

Umwelttechnik in Baden-Württemberg



Entwicklung eines solaren, sorptionsgestützten Klimalüftungssystems (Kühlen/Heizen) mit (fassadenintegrierten) Vakuumröhren- SolarLuftKollektoren

Abschlussbericht zum Förderprogramm
"EFRE Umwelttechnik"
des Ministeriums für Umwelt, Klima und
Energiewirtschaft Baden-Württemberg



Europäische Union
Europäischer Fonds für regionale Entwicklung

investition in
Ihre Zukunft!



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Umwelttechnik in Baden-Württemberg

Autoren:

Gunther Munz, Harry Kummer, Stefan Henninger
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) Freiburg
Thorsten Siems
Firma airwasol GmbH & Co. KG, Gundelfingen
Peter Wohleben, Florian Glücklich
Firma Contherm Wärmedämmsysteme GmbH, Neuenstein

Förderkennzeichen: UT 260-264
Laufzeit: 15.09.2011 - 30.09.2013

Das Projekt wurde je zur Hälfte mit Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) im Rahmen des Operationellen Programms für das Ziel „Regionale Wettbewerbsfähigkeit und Beschäftigung“ und mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert.

Februar 2014



Europäische Union
Europäischer Fonds für regionale Entwicklung

investition in
Ihre Zukunft!



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Inhalt

1	Kurzbeschreibung der Forschungsergebnisse	6
2	Einleitung.....	7
2.1	Motivation für das Vorhaben SorLuko	7
2.2	Wissenschaftlicher und technischer Stand und Anknüpfungspunkte zu Beginn des Vorhabens	8
2.2.1	Solar(luft)kollektoren zur solaren Klimatisierung	8
2.2.2	Offene Kühl- und Entfeuchtungsverfahren / Vorarbeiten ECOS	8
2.2.3	Beschichtungsverfahren und -systeme	9
2.3	Aufgabenstellung.....	10
2.3.1	Entwicklung eines fassadenintegrierten, leistungsgesteigerten Solarluftkollektors mit optimierter Wärmedämmung.....	10
2.3.2	Entwicklung eines sorptiv beschichteten Luft-Luft-Wärmeübertragers mit angepasster Wärmeübertragergeometrie und neu entwickelter Beschichtungstechnologie	11
2.3.3	Aufbau eines Demonstrationssystems zum Nachweis der Funktionsfähigkeit und des Entwicklungsfortschritts der Komponenten Kollektor und Wärmeübertrager	11
3	Eingehende Darstellung der wiss./techn. Ergebnisse nach Arbeitspaketen	13
3.1	AP 1: Entwicklung Solarluftkollektor	13
3.1.1	Absorberröhre.....	13
3.1.2	Kollektorgehäuse und Isolierung	17
3.1.3	Konstruktion Röhrenverschraubung	22
3.1.4	Optik	24
3.1.5	Solarregler	25
3.2	AP 2: Herstellung sorptiver Wärmeübertrager	27
3.2.1	Vorversuche zur Beschichtung.....	27
3.2.1.1	Festlegung der Beschichtungsanforderungen und Materialauswahl	27
3.2.1.2	Upscaling von Probeblechen auf Probenkanäle.....	28
3.2.1.3	Variation der Viskosität und rheologische Additive	29
3.2.2	Wärmeübertragerherstellung	33
3.2.2.1	Platte-Steg Aufbau	34
3.2.2.2	Taschen-Wärmeübertrager Hoval® ST-040/A-40,0	39
3.2.2.3	Wärmeübertrager aus Ladeluftkühlern	40
3.2.2.4	Variantenbewertung	43
3.2.3	Beschichtung des Funktionsmusters	46
3.2.3.1	Aufbau der Coating-Anlage	46
3.2.3.2	Dummy-Experimente	47
3.2.3.3	Beschichtung des Haugg-Wärmeübertragers	51
3.3	AP3: Charakterisierung	54
3.3.1	Charakterisierung der Entfeuchtungsleistung des Funktionsmusters.....	54
3.3.2	Charakterisierung der Luftkollektorleistung	65
3.3.3	Charakterisierung des Gesamtsystems.....	69
3.4	AP 4: Aufbau System	73
3.5	AP 5: Projektcontrolling und Ergebnistransfer	78
3.5.1	Zwischenberichte	78
3.5.2	Projektcontrolling.....	78
3.5.3	Ergebnistransfer	78
4	Projekttablauf und Meilensteine	80
4.1	Projekttablauf.....	80

4.2	M1 Fertigstellung Fassadenkollektor für Systemtests	80
4.3	M2 Funktionsmuster sorptiver Wärmeübertrager fertiggestellt	81
4.4	M3 Funktionsnachweis des Gesamtsystems und der Einzelkomponenten	81
4.5	M4 Endbericht und Projektabschluss erfolgreich	81
5	Verwertungsplan der erzielten Ergebnisse	83
5.1	Erfindungen / Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte	83
5.2	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten	83
5.3	Wissenschaftliche und / oder technische Erfolgsaussichten	85
5.4	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	85
6	Liste der Veröffentlichungen und Vorträge	87
6.1	Veröffentlichungen	87
6.1.1	Journal „Applied Thermal Engineering“	87
6.2	Vorträge	87
6.2.1	Heat Powered Cycles Conference / HPC-2012	87
6.2.2	Deutsche Solarthermie Technologie Plattform / DSTTP-2013	87
6.2.3	IHK – „Best Practices in Innovation“	87
6.2.4	Nachhaltige (Bau-)Materialien und Energiesysteme / EFRE-Umwelttechnik	87
6.2.5	5th International Conference Solar Air-Conditioning / OTTI-SAC-2013	87

1 Kurzbeschreibung der Forschungsergebnisse

Im Konsortialvorhaben SorLuko wurden die Hauptkomponenten eines solarthermisch angetriebenen Klimalüftungssystems auf Basis von sorptiver Entfeuchtung und Verdunstungskühlung neu entwickelt und zur Demonstration des Funktionsprinzips eine solche Anlage aufgebaut.

Der Partner airwasol konnte im Projektverlauf die Neuentwicklung seines Vakuurröhren-Solarluftkollektors, basierend auf durchgängigen Röhren, weitestgehend abschließen. Das Prinzip der beidseitig offenen Röhren ermöglicht dabei ein völlig neues Kollektorlayout, welches gerade für den Einsatz in Gebäudefassaden deutliche Vorteile hinsichtlich der Ausnutzung der von Fensteröffnungen durchbrochenen Flächen sowie im Erscheinungsbild und vor allem bei der Montage bietet. Weiterhin konnte mit dem neuen Kollektor der Druckverlust und somit der elektrische Stromverbrauch für die Lüfter deutlich reduziert werden. Durch die Integration des Hochleistungsdämmstoffes MPH-1000 des Partners Contherm konnte die Dämmwirkung des Kollektorheaders bei sehr geringer Dämmstärke und damit optisch schlankem Erscheinungsbild deutlich verbessert werden.

Der Partner Fraunhofer ISE entwickelte im Vorhaben eine binderbasierte Beschichtungstechnologie zum Aufbringen des Sorptionsmaterials auf die Aluminiumoberfläche des Wärmeübertragers für das Klimalüftungssystem. Der Upscalingprozess konnte dabei mit der Beschichtung des Funktionsmusters erfolgreich abgeschlossen werden. Die Leistungsfähigkeit der entwickelten und umgesetzten Beschichtung konnte dabei auf verschiedenen Größenskalen unter Beweis gestellt werden, dies wurde auch in einem Beitrag des reviewed Journals „Applied Thermal Engineering“ veröffentlicht.

Die Demonstrationsanlage wurde am Standort des Partners airwasol aufgebaut und ging im Sommer 2013 in Betrieb. In Messkampagnen im Juli und August konnte eine hohe Entfeuchtungs- und Kühlleistung nachgewiesen werden. Die Gesamtkühlleistung der Anlage betrug dabei 2 kW bei einem Volumenstrom von 350 m³/h und einer Entfeuchtung von 4,4 g/kg Luft. Gleichzeitig wurde auch ein sehr guter thermischer Wirkungsgrad (COP) von 0,65 erreicht. Der Mess- und Demonstrationsbetrieb hat somit die Einsetzbarkeit und Leistungsfähigkeit des Anlagenkonzepts selbst unter relativ ungünstigen klimatischen Bedingungen mit geringen Außenluftfeuchten unter Beweis gestellt.

2.1 Motivation für das Vorhaben SorLuko

In den letzten Jahren trat eine Häufung von sommerlichen „Blackouts“ der elektrischen Versorgungssysteme in den USA (Kalifornien 2001, Nordwest-Blackout, 2003, Florida Blackout 2008) wie auch im europäischen Raum (Skandinavien, London, Italien 2003) auf.

Ungeachtet der nicht final geklärten Gründe dieser Ausfälle ist die starke Belastung der Netze bei hohen Temperaturen durch Kompressionskältemaschinen unbestritten. Der Kühlungsbedarf im Büro- und Wohnungsbau steigt seit Jahren auch im europäischen Raum kontinuierlich an, was zum einen auf architektonischen Ursachen (große, nach Süden ausgerichteten Glasfassaden), zum anderen auf das zusehends wärmer und trockener werdende Klima und den höheren Komfortanspruch zurückgeführt werden kann.

Der Zeitraum des höchsten Kühlbedarfs korreliert zumeist mit einer hohen Sonneneinstrahlung, beginnend am Vormittag bis in die frühen Abendstunden. Wird die Kühlung über herkömmliche strombetriebene Kompressionskältemaschinen hergestellt, addiert sich dieser zusätzliche Energiebedarf zu den Spitzenlastzeiten und beansprucht die Versorgungsnetze und Kraftwerke. Dies hat natürlich auch Einfluss auf den Anstieg der CO₂-Emissionen.

Gleichzeitig findet ein harter Wettbewerb um die zur Verfügung stehende Dachfläche zur Nutzung erneuerbarer Energien (Photovoltaik, Solarthermie) statt.

Der in diesem Projekt vorgesehene Lösungsweg adressiert hierbei die oben beschriebenen Probleme zum einen durch die energetische Erschließung der Fassade und zum anderen durch ein thermisch angetriebenes System zur Klimatisierung.

Die Verbindung dieser zwei Technologien ist ein neuartiger Lösungsweg, der in dieser Art noch nicht beschritten wurde.

2.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand und Anknüpfungspunkte zu Beginn des Vorhabens

2.2.1 Solar(luft)kollektoren zur solaren Klimatisierung

Verfügbare Systeme und Kollektoren zur solaren Kühlung oder Heizung setzen durchweg auf Wasserkollektoren. Des Weiteren existieren fast ausschließlich Aufdach-Systeme.

Ein großer Nachteil dieser Wasser- und Wasser-Glykol-Solaranlagen ist die Verdampfung der Kollektorflüssigkeit in Stillstandsperioden (Stagnation) wegen fehlender Wärmeabnahme. Dies kann bei unprofessionell montierten Anlagen durchaus zu gefährlichen Betriebszuständen (Dampfschläge) führen. Weiterhin ist das eingesetzte Frostschutzmittel auf Glykolbasis nicht hochtemperaturstabil und zersetzt sich ab ca. 180°C, was zu einer Verblockung der Kollektorkanäle führen kann.

Die Nutzung der Fassade zur Energiegewinnung ist bislang zunächst nur wenig untersucht und befindet sich in den Anfängen der Entwicklung. Bisherige sowie auch aktuelle Projekte für energiesammelnde Fassaden untersuchen meistens Hochhausfassaden (Häuserkategorien > 30 Meter Bauhöhe). Diese Kollektoren sind nicht mit denen von privaten oder kleinen Gebäuden vergleichbar. Es werden andere Montagesysteme sowie Montagen direkt im Fassadenherstellungswerk angewendet. Auf der Baustelle werden Plug-and-Play Systeme verwendet, welche nur vorgefertigt in sehr großer Stückzahl projektbezogen kostengünstig realisierbar sind.

Die typischen Fassaden der anvisierten Gebäudeklasse „Ein- und Mehrfamilienhäuser sowie kleine Bürogebäude“ sind mit ihrer kleingliedrigen Struktur für herkömmliche Solarkollektoren, insbesondere Flachkollektoren, nur schwer nutzbar. Die zahlreichen Öffnungen für Fenster und Türen führen bei einer optimalen Ausnutzung der verfügbaren Fassadenfläche zwangsläufig zu teuren Sonderanfertigungen.

Im Bereich der Solarluftkollektoren mit Absorberröhren für hohe Temperaturen gibt es derzeit die Firma Kollektorfabrik in March-Buchheim sowie die aus der Kollektorfabrik heraus gegründete aber selbstständige Firma airwasol. Kollektorfabrik hat ein Montagesystem für Flach- und Schrägdächer, jedoch kein Fassadenmontagesystem. Weltweit gesehen gibt es außer diesen zwei Firmen lediglich Anbieter von Flachkollektoren in Kastenbauweise. Ein variables System mit Absorberröhren zum Einsatz an der Fassade ist nicht verfügbar.

2.2.2 Offene Kühl- und Entfeuchtungsverfahren / Vorarbeiten ECOS

Im Bereich der DEC-Systeme (Desiccant Evaporative Cooling/Verdunstungskühlung) sind hauptsächlich Systeme zur Entfeuchtung und Kühlung mit Sorptions- und Wärmetauschrotoren marktverfügbar. Diese beanspruchen viel Platz und kommen daher nur für mittlere bis große

Kälteleistungen und somit große Gebäude in Frage. Weiterhin finden in solchen Systemen die sorptive Entfeuchtung und die Kühlung in zwei aufeinander folgenden, getrennten Schritten statt.

Gesamtsysteme zur solaren Kühlung oder Heizung sind rar und finden sich hauptsächlich als Systeme mit getrennten Fluidkreisläufen auf dem Markt. Für die Kühlung wie auch die Heizung werden hierbei geschlossene, im Niederdruck arbeitende Adsorptionskältemaschinen/-wärmepumpen oder aber Flüssig-Absorptionskältemaschinen/-wärmepumpen eingesetzt.

In dem vorangegangenen Forschungsvorhaben „ECOS“ am Fraunhofer ISE wurde das grundlegende Verfahren (Evaporatively COoled Sorptive heat exchanger“) entwickelt, welches einen sorptiv beschichteten Kreuzstromwärmeübertrager nutzt. Bislang wurde die nötige Wärme zum Antrieb des Prozesses jedoch über Heizregister eingekoppelt. Mögliche Wärmequellen sind dabei Abwärme z.B. aus Blockheizkraftwerken oder auch Wasser/Glykol durchströmte Solarkollektoren.

Ein wichtiges Ergebnis dieser Arbeiten war, dass die eingesetzten gefalzten Plattenwärmeübertrager den Belastungen nicht standhalten, und schon nach einigen Wochen im Betrieb Leckagestellen aufweisen, was für den Prozess mit indirekter Befeuchtung ein KO-Kriterium darstellt.

2.2.3 Beschichtungsverfahren und -systeme

Gängige Beschichtungsverfahren z.B. aus der Elektronik- und Halbleiterindustrie sind meist auf die Aufbringung von Lackfilmen beschränkt und liefern keine diffusionsoffenen Systeme zur Einbringung von Zeolith. Neuere Entwicklungen zur Fertigung von Zeolith-Formkörpern zielen wiederum auf die Herstellung von massiven, brikketähnlichen Bauteilen, deren Fertigungsschritte nicht für einen Wärmeübertrager anwendbar sind.

Im Bereich der Beschichtungstechnik kann nach derzeitigem Recherchestand lediglich ein Anbieter aus dem asiatischen Raum die Anforderung einer stabilen, für den Anwendungsfall geeigneten sorptiven Beschichtung erfüllen, der aber aus geschäftspolitischen Gründen den Vertrieb von Produkten und Dienstleistungen im Bereich Adsorptionstechnik derzeit ausgesetzt hat. Ein weiteres Technologieunternehmen, eine Ausgründung des Fraunhofer ISE, beschäftigt sich mit der Direktaufkristallisation von Zeolith auf Metalloberflächen. Dieses Verfahren ist aber für den fokussierten Anwendungsfall zu aufwendig und teuer.

2.3 Aufgabenstellung

Das Gesamtziel des Vorhabens war die Entwicklung eines neuartigen Klimalüftungssystems auf Basis von fassadenintegrierten Vakuum-Solarluftkollektoren und eines sorptiv beschichteten Luft-Luft-Wärmeübertragers.

Hierbei bietet die Nutzung der Fassade zur solaren Wärmegewinnung die Möglichkeit, den Anteil der regenerativen Energieversorgung von Gebäuden allgemein sowie insbesondere für Gebäude, deren Dachfläche bereits anderweitig genutzt oder von der Ausrichtung ungeeignet ist, zu erhöhen. Daher können durch das hier vorgestellte Konzept in Zukunft weitere Gebäude für die Solarenergieerzeugung ökologisch wie auch ökonomisch erschlossen werden.

Im Einzelnen sind die Entwicklungsziele entsprechend den Arbeitspaketen dargestellt:

- (1) Entwicklung eines fassadenintegrierten, leistungsgesteigerten Solarluftkollektors mit optimierter Wärmedämmung
- (2) Entwicklung eines sorptiv beschichteten Luft-Luft-Wärmeübertragers mit angepasster Wärmeübertragergeometrie und neu entwickelter Beschichtungstechnologie
- (3) Aufbau eines Demonstrationssystems zum Nachweis der Funktionsfähigkeit und des Entwicklungsfortschritts der Komponenten Kollektor und Wärmeübertrager.

Im Detail waren folgende Arbeiten an den Teilkomponenten geplant:

2.3.1

Entwicklung eines fassadenintegrierten, leistungsgesteigerten Solarluftkollektors mit optimierter Wärmedämmung

Ziel der Kollektorentwicklung war die Integration in die Fassade eines typischen Wohn- oder kleinen Bürogebäudes. Die Montage der Absorberröhren (in diesen wird die Luft durch die Sonneneinstrahlung erwärmt) ist normalerweise in der 70° bis 90° Position in einer Fassade nur mit sehr großem Personalaufwand auf der Baustelle möglich. Für eine schnelle, sichere und flächenoptimierte Kollektormontage an der Gebäudefassade war daher eine neue an die Fassade angepasste Konstruktion der Absorberröhrenhalter ein wichtiges Arbeitspaket.

Hierzu sollte auch die Möglichkeit der Kollektoranpassung an Fassadenöffnungen (Fenster) untersucht und umgesetzt werden. In Zusammenarbeit mit dem Projektpartner Contherm sollte durch eine verbesserte Wärmedämmung eine maximale Arbeitstemperatur von $T_{max} > 120^{\circ}\text{C}$ erreicht werden. Dadurch wird gleichzeitig ein verbesserter

Kollektorwirkungsgrad im Mitteltemperaturarbeitsbereich ab 100°C erreicht. Weitere Entwicklungsziele waren die Minimierung des Druckverlustes, die Verbesserung der Aeroakustik, Optimierung des Wärmetransports innerhalb des Kollektors vom Absorberrohr hin zum Verbraucher sowie die Entwicklung wirtschaftlicher Verarbeitungsmethoden.

2.3.2 Entwicklung eines sorptiv beschichteten Luft-Luft-Wärmeübertragers mit angepasster Wärmeübertragergeometrie und neu entwickelter Beschichtungstechnologie

Ziel der Entwicklung war die Herstellung eines sorptiv beschichteten Wärmeübertragers für den Mitteltemperatureinsatz mit Regenerationstemperaturen über 100°C. Hierzu musste zunächst ein Luft-Luft-Wärmeübertrager entwickelt werden, welcher bezüglich seiner geometrischen Eigenschaften sowie der Beschichtung den gegebenen Einsatzanforderungen genügt. Das Fraunhofer ISE ließ im Unterauftrag von der Firma Schwarzwälder Metallwarenfabrik einen Wärmeübertrager fertigen, der sich zum einen durch eine hohe Oberfläche und zum anderen durch eine gute Luftführungsstruktur auszeichnet. Das Fraunhofer ISE lieferte hierzu die Kenngrößen wie z.B. Luftvolumenstrom, zulässiger Druckverlust und Mindestoberfläche sowie die Schnittstellenauslegung zum Lüftungsgerät. Die Schwarzwälder Metallwarenfabrik Haugg GmbH fertigte nach diesen Angaben einen geeigneten metallischen Wärmeübertrager.

Die metallische Oberfläche sollte dann am Fraunhofer ISE mit einem geeigneten Sorptionsmaterial beschichtet werden, wobei hier der Fokus auf der Leistungsfähigkeit sowie der Stabilität der Beschichtung liegen. Dazu wurden Beschichtungsversuche an verschiedenen Blechproben durchgeführt, um den Beschichtungsablauf zu optimieren. Die beschichteten Proben wurden dann bezüglich Stabilität und Sorptionsverhalten charakterisiert. Als letzter Schritt wurde dann der gesamte Wärmeübertrager mit einer sorptiven Beschichtung versehen, der dann für die Charakterisierung und das Demonstrationssystem verwendet werden sollte.

2.3.3 Aufbau eines Demonstrationssystems zum Nachweis der Funktionsfähigkeit und des Entwicklungsfortschritts der Komponenten Kollektor und Wärmeübertrager

Zum Zwecke der Evaluation des Gesamtsystems und des Nachweises der Funktionsfähigkeit der Einzelkomponenten sollte ein Demonstrationssystem, bestehend aus Kollektor, Wärmeübertrager und Lüftungsgerät, am Firmenstandort der airwasol in Gundelfingen aufgebaut werden. Die gekühlte, entfeuchtete Zuluft wird zur Kühlung eines Produktionsraumes für temperaturempfindliche sowie Frischluft benötigenden Klebungen eingesetzt. Der hierbei angestrebte Zielbereich lag in der Verringerung der absoluten

Feuchte eines Luftvolumenstromes von 200 m³/h um einen Betrag von mindestens 5g/m³, bei einem für einen Sommertag in Süddeutschland typischen Außenluftzustand von 32°C und 13 g/m³ absoluter Feuchte. Diese Daten beziehen sich lediglich auf die Entfeuchtungsphase, nicht auf den Gesamtzyklus aus Entfeuchtung und Regeneration, da der Demonstrator diskontinuierlich betrieben wird.

Einleitung

3

Eingehende Darstellung der wiss./techn. Ergebnisse nach Arbeitspaketen

Eingehende Darstellung der wiss./techn. Ergebnisse nach Arbeitspaketen

3.1 AP 1: Entwicklung Solarluftkollektor

Zum Projektantrag waren die Hauptziele die Verbesserung der Isolierung und die Fassadenintegration eines bestehenden Kollektors und Komponenten. Gleich am Anfang des Projektes zeigte sich aber, dass die Verwendung von Standard Solarkollektorkomponenten, wie z.B. fertige Gehäuseformen und einseitig offene Glas-Glas-Vakuurröhren, den sogenannten „Sydney-Tubes“, für Fassadenluftkollektoren nicht geeignet ist. Die Standardgehäuse bieten nicht die Flexibilität (verschiedene Größen und Farben), welche in Fassaden benötigt wird.

Nach verschiedensten Konstruktionsvorschlägen entschied sich airwasol für die Entwicklung eines komplett neuen Solarluftkollektors. Es wurden keinerlei Komponenten von anderen Wasser- oder Luftkollektoren eingesetzt. Gehäuse, Röhrenverbinder, Isolierung und das wichtigste Bauteil, eine durchgängige Absorberröhre, wurden von Grund auf neu entwickelt.

3.1.1 Absorberröhre

Die Standard Sydney-Tube ist vor über 20 Jahre für Wassersysteme in Asien entwickelt worden. Sie wird seitdem weltweit für Wasser- und Wasser-Glykol-Systeme eingesetzt. Für Luft als Wärmeträgermedium wird die Durchströmung auf der ganzen Röhrenlänge durch ein Injektionsrohr mit dadurch bedingter Strömungsrichtungsänderung am Ende der Röhre erreicht (vgl. *Abbildung 1*).

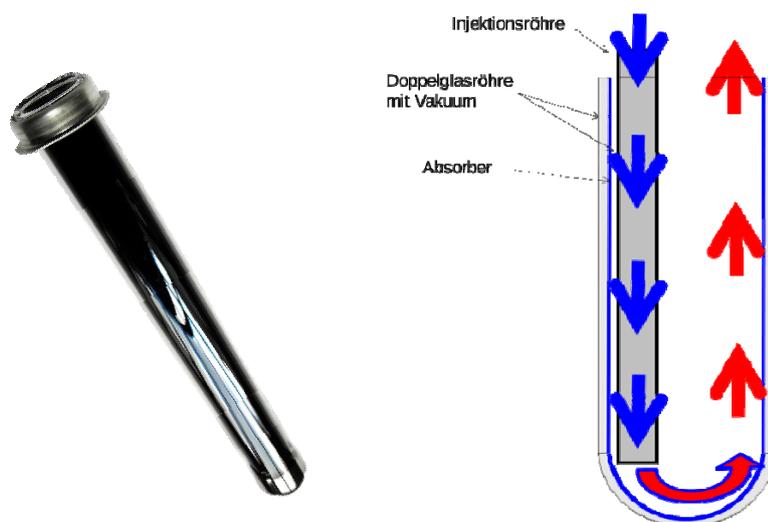


Abbildung 1: Einseitig geöffnete Vakuurröhre (Sydney-Tube)

Vorteile der Sydney-Tube

- Sehr günstige Herstellung in China
- Herstellung als Massenware
- Einfaches Konzept, sehr langzeitstabil

Nachteile

- Langer Transportweg
- Qualität nicht für Fassaden geeignet, sehr große Toleranzen
- Nicht flexibel in der Farbgebung, Längen und Durchmessern
- Nur einseitig offen, somit komplizierte Verschaltung mit hohem Druckverlust

Bei der Sydney-Tube überwiegen die Nachteile für eine Fassadenanwendung, besonders die sehr schlechte Möglichkeit einer druckverlustoptimierten Verschaltung der einzelnen Vakuurröhren. Für die Luft-Durchströmung muss in jede Glasröhre eine Injektionsröhre eingesetzt werden, was den Druckverlust und die Materialkosten sehr erhöht.

Das neue Absorberrohr ist auf beiden Seiten offen.

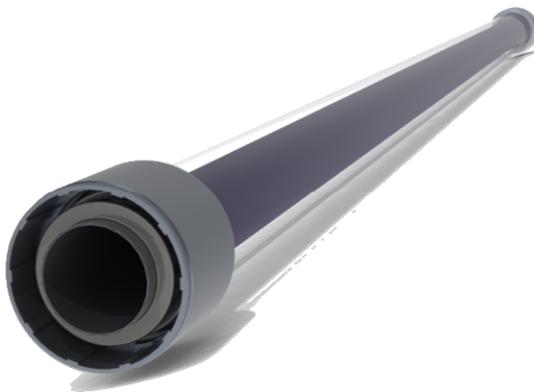


Abbildung 2: Durchgängige Absorberöhre (TST-Absorberrohr)

Die Luft kann mit einem sehr geringen Druckverlust durch die Röhre strömen. Somit können sehr kleine Ventilatoren in der Fassade integriert werden. Es spart Kosten beim Ventilator und bei der Spannungsversorgung. Auch ist eine Spannungsversorgung mit einem Photovoltaik-Modul möglich.

Die wichtigsten neuen Bauteile der Absorberöhre

Sehr zeitintensive Marktrecherchen brachten auch weltweit keinen Hersteller für solch eine Absorberöhre hervor. Es gibt zwar Absorberöhren, aber diese haben zu große Durchmesser und sind zu schwer gebaut, da sie für Wasser-

Hochdrucksysteme konzipiert wurden. Für die Fassade sind aber sehr leichte Röhren notwendig.

Nach langen Patentrecherchen entschloss man sich für eine eigene Absorberrohrkonstruktion. Ein Hauptbauteil ist das „blaue“ und hoch selektive Absorberrohr im Inneren. Hierfür gab es auch keinen Hersteller. Erst nach langer Suche wurde ein Rohrschweißer gefunden der dieses Aluminiumabsorbermaterial verarbeiten kann. Aktuell ist die Fertigung eines Aluminiumrohrs mit einem Durchmesser von 50 mm und einer Wandstärke von 0,5 mm möglich.

Eingehende Darstellung der wiss./techn. Ergebnisse nach Arbeitspaketen

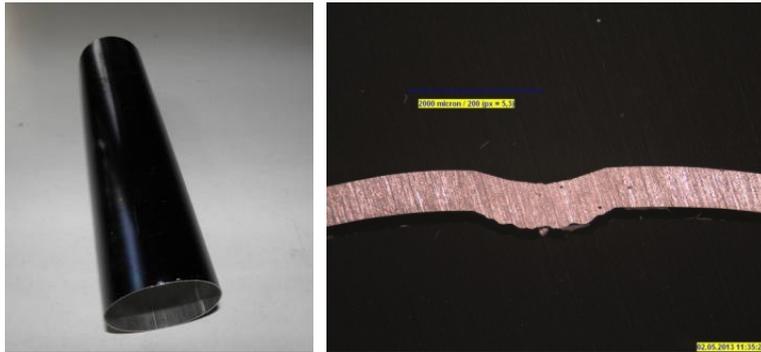


Abbildung 3: Absorberrohr (links), Schliffbild der Schweißnaht (rechts)

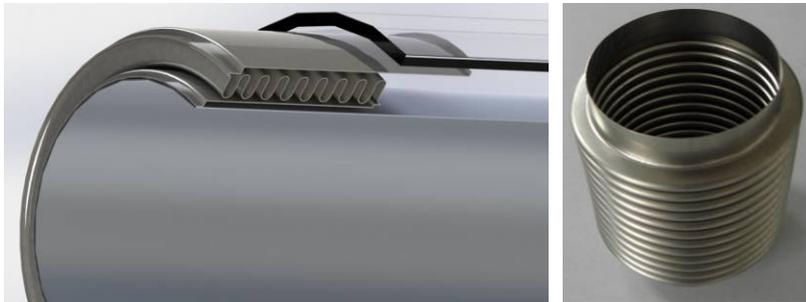


Abbildung 4: Verbindung zwischen Glas- und Metallrohr mit Metallbalg

Da sich das innere Absorberrohr mehr als das äußere Glasrohr ausdehnt, wird ein Metallbalg als Längenkompensator benötigt. Dieser wurde auch wie die anderen Bauteile aus sehr dünnem und leichtem Material hergestellt.

Diese Röhre ermöglicht erstmals eine freie Integration in die Fassade, ohne auf ein Standardmaß Rücksicht nehmen zu müssen. Die Röhren werden parallel an das Gehäuse angeschlossen.

Eingehende Darstellung der wiss./techn. Ergebnisse nach Arbeitspaketen

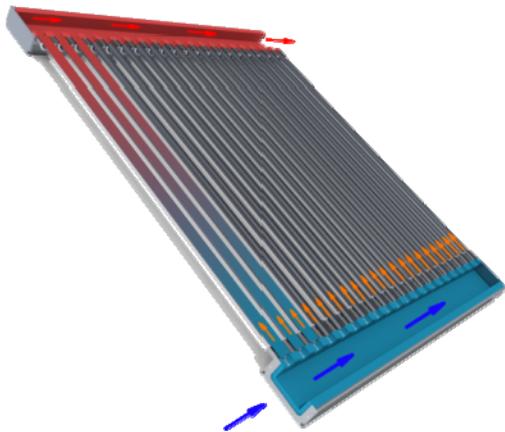


Abbildung 5: Paralleldurchströmung der Absorberröhren

Wie sich die Strömungsverteilung bei parallel angeströmten Absorberröhren verhält, wurde zuerst mit einem Strömungssimulationsprogramm simuliert. Verschiedene Gehäusegrößen und Röhrenabstände wurden untersucht.

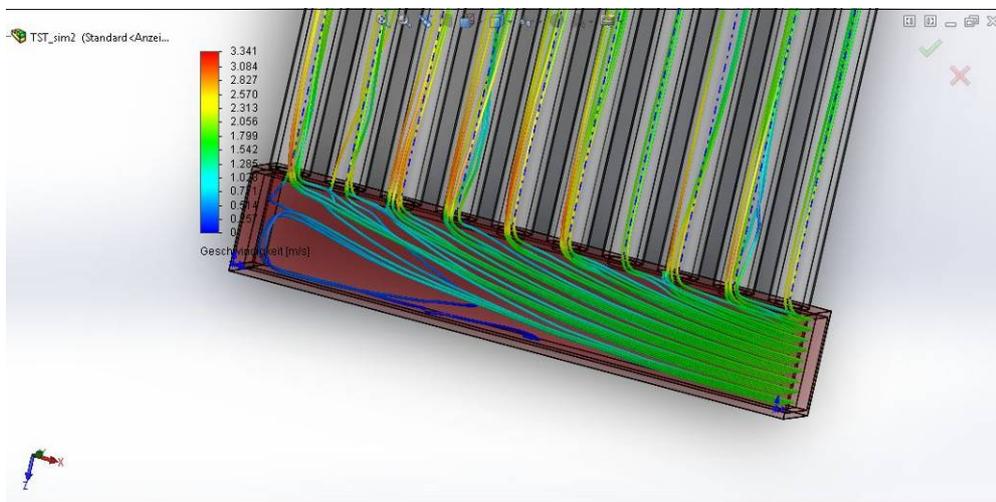


Abbildung 6: Strömungssimulation mit Flowsim von Solidworks

Die Ergebnisse wurden in praktischen Versuchen validiert (siehe Abschnitt 3.3.2).

Mit dieser durchgängigen Röhrenkonstruktion können verschiedene Fassadenaufteilungen bezüglich Fensterposition und Strukturelemente realisiert werden. Die Röhren können einfach mit einem Röhrenverbindungselement verbunden werden. Es sind verschiedene Abstände zwischen den Röhren möglich, sowie unterschiedliche Längen zwischen 50 cm bis zu 200 cm.

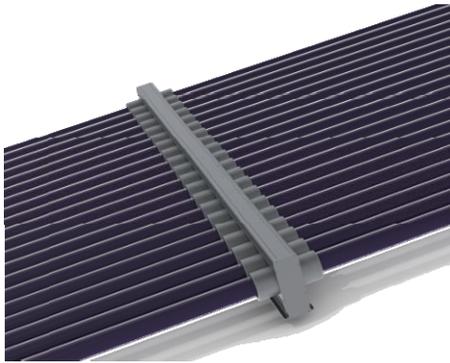


Abbildung 7: Kompakter Röhrenverbinder TST-RV

Die Gehäuse können nach Kundenwunsch gefertigt werden. Es ist nun mit diesem Konzept möglich z.B. alle RAL-Farben, Sonderfarben mit Glimmer und die Maße (Höhe, Breite und Länge) anzupassen.

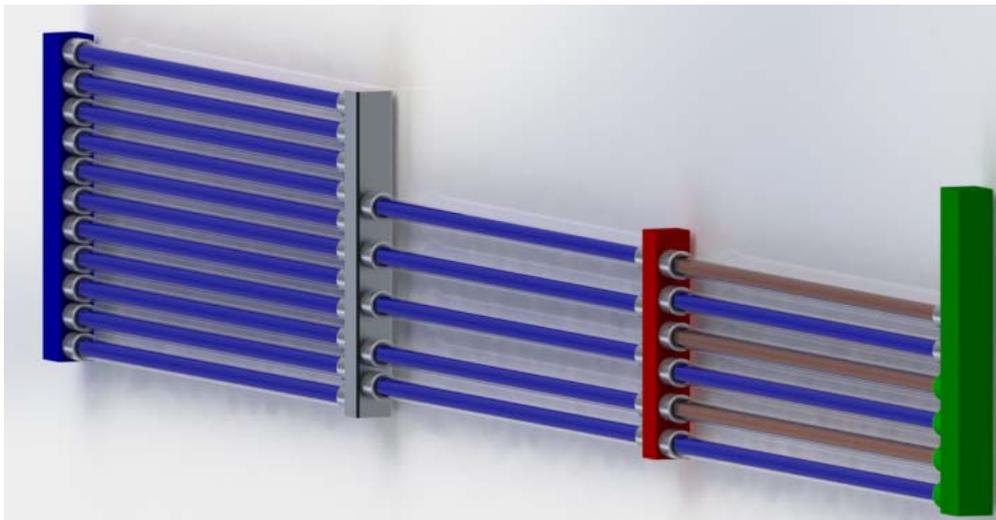


Abbildung 8: Verschiedene Beispiele für Farben und Röhrenabstände

3.1.2 Kollektorgehäuse und Isolierung

Mit der neuen Absorberröhre können auch größere Solarfelder an der Fassade realisiert werden. Die Kollektorgehäuse sowie Absorberröhren können bis zu einem gewissen Druckverlust in Reihe geschaltet werden. Durch verschiedene Gehäusegrößen können diese Kollektorflächen optimal an die Fassade angepasst werden. Eine Kombination verschiedener Gehäusegrößen ist auch möglich. Beim Zusammensetzen der verschiedenen Kollektorkomponenten ist schlussendlich der Druckverlust ausschlaggebend. Durchströmungsprobleme mit überhitzten Wasser, Dampf Bildung und Druckschläge wie bei Wasserkollektoren können nicht auftreten.



Abbildung 9: Großes zusammenhängendes Kollektorfeld

Anforderungen an ein Solarkollektorgehäuse

- Normgerecht, auch für die Zukunft
- Hohe Brandklasseneinstufung, keine Verwendung von Kunststoff
- Hohe Recycelfähigkeit ohne Schadstoffe
- Massenfertigung möglich
- Zeitloses Design mit freier Farbgestaltung
- Kombinierbarkeit untereinander
- Einfache Zusammenbaumontage in der Produktion
- Einfache Montage auf der Baustelle

Ein Kollektorgehäuse besteht aus jeweils zwei Seitenprofilen, Boden- und Deckelbleche, zwei Endrahmen und Isolierung.



Abbildung 10: Kollektorgehäuse TSTair-M

Seitenprofile

Die Seitenprofile wurden als Aluminiumstrangpressprofile realisiert. Mit Wälzstahlprofilen konnten die feinen Konturen nicht umgesetzt werden.

Eingehende Darstellung der wiss./techn. Ergebnisse nach Arbeitspaketen

Die Seitenprofile wurden im Innenbereich (siehe *Abbildung 11*, von links gesehen) sehr einfach und rechteckig gehalten. Es sind keine Innenkonturen vorhanden. Somit war eine einfachere Integration der Contherm Isolierung möglich. Jede Kontur hätte beim Einbringen der Dämmung mehrere Arbeitsschritte und somit erheblich Kosten verursacht. Es wurden auch runde Gehäuse mit konstruiert, welche aber nicht wirtschaftlich realisierbar sind. Es wäre nur eine Handfertigung möglich.

An der Außenprofilseite wurden verschiedene Details in der Konstruktion umgesetzt:

- Designwellen/-rillen, damit das Profil kleiner aussieht
- Halteflansch für Montageschienen
- T-Nut für die Möglichkeit eines Spiegels oder farbigen Bleche als Designelement an der Rückseite
- T-Nut für ein Auffangblech und gleichzeitig Spiegel bei Fassadenmontage, damit bei einem Glasbruch keine Bauteile nach unten fallen



Abbildung 11: Verschiedene Seitenprofilgrößen

Alle drei Seitenprofile können auch miteinander mit einem abgewinkelten Deckel- oder Bodenbleche eingesetzt werden. Der Winkel ist für den Höhenunterschied notwendig.

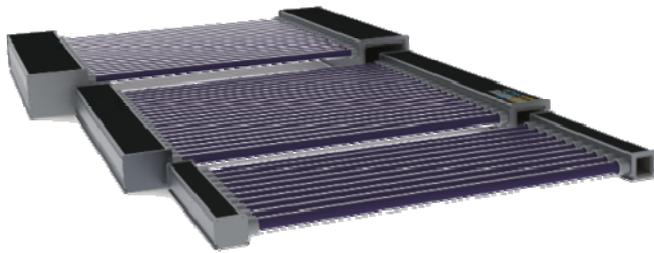


Abbildung 12: Verschiedene Gehäusegrößen

Isolierung

Zum Einsatz kommt die neu entwickelte Isolierung MPH 1000 von Contherm. Die mikroporösen Dämmplatten werden mit Alufolien kaschiert und verklebt. Hierzu wurden verschiedene Aufbauversionen für eine optimale Montage in der Produktion getestet.

Anforderungen an die Isolierung

- Hohe Brandklasse
- Staubfrei
- Ausgasungsfrei
- Silikonfrei
- Schnelle und einfache Montage in der Produktion
- Sehr gute Dämmeigenschaft auch bei Temperaturen $> 150\text{ °C}$
- Langzeitstabil
- Nicht Gesundheitsschädigend

Für die Tests wurden verschiedene Prototypen gebaut und mit verschiedenen Isolierungszuschnitten und Materialstärken montiert und getestet. Probleme gab es z.B. beim Zusammenspiel von Toleranzen und der Befestigung der Isolierung im Inneren. Auch war die Thematik „Staub“ ein wichtiger Punkt. Hierfür wurden Aluhülsen getestet, damit die Löcher für die Absorberröhren auch kaschiert werden können.

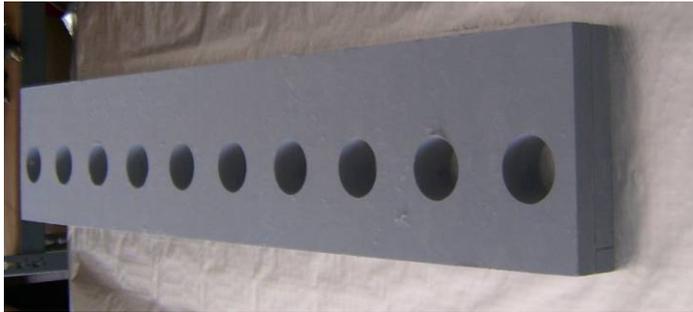


Abbildung 13: Prototypen für Isoliertests

Bei der Konstruktion der Isolierung wurde versucht, eine optimierte Ein- und Ausströmung der Luft in die Kollektorgehäuse mit abgerundeten Kanten in die Isolierung zu integrieren. Diese Isolierung konnte auch mit einem Wasserstrahlschneider von Contherm hergestellt werden. Die Druckverlustmessungen zeigten leider, dass das Aufwand-Nutzenverhältnis nicht wirtschaftlich ist.

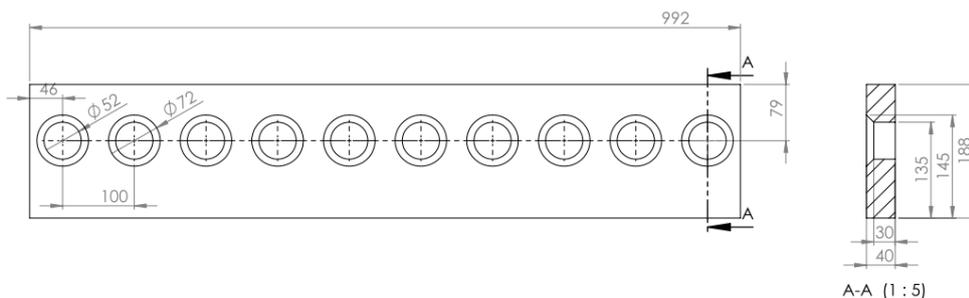


Abbildung 14: Optimierte Isolierung

Mit Hilfe der sehr guten Dämmeigenschaften vom MPH 1000 können kleine Kollektorgehäuse für die Fassade realisiert werden. Man kann die benötigte Isolierstärke zu z.B. Mineralwolle bei gleicher Dämmwirkung halbieren.

3.1.3 Konstruktion Röhrenverschraubung

Die Anforderungen an fassadenintegrierte Solarluftkollektoren werden in der Regel von den auf dem Markt üblichen Kollektoren nicht erfüllt. Die Flexibilität von Design und Montage darf nicht vernachlässigt werden, wenn die solarthermische Anlage in das Gebäude integriert werden soll. Da die Gebäudehülle in den meisten Fällen nicht standardisiert ist, müssen sowohl Absorberrohrlänge als auch Röhrenabstand für den Einsatzort optimiert werden.

Eingehende Darstellung der
wiss./techn. Ergebnisse nach
Arbeitspaketen



Abbildung 15: Fassadenintegrierter Solarluftkollektor

Zunächst wurden verschiedenste Ideen skizziert und diskutiert. Anschließend wurden die vermeintlich Günstigsten näher betrachtet. Daraufhin wurden diese Varianten im CAD konstruiert und Zeichnungen angefertigt.

Ein wesentlicher Punkt der Konstruktion war die Verbindung von Absorberröhre und Header (Kollektorgehäuse). Durch die Neuentwicklung der Absorberröhre ist eine marktübliche Befestigung der Vakuumröhre nicht möglich. Deshalb wurde eine Röhrenbefestigung entwickelt, die die Anforderungen an den neuen Absorber erfüllt. Eine bedeutende Neuerung stellt die Anbindung beidseitig an ein Sammelgehäuse oder Verbindungsgehäuse dar. Um dies zu ermöglichen, muss sich die Röhre wenige Zentimeter ausziehen lassen. Dies wird erreicht indem die Verschraubung ein Spiel in Axialrichtung aufweist, radial die Röhre jedoch fest fixiert. Da der Absorber flexibel einsetzbar sein, und möglichst wenig verschiedene Komponenten enthalten sollte, um die Lagerhaltung zu minimieren und Fehler bei der Montage vorzubeugen, wurde auf ein gleichzeitiges Einschrauben auf beiden Seiten verzichtet. Voraussetzung dafür wäre je ein Links- und ein Rechtsgewinde und die Fertigung der jeweiligen Header mit dem dazu passenden Gewinde.

Für das Befestigen der Röhre wird kein Werkzeug benötigt. Durch Drehen mit der Hand an der Glasröhre wird diese montiert oder demontiert.

Auch verschiedene Fertigungsverfahren wurden diskutiert, darunter Kunststoffspritzguss, Aluminiumdruckguss, Tiefziehen und spanende Bearbeitung. Für kleine und mittlere Stückzahlen hat sich Drehen und Fräsen als die kostengünstigste Variante herauskristallisiert. Auch auf Änderungen kann damit am einfachsten und schnellsten reagiert werden. Zusätzlich kann das Investitionsvolumen durch nicht benötigte Formen verringert werden.

Die Funktion wird im Wesentlichen durch drei Bauteile gewährleistet, dem Gehäuseprofil, der Verschraubung und dem Mitnehmer.

Eingehende Darstellung der wiss./techn. Ergebnisse nach Arbeitspaketen

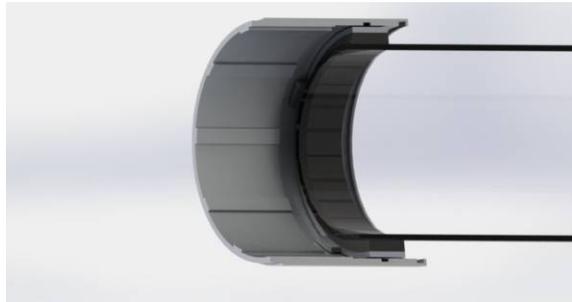


Abbildung 16: Uneingerasteter Mitnehmer in Verschraubung

Der Mitnehmer ist fest mit dem Glasrohr verklebt, während die Verschraubung über den Mitnehmer geschoben wird. In der Standardposition ist die Verschraubung frei drehbar. Zur Montage wird die Röhre gegen das Gehäuseprofil geschoben und dabei gedreht, bis Mitnehmer und die Verschraubung ineinander einrasten. Anschließend wird über weiteres Drehen an der Glasröhre die Verschraubung, über das Gewinde, in den Header eingeschraubt.



Abbildung 17: Durch Andrücken an Header eingerasteter Mitnehmer in Verschraubung

Die Röhre ist nun auf der einen Seite befestigt. Durch Schieben der Röhre auf die gegenüberliegende Seite zum zweiten Header löst sich der Mitnehmer wieder von der Verschraubung. Zur Befestigung auf der zweiten Seite wird der Montagevorgang auf der gegenüberliegenden Seite wiederholt.



Abbildung 18: Gelöster Mitnehmer für Montage auf der anderen Seite des Absorberrohrs

3.1.4 Optik

Da der Luftkollektor in Fassaden eingesetzt werden soll und deshalb sehr gut sichtbar ist, muss die Optik und Farbgebung des Kollektors ansprechend, stilvoll und ansehnlich sein.

Eingehende Darstellung der wiss./techn. Ergebnisse nach Arbeitspaketen

Es wurden verschiedene Farbmöglichkeiten durchsimuliert. Die Anfänge wurden mit Google-Sketchup erstellen, weitere Farbvarianten wurden mit Solidworks fotorealistisch durchgerendert.

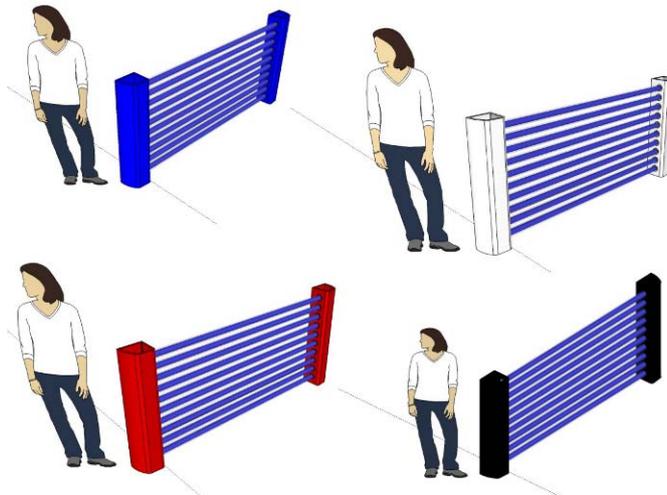


Abbildung 19: Google-Sketchup, Grund-Farbvarianten

Für die Farbgestaltung kommen deshalb hauptsächlich zwei Verfahren zur Anwendung: Pulverbeschichtung und Eloxal. Eine Nasslackierung wird auf Grund hoher Preise und nicht gleicher Beständigkeit ausgeschlossen. Ökologisch gesehen ist die Pulverbeschichtung das nachhaltigste Verfahren, da hier nur sehr wenig Abfall entsteht. Eloxal kann als Kundenwunsch extra angeboten werden, ist jedoch teurer und bei der Herstellung fallen mehr Schadstoffe an. Von Vorteil sind jedoch die schöne Optik und der edle Look.

Tabelle 1: Gegenüberstellung von Pulverbeschichtung und Eloxal hinsichtlich Umwelteinflüsse

Pulverbeschichtung	Eloxal
<ul style="list-style-type: none"> -Wenig Abwasser (Nur Reinigung) -Lösemittelfrei -Overspraypulver wird mit Hilfe eines Zyklons zurückgewonnen und dem Frischpulver beigemischt. -Keine Schwermetalle Recycling und/oder Aufbereitung der Altpulver möglich aber energieaufwändig 	<ul style="list-style-type: none"> Abfallstoffe: - Laugen und Säuren - Schwefelsäure(Bad) -Aluminiumhydroxid auch als Filterschlamm bezeichnet -Beize(Salpetersäure) -Reinigungsmittel, Natronlauge (Spülen Vorbehandlung) -Farbbäder Leicht zu recyceln
+	-



Abbildung 20 Pulverbeschichtetes Farbmuster

3.1.5 Solarregler

Einerseits galt es einen geeigneten Regler für den WKL-Teststand (siehe Abschnitt 3.3.2) sowie Regler für allgemeine Anwendungen zu finden.

Recherchen zeigten, dass sich Standardsolarregler nicht für die Anwendungskonzepte mit Solarluftkollektoren eignen. Zum Beispiel wird für die Ansteuerung der EC-Motoren effizienter Ventilatoren ein PWM-Signal benötigt, welches nur wenige Solarreglerhersteller anbieten, da die meisten Pumpen noch mit einem analogen 0-10 V Signal angesteuert werden. Weiterhin braucht der Regler digitale Eingänge um die Drehzahl der Ventilatoren zu erfassen. Eine Mischeransteuerung, die für den Motor der Mischklappe zuständig ist, gibt es nur bei weitaus kostspieligeren Heizkreisreglern. Ein weiterer Negativpunkt ist, dass die Absoluttemperaturregelung bei den meisten Standardreglern auf die Kollektortemperatur und nicht auf die Zulufttemperatur möglich ist. Außerdem kann man bei fast allen Reglern nur Standardsysteme auswählen, die in den meisten Fällen so nicht direkt übertragbar auf die erforderlichen Regelungsaufgaben sind.

Für kleine Regelungsaufgaben, die keine hohen Anforderungen benötigen, können Universalregler mit einem sehr guten Preis-Leistungsverhältnis eingesetzt werden.

Bei komplexeren Solaranlagen muss jedoch auf frei programmierbare Regler zurückgegriffen werden. Auch sogenannte Universalregler der Firma Sorel, Digitronic oder Resol wurden mit in die Auswahl genommen. Folgende Tabelle zeigt die Regler anhand ihrer Spezifikationen.

Tabelle 2: Potentielle Regler für allgemeine Anwendungen mit den airwasol-Kollektoren

Eingehende Darstellung der wiss./techn. Ergebnisse nach

FREI PROGRAMMIERBAR						Universalregler		
Hersteller	Schuler Control	TA	Hanazeder	WAGO		SOREL	DIGITRONIC	bitspaketen
Name	SC 460	UVR 1611	HLC 10	750-System		XHCC	DIGIENERGY	Deltassimx
Eingänge	24	16	20	-		11	17	16
Ausgänge	19	11	14	-		7	15	14
Eingang Pt1000	0-19	0-14	0-16	12	229€/4 Kanäle	8-11	9	7-16
Eingang andere Temp(KTY,NTC)	0	0-14	0-16			0	0	0-12
Eingang Spannung (0-10 V)	0-19	0-2	0-16	0-4	135€/2 Kanäle	0	0	0
Eingang Strom (4-20 mA)	4	0-2	0-16	0-4		2,Grundfos	0	0
digitale Eingänge Impuls	4	0-2	4	2	10 €/Kanal	0	4	3
digitale Eingänge sonstige	1	0	0					
Eingang Strahlung	0	0						1
Ausgang Relais mechanisch	6	7	0	6	15€/Kanal	4	0	1
Ausgang Relais Halbleiter	4	4	8	4	30€/Kanal	2	15	13
Potentialfrei 12/24 V	1	1	2	2	7€/kanal	1,wechsler	0	1
Freie Ausgänge	4							
0-10 V	0-2	0-2	4	4	135€/4Kanäle	0-2	0	0-4
PWM	ja	0-2		2	65€/Kanal	0-2	4	0-4
4-20mA	0-2				135€/4 Kanäle	0	0	
Alarmanusgang	Nein	Ja			Lampe	Rote LED	nein	ja 64 €
Email oder SMS bei Fehler	?	?				Nein	Ja,Email und Sms	nix gefunden
Ethernet	2	mit bl	Ja	Ja		Ja opt	Ja	Lan
SD-Slot/Usb	USB	nein	rs 232	Ja		Ja		Ja
can bus		Ja	2*	optional		Ja		Vbus
Visualisierung	Browser	d-logg Blnet	hlc visualizer	codesys	browser	?	Webserver	RSC Software
Preis brutto	1.349,00 €	542,00 €	1.671,00 €	2.230,00 €		529,00 €	799,00 €	705,00 €
Preis netto	1.133,60 €							
		mit BL						

Der Regler „UVR 1611“ der Technischen Alternative wurde wegen Nachteilen bei Datalogging, Visualisierung, Handling und Ferndatenüberwachung als Regler ausgeschlossen.

Eine Regelung mit einem SPS-System der Firma WAGO, Phoenix o.Ä. ist im Prinzip möglich, aber anhand der vielen analogen Eingänge, die für Temperaturmessung nötig sind, unverhältnismäßig teuer. Da die Universalregler der Firma Sorel, Digitronic und Resol für die Visualisierung, Datalogging und Fernüberwachung zusätzliche Geräte benötigen, steigt der Preis und die Flexibilität ist anhand der eingeschränkten Programmierung nicht gegeben. Der Regler SC 460 von der Firma „SchulerControl“ überzeugt im Preis und der sehr freien Programmierbarkeit.



Abbildung 21 Regler SC 460 von SchulerControl

3.2 AP 2: Herstellung sorptiver Wärmeübertrager

3.2.1 Vorversuche zur Beschichtung

3.2.1.1 Festlegung der Beschichtungsanforderungen und Materialauswahl

Die Beschichtung des Haugg-Wärmeübertragers sollte sich ganz klar von den bisher vermessenen Systemen und von dem Backup-WÜ abgrenzen. Es wurden hierbei andere Voraussetzungen geschaffen, um eine Optimierung gegenüber dem bereits bestehenden ECOS-System zu realisieren.

Konkret sollten deswegen die folgenden Punkte umgesetzt werden. Die Antriebstemperaturen des Vakuumröhrenkollektors können bis zu 140°C betragen. Gleichgewichtsadsorptionsmessungen zeigen, dass man bei solchen Antriebstemperaturen mit einem anderen Adsorptionsmaterial wesentlich bessere Umsätze erreichen kann, als mit dem bislang eingesetzten Silikagel. Außerdem muss die Beschichtung/Klebung entsprechend temperaturstabil sein. Des Weiteren soll das Adsorptionsmaterial einen Schutz vor kondensierendem Wasser und verschiedenen Verunreinigungen zeigen. Auch die Kinetik sollte sich durch eine Beschichtung verbessern lassen, was zu einer effizienteren Nutzung des eingesetzten Adsorptionsmaterials führt und damit die Leistungsdichte der Anlage erhöhen kann.

Aufgrund dieser geänderten Voraussetzungen wurde entschieden, eine Beschichtung zu verwenden, die auf dem bereits vom ISE patentierten Verfahren beruht. Als geeignetes Sorptionsmaterial soll ein SAPO-34 ähnliches Material verwendet werden. Als Binder wurde hierbei ein Silikonartiges Material verwendet. Dieses hat den Vorteil, dass es bis 200°C temperaturstabil, sehr gut wasserdampfdurchlässig ist und eine hydrophobe, wasserunempfindliche Schutzschicht ausbildet. Um bei dieser Metallmasse ein entsprechend gutes Verhältnis von funktionaler Beschichtung zu Metallmasse zu erreichen, sollte möglichst viel Material auf der Oberfläche aufgebracht werden.

Der Ablauf der Beschichtung läuft in allen Phasen des Scale-Ups immer gleich ab. Destilliertes H₂O wird vorgelegt, anschließend wird das entsprechende Additiv eingerührt. Dann erst wird das Adsorptionsmaterial zugegeben und gut eingerührt und homogenisiert. Der Binder wurde erst kurz vor dem eigentlichen Coating-Prozess eingerührt.

Nach dem Beschichten wurden die Strukturen zuerst bei Raumtemperatur getrocknet. Anschließend wurden sie zum Ausheizen bei 200°C für mindestens eine Stunde in den Ofen gestellt.

3.2.1.2 Upscaling von Probeblechen auf Probenkanäle

Auf kleinen Probenblechen (50 mm × 50 mm) wurden verschiedene Faktoren für die Beschichtung untersucht. Hierbei wurde vor allem der Wassergehalt der Dispersion verändert und 2 verschiedene rheologische Additive (Verdicker) ausprobiert. Diese Beschichtungen fanden im 3 g Maßstab statt. In diesem Maßstab war es auch möglich die Haftung und Abblaufeigenschaften auf kleinen Haugg-Lamellenstücken zu testen.

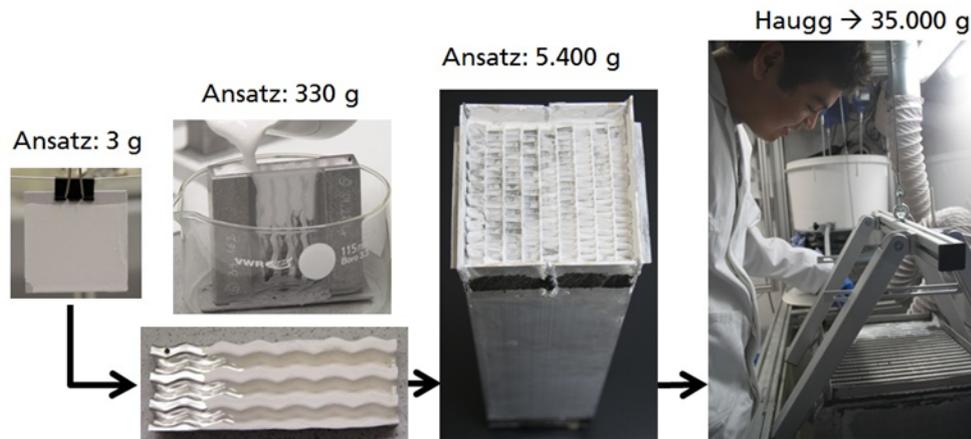
Als Muster für Beschichtungstests wurden Kanalstrukturen aufgebaut, die den sorptiven Lamellenkanal simulieren sollen. Da der Haugg-WÜ aus vielen aufeinandergestapelten Platte-Steg Geometrien aufgebaut ist, war die Anfertigung eines durch U-Profile fixierten und mit Boden- und Deckplatten abgeschlossenen Lamellenverbundes die einfachste Möglichkeit um das Füll- und Ablaufverhalten zu testen (siehe Abbildung 22). Die Abmessungen dieser Kanalstrukturen sind 80 mm × 20 mm mit zwei gefertigten Längen von 80 und 240 mm. Für die Versuche hier wurden ca. 300 g Dispersion benötigt.



Abbildung 22: Lamellenkanal einlagig für Beschichtungstests

Nur Systeme, die auf der Geometrie des Einzelkanals funktioniert haben, wurden dann auf die nächst größere Stufe (Dummy) umgesetzt.

Der Aufbau des sog. Dummy entspricht einem Stapel mit mehreren Lamellenkanälen, welche alle in derselben Richtung angeordnet sind. Die Kanäle haben dabei bereits die volle Länge entsprechend dem Haugg-WÜ von 400 mm (siehe Abbildung 23 „Ansatz 5.400 g“). Im Gegensatz zum WÜ verfügt der Dummy jedoch nicht über im Kreuzstrom angeordnete Kühlkanäle, da diese für einen Beschichtungsversuch nicht von Bedeutung sind. Auf der Dummy-Geometrie sollte hauptsächlich die Verarbeitbarkeit und Handhabbarkeit im Dip-Coater mit einer großen Charge getestet werden. Die Versuche hier erfolgten im Maßstab von ca. 5,4 kg (siehe Kapitel 3.2.3).



Eingehende Darstellung der wiss./techn. Ergebnisse nach Arbeitspaketen

Abbildung 23: Up-scaling Stufen der Beschichtung mit Angabe der benötigten Dispersionsmasse

3.2.1.3 Variation der Viskosität und rheologische Additive

Wie sich herausstellte musste ein Kompromiss gefunden werden zwischen einer hohen Viskosität, der damit verbundenen Schichtdicke und einer noch möglichen Verarbeitung.

Es wurden verschiedene Möglichkeiten versucht, die Viskosität der Beschichtung und Abtropfgeschwindigkeit zu beeinflussen.

Es wurden 2 Ansätze verfolgt:

1. Zugabe eines rheologischen Additivs (RA1 Mg-Schichtsilikat und RA2 pyrogene Kieselsäure).
2. Verringern des Wassergehalts der Dispersion: Verdickung und gleichzeitig Verhindern von Schrumpfungsrissen bei der Trocknung.

In Vorversuchen auf Blechen waren viele dieser Kombinationen mit unterschiedlichen Gewichtsanteilen aus rheologischem Additiv, Binder und Wasser verarbeitbar. Es wurde hierbei nur optisch die Oberfläche und Homogenität untersucht. Die Zyklenstabilität des Binders wurde im Vorfeld bereits untersucht. Die Versuche auf kleinen Blechen werden hier auch nicht weiter ausgeführt. Es werden nur die Zusammensetzungen weiter behandelt, die ausgewählt wurden, um sie auf den kleinen Kanalstrukturen zu testen.



Abbildung 24: Kanalstruktur mit einer Tiefe von 240 mm, die im Labormaßstab die Verarbeitungseigenschaften zeigen soll.

Zuerst soll an dieser Stelle der Einfluss von RA1 auf die Dispersion untersucht werden. Zu diesem Zweck wurden verschiedene Konzentrationen an RA1 eingestellt und die Dispersionen anschließend verarbeitet. Tabelle 3 zeigt eine Übersicht der beschichteten Kanalstrukturen unter Variation des Verdickeranteiles.

Tabelle 3: Übersicht der Tests mit RA-1 als Additiv und unterschiedlichem Verdickeranteil

	HK-120	HK-121	HK-122
Gehalt RA1 auf Wasser bezogen (%)	0,75	0,5	0,25
Coating-Masse [g]	26,56	14,69	7,15
Zeolith-Masse [g]	23,85	13,26	6,48
Zeolithanteil Coating [%]	89,78	90,24	90,61
Berechnete Masse Coating [g/m²]	216,5	119,7	58,3
Berechnete Masse reiner Zeolith [g/m²]	194,4	108,1	52,8
Oberfläche der Kanalstruktur [m ²]	0,123	0,123	0,123
Flächenumrechnungsfaktor	187	187	187
Coating-Masse auf Haugg (berechnet) [g]	4959	2742	1335
Zeolith-Masse auf Haugg (berechnet) [g]	4452	2475	1210
Auslaufbecher-Messung (s)	--	7,2	2,5
Verarbeitbarkeit (m. HM / o. HM)	o / -	+ / o	++ / ++

Mit RA1 lässt sich ein recht guter Trend erkennen, so dass mit steigendem Gehalt die Coating-Masse fast proportional ansteigt. Für die Kanalstrukturen wurden drei verschiedene RA1 Gehalte untersucht. Die Viskosität wurde hierbei mit einem Auslaufbecher (Aluminium „Optima“, 100 ml, 8 mm Düsenöffnung) untersucht. Hiermit wird die Durchlaufzeit gemessen, was grobe Rückschlüsse auf die Viskosität und Verarbeitbarkeit gibt. Die Dispersion mit nur 0,25% RA1 war noch gut mess- und verarbeitbar. Bei 0,75% war keine Messung mehr möglich, da der Becher hier ohne mechanische Einwirkung nicht leer lief.

RA1 zeigte in allen Versuchen, aber vor allem bei hohen Gehalten, einen scherverdünnenden Effekt. Das bedeutet, dass sobald eine Scherkraft anliegt (Rütteln, Vibrieren, teils schon Schwerkraft) die Dispersion halbwegs flüssig bleibt. Lässt man sie stehen, wird sie schlagartig wieder fester. Es wurde versucht diesen Effekt für die Flutbeschichtung auszunutzen. Deswegen wurde zusätzlich untersucht ob Suspensionen mit hohem Verdickeranteil in den Kanalstrukturen mit Hilfe von mechanischen Vibrationen verarbeitbar bleiben. Das hätte den Vorteil, dass das Abfließen unter mechanischer Krafteinwirkung erfolgen kann, anschließend die Dispersion zähflüssig wird und dann eine sehr große Beschichtungsmasse zurückbleibt.

Die Dispersion mit 0,75 Gew.% RA1 konnte ohne Hilfsmittel gar nicht mehr verarbeitet werden. Hier wurde mit einem Kunststoffhammer (vgl. Verarbeitbarkeit m. HM/o. HM in Tabelle 3) durch Stöße an die Seitenwände ein noch recht gutes Einfließen in die Kanäle gewährleistet. Für die Beschichtung auf dem Dummy sollte diese mechanische Krafteinwirkung über Luftdruck-Vibratoren realisiert werden. Da mit mechanischer Krafteinwirkung bei 0,75 Gew.% eine Verarbeitung noch gut möglich war sollte Dummy01 mit 1,0 Gew.% beschichtet werden. Mit dem erhöhten Verdickeranteil sollte das Massenverhältnis aus Beschichtung zu Aluminium weiter maximiert werden (siehe Abbildung 25), um im Demonstrationssystem möglichst hohe Entfeuchtungsleistung und Effizienz zu erreichen. Der Einfluss der Beschichtungsmasse und weiterer Systemparameter auf die zu erwartende Anlagenperformance wurden im Rahmen einer Masterarbeit simulativ untersucht (vgl. Zwischenbericht).

Als zweite Option wurde entsprechend die pyrogene Kieselsäure als Verdicker eingesetzt. Dieser Verdicker war wesentlich besser einarbeitbar, weswegen hier zusätzlich versucht wurde den Wassergehalt zu reduzieren.

Eine besondere Eigenschaft dieses Verdickers ist, dass das Einarbeiten des Zeoliths auch in sehr viskosen, fast schon zementartigen Dispersionen möglich ist. Bei Zugabe des Binders wird die Dispersion wieder niedrigviskoser und kann gut verarbeitet/umgefüllt werden.

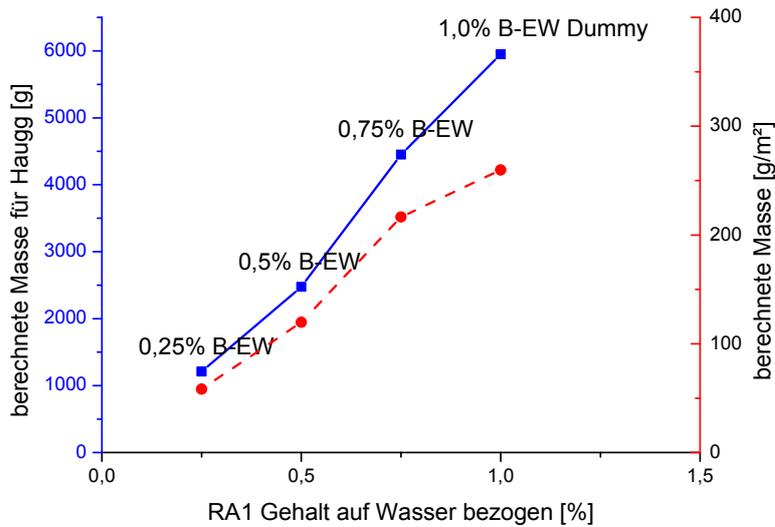


Abbildung 25: Einfluss des Verdickeranteiles auf die realisierte Beschichtungsmasse bzw. die Masse / m²

Tabelle 4: Variation des Wassergehalts mit dem Additiv RA2. (* = Für die 2. Beschichtung ist jeweils die resultierende Gesamtmasse der beiden Beschichtungsvorgänge angegeben)

	HK-134	HK-135	HK-137 2. Coat*
Feststoffgehalt der Dispersion [%]	41	45	45
Gehalt RA2 auf Wasser bezogen [%]	0,49	0,48	0,49
Coating-Masse [g]	7,51	11,12	26,10
Zeolith-Masse [g]	6,78	10,11	23,77
Zeolithanteil Coating [%]	90,27	90,95	91,05
Berechnete Masse Coating [g/m²]	61,22	90,61	212,79
Berechnete Masse reiner Zeolith [g/m ²]	55,26	82,41	193,75
Oberfläche der Kanalstruktur [m ²]	0,123	0,123	0,123
Flächenumrechnungsfaktor	186,68	186,68	186,68
Coating-Masse auf Haugg (berechnet) [g]	1401,9	2074,9	4873,0
Zeolith-Masse auf Haugg (berechnet) [g]	1265,5	1887,1	4436,8
Auslaufbecher-Messung (s)	k.Mess	3,63	k. Mess
Verarbeitbarkeit (nur Zeolith / m. Binder)	+ /+++	o / ++	o / ++

Die Versuche mit diesem Additiv lieferten alle eine gute Verarbeitbarkeit. Allerdings war die Zeolith-Dispersion mit geringem Wassergehalt mit den Rührwerken sehr schlecht zu homogenisieren, da dies eher schon eine zementartige Schlämme darstellt. Hier wurde mithilfe von Ultraschall eine bessere Homogenisierung der Dispersion gewährleistet. Die entstehende Schicht war eher dünn, aber sehr homogen.

Allerdings waren die extrapolierten Beschichtungsmassen für den Haugg-WÜ recht gering (vgl. Tabelle 4). Mit unter 2 kg ist ein sinnvolles Betreiben der SORLUKO-Systems kaum möglich. Deswegen wurde hier die Variante versucht, eine bereits beschichtete Kanalstruktur nochmals zu beschichten. Diese Mehrfach-Beschichtung war auf den kleinen Blechen nicht möglich, lieferte aber mit den Kanalstrukturen gute Ergebnisse!

Ausgewählte Versuche wurden jeweils auf den Dummy-WÜs durchgeführt, wie in Kapitel 3.2.3.2 ausführlicher beschrieben wird.

3.2.2 Wärmeübertragerherstellung

Der Wärmeübertrager soll in einem sorptiven Klimalüftungssystem mit den Übertragungsmedien Luft-Luft eingesetzt werden. Die an den Wärmeübertrager gestellten Anforderungen im Projekt SorLuko weichen teilweise deutlich von den in der Gebäude- und Lüftungstechnik üblichen Spezifikationen ab. Beispielsweise muss der Wärmeübertrager absolut leckagedicht ausgeführt sein, da ein Luft- und Feuchtekurzschluss zwischen den beiden Kanalseiten den Entfeuchtungsprozess der Zuluft vollständig zum Erliegen bringen würde. Marktverfügbare Produkte nach dem Stand der (Lüftungs-)Technik spezifizieren hier bis zu 10% Leckageverlust als hinnehmbar. Diese Abweichung der Spezifikation zeigte sich auch im vorangegangenen „ECOS“ Projekt als äußerst kritisch und von vielen Herstellern nicht zu erfüllen. Allgemein soll eine möglichst große Übertragungsleistung erbracht werden. Um den Wärmeübertrager in einen bestehenden Teststand zur Vermessung von Übertragungsleistung, Druckverlust und Entfeuchtungsleistung einbauen zu können, müssen die Abmessungen von 400×400×400 mm inklusive Rahmen eingehalten werden. Des Weiteren muss für eine Dichtfläche eine Fase von 30 mm an den Ecken der Ab- und Außenluftseite vorhanden sein.

Die Masse des Wärmeübertragers sollte außerdem möglichst gering sein, da sich durch den zyklischen Betrieb (periodisches Aufheizen und Abkühlen) das Ansprechverhalten des Wärmeübertragers bei hoher thermischer Masse verschlechtert, was die Zykluszeiten negativ beeinflussen könnte.

Das Material hat bei Wärmeübertragern mit geringen Wandstärken kaum Einfluss auf dessen Übertragungsleistung. Der Einfluss der Wärmeleitfähigkeit λ ist bei dünnen Wänden sehr gering. Ausschlaggebend sind die Wärmeübergangskoeffizienten α . Im Gegensatz dazu hat das Material,

aufgrund der Temperaturleitfähigkeit einen großen Einfluss auf das Ansprechverhalten des Wärmeübertragers. Weiterhin müssen temperaturstabile Materialien verwendet werden, da im Extremfall Temperaturen von 150°C beim Desorbieren erreicht werden können.

Eingehende Darstellung der wiss./techn. Ergebnisse nach Arbeitspaketen

Eine weitere wichtige Anforderung an den Wärmeübertrager ist dessen Beschichtbarkeit. Unabhängig vom späteren Beschichtungsverfahren muss gewährleistet sein, dass der Wärmeübertrager auf der Außenluftseite komplett beschichtet werden kann. Zudem sollte die innere Oberfläche möglichst groß sein, um viel Sorptionsmaterial auftragen zu können.

Da es sich um einen Luft-Luft-Wärmeübertrager handelt, sollten auch die Druckverluste beim Durchströmen des Wärmeübertragers nicht zu hoch sein. Sie bestimmen maßgeblich die Leistung der Ventilatoren und die Betriebskosten der Anlage.

3.2.2.1 Platte-Steg Aufbau

Die Firma Haugg Industriekühler GmbH mit Sitz in Sulz am Neckar stellt Öl-, Wasser- und Luftkühler aus Aluminium nach Kundenwunsch her. Dabei gibt es eine Vielzahl an Lamellentypen, die verwendet werden können. Im Zuge einer vorherigen Auswahl der Lamellen, unter anderem auch zur Beurteilung einer späteren Beschichtbarkeit, wurde der in Abbildung 26 gezeigte Miniatur-Kreuzstromwärmeübertrager gefertigt, der aus den möglichen Lamellentypen aufgebaut ist.

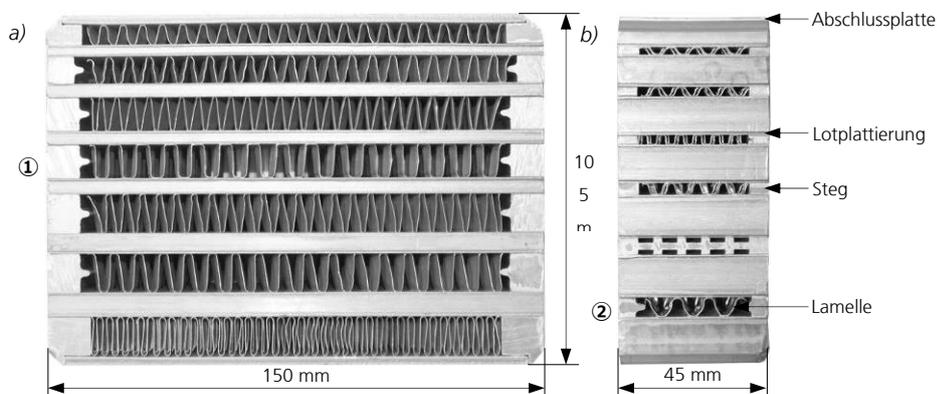


Abbildung 26: Haugg Miniatur-Kreuzstromwärmeübertrager a) Front b) Seite

Gut zu erkennen ist auch der generelle Aufbau der Luft-Luft-Wärmeübertrager nach dem Platte-Steg-System („bar-plate“). Die Stege, Lamellen und lotplattierten Trennbleche werden nach der Montage in einer Spannvorrichtung im Vakuumofen verlötet. Durch diesen Vorgang sind zum einen die Zu- und Abluftkanäle des Wärmeübertragers voneinander gut abgedichtet, so dass keine Durchmischung der beiden Luftströme stattfindet, zum anderen ist ein guter thermischer Kontakt der Lamellen zu den trennenden Platten gegeben.

Haugg Wärmeübertrager – Variante entsprechend Fertigung

Eingehende Darstellung der wiss./techn. Ergebnisse nach Arbeitspaketen

Der Wärmeübertrager ist nach dem Platte-Steg-System aufgebaut, besteht aus Aluminium unterschiedlicher Legierungen und wiegt etwa 28,1 kg. Die Fertigung erfolgte inklusive Rahmen durch die Firma Haugg für einen späteren Einbau. Die äußeren Abmessungen des Wärmeübertragers betragen 400×400×400 mm, die Netzmaße fallen mit 330×380×388 mm etwas geringer aus, da aufgrund der Stege und des Rahmens Platz verloren geht. Abbildung 27 zeigt den fertigen Wärmeübertrager im direkten Vergleich zur CAD-Konstruktion, die unter anderem zur genauen Bestimmung der Oberflächen angefertigt wurde.

a)



b)

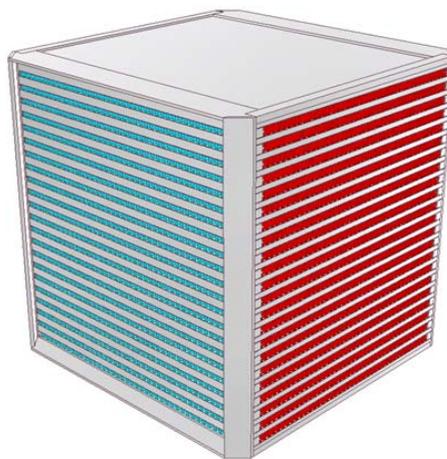


Abbildung 27: Haugg Wärmeübertrager a) real b) CAD-Konstruktion

Für die Außenluftseite des Wärmeübertragers (rot) wurde aufgrund der Beschichtung die in Abbildung 26 mit ① markierte Lamelle gewählt, da sie einen relativ großen Lamellenabstand besitzt. Die Lamelle weist eine Stärke von 0,2 mm auf und besitzt eine Höhe von 10,2 mm. In der Tiefe ist die Lamelle gewellt, dadurch sollen Turbulenzen erzeugt werden, die den Wärmeübergang zur Lamelle begünstigen, aber auch einen höheren Druckverlust zur Folge haben. Die Übertragungsfläche auf der sorptiv beschichteten Außenluftseite des Wärmeübertragers beträgt insgesamt 22,90 m².

Für die Abluftseite (blau), bei der unter anderem eine Verdunstungskühlung durch Einsprühen von Wasser eingesetzt wird, kommt die kleinere, in Abb. 15 mit ② markierte Lamelle, mit einer Höhe von 6,3 mm und einer Dicke von 0,3 mm zum Einsatz. Sie ist im Gegensatz zur ersten nicht gewellt, sondern im Abstand von 7,5 mm geschlitzt, wodurch die einzelnen Lamellenabschnitte versetzt hintereinander angeordnet sind. Die Lamellengänge sind aufgrund dessen nicht durchgehend und lassen so im gewissen Rahmen eine

Quervermischung des Luft-Wasser-Stoffstromes zu. Für die Abluftseite lässt sich eine Übertragungsfläche von 16,15 m² angeben.

Eine vollständige Berechnung des Wärmeübertragers, hinsichtlich Kühlleistung, ist in Abschnitt 3.3.1 dargestellt. Für einen unbeschichteten Wärmeübertrager fasst Tabelle 5 die wichtigsten Eigenschaften zusammen.

Eingehende Darstellung der wiss./techn. Ergebnisse nach Arbeitspaketen

Tabelle 5: Merkmale des Haugg Wärmeübertragers

Masse	28,1 kg
Abmessungen	400×400×400 mm
Netzmaße	330×380×388 mm
AU Oberfläche	22,90 m ²
AB Oberfläche	16,15 m ²
Rückwärmezahl	67,5%
Kühlleistung ($\Delta T_{max} = 6 K$)	518,59 W

Gewichtsoptimierter Haugg-Wärmeübertrager

Da der von der Firma Haugg gefertigte Wärmeübertrager etwa 28,1 kg schwer ist, wird zunächst versucht, eine weitere optimierte Variante zu konstruieren, um Gewicht zu sparen. Wie bereits dargelegt, soll damit das Ansprechverhalten verbessert werden, vor allem aber auch die Energieeffizienz der Prozesszyklen.

Gewichtsoptimierung:

Der CAD Nachbau kommt auf eine Gesamtmasse von 28,9 kg, was vermutlich an den Lamellen liegt, da deren exakte Geometrie nicht bekannt ist. Anhand des CAD-Modells wurde zunächst eine Analyse sämtlicher Bauteile durchgeführt. Für den gefertigten Wärmeübertrager ergeben sich folgende Anteile der Komponenten am Gesamtgewicht:

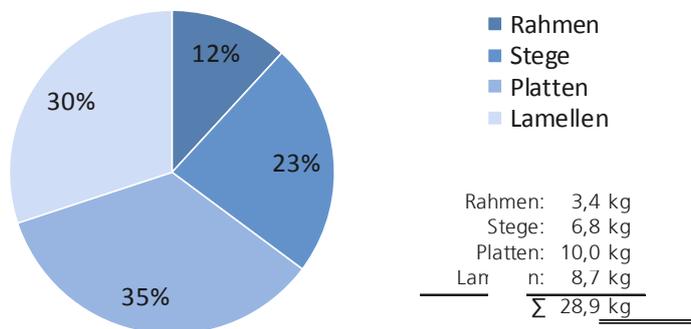


Abbildung 28: Gewichtsanteile der Komponenten

Anhand dieser Daten lässt sich gut abschätzen, an welcher Stelle Gewicht gespart werden kann. Die Zwischenplatten haben mit 35% den größten Anteil

am Gesamtgewicht. Hier lässt sich auch, im Gegensatz zu den Lamellen, deutlich an Gewicht einsparen. Die Trennplatten liegen in der derzeitigen Ausführung in einer Stärke von 0,6 mm vor. Theoretisch wären auch Platten mit einer Stärke von 0,3 mm möglich und sollen für den gewichtsoptimierten Wärmeübertrager verwendet werden. Die Stege bieten ebenfalls ein gewisses Einsparpotential. Diese könnten beispielsweise ausgefräst oder schmaler gestaltet werden, wodurch zusätzliche Lamellenfläche gewonnen wird. Das Gewicht des Rahmens ergibt sich aus der Höhe des Platte-Steg-Systems mit den zwischenliegenden Lamellen. Er muss entsprechend des geforderten Außenmaßes von 400×400×400 mm angepasst werden.

Umsetzung des optimierten Wärmeübertragers:

Der optimierte Wärmeübertrager mit schmaleren Stegen und dünneren lotplattierten Blechen kommt auf ein Gesamtgewicht von 22,4 kg. Dies entspricht einer Einsparung von über 22%. Tabelle 6 verdeutlicht, bei welchen Komponenten wie viel Gewicht eingespart werden konnte.

Tabelle 6: Gewichtseinsparung bei den Komponenten

	Hugg Wärmeübertrager	opt. Hugg Wärmeübertrager	Differenz
Rahmen	3,4 kg	3,6 kg	+ 5,9%
Stege	6,8 kg	4,5 kg	- 33,8%
Platten	10,0 kg	5,1 kg	- 49,0%
Lamellen	8,7 kg	9,2 kg	+ 5,7%
Gesamtgewicht	28,9 kg	22,4 kg	- 22,5%

Aufgrund der halbierten Trennplattenstärke verringert sich die Gesamthöhe des Platte-Steg-Systems so sehr, dass eine zusätzliche sorptive Lamellenreihe untergebracht werden kann. Selbst damit ist die Gesamthöhe noch etwas geringer als bei dem nicht optimierten Wärmeübertrager, wodurch der Rahmen etwas stärker ausfällt. Der Lamellentyp wurde beibehalten, allerdings ergibt sich aufgrund der neuen Anzahl von je 23 Außen- und Abluftlamellenreihen eine Asymmetrie, bei der die letzte sorptive Lamellenschicht nicht mehr von zwei Seiten (oben und unten) im Betrieb gekühlt werden kann. Durch diesen Randeffect sinkt die Effektivität dieser zusätzlichen Reihe. Abbildung 29 zeigt den optimierten Wärmeübertrager.

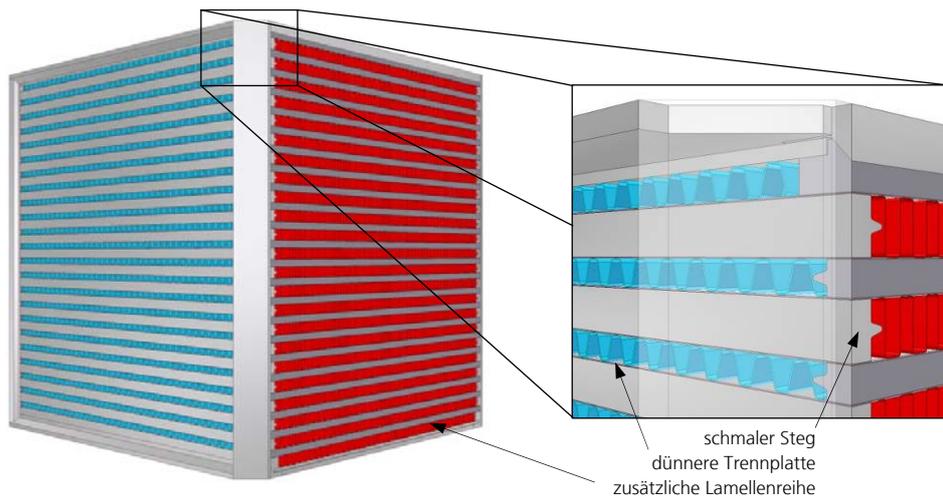


Abbildung 29: optimierter Wärmeübertrager mit Detailansicht

In der detaillierten Ansicht ist noch einmal der Aufbau des Wärmeübertragers nach dem Platte-Steg-System zu sehen, inklusive der wichtigsten vorgenommenen Änderungen. Die außenluftseitige Oberfläche (rot) vergrößert sich durch die zusätzliche Lamelle auf 24,53 m². Die der Abluft (blau) bleibt mit 16,19 m² gleich groß.

Für die charakteristische Übertragungsfähigkeit wurde ein Wert von 352,98 W/K ermittelt. Die Wärmeübergangszahl des Wärmeübertragers beträgt 18,55 W/m²·K, wobei dessen Effizienz mit 67,7% angegeben werden kann. Die Kühlleistung für Eintrittstemperaturen von 32°C und 26°C beträgt 519,90 W. Die nachfolgende Tabelle 7 fasst die wichtigsten Eigenschaften zusammen.

Tabelle 7: Merkmale des optimierten Haugg Wärmeübertragers

Masse	22,4 kg
Abmessungen	400×400×400 mm
Netzmaße	340×390×385 mm
AU Oberfläche	24,53 m ²
AB Oberfläche	16,19 m ²
Rückwärmezahl	67,7%
Kühlleistung ($\Delta T_{max} = 6 K$)	519,90 W

Der optimierte Aufbau des Haugg Wärmeübertragers konnte leider nicht umgesetzt werden, da die Beschaffung des benötigten 0,3mm Blechmaterials für die geringe Stückzahl gefertigter Einheiten finanziell nicht tragbar war, sowie eine höhere Ausschussrate aufgrund von Undichtigkeiten befürchtet wurde.

Aus diesem Grund wurden im Projektverlauf noch weitere für SorLuko verwendbare Wärmeübertrager recherchiert, evaluiert und beschafft, wie im Folgenden dargestellt:

3.2.2.2 Taschen-Wärmeübertrager Hoval® ST-040/A-40,0

Eingehende Darstellung der wiss./techn. Ergebnisse nach Arbeitspaketen

Die Firma Hoval® mit Hauptsitz in Vaduz (Liechtenstein) hat einige Produkte zur Wärmerückgewinnung im Sortiment. Neben Rotationswärmeübertragern gibt es auch eine große Auswahl an Taschen-Wärmeübertragern (bei Hoval Plattenwärmeaustauscher genannt) in unterschiedlichen Größen und Plattenabständen.

Die Wärmeübertrager bestehen aus 0,13 mm dünnen profilierten Aluminiumblechen die abwechselnd, entsprechend Abbildung 30, miteinander verfalzt werden. Die Prägung der Bleche dient zum einen als Abstandhalter, so dass zwischen den Blechen immer ein gewisser Abstand besteht, zum anderen wird durch die Struktur ein besserer Wärmeübergang von der Luft zum Blech realisiert. Das aufgrund der Falzung entstehende Tauscherpaket befindet sich in einem Rahmen bei dem die kritischen Übergänge (Außenluft-Abluft und Zuluft-Fortluft) mit einer Dichtung versehen sind.

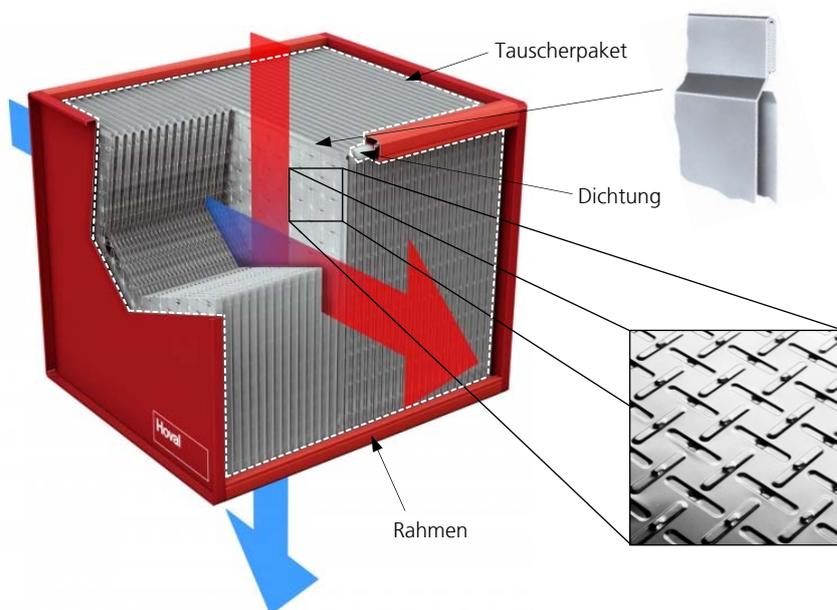


Abbildung 30: Aufbau des Hoval-Wärmeübertragers

Als ECOS Wärmeübertrager kommt von insgesamt drei verfügbaren Ausführungen, aufgrund der Größe, nur eine (Ausführung S) infrage. Die Kantenlänge der gefalzten Aluminiumbleche beträgt 367 mm, nur die Breite des Wärmeübertragers kann durch die Aneinanderreihung der Platten auf genau 400 mm eingestellt werden. Damit ergibt sich ein Außenmaß von 367×367×400 mm bei einem Gesamtgewicht von 12 kg. In der Ausführung S kann zwischen zwei Plattenprägungen gewählt werden, die beide einen Plattenabstand von 2,3 mm aufweisen. Zu den Oberflächen macht der Hersteller keine Angabe, eine Schätzung kommt jedoch auf eine Übertrageroberfläche von circa 19,37 m² pro Seite.

Aufgrund der Tatsache, dass der Wärmeübertrager einbaufertig geliefert werden würde, so dass die Platten bereits gefalzt und in einen Rahmen geklebt

sind, ist nur eine nachträgliche Beschichtung möglich. Somit könnte sich eine Beschichtung, aufgrund des geringen Plattenabstands von 2,3 mm, als schwierig erweisen. Die Leistungsfähigkeit des Wärmeübertragers wurde nicht, wie bei den anderen Varianten, mit der ϵ -NTU Methode durchgeführt, sondern mithilfe eines Auslegungsprogrammes des Herstellers (Hoval® CAPS 2010 V2.0.2). Für die Berechnung mussten die Massenströme und Eintrittstemperaturen für den jeweiligen Wärmeübertrager angegeben werden. Die Rückwärmezahl wird mit 68,2% auf der Abluftseite bzw. mit 69,2% auf der Außenluftseite angegeben. Die Kühlleistung wird grob mit 0,5 kW angegeben. Tabelle 8 gibt eine Übersicht über die wichtigsten Eigenschaften des Hoval-Wärmeübertragers.

Tabelle 8: Merkmale des Hoval Taschenwärmeübertragers

Masse	12 kg
Abmessungen	367×367×400 mm
Netzmaße	317×317×350 mm
AU Oberfläche	19,37 m ²
AB Oberfläche	19,37 m ²
Rückwärmezahl	68,2%
Kühlleistung ($\Delta T_{max} = 6 K$)	≈ 500 W

Zur Evaluation der Beschichtbarkeit dieses Wärmeübertragers wurden vom Hersteller Blechproben angefordert und beschichtet sowie anschließend auf Haftung untersucht (siehe 3.2.1). Die Beschichtung zeigte Verfärbungen, was auf eine geringe Korrosionsbeständigkeit der Oberfläche hindeutet. Weiterhin waren die Hafteigenschaften auf der Oberfläche ungenügend. Zusammen mit der schlechten Zugänglichkeit der Lamellenzwischenräume wurde daher dieser Typ Wärmeübertrager nicht weiterverfolgt.

3.2.2.3 Wärmeübertrager aus Ladeluftkühlern

Im Laufe des Projektes wurde auch im Automotive-Bereich nach Wärmeübertragern recherchiert, um einen alternativen Aufbau aus Ladeluftkühlern oder Motorkühlern umzusetzen. Komponenten aus dem Automobilbereich zeichnen sich durch die in Serienproduktion hergestellten hohen Stückzahlen durch geringe Produktionskosten aus.

Motorkühler kommen in jedem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor zum Einsatz und schützen den Motor vor Überhitzung. Es werden überwiegend Wasser-Luft-Motorkühler eingesetzt, bei denen ein Wasserkreislauf, der die Motorwand durchströmt, durch den Fahrtwind gekühlt wird.

Ladeluftkühler sind Wärmeübertrager, die in Kraftfahrzeugen mit Turbolader eingesetzt werden. Sie befinden sich zwischen Verdichter und Einlassventil und

sorgen dafür, dass die dem Motor zugeführte Verbrennungsluft gekühlt wird. Dadurch sinkt die Dichte der Luft, so dass eine größere Luftmenge dem Motor zugeführt werden kann, wodurch Wirkungsgrad und die Leistung gesteigert werden. Ladeluftkühler können luft- oder wassergekühlt sein. Für dieses Projekt musste dementsprechend ein passender luftgekühlter Ladeluftkühler gefunden werden.

Um sich vorweg für eine Variante zu entscheiden, wurden jeweils Ladeluftkühler und Motorkühler mit passenden Maßen bestellt und auf Druckverluste hin untersucht. Druckverluste bei Luft-Luft-Wärmeübertragern spielen eine große Rolle, da sie einen erheblichen Einfluss auf die Kosten (Energiekosten für Betrieb der Ventilatoren) der gesamten raumluftechnischen Anlage haben. Die Druckverlustmessung ergab, dass der Wasser-Luft-Motorkühler nicht für einen Luft-Luft Einsatz geeignet ist. Aus diesem Grund wird der Aufbau mit Ladeluftkühlern fortgeführt.

Ladeluftkühler bestehen heutzutage meist aus Aluminium und werden im Aluminiumhartlötverfahren zusammengefügt. Als Lot wird eine Aluminiumlegierung (Al-Si) mit niedrigem Schmelzpunkt verwendet. So kann, unter Zusatz eines Flussmittels zur Entfernung der natürlichen Oxidschicht, in einem Inertgasofen ohne Vakuum gelötet werden.

Ladeluftkühler sind meist aus einem Rohr-Lamelle-System („tube-fin“) aufgebaut. Außen befinden sich zwei Rahmenbleche zwischen denen lotplattierte Flachrohre in definiertem Abstand liegen. In diesen Rohren, durch die normalerweise die zu kühlende Ladeluft strömt, befinden sich zur Oberflächenvergrößerung Lamellen. Quer dazu, zwischen den Flachrohren befinden sich ebenfalls Lamellen durch die der Fahrtwind strömt.

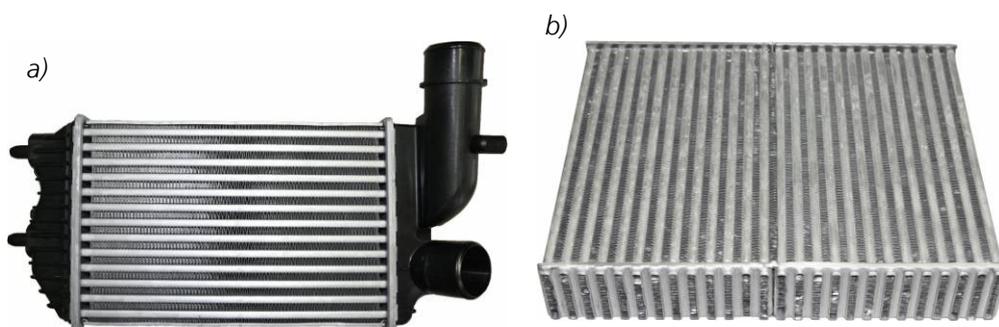


Abbildung 31: a) kompletter Ladeluftkühler b) 2 verschweißte Ladeluftkühler

Abbildung 31: a) zeigt den Ladeluftkühler eines Fiat Ducato/Citroën Relay/Peugeot Boxer. Dieser wurde nach einer umfangreichen Recherche als passend bzw. als geeignet identifiziert. Erschwert wurde die Suche durch den Umstand, dass Ladeluftkühler normalerweise nach Marke des Kraftfahrzeugs bzw. dessen Schlüsselnummer ausgewählt werden und nicht direkt nach Netzmaßen gesucht werden kann.

Die Ladeluftkühler erfordern für eine spätere Beschichtung und einen Zusammenbau gewisse Modifikationen. Dies beinhaltet die Entfernung der Kunststoffadapter an den Seiten, die Verkleinerung des Rahmenbleches sowie das Entfernen der äußeren Lamellenreihen und der Abschlussbleche. In Abbildung 31: b) sind zwei modifizierte Ladeluftkühler, die miteinander verschweißt wurden, dargestellt. Dieses Modul ist eines von insgesamt fünf, die für den vollständigen Wärmeübertrager benötigt werden. Die einzelnen Module können beschichtet und in einen Rahmen eingebaut werden, der die fünf Module aufnimmt und die notwendigen Abmessungen von 400×400×400 mm aufweist.

Abbildung 32 zeigt zum einen den CAD Nachbau des Ladeluftkühlers (a) und zum anderen den CAD Zusammenbau aus zehn einzelnen Ladeluftkühlern inklusive Rahmen (b).

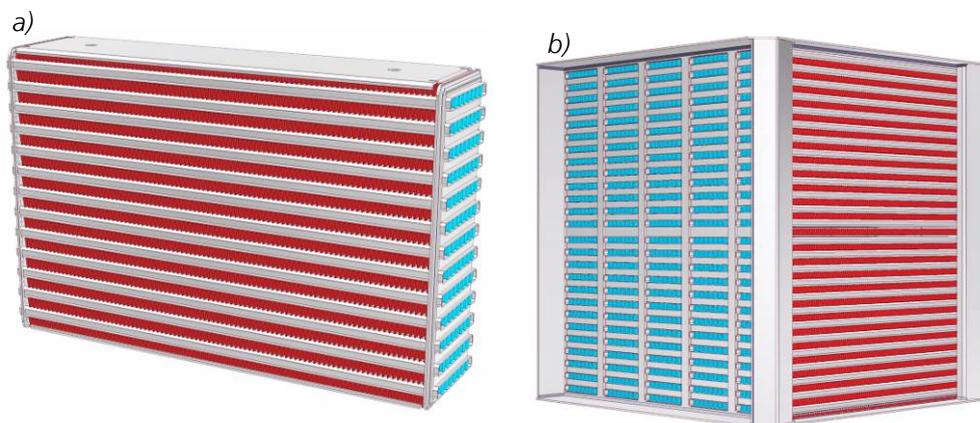


Abbildung 32: a) CAD Ladeluftkühler b) Wärmeübertrager aus Ladeluftkühlern

Strömungstechnisch ungünstig ist bei dem Wärmeübertrager zum einen der Eintrittsbereich der Abluftseite zu bewerten, da dort die Flachrohre etwas hervorstehen, zum anderen besteht zwischen den Ladeluftkühlermodulen ein geringer Abstand. Durch diese Zwischenräume kommt es zu einer Durchmischung der Strömung, die zusätzliche Druckverluste auf der unbeschichteten Rückkühlseite bedeuten.

Der aus zehn Ladeluftkühlern zusammengesetzte Wärmeübertrager hat, inklusive Rahmen und Schweißnähten, ein Gesamtgewicht von 15,8 kg.

Die Lamellen auf der Außenluftseite (rot) sind etwa 7 mm hoch, haben eine Stärke von 0,1 mm und besitzen jalousienartige Schlitze („louvered fins“). Für die Außenluftseite wurde eine Fläche von 24,4 m² bestimmt. Die Schlitze wurden bei der Abschätzung der Oberfläche vernachlässigt, da sie aufgrund der kleinen Strukturen nicht ausreichend genau rekonstruiert werden konnten.

Auf der Abluftseite werden, ähnlich wie beim Haugg Wärmeübertrager, in der Tiefe versetzte Lamellen („lanced offset fins“) mit einer Höhe von 6,6 mm und einer Stärke von 0,1 mm verwendet. Die Übertragungsoberfläche der Abluftseite beträgt 14,2 m².

Die Wärmeübergangszahl des aus Ladeluftkühlern bestehenden Wärmeübertragers beträgt $16,99 \text{ W/m}^2\text{K}$ bei einer charakteristischen Übertragungsfähigkeit von $303,80 \text{ W/K}$. Die Kühlleistung bei einer Differenz der Eintrittstemperaturen von 6 K beträgt $500,54 \text{ W}$ bei einer Rückwärmezahl von $65,1\%$. Die Leistungsfähigkeit des Wärmeübertragers ist vermutlich etwas höher, da auf der sorptiven Seite für die geschlitzten Lamellen keine entsprechende Geometrie für die Nachrechnung vorhanden war und nur mit geraden Lamellen gerechnet wurde, wodurch der Wärmeübergangswert auf der sorptiven Seite herabgesetzt ist. Die nachfolgende Tabelle fasst die wichtigsten Eigenschaften zusammen.

Tabelle 9: Merkmale des Ladeluftkühler-Wärmeübertragers

Masse	15,8 kg
Abmessungen	400×400×400 mm
Netzmaße	315×304×384 mm
AU Oberfläche	24,4 m ²
AB Oberfläche	14,2 m ²
Rückwärmezahl	65,1%
Kühlleistung ($\Delta T_{\text{max}} = 6 \text{ K}$)	500,54 W

3.2.2.4 Variantenbewertung

In diesem Abschnitt werden zunächst alle Eigenschaften der beschriebenen Wärmeübertragervarianten zusammengefasst. Anschließend wird auf die Kriterien und deren Gewichtung eingegangen. Im letzten Unterkapitel erfolgt eine Bewertung der Varianten.

Wärmeübertrager im Überblick

Sämtliche Eigenschaften der beschriebenen Wärmeübertrager sind in Tabelle 10 zusammengefasst. Zusätzlich wurde versucht die Beschichtbarkeit, die Dichtigkeit und den zu erwartenden Druckverlust qualitativ einzuschätzen.

Tabelle 10: Wärmeübertragereigenschaften im Überblick

Eigenschaft	Hugg Wärmeübertrager	Hugg Wärmeübertrager (gewichts-optimiert)	Wärmeübertrager aus Ladeluftkühlern	Taschen-Wärmeübertrager Hoval ST-040/A-40
Beschichtbarkeit	ausreichend	ausreichend	gut	unbefriedigend
sorptive Fläche [m ²]	22,9	24,53	24,4	19,37
Abluftfläche [m ²]	16,15	16,19	14,2	19,37
Dichtigkeit	sehr gut	sehr gut	gut	gut
Druckverluste	mittel	mittel	erhöht	gering
Rückwärmezahl	67,5%	67,7%	65,1%	68,2%
Kühlleistung ($\Delta T_{\text{max}} = 6\text{K}$) [W]	518,59	519,9	500,54	500
Maße BxHxT [mm]	400x400x400	400x400x400	400x400x400	400x367x367
Masse [kg]	28,1	22,4	15,8	12
Preis [€]	2200	>2200	1100	370

Eingehende Darstellung der wiss./techn. Ergebnisse nach Arbeitspaketen

Kriterien und Gewichtung

Aus den oben aufgeführten Eigenschaften werden nun Bewertungskriterien ausgewählt. Wichtigstes Kriterium für den vorgesehen Einsatz der Wärmeübertrager ist zum einen die Beschichtbarkeit bzw. deren Durchführbarkeit und zum anderen, die dafür benötigte Oberfläche der Außenluftseite des Wärmeübertragers, die möglichst groß sein sollte. Von großer Wichtigkeit ist auch die Dichtigkeit des Wärmeübertragers, da ein Vermischen beider Stoffströme aufgrund des eingebrachten Wassers während der Verdunstungskühlung den Effekt der Entfeuchtung zunichtemachen würde. Mit etwas geringerer Wertung soll die Masse, die Kühlleistung und der Druckverlust des Wärmeübertragers bewertet werden, wobei letzterer nicht explizit bestimmt wurde; er kann allenfalls abgeschätzt werden. Das Außenmaß der einzelnen Wärmeübertrager wird auch bewertet, da der Montageaufwand direkt beeinflusst wird. Mit etwas geringerer Gewichtung soll der Preis des Wärmeübertragers bewertet werden. In der nachfolgenden Tabelle sind alle Bewertungskriterien inklusive der festgelegten Gewichtungsfaktoren dargestellt.

Tabelle 11: Bewertungskriterien und deren Gewichtung

Nr.	Bewertungskriterium	Gewichtungsfaktor
1	Beschichtbarkeit	1,0
2	sorptive Oberfläche	1,0
3	Dichtigkeit	0,8
4	Wärmeübertragermasse	0,8
5	Druckverluste	0,5
6	Kühlleistung	0,5
7	Außenmaß	0,4
8	Preis	0,2

Eingehende Darstellung der wiss./techn. Ergebnisse nach Arbeitspaketen

Bewertung

Die Bewertung der einzelnen Wärmeübertrager erfolgt als Variantenvergleich in Form von einer kombinierten Präferenzmatrix mit Punktebewertung (siehe Tabelle 12). Für jedes Kriterium wird anhand der bestimmten Eigenschaften ein Maß bestimmt, welches von eins (unbefriedigend) bis vier (sehr gut) reicht. Das Maß wird anschließend gewichtet, woraus sich der entsprechende Wert für ein Kriterium ergibt, der daraufhin zu einer Gesamtwertigkeit summiert wird, anhand derer sich die Rangfolge ableitet.

Tabelle 12: Variantenbewertung

Bewertungskriterien	Gewichtungsfaktoren	Varianten							
		V1		V2		V3		V4	
		Maß	Wert	Maß	Wert	Maß	Wert	Maß	Wert
Maßlegende: 1 – unbefriedigend 2 – ausreichend 3 – gut 4 – sehr gut									
Beschichtbarkeit	1,0	2	2	2	2	3	3	1	1
sorptive Oberfläche	1,0	3	3	4	4	4	4	2	2
Dichtigkeit	0,8	4	3,2	4	3,2	3	2,4	3	2,4
Wärmeübertragermasse	0,8	1	0,8	2	1,6	3	2,4	4	3,2
Druckverluste	0,5	3	1,5	3	1,5	2	1	4	2
Kühlleistung	0,5	3	1,5	3	1,5	2	1	2	1
Außenmaß	0,4	4	1,6	4	1,6	4	1,6	2	0,8
Preis	0,2	1	0,2	1	0,2	2	0,4	4	0,8
Wertigkeit		13,8		15,6		15,8		13,2	
normierte Wertigkeit		0,83		0,97		0,98		0,78	
Rang		3		2		1		4	

Die Bewertung der Varianten hat ergeben, dass der Aufbau aus Ladeluftkühlern am vielversprechendsten ist. Dieser wird gefolgt von dem gewichtsoptimierten Haugg Aufbau und dem gefertigten Haugg Wärmeübertrager. Aufgrund des hohen Preises und der zu erwartenden langen

Lieferzeit der benötigten Bauteile des optimierten Haugg Aufbaus wurde der Wärmeübertrager aus Ladeluftkühlern aufgebaut, da hier bereits Komponenten vorhanden, und weitere günstig zu beschaffen sind. Somit stehen zwei Wärmeübertragervarianten für eine spätere Beschichtung zur Verfügung.

Eingehende Darstellung der wiss./techn. Ergebnisse nach Arbeitspaketen

3.2.3 Beschichtung des Funktionsmusters

3.2.3.1 Aufbau der Coating-Anlage

Zur Beschichtung des Wärmeübertragers für das solarthermische Klimalüftungssystem wurde im Rahmen einer Bachelorarbeit eine Beschichtungsvorrichtung aufgebaut, welche skizzenhaft in Abbildung 33 dargestellt ist.

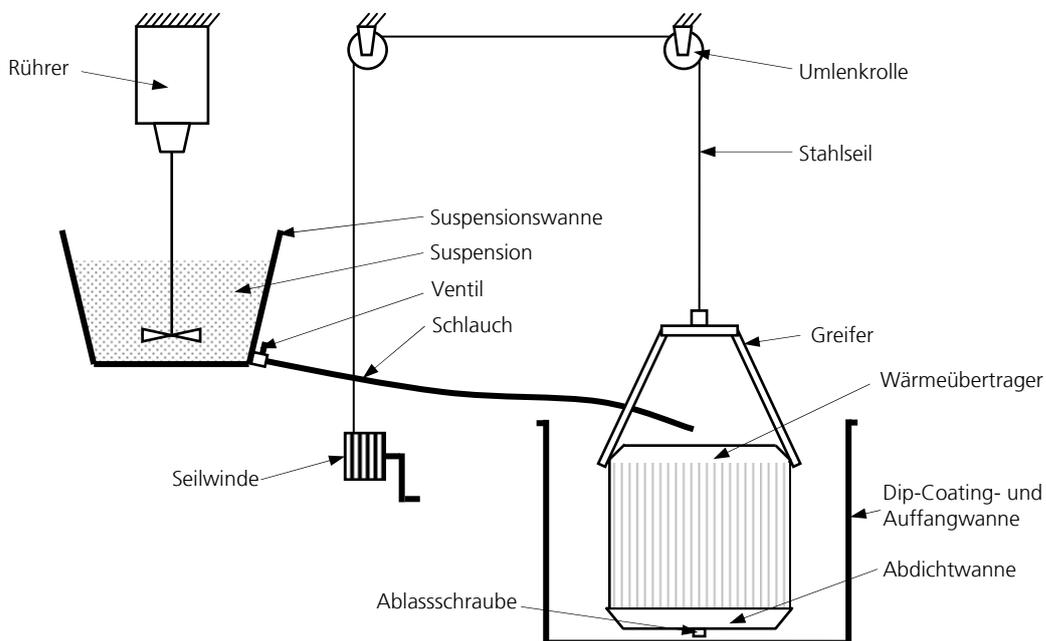


Abbildung 33: Beschichtungsvorrichtung

Im Vorfeld wurden verschiedene Beschichtungsverfahren diskutiert und durch Vorversuche evaluiert, letztendlich fiel die Entscheidung für eine vollständige Flutung der zu beschichtenden Wärmeübertragerseite. Dazu wird eine Seite des Wärmeübertragers durch einen speziell angefertigten Deckel abgedichtet (Abdichtwanne) und anschließend mit der Beschichtungssuspension gefüllt. Nach einer kurzen Dauer wird die Suspension wieder abgelassen und die haften gebliebene Schicht im Wärmeübertrager getrocknet. Mit der Vorrichtung ist auch eine Tauchbeschichtung („dip-coating“) eines Wärmeübertragers bis zu einer Masse von 150 kg möglich, allerdings wäre für das Tauchen des kompletten Wärmeübertragers eine komplizierte Abdichtung und eine große Menge an Suspension nötig, was für die im Projekt gefertigten Stückzahlen zu kostenaufwändig wäre.

Die Arbeitsschritte können grob in folgende chronologisch gelisteten Punkte unterteilt werden:

- Vorbereiten und Abdichten des Wärmeübertragers
- Anrühren der Suspension
- Befüllen des Wärmeübertragers
- Entleeren des Wärmeübertragers
- Trocknen des Wärmeübertragers

Eingehende Darstellung der
wiss./techn. Ergebnisse nach
Arbeitspaketen

Für diese Arbeitsschritte wurden folgende Komponenten / Baugruppen eingesetzt:

- Suspensionswanne mit Schlauch zum Entleeren
- 3 Stck. Rührantriebe mit Teflon-Propellerrührern
- Ultraschallbad 80 L zum Homogenisieren der Suspension
- Handlingeinheit zum Heben und Senken des Wärmeübertragers mittels Winde
- Ofen zum Trocknen der Beschichtung

Die Beschichtungsanlage wurde für die Geometrien „Dummy“ sowie zur Beschichtung des Haugg-WÜ eingesetzt. Insgesamt wurden drei Dummy-WÜ beschichtet, um das Verfahren hinsichtlich Suspensionseinstellung und Homogenisierung, Befüllvorgang und Beschichtungsmassenmaximierung zu optimieren, sowie das Handling des WÜ und die Arbeitsschritte auf die großen Abmessungen und Masse des Haugg-WÜ anzupassen.

3.2.3.2 Dummy-Experimente

Es wurden insgesamt 3 Dummies mit den Abmessungen 100 × 100 × 400 mm hergestellt und beschichtet. Diese bestanden nur aus Kanalstrukturen zur Aufbringung der Beschichtung, die Kanalseite zur Rückkühlung wurde bei der Dummy-Geometrie nicht ausgeführt, da diese für das Beschichtungsverfahren nicht wesentlich ist. Die zu beschichtende Kanal-/Lamellenoberfläche eines Dummies beträgt ca. 1/9 der zu beschichtenden Oberfläche des Haugg-WÜs.

Tabelle 13: Übersicht über die drei beschichteten Dummies

Eingehende Darstellung der wiss./techn. Ergebnisse nach Arbeitspaketen

	Dummy 1	Dummy 2	Dummy 3
Additiv	RA1	RA1	RA2
Feststoffgehalt der Dispersion [%]	35	31,8	43,6
Gehalt Additiv auf Wasser bezogen [%]	0,93	0,42	0,47
Coating-Masse [g]	639,00	544,00	171,00
Zeolith-Masse [g]	549,67	490,14	155,25
Zeolithanteil Coating [%]	86,02	90,10	90,79
Berechnete Masse Coating [g/m²]	259,76	221,14	69,51
Berechnete Masse reiner Zeolith [g/m ²]	223,44	199,24	63,11
Oberfläche der Kanalstruktur [m ²]	2,46	2,46	2,46
Flächenumrechnungsfaktor	9,31	9,31	9,31
Coating-Masse auf Haugg (berechnet) [g]	5948,4	5064,1	1591,8
Zeolith-Masse auf Haugg (berechnet) [g]	5116,8	4562,7	1445,2
Auslaufbecher-Messung (s)	k. Mess	7,5	3,7
Verarbeitbarkeit (nur Zeolith / m. Binder)	+ / o	+ / -(*)	o / ++
Beschichtbarkeit (m. Hilfsm /o. Hilfsm)	o / -	+ / o	+++ / +++
Homogenität der Beschichtung	o	-	++

Bei Dummy 1 wurde versucht den scherverdünnenden Effekt des Additivs RA1 auszunutzen. Das Einrühren des Additivs und Zeoliths hat gut funktioniert. Bei Zugabe des Binders stockte die Dispersion und war nur schwer zu homogenisieren. Auch das Einlaufen in die Lamellenstruktur stellte sich als problematisch heraus. Die verwendeten Vibratoren waren zu schwach, um genügend Scherwirkung einzubringen. Um den gewünschten Effekt zu erzielen hätten statt hochfrequenter Rotor-Vibratoren wesentlich stärkere Kolbenvibratoren zum Einsatz kommen müssen. Als Ersatz wurde die Hubpendel einer Stichsäge verwendet um die entsprechende Amplitude zu erzeugen. Mit Hilfe der starken Impulse war es möglich, die Lamellen mit der sehr viskosen Suspension zu fluten und nach kurzer Verweilzeit auch wieder zu entleeren. Allerdings wurde aufgrund der hohen Viskosität viel Luft eingerührt und es blieb Schaum zurück. Dies führte zu einer inhomogenen Oberfläche. Trotz hoher resultierender Beschichtungsmasse, sollte dieser Ansatz, aufgrund der starken Probleme mit der Verarbeitung, nicht auf den Haugg-WÜ umgesetzt werden.



Eingehende Darstellung der wiss./techn. Ergebnisse nach Arbeitspaketen

Abbildung 34: Anrühren der Suspension – Versuch Dummy-1

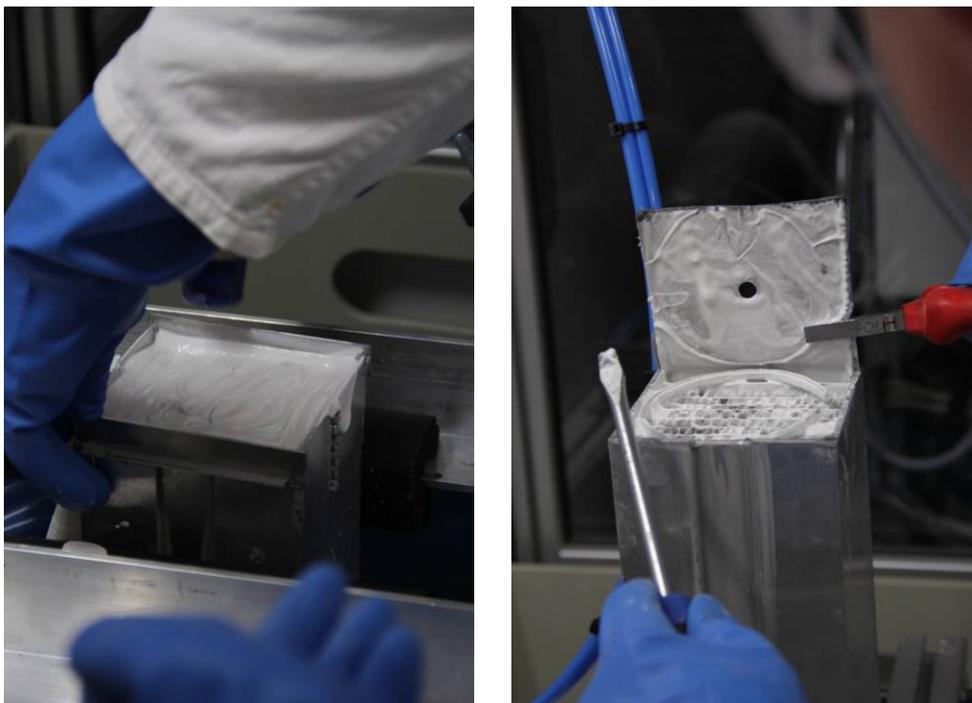


Abbildung 35: Befüllen und Entleeren des Dummy-Wärmeübertragers

Bei Dummy 2 sollte die Viskosität niedriger eingestellt werden, um das Handling zu verbessern. Dabei wurde ein höherer Wasseranteil verwendet und weniger Additiv. Allerdings stellte sich hierbei heraus, dass das Handling zwar besser wurde, auf der anderen Seite verstärkten sich aber die Probleme mit der Schaumbildung. Mit Hilfe starker Impulse war es relativ einfach die Lamellen zu befüllen und wieder zu leeren. Als die Lamellen frei waren, wurde die Krafteinwirkung weggenommen, damit die restliche Dispersion haften blieb. So

wurden zwar hohe Beschichtungsmassen erreicht, aber nach dem Auftrennen des Kanalelements zur optischen Kontrolle der Einzellagen zeigten sich eine schlechte Homogenität sowie ein teilweises Verblocken der Kanäle.

Die beiden ersten Versuche auf der Dummy-Geometrie wurden wegen der hohen nötigen Impulskräfte zum Befüllen und Entleeren der Suspension als nicht auf den Haugg-Wü übertragbar verworfen.

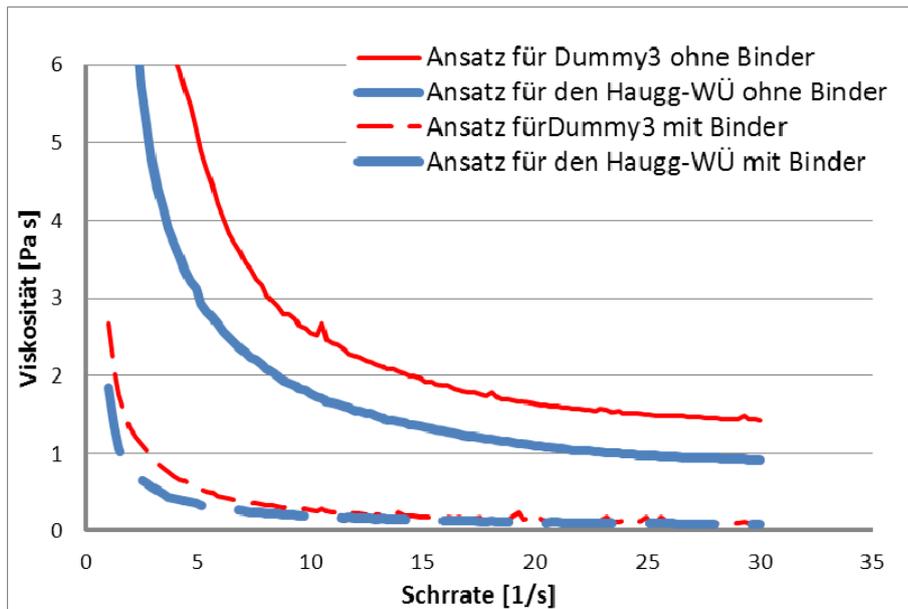
Bei Dummy 3 wurde nun auf das andere Additiv umgeschwenkt und der Wassergehalt reduziert. Beim Einarbeiten des Zeoliths entstand wieder eine zementartige Dispersion, die durch Ultraschall homogenisiert wurde. Nach Zugabe des Binders wurde die Dispersion niedrigviskos und ließ sich sehr gut rühren und ohne weitere Hilfsmittel verarbeiten. Nach dem Trocknen war die erreichte Beschichtungsmasse allerdings gering, die Schichthomogenität aber sehr gut.

Alle Ergebnisse sind in Tabelle 13 zusammengefasst.

Aus den bisher gewonnenen Erkenntnissen wurde beschlossen, den Haugg-WÜ wie Dummy 3 zu beschichten. Zusätzlich soll der WÜ nach der ersten Beschichtung aufgeheizt werden, und dann mit der gleichen Dispersion noch eine 2. Beschichtung aufgetragen werden.

Ein weiteres Problem war die schlecht reproduzierbare Viskosität zwischen den einzelnen Upscaling Stufen. Die Messung der rheologischen Eigenschaften der Dispersion mit Binder war erst nach Aufrüstung des Rheometers mit Einweggeometrien möglich.

Es wurden also erst in der Endphase des Upscalings gute Viskositätswerte gesammelt. In Abbildung 36 ist die Viskosität des Ansatzes von Dummy 3 mit dem des äquivalenten Ansatzes für den Haugg-WÜs verglichen. Dabei zeigte sich zum einen, dass die Viskosität sich drastisch absenkt nach der Binderzugabe. Vor Binderzugabe gibt es deutliche Unterschiede der beiden (eigentlich gleichen) Ansätze zu einander. Nach Binderzugabe ist die Viskosität aber fast wieder auf gleichem Niveau und sollte damit genauso gut zu verarbeiten sein.



Eingehende Darstellung der wiss./techn. Ergebnisse nach Arbeitspaketen

Abbildung 36: Viskositätsmessungen der Ansätze für Dummy3 und Haugg-WÜ vor und nach Binderzugabe

3.2.3.3 Beschichtung des Haugg-Wärmeübertragers

Die letzte Entwicklungsstufe stellte die Herstellung der sorptiven Beschichtung des Haugg-WÜs dar. Die Durchführung der Beschichtung konnte aufgrund des zeitaufwändigen Upscaling-Prozesses und den auftretenden Problemen, welche jeweils iterative Versuchsreihen zur Beseitigung derselben und weiteren Optimierung erforderten, erst gegen Projektende erfolgen.

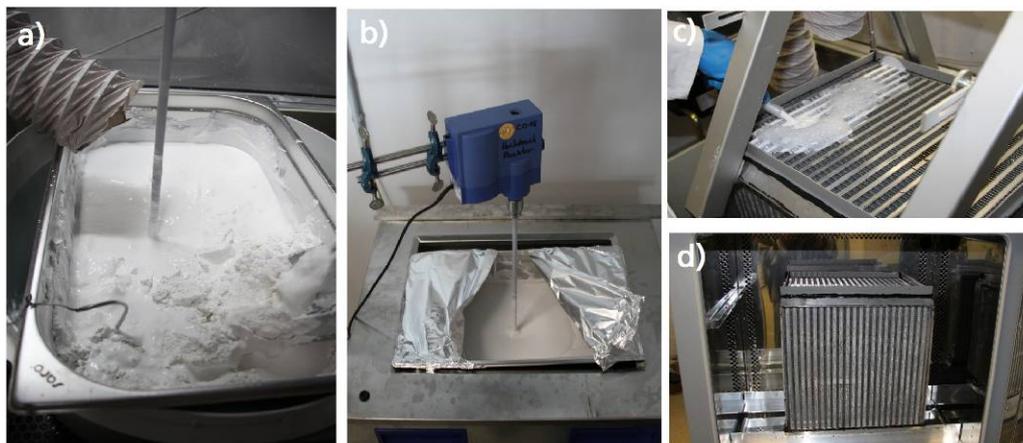


Abbildung 37: Beschichtungsprozess des Haugg-Wärmeübertragers. a) Einrühren des Adsorptionsmaterials. b) Homogenisieren der Dispersion im 80l Ultraschallbad unter ständigem Rühren. c) Fluten des unten abgedichteten WÜ mit der Dispersion. d) Trocknen und Ausheizen der Beschichtung.

Trotzdem konnte noch im Berichtszeitraum eine Beschichtung des Haugg-WÜs realisiert werden. Es wurde hierbei die Beschichtungsrezeptur von Dummy 3 verwendet, zusätzlich sollte aber direkt ein Ausheizen des WÜs und eine 2. Beschichtung stattfinden.

Eingehende Darstellung der
wiss./techn. Ergebnisse nach
Arbeitspaketen

Das Vorgehen hier war analog zu den anderen Versuchen. Destilliertes Wasser wurde vorgelegt, anschließend die pyrogene Kieselsäure (RA2) eingerührt. Danach wurde der Zeolith nach und nach eingerührt. Es entstand eine zementartige Masse wie in Abbildung 37 a) gezeigt. Die Dispersion erhitzte sich auch zeitweilig auf mehr als 60°C durch die Adsorptionswärme. Die Dispersion wurde anschließend in einem großen Ultraschallbad dispergiert. Diese Schritte mussten in 2 Ansätzen durchgeführt werden, damit die Rührleistung und die Gefäße ausreichten. Erst danach wurden die beiden Ansätze zusammen in das Gefäß der Beschichtungsanlage umgefüllt und zuletzt wurde unter Rühren der Binder eingerührt. So wurden insgesamt 43,2 kg Dispersion angerührt, mit einem Feststoffgehalt von 43,5 Gew. %.

Anschließend wurde der unten abgedichtete WÜ geflutet, was sehr gut funktioniert hat. Allerdings konnten die Silikonnähte dem statischen Druck der Suspension nicht längere Zeit standhalten. Sie lösten sich an einer Ecke ab und die Dispersion floss in die Abtropfwanne. Der WÜ wurde anschließend für 1h bei 120°C in den Ofen gestellt, damit die Schicht trocknet. Nach dem Abkühlen wurde ein zweiter Beschichtungsversuch unternommen. Die Leckage an der Silikondichtung war in der zur Verfügung stehenden Zeit nicht zu beheben, so dass mit Eile die Füllung vorgenommen wurde. Eine längere Standzeit vor dem Entleeren konnte nicht mehr gewährleistet werden.

Nach dem Ablaufen wurde der WÜ erst bei Raumtemperatur getrocknet und dann erst bei 200°C in einem Trockenschrank aufgeheizt.

Nach dem Säubern des WÜs blieb eine Beschichtungsmasse von 3,8 kg auf der Oberfläche zurück. Dies entspricht einem reinen Zeolithgehalt von 3,4 kg.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 14 zusammengefasst.

Tabelle 14: Zusammenfassung der Ergebnisse der Beschichtung des Haugg-WÜs

Eingehende Darstellung der wiss./techn. Ergebnisse nach Arbeitspaketen

Haugg-WÜ	
Additiv	RA2
Feststoffgehalt der Dispersion [%]	43,5
Gehalt Additiv auf Wasser bezogen [%]	0,48
Coating-Masse [kg]	3,780
Zeolith-Masse [kg]	3,431
Zeolithanteil Coating [%]	90,76
Berechnete Masse Coating [g/m²]	165,07
Berechnete Masse reiner Zeolith [g/m ²]	149,81
Auslaufbecher-Messung (s)	3,5
Verarbeitbarkeit (nur Zeolith / m. Binder)	+ / +++
Beschichtbarkeit (m. Hilfs- / o. Hilfs-)	+++ / +++
Homogenität der Beschichtung	++



Abbildung 38: Beschichteter Haugg-WÜ nach Trocknen der Beschichtung

Wie ansatzweise aus der Abbildung 38 erkennbar, ist das Beschichtungsergebnis zufriedenstellend, es wurden alle Lamellenkanäle benetzt, und nur sehr wenige Kanäle verblockt, so dass von einer optimalen Funktion des WÜ in der Demoanlage auszugehen ist. Auch die erreichte Adsorbensmasse in der Beschichtung von 3,4 kg lässt für die Anwendung eine hohe Entfeuchtungsleistung erwarten.

3.3 AP3: Charakterisierung

3.3.1 Charakterisierung der Entfeuchtungsleistung des Funktionsmusters

Bis Projektende war es leider nicht möglich, einen beschichteten Wärmeübertrager realer Abmessungen hinsichtlich Entfeuchtungsleistung zu charakterisieren. An dieser Stelle soll auf die Messungen an einem Wärmeübertrager reduzierter Abmessungen (Dummy-1) in diesem Kapitel sowie auf die Messungen der Demonanlage mit dem Silikagel-Wärmeübertrager verwiesen werden. Es wurden jedoch am Teststand für Solare Sorptionsgestützte Gebäudeklimatisierung (SSGK) die beiden unbeschichteten Haugg Wärmeübertrager hinsichtlich Übertragungsleistung charakterisiert. Diese Messungen dienten sowohl dazu, den Unterschied in der Übertragungsleistung vor und nach der Beschichtung zu quantifizieren, als auch die Auswirkungen bauartbedingter Unterschiede der beiden Wärmeübertrager auf den SorLuko-Prozess zu untersuchen. Beide Wärmeübertrager haben die gleichen Abmessungen und wurden aus dem gleichen Material hergestellt. Der Unterschied befindet sich auf den Lamellen der Abluftseite. Im Haugg I Wärmeübertrager sind die Lamellen gewellt und über die gesamte Länge durchgängig. Im Haugg II Wärmeübertrager sind die Lamellen der Abluftseite nicht gewellt, sondern im Abstand von 7,5 mm geschlitzt, wodurch die einzelnen Lamellenabschnitte versetzt hintereinander angeordnet sind. Dieser Aufbau ermöglicht eine Quervermischung in den Kanälen und sollte sich insbesondere bei Rückkühlung mit Befeuchtung bemerkbar machen.

Die Charakterisierung wurde in zwei verschiedenen Szenarien realisiert: Trockene Wärmeübertragung und Wärmeübertragung mit indirekter Verdunstungskühlung.

Charakterisierung unter trockenen Bedingungen

Für die trockene Wärmeübertragungscharakterisierung wurden verschiedene Einstellungen, z.B. verschiedene Temperaturgradienten, und 3 verschiedene Massenströme für jedes Temperaturintervall verwendet.

Tabelle 15 zeigt die Einstellungen für die trockene Charakterisierung.

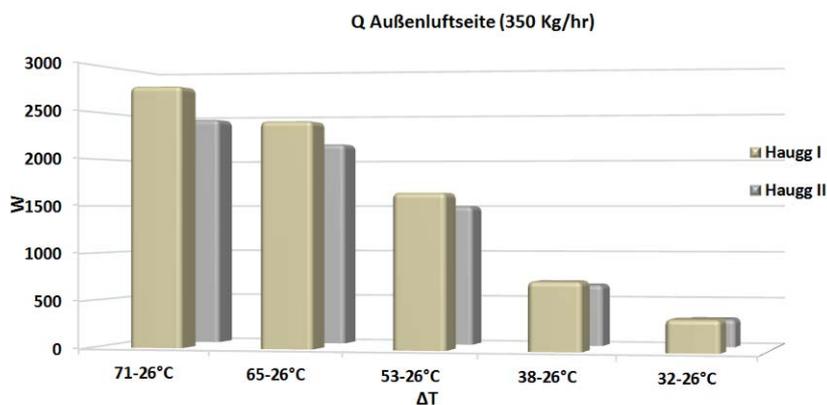
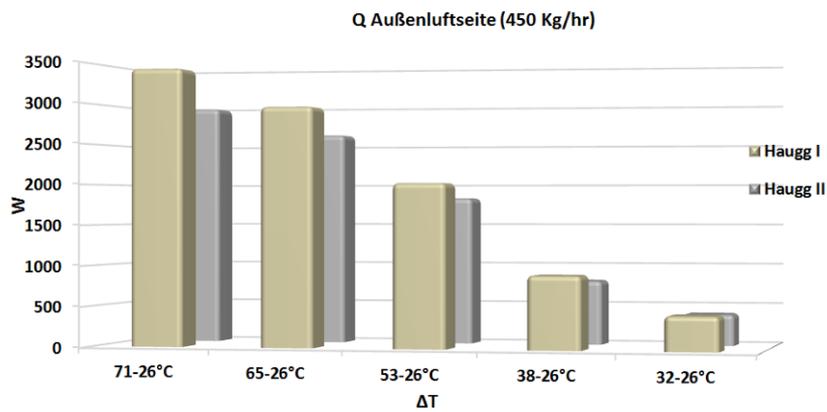
Tabelle 15: Einstellungen

Einstellungen			
Eingangstemperatur		Massenströme	
Außenluftseite	Abluftseite	Außenluftseite	Abluftseite
71°C	26°C	450 kg/h	450 kg/h
		350 kg/h	350 kg/h

		250 kg/h	250 kg/h
65°C	26°C	450 kg/h	450 kg/h
		350 kg/h	350 kg/h
		250 kg/h	250 kg/h
53°C	26°C	450 kg/h	450 kg/h
		350 kg/h	350 kg/h
		250 kg/h	250 kg/h
38°C	26°C	450 kg/h	450 kg/h
		350 kg/h	350 kg/h
		250 kg/h	250 kg/h
32°C	26°C	450 kg/h	450 kg/h
		350 kg/h	350 kg/h
		250 kg/h	250 kg/h

Eingehende Darstellung der wiss./techn. Ergebnisse nach Arbeitspaketen

Abbildung 9 zeigt den Vergleich der trockenen Wärmeübertragungsleistung beider Wärmeübertrager



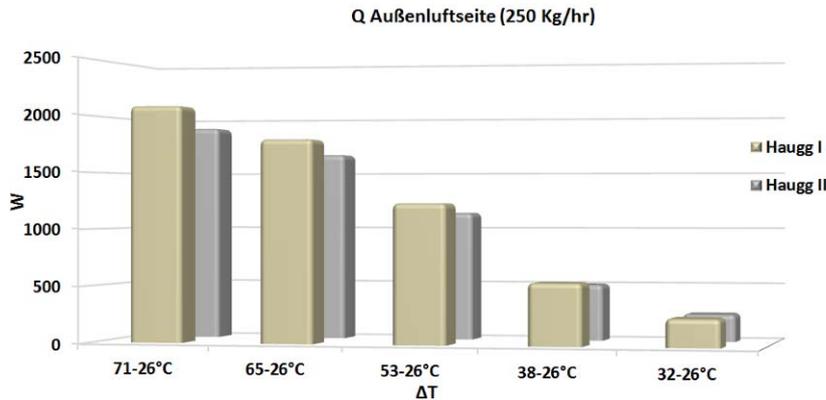
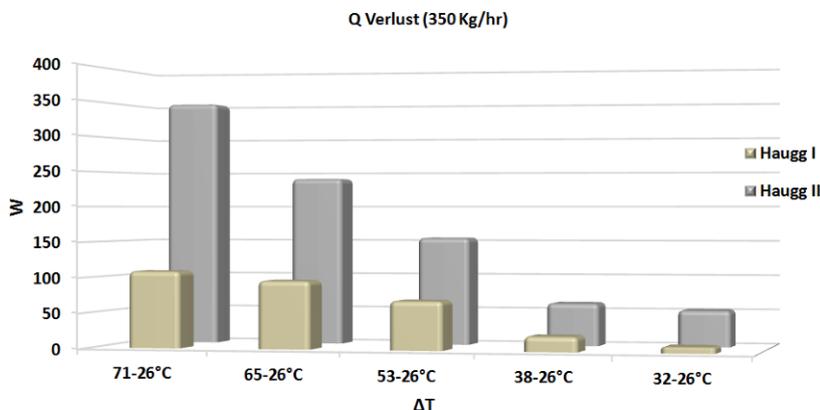
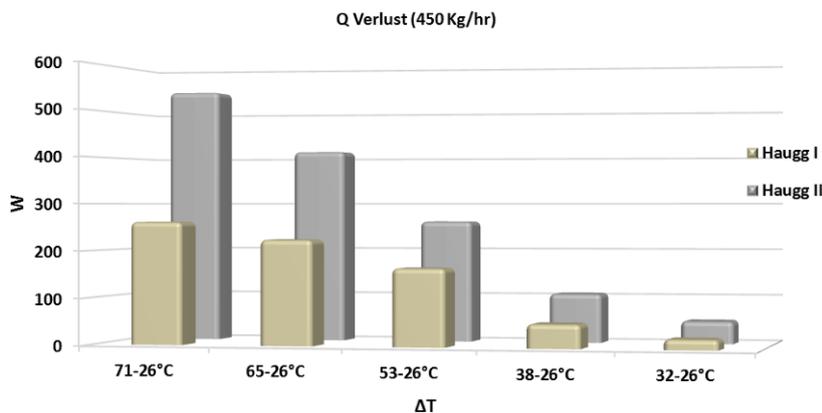


Abbildung 1 Wärmeübertragungsleistung

Der Haugg I Wärmeübertrager entfernt mehr Wärme von der Außenluftseite als der Haugg II in den 3 verschiedenen Szenarien (verschiedene Massenströme). Haugg I liefert somit in allen Betriebszuständen eine höhere Leistung. Die Wärmeübertragungsleistung im niedrigsten Temperaturintervall ist sehr ähnlich für beide Wärmeübertrager, was überwiegend auf den geringeren Einfluss der Lamellen bei kleinen Temperaturgradienten sowie die geringeren Wärmeverluste im Aufbau zurückzuführen ist..



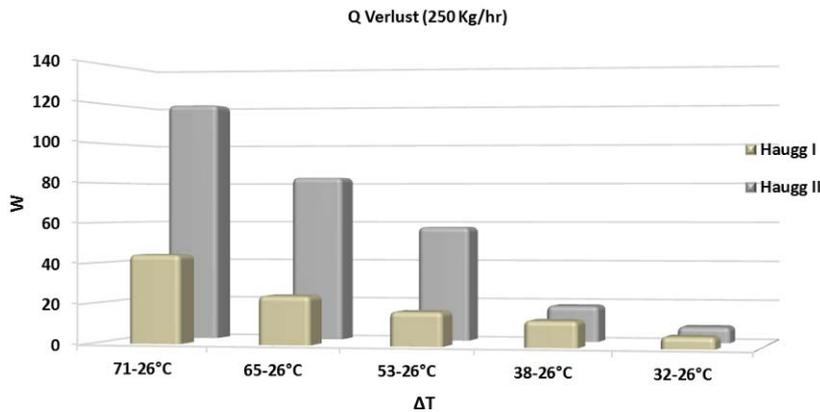
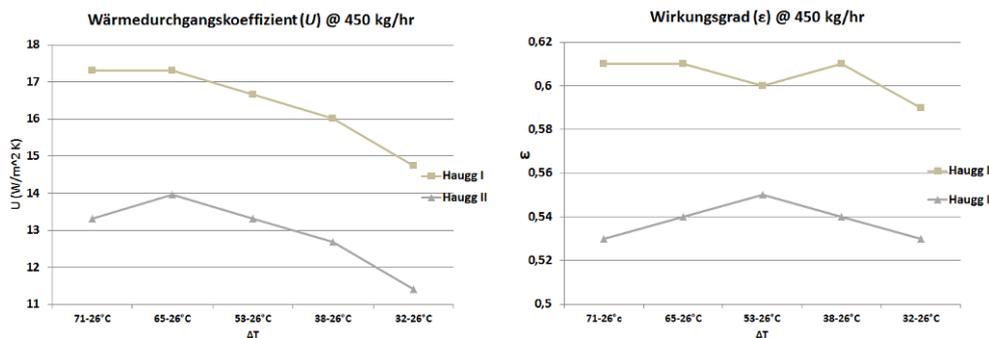
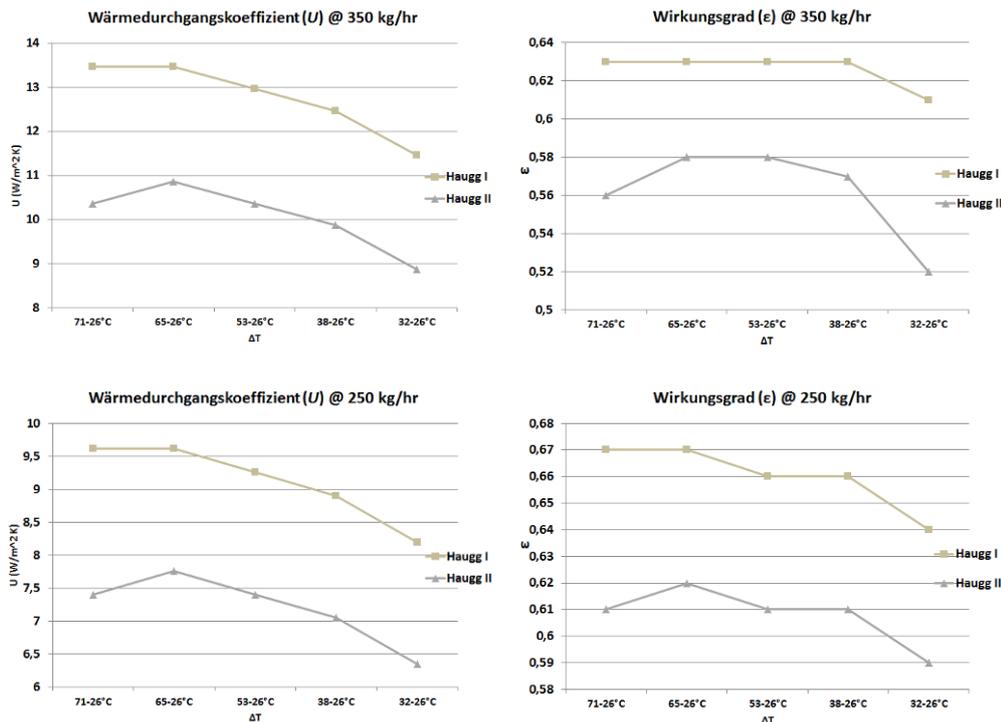


Abbildung 39: Wärmeverlust

Abbildung 39 zeigt den Verlustvergleich von beiden Wärmeübertragern. Dieser ergibt sich aus der Differenz der bilanzierten Wärmeleistungen der beiden Kanäle sorptive Seite und Rückkühlung. Dieser Wert quantifiziert also einerseits die Wärmeverluste über die Stirnseite der isolierten Wärmeübertrager, sowie die Wärmeverluste an den Rohrleitungen bis zur Luftzustandsmessung. Der Wert wird intern überwiegend zur Kontrolle der Messwerte der Übertragungsleistung herangezogen. Für den Anwendungsfall der Klimatisierung repräsentiert durch die Temperaturkombination 32/26°C fallen die Verluste durchwegs kleiner gleich 15% der detektierten Leistung aus, wobei die Verluste des Haugg II deutlich höher als die des Haugg I Wärmeüberträgers sind.

Die Charakterisierung der Wärmeübertrager enthält auch die Berechnung des Wirkungsgrades und des Wärmedurchgangskoeffizienten. Abbildung 40 zeigt diese Ergebnisse.





Eingehende Darstellung der wiss./techn. Ergebnisse nach Arbeitspaketen

Abbildung 40: Darstellung der Werte des Wärmedurchgangskoeffizienten sowie des Wirkungsgrades

Der Haugg I Wärmeüberträger hat den höchsten Wärmedurchgangskoeffizient sowie den höchsten Wirkungsgrad bei allen Massenströmen.

Der Verlauf des Wärmedurchgangskoeffizienten zeigt für beide Prüflinge und alle Massenströme einen ähnlichen Verlauf. Für den Wirkungsgrad stellt sich dies etwas anders dar. Die Linien zeigen verschiedene Verläufe, der höchsten Wirkungsgrad wird mit einem Massenstrom von 250 kg/h erreicht. Dieses Verhalten leitet sich aus der höchsten Temperaturdifferenz zwischen Eintritt und Austritt der Außenluftseite des Wärmeüberträgers bei geringem Massenstrom ab.

Charakterisierung mit Sprühbefeuchtung

Das zweite Szenario der Charakterisierung setzt indirekte Verdunstungskühlung ein, um eine höhere Rückkühlleistung zu erreichen. Um Verdunstungskühlung zu erzielen, wird Wasser auf der Abluftseite über eine Sprühdüse eingebracht. Dieses Wasser verdampft, und kann dabei die erforderliche Wärme der Abluft bzw. dem Wärmeübertrager entziehen. Somit kann eine niedrigere Lufttemperatur der Außenluftseite und höhere Kühlleistung als ohne Verdunstungskühlung erreicht werden.

Für die Charakterisierung der Wärmeübertrager mit Verdunstungskühlung wurden die folgenden Einstellungen benutzt, welche in Tabelle 16 dargestellt sind:

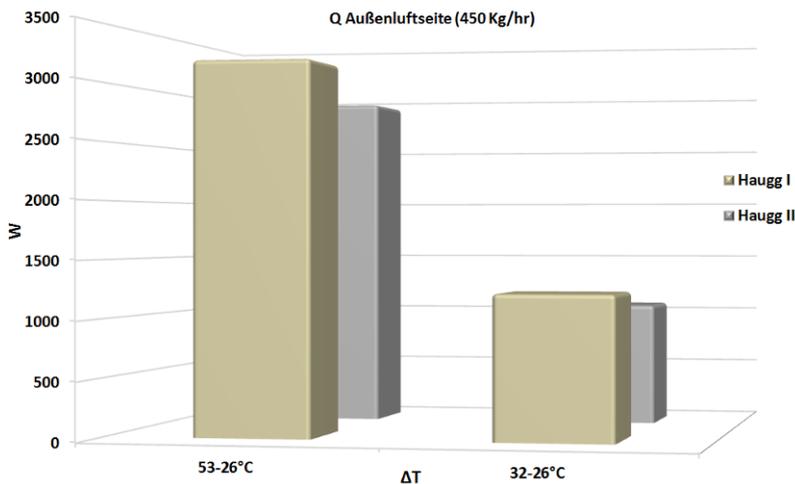
Tabelle 16: Einstellungen Verdunstungskühlung

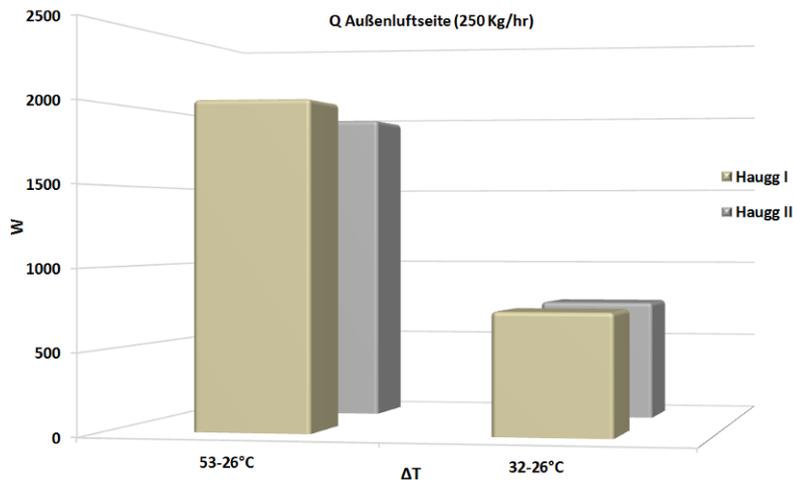
Eingehende Darstellung der wiss./techn. Ergebnisse nach Arbeitspaketen

Einstellungen					
Eingangstemperatur		Massenströme		Absolute Feuchte	
Außenluftseite	Abluftseite	Außenluftseite	Abluftseite	Außenluftseite	Abluftseite
53°C	26°C	450 kg/h	450 kg/h	Umgebung ca. 10-12 g/kg	10 g/Kg
		250 kg/h	250 kg/h	Umgebung ca. 10-12 g/kg	10 g/Kg
32°C	26°C	450 kg/h	450 kg/h	Umgebung ca. 10-12 g/kg	10 g/Kg
		250 kg/h	250 kg/h	Umgebung ca. 10-12 g/kg	10 g/Kg

Die absolute Feuchte der Abluftseite ist jetzt ein Parameter, der geregelt werden muss. Die absolute Feuchte erlaubt die Berechnung der niedrigsten adiabatisch erreichbaren Temperatur der Abluftseite. Diese Temperatur ist nötig um den Wirkungsgrad zu bewerten.

Abbildung 41 zeigt die Wärmeübertragungsleistung beider Wärmeübertrager.





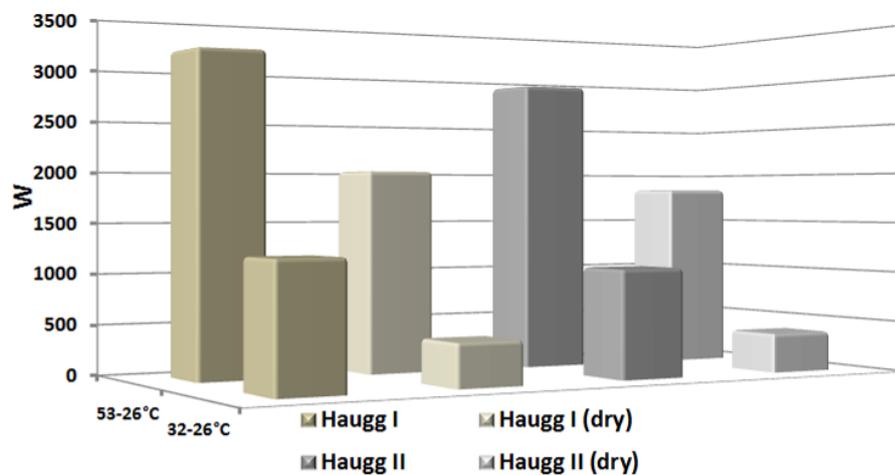
Eingehende Darstellung der wiss./techn. Ergebnisse nach Arbeitspaketen

Abbildung 41: Wärmeübertragungsleistung mit Verdunstungskühlung

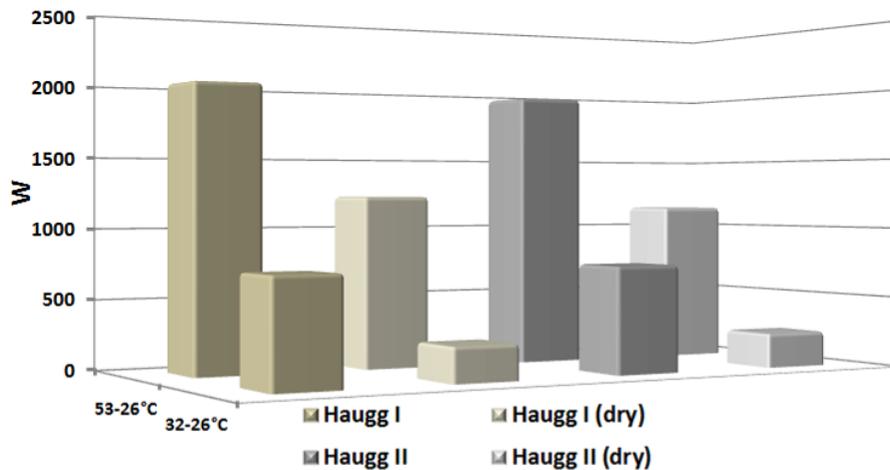
Die Leistung beider Wärmeübertrager ist zumindest im kleinen Massenstrombereich fast identisch, für 450 kg/h zeigt der Haugg I jedoch etwas bessere Ergebnisse.

Abbildung 42 zeigt den Vergleich der Wärmeübertragungsleistung zwischen trockener Wärmeübertragung und indirekter Verdunstungskühlung.

Vergleich Q (450 kg/hr)



Vergleich Q (250 kg/hr)



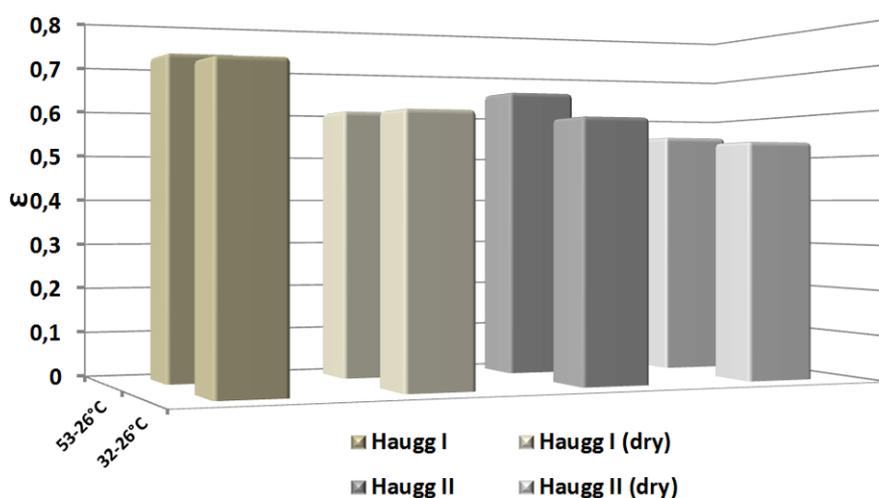
Eingehende Darstellung der wiss./techn. Ergebnisse nach Arbeitspaketen

Abbildung 42: Vergleich der Wärmeübertrager unter trockenen Messbedingungen und mit Sprühbefeuchtung

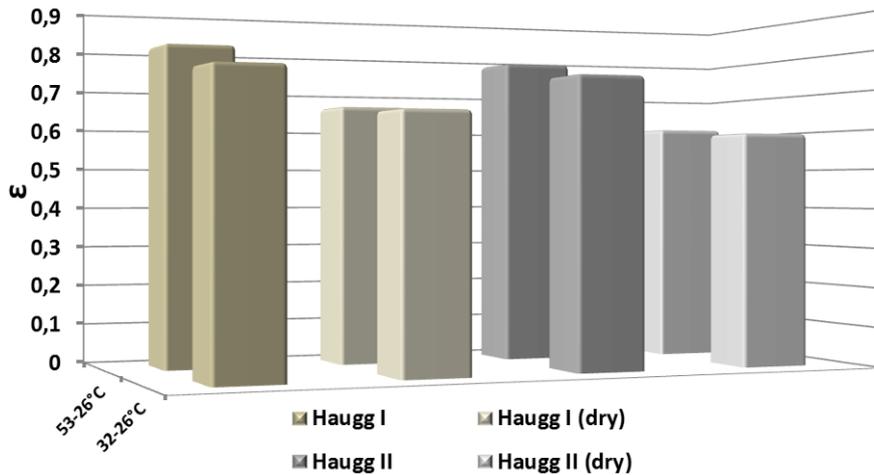
Die Wärmeübertragung ist für alle Messbedingungen mit Verdunstungskühlung höher als bei trockenen Bedingungen. Für das 53-26°C Temperaturintervall ist für beide Massenströme eine Steigerung um 60% erkennbar. Einen besonders großen Einfluss hat die Verdunstungskühlung für das Temperaturintervall 32-26°C, welches den Einsatzbedingungen im SorLuko-System entspricht. Der Anstieg beträgt circa 190%, d.h. die Leistung wird durch die Verdunstungskühlung annähernd verdreifacht.

Der Wirkungsgrad wird durch die indirekte Verdunstungskühlung ebenfalls verbessert.

Wirkungsgrad (ϵ) @ 450 kg/hr



Wirkungsgrad (ϵ) @ 250 kg/hr



Eingehende Darstellung der wiss./techn. Ergebnisse nach Arbeitspaketen

Abbildung 43: Wirkungsgrad Vergleich

Abbildung 43 zeigt den Anstieg des Wirkungsgrades mit indirekter Verdunstungskühlung im Vergleich zu trockenen Messbedingungen. Der Anstieg ist nicht so drastisch wie der Anstieg der Wärmeübertragung, trotzdem kann eine signifikante Verbesserung abgeleitet werden.

Tabelle 17: Übersicht der Messergebnisse

	Massenstrom 450 kg/h					Massenstrom 250 kg/h			
	$\Delta T(^{\circ}C)$	Trocken		Verdunstungskühlung		Trocken		Verdunstungskühlung	
		Q(W)	ϵ	Q(W)	ϵ	Q(W)	ϵ	Q(W)	ϵ
Haugg I	53-26	2014	0,6	3180	0,72	1226	0,66	2014	0,81
	32-26	428	0,59	1225	0,69	249	0,64	744	0,74
Haugg II	53-26	1381	0,55	2907	0,65	1138	0,61	1952	0,78
	32.26	390	0,53	1067	0,58	244	0,59	751	0,73

Zusammenfassend ist festzustellen, dass der Haugg I Wärmeübertrager bei allen Messbedingungen eine bessere Leistung als der zweite Prüfling zeigt. Eine Verbesserung der feuchten Rückkühlleistung durch die geschlitzten Lamellen des Haugg II Wärmeübertragers ist nicht erkennbar. Dieser schneidet sogar bei trockenen und feuchten Messbedingungen schlechter ab. Zur Beschichtung als Funktionsmuster für weitere Tests und zum Einsatz in der Demoanlage wurde daher der Haugg I Wärmeübertrager mit durchgängigen Waschbrettlamellen auf der Rückkühlseite ausgewählt.

Charakterisierung der Entfeuchtungsleistung – Dummy-1

Eingehende Darstellung der wiss./techn. Ergebnisse nach Arbeitspaketen

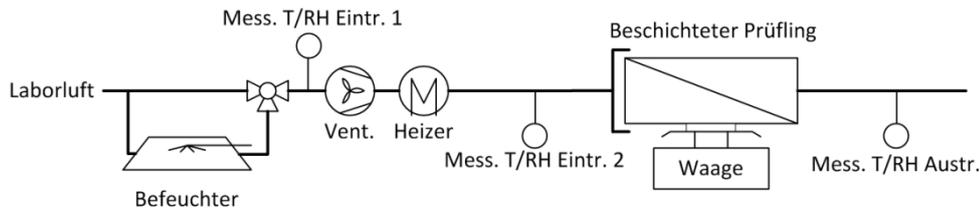
Da wegen des zeitintensiven Upscalings der Beschichtung auf die finale Wärmeübertragergeometrie sich abzeichnete, dass möglicherweise keine Messungen der Entfeuchtungsleistung an einer SorLuko-Beschichtung bis zum Projektende mehr erfolgen können, wurde in einem vereinfachten Messaufbau die Entfeuchtung eines beschichteten Lamellenkanalelements mit reduzierten Abmessungen (Dummy-1) untersucht. Dieses stellt streng genommen keinen Wärmeübertrager dar, da die zweite Kanalseite zur Rückkühlung fehlt, welche wegen der Fokussierung auf die Beschichtungsversuche weggelassen wurde.

Die Daten dieses Lamellenkanalelements sowie die Daten der beiden Wärmeübertragervarianten mit vollen Abmessungen, sowie die daraus hochgerechneten Werte für Adsorbensmasse und Massenverhältnis sind in Tabelle 18 aufgeführt.

Tabelle 18: Beschichtungsspezifische Kenngrößen der 3 Wärmeübertrager (Werte mit Kommentar „ber.“ hochgerechnet aus Werten Dummy-1)

Typ	Platte/Steg – Dummy-1	Platte/Steg – Haugg	Ladeluftkühler
Masse [kg]	2,9	28,1	15,8
Oberfläche [m ²] für Beschichtung	2,46	22,9	24,4
Oberfläche [m ²] für Rückkühlung	-	16,2	14,2
Beschichtungsmasse [kg]	0,54	5,1 (ber.)	5,4 (ber.)
Erreichtes Massenver- hältnis Adsorbens/Metall	0,19	0,18 (ber.)	0,34 (ber.)

Der Messaufbau besteht aus einem Heizelement mit Ventilator, um den benötigten Luftstrom sowie die Desorptionswärme bereitstellen zu können. Für die Adsorption bzw. Entfeuchtung kann ein einfacher Luftbefeuchter, bestehend aus einem befeuchteten Textilkanal, zugeschaltet werden. Das beschichtete Kanalelement befindet sich dabei auf einer Waage, um die Massenänderung durch Feuchteaufnahme bzw. -abgabe aufzeichnen zu können. Die Luftkanalankopplung ist dabei berührungsfrei ausgeführt, um eine Beeinflussung der Wägung zu vermeiden (siehe Abbildung 44).



Eingehende Darstellung der wiss./techn. Ergebnisse nach Arbeitspaketen

Abbildung 44: Schema des Messaufbaus zur Bestimmung der Feuchtaufnahme des beschichteten Lamellenkanalelements

Die Luftzustände werden dabei an den drei Messstellen durch Temperatur- und relative Feuchtefühler erfasst.



Abbildung 45: Messaufbau mit Waage, Dummy-1, Heizelement und Datenerfassung zur Aufzeichnung der Temperatur und Feuchte

Der Luftvolumenstrom durch den beschichteten Dummy wurde auf 20 m³/h eingestellt, was im Verhältnis der Lamellen- bzw. Kanaloberfläche einem Nennvolumenstrom von 200 m³/h des Haugg-WÜ entspricht. Als Desorptionstemperatur wurde 120°C gewählt, was sowohl eine weitgehende Regeneration des Sorptionsmaterials sicherstellt, als auch mit Vakuurröhren Solarluftkollektoren erreichbar ist.

Nach dem Einschalten des Heizelements beginnt die 75-minütige Desorptionsphase. In Abbildung 46 ist deutlich zu erkennen, dass die Austrittsfeuchte sehr stark ansteigt, entsprechend nimmt das Gewichtssignal durch die aus der Sorptionsschicht freigesetzte und mit dem Luftstrom abgeführte Feuchte deutlich ab. Nachdem die Austrittstemperatur ca. 75°C erreicht und das Gewichtssignal asymptotisch einem Gleichgewichtszustand zustrebt, wird die Heizung deaktiviert und somit in die Adsorptionsphase umgeschaltet.

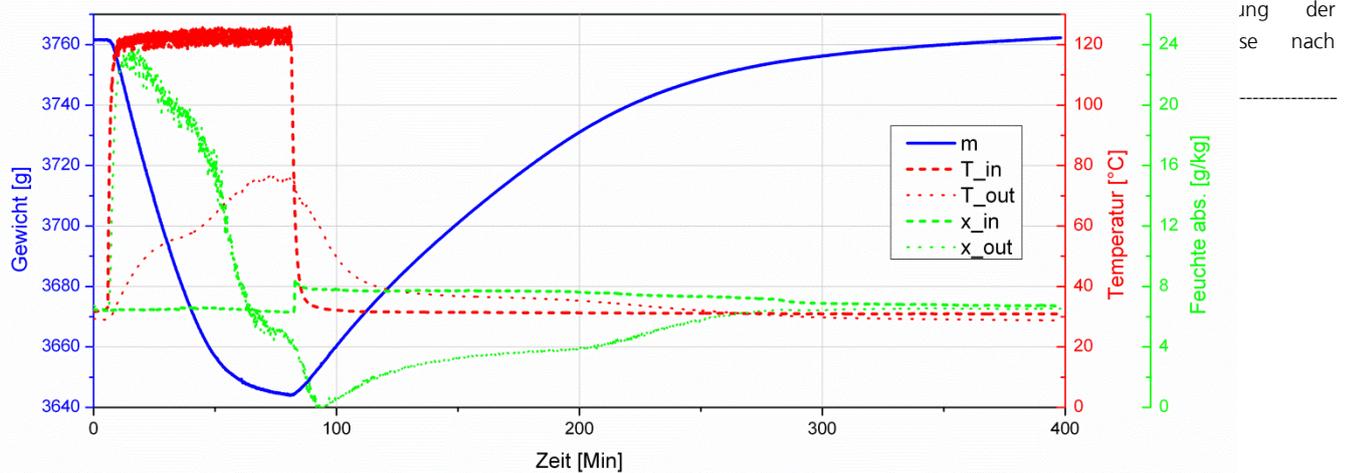


Abbildung 46: Verlauf von Temperatur (rot) und Feuchte (grün) am Eintritt (gestrichelt) und Austritt (gepunktet) des Prüflings. Die blaue Kurve zeigt den Verlauf des Gesamtgewichtes des Prüflings während der Desorption (5-80 Min.) und Adsorption (80-400 Min.).

Während der Adsorptionsphase wird Feuchte aus der zugeführten Luft adsorbiert, was sowohl aus der starken Reduktion der Austrittsfeuchte, als auch aus dem zunehmenden Gewichtssignal erkennbar ist. Die Feuchtereduktion beträgt dabei über einen sehr langen Zeitraum von 100 Minuten ca. 4-6 g/kg Absolutfeuchte. Die Austrittstemperatur liegt im Bereich der hohen Adsorptionsrate und Entfeuchtung über der Eintrittstemperatur, da bei dem Dummy-Aufbau ohne Kühllamellenkanal die Adsorptionswärme vom Luftstrom der sorptiven Seite abgeführt werden muss. Die fehlende Rückkühlung des Adsorptionsprozesses ist auch der ausschlaggebende Grund, dass der Prozess sehr langsam abläuft und mehrere Stunden bis zum Erreichen des Endzustandes benötigt.

Der Wasserumsatz über den gesamten Zyklus beträgt 118 g, was einem Beladungsumsatz des Sorptionsmaterials von 0,23 g/g entspricht, und sehr gut mit den Gleichgewichtsdaten des verwendeten SCT-323 korrespondiert.

3.3.2 Charakterisierung der Luftkollektorleistung

Noch während der Konstruktion des neuen Kollektors wurden experimentelle Tests durchgeführt, um das Strömungsverhalten und Druckverluste des neuen Designs zu überprüfen. Es wurden Druckverlust-Volumenstromkurven aufgenommen. Im Vergleich z.B. zum Sun-Storm Luftkollektor der Firma Kollektorfabrik kann mit dieser Kollektorkonstruktion der Druckverlust um bis zu 90% reduziert werden.

Es wurden auch Nebelversuche durchgeführt. Hierbei wurde die Durchströmungsverteilung der einzelnen Absorberröhren untersucht. Verschiedene Strömungsbleche wurden untersucht. Es sollten damit

unterschiedliche Druckbereiche im Kollektor entstehen, die eine noch optimalere Strömungsverteilung ermöglichen. Aktuell wird der Kollektor ohne diese Bleche betrieben, da sich diese nicht wirtschaftlich zeigten.

Eingehende Darstellung der wiss./techn. Ergebnisse nach Arbeitspaketen



Abbildung 47 Durchströmungstests mit transparenten Prototyp

Für die Charakterisierung der Luftkollektorleistung und Aufnahme der Wirkungsgradkennlinien wurde ein eigener Teststand ausgelegt und aufgebaut. Hier galt es preiswerte Messtechnik bei gleichzeitig zufriedenstellender Genauigkeit auszuwählen. Als erste Abschätzung der Messunsicherheiten und Änderungen der Messgrößen bei verschiedenen Einflüssen, wurde in Excel eine Berechnung nach DIN EN ISO 9806 durchgeführt. Hierbei werden die Änderungen der Wärmeleistung und des Wirkungsgrades bei verschiedenen Temperaturen, Volumenströmen, Einstrahlungen und Luftfeuchten simuliert.

Anhand der hohen Kosten (über 14.000,00 €) für eine exakte Volumenstrommessung, wurden zwei sehr preiswerte Messkreuze bei zwei verschiedenen Aufbauten installiert und miteinander kalibriert.

Nach vielen Anfragen und Angeboten konnte eine Tabelle mit den zu messenden Parametern, zugehörigen Messgeräten, Stromversorgung, Messunsicherheit, Erfassungsgenauigkeit und Preis erstellt werden. Ein weiterer Aspekt lag auf der Auswahl der Regelung und die Verbindung mit der Messtechnik.

Für die Messtechnik wurden folgende Geräte ausgewählt:

Zu messen	Hersteller	Preis	Bemerkung
Umgebungstemperatur	Heinz WTH	15€	Pt 1000
Einstrahlung	Kipp&Zonen CMP3	785€	Preis/Leistung top
Vorlauftemperatur 1	Heinz MWTF	85€	Pt 100

Vorlauftemperatur 2	Heinz MWTF	85€	Pt 100
Wärmetauschertemperatur	Heinz WTH	15€	Pt 1000
Rücklauftemperatur 1	Heinz MWTF	85€	Pt 100
Rücklauftemperatur 2	Heinz MWTF	85€	Pt 100
Rücklaufvolumenstrom1	Halton Messkreuz	180€	Mit Messumformer
Rücklaufvolumenstrom2	Halton Messkreuz	180€	Mit Messumformer
Relative Luftfeuchte	Galltec	Ca.350€	

Eingehende Darstellung der wiss./techn. Ergebnisse nach Arbeitspaketen

Tabelle 3: Messgrößen beim Wirkungsgradkennlinienteststand

Eine Übersicht der zu installierenden Messgeräte zeigt folgendes Bild:

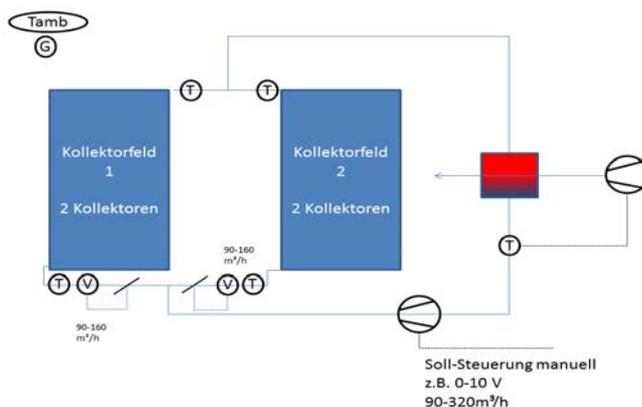


Abbildung 48 Aufbau des Wirkungsgradkennlinienteststands

Die Auswahl der Sensoren aus einer großen Anzahl von Angeboten erfolgte nach hinreichender Abschätzung des jeweiligen Preis/Leistungs-Verhältnis und des größtmöglichen Nutzens unter Berücksichtigung der geforderten Messungenauigkeiten und Toleranzen.

Anhand dieses Messaufbaus können die Leistung sowie der Wirkungsgrad gemessen werden.

Insgesamt sind folgende Messungen für die Leistungsbewertung des neuen Solarluftkollektors notwendig:

- WKL-Messung
- Druckverlustmessung

- Maximaltemperatur
- Fassadenteststand

Eingehende Darstellung der wiss./techn. Ergebnisse nach Arbeitspaketen

Hierbei werden verschiedene Parameter gemessen:

Wärmeleistung, Wirkungsgrade, Druckverlust, Dichtheit, Sicherheit gegen mechanische Belastung, Stagnationstemperatur, Hochtemperaturbeständigkeit und Kollektorzeitkonstante.

Die Druckverlust- und Maximaltemperaturmessung können durch einfache Messtechnikerweiterungen in den WKL-Teststand integriert werden. Für den Test der Eignung des Kollektors in der Fassade ist ein separater Testplatz erforderlich, welcher entweder ohne Messtechnik nur zur Ermittlung von konstruktiven, mechanischen oder montagebezogenen Ergebnissen dient, oder aber mit der Messtechnik des WKL-Teststandes verbunden werden kann.



Abbildung 49 Prototyp installiert auf dem Aussen-Testgelände bei airwasol

Die für die Teststände notwendigen Komponenten wurden während der Projektlaufzeit beschafft und sind einsatzbereit. Eine Messung des ersten Kollektorprototypen war leider wegen der großen Verschattung der Testfläche durch umliegende Gebäude im Herbst/Winter 2013 nicht mehr möglich.

3.3.3 Charakterisierung des Gesamtsystems

Die Demonstrationsanlage lief in den Monaten Juli und August 2013 im Kühlbetrieb, falls die Sonneneinstrahlung einen Anlagenbetrieb ermöglichte.

Die dabei erfassten Messdaten wurden als Tages-Datenfiles abgespeichert und in einer Excelvorlage ausgewertet. Darin wurden sowohl Gesamttagesverläufe, als auch einzelne Zyklen grafisch dargestellt, und die umgesetzten Wärme- und Stoffmengen bilanziert, um daraus Entfeuchtungs-, Kühlleistungs- und Anlageneffizienzwerte abzuleiten.

Im Folgenden sollen exemplarisch die Daten der Messkampagne am 22. August dargestellt werden:

Abbildung 50 zeigt den Tagesverlauf der Prozesslufttemperatur am WÜ Eintritt und Austritt. Es wurden sieben Gesamtzyklen von ca. 90 Minuten bestehend aus Regeneration, Zwischenkühlung und Kühlphase gefahren.

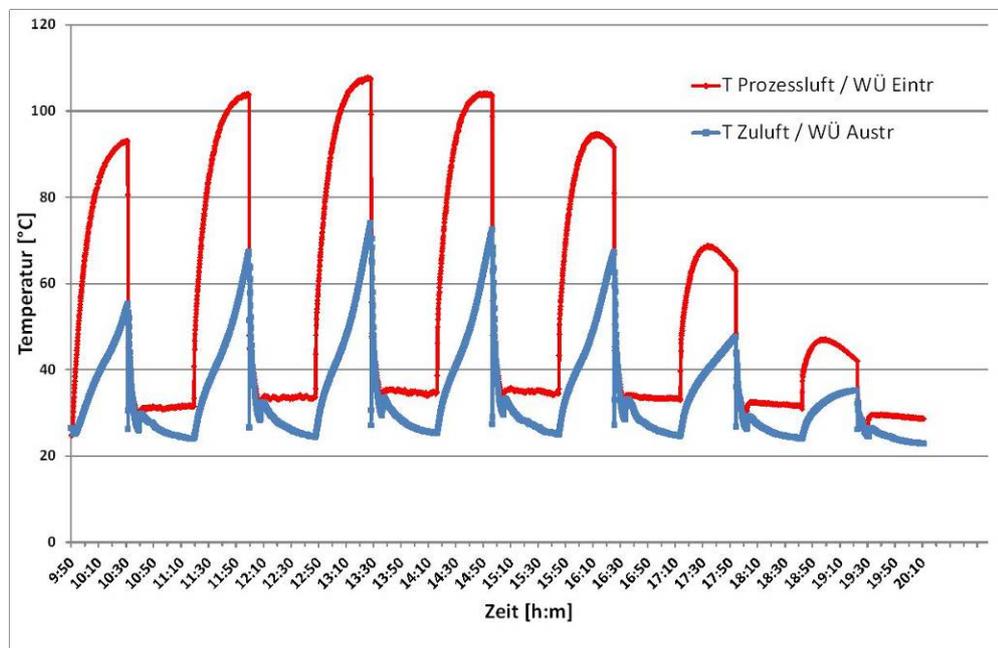


Abbildung 50: Tagesverlauf der Prozesslufttemperaturen am WÜ Ein- und Austritt

Der Verlauf der Maximaltemperaturen in der Desorptionsphase gibt dabei deutlich den Tagesgang der Sonne wieder, der durch die Änderung des Einfallswinkel der Strahlung auf die Kollektorfläche und der Strahlungsintensität die Kollektorleistung und somit die erreichbare Lufttemperatur bedingt. Es konnten über mehrere Zyklen Lufttemperaturen von deutlich über 100°C, gemessen am Wärmeübertragereintritt, erreicht werden. Die Basislinie der Eintrittstemperatur gibt dabei die Außenlufttemperatur wieder, die am Messtag deutlich über 30°C lag, mit Spitzenwerten von ca. 35,5°C. Für die Kühlphase wird in jedem Zyklus eine deutliche Temperaturreduktion erreicht, die Austrittstemperatur (blaue Kurve in Abbildung 50) liegt bis zu 10°C unter der Eintrittstemperatur.

Im Folgenden soll der zweite Zyklus herausgegriffen und genauer dargestellt und bilanziert werden:

Eingehende Darstellung der wiss./techn. Ergebnisse nach Arbeitspaketen

Abbildung 51 zeigt die Lufttemperaturen vor und nach dem WÜ in den drei Abschnitten des Zyklus, Desorption (40 Min.), Zwischenkühlung (8 Min.) und Adsorption bzw. Kühlung (40 Min.).

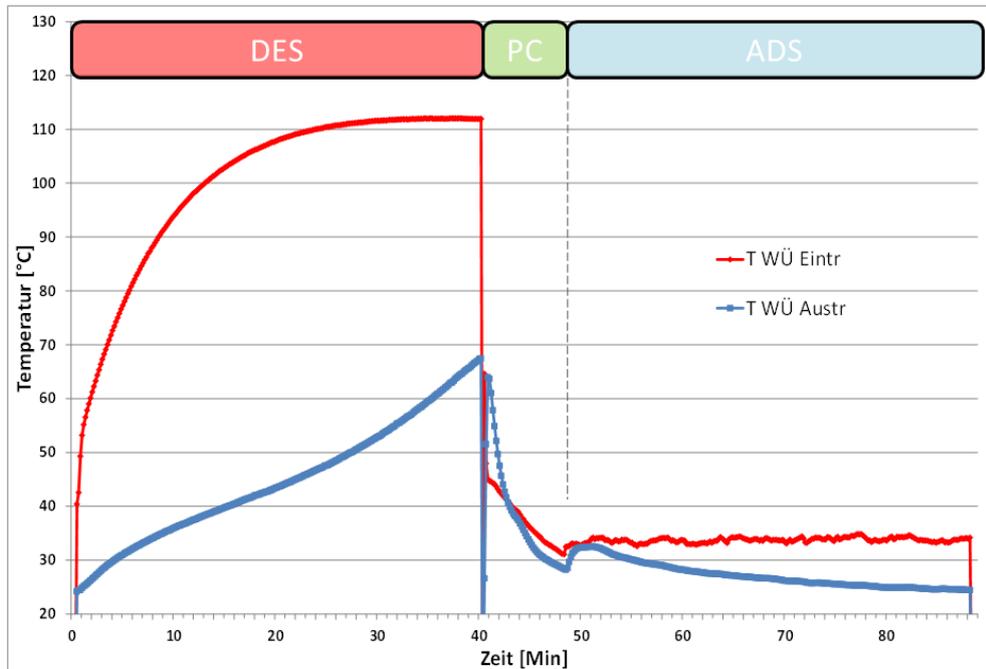


Abbildung 51: Lufttemperaturen am WÜ Ein- und Austritt während eines Messzyklus

Die Eintrittstemperatur steigt während der Desorption kontinuierlich bis zum Erreichen des Maximalwertes von ca. 110°C an. Die Austrittstemperatur folgt dieser Kurve nur mit deutlicher Verzögerung, anfangs überwiegend verursacht von der sensiblen Wärmekapazität des WÜ. Nach ca. 10 Minuten flacht die Austrittstemperaturkurve nochmals etwas ab, hier setzt verstärkt die Desorption des Silikagels des WÜ ein. Nach ca. 30 Minuten ist das Material weitgehend regeneriert, und die Steigung der Kurve nimmt wieder erkennbar zu, gegen Ende der Desorptionsphase werden am Austritt knapp 70°C erreicht.

In der Zwischenkühlphase wird die Kühlseite des WÜ mit Außenluft durchströmt, unterstützt durch die Sprühbefeuchtung. Dadurch wird der WÜ auf ca. 30°C abgekühlt.

In der Adsorptions- bzw. Kühlphase wird nun die Außenluft (Eintritts-T entspricht der roten Kurve) über den sorptiven Kanal geführt und dabei entfeuchtet und durch die über Sprühbefeuchtung gesättigte Abluft im Kühlkanal des WÜ gleichzeitig gekühlt. Der gemessene Verlauf zeigt deutlich, dass sowohl die bei der Entfeuchtung entstehende Adsorptionswärme vollständig abgeführt werden kann, als auch die Zuluft sensibel gekühlt wird.

Gegen Ende der Adsorptionsphase, bei geringerer Entfeuchtungsleistung, kann eine maximale Temperaturabsenkung von ca. 10°C erreicht werden.

Abbildung 52 zeigt die Luftfeuchten vor und nach dem WÜ in den drei Abschnitten des Zyklus.

Eingehende Darstellung der wiss./techn. Ergebnisse nach Arbeitspaketen

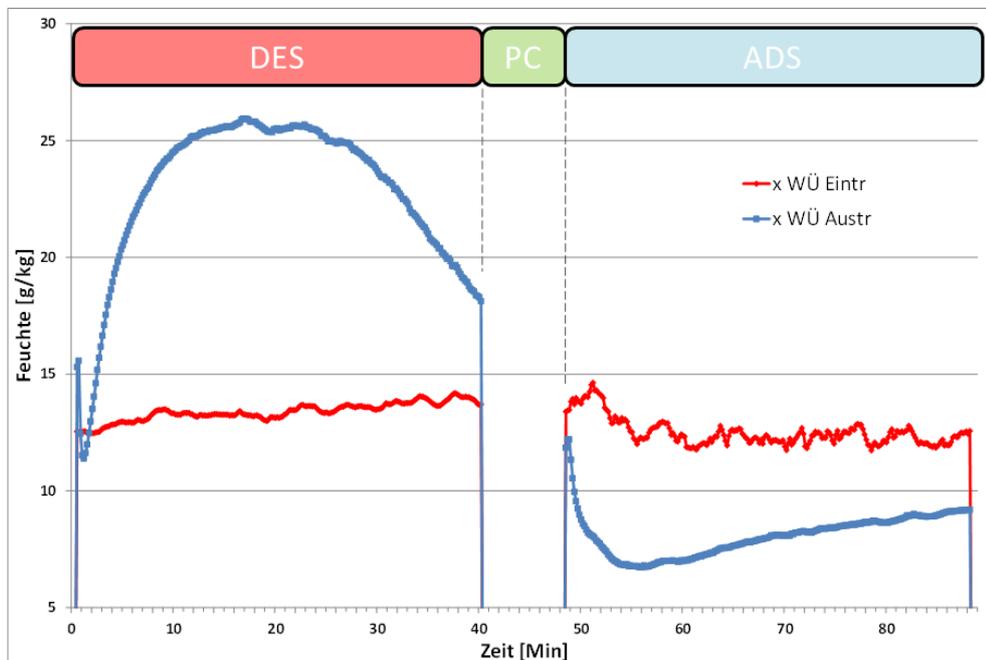


Abbildung 52: Luftfeuchten am WÜ Ein- und Austritt während eines Messzyklus

Sehr deutlich ist die große Menge an ausgetriebenem Wasser aus dem hohen Austrittsfeuchtesignal ersichtlich. Ab ca. 30 Minuten nimmt diese erkennbar ab, d.h. das Silikagel ist weitgehend regeneriert, und es kann in die nächste Phase geschaltet werden.

Während der Zwischenkühlphase wird der sorptive Kanal nur auf kürzestem Weg in Umluft gefahren und überstreicht dabei keinen Feuchtesensor, weshalb für diesen Abschnitt keine Feuchtemesswerte vorliegen.

Nach Beginn der Adsorptionsphase nimmt die Austrittsfeuchte stark ab, auf Werte von ca. 7 g/kg. Je mehr das Silikagel dadurch gesättigt wird, desto geringer fällt die Entfeuchtungsleistung aus. Diese ist aber trotzdem auch am Ende des Zyklus mit über 3 g/kg noch in einem anwendungsrelevanten Bereich.

Tabelle 19: Messergebnisse des Zyklus

Bilanzparameter:	Wert:
Mittl. Volumenstrom Desorption [m ³ /h]:	168
Mittl. Volumenstrom Zwischenkühlung [m ³ /h]:	545
Mittl. Volumenstrom Adsorption [m ³ /h]:	354
Mittlere Entfeuchtungsleistung (Ads. Phase) [g/kg]:	4,4
Mittlere Temperaturabsenkung (Ads. Phase) [°C]:	6,5
Entfeuchtungsleistung / Kühlleistung latent [kW]:	1,24
Kühlleistung sensibel [kW]:	0,77
Thermischer Wirkungsgrad / COP:	0,65

Eingehende Darstellung der wiss./techn. Ergebnisse nach Arbeitspaketen

Neben einer hohen Entfeuchtungsleistung von 4,4 g/kg konnte ebenso eine gute mittlere Temperaturabsenkung von 6,5 °C erreicht werden. Die Gesamtkühlleistung des Systems, welche sich aus sensibler Temperaturabsenkung und latenter Kühlung bzw. Entfeuchtung zusammensetzt, belief sich auf 2 kW. Diese Werte wurden für die Kühlphase bilanziert, da davon ausgegangen wurde, dass für einen kontinuierlichen Betrieb üblicherweise eine Anlage mit zwei antizyklisch arbeitenden WÜ zum Einsatz kommt.

Der Luftvolumenstrom in der Desorptionsphase war durch die Verwendung des Kollektor-Backups vom Modell „Sunstorm“ aufgrund des hohen Druckverlustes auch bei voller Lüfterleistung auf den gemessenen Wert limitiert. Neben der entsprechend längeren Zeitdauer, welche für die Desorption aufgrund des geringen Volumenstroms angesetzt werden musste, hatte dies den Nebeneffekt, dass die Austrittstemperatur über lange Zeit auf sehr niedrigem Niveau gehalten wurde. Das bedeutet, die eingesetzte Wärme des Kollektors wurde sehr effizient für die Desorption verwendet, was sich in dem sehr guten thermischen Wirkungsgrad von 0,65 widerspiegelt.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Messergebnisse der Demoanlage sehr zufriedenstellend ausfielen, und die Erwartungen hinsichtlich Entfeuchtungs- und Kühlleistung sowie COP deutlich übertrafen.

3.4 AP 4: Aufbau System

Eingehende Darstellung der wiss./techn. Ergebnisse nach Arbeitspaketen

Zur Demonstration der Performance und Funktionsfähigkeit des Konzepts der Zuluftentfeuchtung und Kühlung mittels Solarluftkollektoren und sorptivem Wärmeübertrager wurde ein Demonstrationssystem aufgebaut. Als Standort des Systems wurde das Technikum des Projektpartners airwasol gewählt, da dort sowohl eine Aufstellmöglichkeit für das Kollektorfeld, als auch mit dem Technikum ein geeigneter Raum zur Aufstellung der Anlage und zur Demonstration der Lüftungs- und Entfeuchtungsfunktion vorhanden war. Weiterhin ermöglichte die räumliche Nähe zum Fraunhofer ISE und dem Firmengebäude der airwasol eine kontinuierliche Betreuung der Anlage, sowohl während des Aufbaus, als auch während des Betriebs.

Für den Aufbau der Anlage arbeiteten alle Partner zusammen an deren Realisierung, zusätzlich wurde die Anfertigung des Lüftungsgerätes im Unterauftrag an die Firma PSE vergeben, welche bereits ein ähnliches Gerät für das Forschungszentrum SERIS in Singapur gefertigt hatte. PSE übernahm ebenso die Auslegung und Dimensionierung der übrigen Bauteile der Anlage, wie Lüfter, Klappen, Filter und Rohrleitungen, sowie den Aufbau der Steuerungs- und Messtechnik. Für die Konfiguration der Datenerfassung und Programmierung der Anlagensteuerung wurde die Firma Christian Reetz per Unterauftrag eingebunden.

Aufbau der Anlagenkomponenten

Zur sicheren Befestigung der Rohrleitungen im Gebäude wurde ein Gestell entworfen und aufgebaut. Die Instabilität der abgehängten Decke veranlasste eine Befestigung des Gestells an der Wand. Nach mehreren Angeboten unter anderem von Hilti, Mez-Technik und Item fiel die Entscheidung anhand des besten Preis/Leistungs-Verhältnisses für das Schienensystem von Müpro.



Abbildung 53: Gestell für die Verrohrung im airwasol-Technikum

Auf der für das Projekt angemieteten Parkplatzfläche vor dem „airwasol-Technikum“ entstand ein Gestell für die Montage der Solarluftkollektoren.

Hierbei wurde das Gelände in sinnvolle Flächen (Kollektoren für Demoanlage und Charakterisierung (WKL-Teststand), T_max-Teststand und Fassadenteststand) unterteilt.

Eingehende Darstellung der wiss./techn. Ergebnisse nach Arbeitspaketen



Abbildung 54: Aufbau der Rohreinlässe

Nach der Lieferung des Lüftungsgerätes und Fertigstellung der Montagegestelle konnte mit dem Installieren der Komponenten und Rohrleitungen begonnen werden.

Die Schaltschränke wurden so aufgestellt, dass alle Abstände zu den Sensoren in etwa gleich weit entfernt sind. Die Rohrstücke, welche die Messsensoren für Volumenstrom, Feuchte und Temperatur beinhalten, wurden demontierbar gefertigt, und als ganze Bauteile am Fraunhofer ISE im Prüfzentrum für thermische Solaranlagen (PZTS) kalibriert.

Nachdem alle Sensoren montiert waren, und die Verrohrung einem Dichtheitstest mit einer Nebelmaschine unterzogen worden war, konnte die Firma Contherm die Rohrleitungen mit dem Hochleistungsdämmstoff MPH-1000, welcher speziell als per Rohrabwicklung angefertigte Alu-kaschierte Einzelsegmente konfektioniert wurde, gegen Wärmeverluste dämmen.

Auf dem Parkplatz wurde auf ebener Fläche vorerst die Kollektoren von der Firma Kollektorfabrik aufgebaut, da zu diesem Zeitpunkt die Entwicklung des neuen Kollektors noch nicht abgeschlossen war. Zum Abschluss wurden die Kollektoren mit dem Demonstrationssystem im Inneren verbunden und isoliert.

Nach der Montage eines zunächst unbeschichteten Wärmeübertragers war die Anlage für die ersten Funktionstests im März 2013 einsatzbereit.



Abbildung 55: Der Teststand nach Fertigstellung

Zunächst wurden sämtliche Sensoren und Aktoren überprüft, und dann ein einfaches Regelkonzept zur Raumbeheizung, bei der die Zulufttemperatur über eine Mischklappe aus Außen- und Kollektorluft eingestellt wird, umgesetzt.

Nach der Montage des Silikagel-beschichteten Wärmeübertragers im Juni 2013 konnte dann der eigentliche Messbetrieb mit Kühl- und Entfeuchtungsfunktion starten (siehe Abschnitt 3.3.2).

Nach einigen Optimierungen an der Bedüsung der Sprühbefeuchtung wurde eine gute Rückkühlung und damit Temperaturabsenkung der Zuluft erreicht. Im Laufe des Betriebs wurde das Steuerungsprogramm in Kooperation mit Christian Reetz weiter optimiert, und auch ein browserbasiertes Online-Anlagenschema umgesetzt, welches den Anlagenzustand über Schaltstellungen und Lüfterfunktion sowie die Messwerte Temperatur, Feuchte und Volumenstrom an den jeweiligen Messpunkten in Echtzeit darstellt (siehe Abbildung 56).

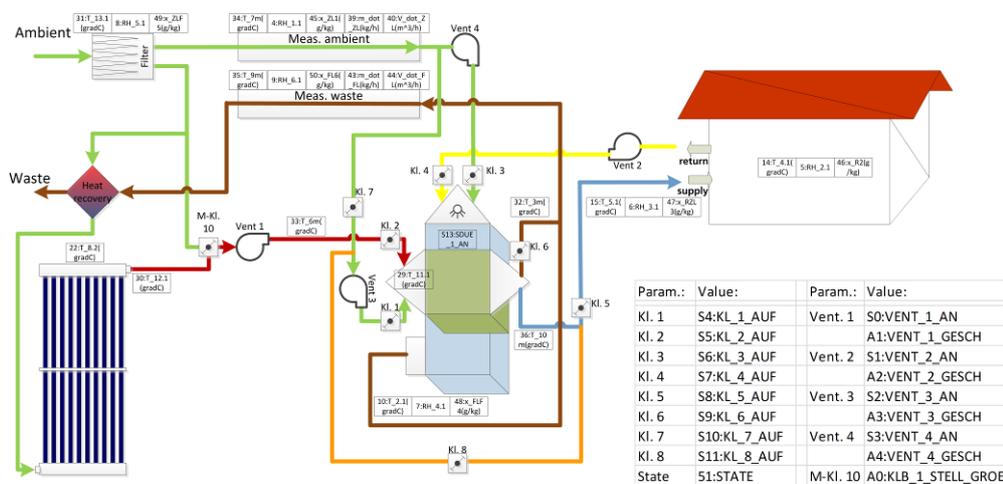


Abbildung 56: Vorlage der Online-Visualisierung: Anlagenschema mit Zuordnung der Messwerte und Aktoren

Mit den zahlreichen Sensoren und Messstellen konnte sichergestellt werden, dass die Luftzustände in sämtlichen Betriebszuständen kontinuierlich erfasst werden, um eine Auswertung und Bilanzierung der Ergebnisse mit hoher Genauigkeit sicherzustellen (siehe auch Abschnitt 3.3.3).

Eingehende Darstellung der wiss./techn. Ergebnisse nach Arbeitspaketen

Tabelle 20 gibt eine Übersicht sämtlicher Sensoren der Demoanlage mit Hersteller und Typ des verwendeten Sensors in Tabellenform wieder.

Tabelle 20: Sensorliste der Demonstrationsanlage

Sensor/Aktor	Kurz-Bez.	Kap.	Lieferant / Hersteller:	Typ:
Absolutdruck	P 1	.1	Halstrup-Walcher	BA 1000
Absolutdruck	P 2	.1	Halstrup-Walcher	BA 1000
Temperatur	T 1	.1		Schwarzkugel
Temperatur	T 2	.1	Heinz	PT100 1,6 mm m. Anschlussdose
Temperatur	T 3	.1	Heinz	PT100 1,6 mm m. Anschlussdose
Temperatur	T 3	.2	Heinz	PT100 1,6 mm m. Anschlussdose
Temperatur	T 3	.3	Heinz	PT100 1,6 mm m. Anschlussdose
Temperatur	T 4	.1	Heinz	PT100 1,6 mm m. Anschlussdose
Temperatur	T 5	.1	Heinz	PT100 1,6 mm m. Anschlussdose
Temperatur	T 6	.1	Heinz	PT100 1,6 mm m. Anschlussdose
Temperatur	T 6	.2	Heinz	PT100 1,6 mm m. Anschlussdose
Temperatur	T 6	.3	Heinz	PT100 1,6 mm m. Anschlussdose
Temperatur	T 7	.1	Heinz	PT100 1,6 mm m. Anschlussdose
Temperatur	T 7	.2	Heinz	PT100 1,6 mm m. Anschlussdose
Temperatur	T 7	.3	Heinz	PT100 1,6 mm m. Anschlussdose
Temperatur	T 8	.1	n. b.	PT1000
Temperatur	T 9	.1	Heinz	PT100 1,6 mm m. Anschlussdose
Temperatur	T 9	.2	Heinz	PT100 1,6 mm m. Anschlussdose
Temperatur	T 9	.3	Heinz	PT100 1,6 mm m. Anschlussdose
Temperatur	T 10	.1	Heinz	PT100 1,6 mm m. Anschlussdose
Temperatur	T 10	.2	Heinz	PT100 1,6 mm m. Anschlussdose
Temperatur	T 10	.3	Heinz	PT100 1,6 mm m. Anschlussdose
Temperatur	T 11	.1	Heinz	PT100 1,6 mm m. Anschlussdose
Temperatur	T 12	.1		Reserve Temperaturmesspunkt
Temperatur	T 13	.1	Heinz	PT100 , Kopfform J
rel. Feuchte, kapazitiv	RH 1	.1	Fuehlersysteme	Pendelfuehler RRF(PH)-A
rel. Feuchte, kapazitiv	RH 2	.1	Fuehlersysteme	Pendelfuehler RRF(P)/-A
rel. Feuchte, kapazitiv	RH 3	.1	Fuehlersysteme	Pendelfuehler RRF(PH)-A
rel. Feuchte, kapazitiv	RH 4	.1	Fuehlersysteme	Pendelfuehler RRF(P)/-A
rel. Feuchte, kapazitiv	RH 5	.1	Fuehlersysteme	Pendelfuehler RRF(P)/-A
rel. Feuchte, kapazitiv	RH 6	.1	Rotronic	Transmitter: HF535-WBA3X5XX & Sensor: HC2-IC302
Differenzdruck f. Volumenstrom	V 1	.1	Airflow	Druckmessumformer PTSXR
Volumenstromsensoren	V 1	.2	Halton	MSD-160
Differenzdruck f. Volumenstrom	V 2	.1	Airflow	Druckmessumformer PTSXR
Volumenstromsensoren	V 2	.2	Halton	MSD-160

Für die Durchführung einer Messung und Start des Anlagenbetriebs konnte über die Netzwerkanbindung der Anlage die Konfiguration (Zyklusanzahl, Dauer der Einzelphasen, Lüfterdrehzahl etc.) auch vom Fraunhofer ISE aus den Tagesumständen angepasst, und der Kühlbetrieb gestartet werden. Die Messkampagne wurde dann automatisch durchgeführt, und die Anlage schaltete nach Beendigung in einen Stand-by Modus, d.h. alle Klappen wurden geschlossen und die Lüfter gestoppt.

Die Anlage lief im Probetrieb zuverlässig und störungsfrei. Auch die Messdatenerfassung und die Automatisierung waren für den Zweck einer Demoanlage mehr als zufriedenstellend.

3.5 AP 5: Projektcontrolling und Ergebnistransfer

Eingehende Darstellung der
wiss./techn. Ergebnisse nach
Arbeitspaketen

3.5.1 Zwischenberichte

Im Projektverlauf wurden im Juni 2012 Zwischenberichte abgegeben, welche partnerspezifisch von jedem Projektpartner für seine Arbeitspakete angefertigt wurden.

3.5.2 Projektcontrolling

Das Projektcontrolling lag in der Hand des Konsortialleiters Fraunhofer ISE. Dieses beinhaltete neben dem Abgleich der zeitlichen Planung mit dem Arbeitsstand auch die Überwachung der Meilensteine sowie die Kommunikation zwischen den Partnern und dem Projektträger.

Weiterhin wurden auch mehrere Projekttreffen sowie ein Abschlusstreffen geplant und durchgeführt. Diese fanden im Dez. 2011 bei Contherm in Neuenstein, Juni 2012, Februar 2013 und November 2013 bei airwasol in Gundelfingen statt.

3.5.3 Ergebnistransfer

Die Ergebnisse des Projektes wurden von den Partnern auf mehreren Tagungen und Konferenzen vorgestellt. Eine vollständige Liste der Veröffentlichungen befindet sich in Abschnitt 6.

Darüber hinaus ist ein Artikel zu den Arbeiten am Wärmeübertrager, dessen Beschichtung und der Charakterisierung der Entfeuchtungsleistung im reviewed Journal „Applied Thermal Engineering“ 2013 erschienen, der Titel ist „FIRST RESULTS OF A COATED HEAT EXCHANGER FOR THE USE IN DEHUMIDIFICATION AND COOLING PROCESSES“.

Die Demoanlage wurde an zwei Terminen dem interessierten Fachpublikum vorgestellt: Die solare Kühl- und Entfeuchtungsanlage des SorLuko Projekts war eine Station der Technical Tour der „International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry“, welche vom 23. bis 25. September in Freiburg stattfand.

Weiterhin wurde die Anlage im Rahmen der International DAAD-Alumni Summer School „Sustainable Provision of rural renewable energy with focus on financially viable solutions in developing countries“, veranstaltet von der Uni Hohenheim im November 2013, präsentiert.

Bei beiden Terminen fand die Anlage sowie die Technologien des Vakuumröhren-Solarluftkollektors und sorptive Zuluftentfeuchtung und Kühlung großen Zuspruch bei den Besuchern. Es wurden viele Fragen zur Funktion, Verfügbarkeit der Komponenten und Einsetzbarkeit bei konkreten Kühl- und Klimatisierungsaufgaben gestellt und von den Projektpartnern kompetent beantwortet. Bei beiden Veranstaltungen waren die Teilnehmer

gegen Ende sichtlich enttäuscht, dass sie der enge Zeitplan bereits wieder in den Bus und zur nächsten Station ihrer Tour zwang.

Eingehende Darstellung der wiss./techn. Ergebnisse nach Arbeitspaketen



Abbildung 57: Präsentation der Demoanlage bei der DAAD-Alumni Summer School

Für die Teilnehmer der Summer School war das Thema der solar angetriebenen Kühlung und Entfeuchtung umso spannender, als die Teilnehmer überwiegend aus Schwellen- und Entwicklungsländern kamen. Entsprechend viele von ihnen leben somit in Regionen, wo sowohl hohe solare Einstrahlung zum Betrieb der Anlage zur Verfügung steht, als auch die klimatischen Bedingungen Zuluftkühlung und Entfeuchtung zwingend notwendig machen.

4.1 Projektablauf

Start und Ablauf des Projektes SorLuko waren Ereignissen unterworfen, welche die anfänglichen Planungen, insbesondere die Zeit- und Ablaufplanung, als nicht mehr umsetzbar darstellte und somit Änderungen erforderte.

Vor Projektstart konnte der geplante Projektpartner Haugg die KMU-Kriterien im antragsrelevanten Berechnungszeitraum nicht erfüllen, dann aber im Unterauftrag zwei vakuumgelötete Wärmeübertrager für die Beschichtung zur Verfügung stellen.

Entgegen der ursprüngliche Planung mit einem Projektstart im Juni 2010 konnte der Zuwendungsbescheid erst zum 15. Sept. 2011 erfolgen. Der geänderte Starttermin mit geplantem Projektabschluss zum 15. März 2013 führte zu Komplikationen in der zeitlichen Verzahnung der Arbeiten, insbesondere der Demonstration des Gesamtsystems. Der Funktionsnachweis der Demoanlage ist nur im Sommerhalbjahr bei entsprechenden solaren Einstrahlungswerten und klimatischen Bedingungen möglich, und musste auf einen frühen Zeitpunkt nach weniger als einem Jahr Laufzeit vorgezogen werden.

Zum Jahreswechsel 2011/2012 wurde die Firma airwasol aus der bisherigen SorLuko-Partnerfirma Kollektorfabrik ausgegründet und übernahm die Arbeiten gemäß Vorhabensbeschreibung.

Den geänderten Umständen wurde durch eine kostenneutrale Verlängerung um ca. sechs Monate, wie mit dem Änderungsbescheid vom 24.07.2012 umgesetzt, Rechnung getragen.

4.2 M1 Fertigstellung Fassadenkollektor für Systemtests

Der Meilenstein 1 war für das 5. Projektquartal vorgesehen. Durch die Ausgründung von airwasol wurden die Entwicklungsarbeiten des Kollektors (siehe Abschnitt 3.1) etwas verzögert, so dass zum Projekttreffen am 15. Februar 2013 diskutiert wurde, auf die Fallbacklösung des Sunstorm-Kollektors zurückzugreifen. Dies wurde Mitte März in Angriff genommen, so dass ab dem 21. März 2013 ein Solarkollektor zum thermischen Antrieb des Demosystems zur Verfügung stand, welcher für Inbetriebnahme, Tests und Kühlbetrieb genutzt werden kann.

4.3 M2 Funktionsmuster sorptiver Wärmeübertrager fertiggestellt

Der Meilenstein 2 war für das 5. Projektquartal vorgesehen. Wie bereits in der Vorhabensbeschreibung angedeutet, gestalteten sich die Arbeiten zum Upscaling des Beschichtungsverfahrens als äußerst problematisch. Die Eigenschaften der Beschichtungssuspension, insbesondere der Viskosität, Benetzungs- und Trocknungsverhalten, zeigten sich in keinem der Vergrößerungsschritte als vom Laboransatz skalierbar und somit planbar, was einen erheblichen Zeit- und Materialaufwand bei jedem Vergrößerungsschritt zur Folge hatte, um die jeweils geeigneten Parameter wie Mischungsverhältnisse, Bearbeitungsweise und -dauer zu finden (siehe Abschnitt 3.2.1 und 3.2.3).

Daher wurde für Systemtests, nachdem ein Kollektor zum Antrieb verfügbar war, ein Wärmeübertrager nach Stand der Technik als Fall-Back-Variante verwendet. Dieser durch ein Klebeverfahren mit Silikagel beschichtete Platten-WÜ wurde am 26. Juni 2013 gegen den bislang montierten unbeschichteten Haugg Wärmeübertrager ausgetauscht, sodass ab Ende Juni neben dem Heiz- auch Enfeuchtungs- und Kühlbetrieb an der Demoanlage bei airwasol möglich war.

4.4 M3 Funktionsnachweis des Gesamtsystems und der Einzelkomponenten

Dieser Meilenstein war für das Projektende im 6. Projektquartal vorgesehen.

Der Funktionsnachweis des Gesamtsystems wurde in einer Messkampagne im Juli 2013 erbracht (siehe Abschnitt 3.3.3), die erreichte Entfeuchtungsleistung wurde bei einem Volumenstrom von 354 m³/h mit 4,4 g/kg bzw. 5,1 g/m³ ermittelt, was aufgrund des annähernd verdoppelten Luftvolumenstroms die Absolutentfeuchtung der Zielvorgabe 5 g/m³ bei 200 m³/h deutlich übertrifft. Die gesamte Kühlleistung der Anlage im Adsorptionsmodus beläuft sich auf 2 kW, welche sich auf 1,24 kW für die Entfeuchtung und 0,77 kW für sensible Abkühlung der Luft aufteilen.

4.5 M4 Endbericht und Projektabschluss erfolgreich

Der vorliegende Endbericht markiert den Abschluss des Konsortialvorhabens SorLuko.

Die gesetzten Ziele konnten, wie im diesem Abschnitt bereits dargelegt, alle erreicht werden. Zeitliche Verschiebungen und für Entwicklungsschritte typische unvorhergesehene Probleme zwangen teilweise dazu, auf Backup-Lösungen zurückzugreifen. Der zentrale Meilenstein 3 mit dem

Funktionsnachweis des Gesamtsystems war dadurch aber zu keiner Zeit gefährdet.

Die sehr guten Ergebnisse der Demonstrationsanlage hinsichtlich Entfeuchtungs- und Kühlleistung sowie Energieeffizienz des Prozesses fielen selbst im harten realen Outdoor-Messbetrieb besser aus, als in den optimistischeren Abschätzungen erwartet.

Die Entwicklungen der zentralen Komponenten des Systems, Vakuumröhren-Solarluftkollektor und sorptiver Wärmeübertrager, konnten durch die gemeinsame Arbeit der Konsortialpartner einen deutlichen Schritt in Richtung Serienproduktion absolvieren.

Somit wird der Projektabschluss von allen Partnern als sehr erfolgreich eingeschätzt.

5 Verwertungsplan der erzielten Ergebnisse

5.1 Erfindungen / Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte

Die Arbeiten der Partner im Konsortialprojekt SorLuko hatten ihren Schwerpunkt auf (verfahrens-)technischen Umsetzungen, wie beispielsweise der Beschichtungstechnik, sowie der Demonstration eines Klimatisierungsverfahrens, und waren nicht grundlagenorientiert.

Von den Partnern wurde während der Laufzeit keine Schutzrechtsanmeldung im Zusammenhang mit den Arbeiten des Konsortialprojektes beantragt.

5.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Die beteiligten Partner konnten bereits gegen Projektende oder kurz nach Abschluss desselben das neu entwickelte Produkt bzw. Komponenten und erworbenes Know-how gewinnbringend vermarkten. So hat die Firma airwasol im November 2013 auf der italienischen Insel Pantelleria den neu entwickelten TST-Kollektor mit neuem Design und Durchgangsabsorberröhren an einem Ferienhaus installiert. Der Kollektor ist dort Teil eines solaren Lüftungssystems zum Lüften und Trocknen des Ferienhauses mit warmer Luft während der Abwesenheit der Eigentümer.



Abbildung 58: Kollektoranlage mit neuem TST-Kollektor der Firma airwasol installiert auf Pantelleria

Abbildung 58 zeigt den Kollektor, welcher an der Fassade des Gebäudes bzw. der Terasse installiert wurde. Der Kollektor fügt sich auch auf diesem mediterranen Gebäude harmonisch in das Gesamtbild ein. Durch die deutliche Reduzierung des Druckverlustes durch das neue Kollektordesign ist ein 35 W Solarpanel (siehe Abbildung 59) mehr als ausreichend, um den Ventilator zu betreiben und die Lüftungs- und Trocknungsfunktion vollständig solarautark bereitzustellen.



Abbildung 59: Kollektoranlage der Firma airwasol auf Pantelleria, Schrägansicht

Auch die Firma Contherm konnte durch ihr im Projektverlauf erarbeitetes Know-how bereits Folgeaufträge generieren:

- Die für die Rohrisolation entwickelten 2D-Abwicklungen für Zuschnitt und Konfektionierung von Dämmelementen für unterschiedlichste Geometrien konnte gewinnbringend für die Behälterisolierung eingesetzt werden. Die Dämmung von Aluminium Transportziegeln mit der hydrophoben, mikroporösen Dämmplatte ist ein Alleinstellungsmerkmal von Contherm und eines der wichtigsten Geschäftsfelder des Unternehmens.
- Durch die Arbeiten zu Beschichtbarkeit des hydrophoben Plattenmaterials konnten diverse Aufträge für beschichtetes Plattenmaterial mit Gewebe, Vlies und Folien generiert werden.
- Im Bereich der Rohrisolation mit MPH Hochleistungsämmstoff konnten aufgrund der hervorragenden Materialeigenschaften und des Know-how von Contherm zur Konfektionierung der Dämmelemente und Verarbeiten des Werkstoffes Aufträge von DLR und Siemens gewonnen werden. Für Anwendungen, bei denen die Temperaturfestigkeit des Werkstoffes sowie die hohe Dämmwirkung und damit bei gleicher Dämmleistung geringere

Dämmstärke eine entscheidende Rolle spielen, kann sich das etwas teurere Material trotz aufwändigerer Verarbeitung gegen Materialien wie Steinwolle durchsetzen.

- Es konnte ein Großauftrag für beschichtete Platten für den Abgaskanal der neuen Kokerei HKM in Duisburg gewonnen werden.

5.3 Wissenschaftliche und / oder technische Erfolgsaussichten

Für den neu entwickelten TST-Kollektor ergeben sich vielversprechende Anwendungsmöglichkeiten. Das neue Design ist optimal auf die Fassadenintegration und Installation an der Fassade angepasst, was diesem deutliche Vorteile gegenüber Konkurrenzprodukten auf dem Markt für Fassadenanwendungen verschafft. Mit dem Design der Durchgangsröhre wurde der bislang größte Nachteil des Vakuumröhren-Solarluftkollektors, z.B. nach Bauart „Sunstorm“ der Kollektorfabrik, nämlich der hohe Druckverlust und damit hoher Stromverbrauch für die Ventilatoren zur Durchströmung des Kollektors, überwunden. Die hohen erreichbaren Lufttemperaturen sowie der hohe Kollektorwirkungsgrad eröffnen dabei eine Vielzahl von solarautarken und solar unterstützten Anwendungen im Bereich der Heizung, Luftvorwärmung, Trocknung sowie Antrieb thermischer Prozesse.

Das Fraunhofer ISE konnte sich mit der Entwicklung und dem Upscaling der Beschichtungstechnologie auf reale Wärmeübertragergeometrien im Projekt SorLuko einen wichtigen Grundstein zur Realisierung weiterer Projekte und Anwendungsmöglichkeiten erarbeiten. Die Beschichtung kann mit kleineren Modifikationen auch auf geschlossene Adsorptions-Wärmepumpen und – Kältemaschinen übertragen werden, und ist prinzipiell auch für Adsorptionsspeicheranwendungen einsetzbar.

5.4 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Im Laufe des Forschungsprojektes SorLuko wurden die wichtigsten Komponenten des solar-sorptiven Klimalüftungssystems auf die vorgegebenen Randbedingungen angepasst bzw. neu entwickelt. Als Kernkomponenten sind hier der Vakuumröhren-Solarluftkollektor mit den durchgängigen Vakuumabsorberröhren und der verbesserten Headerdämmung sowie der dicht gelötete Wärmeübertrager und die sorptive Beschichtung desselben zu nennen. Die Funktionsfähigkeit und Leistungsdaten der Anlage wurden mit dem Betrieb der Demonstrationsanlage unter Beweis gestellt. Mit der Anlage konnte eine solar-sorptiv generierte Kälteleistung von 2 kW demonstriert werden. Das Forschungsprojekt legte damit die Basis für eine noch zu leistende Folgeentwicklung zur Integration und Kompaktierung der Komponenten in ein Lüftungsgerät und Weiterentwicklung zur Serienreife inklusive Entwicklung

einer Regelungssoft- und –hardware. Für diese Arbeiten wird nach Ablauf des Projektes SorLuko noch ein Partner, bevorzugt aus dem Bereich der Lüftungsgeräte, gesucht.

Verwertungsplan der erzielten
Ergebnisse

6 Liste der Veröffentlichungen und Vorträge

Liste der Veröffentlichungen und
Vorträge

6.1 Veröffentlichungen

6.1.1 Journal „Applied Thermal Engineering“

Der Beitrag zur HPC 2012 wurde aus allen Beiträgen der HPC (siehe Vorträge) zur Veröffentlichung in einem Sonderband des reviewed Journals „Applied Thermal Engineering“ ausgewählt. Der Artikel erscheint im Herbst 2013 in einer „Special Edition HPC2012“. Titel des Beitrages ist „FIRST RESULTS OF A COATED HEAT EXCHANGER FOR THE USE IN DEHUMIDIFICATION AND COOLING PROCESSES“ und beinhaltet Ergebnisse zu den Upscaling Tests der Beschichtung eines Wärmeübertragers mit reduzierten Abmessungen, sowie der Charakterisierung desselben hinsichtlich Entfeuchtungsleistung.

6.2 Vorträge

6.2.1 Heat Powered Cycles Conference / HPC-2012

Vortrag Hr. Munz, „A NOVEL DEHUMIDIFICATION AND COOLING SYSTEM DRIVEN BY AN EVACUATED TUBE SOLAR AIR COLLECTOR“, 10.-12. September 2012, ECN in Alkmar / Niederlande

6.2.2 Deutsche Solarthermie Technologie Plattform / DSTTP-2013

Vortrag Hr. Siems und Partner, „Entwicklung eines solaren, sorptionsgestützten Klimalüftungssystems mit Fassaden-Solarluftkollektoren“, 31. Januar 2013 in Berlin

6.2.3 IHK – „Best Practices in Innovation“

Vortrag Dr. Hans-Martin Henning (stv. Institutsleiter ISE), Vorstellung der Ergebnisse aus den Projekten AgroKuehl und SorLuko, 15. Mai 2013 in Lahr

6.2.4 Nachhaltige (Bau-)Materialien und Energiesysteme / EFRE-Umwelttechnik

Vortrag Hr. Munz und Partner, 17. Juli 2013 im Haus der Wirtschaft, IHK Karlsruhe

6.2.5 5th International Conference Solar Air-Conditioning / OTTI-SAC-2013

Vortrag Hr. Munz, „Development of a Sorption Assisted Air Conditioning System Driven by a Solar Air Collector“, 25.-27. September 2013 in Bad Krozingen