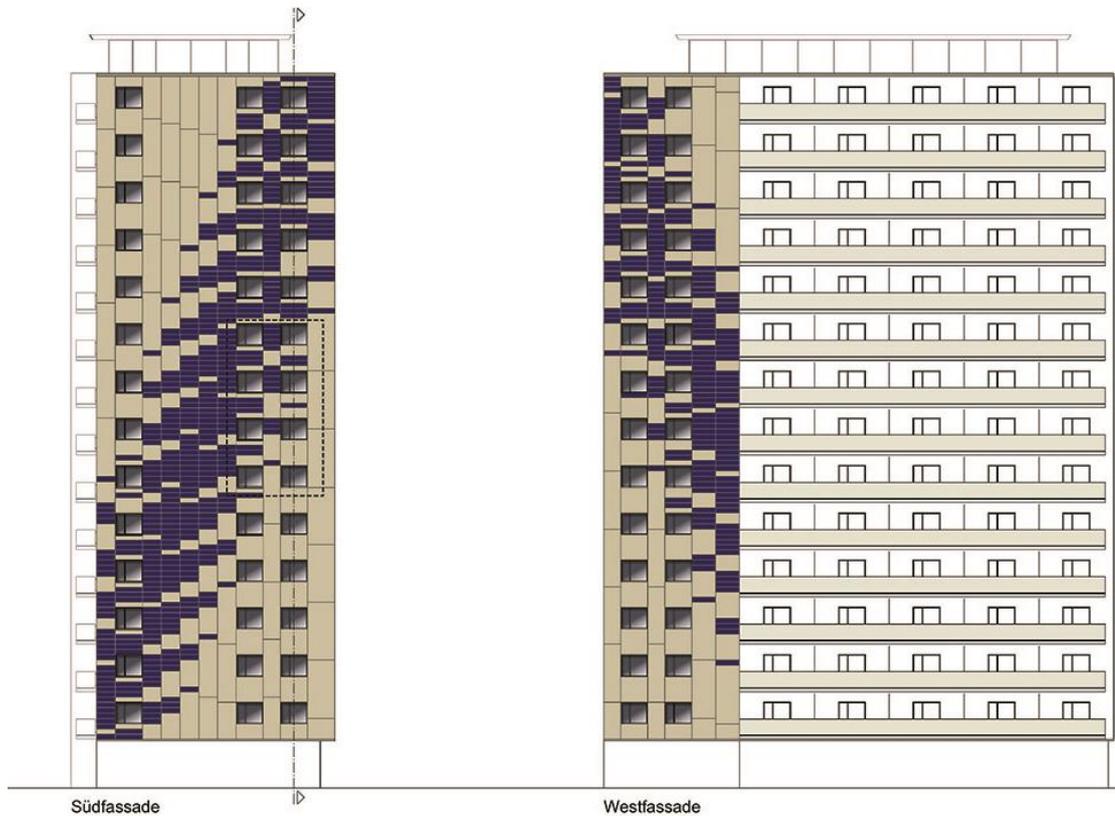
Gesamtfläche:	1740 m ²	
Anteil Fenster:	280 m ²	16% / m ³
Anteil opak:	1460 m ²	83% / m ³
Anteil Kollektor:	250 m ²	14% / m ³

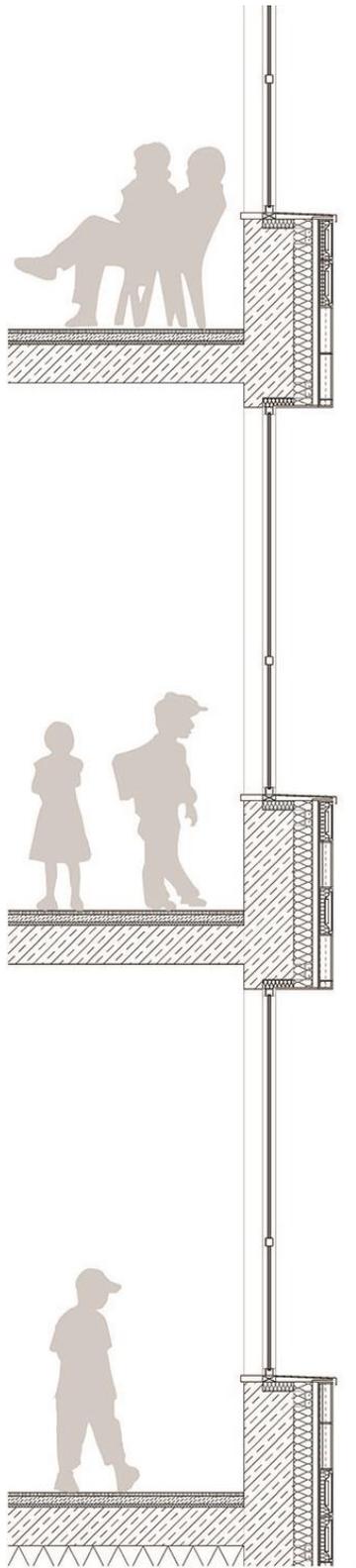


Entwicklungsprozess

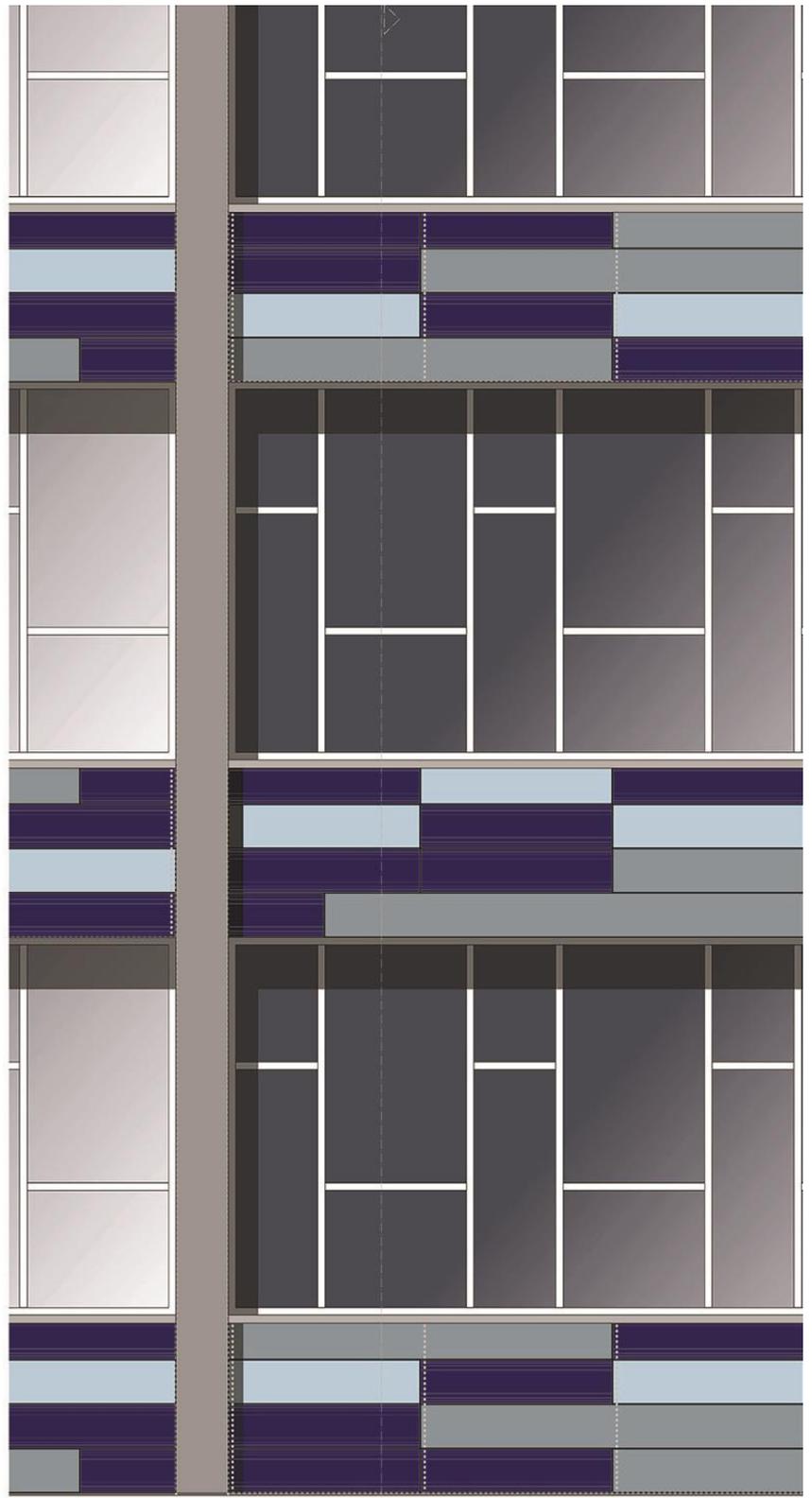


Verdichtungs Varianten





Fassadenschnitt 1:20



Fassadenansicht 1:20

Abbildungen 19 - 20: Seminarentwurf – Jonas Cziki/ IBK2

Streifenkollektor im VHF der Wilhelms Gymnasium

Beschreibung:

Eine Besonderheit in der Fassade des Wilhelms Gymnasiums ist zum Teil die spielfhafte Aufteilung der Verglasungen, die mit verspringende Horizontalelemente einen Aufbrechung der strengen Gliederung darstellt. Diese Aufbrechung sollte auf die Brüstungselemente unterhalb der Verglasungen weitergeführt werden, eben durch die Anordnung von solarthermische Kollektoren in Wechselhafterweise mit farbigen Aluminiumpanellen die die gleiche Höhenmaße wie die vorgegebene Kollektoren. Die blautönige Panelen sollen sich mit die Kollektoren harmonieren und sich nur leicht von der Oberflächenoptik von die verglaste Kollektoren unterscheiden.

Diese Zusammenspiel von Verkleidung und Kollektoren werden als gesamtes Element ausgebildet, die in vier verspiegelte Varianten möglich sind. Die Sammelkanäle verlaufen in jeden Element nach dem gleichen Raster, und jedes Brüstungselement hat dann ihren eigenen Anschlüssen an die Hauptsammelkanäle die dann entlang die hinausragende Stahlbetonstützen führen angeschlossen.

Die anderen Fassadenanteile wurden mit die gleichen Aluminiumpanellen ausgebildet, aber in eine hell graue Variante was einen Kontrast zu das spielfhafte Verglasungsanteil darstellt. So umrahmt sich die Kollektorfassade seitlich mit einer glatte, saubere Fassade, sowie oberhalb durch die durchlaufende Attikafläche. Mit die fassadenintegrierte Kollektoren soll die Warmwassererzeugung des Gymnasiums abgedeckt sein. Die spielfhafte Fassade sollte auch einen angenehmes Außenbild für die Jugendliche, die Lehrpersonen, und das Gymnasium selbst darstellen.x

Aufbau:

Oberfläche(Material): Verglaste Kollektoren und Aluminiumpanellen.

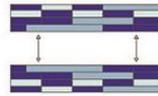
Wandaufbau (von Innen nach Außen):
 Rohbau aus Stahlbeton
 Wärmedämmung
 Abdichtung
 Luftschicht und Unterkonstruktion
 Elementkasten
 Heat-Pipe Kollektoren
 Aluminiumpanellen

Südfassade

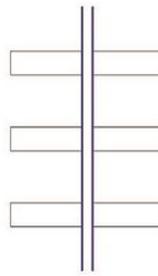
Gesamtfläche	760 m ²
Verglasteflächen	335 m ²
Opakefflächen	425 m ²
Kollektorflächen	75 m ²
Anteil Fenster:	44% / m ²
Anteil Geschlossen:	56% / m ²
Anteil Kollektor:	1% / m ²



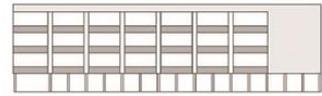
Wahl der Farben die mit der Kollektor harmonieren.



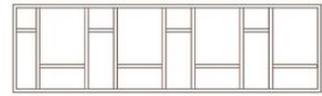
Verspiegelung der Brüstungselement um Varianten zu erzeugen.



Anordnung der Brüstungselemente an Sammelkanäle.



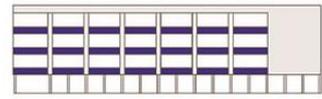
Bestandsfassade mit strenge Aufteilung.



Prägnante Fensteraufteilung, wechselfpiel der horizontale Elemente.



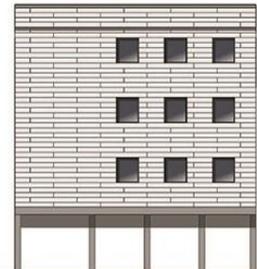
Ursprüngliche Anordnung der solarthermische Kollektoren auf Brüstungselemente um die Fenstergestaltung in die gesamte Fassade weiter zu verspiegeln.



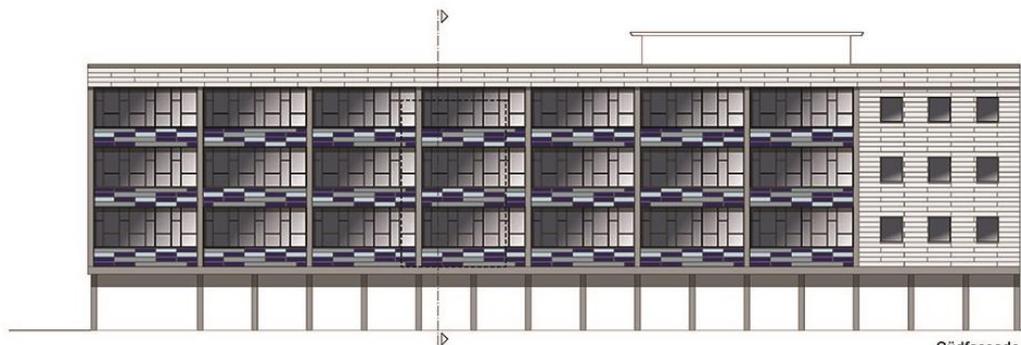
Weiterführung der Kollektorelemente auf alle Brüstungselemente um Kontrast zwischen den Kern und Umrandung zu verdeutlichen.

Brüstungselement

Entwicklungsprozess

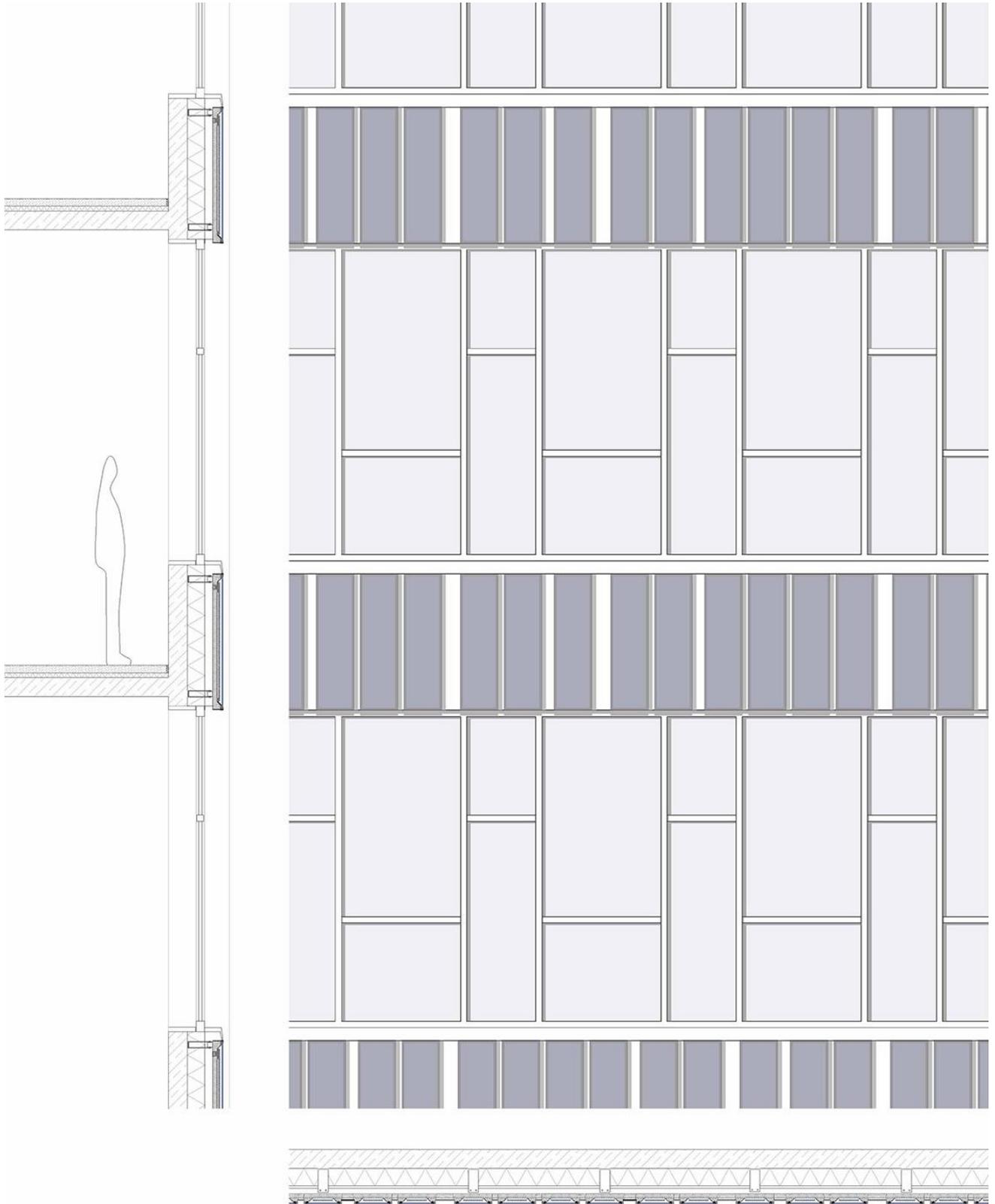


Westfassade



Südfassade

Ansicht 1:200



Fassadenschnitt 1:20

Fassadenansicht und -grundriss 1:20

Abbildungen 21 - 22: Seminarentwurf – Hanna Ronge/ IBK2

Streifenkollektor in der vorgehängt hinterlüfteten Fassade

Beschreibung:

Ziel bei der neuen Fassadengestaltung des Wilhelms Gymnasiums in Degerloch war es mit verschiedenen Ebenen zu arbeiten um so, durch die Verwendung der Streifenkollektoren, eine gewisse Tiefe bzw. Dreidimensionalität in der Fassade erzeugen zu können.

Angeordnet werden die Kollektoren an den Brüstungsfeldern der Südfassade. Diese waren ursprünglich schon vertikal gegliedert und diese Gliederung soll beibehalten werden. Sie wird durch die vertikale Anordnung der Streifenkollektoren an dieser Stelle wieder aufgenommen. Die Länge bzw. Höhe eines Kollektors entspricht hier der Brüstungshöhe von 110cm.

Die Kollektoren werden je Brüstungsfeld jeweils mit einem festgelegten Abstand zueinander angeordnet, der jedoch nicht immer der selbe sein muss und soll. Der Abstand kann zwischen den Werten von 5cm, 10cm und 15cm variieren. Da die Brüstungsfelder als unabhängige Einheit gesehen werden sollen, muss sich die Anordnung der Kollektoren innerhalb nicht am Fensterraster orientieren. So entsteht ein dynamischeres Fassadenbild.

Die Streifenkollektoren befinden sich jeweils in einer Ebene, wohingegen deren Zwischenräume eine Ebene zurück versetzt liegen. Diese sind mit hellem rückwertig lackiertem Glas abgedeckt. Angewendet wurde dazu das System der vorgehängt hinterlüfteten Fassade. Durch die unterschiedlichen Breiten der Glasplatten bildet sich im Zusammenhang mit den Kollektoren ein "Fugenbild". Das dadurch im Zusammenhang mit dem Licht entstehende Schattenspiel erzeugt eine gewisse dreidimensionale Struktur im Brüstungsbereich.



Aufbau:

Oberfläche(Material): transluzentes Glas

Wandaufbau:
 150mm *Ortbeton*
 140mm *Wärmedämmung (PU-Hartschaum)*
 180x40mm *Verankerungselement*
 20mm *Luftraum*
 40x40mm *Befestigungsschiene*
 80mm *Kollektor*

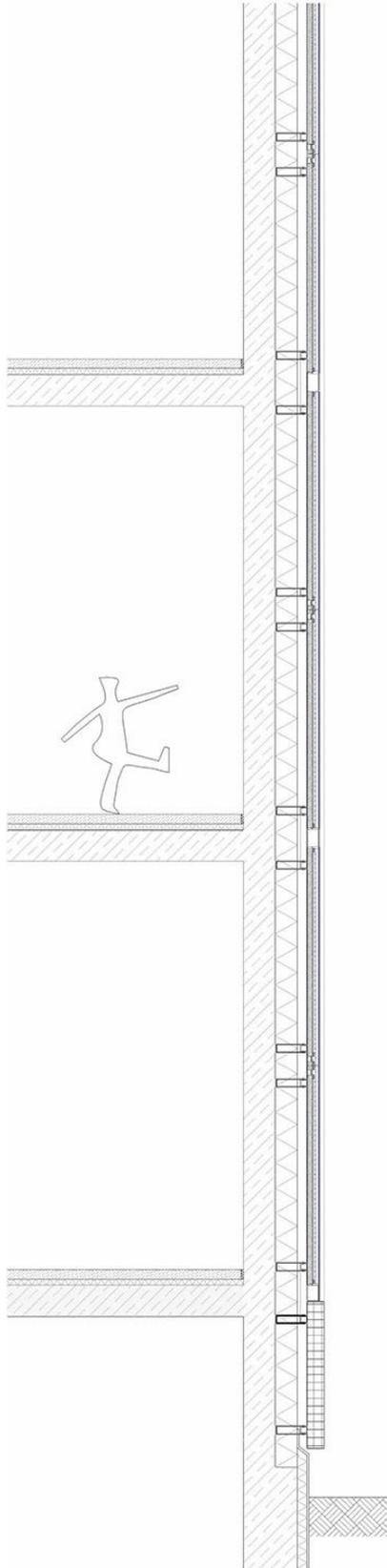
Anteil Fenster: 52 % / m²
 Anteil opak: 33 % / m²
 Anteil Kollektor: 15 % / m²

Weite bezogen auf eine, die abgebildete, Fassade

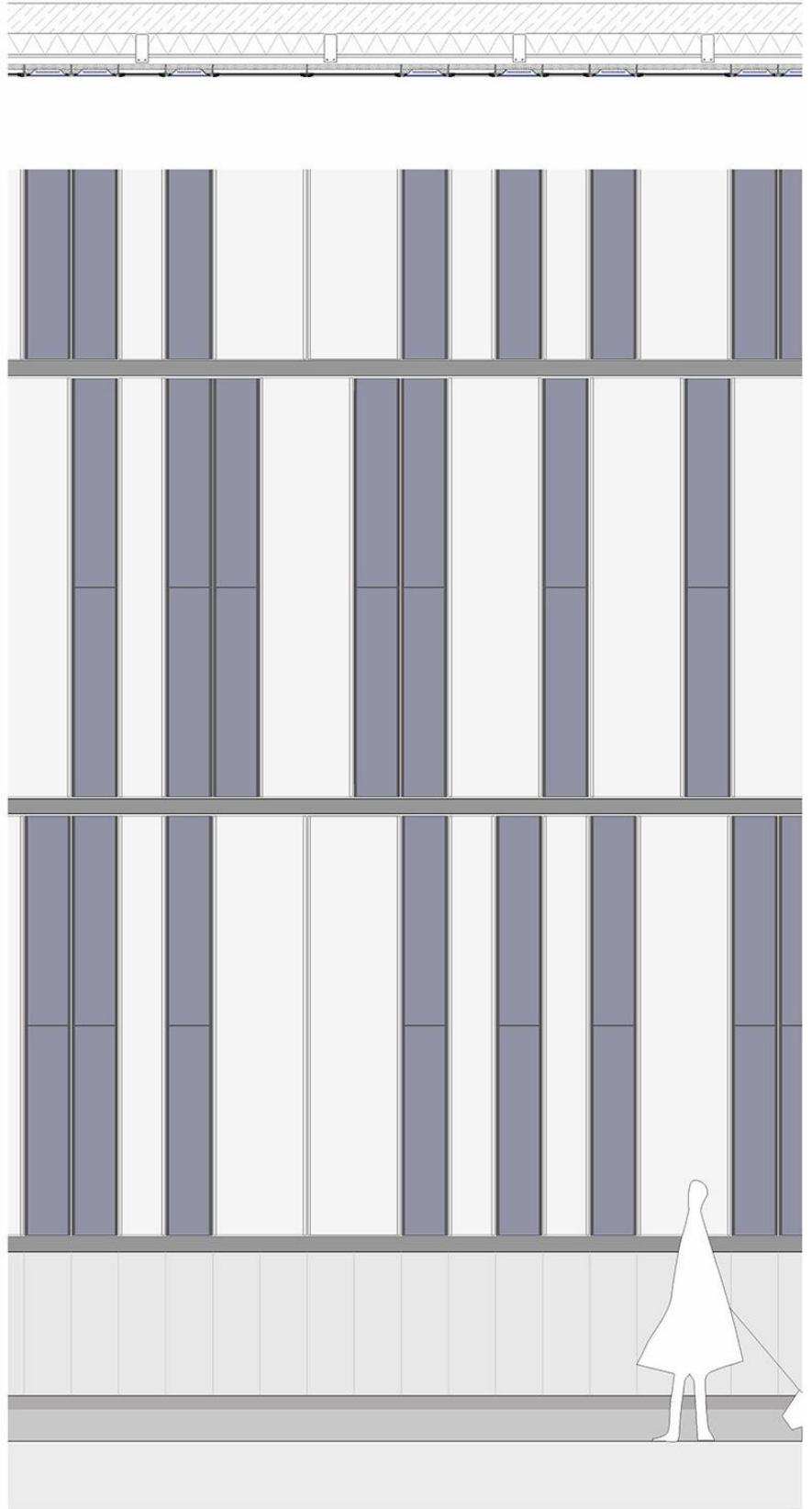


möglicher Verlauf Sammelkanäle

Ansicht 1:200



Fassadenschnitt 1:20



Fassadenansicht und -grundriss 1:20

Abbildungen 22 -23: Seminarentwurf – Hanna Ronge/ IBK2

Streifenkollektor in der vorgehängt hinterlüfteten Fassade

Beschreibung:

Die Intention beim Wohnblock in der Karl-Marx Allee in Berlin war es, Streifenkollektoren an einer Fassade ohne jegliche Gliederung durch Fenster oder ähnlichem, sinnvoll bzw. nach einem gewissen System anzuordnen. Dazu bietet sich die Süd-Ost-Fassade des Gebäudes an, die ohne Fenster ausgebildet ist.

Schon an der ursprünglichen Fassade konnte man die Geschossigkeit anhand der Untergliederung der Fassadenplatten ablesen. Diese Ablesbarkeit sollte beibehalten werden und dient als Anhaltspunkt für die neue Fassadengestaltung mit Streifenkollektoren.

Horizontale Streifen aus Aluminiumelementen sollen die Geschossigkeit weiterhin von außen ablesbar erscheinen lassen und teilen die Fassade in horizontale Abschnitte ein. Diese wiederum sind in sich vertikal gegliedert.

Als ein "Gliederungselement" dienen zwei übereinander stehende Streifenkollektoren mit jeweils einer Länge von 1,35m. Rastermaß ist dabei die Breite eines Kollektors mit 30cm. Innerhalb dieser Systemvorgaben lassen sich die Kollektoren nun beliebig anordnen. Die Felder zwischen den Streifenkollektoren werden dann durch Blindpaneelen mit Aluminiumabdeckung aufgefüllt. Für diese gilt eine Limitierung in ihrer Breite auf zwei Kollektorfelder. Es können jedoch auch mehrere dieser Paneele nebeneinander angeordnet werden.

Streifenkollektoren und Blindpaneelen befinden sich in der selben Ebene wie die horizontalen Streifen zur Gliederung der Geschosse. Angewendet wurde dazu das System der vorgehängt hinterlüfteten Fassade.



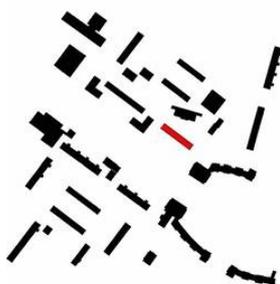
Aufbau:

Oberfläche(Material): Beton, Aluminium

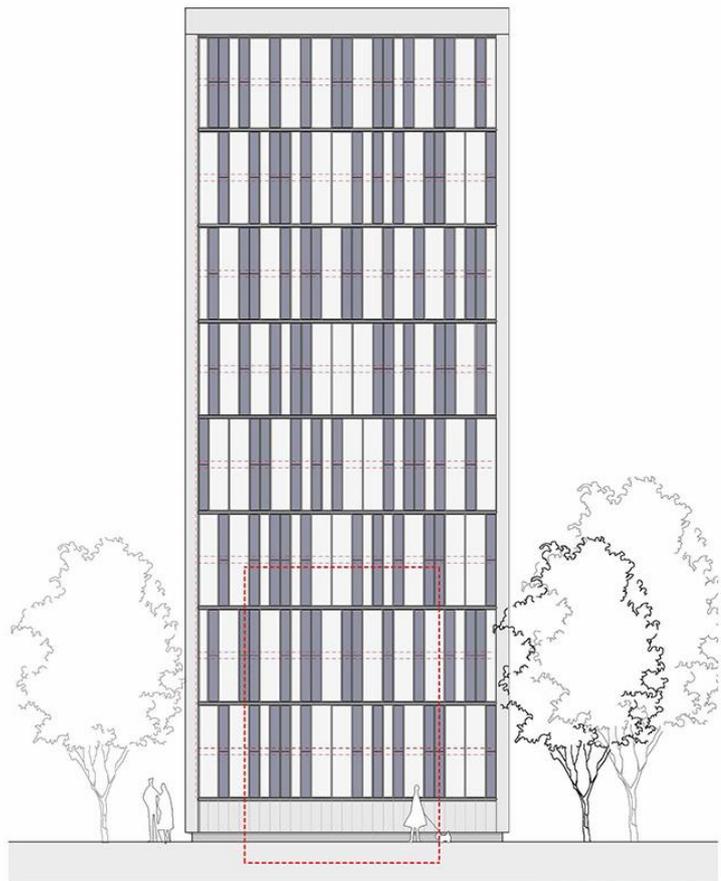
Wandaufbau:
 200mm Ortbeton
 140mm Wärmedämmung (PU-Hartschaum)
 180x40mm Verankerungselement
 20mm Luftraum
 40x40mm Befestigungsschiene
 80mm Kollektor / Aluminiumpaneel

Anteil Fenster: 0 % / m²
 Anteil opak: 70 % / m²
 Anteil Kollektor: 30 % / m²

Werte bezogen auf eine, die abgebildete, Fassade

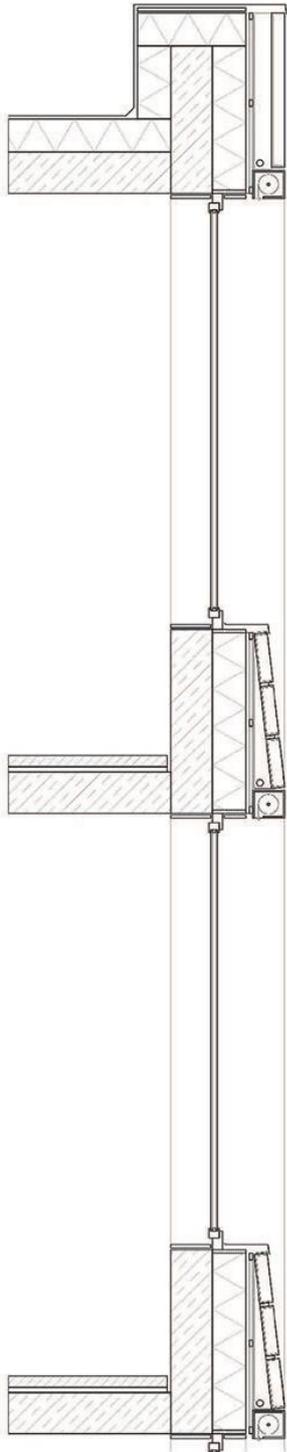


Schwarzplan 1:5000

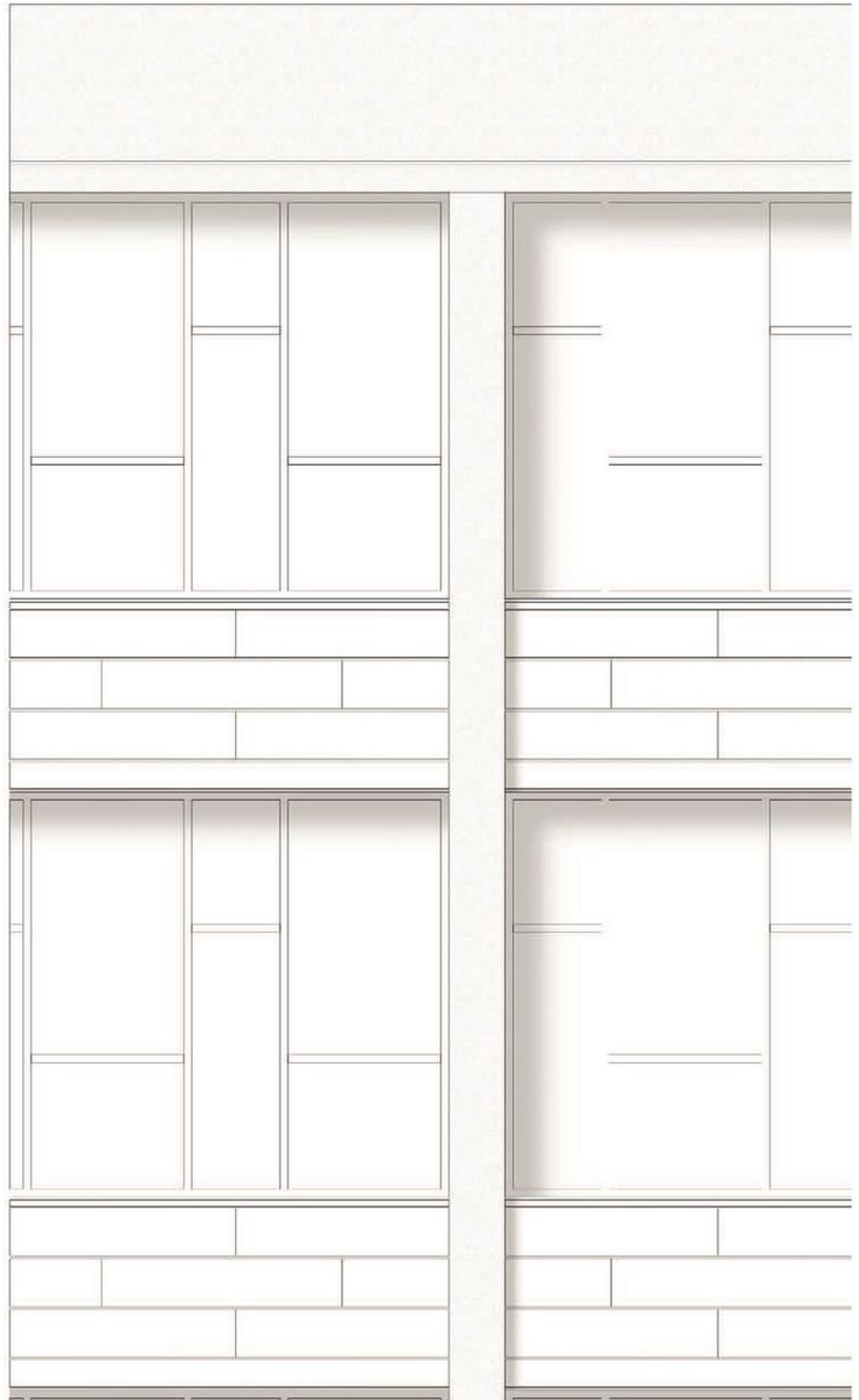
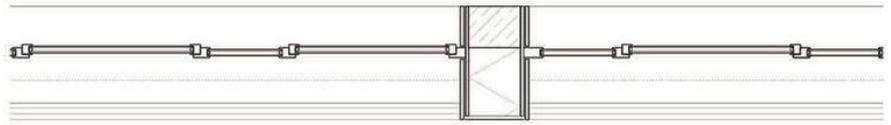


Ansicht 1:100

möglicher Verlauf Sammelkanäle



Fassadenschnitt 1:20



Fassadenansicht 1:20

Abbildungen 24 -25: Seminarentwurf – M. Janke, T. Muffler, H. Ronge

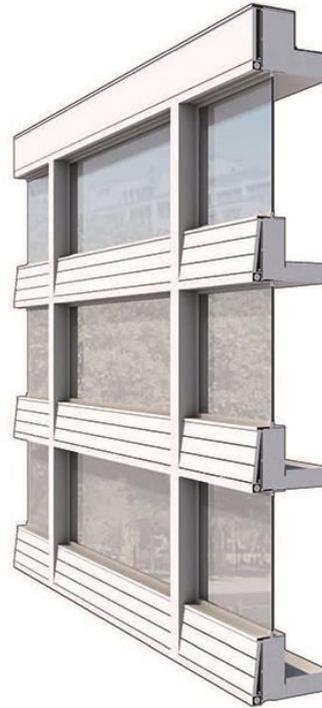
Streifenkollektor in der hinterlüfteten Fassade

Beschreibung:

Das zweite Beispiel zur gegebenen Aufgabe der Integration von Streifenkollektoren in die Fassade ist das Wilhelms Gymnasium in Degerloch. Durch seine direkte Südfassade gibt es hier zahlreiche Möglichkeiten der Energiegewinnung durch Sonneneinstrahlung.

Die Konzeptidee mit den angeschrägten Elementen wird hier aufgegriffen, allerdings auf ein hinterlüftetes System angewandt. Die existierende Betonstruktur, die den Fenstersturz verziert hat, wird dafür abmontiert und durch ein fertiges Element ersetzt, das nur noch in einer Montageschiene befestigt werden muss. Anders als in Karlsruhe ist das Fenster bereits bestehend, sodass das Element nur noch die Streifenkollektoren und den Sonnenschutz beinhaltet.

Durch ihre horizontale Ausrichtung wird den vertikal verlaufenden Fenstern eine Gegenrichtung gegeben, um bestehende gestalterische Merkmale nicht zu untergraben und dem stark horizontal ausgerichteten Gebäude in der neuen Achsrichtung nachzugeben. Durch die Ansträgung wird zudem Tiefe erzeugt, wodurch die Fenster stärker hervorgehoben werden.

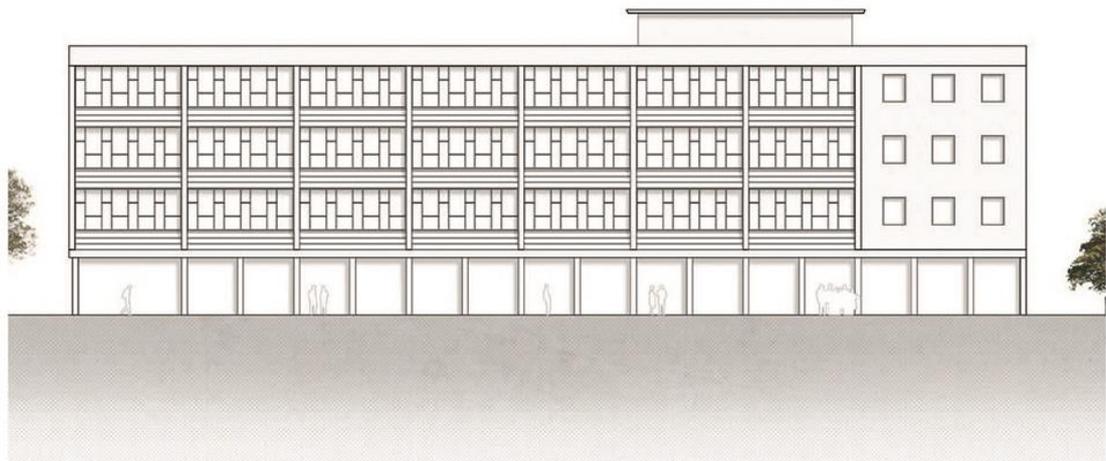


Aufbau:

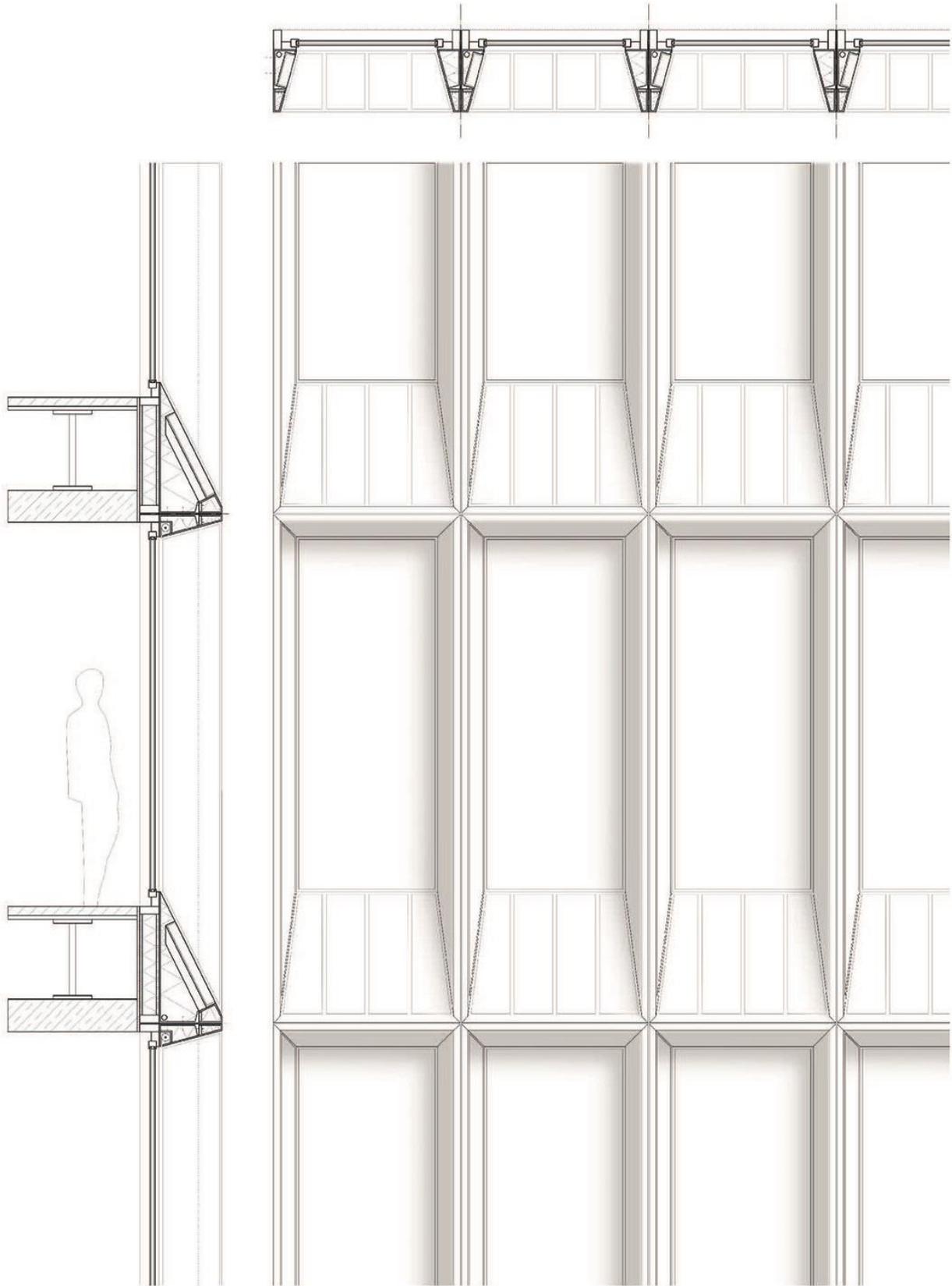
Oberfläche(Material): Hinterl.

Wandaufbau:
Stahlbeton
Dämmung
Lattung/Konterlattung
Streifenkollektor

Anteil Fenster: 60% / m²
Anteil opak: 15% / m²
Anteil Kollektor: 25% / m²



Ansicht 1:200



Fassadenschnitt 1:20

Fassadenansicht 1:20

Abbildungen 26 -27: Seminarentwurf – M. Janke, T. Muffler, H. Ronge

Streifenkollektor in der Elementfassade

Beschreibung:

Das erste Beispiel zur gegebenen Aufgabe der Integration von Streifenkollektoren in die Fassade ist das Rathaus in Karlsruhe. In einer Seitenstraße gelegen ist nur die Westfassade geeignet, um über Sonneneinstrahlung Energie zu gewinnen.

Konzeptidee ist die Fläche unterhalb des Fensters anzuschragen und mit Streifenkollektoren zu versehen. Ebenso werden die Zargen angeschragt und die nach Süden zeigende ebenso mit einem Kollektor versehen, um den Betrag in dieser schwierigen städtebaulichen Situation zu maximieren. Aufgenommen werden hierbei die Strukturen der bereits bestehenden seitlichen Schotten, die den Lichteintrag im Stockwerk erhöhen sollen. Durch die Anschragung wird dieses Konzept aufgenommen und weitergeführt.

Da das Tragwerk nicht in Fassadenenebene verläuft, sondern nach hinten springt, ist es möglich die Fassade als einzelne Elemente auszubilden, die vofabriziert auf der Baustelle nur noch montiert werden müssen. Die Fassade erhält dadurch eine homogene Wirkung.

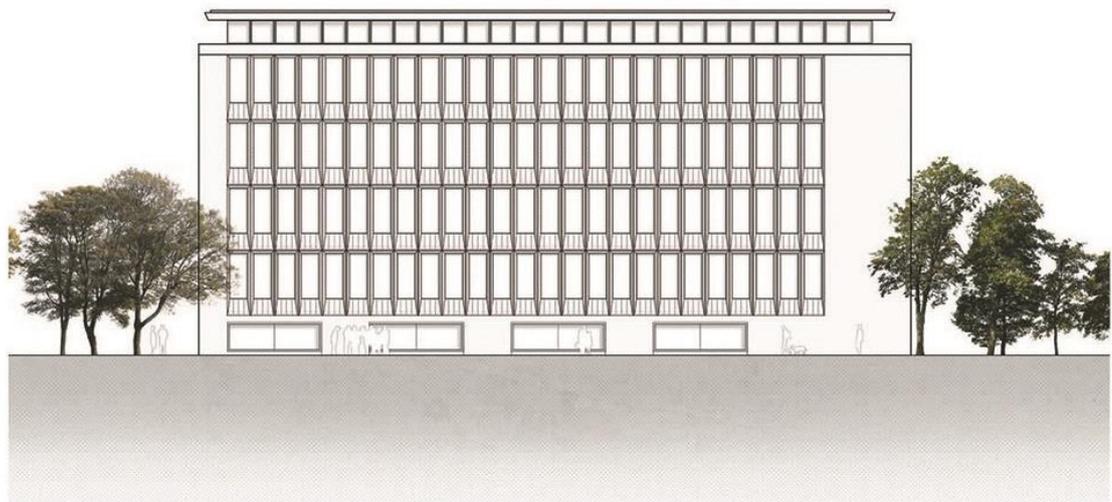


Aufbau:

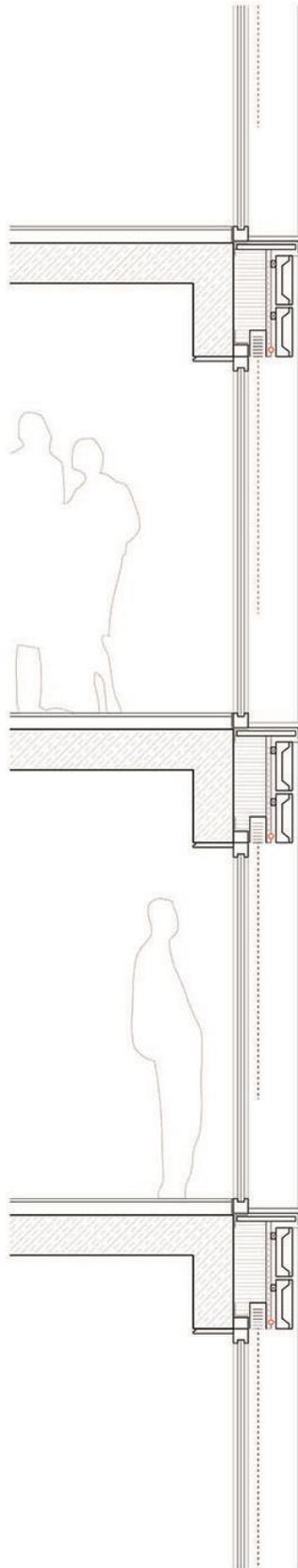
Oberfläche(Material): Element

Wandaufbau:
Fensterelement
Gedämmte Profile (Blech)
Eingelassene Streifenkollektoren

Anteil Fenster:	30% / m ²
Anteil opak:	50% / m ²
Anteil Kollektor:	20% / m ²



Ansicht 1:200



Fassadenschnitt 1:20



Fassadenansicht 1:20

Abbildungen 28 -29: Seminarentwurf – M. Janke, T. Muffler, H. Ronge

Hinterlüfteter Streifenkollektor

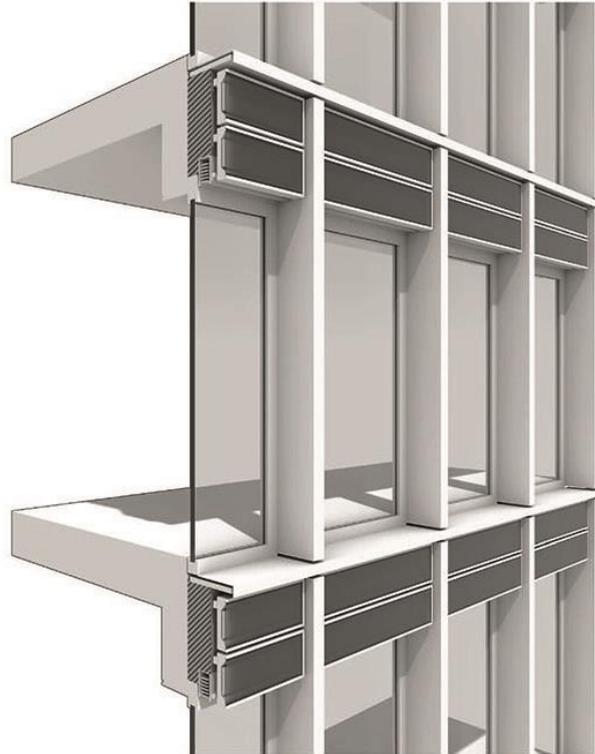
Beschreibung:

Die Südfassade des Technischen Rathauses in Karlsruhe besteht zu einem großen Teil aus einer vorgehängten Glasfassade, die im Brüstungsbereich durch opake Elemente ausgeführt wurde.

Im Zuge einer Sanierung wird vorgeschlagen den Brüstungsbereich durch eine bodentiefe Verglasung zu ersetzen. Gleichzeitig bietet es sich an, in den Bereichen der Geschossplatten hinterlüftete Streifenkollektoren vorzuhängen, die neben der Wärmedämmung ebenfalls einen mechanischen Sonnenschutz verblenden.

Die Streifenkollektoren spannen sich jeweils über die Breite eines Fensterelementes auf und bieten so dem bereits bestehenden Gestaltungsmittel der vertikalen Lisenen die Möglichkeit weiterhin von oben nach unten durchzulaufen.

Es ist denkbar, dass der vertikale Sammelkanal das Leitmedium im Hohlraum einzelner Lisenen nach unten abführt und zum Endverbraucher leitet.



Aufbau:

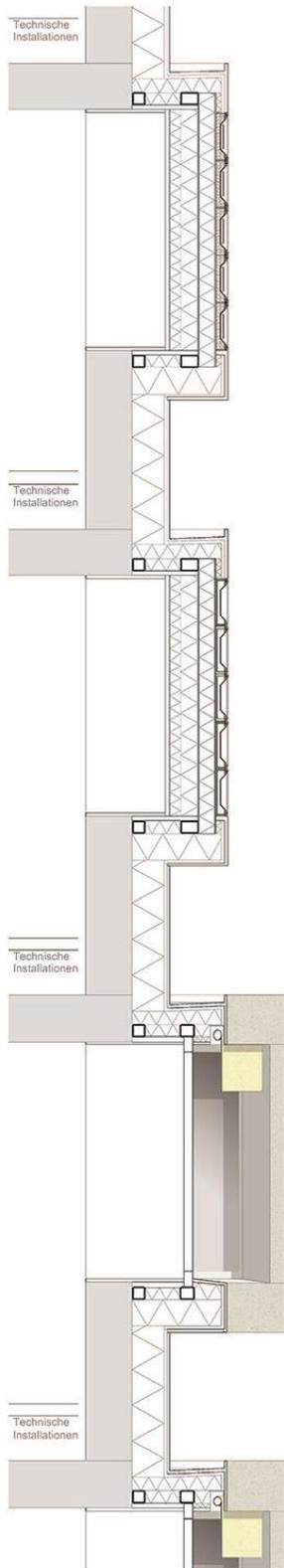
Oberfläche(Material): Vorhangfassade

Wandaufbau:
Stahlbeton
Dämmung
Fassadenelemente
Lisenen zum Sonnenschutz

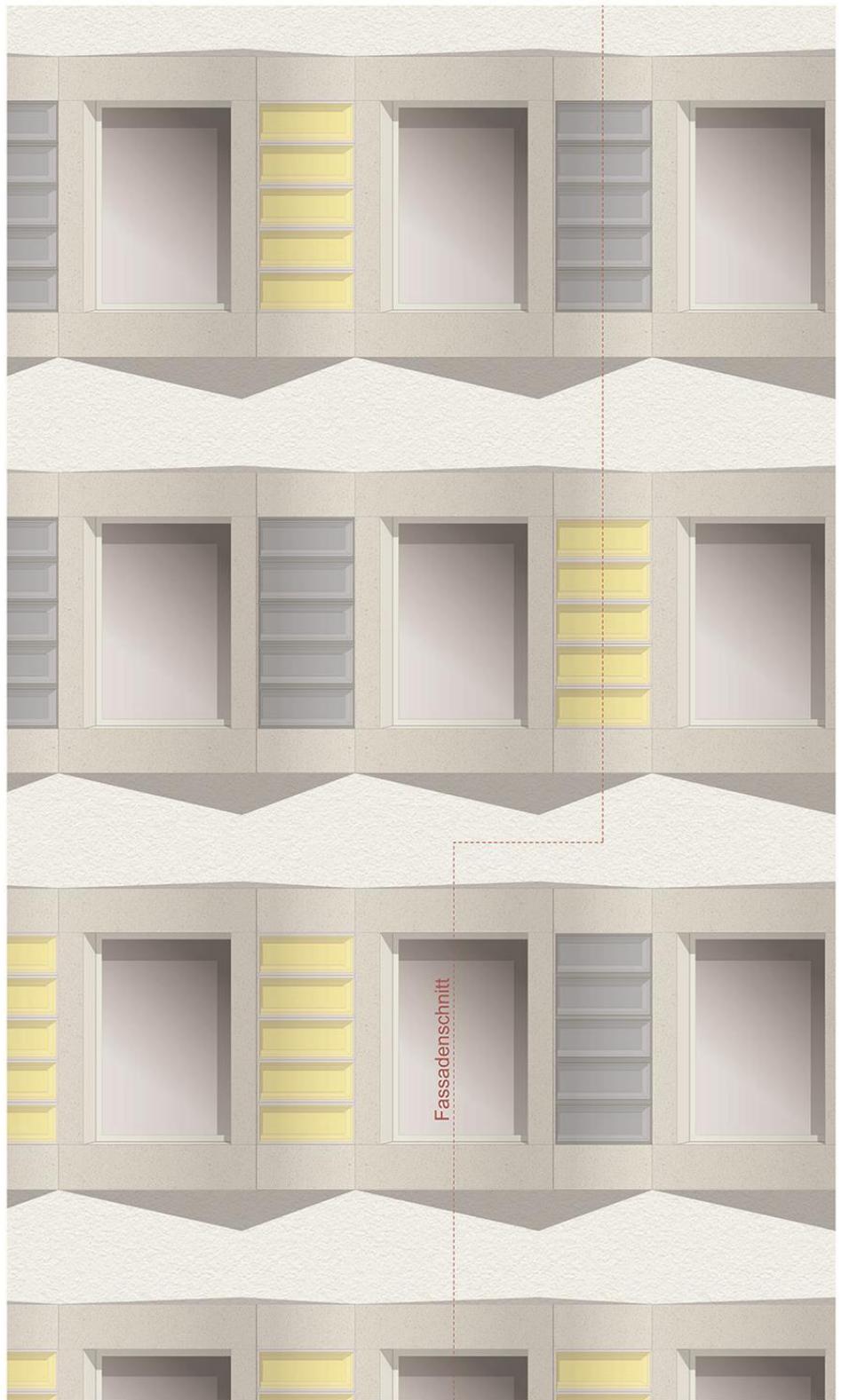
Anteil Fenster: 70% / m²
Anteil opak: 20% / m²
Anteil Kollektor: 10% / m²



Ansicht 1:200



Fassadenschnitt 1:20



Fassadenansicht 1:20

Abbildungen 28 -29: Seminarentwurf – Andre Haseneder

Streifenkollektor in der Elementfassade

Technisches Rathaus Karlsruhe

Das Technische Rathaus Karlsruhe befindet sich in der Lammstraße zwischen Kaiserstraße und Zähringerstraße. Es ist ein länglicher Baukörper in Nord-Süd-Ausdehnung, dessen Westfassade näher betrachtet werden soll. Für die Positionierung der Kollektoren wurden hier zunächst abstrahierte Flächenstudien erarbeitet die im Booklet näher durchgesehen werden können. Keine dieser ersten Varianten wurde jedoch weiterverfolgt. Da unter Einbezug des Nutzerverhaltens eine Westorientierung der Kollektoren nicht als sinnvoll zu erachten ist. Die Angestellten verlassen vermutlich am späten Nachmittag zwischen 16 Uhr und 18 Uhr das Gebäude, weshalb der Energiebedarf deutlich zurückgeht, während die Energiegewinnung mit der abendlichen Westsonne steigt. Energiebereitstellung und -bedarf zielen somit aneinander vorbei.

Stattdessen entstand die Idee der Westfassade dreieckige Erkerelemente aufzusetzen. Die eine Seite soll mit Kollektoren zur Energiegewinnung besetzt werden, die andere Fläche soll als Belichtungs- und Belüftungsfläche dienen. Die Dreieckselemente bestehen aus einer stählernen Unterkonstruktion, die zwischen und aufgedämmt wird. Die ca. 1,9m² großen Fenster weisen nach Nordwesten und bringen eine gleichmäßige Nordlicht-Atmosphäre in die Büroräume. Die Rahmenbreite der Metallverkleidung um das Fenster ergibt sich aus dem minimal notwendigen konstruktiven Aufbau.

Die zweite Fläche des Dreieck-Elements, die nach Süd-Westen orientiert ist, wird vollflächig mit Kollektoren bedeckt. Dazu werden fünf Kollektoren mit einer Länge von je 1,00m horizontal übereinander geschichtet. Dies führt dazu, dass eine waagrecht durchlaufende Sammelleitung im oberen Abschnitt des Elementerahmens genügt, die sich visuell als ein breites Band durchzieht. Von dieser Sammelleitung gibt es an jeder Kollektorfläche einen senkrechten Stich. Weil die resultierende Kollektorfläche der 85 Fassadenelemente überdimensioniert wäre, entsteht so die Möglichkeit einige der Kollektoren durch gefärbtes Glas zu ersetzen umso eine freiere Gestaltung zu ermöglichen. Hier zu sehen ist eine Verdichtung der gefärbten Gläser in den unteren Geschossen und eine Verdichtung der Kollektorflächen in den oberen Fassadenelementen. Da sich dort in den engen sich verschattenden Häuserschluchten ein längerer Licht- und damit Energieeintrag gewährleisten lässt.

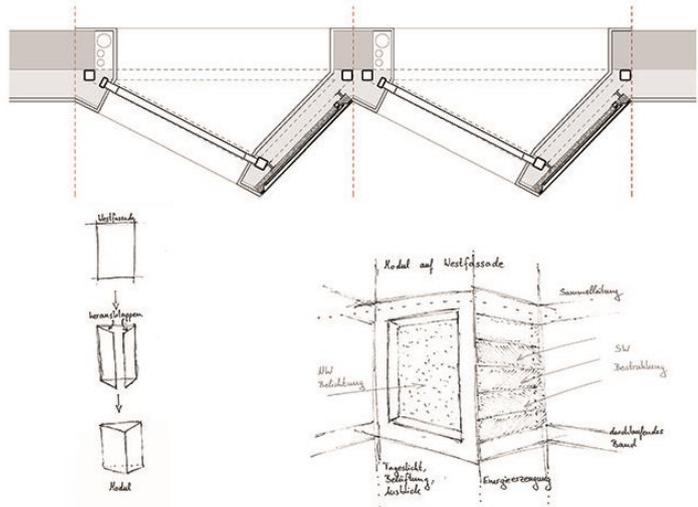
Insgesamt erhält die Fassade eine neue plastische Struktur, die zugleich die Kollektoranordnung und damit verbunden die Energiegewinnung optimiert.

Oberfläche (Material): Metallverkleidung

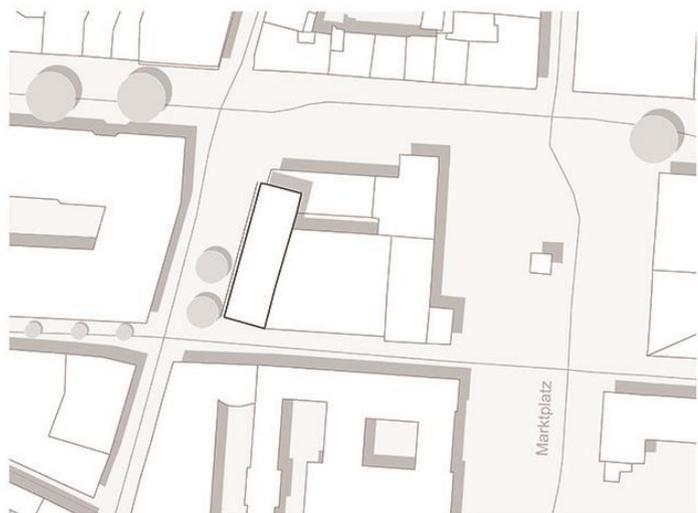
Wandaufbau:
 Stahlbetonbrüstung 300 mm
 Dämmung 200 mm
 Metallverkleidung 20 mm

Stahlunterkonstruktion 80 x 80 mm
 Kollektor 80 mm

Anteil Fenster: 30 % / m²
 Anteil opak: 63 % / m²
 Anteil Kollektor: 7 % / m²



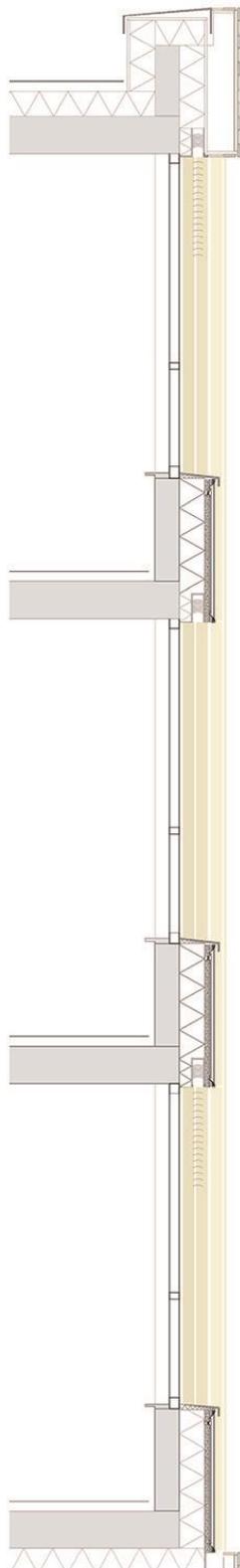
Konzeption



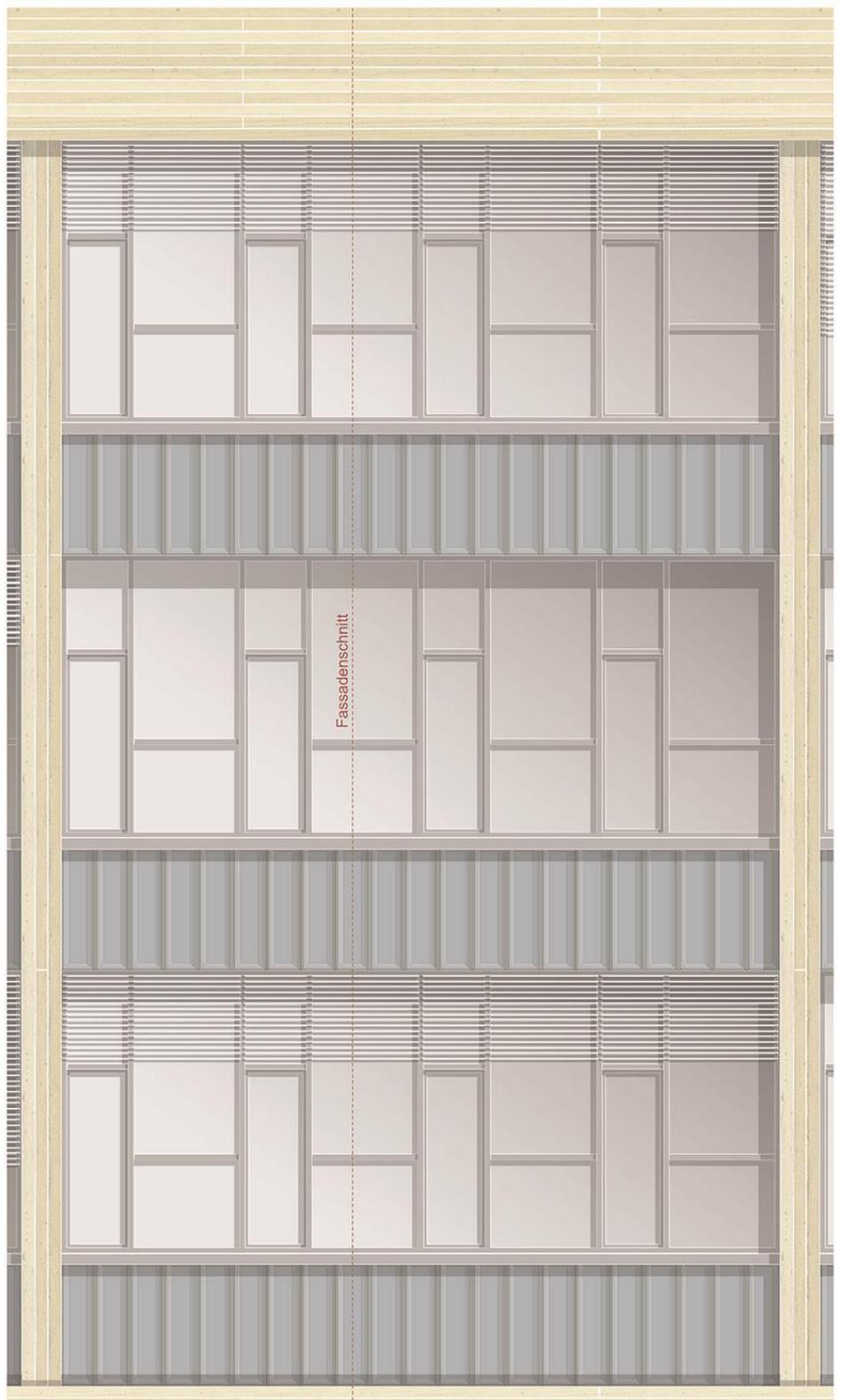
Lageplan 1:1000



Ansicht 1:200



Fassadenschnitt 1:25



Fassadenansicht 1:25

Abbildungen 30 -31: Seminarentwurf – Andre Haseneder

Streifenkollektor in der hinterlüfteten Fassade

Wilhelmsgymnasium, Stuttgart Degerloch

Das Wilhelmsgymnasium befindet sich zwischen der Bundesstraße 27, der Sigmaringer Straße und der Albstraße in Stuttgart Degerloch. Auf dem Campus stehen mehrere Gebäude; unter anderen das Schulgebäude, die Sporthalle und das neue Mensengebäude. Das Hauptgebäude des Schulkomplexes ist längsgerichtet, mit einer langen Nord- und Südfassade sowie zwei kurzen Fassaden im Osten und Westen. Die Südfassade gliedert sich in einen Sockelbereich, die Zone mit den Klassenzimmern und einen Dachaufsatz. Für die Platzierung der Kollektorfläche wurden im beigelegten Booklet verschiedene Optionen mit abstrahierten Flächen geprüft, mit folgendem Ergebnis:

Mit den Kollektoren sollen die Klassenräume in der Fassade stärker betont werden, um diese als zentrale Bausteine im Gebäude hervor zu heben. Die Positionierung der Kollektoren im Brüstungsbereich sorgt hier dafür, dass die Belichtung der Klassenzimmer nicht beeinträchtigt wird. Die Kanten der Kollektorfläche beziehen sich auf die Kanten der Fenster, diese erzielen dadurch klare Geometrien innerhalb der Fassade. In dem beiliegenden Booklet können zahlreiche Varianten zur Gliederung des Brüstungselements betrachtet werden. Da eine kleinteilige, differenzierte Anordnung die Fassade zergliedert, wurde eine vollflächige Kollektorfläche bevorzugt. Aufgrund der begrenzten Länge des Kollektors auf 1,00m - 1,20m und der Brüstungsfläche von ca. 6,45m x 1,20m, bietet es sich an die Kollektoren vertikal nebeneinander zu stellen. So wird nur eine einzige Sammelleitung je Abschnitt benötigt, die im oberen Ende des Kollektors (ca. die oberen 0,15m) horizontal vorbeiführt. Die übrigen opaken Flächen werden mit einer Holzlattung verkleidet.

In der Fassade entstehen schließlich drei Ebenen. Die vorderste Schicht wird durch die Vertikalen gebildet. Die Kollektoren sind zurückgesetzt. Noch eine Ebene weiter hinter den Kollektoren liegt die Fensterebene, sie ist am tiefsten zurückgesetzt. Die Fensterfront mit ihrer charakteristischen Unterteilung bleibt erhalten.

Auf die tragende Struktur wird die Dämmung aufgebracht. Darauf folgt entweder der Kollektor oder die Holzlattung. Unter den Kollektoren werden zudem Kästen für die Verschattung verborgen, sodass diese nur im ausgefahrenen Zustand in der Fassade wahrgenommen werden kann.

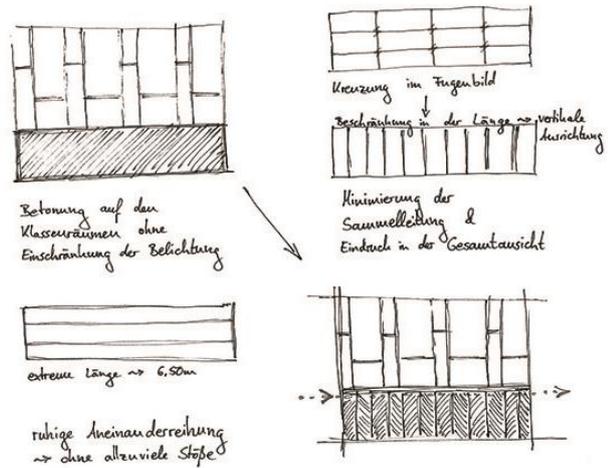
Insgesamt wirkt die Fassade mit der liegenden Lattung, der länglichen Fensterfronten (zusammengesetzt aus jeweils acht Scheiben) und den Kollektorbändern horizontal gestreckt und angenehm proportioniert.

Oberfläche (Material): hinterlüftete Holzlattung

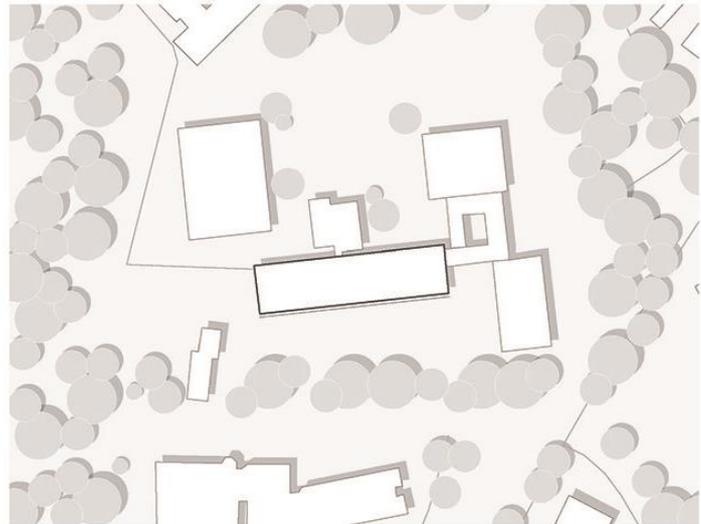
Wandaufbau:	
Stahlbetonbrüstung	200 mm
Dämmung	200 mm
Kollektor	80 mm

Holzunterkonstruktion	20 mm
Holzlattung	20 mm

Anteil Fenster:	38 % / m ²
Anteil opak:	46 % / m ²
Anteil Kollektor:	16 % / m ²



Konzeption



Lageplan 1:1000



Ansicht 1:200

3.1 Fazit aus dem Seminar

Sowohl aus ästhetischer als auch baukonstruktiver Sicht hat sich die Bündelung mehrerer Kollektoren beispielsweise im Bereich von Brüstungen oder als Fensterbänder vorteilhaft erwiesen. Eine Vielzahl von Anschlusspunkten an die bestehende Fassadenkonstruktion lassen sich dadurch minimieren. Die Erscheinung einer bestehenden Fassade wird weniger durch viele kleine Kollektorflächen gestört, sondern vielmehr durch wenige größere Flächen aufgewertet und beruhigt. Weitere Elemente wie ein Umfassungsrahmen oder Ausgleichspaneele dienen zur besseren Integration der Kollektorflächen an bestehende Fassaden und schaffen eine zusätzliche Akzentuierung in der Fassade über ihre Schmuckfarbe oder eigene Materialität.

Die Anordnung von einzelnen Streifenkollektoren in der Fassade kann im Gegensatz zum Zusammenfassen von Kollektorflächen zu ganz individuell gemusterten Fassadenbildern führen, wie beispielsweise einem „Pixelverlauf“ oder variierenden Streifenmustern. Bestehende Fensteröffnungen in der Fassade sind in der Regel nicht flächengleich mit der äußeren Fassadenebene und können daher zu Einschränkungen im Gesamtbild führen. Diese Art der Gestaltung mit dem „expressiven“ Einsatz des Streifenkollektors ist am besten im Bereich geschlossener Fassadenflächen beispielsweise an der Stirnseite von Wohngebäuden oder im Bereich von Industriebauten geeignet.

Insgesamt fällt auf, dass aufgrund der kleinen Abmessung der einzelnen Streifenkollektoren im Vergleich zu anderen marktüblichen Kollektoren eine relativ große Bandbreite an Gestaltungsmöglichkeiten in unterschiedlichen Fassadentypen ermöglicht wird.

4 Visualisierungen des Streifenkollektors nach ausgewählten Anwendungsfällen

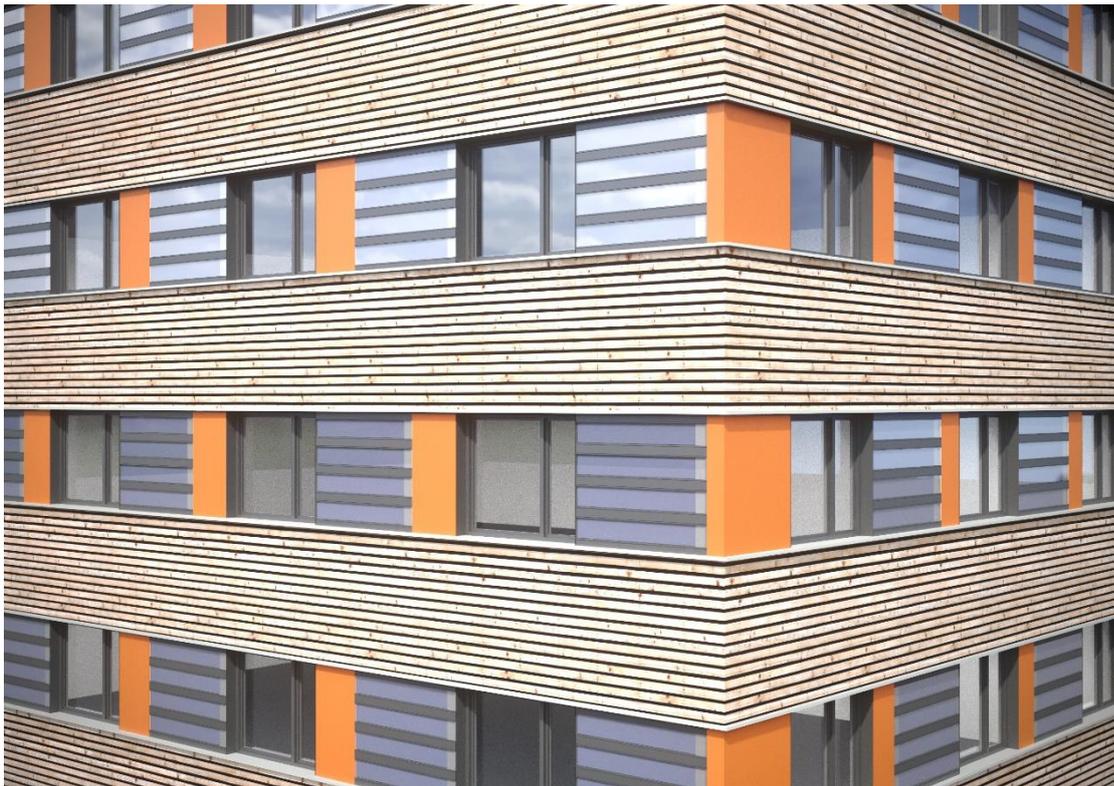
Basierend auf den Erkenntnissen des Seminars an der Universität Stuttgart wurden weitere Visualisierungen zu einzelnen typischen Fallbeispielen erstellt

- Visualisierung Szenario Bürogebäude



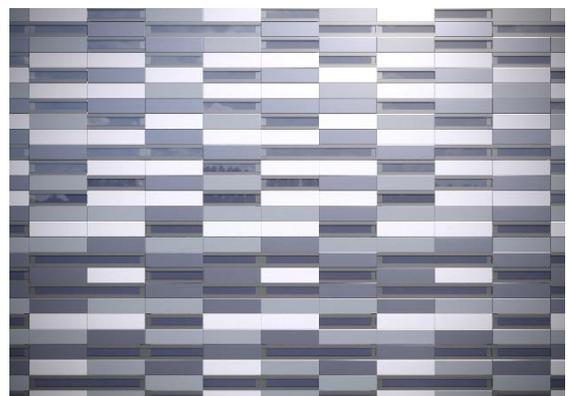
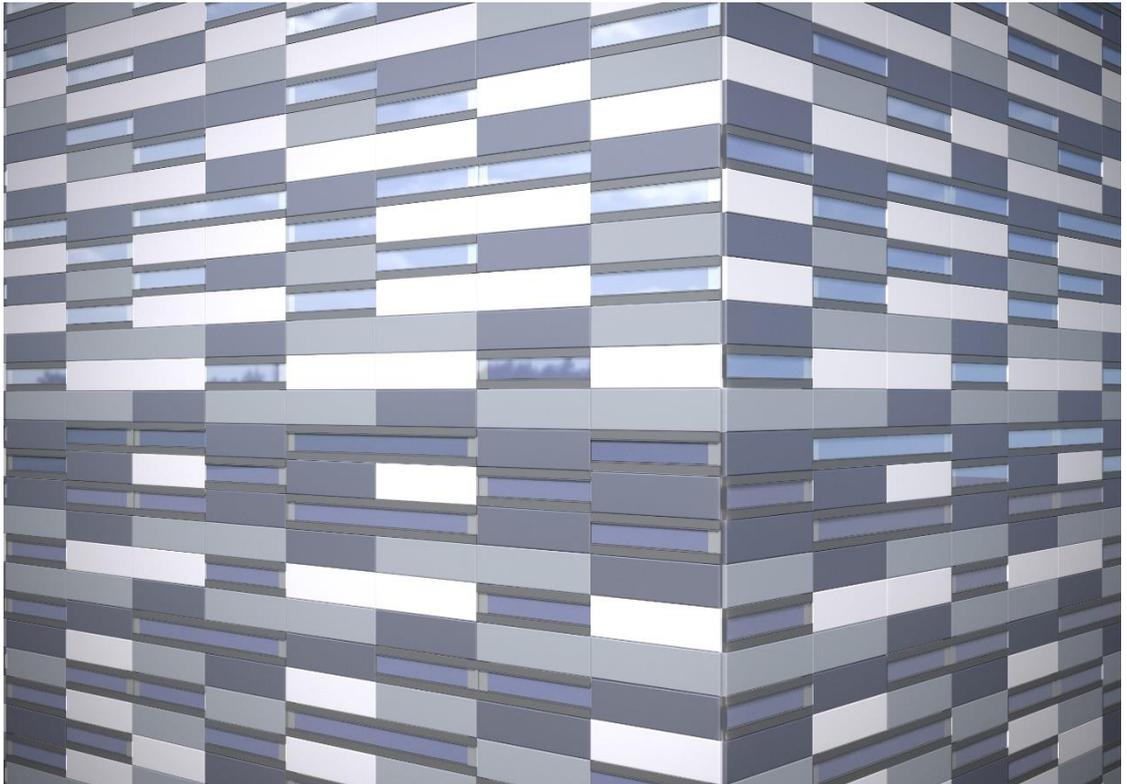
Abbildungen 32 -33: Visualisierung Streifenkollektor in einer Bürofassade/ IBK2

- **Visualisierung Szenario Wohngebäude**



Abbildungen 34 -35: Visualisierung Streifenkollektor in einer Wohnungsbaufassade/
IBK2

- **Visualisierung Szenario Industriegebäude**



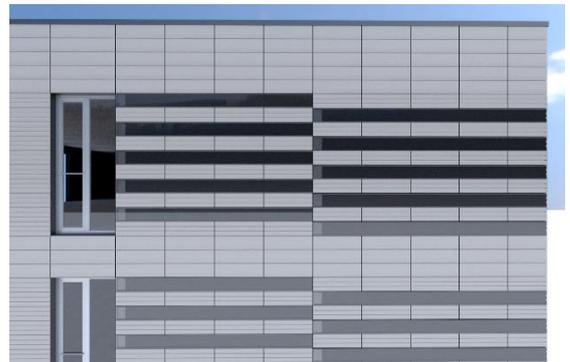
Abbildungen 36 -37: Visualisierung Streifenkollektor in einer Industriefassade/IBK2

- **Visualisierung Szenario Hotelgebäude, Variante 1**



Abbildungen 38 -39: Visualisierung Streifenkollektor in einer Hotelfassade/ IBK2

- **Visualisierung Szenario Hotelgebäude, Variante 2**



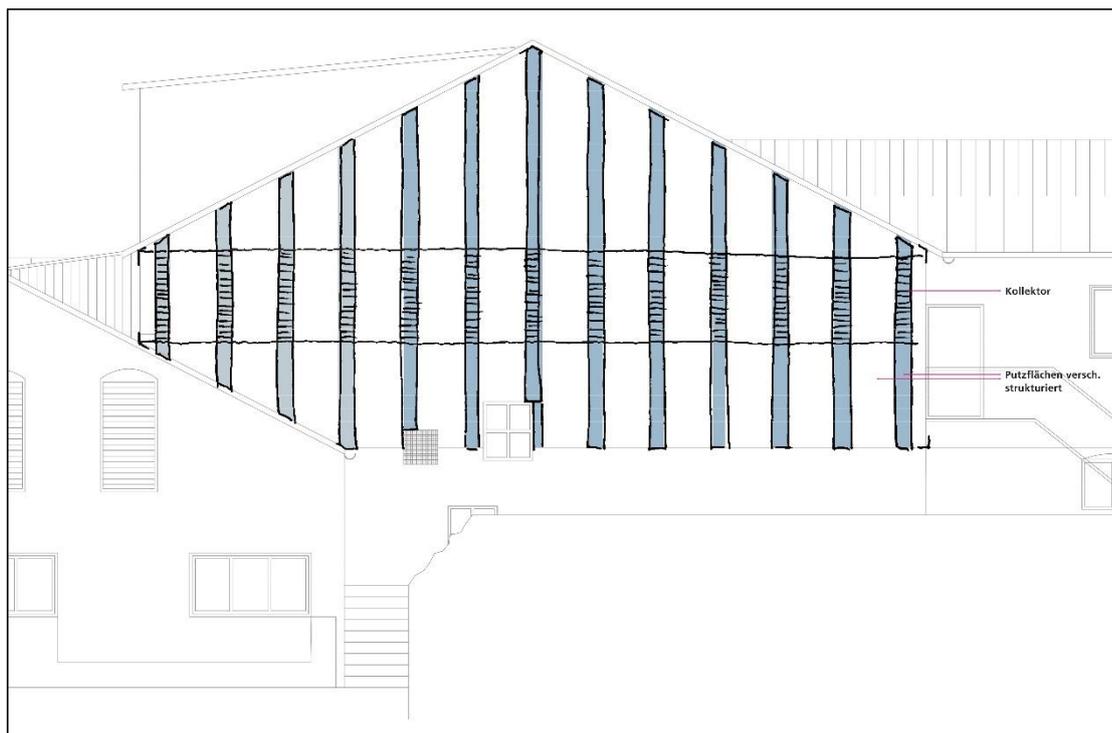
Abbildungen 40 -41: Visualisierung Streifenkollektor in einer Hotelfassade/IBK2

5 Skizzenentwurf Demonstratorfassade des Streifenkollektors

Als Testfassade, zur Entwicklung und Überprüfung des Streifenkollektors, wurde an einem Bestandsgebäude auf dem Gelände der DAW eine Demonstratorfassade verwirklicht.

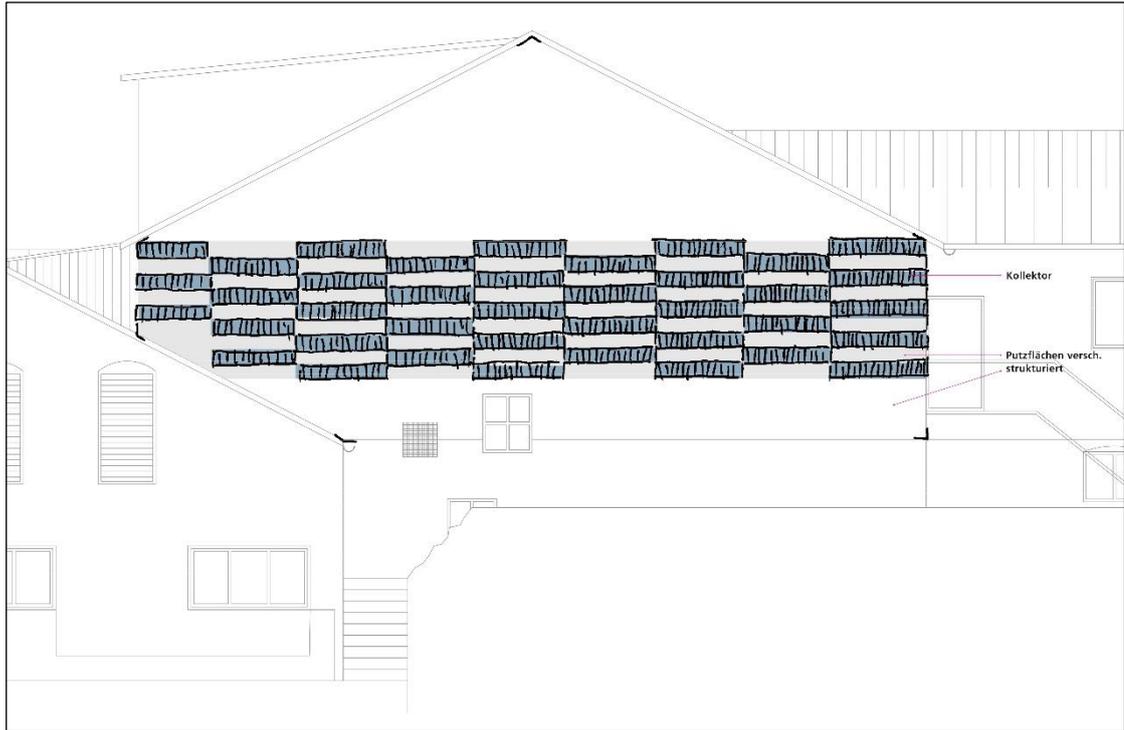
Unter allen Projektpartnern wurde dabei in einem iterativen Prozess eine Vielzahl an Entwürfen erarbeitet, diskutiert und eine auszuführende Version festgelegt. Die Entscheidung basiert auf der Bewertung von architektonischer Gestaltung, konstruktiver Umsetzbarkeit, Ertrag und Repräsentativität in Bezug auf die möglichen Variationen des solarthermischen Streifenkollektors (Länge, Orientierung, Abstand etc.) und dessen Fassadenintegration im Zusammenspiel mit anderen Systemen.⁶

Als erste Konzept- und Ideenfindungen für die Demonstratorfassade diente der Skizzenentwurf, der am IBK2 entstanden ist.

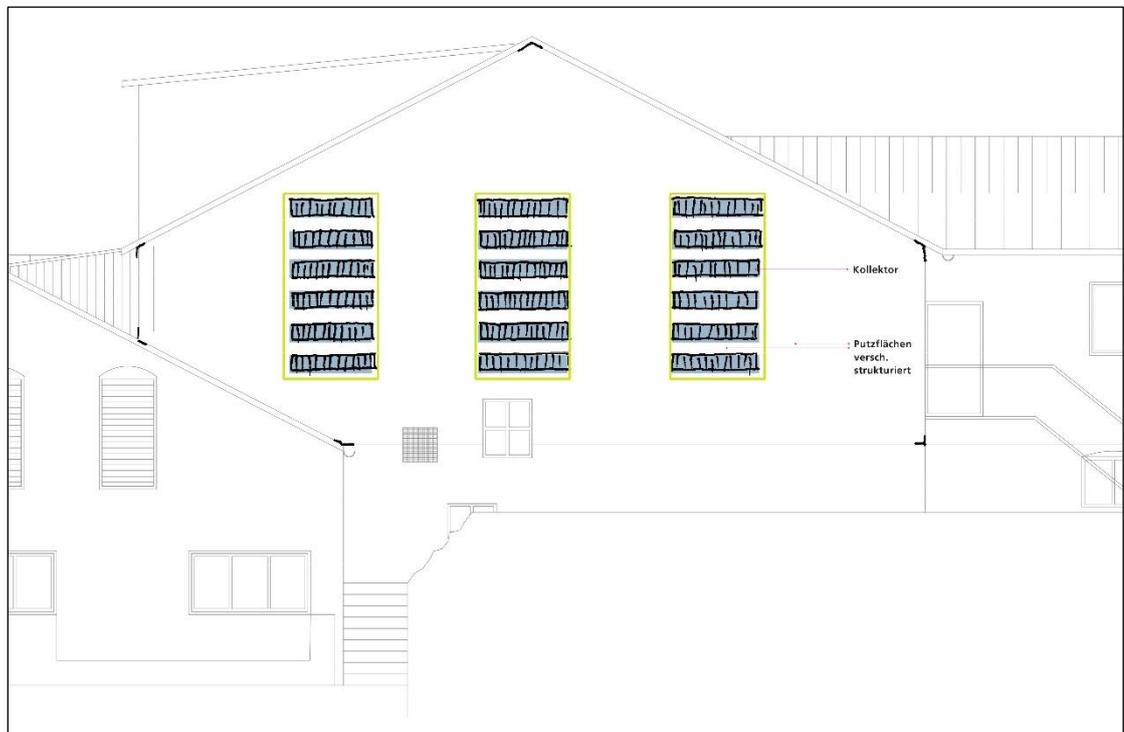


Abbildungen 42: Skizzenentwurf Demonstratorfassade – Variante 1/ IBK2

⁶ Häringer, Simon [u. a.]: ArKol – Entwicklung von architektonisch hoch integrierten Fassadenkollektoren mit Heat-Pipes; Schlussbericht: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, 2020, (0325857A/B/C), S.153 ff.



Abbildungen 43: Skizzenentwurf Demonstratorfassade – Variante 2/ IBK2



Abbildungen 44: Skizzenentwurf Demonstratorfassade – Variante 3/ IBK2

6 Fazit

Unter Berücksichtigung der Erwartungen zu Beginn des Forschungsprojekts⁷ und der verschiedenen Entwicklungsstufen, sollen abschließend einzelne Aspekte bezüglich der architektonischen Integration des Streifenkollektors hervorgehoben werden:

- **Ästhetische Varianz**
Entsprechend seiner Bezeichnung besitzt der Kollektor eine Streifen-Geometrie, die es ermöglicht ihn sowohl über seine Quer- als auch Längsseite zu kombinieren. Im Gegensatz zu einem großen zusammenhängenden Kollektorfeld, erleichtert die relativ kleine Geometrie des Streifenkollektors den vielfältigen Einsatz in eine Fassade. Der Streifenkollektor, abhängig vom Verlauf der Sammelleitung, kann dabei horizontal und vertikal eingesetzt werden, was sein Einsatzgebiet zusätzlich vergrößert. Die Entscheidung bei dem Kollektor unterschiedliche Längendimensionen bei gleichbleibender Breite anzubieten, kann als guter Kompromiss zwischen individuellen Einsatzmöglichkeiten und wirtschaftlichen Überlegungen hinsichtlich einer Massenproduktion angesehen werden. Insgesamt wird die ästhetische Varianz des Streifenkollektors als hoch eingeschätzt.
- **Materialspezifische Varianz**
Ausgehend von einem Haupteinsatzgebiet des Kollektors in vorgehängte hinterlüftete Fassaden-Systeme (VHF) lässt sich der Kollektor mit den unterschiedlichsten Fassadenmaterialien, wie Holz, Metall und Glas kombinieren. Der Kollektor verhält sich dabei so modular, wie jedes andere Fassadenpaneel und macht seinen Einsatz in unterschiedlichste Fassadendesigns möglich.
- **Konstruktive Integration**
Die Integration sowohl in ein Wärmedämmverbundsystem (WDVS) als auch in eine vorgehängte hinterlüfteten Konstruktion ist möglich und wurde im Forschungsprojekt untersucht. Als präferierte Variante, unter Berücksichtigung des aktuellen Entwicklungsstands des Streifenkollektors, wird die Integration des Kollektors in ein VHF-System angesehen. Grund dafür ist die größere Modularität und die Tatsache, dass der Kollektor die genau gleiche Unterkonstruktion für die Befestigung an der Fassade besitzt, wie jedes andere Fassadenpaneel der VHF-Konstruktion und den damit verbundenen Vorteilen.
- **Revisionierbarkeit**
Die Wartung und der leichte Austausch einzelner Bauteile, aufgrund zum Beispiel von Beschädigung, sind einer der wichtigsten Aspekte im Lebenszyklus einer Fassade. Der Unterhalt eines Gebäudes und die damit verbundenen Kosten sind Aspekte, die Bauherren meist genauso wichtig sind wie die Ästhetik des Gebäudes oder seiner Fassade. Diesen Aspekten trägt der Streifenkollektor sowohl aufgrund seiner trockenen Anbindung an die Sammelleitung als auch seiner „einfachen“ Integration in die VHF Rechnung.

⁷ Vgl. Kapitel 2.1, S.4 ff.

- **Akzeptanz bei Nutzern und Bauherrn**

Mit einer zunehmenden Verschärfung von gesetzlichen Richtlinien zur Verbesserung der Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden, wächst auch das Bewusstsein in der Öffentlichkeit für die Wichtigkeit des globalen Klimaschutzes und der Reduktion von Treibhausgasen in der Atmosphäre. Dem sehen sich genauso Bauherren ausgesetzt und interessieren sich zunehmend für den Einsatz nachhaltiger Energiesysteme zur Nutzung der solaren Energieeinstrahlung. Nicht zu unterschätzen ist dabei der Prestigegewinn für einen Bauherrn durch den sichtbaren Einsatz solcher Systeme, zum Beispiel in die Gebäudefassade. Umso wichtiger ist es ein System am Markt anbieten zu können, das einen hohen ästhetischen Anspruch in der Gestaltung einer Fassade mit einem modular einsetzbaren Kollektor verbindet. Dies verspricht der Streifenkollektor in einem potentiellen Markt zu bieten.

- **Entwicklungspotential**

Bei der Umsetzung der Demonstratorfassade wurde der letzte Entwicklungsstand der Kollektorkonstruktion eingefroren und an den Kollektorbauer (Firma Wagner Solar) zur Prototypenproduktion übergeben. Die Ausführung erfolgte dann in Überarbeitung des Entwicklungsstands auf Basis eigener Erfahrung der Firma auf dem Gebiet des Kollektorbaus sowie Einschränkungen durch den bestehenden Maschinenpark. Dieses nachvollziehbare Vorgehen, aufgrund der geringen Stückzahl der Kollektoren für die Demonstratorfassade, führte dabei zu einzelnen Details am Kollektor, die in Anbetracht einer zukünftigen Produktion in großen Stückzahlen verbessert werden könnten:

1. Rahmendetails: Die Ansichtsbreite des Kollektorgehäuses sollte so weit wie möglich minimiert werden. Idealerweise überblendet die Abdeckscheibe den Rahmen vollständig und ist in den Abdeckbereichen rückseitig mit dunkler Farbe bedruckt (ähnlich den Scheiben in einem Fahrzeug). Damit lassen sich die einzelnen Kollektoren gleich einer Fassadentafel nur über eine schmale Fuge aneinanderfügen.

2. Abdichtungsprofile: Ähnlich wie bei den Rahmendetails, sollten Abdichtungsprofile hinter der Abdeckscheibe unsichtbar integriert werden, so dass Gehäuserahmen, Abdichtungsebene und Abdeckscheibe zum Beispiel mit Silikon in einem Klebeverbund kombiniert werden.

3. Verschieden Farbigkeit: Die selektive Beschichtung des Absorbers prägt in Ihrer Farbigkeit maßgeblich den Kollektor. Die Untersuchung welche Farben für eine solche Beschichtung in Frage kommen, könnte den vielfältigen Einsatz des Kollektors erhöhen

4. Verschiedene Oberflächen: Eine zusätzliche Varianz in der Erscheinung des Kollektors kann in verschiedenen behandelten Oberflächen der Abdeckscheibe liegen, die zum Beispiel unterschiedlich bedruckt, geätzt und geprägt sein kann.

Quellenverzeichnis

Literatur

Behling, Stefan; Volz, Tina: Integration von Solarthermie in Glasfassaden von Bürogebäuden zur Energiegewinnung, Tageslichtnutzung und als Sonnenschutz; Forschungsbericht; Universität Stuttgart: Institut für Baukonstruktion Lehrstuhl 2, 2009, (0329278A)

Häringer, Simon [u. a.]: Arkol – Entwicklung von architektonisch hoch integrierten Fassadenkollektoren mit Heat-Pipes; Forschungsbericht: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, 2020, (0325857A/B/C), S.53 ff.

Probst, Maria C. M.; Roecker, C.: Architectural Integration and Design of Solar Thermal Systems; Oxford: Taylor & Francis Ltd, 2011

Internet

Umweltbundesamt: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/energieverbrauch-privater-haushalte#endenergieverbrauch-der-privaten-haushalte>

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1
Endenergieverbrauch 2018 nach Sektoren und Energieträgern (Ausschnitt).
Quelle: Umweltbundesamt auf Basis AG Energiebilanzen, Auswertungstabellen zur Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 1990 bis 2018, Stand 10/2019

Abbildung 2:
Kollektorintegration als Aufdach-Konstruktion.
Quelle: Solites - Steinbeis Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige thermische Energiesysteme (Dipl.-Ing. Dirk Mangold)

Abbildung 3:
Saniertes Mehrfamilienhaus in Eschwege mit Solarthermie-Elementen an der Fassade:
Quelle: DAW - Deutsche Amphibolin-Werke

Abbildung 4:
Mockup Vakuumröhren-Kollektor
Quelle: Institut für Baukonstruktion und Entwerfen Lehrstuhl 2 der Universität Stuttgart (IBK2)

Abbildung 5:
Visualisierung Vakuumröhren-Kollektor
Quelle: Institut für Baukonstruktion und Entwerfen Lehrstuhl 2 der Universität Stuttgart (IBK2)

Abbildung 6:
Aufbau und Integration Streifenkollektor in WDVS-System und VHF-System
Quelle: Facade-Lab Priedemann, DAW- Deutsche Amphibolin-Werke

Abbildung 7:
Visualisierung vertikale und horizontale Integration des Streifenkollektors in ein VHF-System
Quelle: Institut für Baukonstruktion und Entwerfen Lehrstuhl 2 der Universität Stuttgart (IBK2)

Abbildungen 9 - 31:
Untersuchung der verschiedenen Einsatzmöglichkeiten des Streifenkollektors nach Gebäudetypologie im Rahmen einer Seminarveranstaltung an der Universität Stuttgart
Quelle: Institut für Baukonstruktion und Entwerfen Lehrstuhl 2 der Universität Stuttgart (IBK2)

Abbildungen 32 - 33:
Visualisierung Streifenkollektor in einer Bürofassade
Quelle: Institut für Baukonstruktion und Entwerfen Lehrstuhl 2 der Universität Stuttgart (IBK2)

Abbildungen 34 -35:
Visualisierung Streifenkollektor in einer Wohnungsbaufassade
Quelle: Institut für Baukonstruktion und Entwerfen Lehrstuhl 2 der Universität Stuttgart (IBK2)

Abbildungen 36 -37:
Visualisierung Streifenkollektor in einer Industriefassade
Quelle: Institut für Baukonstruktion und Entwerfen Lehrstuhl 2 der Universität Stuttgart (IBK2)

Abbildungen 38 -39:
Visualisierung Streifenkollektor in einer Hotelfassade Variante 1
Quelle: Institut für Baukonstruktion und Entwerfen Lehrstuhl 2 der Universität Stuttgart (IBK2)

Abbildungen 40 -41:
Visualisierung Streifenkollektor in einer Hotelfassade Variante 2
Quelle: Institut für Baukonstruktion und Entwerfen Lehrstuhl 2 der Universität Stuttgart (IBK2)

Abbildungen 42 - 44:
Skizzenentwurf Demonstratorfassade – Varianten
Quelle: Institut für Baukonstruktion und Entwerfen Lehrstuhl 2 der Universität Stuttgart (IBK2)

Erfassung von Anwendungsszenarien für Fassadenkollektoren im Projekt Arkol

Autoren:

Severin Beucker

Katharina Morawietz

Christoph Maurer

Paul-Rouven Denz

Stand 05.07.2017

1	Einleitung.....	3
1.1	Ziel des Projektes Arkol	3
1.2	Stand der Arbeiten und weitere Vorgehensweise	3
1.3	Erfassung von Anwendungsszenarien	4
2	Anwendungsszenario Streifenkollektor	4
2.1	Beschreibung der Anwendung Streifenkollektor	4
2.2	Grenzen der Anwendung Streifenkollektor	5
2.3	Unterteilung der Anwendung Streifenkollektor	5
2.4	Variante A: Streifenkollektor als Bestandteil eines Wärmedämmverbundsystems	6
2.4.1	Nutzen/ Wertversprechen der Anwendung	6
2.4.2	Mögliche Kunden (in Bezug auf den Nutzen)	7
2.4.3	Einflussfaktoren des Anwendungsszenarios	7
2.4.4	Realisierung des Anwendungsszenarios.....	10
2.5	Variante B: Streifenkollektor als Element einer vorgehängten, hinterlüfteten Fassade	10
2.5.1	Nutzen/ Wertversprechen der Anwendung.....	10
2.5.2	Mögliche Kunden (in Bezug auf den Nutzen)	11
2.5.3	Einflussfaktoren des Anwendungsszenarios	11
2.5.4	Realisierung des Anwendungsszenarios.....	13
2.6	Bewertung des Anwendungsszenarios Streifenkollektor	13
3	Anwendungsszenario solarthermische Jalousie.....	13
3.1	Beschreibung der Anwendung	13
3.2	Nutzen/ Wertversprechen der Anwendung	14
3.3	Mögliche Kunden (in Bezug auf den Nutzen).....	15
3.4	Einflussfaktoren des Anwendungsszenarios.....	15
3.4.1	Wirtschaftliche Umsetzbarkeit.....	15
3.4.2	Technische Machbarkeit.....	15
3.4.3	Normen und Standards des Fassadenbaus	16
3.4.4	Zuverlässigkeit und Lebensdauer	17
3.4.5	Energiepolitische und –rechtliche Rahmenbedingungen	17
3.5	Realisierung des Anwendungsszenarios	17
3.6	Bewertung des Anwendungsszenarios solarthermische Jalousie	17

1 Einleitung

1.1 Ziel des Projektes Arkol

Ziel des Forschungsprojektes Arkol ist, zwei neuartige Fassadenkollektoren zu entwickeln, die Architekten zusätzlichen Gestaltungsspielraum für solare Architektur geben. Bei den Kollektoren handelt es sich um:

- Einen **Streifenkollektor**, der eine relativ hohe Effizienz aufweisen soll und in Gebäudefassaden zum Einsatz kommen soll. Der Streifenabstand und das Material zwischen den Streifen kann in Grenzen frei gewählt werden.
- Eine **solarthermische Jalousie**, die zum Beispiel in Fassaden bzw. Fenstern zwischen Glasscheiben eingesetzt werden soll. Ihr Funktionsprinzip gleicht dem einer normalen Jalousie, wobei sie gleichzeitig erneuerbare Wärme liefert und den Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) verglaster Flächen dynamisch steuert.

Grundlage beider Kollektortypen sind Heatpipes, mit denen die Wärme erzeugt und über einen Sammelkanal abgeführt wird.

Neben der Demonstration der technischen Umsetzbarkeit besteht das Ziel des Projektes darin, die Kollektorkonzepte bis nah an die Marktreife zu entwickeln und entsprechende Muster für Anwendungen zu entwerfen. Hierfür sollten die zukünftigen Anwendungsfelder der Kollektoren analysiert und mögliche Produktsysteme beschrieben werden. Darauf aufbauen sollen die für eine Vermarktung nach Projektende notwendigen Wertschöpfungsketten und Geschäftsmodelle mit den Projektpartnern entwickelt werden. Hierbei soll das Borderstep Institut die Projektpartner von Arkol unterstützen.

1.2 Stand der Arbeiten und weitere Vorgehensweise

Das Vorhaben Arkol hat im Januar 2016 begonnen. Seit dem wurde sowohl die Technik für die Kollektoren (Heatpipes) weiterentwickelt, als auch Architekturmodelle und Handmuster bzw. Teilfunktionsmuster für die beiden Kollektortypen entworfen. Die grundsätzliche Entscheidung für die Anwendungsfelder (Streifenkollektor für Fassaden sowie solarthermische Jalousie) der Kollektoren war damit zum Zeitpunkt der Aufnahme des Borderstep Institutes in das Projektkonsortium bereits gefallen¹. Aus Sicht des Borderstep Instituts wäre es hilfreich, die Annahmen und Einschätzungen, die diesem vorgelagerten Entscheidungsprozess zugrunde liegen und die zu der Auswahl geführt haben (z.B. in Form von politisch-rechtlichen Rahmenbedingungen, Marktpotenzialen, möglicher Nachfragen, technischer und architektonischer Realisierbarkeit, etc.) kurz zusammenzufassen und zu dokumentieren. Dies kann z.B. auch in Form eines Rahmenszenarios geschehen. Die Entwicklung und Dokumentation des Rahmenszenarios ist bisher jedoch nicht Bestandteil der geplanten Arbeiten.

Das Borderstep Institut schlägt vor, die beiden ausgewählten Kollektoranwendungen mit dem vorliegenden Dokument in Anwendungsszenarien zu überführen und sie damit zu dokumentieren sowie zu bewerten. Im Anschluss an diesen Schritt sollen ab Spätsommer 2017 für voraussichtlich beide Anwendungsszenarien Geschäftsmodelle entwickelt werden. Diese sollen dann genutzt werden, um Produkt- und Produktionskonzept zu detaillieren, bzw. daran Änderungen vorzunehmen und eventuell weitere Partner für die Produktion oder Erstanwendungen (Pilotprojekte) zu identifizieren.

¹ Auf diesen Sachverhalt soll deshalb hingewiesen werden, da mit ihm die Annahme verbunden ist, dass die ausgewählten Anwendungsfelder aus Sicht der Projektpartner bezüglich ihrer Umsetzbarkeit und dem erwarteten Markterfolg die aussichtsreichsten sind.

Die im nachfolgenden beschriebenen Anwendungsszenarien wurden durch die Projektpartner von Arkol ausgewählt und die Einschätzungen zu den Szenarien mit allen Partnern abgestimmt.

1.3 Erfassung von Anwendungsszenarien

Ein Anwendungsszenario (engl. Use Case) beschreibt den Anwendungsfall und -kontext eines zukünftigen Produktes oder einer Dienstleistung. Es erfasst somit eine konkrete Umsetzungsmöglichkeit und den damit verbundenen Nutzen. Die Beschreibung von Anwendungsszenarien sollte möglichst präzise sein und falls möglich eine Abgrenzung zu vergleichbaren, bereits existierenden Produkten und Dienstleistungen vornehmen. Dies erleichtert die spätere Entwicklung von Geschäftsmodellen und die Differenzierung von bestehenden Produkten. Folgende Punkte sollen durch ein Anwendungsszenario erreicht werden:

- Beschreibung der Funktionsweise und des Leistungsumfanges der Anwendung (Produktes und/oder der Dienstleistungen) und der Grenzen der Anwendung. Im Fall des Kollektors bedeutet dies auch, dass neben dem Produkt auch dessen Montage und Einbau in Fassaden, Wartung, Tausch und Reparatur in der Nutzungsphase, sowie dessen Rückbau berücksichtigt werden.
- Definition des Nutzens der Anwendung, damit ist der Wert gemeint den ein zukünftiger Kunde aus der Nutzung des Produkts erfährt. Dieser kann sowohl monetär (z.B. in Form eingesparter Energie und Betriebskosten) oder auch nicht-monetär (z.B. durch das Erreichen von Umweltzielen, Zertifizierungen oder der Erfüllung gestalterischer Wünsche) sein.
- Erste Abschätzung der Machbarkeit und des Aufwandes einer geplanten Realisierung der Anwendung, z. B. als Pilotprojekt (inklusive der Fertigung der ersten Serie).
- Erste Abschätzung eines vorläufigen Arbeits- und Zeitplans für die Erreichung des Anwendungsszenarios sowie ggf. der dafür notwendigen Rahmenbedingungen.

2 Anwendungsszenario Streifenkollektor

2.1 Beschreibung der Anwendung Streifenkollektor

Der zu entwickelnde Streifenkollektor besteht aus Heat-Pipes in einem Gehäuse (siehe Abbildung 1), Die Kollektoren lassen sich flexibel in Fassaden integrieren. Das Heat-Pipe-Konzept soll dabei so ausgeführt sein, dass sowohl eine vertikale als auch horizontale Ausrichtung möglich ist, was die Individualisierung der jeweiligen Anwendung erhöht. Die besondere Ausführung der Sammleranbindung (Heat-Pipe-Kondensator, der formschlüssig in einen entsprechend geformten Sammelkanal greift) lässt einen verringerten thermischen Widerstand erwarten. Sie ermöglicht zudem einen stufenlos einstellbaren, flexiblen Abstand der einzelnen Heat-Pipes und trägt so weiter zur Individualisierung der Anwendung bei. So kann der Bereich zwischen den verglasten Kollektorstreifen gestalterisch genutzt werden. Dabei können klassische Materialien wie Holz oder Putz, Strukturen und Farben verwendet werden. Auf das Anbindungskonzept des Kollektors an die Sammelschiene des Fraunhofer ISE wurde ein deutsches Patent erteilt.

Durch die Verwendung von Heat-Pipes auf Basis stranggepresster Profile wird zudem eine kostengünstigere fertigungstechnische Realisierung von unterschiedlichen Kollektorstranglängen erwartet. Auch die Verschaltung unterschiedlich langer Heat-Pipes an einen gemeinsamen Sammelkanal, der ebenfalls durch Strangpressen hergestellt werden soll, ist im Gegensatz zum direkt durchströmten Kollektor hydraulisch unproblematisch. Der modulare Aufbau des Kollektors und die trockene Anbindung der Heat-Pipe an den Sammelkanal garantieren eine einfache Wartung und Reparatur (ohne Entleerung des gesamten Kollektorkreislaufs) sowie eine kostengünstige Installation des Kollektors.

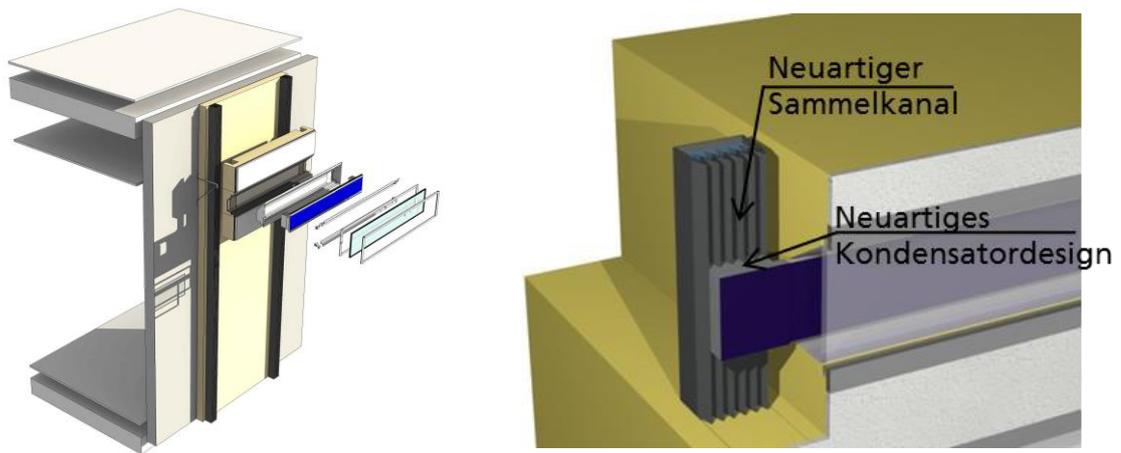


Abbildung 1: Visualisierungen des Streifenkollektors (Quelle: Facade-Lab 2017)

2.2 Grenzen der Anwendung Streifenkollektor

Obwohl der Streifenkollektor grundsätzlich in einem großen Längenspektrum, beginnen im Zentimeterbereich bis zu einigen Metern Länge, gefertigt werden kann, hängt die Frage ob und in welchem Umfang unterschiedliche Kollektorlängen gefertigt werden können von folgenden Faktoren ab:

- Der Ausrichtung des Kollektors (Winkel, horizontal oder vertikal) und den damit verbundenen physikalischen Optima für den Wärmetransport. Weitere Informationen hierzu werden durch das Fh-ISE ermittelt und zur Verfügung gestellt. Es ist zu erwarten, dass zwar ein großes Spektrum möglich sein wird aber nicht alle Kollektorlängen und –ausrichtungen gute solare Erträge ermöglichen.
- Die Fertigung individueller Kollektorlängen kann aufgrund des Kollektorkonzeptes zwar prinzipiell möglich sein, sie erfordert jedoch bei hoher Variantenvielfalt die Produktion in variablen Losgrößen und individuellen Fertigungsaufträgen, die die Kosten für den Kollektor steigen lassen.
- Der Handhabung größerer Kollektorlängen beim Einbau. Da einzelne Kollektoren größerer Länge empfindlicher gegen Verwindung und Erschütterungen werden, ist zu berücksichtigen, bis zu welcher Länge die Kollektoren sinnvoll auf Baustellen gehandhabt werden können und bis zu welcher Länge diese problemlos an den Sammelkanal angeschlossen werden können.

2.3 Unterteilung der Anwendung Streifenkollektor

Ergebnis des Arkol-Projekttreffens am 05.04.2017 in Gerstungen war, dass eine Unterteilung des Anwendungsszenarios Streifenkollektor in zwei Unterfälle sinnvoll ist. Die beiden Unterfälle sind:

- **Variante A Streifenkollektor als Bestandteil eines Wärmedämmverbundsystems (WDVS):**
Dabei wird der Streifenkollektor als fertiges Dämmmodul (inklusive dahinter liegendem Dämmmaterial und Adapter zum Anschluss an den Sammelkanal) ausgeführt und auf der Baustelle von Fachbetrieben als Bestandteil einer Fassadendämmung montiert,
- **Variante B Streifenkollektor als Element einer vorgehängten, hinterlüfteten Fassade (VHF):**
Der Streifenkollektor soll in diesem Fall als vorgefertigtes Modul für die Montage in Gebäudefassade ausgeführt werden. In diesem Fall wird das Modul so ausgeführt, dass es in bestehende hinterlüftete Fassadensysteme (mit bestehenden Schienensystemen, Befestigungsmöglichkeiten und Rastermaßen) integriert werden kann.

Obwohl der Streifenkollektor der in beiden Fällen zum Einsatz kommen soll vom Grundaufbau her gleich ist, so sind jedoch für die Integration in die verschiedenen Anwendungen Anpassung, z.B. in Bezug auf die Montagesysteme oder auch die Anbindung an den Sammelkanal, notwendig. Diese Unterschiede können Auswirkungen auf die verwendeten Materialien, die Produktionsschritte, die für eine Umsetzung notwendigen Partner sowie die Montage in der Fassade haben. Zudem zielen sie auf unterschiedliche Marktsegmente ab. Eine getrennte Behandlung der Fälle ist daher sinnvoll.

Grundsätzlicher Nutzen der Anwendung Streifenkollektor

Der entscheidende Nutzen des Streifenkollektors gegenüber bestehenden Anwendungen liegt in seiner hohen Flexibilität. Durch die modulare Bauweise kann ein Kollektorbaukasten realisiert werden, der dem Architekten und Gebäudeplaner eine einfache Anpassung an die individuelle Fassadengestaltung ermöglicht. Dabei kann nicht nur die Kollektorstreifenlänge, sondern auch der Abstand zwischen den Streifen in Grenzen (siehe Kap. 2.2) frei gewählt werden. Darüber hinaus werden unterschiedliche Varianten zur Rahmgestaltung des Kollektorgehäuses untersucht. Diese Flexibilität wird durch die Verwendung von Heat-Pipes sowie die Anbindung an den Sammelkanal ermöglicht. Durch die modulare Bauweise wird ein wirtschaftlicher Nutzen erwartet.

Die im Kollektor verwendeten Heat-Pipes sollen anders als die meisten am Markt verfügbare Kollektoren auch bei horizontaler Ausrichtung zuverlässig arbeiten und die Designflexibilität weiter erhöhen.

Das patentierte Design für den Anschluss des Kollektors an den Sammelkanal soll einen geringen thermischen Anbindungswiderstand der Heat-Pipes an den Sammelkanal bei hoher Freiheit in der Positionierung der Kollektorstreifen ermöglichen und somit einen hohen Kollektorwirkungsgrad sicherstellen.

2.4 Variante A: Streifenkollektor als Bestandteil eines Wärmedämmverbundsystems

2.4.1 Nutzen/ Wertversprechen der Anwendung

Hauptnutzen des Streifenkollektors ist, dass er regenerativ erzeugte Wärme bereitstellt, die im Gebäude für verschiedene Zwecke genutzt werden kann. Er ist zudem Bestandteil eines Wärmedämmverbundsystems und damit einer energetischen Sanierungslösung, mit der nicht nur der Energiebedarf im Gebäude reduziert wird, sondern auch gleichzeitig regenerative Energie für die Nutzung im Gebäude erzeugt wird.

Der Kollektor ist ein einfach zu fertigendes, vorkonfektioniertes Produkt, das größere Gestaltungs- und Designfreiheit in solarthermischen Fassaden ermöglicht. Die Gestaltungsfreiheit besteht darin, dass die Kollektorstreifenlänge sowie der Abstand zwischen den Streifen in Grenzen frei gewählt werden kann. Durch die Variierbarkeit dieser Faktoren kann der Kollektor in freier Verteilung in Fassaden eingesetzt werden (im Gegensatz zu Standardkollektoren, die als Felder mit festen Längen- und Breitenverhältnissen zum Einsatz kommen).

Die Module können bei der Sanierung durch Fachpersonal im Rahmen einer Wärmedämmung installiert werden. Gegenüber normalen thermischen Solarkollektoren sollte der Streifenkollektor damit Vorteile besitzen und gemessen an seiner Funktion ein gutes Preis-Leistungs-Verhältnis aufweisen.

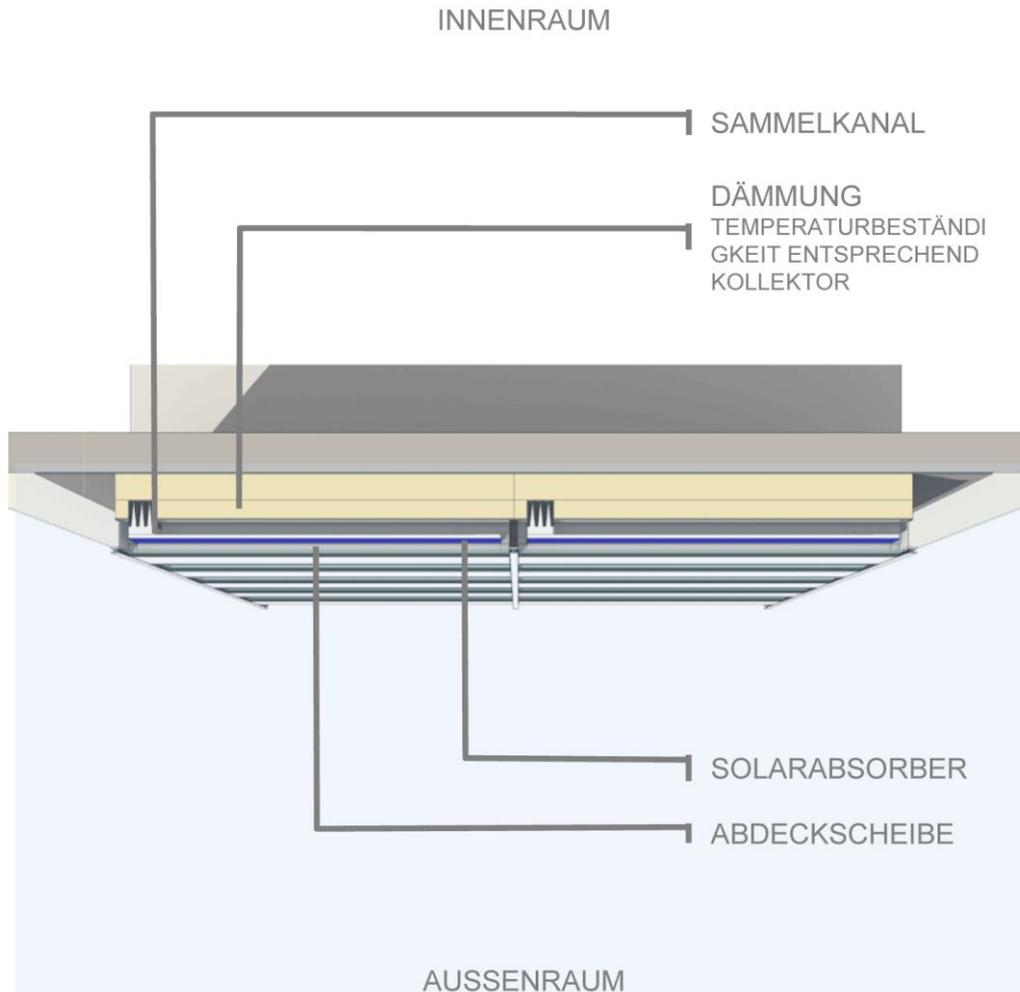


Abbildung 2: Integration Streifenkollektor in Wärmedämmverbundsystem (Quelle: Facade-Lab 2017)

2.4.2 Mögliche Kunden (in Bezug auf den Nutzen)

Möglich Kunden/ Nutzer des Produktes sind:

- Architekten
- Gebäude- und Fassadenplaner
- Bauherren/ Besitzer von Immobilien
- Investoren/ Bauträger/ Projektentwickler/ Wohnungsbaugenossenschaften
- Bauunternehmen/ Bauindustrie

Wichtig ist bei allen genannten Kunden, dass sie Interesse und einen Bedarf an regenerativen erzeugter, thermischer Solarenergie besitzen. Der Bedarf kann aufgrund unterschiedlicher Gründe (wirtschaftlich, rechtlich, umweltpolitisch, gestalterische, etc.) bedingt durch Gebäudetypologie und Nutzung bzw. durch Umgebung und Quartiersstruktur/-Infrastruktur bestehen. Als Kunden kommen sowohl private als auch öffentliche Akteure in Frage.

2.4.3 Einflussfaktoren des Anwendungsszenarios

2.4.3.1 Wirtschaftliche Umsetzbarkeit

Die Bewertung der wirtschaftlichen Umsetzbarkeit des Anwendungsszenarios hängt zuerst von unmittelbaren Kostenstrukturen des Kollektors ab. Zu diesen zählen: Material- und Fertigungskosten; Installations- und Betriebskosten sowie ggf. Entsorgungskosten. Darüber hinaus, fließt in die Bewertung die Frage ein, ob es für den beschriebenen Nutzen des Kollektors einen Markt und damit eine Zahlungsbereitschaft gibt. Die Zahlungsbereitschaft für ein Produkt ergibt sich wiederum aus dem Preis-Leistungs-Verhältnis und damit dem Nutzen bzw. Mehrwert, den der Käufer mit der Leistung des Produkts verbindet.

Ebenfalls relevant für die Ermittlung der Wirtschaftlichkeit ist die Frage, mit welcher Technik oder welchem Produkt der neue Kollektor verglichen wird (Referenz). So ist beispielsweise für eine Bewertung der Wirtschaftlichkeit des Streifenkollektors der Vergleich des Preis-Leistungs-Verhältnisses mit anderen thermischen Solarkollektoren relevant. Ein höherer Preis für ein Produkt kann sich aufgrund einer verbesserten Leistung (z.B. höherer Wirkungsgrad, längere Lebensdauer oder geringere Montagekosten) rechtfertigen. Darüber hinaus kann ein höherer Preis auch gerechtfertigt sein, wenn er völlig neue Gestaltungsoptionen in Fassaden ermöglicht und auf Seiten der Kunden eine entsprechende Zahlungsbereitschaft besteht.

Einschätzung

Es wird davon ausgegangen, dass für die wirtschaftliche Umsetzung der Variante A ‚Streifenkollektor als Bestandteil des WDVS‘ eine wirtschaftliche Umsetzung erfolgen kann, wenn der Kollektor als vorgefertigtes Modul mit integrierter Dämmung konzipiert und gefertigt werden kann. Einfluss auf den Preis des Produktes haben in diesem Fall die verwendeten Materialien (z.B. Metallart, so sind strangepresste Aluminiumprofile z.B. deutlich günstiger als Kupfer), die genutzten Dämmkomponenten (z.B. Steinwolle vs Foamglas) sowie die Frage ob und wie die Module vor Ort installiert und mit dem Sammelkanal verbunden werden können.

Während die Kosten für den Kollektor als beherrschbar (z.B. durch Nutzung von Standardmaterialien wie Aluminiumprofile und Solarglas) eingeschätzt werden, bestehen hinsichtlich der Integration in ein Dämmmodul und die Ausführung des Systems und des Sammelkanals vor allem in kleineren Bauprojekten Zweifel, ob diese Arbeiten zu akzeptablen Preisen realisiert werden können. Als Herausforderungen werden angesehen:

- Kostengünstige thermische Entkopplung von Kollektor und Putz (vermutlich nur durch teure Werkstoffe zu realisieren)
- Installation des Sammelkanals und dessen Anschluss an die Haustechnik vor Ort und Systemprüfung auf Dichtigkeit (inklusive der dafür benötigten Qualifikationen und der Gewährleistung)
- Komplexe Gesamtplanung und –leistung notwendig, die sich für WDVS in kleineren Bauprojekten nicht lohnt.

2.4.3.2 Technische Machbarkeit

Die technische Machbarkeit beschreibt die grundsätzliche Realisierbarkeit der im Szenario beschriebenen Anwendung. Dies gilt sowohl in Bezug auf die zugrundeliegende Technik (Streifenkollektor) als auch das für die Anwendung notwendige System zu dessen Funktionsfähigkeit (z.B. Sammelkanal, WDVS).

Einschätzung

Variante A wird grundsätzlich als technisch umsetzbar angesehen. Ein technischer Faktor, der für die Realisierung des Szenarios wichtig ist, ist die Funktion der Heat-Pipe auch unter -1° Neigungswinkel aufgrund von Fertigungs- und Montagetoleranzen. Dies wird bei den zu übertragenden Leistungen als herausfordernd gesehen. Alternativ kann die Heat-Pipe mit einem Neigungswinkel im Kollektor montiert sein. Zudem ist ein Betrieb und Frostsicherheit bei Temperaturen unter null Grad zu

gewährleisten, was den Einsatz von organischen Fluiden oder beim Einsatz von Wasser als Arbeitsfluid entsprechende Schutzmaßnahmen erfordert (Zusatz von Additiven, konstruktive Maßnahmen wie konisch zu laufendes Verdampferende).

2.4.3.3 Produkt- und Fertigungstechnik

Zu den Faktoren die Voraussetzung für die Anwendung des Streifenkollektors sind gehört auch die Reproduzierbarkeit der Heat-Pipe- und Kollektor-Prototypen unter den Bedingungen einer industriellen Serienproduktion (Massenfertigung).

Um dies zu gewährleisten sollte der Prototyp möglichst durch bekannte oder adaptierbare Fertigungsverfahren effizient und in größerer Stückzahl reproduziert werden können. Die Entwicklung neuer Fertigungsverfahren und –prozesse ist zwar auch möglich, erfordert jedoch andere (risikoreichere) Kommerzialisierungsstrategien. Oft (aber nicht immer) gilt auch, dass eine Variantenvielfalt des Produktes die Anforderungen an die Fertigungstechnik und die Produktionsplanung erhöht und sich daher in einem höheren Preis auswirkt.

Einschätzung

Eine Serienfertigung von Variante A des Streifenkollektors wird als gut umsetzbar angesehen, da auf bekannte Prozesse aus der Kollektorfertigung zurückgegriffen werden kann, die auch eine Produktion individueller Kollektorlängen und Größen ermöglicht.

Für die Produktion kann zudem auf Standardmaterialien (stranggepresste Aluminiumprofile, Solarglas, Heatpipes, etc.) zurückgegriffen werden. Gesucht wird noch ein Partner der aufgrund seiner Erfahrung und möglichst mit bestehenden Anlagen eine Pilotproduktion (Kleinserie) des Kollektors umsetzen kann und der zu einem späteren Zeitpunkt ggf. auch größere Einheiten produzieren kann. In diesem Fall wird davon ausgegangen, dass die Heatpipe von einem Zulieferer bezogen werden kann.

2.4.3.4 Normen und Standards des Fassadenbaus

Um solartechnische Produkte für Fassaden in den Markt bringen zu können, müssen die dafür relevanten Normen erfüllt werden. Für Solarkollektoren sind dies die EN 12975-1 bzw. EN ISO 9806. Außerdem ist zu beachten, dass die Kriterien des Qualitätslabels „Solar Keymark“ erfüllt sein müssen, um eine Förderung zu erhalten. Da es sich um Fassadenkollektoren handelt, sind darüber hinaus weitere Normen und Randbedingungen zu berücksichtigen. Für Unterkonstruktionen an der Fassade müssen die Eurocodes berücksichtigt werden, hinzu kommen die Regelungen der einzelnen Staaten über eventuelle Sicherheitszuschläge. Hinsichtlich des Brandschutzes müssen auf Europäischer Ebene die DIN EN 13501 (für Brandklassifizierung), auf Deutscher Ebene die DIN 4102-20 (für Fassadenbrand) und auf Landesebene die Musterbauverordnung berücksichtigt werden. Weiterhin sind die folgenden Normen zu berücksichtigen: DIN 18346; DIN EN 13497 – 13499 + 13500 (WDVS), DIN EN 13162 – 13172 (Wärmedämmstoffe), DIN 4102; DIN EN 1363, 1364; Muster-Hochhaus-Richtlinie (Brandschutz), DIN 18550 (Putz), EnEV 2014 sowie DIN 18202, 4172 (Toleranzen).

Ein Nichteinhalten dieser Normen hat zur Folge, dass das Produkt nicht in klassischen Bauprojekten eingesetzt werden kann.

Weitere Aspekte der Sicherstellung der Funktionen der Gebäudehülle (Wärmeschutz, Witterungsschutz, Feuchtehaushalt, etc.) sowie Sicherheitsaspekte (z.B. Absturzsicherung) sind nicht über Normen geregelt und müssen in Deutschland mit dem Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) geklärt werden. Die Anforderungen, die an das Bauprodukt gestellt werden, werden hier vom DIBt und für komplexere Themen mit Hilfe eines Sachverständigenrats (SVA) erstellt.

Einschätzung

Variante A des Streifenkollektors kann die Normen und Standards des Fassadenbaus erfüllen. Im Detail sind noch Sicherheitsaspekte (Absturzsicherung / Bruchverhalten des Deckglases, Verwendung von ESG oder VSG) zu klären.

2.4.3.5 Zuverlässigkeit und Lebensdauer

Ebenfalls von großer Bedeutung sind die Zuverlässigkeit und Lebensdauer der Streifenkollektoren und der Sammelkanälen bzw. deren Verbindungsstellen. Diese wirken sich unmittelbar auf die Gewährleistung aus. Im Fassadenbau werden aufgrund der Langlebigkeit der Fassaden daher hohe Standards angesetzt. Relevant für einen Vergleich ist in diesem Fall die übliche Lebensdauer von Wärmedämmverbundsystemen, da die Kollektoren Bestandteil des Systems sind.

Einschätzung

Die Lebensdauer der Streifenkollektoren und Sammelschienen sollte daher eine dem WDVS vergleichbare Lebensdauer aufweisen oder ggf. zu vertretbaren Kosten wart- bzw. reparierbar sein. Der Faktor der Lebensdauer wirkt sich auch unmittelbar auf die Wirtschaftlichkeit aus (siehe oben).

Besonderes Augenmerk sollte auf die Sammelschiene gelegt werden, da Fehler und Reparaturen bei diesen Komponenten ein Öffnen des WDVS erfordern würden. Defekte Kollektoren sollten sich dagegen leicht austauschen lassen bzw. im Falle eines Defekts zunächst in der Fassade verbleiben können.

2.4.3.6 Energiepolitische und –rechtliche Rahmenbedingungen

Stark beeinflusst wird die Verbreitung neuer thermischer Solarkollektoren durch die energie- und umweltpolitische Gesetzgebung. Bei der bisherigen Energiewende lag der Fokus auf der Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien sowie der Steigerung der Energieeffizienz (z.B. durch die Förderung von Dämmung im Gebäudesektor). Eine konsistente Förderung von thermischen Solaranlagen hat dagegen, trotz der Bedeutung der Wärmerzeugung in Deutschland, bisher nicht stattgefunden.

Einschätzung

Für den Streifenkollektor als Bestandteil eines Wärmedämmverbundsystems folgt daraus, dass er nach heutiger Lage nur geringe Förderung erhält (siehe KfW-Programme). Interessant ist für die Variante allerdings, dass aufgrund der Kombination mit dem Wärmedämmverbundsystem die energetische Gebäudesanierung unterstützt wird und zusätzlich die thermischen Solarkollektoren bei der Ermittlung des Energiebedarfs angerechnet werden können.

2.4.4 Realisierung des Anwendungsszenarios

Das Anwendungsszenario soll in Form einer Demonstratorfassade bei DAW oder dem Facade-Lab innerhalb der Projektlaufzeit umgesetzt werden. Diese kann sich sowohl in einem Neubau als auch in einem Sanierungsprojekt befinden. Für die Umsetzung sind neben den Projektpartnern weitere Partner bzw. Unterauftragnehmer für die Heat-Pipe-Fertigung (Kleinserie) und Verarbeitung erforderlich. Schließlich muss ein Umsetzungspartner, ein Planungsbüro und ein Handwerksunternehmen für die Umsetzung gefunden werden. Das Anwendungsszenario soll bis 2020 umgesetzt werden.

2.5 Variante B: Streifenkollektor als Element einer vorgehängten, hinterlüfteten Fassade

2.5.1 Nutzen/ Wertversprechen der Anwendung

Hauptnutzen des Streifenkollektors als Element einer VHF ist ebenfalls, dass er regenerativ erzeugte Wärme bereitstellt, die im Gebäude für verschiedene Zwecke genutzt werden kann. Im Falle des Einsatzes in vorgehängten, hinterlüfteten Fassaden kann die im Kollektor erzeugte Wärme aufgrund des unterschiedlichen Gebäude- und Nutzungscharakters (siehe auch folgendes Kapitel) z.B. auch für die Entfeuchtung in der Belüftungstechnik eingesetzt werden.

Für die Weiterverarbeitung des Kollektors und der Sammelschiene in vorgehängten, hinterlüfteten Fassaden sollen diese als Vorprodukt für die Fassadenfertigung ausgeführt werden. Ziel ist dabei, eine leichte Integration in bestehende Fassadensysteme und Rastermaße zu ermöglichen.

Auch im Fall der hinterlüfteten Fassade gilt, dass der Kollektor in Bezug auf Größe und Abstand zwischen den Streifen Freiheitsgrade zulässt und dadurch im Gegensatz zu Standardkollektoren neue Gestaltungsoptionen in Fassaden ermöglicht. Gegenüber normalen thermischen Solarkollektoren besitzt der Streifenkollektor bei einer Integration in vorgehängte Fassaden damit Vorteile und gemessen an seinen Funktionen ein gutes Preis-Leistungs-Verhältnis.

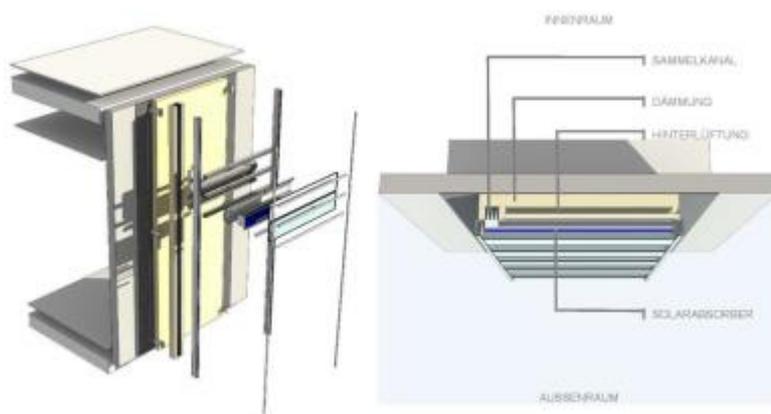


Abbildung 3: Integration Streifenkollektor in vorgehängte, hinterlüftete Fassade (Quelle: Facade-Lab 2017)

2.5.2 Mögliche Kunden (in Bezug auf den Nutzen)

Da vorgehängte, hinterlüftete Fassaden verstärkt in gewerblichen Gebäuden eingesetzt werden, zielt diese Variante des Streifenkollektors auf eine andere Nutzergruppe als Variante A ab. Zunächst sind die potenziellen Ansprechpartner vergleichbar denen von Variante A:

- Architekten
- Gebäude- und Fassadenplaner
- Bauherren von gewerblichen Immobilien
- Investoren / Bauträger / Projektentwickler
- Bauunternehmen/ Bauindustrie

Allerdings besitzen die Investoren von gewerblichen Gebäuden, je nachdem ob es sich um private oder öffentliche Akteure handelt, ggf. andere Investitionsspielräume oder auch Verpflichtungen für den Einsatz erneuerbarer Energien. Dies kann z.B. der Fall sein, wenn (öffentliche) Auftraggeber eine Verpflichtung zur Förderung erneuerbarer Energien besitzen oder aufgrund von eigenen Zielsetzungen, Zertifizierungen oder Vermarktungsstrategien in deren Ausbau investieren.

2.5.3 Einflussfaktoren des Anwendungsszenarios

Die Einflussfaktoren für Variante B sind mit denen von A vergleichbar. Es wird daher nur auf Unterschiede hingewiesen.

2.5.3.1 Wirtschaftliche Umsetzbarkeit

Siehe Variante A

Einschätzung

Ein Unterschied liegt darin, dass für vorgehängte, hinterlüftete Fassaden andere Planungs-, Anschaffungs-, Installations- und Betriebskosten gelten. Da diese verstärkt in gewerblich genutzten Gebäuden eingesetzt werden, besteht teilweise eine andere (höhere) Zahlungsbereitschaft. Ein höherer Preis für ein neues Produkt kann im Falle eines umweltfreundlichen, multifunktionalen und gestalterischen attraktiven Fassade am Markt durchsetzbar sein.

Zudem wird davon ausgegangen, dass sich der Sammelkanal und die damit verbundenen Anschlüsse an die Haustechnik leichter in einem Konstruktionssystem einer VHF realisieren lassen. Grund hierfür ist, dass eine VHF meist professionell geplant wird und sich der Kanal gut in bestehende Schienen und Aufhängungssysteme integrieren lässt. Zu regeln wäre dabei jedoch noch, wer (welches Gewerk) die Umsetzung der Anschlüsse der Sammelkanäle an die Haustechnik und damit die Gewährleistung über die Dichtigkeit des Systems übernimmt.

2.5.3.2 Technische Machbarkeit

Siehe Variante A

2.5.3.3 Produkt- und Fertigungstechnik

Siehe Variante A

Einschätzung

Die Fertigung vorgehängter, hinterlüfteter Fassaden unterliegt ggf. anderen Parametern und Herausforderungen als die von Wärmedämmverbundsystemen. Die Montage der beiden Systeme WDVS und VHF setzen andere Fähigkeiten der Verarbeiter voraus. VHF werden eher durch Fassadenbauer und WDVS eher durch Stuckateure umgesetzt, wobei die Grenzen fließend sind. VHF haben eine andere Statik und sind toleranter für Abweichungen im Untergrund. So können mit VHF starke Unebenheiten auf dem Untergrund ausgeglichen werden, welches mit WDVS nur bedingt möglich ist. Beide Fassadensysteme (WDVS und VHF) lassen sich auch kombinieren.

2.5.3.4 Normen und Standards des Fassadenbaus

Siehe Variante A sowie

DIN EN 13162 – 13172 (Wärmedämmstoffe), DIN 4102; DIN EN 1363, 1364; Muster-Hochhaus-Richtlinie (Brandschutz), DIN EN 12179 (Windlast), DIN 18202, 4172 (Toleranzen), DIN EN 485, 12810, 13119, 1364, 13830, 13947 (Fassade) und VDI 2169_2012-10 (Solarthermie)

2.5.3.5 Zuverlässigkeit und Lebensdauer

Siehe Variante A

Einschätzung

Die Standsicherheit wird zusätzlich zu Variante A jedoch auch in ETAG034 geregelt. Eine Einbindung des DIBt und eine Konsultation des SVA ist jedoch auch hier nötig. Eine ggf. notwendige Reparatur und Wartung der Kollektoren und Sammelschienen ist im Fall der vorgehängten, hinterlüfteten Fassade vermutlich etwas leichter zu realisieren als beim WDVS, da die Komponenten leichter zugänglich sind und mechanisch befestigt sind.

2.5.3.6 Energiepolitische und –rechtliche Rahmenbedingungen

Siehe Variante A

Einschätzung

Ggf. gelten ab nächstem Jahr für die energetische Planung und Sanierung von Fassaden in Nicht-Wohngebäuden verschärfte rechtliche Vorgaben für den Einsatz erneuerbarer Energien (siehe z.B. geplantes Gebäudeenergiegesetz oder Nearly Zero Energy Building in der EU). Dies könnte sich fördernd auf Kollektoren in VHF auswirken, da diese sowohl die eigentliche Bekleidungs- als auch Energieerzeugungsfunktion übernehmen.

2.5.4 Realisierung des Anwendungsszenarios

Das Anwendungsszenario soll in Form einer Demonstratorfassade innerhalb der Projektlaufzeit bei den Partnern DAW oder Facade-Lab umgesetzt werden. Diese kann sich sowohl in einem Neubau als auch in einem Sanierungsprojekt befinden. Für die Umsetzung sind neben den Projektpartnern weitere Partner bzw. Unterauftragnehmer für die Heat-Pipe-Fertigung (Kleinserie) und Verarbeitung erforderlich. Schließlich muss ein Umsetzungspartner, ein Architektur- oder Planungsbüro, ein Fassadenbauer und ein Handwerksunternehmen für die Ausführung gefunden werden. Das Anwendungsszenario soll bis 2020 umgesetzt werden.

2.6 Bewertung des Anwendungsszenarios Streifenkollektor

Während des Arkol-Projekttreffens in Freiburg am 26./27. Juni 2017 wurde beschlossen, Variante A ‚Streifenkollektor als Bestandteil eines Wärmedämmverbundsystems‘ zunächst nicht weiterzuverfolgen. Grund hierfür ist, dass derzeit zu viele ungeklärte Fragen (geeignetes, hitzeresistentes Dämmmaterial zur Einbettung des Kollektors, Ausführung und Umsetzung des Sammelkanals, etc.). Diese Fragestellung sind für die Variante B ‚Streifenkollektor als Element einer VHF‘ leichter zu beantworten bzw. es liegen bereits Lösungen vor. Der Integration des Kollektors in die VHF wird damit der Vorzug gewährt.

Damit verändert sich implizit auch das Einsatzfeld der Kollektoren hin zu größeren Bau- und Sanierungsvorhaben, da dort die VHF verstärkt zum Einsatz kommt. Gleiches gilt für die Entwicklung von Geschäftsmodellen, die nun ebenfalls auf dieses Einsatzfeld abzielen werden.

Der Vollständigkeit halber sei darauf verwiesen, dass es zwischen WDVS und VHF Übergänge gibt und beide Systeme auch in Kombination eingesetzt werden können.

3 Anwendungsszenario solarthermische Jalousie

3.1 Beschreibung der Anwendung

Bei der solarthermischen Jalousie transportieren Heat-Pipes die Wärme von der Lamelle an den seitlichen Sammelkanal. In der Jalousie können Lamellen mit spektralselektiver oder herkömmlicher Beschichtung eingesetzt werden. Die Verwendung von Heat-Pipes und einer trockenen schaltbaren thermischen Ankopplung an den Sammelkanal kombiniert bewegliche Lamellen mit der Energiegewinnung. Die schaltbare Anbindung der Lamellen an den Sammelkanal ermöglicht es, die Jalousie zu drehen und zu raffen. Somit können die Sonnenschutz- und Wärmegewinn-Funktionen geregelt werden. Wird die Jalousie gerafft, können durch die passiven solaren Erträge der Heizbedarf des Gebäudes gesenkt werden. Wenn die Lamellen einen hohen Absorptionsgrad aufweisen, dann kann die Jalousie zusätzlich einen signifikanten solarthermischen Beitrag zur Haustechnik leisten.

Ziel ist, die Lamellen so zu gestalten, dass sie die gleiche Funktion und Beweglichkeit wie in eine normale Jalousie aufweisen. Neben der Funktion der Verschattung und der Verringerung des

Energieeintrags in das Gebäude liefert die Jalousie solarthermische Wärme für die Nutzung im Gebäude.

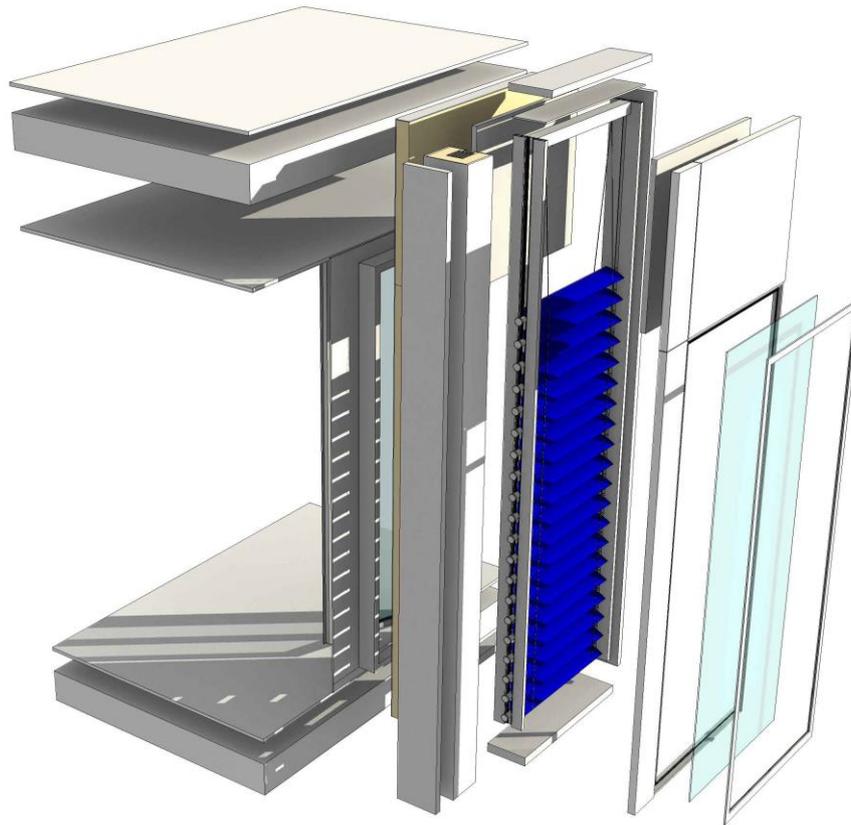


Abbildung 4: Testmuster Solarthermische Jalousie (Quelle: Facade-Lab 2017)

3.2 Nutzen/ Wertversprechen der Anwendung

Der Nutzen der solarthermischen Jalousie (STJ) ist ein mehrfacher und besteht aus:

- Verschattung (schaltbare Transparenz) und damit Verringerung des Energieeintrags in Gebäude,
- Erzeugung solarthermischer Energie für die Nutzung im Gebäude,
- Abführen der solaren Wärme im Bereich der Jalousie und somit eine zusätzliche Verringerung des (ungeregelten) Wärmeeintrags ins Gebäude bzw. Steuerung des g-Werts und damit auch eine Verringerung des Kühlbedarfs.

Die STJ ist somit ein multifunktionelles Produkt, das vor allem in hochwertigen / -preisigen, verglasten Gebäudefassaden zum Einsatz kommen soll. Die Farbe der Lamellen kann in gewissem Umfang frei gewählt werden.

Bedingt durch die Funktionen und den Fassadentyp ist der Einsatz der STJ in gewerblichen Gebäuden wahrscheinlich. Besonders geeignet sind damit Gebäude mit Glasfassaden in gemäßigten und warmen Klimazonen, die eine Verschattung benötigen und in denen die solarthermischen Energie entweder für die Erzeugung von Wärme oder im Rahmen der Gebäudeklimatisierung (z.B. Luftentfeuchtung) genutzt werden kann. Wichtig für die Bewertung des Nutzens ist daher, dass die Haustechnik des Gebäudes einen möglichst hohen Bedarf an Niedertemperaturwärme hat. Deshalb sind Hochhäuser, die auch ein Hotel und Restaurants beinhalten und somit einen Bedarf an Trinkwarmwasser haben, vielversprechender als reine Bürogebäude. Doch auch bei Bürohochhäusern kann man zum Beispiel Wärme auf einem Temperaturniveau von 55°C in den Lüftungsanlagen zur Entfeuchtung nutzen.

3.3 Mögliche Kunden (in Bezug auf den Nutzen)

Möglich Kunden/ Nutzer des Produktes sind:

- Architekten
- Fassadenplaner/ Generalplaner
- Fassadenbauer
- (Fassadenhersteller) – Systemhäuser / Produkthersteller bzw. -Vertriebler
- Bauherren repräsentativer, gewerblicher Gebäude
- Investoren / Bauträger / Projektentwickler

Die solarthermische Jalousie zielt aufgrund ihrer Anwendung in höherwertigen Glasfassaden auf andere Kundengruppen bzw. Märkte ab, als der Streifenkollektor. Es kommen somit zunächst eher Kunden in Frage, die eine höhere Zahlungsbereitschaft für ein hochwertiges, multifunktionelles und individuelles Produkt besitzen.

3.4 Einflussfaktoren des Anwendungsszenarios

3.4.1 Wirtschaftliche Umsetzbarkeit

Wie bereits unter den Varianten A und B beschrieben, hängt die wirtschaftliche Umsetzbarkeit der solarthermischen Jalousie von unmittelbaren Kostenfaktoren sowie vom Preis-Leistungs-Verhältnis und damit dem Nutzen eines Produktes ab.

Einschätzung

Im Fall der solarthermischen Jalousie sind bereits erwähnte Materialkosten- und Fertigungskosten vermutlich deutlich höher anzusetzen als beim Streifenkollektor, da die Ausführung als hochwertige Jalousie teurere Materialien (Metalllamellen, Mechanik, etc.) erfordert. Auch die Fertigungskosten werden höher sein, da die Jalousien auf absehbare Zeit in Kleinserien im Manufakturbetrieb gefertigt werden müssen.

Wie bereits erwähnt, kann aufgrund des vielfältigeren Nutzens mit dem Produkt aber auch ein höherer Preis erzielt und im günstigen Fall ein kleiner aber zahlungskräftiger Markt bedient werden. Referenz für die Ermittlung eines Preises für dieses Produkt sind daher hochwertige, multifunktionelle bzw. adaptive Fassadenlösungen.

3.4.2 Technische Machbarkeit

Siehe Szenarien zum Streifenkollektor, zusätzlich muss die Funktion der Heat-Pipe für alle Kippwinkel der Lamelle (ca. 0 bis 90°) und eine lösbare Wärmeübertragungsfläche zwischen Heat-Pipe (Adapter) und Sammelkanal gewährleistet sein.

Einschätzung

Darüber hinaus stellt für die Umsetzung der solarthermischen Jalousie die zuverlässige und dauerhafte Umsetzung einer wartungsarmen Mechanik (Kippen & Raffen der Lamellen, Anpressen der Lamellen an den Sammelkanal) eine zu lösende Herausforderung dar. Für die technische Ausführung des Sammelkanals in der Fassade gelten vergleichbare Annahmen und Voraussetzung wie im Fall der VHF.

Auf dem Arkol-Projekttreffen am 26./27. Juni 2017 wurden eine Vielzahl von technischen Detaillösungen (Material für den Sammelkanal, Anpressmechanismus an den Sammelkanal, Löt- bzw. Schweißverfahren für die Lamellen, etc.) besprochen, die Einfluss auf die technische Umsetzbarkeit der STJ haben. Für die Details wird auf die Unterlagen bzw. das Protokoll des Treffens verwiesen.

3.4.2.1 Produkt- und Fertigungstechnik

Einschätzung

Aufgrund der technisch relativ aufwendigen Konstruktion der STJ und dem zunächst kleinen Marktsegment muss damit gerechnet werden, dass die Jalousie zunächst in kleinen, projektbezogenen Serien im Manufakturbetrieb hergestellt wird. Die Ausführung der Jalousie wird dabei als Modul geplant, das durch Fassadenbauer im Rahmen individueller Fassadenlösungen weiterverarbeitet wird. Die Heat-Pipe sowie die notwendigen Materialien zum Bau der Jalousie werden in diesem Fall von Vorlieferanten bezogen

Zu lösende Probleme für eine erfolgreiche Kleinserie liegen vor allem in technischen Details für die jeweils produkt- oder fertigungstechnische Lösungen gefunden werden müssen. Dazu zählen u.a.:

- Finale Material- und Komponentenauswahl für die STJ (Metallprofile, Motoren, etc.)
- Kontakt zwischen Sammelkanal und Adapter
- Löt- oder Schweißverfahren für Lamellen
- Beschichtungsverfahren für Lamellen

Ein Produktionspartner, der die STJ in Kleinserie herstellt muss noch gefunden werden. Z.T. müssen noch Partner für Vorprodukte (Lamellen) bzw. spätere Vertriebspartner gefunden werden.

3.4.3 Normen und Standards des Fassadenbaus

Siehe Variante A des Streifenkollektors.

Für die Integration in Glasfassaden gelten die folgenden Normen und Standards des Fassadenbaus:

- DIN EN 13363, 13659, (Sonnenschutz)
- DIN 18202, 4172 (Toleranzen)
- DIN EN 12179 (Windlast)
- DIN EN 12154, 1255 (Schlagregendichtheit)
- DIN 12365, 18540, 18545, 52452, 52455, 52460; DIN EN 12154, 15434 (Abdichtung)
- DIN 17611; DIN EN 573; 755 (Aluminium)
- DIN 5034; EN 12464; VDI 6011 (Belichtung)
- DIN 4102; DIN EN 1363, 1364; Muster-Hochhaus-Richtlinie (Brandschutz)
- DIN EN 485, 12810, 13119, 1364, 13830, 13947 (Fassade)
- VDI 2067, 2078, 3807, 3808, 4710, 6002; (Gebäudetechnik)
- DIN 18008; DIN EN 410, 572, 673 - 675, 1096, 1279, 12758, 13022, 13031 (Glas)
- DIN EN 12152, 12153, 12835 (Luftdurchlässigkeit)

Einschätzung

Die solarthermische Jalousie benötigt voraussichtlich eine Zustimmung im Einzelfall (ZiE). Wichtig ist, dass die Kosten für diese ZiE nur einen Teil der geplanten Kosten für die Jalousie ausmachen und die ZiE nicht aufgrund unklarer Normen ausbleibt oder zu lange dauert. Eine gute Auslegung sollte die ZiE allerdings erhalten. Zudem muss die Jalousie so entwickelt werden, dass sie die ZiE sicher und zügig erreichen wird. Zur Erreichung der ZiE soll eine rigorose Failure Mode Effect Analysis² durchgeführt werden.

² Die FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) ist eine analytische Methoden der Zuverlässigkeitstechnik. Mit ihr werden mögliche Produktfehler, ihrer Bedeutung für den Kunden, ihrer Auftretenswahrscheinlichkeit sowie ihrer Entdeckungswahrscheinlichkeit mit Kennzahlen bewertet.

3.4.4 Zuverlässigkeit und Lebensdauer

Einschätzung

Zuverlässigkeit, Reparaturfähigkeit und Lebensdauer sind aufgrund des höheren Produktpreises und der Nutzung in hochwertigen Fassaden eine zentrale Anforderung an die solarthermische Jalousie. Dies bedeutet, dass

- Die Jalousie so ausgelegt sein muss, dass sie zuverlässig für die Lebensdauer der Fassade (Zeitraum ca. 20-30+ Jahre) funktioniert bzw.
- dass man sie mit überschaubaren Kosten erreichen und reparieren kann, so dass zumindest die Jalousie bis zum Ende der Fassadenlebensdauer funktioniert.
- Besonders in den frühen Phasen der Kommerzialisierung darf es keine großen Fehler geben, die potenzielle Kunden abschrecken können.

Zu klären ist noch, wer die Gewährleistung für das Modul der STJ übernimmt (Fassadenbauer bzw. Hersteller ?).

3.4.5 Energiepolitische und –rechtliche Rahmenbedingungen

Siehe Variante A

Einschätzung

Eventuell gelten für die energetische Planung und Sanierung von Fassaden in Nicht-Wohngebäuden andere (strengere) rechtliche Grundlagen (siehe z.B. geplantes Gebäudeenergiegesetz).

3.5 Realisierung des Anwendungsszenarios

Der wahrscheinlichste Anwendungsfall der solarthermischen Jalousie ist die Renovierung oder der Neubau eines Hochhauses mit dem Ziel eines Nachhaltigkeitszertifikats wie LEED, DGNB oder BREEAM. Wenn eine Zweite-Haut-Fassade mit Jalousie vorgesehen ist oder sogar eine Closed-Cavity-Fassade, dann bietet die solarthermische Jalousie im Vergleich dazu den mehrfachen Nutzen von reduziertem Kühlbedarf, niedrigeren Temperaturen der raumseitigen Oberfläche und solarthermischer Ertrag.

Für die Realisierung eines solchen Vorhabens bis zum Herbst 2020 sind weitere wichtige Akteure zu gewinnen, dazu zählen:

- Renommiertere Architekten mit Schwerpunkt und Kenntnissen auf hochwertigen, multifunktionalen Fassaden und dem Einsatz erneuerbarer Energien,
- Planer und Partner für Auslegung und Fertigung der Pilotserie.

3.6 Bewertung des Anwendungsszenarios solarthermische Jalousie

Das Anwendungsszenario solarthermische Jalousie wird in jedem Fall weiterverfolgt. Die Umsetzbarkeit des Konzeptes ist von vielen technischen Detailfragen und der Gewinnung von Partnern für die Produktion und die Umsetzung abhängig.

Entwicklung von Geschäftsmodellen für Fassadenkollektoren im Projekt Arkol

Autor:

Severin Beucker

Kommentiert durch:

DAW

Facade-Lab

Fraunhofer ISE

Kompetenzzentrum für Ausbau und Fassade

Stand 05.03.2018

1	Einleitung: Ziel und Grundlage der Entwicklung von Geschäftsmodellen	3
1.1	Begriff des Geschäftsmodells	3
1.2	Vorgehensweise für die Entwicklung von Geschäftsmodellen	4
1.3	Anwendungsszenarien als Grundlage der Geschäftsmodellentwicklung	5
2	Entwicklung von Geschäftsmodellen für ausgewählte Fassadenkollektor(systeme)	5
2.1	Geschäftsmodell für einen Streifenkollektor als Element einer vorgehängten, hinterlüfteten Fassade.....	5
2.2	Geschäftsmodell für die solarthermische Jalousie	8
3	Fazit und weitere Vorgehensweise.....	9
3.1	Nutzung von Innovations- und Lead-User-Workshops	10
3.2	Angepasste Workshops für die Geschäftsmodelle	10
4	Quellen.....	12

1 Einleitung: Ziel und Grundlage der Entwicklung von Geschäftsmodellen

Im vorliegenden Dokument sollen Geschäftsmodellentwürfe für Anwendungen von Fassadenkollektoren im Projekt Arkol entwickelt werden. Ziel dieser Entwicklung ist, die im vorangegangenen Arbeitsschritt im Jahr 2017 erstellten Anwendungsszenarien, mit denen zwei Varianten der Fassadenkollektoren ausgewählt, analysiert und beschrieben wurden, in Geschäftsmodelle zu überführen.

Mit dem Entwicklungsprozess der Anwendungsszenarien (siehe Kap. 1.3) wurden bereits viele Erkenntnisse gewonnen (z.B. zum Nutzen der Anwendung, der produktionstechnischen Umsetzbarkeit sowie zu Qualitätsanforderungen), die für die Entwicklung der Geschäftsmodelle genutzt werden können. Auch der Auswahlprozess der Anwendungsszenarien selbst stellt eine entscheidende Vorarbeit dar. In einem mehrstufigen Verfahren wurden Varianten der Anwendungsszenarien durch die Projektpartner geprüft und in Bezug auf ihre Umsetzbarkeit und des zu erwartenden Nutzens und des Marktpotenzials bewertet. Die im Folgenden für die Geschäftsmodellentwicklung genutzten Szenarien stellen somit bereits die Varianten dar, die von den Projektpartnern bisher als am erfolgversprechendsten angesehen werden. Weitere Optionen, v.a. des Streifenkollektors in unterschiedlichen Fassadensystemen können bei Bedarf, zu einem späteren Zeitpunkt, einer Neubewertung unterzogen werden. Dies kann z.B. aufgrund sich ändernder Einschätzungen der Projektpartner oder externer Experten bzw. sich wandelnder Marktbedingungen notwendig werden (siehe hierzu auch die geplante Vorgehensweise zur Geschäftsmodellentwicklung in Kap. 1.2).

1.1 Begriff des Geschäftsmodells

Der Begriff des Geschäftsmodells wird in der betriebswirtschaftlichen Literatur nicht einheitlich definiert. Er umfasst verschiedene Ansätze und Begriffsdefinitionen, die neue Wertschöpfungsmodelle beschreiben und auf der Branchen-, Unternehmens- oder auch der Produktebene ansetzen können (siehe z.B. Bucherer 2011; Wirtz 2013; Bierter et al. 2005; Fichter 2004 und Chesbrough, Rosenbloom 2002). Ein einendes Element der Definitionen ist, dass ein Geschäftsmodell im Kern ein Streben nach der Erwirtschaftung eines Gewinns und damit einen unternehmerischen Akteur erfordert.

Nach Wirtz (2013) bildet ein Geschäftsmodell in stark vereinfachter und aggregierter Form ab, welche Ressourcen in ein Unternehmen fließen und wie diese durch den innerbetrieblichen Leistungserstellungsprozess in vermarktungsfähige Informationen, Produkte und/ oder Dienstleistungen transformiert werden. Ein Geschäftsmodell ist demnach eine vereinfachte und idealtypische Beschreibung eines Nutzerversprechens, eines Wertschöpfungssystems sowie eines Ertragsmodells. Das Modell gibt die Struktur und den Zusammenhang dieser Komponenten sowie ihre mögliche Umsetzung wider.

Eine Herausforderung bei der Entwicklung von Geschäftsmodellen liegt darin, dass sie auf Annahmen beruhen und die Abschätzung einer zukünftigen Nachfrage und Anforderung an ein Produkt oder einer Dienstleistung beschreiben. Wie jede Modellbildung beinhaltet sie daher auch das Risiko, Fehlannahmen zu treffen oder schwer abschätzbare Entwicklungen (z.B. technischer, rechtlicher oder marktlicher Art) nicht ausreichend zu berücksichtigen. Da dieses Risiko mit nahezu allen Modellbildungen einhergeht, stellt es keine besondere Schwäche bei der Entwicklung von Geschäftsmodellen dar. Die Geschäftsmodellentwicklung sollte vielmehr als eine Möglichkeit gesehen werden, vor dem Markteintritt von Produkten oder Dienstleistungen, eine plausible und realistische Abschätzung der Umsetzbarkeit zu treffen.

Neben dem Risiko der Fehleinschätzung ist der Ansatz der Geschäftsmodellentwicklung mit einer weiteren Einschränkung verbunden. Die getroffenen Einschätzungen bzw. Annahmen verändern sich mit der Zeit, beispielsweise durch eine neue Marktsituation, steigende oder sinkende Preise, neue konkurrierende Produkte oder Anbieter, etc. Die entwickelten Modelle stellen daher Momentaufnahmen dar,

die eine Einschätzung zum Zeitpunkt der Erstellung widerspiegeln. Die Modelle und die ihnen zugrundeliegenden Annahmen sollten daher in regelmäßigen Abständen (z.B. jährlich) hinterfragt und die Modelle angepasst werden.

1.2 Vorgehensweise für die Entwicklung von Geschäftsmodellen

Eine bekannte Vorgehensweise zur Entwicklung von Geschäftsmodellen stellt das Business Model Canvas (Osterwalder, Pigneur 2011) dar. Das ihm zugrundeliegende Schema stellt das Nutzenversprechen für Kunden in den Mittelpunkt, welches sich auf ein potentiell Produkt oder eine Dienstleistung bezieht. Davon ausgehend werden weitere Elemente der Leistungserbringung im Unternehmen, die Schlüsselressourcen und -aktivitäten, Schlüsselpartner sowie die Kostenstruktur beschrieben. Marktseitig werden zudem mögliche Kundenbeziehungen und –segmente sowie Vertriebskanäle formuliert sowie schließlich ein Vertragsmodell skizziert.

Die Methode kann sowohl für die Beschreibung bestehender als auch die Entwicklung zukünftiger, d.h. noch nicht existenter, Geschäftsmodelle genutzt werden. Entscheidend für die Differenzierung einzelner Modelle ist die Frage, ob sich aus einer Variante eigene, hinreichend abgrenzbare Nutzenversprechen und ableiten lassen. Dies ist z.B. bei den für die Fassadenkollektoren entwickelten Anwendungsszenarien ‚Streifenkollektor in VHF‘ sowie ‚Solarthermische Jalousie‘ (siehe auch Kap. 1.3) der Fall. Ob es sinnvoll ist, für weitere Varianten des fassadenintegrierten Streifenkollektors eigene Modelle zu entwickeln, soll erneut im Frühjahr 2018 geprüft werden.

Abbildung 1: Business Model Canvas zur Erfassung von Geschäftsmodellen



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Osterwalder, Pigneur (2011)

Die mit Hilfe der Methode des Canvas entwickelten Modelle werden nachfolgend dokumentiert. Im Anschluss an die Modellentwicklung werden Rückschlüsse über ihre Umsetzbarkeit gezogen.

1.3 Anwendungsszenarien als Grundlage der Geschäftsmodellentwicklung

Grundlage der Geschäftsmodellentwicklung im Projekt Arkol sind zwei bereits beschriebene Anwendungsszenarien (siehe auch den Bericht zu den Anwendungsszenarien, Beucker et al. (2017)):

- **Anwendungsszenario (1), „Streifenkollektor als Element einer vorgehängten, hinterlüfteten Fassade (VHF)“:** Der Streifenkollektor soll in diesem Fall als vorgefertigtes Modul für die Montage in Gebäudefassade ausgeführt werden. Er wird dafür in bestehende hinterlüftete Fassadensysteme (mit bekannten Schienensystemen, Befestigungsmöglichkeiten und Rastermaßen) integriert.
- **Anwendungsszenario (2), „Solarthermische Jalousie“:** Die solarthermische Jalousie soll so ausgeführt werden, dass sie zum Beispiel in Fassaden oder Fenstern, d.h. zwischen Glasscheiben eingesetzt werden kann. Ihr Funktionsprinzip gleicht damit dem einer normalen Jalousie, wobei sie gleichzeitig erneuerbare Wärme liefert und den Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) verglaster Flächen dynamisch steuerbar macht.

Die Anwendungsszenarien entstanden in einem wechselseitigen Abstimmungsverfahren zwischen den Projektpartnern im Jahr 2017. Aufbauen auf den im Projektkonsortium bestehenden Anwendungsfeldern der Fassadenkollektoren wurden die Varianten („Streifenkollektor in der Fassade“ sowie „Streifenkollektor in der Jalousie“) in Anwendungsszenarien beschrieben. Diese wurde auf dem Projekttreffen am 05.04.2017 in Gerstungen vorgestellt. Danach wurden die Anwendungsszenarien weiter detailliert. Dabei wurde diskutiert, ob das Szenario ‚Streifenkollektor in der Fassade‘ in weiteren Varianten, beispielsweise für die Integration in ein Wärmedämmverbundsystem oder als Bestandteil einer vorgehängten, hinterlüfteten Fassade, differenziert werden muss.

Auf einem weiteren Projekttreffen am 26./27.06.2017 in Freiburg wurde beschlossen, dass zunächst das Szenario „Streifenkollektor als Element einer vorgehängten, hinterlüfteten Fassade (VHF)“ verfolgt werden soll, da es in Bezug auf die Umsetzbarkeit (Spezifisches Nutzenversprechen, abschätzbares Ertragsmodelle und Kostenstrukturen sowie mögliche Partnerschaften) als am vielversprechendsten bewertet wurde. Folglich werden in den nachfolgenden Kapiteln zunächst Modelle für die beiden oben genannten Szenarien entwickelt.

2 Entwicklung von Geschäftsmodellen für ausgewählte Fassadenkollektor(systeme)

Bei den nachfolgenden Geschäftsmodellen handelt es sich um Entwürfe, die auf einem Projekttreffen am 10./11. Oktober in Freiburg gemeinsam mit den Projektpartnern von Arkol entwickelt wurden. Diese Entwürfe werden im Jahr 2018 im Rahmen von Workshops und in Zusammenarbeit mit Partnern weiter ausgearbeitet. Die Aufnahme weitere Geschäftsmodelle zu einem späteren Zeitpunkt soll damit nicht ausgeschlossen werden.

Die Entwürfe dienen zudem dazu, spezifische Vorgehensweisen für die Umsetzung der ausgewählten Anwendungsszenarien zu entwickeln (siehe Kap. 3). So hat der bisherige Entwicklungsprozess bereits gezeigt, dass aufgrund unterschiedlicher zu leistenden technischer und organisatorische Anforderungen an zukünftige Produkte sowie der Reife der Technik spezifische Vorgehensweisen für die Gewinnung von Schlüsselpartnern sowie die Etablierung von Kundenbeziehungen notwendig sind.

2.1 Geschäftsmodell für einen Streifenkollektor als Element einer vorgehängten, hinterlüfteten Fassade

Der nachfolgende Geschäftsmodellentwurf bezieht sich auf das Szenario des Streifenkollektors in einem vorgehängten, hinterlüfteten Fassadensystem:

Tabelle 1: Geschäftsmodellentwurf für einen Streifenkollektor als Element einer vorgehängten, hinterlüfteten Fassade

<p>Schlüsselpartner</p> <ul style="list-style-type: none"> • Produktionspartner für (Klein-)Serie, z.B. Kollektorhersteller, Systemintegrator (DAW) • Gebäude- und Fassadenplaner • Fachplaner für Haustechnik • Maler, Stuckateure, Fassadenbauer • Energieberater • Gas- Wasser- Heizungsinstallateur • Kompetenzzentrum, als Schulungs- und Zertifizierungseinrichtung (SAF) 	<p>Nutzenversprechen/ Wertangebot</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bereitstellung einer innovativen und ästhetischen Kollektortechnologie zur regenerativen Erzeugung von Wärme in Gebäuden in Kombination mit bewährten Fassadensystemen (WDVS) • Flexible Gestaltungsmöglichkeiten für Fassaden (flexiblere Gestaltung als mit andere Fassadenkollektoren) • Senkung von Betriebskosten in Gebäuden (durch Energieeinsparung bei der Wärmeerzeugung und Luftentfeuchtung) • Optisch sichtbarer Umweltschutz • Erfüllung der Energieeinsparverordnung (EnEV) in Gebäuden durch CO2-Einsparung sowie flexiblere Umsetzung (z.B. Reduktion der Dämmschicht durch Solarthermie)
<p>Schlüsselaktivitäten</p> <ul style="list-style-type: none"> • Identifikation von Partner für (Klein-)Serie • Schnittstelle definieren: Übergabepunkt zwischen Fassadenbauer und Haustechnik • Umsetzung von Pilotprojekt, Verkauf der ersten (Pilot-)Serie 	<p>Kundensegment</p> <ul style="list-style-type: none"> • (Ökologisch und ökonomisch orientierte) gewerbliche und öffentliche Bauherren • (Ökologisch orientierte) private Bauherren
<p>Schlüsselressourcen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Heat Pipes mit reproduzierbarer Leistung • Know-How und Anlagen zur Fertigung von (Klein)Serie • Finanzierung für Pilotserie und Pilotprojekte 	<p>Vertriebs- oder Distributionskanal</p> <ul style="list-style-type: none"> • Architekten, Gebäudeplaner • Handwerk, Fassadenbauer • Bauunternehmen/ Bauindustrie • Energieberater • Spezialhandel
<p>Kostenstruktur</p> <ul style="list-style-type: none"> • Variable/ mengenabhängige Kostenstruktur, mit steigender Nachfrage und Produktionsmenge sinken die spezifischen Kosten für das Produkt, das Ziel ist eine schlanke Kostenstruktur für ein hochwertiges Produkt zu erreichen. 	
<p>Ertragsmodell</p> <ul style="list-style-type: none"> • Verkauf eines ökologischen, innovativen und ästhetischen Fassadenbaustoffs zur Erzeugung regenerativer Energie sowie zur Betriebskosteneinsparung • Ggf. auch Planung- und Umsetzungsleistung für Technik 	

Erläuterungen und Rückschlüsse aus dem Geschäftsmodellentwurf

Das Geschäftsmodell für einen Streifenkollektor als Element einer vorgehängten, hinterlüfteten Fassade zielt auf das Marktsegment von Fassadenkollektoren ab. Der fassadenintegrierte, hochwertige Kollektor mit guten Leistungsdaten und flexiblen Gestaltungsmöglichkeiten soll daher ein Konkurrenzprodukt zu bestehenden thermischen Fassadenkollektoren sein. Das wesentliche Alleinstellungsmerkmal des Streifenkollektors gegenüber bestehenden fassadenintegrierbaren Systemen (siehe z.B. DOMA Solartechnik) besteht in der größeren gestalterischen Freiheit (Länge, Größe, etc.) des Kollektors.

Als zentrale Voraussetzung für die Realisierung des Geschäftsmodells hat sich auf dem Projekttreffen am 10./11. Oktober 2017 in Freiburg die Identifizierung eines geeigneten Produktionspartners für die (Klein-)Serie herausgestellt. Diese Rolle eines unternehmerischen Systemintegrators, der die Einzelkomponenten (Heat-Pipe, Kollektorgehäuse, Glas, Anschluss an Sammelkanal, Sammelkanal, etc.) aus Halbzeugen und/oder Vorprodukten (z.B. Aluminiumprofile, Heatpipes und Solarglas) zu einem Produkt zusammenfügt, wird bisher von keinem der Projektpartner eingenommen.

Der Systemintegrator muss auch den größten Anteil des unternehmerischen Risikos tragen, das mit der Umsetzung des neuen Produkts einhergeht und die Gewährleistung übernehmen. Die Rolle ist entscheidend für den Erfolg der Produkte am Markt nach Abschluss des Forschungsprojekts. Sie kann von der DAW übernommen werden, der die beschriebenen Integrationsschritte von technischen Elementen in Fassaden beherrscht.

Die Wertschöpfungskette für den Streifenkollektor ist damit grundsätzlich erfasst und besteht aus: Vorproduzenten und Systemintegrator (DAW), der auch für die Distribution und Vertrieb zuständig ist. Zwei Varianten sind denkbar: Die DAW möchte als Systemlieferant auftreten der entweder (1.) das Produkt in eigene Regie inkl. Gewährleistung fertigt und liefert oder (2.), der als Lieferant eines Produktes auftritt, dass aus einzelne Komponenten montiert, die von anderen Unternehmen nach DAW Spezifikationen gefertigt wurden.

In der Diskussion am 10./11. Oktober 2017 in Freiburg gingen die Projektpartner davon aus, dass die Beschaffung der erforderlichen Halbzeuge (Metallprofile, Solarglas, etc.) sowie Vorprodukte (Heatpipes, Befestigungen, etc.) für die Fertigung der Kollektoren kein Problem darstellen.

Als ebenfalls entscheidend für die Umsetzung wird die Identifikation von Partnern für erste Pilotprojekte/ -umsetzungen gesehen. Dies könnten beispielsweise ökologisch orientierte Bauherren oder Projektentwickler (z.B. öffentliche Gebäude oder Energieberatungszentren) planen und die daher selber einen Nutzen von der innovativen Technologie haben. Sie können gemeinsam mit dem unternehmerischen Partner die Abnahme erster Produkte garantieren und damit die Hürden für den Markteintritt senken. Dieser Teil wird schwerpunktmäßig von der DAW getragen.

2.2 Geschäftsmodell für die solarthermische Jalousie

Der nachfolgende Geschäftsmodellentwurf bezieht sich auf das Szenario der solarthermischen Jalousie:

Tabelle 2: Geschäftsmodellentwurf für die solarthermische Jalousie

<p>Schlüsselpartner</p> <ul style="list-style-type: none"> • Produktionspartner für (Klein-)Serie, z.B. Systemhaus für Sonnenschutz- und Fassadensysteme • Große/ renommierte Gebäude- und Fassadenplaner für Planungsleistung, Integration in Fassadensystem und Entwicklung von Dienstleistungs- und Serviceangeboten 	<p>Nutzenversprechen/ Wertangebot</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ästhetisch einzigartiger und multifunktionaler Fassadenbaustoff • Verschattung und Verringerung des Kühlbedarfs (Abführung solarer Wärme) • Bereitstellung solarthermischer Energie und Senkung von Betriebskosten in Gebäuden • Ggf. Systemdienstleistung, die auch Betrieb und Wartung umfasst
<p>Schlüsselaktivitäten</p> <ul style="list-style-type: none"> • Klärung der Wertschöpfungskette • Identifikation von Partnern für Fertigung und Pilotprojekte • Umsetzung von Pilotprojekte und Verkauf der ersten Serie vom STJ oder STJ-Fassenelementen 	<p>Kundensegment</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bauherren einer selbstgenutzten Immobilie • Bauherren einer repräsentativen Immobilie
<p>Schlüsselressourcen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Langzeitstabilität der Technik (Orientiert sich an Jalousien und Fassadensystemen) • Ressourcen für Bau von Mockups und Vermessung • Finanzielle Ressourcen für Pilotprojekte und Realisierung 	<p>Vertriebs- oder Distributionskanal</p> <ul style="list-style-type: none"> • Renommierte Architekten und Gebäudeplaner • Renommierte Fassadenbauer und Systemhäuser
<p>Kostenstruktur</p> <ul style="list-style-type: none"> • Wertorientierte Kostenstruktur, aufgrund der Hochwertigkeit des Produktes (Multifunktionalität, ansprechendes Design, etc.) liegt das Ziel auf einem erstklassige Angebote und einem hohen Maß an Qualität und Service. 	
<p>Ertragsmodell</p> <ul style="list-style-type: none"> • Verkauf eines hochwertigen, multifunktionalen Produktes • Verkauf von individuellen Planungs-, Umsetzungs- und Servicedienstleistungen 	

Erläuterungen und Rückschlüsse aus dem Geschäftsmodellentwurf

Das Geschäftsmodell der solarthermischen Jalousie zielt auf das Marktsegment der hochwertigen und multifunktionalen Sonnenschutz- und Fassadensysteme ab. Die solarthermische Jalousie steht damit

in Konkurrenz zu anderen hochwertigen und hochpreisigen Fassadentechniken, für die es zwar Zahlungsbereitschaft gibt, an die jedoch auch hohe Anforderungen hinsichtlich Qualität, Realisierung und Gewährleistung gestellt werden.

Auf dem Projekttreffen am 10./11. Oktober 2017 in Freiburg hat sich gezeigt, dass wie auch im vorangegangenen Modell, weitere unternehmerische Partner für die Umsetzung benötigt werden. Im Idealfall wäre dies ein bereits am Markt etabliertes Systemhaus für Sonnenschutz- oder Fassadensysteme (z.B. WAREMA), das über fertigungstechnische Kompetenzen und Vertriebsstrukturen verfügt, die für eine Markterschließung notwendig sind. Auf dem Projekttreffen wurden auch unterschiedliche Optionen für mögliche Wertschöpfungsketten diskutiert. Diese könnten je nach Kompetenz, Fertigungstiefe und Vertriebsstruktur des zu identifizierenden Partners unterschiedlich aussehen:

- A) Integrierte Fertigung des Produktes und Vertrieb z.B. durch einen Jalousiehersteller
- B) Komplette Fertigung durch externes Unternehmen und Übernahme sowie Vertrieb des Produktes durch Jalousiehersteller
- C) Zulieferung von Vorprodukten/ Komponenten durch externe Unternehmen, Endmontage und Vertrieb durch einen Jalousiehersteller

Weitere Partner, die für den Markteintritt der solarthermischen Jalousie von Bedeutung sind, sind Architekten und Bauherren von hochwertigen, vorzugsweise selbst genutzten Immobilien, da im Fall dieser Gruppe vermutlich eine höhere Bereitschaft besteht, hochwertige, multifunktionale Fassaden- und Sonnenschutzsysteme einzusetzen. Die Integration eines solchen Partners ist für die Umsetzung eines Pilotvorhabens zur solarthermischen Jalousie von großer Bedeutung, da eine erste Serie der Jalousie mit hohem Aufwand und Unsicherheiten bezüglich der Langzeitstabilität verbunden ist.

Damit wird deutlich, dass für die Umsetzung Modell der solarthermischen Jalousie ebenfalls die Identifizierung weiterer Partner für die Fertigung, den Vertrieb und die Umsetzung von Pilotprojekten notwendig ist. Allerdings ist diese Aufgabe komplexer als im Fall des fassadenintegrierten Streifenkollektors, da sie mit der grundlegenden Fragestellung verbunden ist, welche Variante der Wertschöpfungskette sich am ehesten mit welchen Partnern realisieren lässt.

3 Fazit und weitere Vorgehensweise

Beide Geschäftsmodellentwürfe verdeutlichen, dass für die Realisierung von marktfähigen Kollektor-Produkten auf Basis von Heatpipes neben den Forschungs- auch Umsetzungspartner benötigt werden. Zum einen, weil die im Arkol-Konsortium vertretenen Forschungsinstitute nach ihrem Selbstverständnis das für eine Kommerzialisierung notwendige unternehmerische Risiko nicht eingehen können. Zum anderen, weil sie auf diesem Gebiet nicht über die ausreichend detaillierte Sach- und Marktkennnisse verfügen. Hinzu kommt, dass beide Produkt- und Geschäftsmodellvarianten für die Umsetzung noch der weiteren Konkretisierung bedürfen, um damit verbundene finanzielle und technische Risiken abschätzen zu können.

Im Fall des Streifenkollektors existiert mit der DAW ein Unternehmenspartner, der die Rolle eines Systemintegrators einnehmen kann. Dies ist für den Aufbau einer Wertschöpfungskette und die Entwicklung (eines) marktfähiger(n) Produkte(s) von großer Bedeutung, da der zentrale Akteur mit Marktkennnissen, Kontakten und Vertriebsstrukturen bereits existiert. Ggf. müssen noch geeignete Zulieferer und Auftragsfertiger gefunden werden.

Für die solarthermische Jalousie muss ein zentraler unternehmerischer Akteur noch identifiziert werden. Das Kundensegment, das Ertragsmodell und damit auch die unternehmerische Rolle sind aufgrund der hochwertigen und multifunktionalen Sonnenschutz- und Fassadensysteme komplexer und mit höheren Risiken verbunden. Für die Umsetzung des Modells muss daher ein Bauherr, Planer und / oder Architekt gefunden werden, der bereit ist für ein hochwertiges, multifunktionelles Produkt

ein höheres Risiko einzugehen und der dieses im Rahmen eines Modell- oder Pilotvorhabens nutzen möchte.

Diese Unterschiede in den Geschäftsmodellentwürfen erfordern angepasste Vorgehensweisen, die in den folgenden Kapiteln dargestellt werden

3.1 Nutzung von Innovations- und Lead-User-Workshops

Für die weitere Ausarbeitung der Geschäftsmodelle im Jahr 2018 wird vorgeschlagen, Innovations- oder Lead-User-Workshops mit weiteren Wertschöpfungspartnern bzw. Kunden und Nutzern durchzuführen.

Innovationsworkshops haben in der Kombination mit der Geschäftsmodellentwicklung die Aufgabe, fehlende Elemente in den Modellen (z.B. Identifikation von Schlüsselpartnern, Kunden oder des Nutzens) zu ergänzen oder zu präzisieren. Eine Schlüsselrolle kommt bei der Entwicklung und Umsetzung von Geschäftsmodellen den Partnern und Kunden zu, da ihre Anforderungen maßgeblichen Einfluss auf die Modelle nehmen. Als hilfreich hat sich in diesem Zusammenhang das Lead-User-Konzept¹ erwiesen. Lead-User sind nicht ausschließlich Kunden, sondern auch Anwender der Technik oder Produkte. Nach der Geschäftsmodelllogik können auch Schlüssel- sowie Distributions- und Vertriebspartner zu dieser Kategorie gezählt werden, da sie die Technik nutzen bzw. die Schnittstelle zu den Anwendern und Nutzern bilden und deren Bedürfnisse gut kennen.

Für die Konkretisierung der Geschäftsmodellentwürfe sind daher Lead-User-Workshops bzw. modifizierte Varianten dieser Workshops geeignet. Über sie können die Anforderungen von Anwendern und Nutzern der Technik bzw. zukünftiger Produkte erfasst und Kundensegmente präzisiert werden. Gleichzeitig können im idealen Fall über die Workshops Partner für die spätere Umsetzung einer Pilotanwendung oder –produktion gewonnen werden.

Um sicherzustellen, dass die Einschätzungen der Lead-User auch tatsächlich relevante Marktsegmente und Produkte treffen, soll der Prozess der Geschäftsmodellentwicklung und der Lead-User-Workshops parallel durch ausgewählte Marktrecherchen und Umfeldanalysen begleitet werden.

3.2 Angepasste Workshops für die Geschäftsmodelle

Beide Geschäftsmodelle erfordern die Identifizierung und Einbeziehung weiterer Partner, allerdings mit unterschiedlichen Zielsetzungen. Während für die Umsetzung des Geschäftsmodells des Streifenkollektors die Suche nach Produktionspartnern und Kunden im Mittelpunkt stehen, so muss im Fall der solarthermischen Jalousie zusätzlich auch ein Systemintegrator bzw. ein Akteur gefunden werden, der bereit ist, die mit einer Pilotanwendung technischen und unternehmerischen Risiken zu tragen und der von dem innovativen Charakter und der Multifunktionalität der Technik überzeugt ist. Abhängig von den Geschäftsmodellen werden daher die folgenden Vorgehensweisen vorgeschlagen:

I Workshops für Streifenkollektor

¹ Als Lead-User (dt. trendführender Nutzer oder Kunde) sind Nutzer definiert, die vor dem Massenmarkt ein Bedürfnis formulieren und die sich einen hohen Nutzen von einer Problemlösung erhoffen. Lead-User besitzen zudem bezogen auf spezifische Fragestellungen eine große Fachexpertise und Problemlösungskompetenz und arbeiten in kooperativen Netzwerken (Hippel v. 2005). Eine wesentliche Herausforderung stellt die Identifikation echter Lead-User dar, die tatsächlich dem Anspruch der frühen Bedürfnis- bzw. Nutzenformulierung gerecht werden und somit helfen spätere Marktentwicklungen zuverlässig zu identifizieren.

Für die Umsetzung des Modells des Streifenkollektors wird die Durchführung von zwei modifizierten Lead User Workshops vorgeschlagen:

- **I.I Innovationsworkshop mit möglichen Produktionspartnern und Zulieferern** (eventuell Juni 2018): Identifikation von Zulieferern und Partnern für die Entwicklung und Produktion von Vorprodukten/ Halbzeugen. Dieser Workshop kann genutzt werden, um weitere Erkenntnisse zur produktionstechnischen Umsetzung und zur Kostenstruktur des Streifenkollektors zu gewinnen. Teilnehmer dieses Workshops können sich aus dem Umfeld möglicher Zulieferer oder Auftragsfertiger des Systemintegrators (DAW) gewinnen lassen.
- **I.II Lead-User bzw. Kundenworkshop** (Herbst 2018): Identifikation zukünftiger Kunden bzw. Anwender des Streifenkollektors. Dies können sowohl ausgewählte Bauherren oder Kunden der DAW (z.B. Wohnungsbaugenossenschaften) als auch Architekten, Gebäudeplaner und Fassadenbauer sein, die die Technik kennen und in ihrer Planung berücksichtigen müssen. Sie können wichtige Informationen zum Nutzen und den Anforderungen an zukünftige Produkte liefern. Ein solcher Workshop kann zudem dafür genutzt werden Pilotprojekte für den Streifenkollektor zu identifizieren.

Zu klären ist noch für welche exakten Vorprodukte bzw. Teilgewerke der Systemintegrator DAW Partner benötigen würde. Dies hängt auch davon ab, welche exakte Rolle DAW als Systemintegrator übernehmen möchte und kann innerhalb des Projektkonsortiums geklärt werden. Für die Suche nach geeigneten Partnern können in Folge sowohl Kontakte der DAW als auch der Projektpartner genutzt werden. Die Anzahl der Workshopteilnehmer sollte eine maximale Zahl von 10 – 15 nicht überschreiten.

II Workshops für die solarthermische Jalousie

Für die Umsetzung des Modells der solarthermischen Jalousie wird ebenfalls die Durchführung von zwei modifizierten Lead User Workshops vorgeschlagen. Diese haben jedoch andere Schwerpunkte:

- **II.I Innovationworkshops bzw. bilaterale Treffen mit möglichen Partnern aus der Wertschöpfungskette** (sobald möglich und fortlaufend / in Abstimmung mit Verfügbarkeit Testmuster): Für die Umsetzung des Geschäftsmodells der solarthermischen Jalousie ist noch zu präzisieren, wie die exakte Wertschöpfungskette aussieht, welche Akteure hierfür notwendig sind und welcher unternehmerische Partner die Umsetzung übernehmen kann. Da hierfür wenige renommierte Hersteller und Planer von Fassaden bzw. Sonnenschutzsystemen (z.B. WAREMA, Colt International, Clauss Markisen und Renson) in Frage kommen, erscheint es sinnvoll, mit ihnen zunächst bilaterale Treffen bzw. Innovationworkshops durchzuführen, sobald ein geeigneter Prototyp der Jalousie existiert. Ggf. können zu diesen Treffen auch geeignete Auftragsfertiger hinzugezogen werden.
- **II.II Lead-User-Workshop** (ab Herbst 2018): Wenn die Wertschöpfungskette geklärt ist, kann ein Lead-User-Workshop mit Bauherren und potentiellen Anwendern wie renommierten Architekten, Planern (Transsolar etc.) und Fassadenbauern (Gartner, lokale Partner) erfolgen, auf dem potentielle Anwendungen oder Pilotprojekte entwickelt werden. Aufgabe dieser Workshops ist es auch, eine Finanzierung und potentielle Risiken der Projekte zu berücksichtigen und abzuschätzen.

Bei der solarthermischen Jalousie sind somit noch grundlegendere Voraussetzungen für die Entwicklung der Wertschöpfungskette zu klären, die am besten über die bilateralen Treffen erfasst werden können.

Voraussetzungen für alle Workshops

Voraussetzung für die Workshops ist das Vorliegen belastbarere Aussagen zu Wirkungsgraden, möglichen Fertigungsschritten und der voraussichtlichen Lebensdauer der Kollektoren. Bei den Innovationsworkshops kann noch mit vorläufigen Aussagen gearbeitet werden, da auch in Zusammenarbeit

mit den Partnern die Technik und ihre Leistungsfähigkeit noch verbessert werden sollen. Im Falle der Lead-User-Workshops sollten die Aussagen bereits belastbarer sein da darauf aufbauen erste Kalkulationen zu den Kosten möglicher Projekte vorgenommen werden können.

Von großem Vorteil für die Workshops sind auch Prototypen, Mockups und einfache Handmuster der Komponenten und Anwendungen, um daran mit den Teilnehmern diskutieren zu können. Ggf. können mit den Teilnehmern Geheimhaltungsvereinbarungen unterzeichnet werden, um wettbewerbsrelevante Details zu schützen.

Detailliertere Konzepte für die beiden Workshops werden durch das Borderstep Institut entwickelt und mit den Projektpartnern abgestimmt. Termin für Workshops im Jahr 2018 sollen in Verbindung mit Projekttreffen gefunden werden.

4 Quellen

Beucker, S.; Morawietz, K.; Maurer, C.; Denz, P.-R. (2017): Erfassung von Anwendungsszenarien für Fassadenkollektoren im Projekt Arkol. Interner Projektbericht.

Bierter, W., Fichter, K., Rudeloff, M. & Führ, M. (2005): Sondierungsvorhaben zu Forschungsbedarfe und Förderformen im Förderschwerpunkt ‚Erfolgreiche Geschäftsmodelle in einer nachhaltigen Marktwirtschaft‘, Erarbeitet im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF).

Bucherer, E. (2011): Business Model Innovation - Guidelines for a Structured Approach. Doctoral thesis, St. Gallen.

Chesbrough, H.W.; Rosenbloom, R.S. (2002): The Role of the Business Model in Capturing Value from Innovation: Evidence from Xerox Corporation's Technology Spinoff Companies, Industrial and Corporate Change. 11. 529-555.

Fichter, K. (2004): Der Geschäftsmodellbegriff, Auslegungsvarianten, Merkmale und Definition, Arbeitspapier im Rahmen des Sondierungsprojektes „Geschäftsmodelle“, Berlin.

Hippel v., E. (2005): Democratizing Innovation, MIT Press, Cambridge MA.

Osterwalder, A.; Pigneur, Y. (2011): Business Model Generation. Ein Handbuch für Visionäre, Spielveränderer und Herausforderer, Campus Verlag, Frankfurt a.M.

Wirtz, B.W. (2013): Business Model Management. Design - Instrumente - Erfolgsfaktoren von Geschäftsmodellen. Gabler Verlag, Wiesbaden

Auswertung von Produkt- und Vermarktungs- optionen für architektonisch integrierte Fassaden- kollektoren im Projekt ArKol

Autor:

Severin Beucker

1	Einleitung	3
2	Konzeption und Durchführung der Lead-User-Workshops	3
2.1	Lead-User-Workshop Streifenkollektor	3
2.2	Lead-User-Workshop Solarthermische Jalousie	4
3	Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Lead-User-Workshops	5
3.1	Ergebnisse des Lead-User-Workshops zum Streifenkollektor	5
3.2	Ergebnisse des Lead-User-Workshops zur Solarthermischen Jalousie	6
4	Bewertung der Ergebnisse der Lead-User-Workshops	7
4.1	Bewertung der Ergebnisse des Streifenkollektors	7
4.2	Bewertung der Ergebnisse der Solarthermischen Jalousie	8
5	Gesamtfazit	9
6	Quellen	10

1 Einleitung

Der vorliegende Bericht fasst die Ergebnisse aus zwei Lead-User-Workshops zusammen, die im Projekt ArKol zu möglichen Anwendungen architektonisch integrierter Fassadenkollektoren durchgeführt wurden. Die Anwendungen wurden im Laufe des Projektes ArKol in mehreren Schritten (Szenarien, Geschäftsmodelle, etc.) entwickelt und mündeten in zwei möglichen Anwendungsszenarien bzw. möglichen Produktvarianten (siehe Beucker et al. 2017):

- (1) Streifenkollektor in vorgehängter hinterlüfteter Fassade (VHF): Der Streifenkollektor soll in diesem Fall als vorgefertigtes Modul für die Montage in die Gebäudefassade ausgeführt werden. Er wird als Modul in hinterlüftete Fassadensysteme integriert.
- (2) Solarthermische Jalousie: Die solarthermische Jalousie soll in hochwertigen Glasfassaden (z. B. Doppelfassaden wie CCF) eingesetzt werden. Ihr Funktionsprinzip gleicht damit dem einer normalen Jalousie, wobei sie gleichzeitig erneuerbare Wärme liefert und den Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) verglaster Flächen reduzieren kann.

Für beide Varianten wurden in ArKol mögliche Geschäftsmodelle entwickelt (siehe Beucker 2017). Dabei wurde deutlich, dass für die Umsetzung der Modelle nach Abschluss des Projektes sowohl weitere Partner zur Vervollständigung der Wertschöpfungskette als auch für die Erschließung zukünftiger Märkte benötigt werden, um so schließlich geeignete zukünftige Umsetzungs- und Vermarktungsstrategien für die entwickelten Anwendungen identifizieren zu können.

In der Folge wurden zwei Wege zur Weiterentwicklung der Anwendungen verfolgt. Zum einen wurden Gespräche mit möglichen Umsetzungs- und Kooperationspartnern für eine Fertigung der beiden Varianten begonnen. Diese sollten sicherstellen, dass nach Abschluss des Vorhabens mögliche Wertschöpfungsketten und -partnerschaften bestehen. Zum anderen wurden für beide Anwendungen Konzepte für Lead-User-Workshops entwickelt (siehe Beucker 2017). Das Ziel der Workshops ist, gemeinsam mit zukünftigen Wertschöpfungspartnern und Anwendern der Technik Anforderungen an zukünftige Produkte zu erfassen und möglichst passgenaue Vermarktungsstrategien zu entwickeln. Die Theorie des Lead-Users (dt.: trendführender Nutzer oder Kunde) ist dafür geeignet, da sie davon ausgeht, dass solche Nutzer bzw. Kunden Bedürfnisse formulieren, die Hinweise auf zukünftige Märkte geben und sie zudem über große Fachexpertise und Problemlösungskompetenz verfügen (Hippel v. 2005).

Ein wichtiger Baustein für die Durchführung der Workshops waren zudem Mock-ups oder Demonstratoren der Anwendungen, da an ihnen konkrete Anforderungen an die wirtschaftliche, fertigungstechnische oder gestalterische Umsetzung diskutiert werden konnten. Die Durchführung der Workshops, die ursprünglich für den Sommer 2019 geplant waren, fand daher im Winter 2019/2020 statt, um die dann verfügbaren Mock-ups bzw. Demonstratoren nutzen zu können.

Die Ergebnisse dieser Workshops und die daraus gezogenen Rückschlüsse für zukünftige Produkt- und Vermarktungsoptionen werden in diesem Bericht zusammengefasst.

2 Konzeption und Durchführung der Lead-User-Workshops

Das Borderstep Institut hat gemeinsam mit den Projektpartnern von ArKol folgende Lead-User-Workshops konzeptioniert, geplant und durchgeführt:

2.1 Lead-User-Workshop Streifenkollektor

Gemeinsam mit den Partner DAW, Priedemann Facade-Lab und Fraunhofer ISE wurde ein Konzept für einen Lead-User-Workshop mit potenziellen Anwendern und Kunden zukünftiger Angebote des

Streifenkollektors entwickelt. Dieser fand nach Fertigstellung der Demonstrationsfassade bei DAW in Ober-Ramstadt am 19.02.2020 statt.

Ziel des Workshops war es, Interessenten für den Streifenkollektor zu identifizieren, mit ihnen gemeinsam Anforderungen an zukünftige Produkte zu erfassen und ggf. Partner für die weitere Zusammenarbeit (z. B. in Form von Pilotprojekten oder auch der gemeinsamen Vermarktung) zu gewinnen. Der Streifenkollektor wurde daher als eine seriennahe Anwendung präsentiert. An dem Workshop nahm auch der bereits identifizierte mögliche Fertigungspartner für den Streifenkollektor (Wagner Solar) teil. Damit sollte den Teilnehmern eine möglichst vollständige zukünftige Wertschöpfungskette für den Streifenkollektor dargestellt und zukünftige Einsatzmöglichkeiten diskutiert werden.

Die Teilnehmer des Workshops konnten aus dem Kontaktnetzwerk der DAW sowie aus der Interessentenliste, die vom Fraunhofer ISE auf der BAU 2019 erstellt worden war, gewonnen werden. Es handelte sich dabei schwerpunktmäßig um Architekten, Planer und Immobilienunternehmen mit Interessen an innovativen Fassadensystemen und regenerativer Energiegewinnung.

Der Workshop wurde in zwei Teilen durchgeführt. Im ersten Abschnitt wurden die Technik, das Konzept des Kollektors sowie Anwendungs- und Gestaltungsmöglichkeiten vorgestellt. Nach einer Besichtigung der Demonstrationsfassade bei DAW wurden dann in drei parallel verlaufenden Workshops mit den Teilnehmern Anforderungen in den Kategorien Montage/Konstruktion, Design/architektonische Gestaltung sowie Wirtschaftlichkeit/Vermarktung diskutiert.

Die Ergebnisse dieses Workshops und ihre Bewertung sind in Kap. 3.1 dokumentiert.

2.2 Lead-User-Workshop Solarthermische Jalousie

Für die Solarthermische Jalousie wurde in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern Priedemann Facade-Lab und Fraunhofer ISE ein Lead-User-Workshop für Anbieter und Planer hochwertiger und multifunktionaler Fassaden sowie renommierte Architekten geplant und durchgeführt. Dieser fand am 13.11.2019 bei Priedemann Facade-Lab in Großbeeren/Berlin statt.

Ziel des Workshops war es, die Solarthermische Jalousie als ein Bestandteil hochwertiger Fassaden (-systeme) zu präsentieren (z. B. Doppelfassaden wie CCF). Aufgrund der hohen Komplexität der solarthermischen Jalousie und des damit verbundenen Planungsaufwands lag der Schwerpunkt des Workshops darauf, die Anwendung als ein multifunktionelles Element der Fassadengestaltung vorzustellen und mit den Teilnehmern Anforderungen an die Einsatzmöglichkeiten der Technik zu diskutieren. Als Teilnehmer wurden daher insbesondere Partner bzw. Kunden des Priedemann Facade-Lab sowie des Fraunhofer ISE gewonnen (Architekten als auch Planer/Anbieter), die bereits Erfahrung mit dem Einsatz, der Planung und der Fertigung hochwertiger Fassadensysteme haben.

Der Workshop wurde in zwei Teilen durchgeführt. Im ersten Abschnitt wurde die Technik und das Konzept der Solarthermischen Jalousie sowie Anwendungs- und Gestaltungsmöglichkeiten vorgestellt. Danach erfolgte eine Besichtigung des Demonstrators der Solarthermischen Jalousie im Priedemann Facade-Lab. Im zweiten Teil des Workshops wurden mit den Teilnehmern Anforderungen (gestalterische, technische, wirtschaftliche, (bau-)rechtliche sowie Nutzer- bzw. Kundenanforderungen) für die Weiterentwicklung der Solarthermischen Jalousie erarbeitet und bewertet.

Die Ergebnisse dieses Workshops sind in Kap. 3.2 dokumentiert.

3 Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Lead-User-Workshops

3.1 Ergebnisse des Lead-User-Workshops zum Streifenkollektor

Wie in Kap. 2.1 beschrieben wurden im Lead-User-Workshop für den Streifenkollektor Anforderungen in den drei Kategorie Montage/Konstruktion, Design/architektonische Gestaltung sowie Wirtschaftlichkeit/Vermarktung mit den Teilnehmern diskutiert. In den Teilworkshops wurden folgende Ergebnisse erzielt:

Montage/Konstruktion

In Bezug auf das Montagesystem und die Konstruktion des Streifenkollektors wurden von den Teilnehmern folgende Anmerkungen gemacht:

- Das System der trockenen Anbindung (Schnittstelle zwischen Kollektor und Sammelkanal) wurde durchgängig als vorteilhaft angesehen, da es eine klare Trennung von Gewerken in der Bauphase sowie bei der Wartung und die Übernahme von Garantie ermöglicht.
- Das Kollektorprinzip wurde positiv bewertet. Wünschenswert wäre nach Ansicht der Teilnehmer ein weniger auffälliger Rahmen (ggf. eine rahmenlose Konstruktion) sowie eine verdeckte bzw. weniger auffällige Aufhängung des Kollektors (Vermeidung deutlich sichtbarer Schrauben). Diese Punkte sind bekannt und teilweise bereits gelöst.
- Weiterhin wurde diskutiert, ob es sinnvoll ist, zwei Produktlinien (einfacher Kollektor und höherwertiger Fassadenkollektor) für den Streifenkollektor zu entwickeln, und ob eine Variante für die Integration in ein WDVS entwickelt werden soll. Hierzu gab es keine einhellige Auffassung. Zum einen erscheint ein einfacher Kollektor (z. B. für Dachanwendungen) ein ungeeigneter Vergleich für die auf architektonische Integration ausgelegten Streifenkollektoren zu sein. Zum anderen wurden die Abgrenzung von WDVS und vorgehängten hinterlüfteten Fassaden als schwierig angesehen, da die Systems sich einander annähern, sobald man versucht, einen Streifenkollektor in ein WDVS zu integrieren.

Design/architektonische Gestaltung

In Bezug auf das Design und die architektonische Gestaltung wurden von den Teilnehmern folgende Anmerkungen gemacht:

- Als positiv bewertet wurde von den Teilnehmern, dass der Kollektor flexible Längenmaße ermöglicht und damit ein höheres Maß an Gestaltungsfreiheit erlaubt.
- Als Gestaltungshinweise wurde mehrere Punkte genannt und mit Prioritäten versehen. Diese sind mit abnehmender Priorität:
 - Möglichst rahmenlose Kollektoren
 - Farbigkeit (möglichst nicht dunkelblau/schwarz wie bei marktüblichen spektralselektiven Beschichtungen)
 - Möglichst unsichtbares Befestigungssystem
 - Möglichst nahtloses Fugenbild bei größeren Kollektorfeldern
- Als weitere gestalterische Hinweise wurden genannt:
 - Kollektorfelder, die sich in Größe und Proportion in Fensterraster einfügen
 - Kollektoren, die in Verbundglassystem integriert werden können

Wirtschaftlichkeit/Vermarktung

In Bezug auf die Wirtschaftlichkeit und eine zukünftige Vermarktung des Streifenkollektors wurden von den Teilnehmern folgende Anmerkungen gemacht:

- Eine Vermarktung sollte in erster Linie als Architekturfassade mit solarthermischer Funktion erfolgen.

- Für die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit und eine zukünftige Vermarktung ist es wichtig, spezifische Eigenschaften/Nutzen einer solarthermischen Architekturfassade zu definieren und ihnen einen Wert zuzuordnen. Ein Teilnehmer schlug vor, die Eigenschaften/ Nutzen wie folgt und mit abnehmender Priorität zu gliedern:
 - Wetterschutz
 - Wärmedämmung
 - Energiegewinnung
 - Gestaltung
- Eine frühzeitige Einbeziehung von Fachplanern in die Vermarktung wird als zentral angesehen, da die Fachplaner Einfluss auf die Auswahl von Fassadensystemen haben.
- Der Beitrag des Streifenkollektor zur Erfüllung bzw. Einhaltung von Standards (KfW 40, Energiehaus Plus, etc.) muss deutlich herausgearbeitet werden.

3.2 Ergebnisse des Lead-User-Workshops zur Solarthermischen Jalousie

In Kap. 2.2 wurde beschrieben, dass mit den Teilnehmern des Lead-User-Workshops gestalterische, technische, wirtschaftliche, (bau-)rechtliche sowie Nutzer- bzw. Kundenanforderungen) für die Weiterentwicklung der Solarthermischen Jalousie erarbeitet und bewertet wurden.

In einem ersten Schritt wurde den Teilnehmern zunächst die Möglichkeit gegeben, in vorgeschlagenen Kategorien (I – V) Anforderungen an die Solarthermische Jalousie zu nennen und zu detaillieren. Dies sind die unter den Überschriften I bis V genannten Anmerkungen (siehe Tabelle 1). Diese Anmerkungen wurden gemeinsam mit den Teilnehmern diskutiert und in die vorliegende Form gebracht.

In einem zweiten Schritt konnten die Teilnehmer die Anmerkung und ihr Wichtigkeit frei durch die Vergabe von Punkten bewerten. Dabei konnte jeder Teilnehmer maximal drei Punkte vergeben werden (Kumulieren und Panaschieren möglich). Ziel dieses Schrittes war, eine Einschätzung der Teilnehmer über die Prioritäten der Weiterentwicklung der Solarthermische Jalousie zu erhalten. Anmerkungen, die mit mehreren Punkten bewertet wurden, werden somit durch die Teilnehmer als wichtiger angesehen als solche, die keine oder wenige Punkt erhalten haben. Das Ergebnis der Diskussion und Bewertung ist in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 1: Zusammenfassung und Gewichtung der Anforderungen an die Solarthermische Jalousie

I Gestalterische Anforderungen	Gewichtung	II Technische Anforderungen	Gewichtung	III Wirtschaftliche Anforderungen	Gewichtung
mehr Farbvielfalt		Reduktion von Komplexität	3	geeignete Gebäudetypen die Sonnenschutz benötigen sind: Krankenhäuser, Hotels repräsentative Gebäude von Firmen, Ämtern/ Ministerien, etc.	1
hoher transparenter Anteil des Fassadenelements		Zugänglichkeit für Wartung und Reinigung	1	STJ ist Nischenanwendung und kein Konkurrenzprodukt zu PV	
möglichst visuell reduziert und unauffällig	3	Gewicht < 300gr/m ²		Reduktion der Wärmelast von Gebäuden ist gutes Verkaufsargument (siehe auch g-Wert)	2
Großlamellen auf Glasdächern könnten für Erstanwendung interessant sein, da geringere Komplexität		gut definierte Schnittstellen zur Haustechnik und zu Planern notwendig, klare Gewerketrennung ist wichtig		Alleinstellungsmerkmale noch deutlicher herausarbeiten, Kosten-Nutzen-Verhältnis wird bisher noch kritisch gesehen	1
Lamellen müssen nicht überlappen um Sonnenschutz zu gewährleisten		Wärme sollte möglichst auf nutzbarem Niveau (z.B. 30°C) ausgekoppelt und direkt genutzt werden (z.B. für Flächenheizung)		Schweizer Markt wäre als Einstieg eventuell geeignet, da dort hohe Anforderungen an Gebäude bestehen und mit längeren Zeithorizonten investiert wird	
		Reduktion des g-Wertes bei gleichzeitiger Transparenz ist gutes Verkaufsargument, Glaseckfassaden können wieder gebaut werden		Kombination mit PV könnte wirtschaftlich interessant sein	
		Baugröße der Fluidkopplung sollte kleiner sein	3		
		Stapelpaket der Lamellen sollte niedriger sein			
		Produkt sollte möglichst "enttechnisiert" im Sinne einer CCF präsentiert werden			

IV (Bau-)Rechtliche Anforderungen	Gewichtung	V Nutzer- bzw.- Kundenanforderungen	Gewichtung
Anforderungen an besseren Blendschutz/ Spiegelungen durch Fassaden		Sorgenfreiheit des Kunden mit dem Produkt über die Lebensdauer	3
Frostschutz der Sammelkanäle		Steuerungskonzept der STJ ist zentral und sollte Teil der Gebäudefunktion sein	
Ökobilanz der Materialien/ des Systems muss bekannt sein			
Schallschutz vor Mechanik der Jalousie (<35 dBA in Innenräumen)			
höhere Gewährleistung als üblich erwartbar (> 10 Jahre)			
bewegliche Lamellen können hohen Reinigungs- und Wartungsaufwand erzeugen			

Die Tabelle enthält eine Vielzahl von Hinweisen für die weitere Ausgestaltung der Solarthermischen Jalousie. Besonders hoch gewichtet wurde von den Teilnehmern die visuell reduzierte Gestaltung (Gestalterische Anforderungen), die Reduktion der technischen Komplexität und die Verringerung der Größe der Fluidkopplung (Technische Anforderung) sowie die Umsetzung eines weitestgehend sorgenfreien Produktes (Nutzer-/Kundenanforderung).

Eine zentrale Erkenntnis der nachfolgenden Diskussion war zudem, dass die Reduktion des g-Wertes (Wirtschaftliche Anforderung) durch die Jalousie für die zukünftige Vermarktung ein wichtiges Argument sein kann. Es wurde von mehreren Teilnehmern angemerkt, dass der Bau von südlich bzw. südwestlich ausgerichteten Glasfassaden aufgrund rechtlicher und bautechnischer Vorgaben nur noch bedingt möglich ist. Eine Technik, die den g-Wert durch Energieaustrag reduziert, kann daher für die Umsetzung von Glasfassaden von großer Bedeutung sein. Dadurch verändert sich nach Auffassung der Teilnehmer auch die Bewertung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses der Solarthermischen Jalousie, da sie in ausgewählten Bauvorhaben ein entscheidendes Alleinstellungsmerkmal besitzen kann.

4 Bewertung der Ergebnisse der Lead-User-Workshops

Die Lead-User-Workshops für den Streifenkollektor sowie die Solarthermische Jalousie haben zahlreiche Ansatzpunkte für die weitere Entwicklung der jeweiligen Anwendung ergeben. In den nachfolgenden Abschnitten werden insbesondere Hinweise zu möglichen Geschäftsmodellen und Vermarktungsstrategien zukünftiger Anwendungen ausgewertet. Zentrale Hinweise für Geschäftsmodelle sind beispielsweise solche, die einen Nutzen oder ein Wertversprechen beschreiben (siehe Beucker 2017 und Osterwalder, Pigneur 2011). Aus ihnen können auch Erkenntnisse zu möglichen Vermarktungsstrategien gewonnen werden.

Ziel der nachfolgenden Auswertung ist es, diese Hinweise für die Projektpartner von ArKol nach Ablauf des Vorhabens nutzbar zu machen.

4.1 Bewertung der Ergebnisse des Streifenkollektors

Nutzen/Wertversprechen

Der Workshop für den Streifenkollektor hat einen deutlichen Hinweis zur weiteren Präzisierung des Nutzens ergeben. Von den Teilnehmern wurden sowohl mehrere Nutzen eines Fassadensystems mit Streifenkollektoren (Wetterschutz, Wärmedämmung, Energiegewinnung und Gestaltung) als auch eine Prioritätenreihenfolge genannt.

Eine wichtige Aufgabe für die Weiterentwicklung des Streifenkollektors zu einem marktfähigen Produkt besteht demnach darin, die verschiedenen Nutzen in Produktangeboten für Gesamtfassaden – beste-

hend aus Solarkollektoren und Fassadenbekleidungs-elementen – zu verbinden. Die oben genannte Prioritätenreihenfolge könnte ein Hinweis darauf sein, wie die Nutzen zukünftiger Produkte berücksichtigt und miteinander kombiniert werden könnten. Dies sollte jedoch mit weiteren Lead-Usern bzw. potentiellen Kunden verifiziert werden. In einem weiteren Schritt kann dann mit potentiellen Kunden die Zahlungsbereitschaft, und damit auch ein Preiskorridor, für solche Produkt ermittelt und mit bestehenden Fassadensystemen verglichen werden.

Nicht abschließend geklärt werden konnte die Frage, welche Priorität die Themen Design/Gestaltung sowie Montage/Konstruktion besitzen. Während im Workshop zum Themenfeld Wirtschaftlichkeit/Vermarktung diese Themen eher weniger prioritär bewertet wurden, besaßen sie in den jeweiligen Workshops naturgemäß einen höheren Stellenwert.

Vermarktungsstrategie

Die Workshopteilnehmer waren sich weitestgehend einig, dass der Streifenkollektor als Element oder Komponente einer solarthermischen Architekturfassade vermarktet werden soll. Dies steht im Einklang mit dem oben genannten Mehrfachnutzen (Wetterschutz, Wärmedämmung, Energiegewinnung und Gestaltung) des Kollektors sowie dem Geschäftsmodellentwurf für den Streifenkollektor (siehe Beucker 2017) und rechtfertigt auch einen höheren Produktpreis. Eine solche Vermarktung würde sich gut in das bisherige Portfolio der DAW einfügen, die bereits heute Kombinationsfassaden unter dem Markennamen ‚Lithodecor‘ vertreibt.

Als weniger zielführend wird daher der in den Workshops genannte Hinweis auf verschiedene Produktlinien (einfaches und höherwertiges Produkt) angesehen. Die flexible Gestaltung stellt ein wesentliches Merkmal des Konzepts dar, führt durch diesen Mehrwert jedoch auch zu einem eher hochpreisigen Produkt. Um eine „Low-cost-Variante“ zu realisieren, müssten deutliche Abstriche gemacht werden, was jedoch das bisherige Grundkonzept des Streifenkollektors in Frage stellen würde.

Als positiv für die Vermarktung wurde die trockene Anbindung des Kollektors an den Sammelkanal hervorgehoben, da er eine optimale Gewerketrennung auf Baustellen ermöglicht.

Wichtig für die Vermarktung sind auch die Hinweise auf entsprechende zusätzliche Vermarktungspartner wie Planer und Architekten, die als Mittler zum Kunden bzw. Bauherren wirken. Sie sollten in eine weitere Vermarktungsstrategie einbezogen werden.

Schließlich stellt der Hinweis auf bestehende Standards (KfW 40, Energiehaus Plus, etc.) einen zusätzlichen Ansatzpunkt dar. Hier erscheint es sinnvoll, den Beitrag des Kollektors zur Erfüllung der Standards deutlicher herauszuarbeiten.

Eine Herausforderung für die Vermarktung des Streifenkollektors als Komponente einer solarthermischen Architekturfassade bleibt die Demonstration der Anwendbarkeit und Durchführbarkeit der Technik (Proof of Concept). Mit der Errichtung der Demofassade bei DAW ist zwar ein erster Schritt in diese Richtung umgesetzt worden, weitere Pilotvorhaben mit den Streifenkollektoren im öffentlichen Raum würden die Demonstration der Umsetzbarkeit jedoch deutlich verbessern. Dies könnte neben der technischen Weiterentwicklung Fokus eines möglichen öffentlich geförderten Folgeprojekts sein.

4.2 Bewertung der Ergebnisse der Solarthermischen Jalousie

Nutzen/Wertversprechen

Der Workshop für die Solarthermischen Jalousie hat ergeben, dass neben einer Vielzahl von Hinweisen zur Gestaltung, dem Design sowie zur technischen Realisierung der Jalousie vor allem die Reduktion des g-Wertes in südlich bzw. südwestlich ausgerichteten Glasfassaden ein Hauptnutzen eines zukünftigen Produktes sein kann. Dieser Nutzen sollte noch stärker herausgearbeitet werden.

Die Nutzenbestimmung und die Ermittlung einer Zahlungsbereitschaft sowie eines Produktpreises ist in diesem Fall deutlich komplexer, da sich die Solarthermische Jalousie vermutlich nicht als singuläres Produkt, sondern nur als Bestandteil einer multifunktionellen Fassade bzw. eines Fassadensystems anbieten lässt (siehe auch Vermarktungsstrategie).

Vermarktungsstrategie

Die Workshopteilnehmer waren sich einig, dass ein Produkt Solarthermische Jalousie für große, anspruchsvolle und architektonisch herausgehobene Bauvorhaben (mit Glasfassaden, multifunktionellen Fassaden, etc.) interessant ist. Ebenfalls einig waren sich die Teilnehmer darin, dass noch eine Vielzahl von technischen Details (z. B. Antrieb, Bauhöhe der Lamellen) optimiert werden können.

Aufgrund der Komplexität der Solarthermischen Jalousie wird die Vermarktung jedoch als anspruchsvoll angesehen. Diese Einschätzung deckt sich mit dem bisherigen Entwurf des Geschäftsmodells zur Solarthermischen Jalousie (siehe Beucker 2017) sowie den bisher geführten Gesprächen mit etablierten Fassadenbauern und -planern. Die Gewinnung eines Fertigers und der Einstieg in eine Vermarktung einer solchen Technologie setzt nach Einschätzung der Workshopteilnehmer voraus, dass es eine oder mehrere Installationen der Solarthermischen Jalousie gibt, an denen wichtige Eigenschaften wie g-Wert-Reduktion, Wartungsfreiheit und Garantie überzeugend demonstriert werden können.

Die größte Herausforderung für die Vermarktung dürfte im ersten Schritt daher darin liegen, ein Pilotvorhaben mit einem Bauherrn zu gewinnen, der einen Bedarf an architektonisch anspruchsvollen und multifunktionellen Fassadenlösungen besitzt. Mit dem geplanten Forschungsvorhaben „DESTINI“, bei dem eine Demonstrationsumsetzung im Bauvorhaben SpringPark VALLEY geplant ist, könnte dieser Schritt erfüllt sein.

In einem zweiten Schritt sollte dann für eine Vermarktung ein geeignetes Partnernetzwerk definiert werden, das Planung, Fertigung und Garantie zuverlässig und reproduzierbar gewährleisten kann. Erst dann macht es Sinn, weitere potentielle Kunden, z.B. Bauherren, einzubeziehen.

5 Gesamtfazit

Abschließend kann für die Produkt- und Vermarktungsoptionen der beiden Anwendungen folgendes Fazit gezogen werden:

Streifenkollektor

Für den Streifenkollektor ergibt sich eine gute und fortgeschrittene Produkt- und Vermarktungsoption. Die technischen und gestalterischen Ziele für die Optimierung des Streifenkollektors (Heatpipe, randloser Kollektor, Farbigkeit, etc.) sind dokumentiert. Die Partner einer zukünftigen Wertschöpfungskette sind mit Wagner Solar und DAW vorhanden und eine Demonstrationsfassade, mit der Messwerte und Erfahrungen ausgewertet werden können, existiert. Damit ist ein wichtiges Ziel von ArKol erreicht.

Eine Frage, die im weiteren Verlauf auftreten wird, ist z. B. die Entscheidung darüber, ob ein Streifenkollektor in das Portfolio von Lithodecor/DAW aufgenommen werden kann und soll, und ob das Unternehmen damit einen zentralen Platz in der Wertschöpfungskette einnimmt. Dies kann sicherlich erst nach der Realisierung eines oder mehrerer Pilotvorhaben mit signifikanten Stückzahlen des Streifenkollektors entschieden werden. Die Umsetzung von Pilotvorhaben besitzt daher eine hohe Priorität.

Unmittelbaren Einfluss auf diese Entscheidung und eine Vermarktungsstrategie hat auch der kommunizierbare Nutzen bzw. Mehrwert des Streifenkollektors. Wie bereits im Workshop deutlich wurde, wäre es sinnvoll, den Nutzen noch differenzierter herauszuarbeiten und spezifischen Funktionen des Kollektors einen Wert bzw. die Erfüllung eines Standards zuzuordnen. Dies sollte nach Projektabschluss bzw. in einem Folgevorhaben weiterverfolgt werden.

Ein weiterer Faktor, der sich auf eine unternehmerische Entscheidung auswirken wird, ist die Gesamtentwicklung des Marktes und der Förderung für Solarthermie. Derzeit wird diese Entwicklung eher positiv eingeschätzt, da sich der Handlungsbedarf erneuerbare Energien und Wärme in Gebäuden einzusetzen zusehends verschärft.

In der weiteren Zukunft, und falls die Fertigung größerer Stückzahlen des Streifenkollektors notwendig sein sollte, kann eine Entscheidung darüber notwendig sein, welche Position Wagner Solar in der Wertschöpfungskette einnimmt.

Solarthermische Jalousie

Für die Solarthermische Jalousie ergibt sich noch keine eindeutige Produkt- und Vermarktungsoption. Dies liegt zum einen daran, dass die hohe Komplexität der Anwendung noch zahlreiche Detaillösungen und Vereinfachungen erfordert (z.B. wartungs- und geräuscharmer Anpressmechanismus, Reduktion der Lamellendicke). Hierfür kann im Nachfolgevorhaben DESTINI gezielt nach Lösungen gesucht werden.

Zum anderen erfordert die Solarthermische Jalousie die gezielte Ansprache eines sehr kleinen Nutzer- bzw. Kundenkreises. Dies wurde auch schon bei der Entwicklung eines Geschäftsmodells für diese Anwendung deutlich (siehe Beucker 2017). Dort wurde das potentielle Kundensegment mit Bauherren von repräsentativen Immobilien und das Nutzenversprechen mit einem ästhetisch einzigartigen und multifunktionalen Fassadenbauelement angegeben. Die Solarthermische Jalousie zielt damit nach Ansicht des Projektkonsortiums auf einen sehr kleines und hochwertiges Marktsegment ab, was die Gewinnung möglicher Anwender und Pilotkunden zu einer anspruchsvollen Aufgabe macht.

Zwei Punkte, die für die Weiterentwicklung des Geschäftsmodells sowie einer Vermarktungsstrategie relevant sind, wurden durch den Lead-User-Workshop zur Solarthermischen Jalousie jedoch nochmals deutlich. Erst nach ihrer Klärung kann eine weitere Entwicklung und Bewertung des Geschäftsmodells und der Vermarktungsstrategie erfolgen.

Die Teilnehmer des Workshops betonten, dass die Reduktion des g-Wertes in Glasfassaden (Verringerung der Kühllast) bei gleichzeitiger Transparenz ein entscheidender Nutzen sein kann, der für den Einsatz der Solarthermischen Jalousie spricht. Dieser Nutzen sollte noch stärker herausgearbeitet werden.

Außerdem wurde von den Teilnehmern betont, dass für den Einsatz der Solarthermischen Jalousie in großen, repräsentativen Fassaden die Garantie entscheidend ist. Gerade weil es sich oftmals um prestigeträchtige Projekte handelt, sollte bei einer ersten Umsetzung darauf geachtet werden, dass für mindestens 10 Jahre ein reibungsloser Betrieb der Jalousie gewährleistet werden kann. Damit ist für das Nachfolgevorhaben DESTINI ein anspruchsvolles Ziel formuliert worden.

6 Quellen

Beucker, S. (2017): Geschäftsmodellentwürfe für Fassadenkollektoren im Projekt ArKol/Erfassung von Anwendungsszenarien für Fassadenkollektoren im Projekt ArKol. Interner Projektbericht.

Beucker, S.; Morawietz, K.; Maurer, C.; Denz, P.-R. (2017): Erfassung von Anwendungsszenarien für Fassadenkollektoren im Projekt ArKol. Interner Projektbericht

Hippel v., E. (2005): Democratizing Innovation, MIT Press, Cambridge MA.

Osterwalder, A.; Pigneur, Y. (2011): Business Model Generation. Ein Handbuch für Visionäre, Spielveränderer und Herausforderer, Campus Verlag, Frankfurt a.M.