



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

Schlussbericht 15.09.2015

SOLARE LUFTHEIZSYSTEME FÜR INDUSTRIE- UND GEWERBEGEBÄUDE

EVALUATION EINER PILOTANLAGE

Subventionsgeberin:

Schweizerische Eidgenossenschaft, handelnd durch das
Bundesamt für Energie BFE
Sektion Cleantech
Pilot- und Demonstrationsprogramm
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Kofinanzierung:

MONTANA BAUSYSTEME AG
Durisolstrasse 11
CH-5612 Villmergen
www.montana-ag.ch/

Stadt Zürich – Amt für Hochbauten
Lindenhofstr. 21
CH-8021 Zürich

Subventionsempfänger:

Hochschule Luzern - Technik & Architektur
Technikumstrasse 21
CH-6048 Horw
www.hslu.ch/

Autoren:

Benoit Sicre, Hochschule Luzern – T&A, benoit.sicre@hslu.ch

BFE-Programmleitung: Yasmine Calisesi, Leiterin P+D-Programm
yasmine.calisesi@bfe.admin.ch

BFE-Projektbegleitung: Marc Köhli, Stv. Leiter Forschungsprogramm Energie in Gebäuden
koechli@enerconom.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/501048-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Zusammenfassung

Solare Luftheizsysteme sind Versorgungsanlagen zur Teildeckung des Heizwärme- und Lüftungsbedarfs eines Gebäudes mit Luft als Arbeitsmittel. In der Fachliteratur werden sie als marktreif und zuverlässig bezeichnet. Studien zeigen aber, dass ihr Marktanteil unter 1% liegt. Um die Informationslücke zu schliessen, demonstrierte die Hochschule Luzern gemeinsam mit dem Hersteller Montana die technische Machbarkeit von unabgedeckten, perforierten Luftkollektoren in der Fassade einer Industriehalle.

Die thermischen Eigenschaften und der Hilfsenergieverbrauch des Systems konnten während eines Jahres untersucht und der Wartungsbedarf dokumentiert werden. Zudem wurden hygienische Untersuchungen und Schallmessungen durchgeführt.

Parallel zum Projekt wurde in einer studentischen Arbeit ein Computermodell entwickelt und mithilfe von Messdaten kalibriert. Somit konnten in einem zweiten Schritt die Einsparpotentiale des solaren Luftheizsystems mit denjenigen eines Erdluftregisters verglichen werden. Zusätzlich wurde ein Konzept für die Kombination eines Luftkollektors mit einer Wärmerückgewinnungsanlage entwickelt und am Computer getestet.

Die Ergebnisse bestätigen, dass die Primäraufgabe eines solaren Luftheizsystems die Vorwärmung der hygienisch notwendigen Außenluftzufuhr ins Gebäude ist. Im Betrieb erreichte der Luftkollektor jedoch auch Austrittstemperaturen deutlich über der Raumtemperatur. Somit konnte mit der Luft – in begrenztem Umfang – auch geheizt werden. Verglichen mit einem Erdregister produziert der Luftkollektor laut Simulation – bei ähnlichen Druckverlusten – etwa um einen Faktor sechs mehr Heizenergie. Allerdings kann das Erdregister im Sommer – im Gegensatz zum Luftkollektor – zur Kühlung eingesetzt werden. Deshalb sollte die Entscheidung für die eine oder andere Vorwärmtechnologie unter Berücksichtigung des Kühlbedarfs erfolgen.

Abstract

For the purpose of energy conservation, modern buildings become more and more air-tight and generally rely on a mechanical ventilation system for the supply of breath air in the rooms. According to literature, solar air heating systems can contribute in a cost-effective way to the ventilation and heating of utility buildings. But the market share of solar air collector is less than 1%. To demonstrate the technical feasibility of generating heating energy on facades, Montana AG, a Swiss manufacturer decided to build a demonstration plant based on an unglazed solar air collector. This plant was intensively investigated by Hochschule Luzern using energy metering during a one-year period.

Beside this monitoring activity, sound level and hygiene investigations were conducted. Further, a simulation model was developed and calibrated using the measurement results. The annual solar yield of the collector was computed with a whole-building simulation software and was compared with the energy output of buried pipes (earth-to-air heat exchanger) and with the energy savings of a state-of-the-art air-to-air heat recovery unit.

Project results outline that the primary role of an unglazed micro-perforated air collector is to preheat the make-up air. But the solar air collector generally achieves higher temperature levels than room temperature. Therefore it offers room heating capabilities, but the potential is limited. Benchmarked against buried pipes, the air collector produces up to 6 times more heating energy under similar pressure drop conditions. But as free cooling is regarded, buried pipes surpass the collector by approx. 2 times. The selection of what preheating technology fits the best should be made under consideration of the needs for free cooling.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	5
2.	Ausgangslage, Motivation	7
3.	Ziel der Arbeit	7
4.	Grundlagen, Randbedingungen, Abgrenzungen.....	8
5.	Konzept, Anlagenbeschrieb	9
5.1.	Das Gebäude	9
5.2.	Kollektor.....	10
5.3.	Lüftungsanlage	11
5.4.	Betriebsstrategie.....	12
6.	Vorgehen / Methode.....	12
7.	Ergebnisse / Erkenntnisse.....	13
7.1.	Temperaturanstieg im Kollektor	13
7.2.	Luftgeschwindigkeit und Temperaturverteilung im Kollektor.....	15
7.3.	Schallmessung	16
7.4.	Hygienemessung.....	18
7.5.	Energiemonitoring	19
7.6.	Simulationsstudie	21
7.7.	Thermischer Komfort im Sommer und passive Kühlung.....	22
7.8.	Jahreserträge und Effizienz.....	23
8.	Fazit.....	25
9.	Diskussion / Würdigung der Ergebnisse / Erkenntnisse	27
9.1.	Monitoring	27
9.2.	Hygiene	27
9.3.	Hygiene und Energieeinsparung	28
9.4.	Energieeffizienz.....	28
10.	Ausblick	29
11.	Literaturverzeichnis	30
12.	Glossar	32
	Symbolen	32
	Abkürzungen.....	32
13.	Anhang	33

1. Einleitung

Derzeit tragen der Bau und die Renovation von Nutzgebäuden in der Schweiz rund 50% zur gesamten Bautätigkeit bei. Die Gesamt-Fassadenfläche von Gewerbegebäuden beläuft sich auf rund 3 Mio. m². Zahlreiche Gewerbegebäude stehen kurz vor dem Ende ihres Lebenszykluses und müssen renoviert werden. Die Sanierungsquote liegt bei rund 30% der gesamten Bautätigkeit im Bereich Gewerbebau [SFHF 2013]. Kosteneffiziente, fassadenintegrierte, unabgedeckte "perforierte" Solarluftkollektoren könnten zu einem attraktiven neuen Marktsegment für Fassadenhersteller werden [Filleux und Gütermann 2010]. Es besteht jedoch ein Mangel an technischem Wissen zur Einbindung des Luftkollektors in eine hocheffiziente Lüftungsanlage. Deshalb wurde die Hochschule Luzern - Technik & Architektur beauftragt, die Entwicklung und die Erprobung eines fassadenintegrierten, solaren Luftheizsystems für Nichtwohngebäude wissenschaftlich zu begleiten.

Solare Luftheizsysteme sind Versorgungsanlagen zur Teildeckung des Heizwärme- und Lüftungsbedarfs eines Gebäudes mit Luft als Arbeitsmittel (s. Abbildung 1). Sie versorgen die Räume mit Frischluft und bieten Schutz für die Bausubstanz dank Feuchtigkeitsabfuhr. Marktstudien zeigen aber, dass der Marktanteil von Luftkollektoren unter 1% liegt [Stryip-Hipp et al. 2010]. Dies ist einerseits auf das Informationsdefizit in der Fachbranche und andererseits auf den Mangel an erprobten Lösungen und an normativen Vorgaben bzw. auf das technische und finanzielle Risiko für Investoren zurückzuführen.

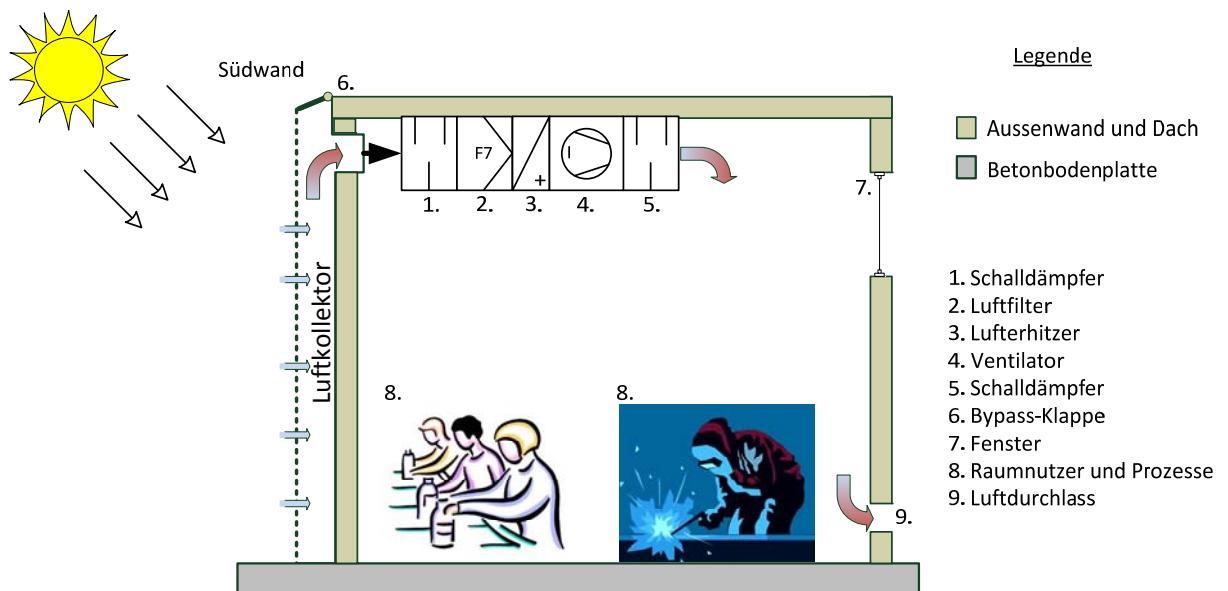


Abbildung 1: Prinzip eines solaren Zuluft-Heizsystems mit fassadenintegriertem Luftkollektor

In einem früheren Projekt der Hochschule Luzern wurden mittels einer Benchmark-Analyse, auf der Grundlage von Gebäude- und Anlagensimulationen, die Konkurrenz-Mechanismen mit anderen erneuerbaren Energiesystemen wie Photovoltaik und Wärmepumpen untersucht [Sicre 2012]. Gemäss dieser Referenz sind die Marktperspektiven für die kostengünstigen, unverglasten, fassadenintegrierten Luftkollektoren (s. Abbildung 2), insbesondere für Nichtwohngebäude, sehr gut. Deshalb wurde der Bau einer Versuchs- und Demonstrationsanlage auf dem Campus der Hochschule am Versuchstand für ganzheitliche Sanierung von Industriehallen VeGaSiN beschlossen [Sicre und Dürr 2013]. Ziel war es, neben dem Kompetenzaufbau in Planung und Dimensionierung, Knowhow in den Bereichen Bau und Betrieb zu generieren. Ferner sollte die Anlage messtechnisch untersucht werden um Aussagen bezüglich Energieeffizienz formulieren zu können.

Die Randbedingungen für den Einsatz von Luftkollektoren in der Schweiz ändern sich. Gestützt durch die vom Bundesrat beschlossene *Energiewende 2050* schreibt die MuKen 2014 eine Wärmerückgewinnungsanlage (WRG) auch für einfache Abluft- bzw. Zuluftanlagen ab 1000 m³/h und 500 Betriebsstunden pro Jahr vor. Dass Luftkollektoren und WRG sich nicht gegenseitig ausschliessen, ist noch zu

belegen. Eine beliebte Massnahme als Frostschutz für WRG sind Erdluftregister. Darüber hinaus bieten diese eine Kühlfunktion für die Zuluft in Sommer. In der Branche bestehen Bedenken gegen Erdluftregister, insbesondere wegen der Hygiene. Ob ganzjährig betriebene Luftkollektoren ein hygienisches Risiko für den Raumnutzer darstellen muss noch an realen Anlagen untersucht werden.

Mit der Firma Montana Bausysteme AG, Hersteller von Fassadenbekleidungen für Industrie- und Gewerbegebäude, und weiteren Partnern hat die Hochschule Luzern an dem VeGaSIN auf dem Campus Horw den Betrieb und den Wartungsbedarf eines solaren Zuluft-Heizsystems 12 Monate lang untersucht und einige Dimensionierungs- und Betriebsfragestellungen abgeklärt.



Abbildung 2: Konzept der Zuluft-Vorwärmung mittels perforierter Fassadenelemente (links) und Detailansicht des Luftkollektors COLOR-COAT RENEW SC® (rechts) (Quelle: Tata Steel/Montana AG)



Abbildung 3: In der Versuchsanlage in Horw befindet sich der Luftkollektor im oberen Bereich der Südfassade und versorgt die Halle mit vorgewärmerter Außenluft. Im unteren Teil der Fassade wurden PV-Streifen (Dünnschichtzellen) angebracht, welche als Referenz bei der Benchmark-Analyse dienen. Angegeben sind die Aperturmassen des Luftkollektors.

2. Ausgangslage, Motivation

In der Literatur werden solare Zuluft-Heizsysteme als energieeffiziente und marktreife Technologie für die Vorwärmung von Aussenluft bei mechanisch belüfteten Gebäuden mit hohem Lüftungsbedarf und niedrigen Komfortansprüchen bezeichnet [Hastings et al. 2000][Filleux und Gütermann 2010]. Die Verkaufszahlen von solaren Zuluft-Heizsystemen befinden sich jedoch seit Jahren auf einem sehr niedrigen Niveau [Banse 2010].

In der Schweiz wurden um die Jahrhundertwende einige wenige Anlagen gebaut, welche jedoch nicht den erhofften Multiplikatoreffekt bewirken konnten. Die Hochschule Luzern strebte an, Praxiserfahrungen mit dieser als energie- und kosteneffizient gepriesenen Technologie zu sammeln und diese in die Lehre einfließen zu lassen. In einem früheren Projekt wurde eine Demonstrationshalle (VeGaSiN) auf dem Campus der Hochschule in Horw nach Minergie-Standard gebaut, um verschiedene Arten von Fassaden testen zu können. Die Südfassade der Halle wurde mit einem kommerziellen fassadenintegrierten, unverglasten Luftkollektor der Firma Montana vom Typ COLORCOAT RENEW SC® ausgestattet (s. Abbildung 3). Diese Anlage war mit Messtechnik bestückt, um die Betriebscharakteristiken des Luftkollektors (Absorbertemperatur, Austrittstemperatur, Temperaturanstieg im Kollektor, Druckverlust etc.) zu ermitteln und den Betrieb langfristig zu überwachen.

Im Rahmen eines P&D-Projektes wurde das energetische Verhalten der Anlage 12 Monate lang überwacht und weitere Aspekte wie Wartungsbedarf, Hygiene oder Schall untersucht. Projektziel war, das gesammelte Wissen im Rahmen von Fachveranstaltungen und Publikationen der Branche zur Verfügung zu stellen.

Mit dem Projekt ging die Firma Montana einen neuen Weg, indem eine industrielle Fassadenkonstruktion – neben dem Schutz gegen das Aussenklima (Wärmedämmung, Luftdichtheit, Schalldämmung) – eine weitere Funktion anbietet, nämlich die der Energiegewinnung. Für die optimierte Auslegung und Einbindung des Fassadenkollektors in das Lüftungssystem sind Methoden und Werkzeuge aus dem Bereich Solarthermie und Lüftungstechnik erforderlich. Insbesondere beim ersten Demonstrator (Pilotanlage), bei dem die Eigenschaften des Fassadenkollektors sowie das Zusammenspiel mit der Lüftungsanlage nicht genau bekannt waren, war es wichtig, auf das Knowhow eines kompetenten Partners zurückgreifen zu können.

Der Demonstrator musste neben der Gewinnung von Erkenntnissen seine Primärfunktion erfüllen: die Zielgruppe überzeugen. Bei dieser Aufgabe mussten wichtige Aspekte des Wissenstransfers betrachtet werden. Für die künftige Markteinführung waren eine strukturierte Dokumentation zum Aufbau und Betrieb des Demonstrators für die Verwendung in Planungsunterlagen sowie eine Produktdokumentation unentbehrlich.

Für die Gewinnung an Anerkennung auf dem Markt war es zudem äusserst wichtig, dass die Messungen und die Betreuung des Demonstrators durch eine unabhängige Stelle erfolgten. Messung und Bewertung erfolgten nach international anerkannten Methoden.

In der Schweiz gab es bereits um die Jahrtausendwende Aktivitäten im Bereich der solaren Luftsysteme (siehe Einfamilienhaus Horw, Mehrfamilienhaus Winterthur, Industriebau WASAG, alles BFE-unterstützte Projekte). Jedoch wurde den Luftkollektoren wenig Interesse geschenkt. Deshalb sollten Aktivitäten gestartet werden, um die technische Machbarkeit mit gegenwärtigen Produkten aufzuzeigen.

3. Ziel der Arbeit

Im vorliegendem P&D-Projekt lag der Schwerpunkt der Untersuchungen einerseits bei der Einbindung eines kommerziell erhältlichen Luftkollektors in ein herkömmliches Lüftungssystem. Andererseits stand das Zusammenspiel zwischen Luftkollektor, Lüftungsanlage und Gebäude im Mittelpunkt der

Untersuchungen. Neben der Beantwortung gezielter Betriebsfragen sollte das Projekt ebenso der Erweiterung der Kompetenzen der Projektpartner im Bereich Planung, Realisierung, Betrieb und Wartung dienen. Hierfür sollten projektspezifische Auswertungsmethoden, Tools und Benchmark-Messlatten verwendet werden. Die Ergebnisse sollten mit Literaturangaben verglichen werden.

Zudem sollten Forschungsfragen, die im Rahmen von früheren Fachgesprächen, Literaturrecherchen, aber auch bei der Planung und Ausführung der Demoanlage in Horw aufgetaucht sind, weiter untersucht werden. Diese waren:

- Ermittlung von Betriebscharakteristiken (u.a. Kollektoraustrittstemperatur, Kollektorwirkungsgrad, Druckverlust, ...)
- Jahreserträge, Benchmark mit anderen nachhaltigen Technologien
- Hygienische Belange
- Schalltechnische Belange
- Einbindung in eine moderne Lüftungsanlage
- Betriebsführung

Das P&D-Projekt wurde in 2 Arbeitspakete unterteilt:

1. Leistungs- und Effizienzmessung am Luftkollektor

An der Pilotanlage in Horw sollte eine Langzeitmessung (Dauer: 1 Jahr) durchgeführt werden. Mit der umfangreichen Datenbasis sollte eine erweiterte Charakterisierung des unabgedeckten Luftkollektors vorgenommen werden. In diesem Rahmen sollte zudem Erfahrung mit dem Betrieb und der Wartung der Pilotanlage gesammelt und darüber hinaus dokumentiert werden. Hygienische Aspekte wie Staubansammlung und Feuchtigkeit im Kollektor sollten mittels z.B. einer Hygieneinspektion in Anlehnung an die SWKI VA104-1 untersucht werden.

Im P&D-Projekt war die Hochschule Luzern für die Überwachung des Betriebs und die Messung zuständig, führte die Versuche durch und wertete die Daten aus. Der Partner Montana begleitete fachlich die Versuche und diente als Schnittstelle mit der Forschungsgruppe der Tata Steel¹ in Schottland. Außerdem arbeitete er das neu gewonnene Knowhow in die technischen Unterlagen des Produktes ein [Ventilator 2015].

Die Datenauswertung, die Darstellung der Ergebnisse und das Beurteilen der Kollektorperformance sollten in Anlehnung an die einschlägige Literatur, z.B. [Hastings et al. 2000], erfolgen. Dabei sollten Messergebnisse an einem ähnlichen Kollektor vom Fraunhofer Institut für solare Energiesysteme ISE [ISE 2014] für Vergleiche herangezogen werden.

2. Dokumentation, Wissenstransfer, Projektleitung

Dieses Arbeitspaket sollte die Aktivitäten rund um die Projektleitung, die Berichterstattung und die Dokumentation der Erfahrungen mit der Pilotanlage, sowie Kommunikation und Wissenstransfer umfassen. Ein Workshop für Fachleute und Interessierte sollte im Rahmen des Projekts organisiert werden.

4. Grundlagen, Randbedingungen, Abgrenzungen

Solarthermie ist weitgehend eine bewährte und marktreife Technologie zur Wärmebereitstellung in Gebäuden und für Prozesse. In der Regel werden Flüssigkeiten (z.B. eine Mischung aus Wasser und Glycol) als Wärmeträger eingesetzt. Neben guten Strömungsmerkmalen können Flüssigkeiten wie Wasser, Wärme platzsparend speichern (z.B. in einem Solar-Schichtenspeicher).

¹ Mutterkonzern von Montana und Patentinhaberin vom Luftkollektor Solarcoat Renew SC

Luft hat als Wärmeträger Vor- und Nachteile. Einerseits ist Luft ungiftig, in grossen Mengen kostenfrei vorhanden und fügt der Bausubstanz bei allfälligen Leckagen keinen Schaden zu. Gegenüber Wasser weisst Luft aber eine deutlich niedrigere Dichte, Wärmekapazität und -leitfähigkeit auf. Der energetische Aufwand für die Umwälzung der Luft durch den Kollektor ist vergleichsweise höher und die Anlage benötigt einen deutlich höheren Platzbedarf (grösserer Durchmesser der Leitungen). Zudem können bei unsachlicher Planung oder mangelhafter Ausführung Strömungsgeräusche entstehen.

Eine frühere Studie der Hochschule Luzern hatte aber schon gezeigt, dass sachgerecht geplante, ausgeführte und betriebene Luftkollektoren ein Marktpotenzial in der Schweiz haben, insbesondere für Gebäude mit hohem Lüftungsbedarf und niedrigen Komfortansprüchen (z.B. Lagerhallen, Sportheilanstalten, Gewerbehallen, Tramdepots, ...). Wichtige Voraussetzungen sind die Wirtschaftlichkeit bzw. die Investitionskosten.

Deshalb wurde im vorliegenden Projekt ein unabgedeckter, perforierter Blechkollektor eingesetzt. Der Literatur zufolge sollte dieser am besten als Vorwärmung der Aussenluft der Lüftungsanlage vorschaltet werden und mit einem Bypass für den Sommerbetrieb (hinterlüftete Fassade) vorgesehen werden [Hollick 1998].

Am Prüfstand für Luftkollektoren des Fraunhofer ISE werden Prüflinge mit einer maximalen Grösse von $2 \times 3 \text{ m}^2$ auf einem Outdoor-Prüfstand ca. 1 Monat lang getestet. Einzelne Zeiträume mit geeigneter Einstrahlung und Windgeschwindigkeit werden aus der Datenbasis extrahiert und ausgewertet [Wip 2014]. In der Regel werden aber unabgedeckte perforierte Luftkollektoren an südorientierten Grossflächen gebaut. In einer Grossanlage verhalten sich die Luftströme ganz anders als in einer $2 \times 3 \text{ m}^2$ Anlage. Ferner fallen die thermischen Randeffekte (Kollektorrahmen) bei grossen Absorberflächen verhältnismässig weniger ins Gewicht.

Im Fokus des vorliegenden Projektes stand die Langzeitmessung einer mittelgrossen Anlage. Damit können z.B. der Albedo-Effekt im Winter und die Rückstrahlung zum Himmel im Sommer berücksichtigt werden. Ferner sollte der Einfluss des Betriebs auf den hygienischen Zustand der Luftleitungen untersucht werden. Als letzter Faktor sollten an einer fassadenintegrierten, fachmännisch gebauten Anlage die Schallemissionen beurteilt werden.

Bei Fraunhofer werden wiederum andere Aspekte geprüft, wie z.B. mechanische und thermische Eigenschaften, wie z.B. Bruch und Dichtigkeit des Kollektors, Hochtemperaturbeständigkeit etc., sodass beide Messprojekte für den Kollektorhersteller ergänzende Informationen liefern.

Neben dem Prüfstand betreibt das Fraunhofer ISE seit geraumer Zeit auch FuE-Aktivitäten (s. LuKo-E-Projekt): Der Fokus liegt im Wesentlichen auf Vakuum-Luftkollektoren (Hochtemperatur-Kollektoren) mit Prozesswärme als Anwendungsbereich [Kramer 2013].

Patentinhaberin Tata Steel betreibt ebenso FUE-Aktivitäten in ihrem Labor in Schottland. Der Fokus liegt primär beim angloamerikanischen Markt, wobei sich die Anforderungen an die Lufttechnik dort erheblich von der Schweiz unterscheiden. Das vorliegende P&D-Projekt fokussiert auf in der Schweiz als Stand-der-Technik geltende Lüftungs- und Fassadentechniken.

5. Konzept, Anlagenbeschrieb

5.1. Das Gebäude

Das experimentelle solare Luftheizsystem wurde auf einer bestehenden Testhalle getestet (s. Abbildung 3). Die Abmessungen der Halle entsprechen den durchschnittlich grossen Gewerbehallen in der Schweiz (s. Tabelle 1). Die Gewerbehalle wurde als einfache Stahlkonstruktion gebaut, auf der die verschiedenensten Gebäudehüllen montiert werden können. Sowohl die Fundamentplatte als auch die Hallendecke sind als thermoaktive Bauteile ausgelegt, die für die Wärmespeicherung genutzt werden können. Aufgrund der gesetzlichen Vorgaben musste das Flachdach des Versuchsstandes begrünt werden. Die Halle ist mit grossen Eingangstoren ausgestattet, damit LKWs hineinfahren können. Das Dach und die Wände sind thermisch nach Minergie-Standards isoliert. Die Halle verfügt über eine Metallstruktur und die Gebäudehülle besteht aus Kassettenblech.

Breite	12,7 m
Länge	24,3 m
Fläche	308 m ²
Höhe	8,2 m
Volumen	ca. 2275 m ³

Tabelle 1: Daten der VeGaSin-Halle in Horw

Die Wände des Versuchsstandes bestehen zur Zeit der Versuche aus dem Montaplus®-Minergie®-Modul der Montana Bausysteme AG, Villmergen. Dieses ist aufgebaut aus Kassetten MK 140/600 mit einer zusätzlichen Dämmung, bestehend aus den Wärme- und Schalldämmstoffen ISOVER Cladiroll 032 und ISOVER Cladisol 032. Die Wandstärke beträgt total 22 cm. Der Wärmedurchgangskoeffizient U für dieses Modul ist kleiner als 0.20 W/m2K. Den Abschluss auf der Wetterseite der Wand bildet eine hinterlüftete Fassade vom Typ Swiss Panel SP 27/111.

Näheres zum Versuchstandort VeGaSin in [Kreher 2011].

5.2. Kollektor

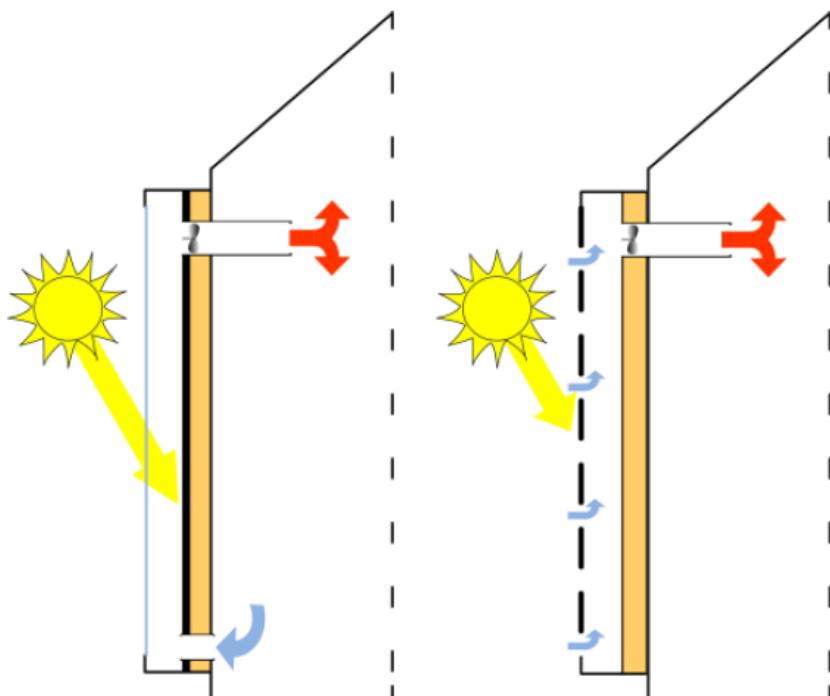


Abbildung 4: Zwei Konzepte für solare Luftheizsysteme. Geschlossener Luftkreis (links) und offener Luftkreis mit unabgedecktem perforiertem Kollektor (rechts). (Quelle: IEA Task SHC 42).

Ein Teil der Südfassade der VegaSin-Halle an der Hochschule Luzern wurde mit einem fassadenintegrierten unabgedeckten Luftkollektor ausgestattet (s. Abbildung 4). Hierfür musste zuerst die äussere Hülle der Trapezblechfassade durch einen Absorber vom Typ Montana Colorcoat Renew SC SP45 ersetzt werden.

Der Luftkollektor besteht aus einem perforierten Trapezblech vom Typ TSC SP45 (s. Abbildung 5). TSC bedeutet transpired air collector, also „durchlässiger Luftkollektor“. SP45 beschreibt dabei die Grösse der Trapeze. Die Trapezbleche dienen als unabgedeckte, selektiv beschichtete Absorber. Durch die dunkle Beschichtung vom Typ Colorcoat Prisma, Farbe Anthrazit, wandelt er die Solarstrahlung in sensible Wärme um. Im Kap. 13 – Anhang 2 ist der Aufbau eines Trapezbleches für die äussere Schale und dessen Masse zu finden.

Orientierung und Grösse des Kollektors waren vom verfügbaren Platz an der Südfassade abhängig: Die Kollektorfläche betrug $13,1 \times 2,2$ m (Breite x Höhe). Gemäss Herstellerempfehlung war für diese Fläche eine einzige Ansaugungsstelle ausreichend. Der Plenum (Luftzwischenraum) zwischen Kollektorbleck und Rückwand betrug im Durchschnitt 9 cm.

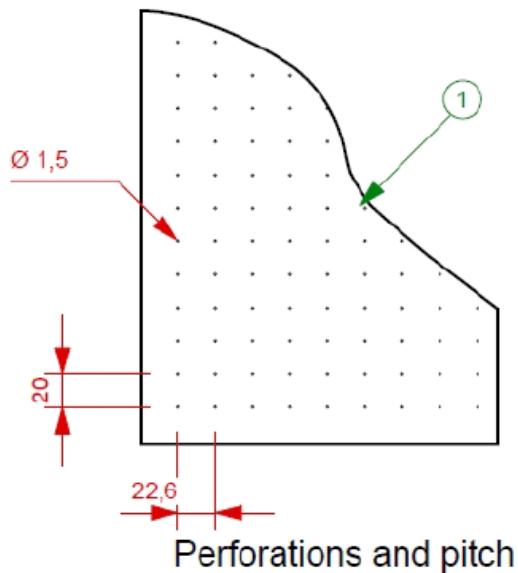


Abbildung 5: Perforation des „Colorcoat renew SC“ (Quelle: [ISE 2014])

5.3. Lüftungsanlage

Aus finanziellen Gründen wurde eine rudimentäre Zuluft-Anlage gebaut, die aber die Zwecke der Prüfung erfüllte. Sie besteht aus einer Luftansaugung auf der inneren Seite der Südwand (Aussparungsweite: 500×500 mm 2). Dort wurde ein Blechrahmen an die Wand verschraubt und mit Acrylat abgedichtet. Das Acrylat dient dazu, dass keine Raumluft von der Lüftungsanlage angesaugt wird und so mit Messungen verfälscht werden. Die Luftansaugung besitzt eine Revisionsöffnung und wurde mit verschiedenen Temperaturfühlern ausgestattet. Nach der Luftansaugung folgt ein Übergang vom Kanal zu einem Wickelfalzrohr. Die Strecke bis zum Ventilator wird als Volumenstrom-Messstrecke verwendet. Am Ende der Messstrecke ist ein Mitteldruckventilator² mit rückwärtsgekrümmten Schaufeln installiert worden. Auf etwaige Luftfilter, Wärmerückgewinnungsanlage, Luftheritzer und Schalldämpfer wurde aus finanziellen Gründen verzichtet.

Die VeGaSIN-Halle beherbergt ausschliesslich Prüfstände. Da sich nur selten Menschen in der Halle aufzuhalten, wurde auf eine Heizung verzichtet. Im Winter wurde die Halle bei Bedarf – zusätzlich zum Luftkollektor – mit Heissluft-Gebläsen temperiert. Dies hatte aber keinen Einfluss auf den Betrieb des solaren Luftheizsystems, da die Steuergrösse für die Lüftungsanlage die Temperatur im Kollektorzwischenraum war.

² Gebrauchtes Teil, für die Aufgabe bekanntlich überdimensioniert.

5.4. Betriebsstrategie

Um das solare Luftheizsystem zu steuern wurden 3 Betriebsmodi entwickelt und in ein digitales Controller³ implementiert (s. Abbildung 6):

- Handbetrieb: der Ventilator läuft stets bei der Nenndrehzahl,
- Fahrplanbetrieb: die Betriebszeit kann vom Anwender vorgegeben werden. Generell handelt es sich um die Arbeitszeiten der Arbeitsstätte, wenn die Raumnutzer im Gebäude sind (z.B. 6.00 bis 18.00 Uhr),
- temperaturgesteuert: Die Temperatur im Kollektorzwischenraum steuert das Gebläse. Im Projekt wurde die Temperaturschwelle auf 18 ° C mit einem Hysterese-Band von 2 K eingestellt. Im Betrieb läuft das Gebläse bei Nenndrehzahl.

Die Nenndrehzahl des Gebläseantriebs wurde so gewählt, dass sich ein Volumenstrom durch den Kollektor von 50 m³ / (m².h) einstellt. Somit ergibt sich ein Luftwechsel von 0.5.

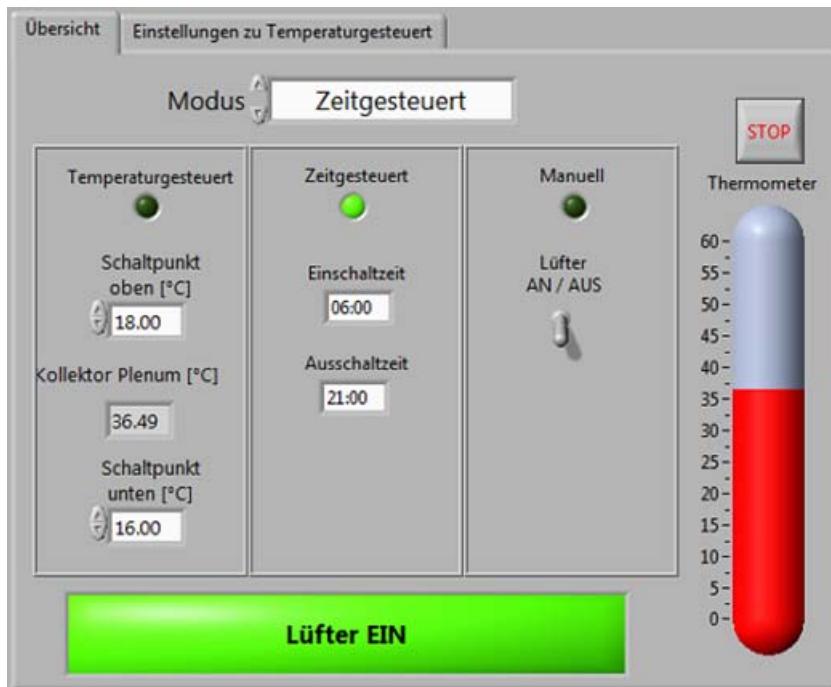


Abbildung 6: Bedienpanel der Steuerung des solaren Luftheizsystems

6. Vorgehen / Methode

Der Aufbau des solaren Luftheizsystems ist in Abbildung 7 vereinfacht dargestellt. Das Lüftungssystem besteht aus dem Luftkollektor, einer im Kanalnetz eingebauten Messstrecke und einem Ventilator.

Das Messkonzept ist in Kap. 13 – Anhang 1 dargestellt. Die Wetterstation zeichnete die Solareinstrahlung, die Außentemperatur, die Luftfeuchte, die Windgeschwindigkeit und -richtung auf. Die Solarerträge wurden aus dem Produkt von Dichte, Volumenstrom, Wärmekapazität und Temperaturdifferenz am Ein- und Austritt des Kollektors berechnet (s. Kap. 13, Anhang 1). Die Effizienz der Solarkollektoren ergibt sich aus dem Verhältnis vom Solarertrag zum Strahlungsangebot. Mit der Leistungsaufnahme des Ventilators liess sich anteilmässig eine Leistungszahl (COP) des solaren Luftheizsystems berechnen.

Die Messung erfolgte kontinuierlich mittels Datenloggers. Der Zeitschritt betrug 1 Minute. Die Datenauswertung erfolgt täglich automatisch mittels Auswerteroutinen in Matlab. Messfehler oder die Nicht-

³ Labview in Kombination mit einer I/O-Einschubkarte

Einhaltung von Randbedingungen (Plausibilitätsprüfung) lösten einen Alarm aus (Watchdog-Funktion). Somit konnten Störungen an der Messtechnik ohne grosse Zeitverzögerung behoben werden.

Berechnungsvorlagen wurden für die tageweise Datenauswertung entwickelt (Kollektorwirkungsgrad, Temperaturanhebungskennlinie, Druckverlust-Kennlinie, Hilfsenergien, ...)

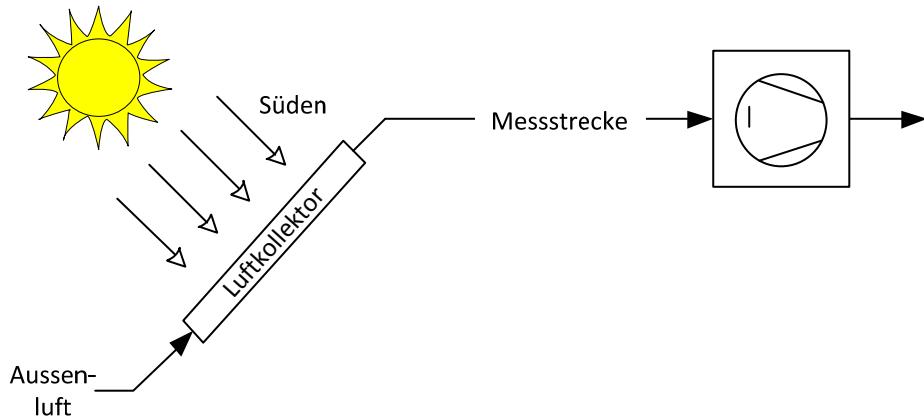


Abbildung 7: Prinzipschema der Langzeitmessung an der VeGaSin-Halle in Horw. Dabei handelt es sich um ein einfaches Zuluftsystem. Aus Kostengründen musste auf Filter, Schalldämpfer und Wärmerückgewinnungsanlage verzichtet werden.

7. Ergebnisse / Erkenntnisse

7.1. Temperaturanstieg im Kollektor

Die Aufgabe des Luftkollektors besteht darin, durch die Umwandlung der Solarstrahlung in sensible Wärme die angesaugte Außenluft auf ein höheres Temperaturniveau zu bringen (i.e. Außenluft-Vorerwärmung). Diese Temperaturanhebung ist primär von der Strahlungsstärke abhängig, aber auch von den Konvektions- und Strahlungsverlusten. Somit spielen ebenso die Außenlufttemperatur, die Windrichtung und -geschwindigkeit eine wesentliche Rolle.

Abbildung 8 illustriert einen typischen Tagesverlauf an einem sonnigen Wintertag. Ab 9.20 Uhr wird die Strahlung an der Fassade stark genug, dass die Lufttemperatur im Kollektorzwischenraum den Sollwert der Steuerung (18 °C) überschreitet. Das Gebläse schaltet ein. Diese Kurve steigt quasi parallel zu der zunehmenden Einstrahlung. Zwischen 10 und 11 Uhr ziehen Wolken vorbei, die Einstrahlung schwankt stark, die Kollektortemperatur dementsprechend. Gegen 14 Uhr hat die Sonne ihren Zenit erreicht, die Strahlungsstärke nimmt ab jetzt ab, so auch der Temperaturanstieg. Um 16.20 verschwindet die Sonne hinter einem nahe liegenden Berg. Der Kollektor gibt die im Blech gespeicherte Wärme ab. Um 16:30 unterschreitet die Lufttemperatur im Kollektorzwischenraum den Sollwert der Steuerung (inkl. Hysterese), das Gebläse schaltet ab. Der Kollektor liefert keine brauchbare Wärme mehr. An diesem Tag lag das Solarangebot bei 5.1 kWh/m² Kollektorfläche. Die maximale Temperatursteigerung im Kollektor betrug 32.4 K (s. Abbildung 10). Die Kollektorkennlinie ist in Abbildung 9 dargestellt. Sie gilt ausschliesslich für die Witterungsbedingungen dieses speziellen Tags, insbesondere was Außentemperatur, Windgeschwindigkeit und -richtung angeht.

Nennen wir die Steigung der Linearregression der Kollektorkennlinie k:

$$k = \frac{\text{Temperaturerhöhung im Kollektor}}{\text{senkrechte Einstrahlung}} [K * m^2 / W] \quad (1)$$

Somit ergibt sich ein mittlerer Kollektorwirkungsgrad η :

$$\eta = k \rho V C_p [-] \quad (2)$$

Beträgt wie im Beispiel $k 0.039 \text{ K}^*(\text{m}^2/\text{W})$, dann ergibt sich aus Gleichung (2) ein mittlerer Kollektowirkungsgrad von ca. 65%.

Die Abbildung 10 stellt die Summenhäufigkeit der Temperaturerhöhung im Kollektor am 23.02.2014 dar. Hiermit kann leicht ermittelt werden, wie lang der Kollektor bei welcher Temperatur gelaufen ist.

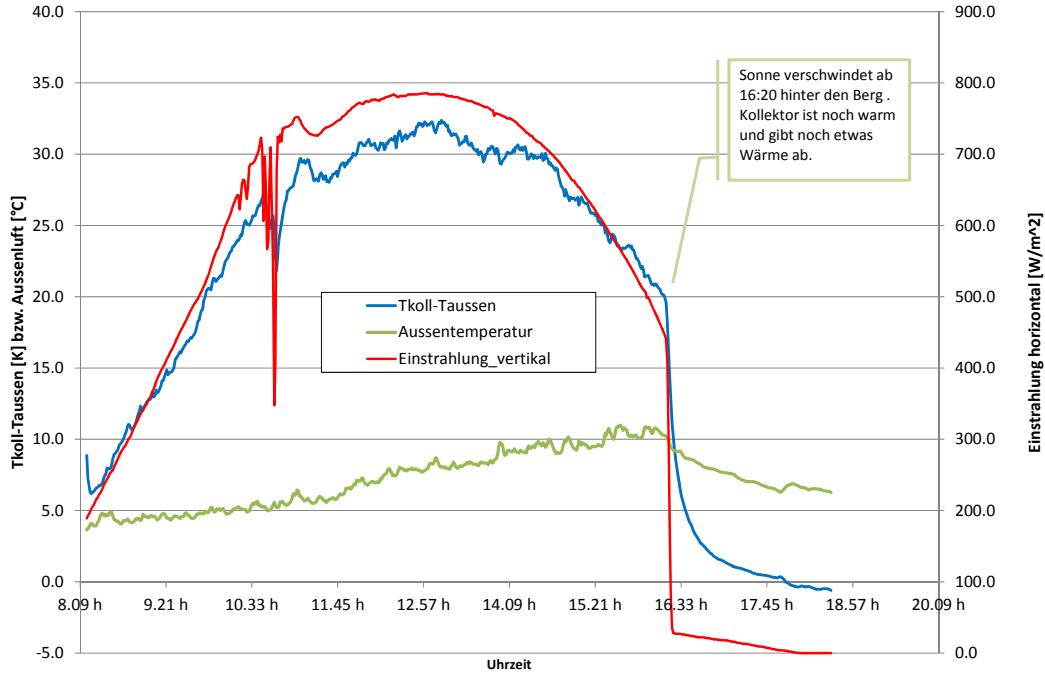


Abbildung 8: Temperaturverlauf im Luftkollektor an einem sonnigen Wintertag (23.02.2014)

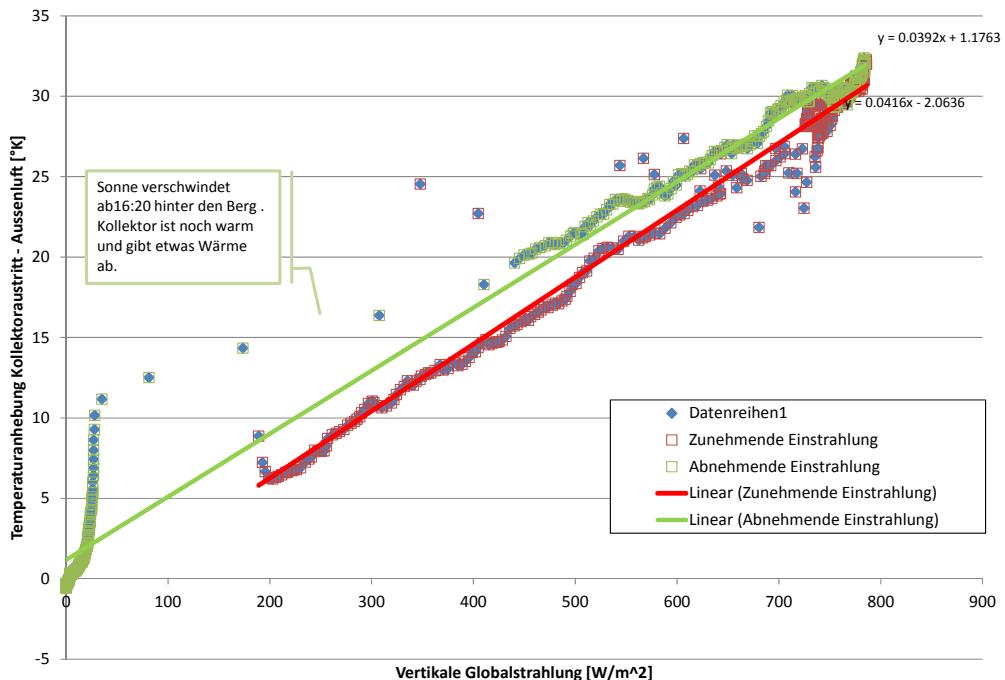


Abbildung 9: Kollektor-Kennlinien an einem sonnigen windarmen Wintertag (23.02.2014). Die Phasen mit zunehmender und abnehmender Einstrahlung unterscheiden sich etwas voneinander in der Höhe (bedingt durch die thermische Masse der Fassade) aber kaum in der Steigung (Kollektowirkungsgrad). Die maximale Temperaturanhebung lag an diesem Tag bei ca. 32 K.

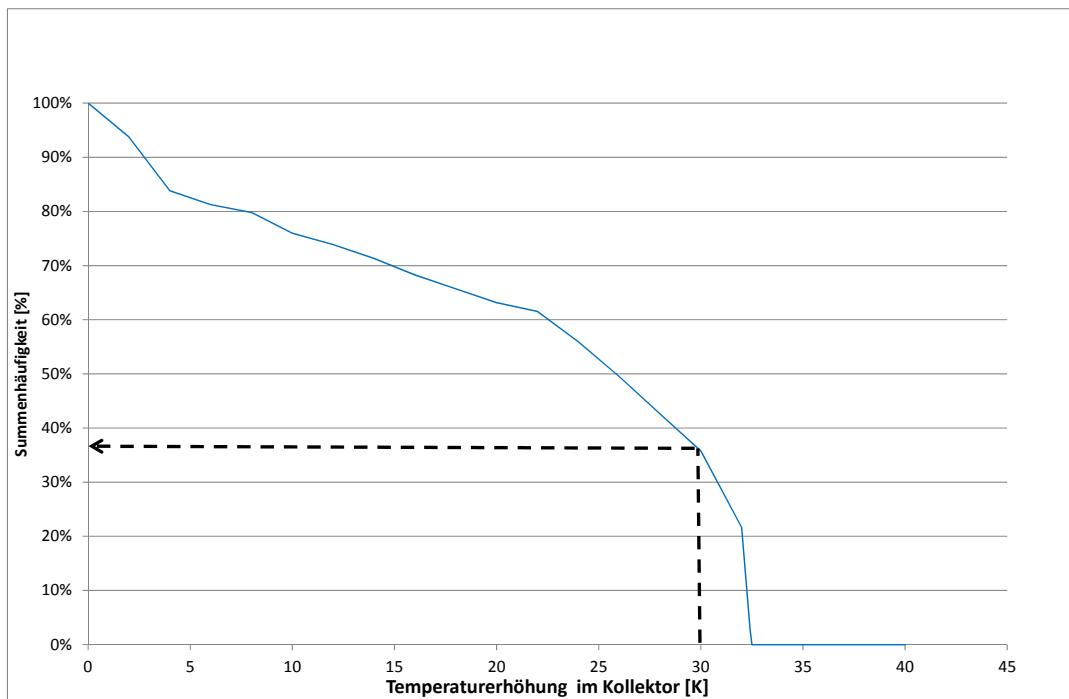


Abbildung 10: Summenhäufigkeit der Temperaturerhöhung im Luftkollektor. An diesem Tag (24.2.2014) lag die Temperaturerhöhung während 37% der Betriebszeit über 30 K. Der maximale Wert liegt bei 32.4 K.

7.2. Luftgeschwindigkeit und Temperaturverteilung im Kollektor

Fertigungsbedingt sind Durchmesser und Abstand zwischen den Mikroperforationen auf der ganzen Fläche des Kollektors gleich. Deshalb nimmt der Strömungswiderstand umso stärker zu, je länger der Weg zwischen Perforation und Ansaugung (mittig im Kollektor) ist. Dieser beeinträchtigt die Strömungsgeschwindigkeit durch die Perforation und somit die Übertragung sowie den Abtransport der Solarwärme im Kollektor.

Die Wärmeverteilung im Kollektor wurde qualitativ unter Verwendung von Infrarotbildern an einem sonnigen Tag im September untersucht. Abbildung 11 zeigt den zentralen Bereich des Kollektors um den Kollektorauslass (i.e. Ansaugung der Lüftungsanlage). Der Temperaturgradient verläuft – wie erwartet – quasi konzentrisch zu dem Auslass, was auf eine quasi-konzentrische Verteilung der Luft im Kollektor hinweist. Keine undichte Stelle ist zwischen zwei Trapezblechen zu beobachten. Die Temperaturdifferenz zwischen Kollektorauslass und senkrechtem Kollektorrand beträgt einige wenige Kelvin, sodass eine Nachbesserung beim Abdichten der Trapezbleche nicht für erforderlich erachtet wurde.

Darüber hinaus belegt das relativ homogene Temperaturband am Rand des Kollektors, dass keine wesentliche Undichtigkeitsstelle zu finden ist. Damit wurde der Kollektor als luftdicht bewertet.

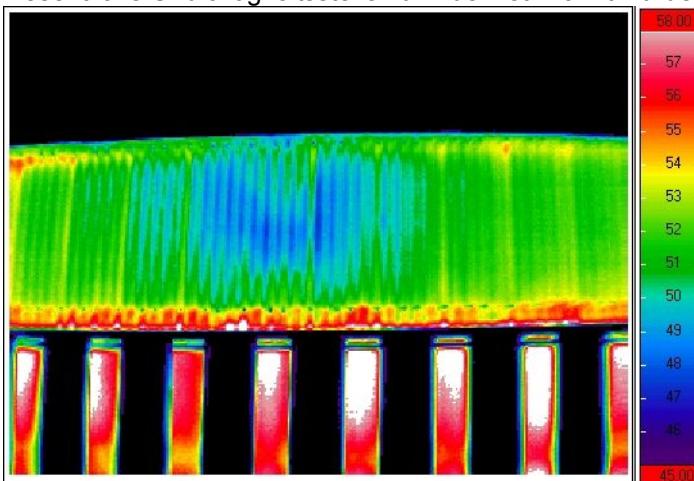


Abbildung 11: Temperaturverteilung entlang des Luftkollektors. Der Ansaugbereich (i.e. der Kollektor Auslass) befindet sich in der Mitte der Fläche. An dieser Stelle ist der Außenluftvolumenstrom durch die Mikroperforationen am grössten, und so auch die Abkühlung durch die durchströmende Luft. Daher ist die Oberflächentemperatur am tiefsten. An den Rändern sind keine Lecks sichtbar: die Polyethylen Schaumstoff-Dichtung erfüllt ihren Zweck

7.3. Schallmessung

Für Luftkollektoren liegt keine Norm für Schallmessungen vor. Aufgrund von Ähnlichkeiten bei der Schallerzeugung (Ventilator) und dem Emissionsort (fassadennahe Emissionsquelle) wurde ersatzweise auf die Vollzugshilfe 6.21 des Cercle Bruit „Lärmtechnische Beurteilung von Luft / Wasser-Wärmepumpen“ zurückgegriffen. Die Grenzwerte für den Beurteilungswert orientieren sich dann an den Vorgaben der [SIA 181] für Industrie- und Gewerbelärm.

Abbildung 12 illustriert den Messaufbau. Die Messung wurde in einer ruhigen, windstillen Nacht durchgeführt, um Störungen durch die Umgebung (Geräuschpegel durch den Parkplatz, nahe liegende Autobahn, ...) gering zu halten. Generell stammen Geräusche an einem Luftkollektor von zwei Quellen: Strömung durch die Perforationen im Blech und dem Ventilator. Über den Frequenzbereich können diese zwei Quellen voneinander unterschieden werden. In Abbildung 14 wurde der gemessene Schalldruckpegel vor dem Kollektor in Oktavbänder unterteilt und dem Schalldruckpegel des Hintergrunds gegenübergestellt. Im niedrigen Frequenzbereich sind die Ventilatorgeräusche dominierend. Im höheren Frequenzbereich wurden vor allem die Strömungsgeräusche durch die Perforationen erfasst. Bei einem Luftdurchfluss von $50 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ (Luftwechsel 0.5) lagen diese mit 40 dB(A) gerade so über dem Umgebungsschallpegel, sodass sie nicht hörbar sind. Mit weniger als 38 dB(A) läuft der Ventilator verhältnismässig ruhig und ist trotz fehlendem Schalldämpfer für das menschliche Ohr ausserhalb des Gebäudes nicht wahrnehmbar.

Abbildung 13 zeigt das Berechnungsverfahren zur Ermittlung des Beurteilungswertes nach Lärmschutzverordnung. In Abbildung 14 wurden die berechneten Beurteilungswerte für unterschiedliche Luftdurchflüsse am Kollektor und verschiedene Abstände zum nächsten Gebäude aufgetragen und mit dem Grenzwert für die Empfindlichkeitsgruppe 1 nachts (s, Anhang 6 in [LSV 2015]) verglichen. Bei dem gewählten Durchfluss von $50 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ wurden die gesetzlichen Anforderungen bei allen Abständen eingehalten. Bei höheren Luftdurchflüssen müsste der Abstand zum nächsten Gebäude weniger als 5 m betragen, damit der Grenzwert nachts nicht eingehalten wird.

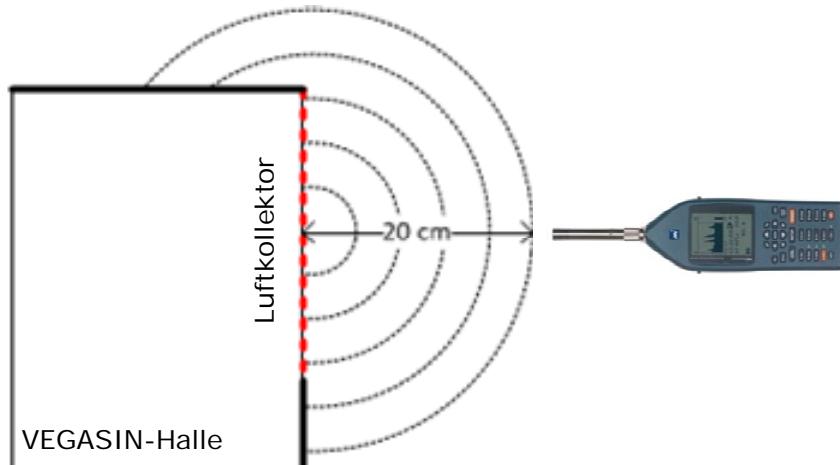


Abbildung 12: Messaufbau für die Bestimmung der Schalleistung.

$$L_{eq} = L_{W,A} - 11 + D_c - 20 \cdot \log(s) + 1$$

Wobei:

L_{eq}	A-bewerteter Mittelungspegel am Immissionsort
$L_{W,A}$	Schallleistungspegel
D_c	Richtwirkungsmass (an Fassade +6db)
$20 \cdot \log(s)$	Abstanddämpfung
s	Abstand s in Meter zwischen Schallquelle und Messort
+1	Korrekturwert für das offene Fenster

$$L_r = L_{eq} + K1 + K2 + K3 + 10 \cdot \log\left(\frac{t_i}{t_0}\right)$$

Wobei:

L_r	Beurteilungspegel nach LSV
L_{eq}	A-bewerteter Mittelungspegel am Immissionsort
$K1$	Pegelkorrektur aufgrund des Anlagetyps (+5db)
$K2$	Pegelkorrektur aufgrund Tongehalt (+2db)
$K3$	Pegelkorrektur aufgrund Pegelkorrektur (+0db)
$10 \cdot \log\left(\frac{t_i}{t_0}\right)$	Zeitkorrektur
t_i	Durchschnittliche tägliche Dauer i in Minuten
t_0	720 Minuten

Abbildung 13: Berechnung des Beurteilungswertes nach [LSV 2015] auf Basis des gemessenen Schallleistungspegels [Cercle 2013]

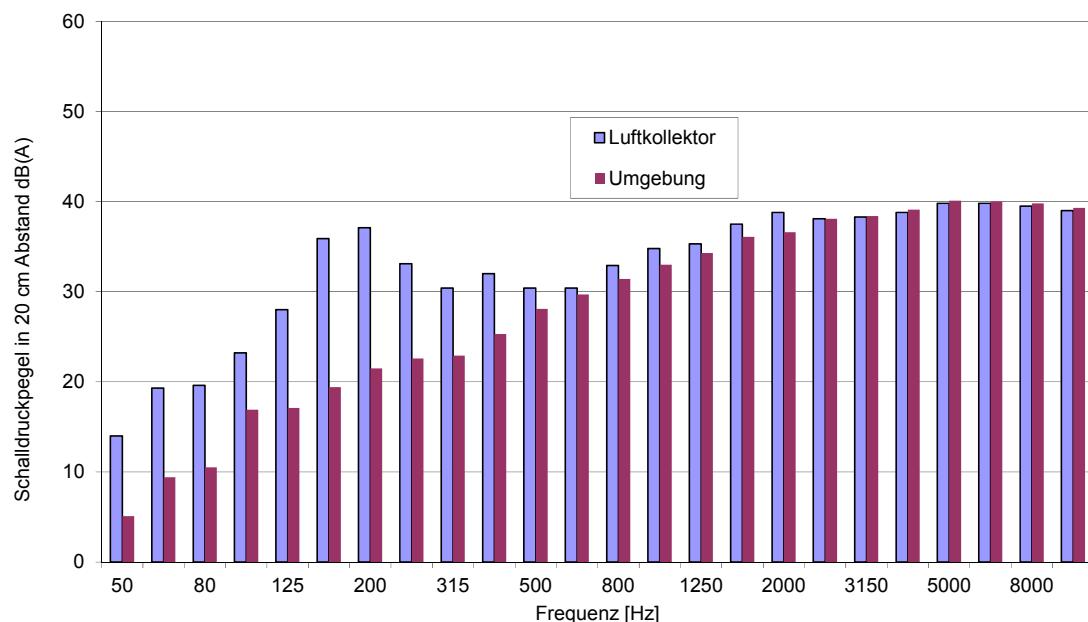


Abbildung 14: Schalldruckpegel beim Ansaugstutzen und Hintergrundgeräusche bei einem Volumenstrom von $50 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$

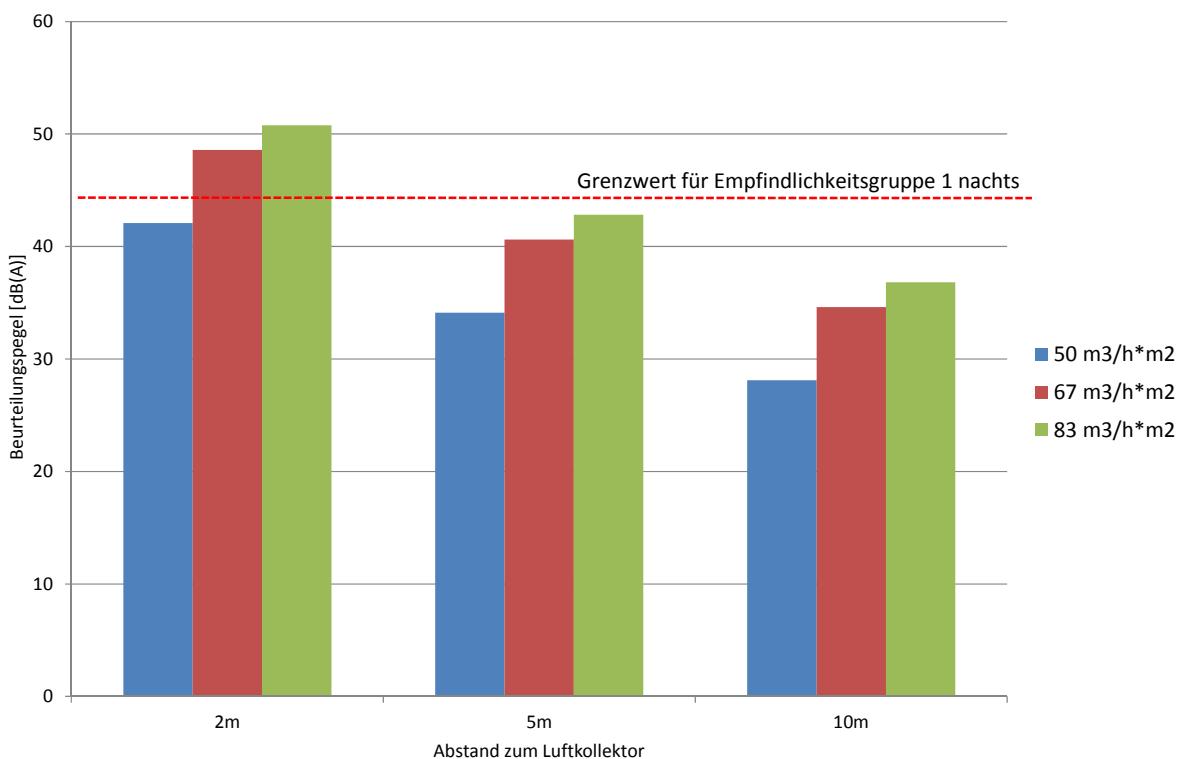


Abbildung 15: Beurteilungspegel nach [Cercle 2013] und [LSV 2015]

7.4. Hygienemessung

Wegen fehlender Luftfilterstufe (i.e. Staubablagerungsgefahr) und schwankender Luftfeuchtigkeit im Kollektorzischenraum wurden hygienische Bedenken gegenüber dem Luftkollektor erhoben. Eine Aufgabe des Projekts war es, im Frühling, nach ca. 2 Jahren Betrieb⁴, eine Hygieneinspektion durchzuführen, um diese Bedenken zu erhärten oder zu entkräften. Die Inspektion lehnte sich an die Anforderungen der SWKI-Richtlinie VA 106-1 an. Hierfür wurde ein spezialisiertes Institut mit der Messung beauftragt. Die Inspektion bestand aus

- einer qualifizierten Sichtprüfung vom Luftkanal und vom Kollektorzischenraum,
- einer Luftkeimmessung (Aussen- und Zuluft)
- einer Keimmessung an luftleitenden (angeströmten) Oberflächen

Für die mikrobiologische Untersuchung der Proben wurde ein akkreditiertes Labor beauftragt.

Die Sichtprüfung wurde in Form eines Videos dokumentiert. Es konnten keine Spuren von Kondenswasser, Korrosion, übermässiger Staubanhäufung oder Biofilm festgestellt werden.

Abbildung 17 zeigt die Laborergebnisse. Mit zwei KBE liegt die Oberflächenkonzentration an Schimelpilz deutlich unter dem Grenzwert von 25. Zudem konnten in der Probe keine Bakterien entdeckt werden. Bei den Luftproben liegen die Konzentrationen an Bakterien und Pilze deutlich niedriger in der Zuluft als in der Aussenluft. Demnach gibt es kein Anzeichen, dass die Lüftungsanlage mit Keimen befallen ist.

Bei beiden Untersuchungen – Sichtprüfung und mikrobiologischer Analyse – wurden keine hygienischen Mängel festgestellt. Das solare Heizluftsystem in Horw stellt für den Hallennutzer keine besondere Hygienegefahr dar.

⁴ In einem Vorprojekt lief die Anlage bereits über 1 Jahr lang.

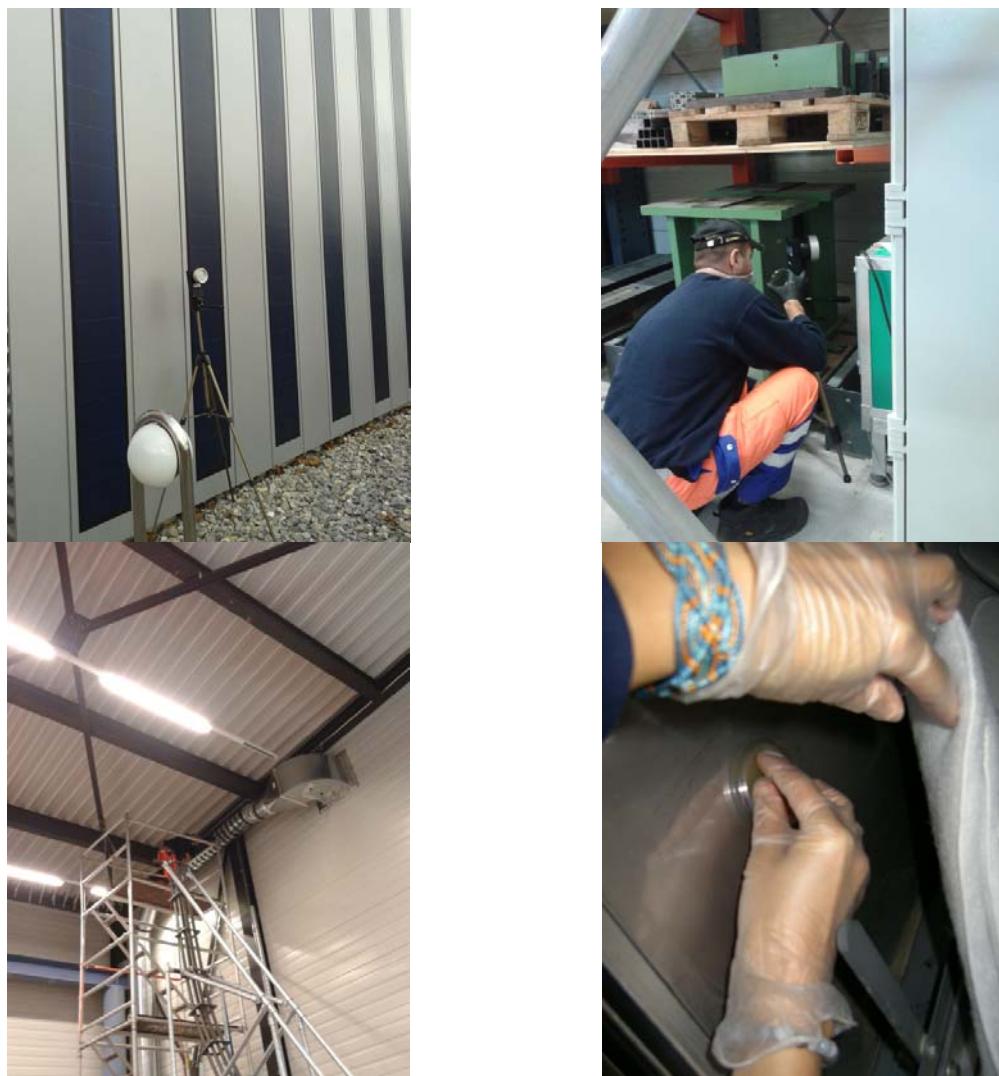


Abbildung 16: Durchführung der Hygieneinspektion am solaren Luftheizsystem. Luftprobenahme (oben), Sichtprüfung mit Kanalkamera (unten links) und Oberflächenprobe nach dem Abklatzverfahren (unten rechts)

Objekt:	HSLU / Consiltrade
Datum der Probenahme:	04.11.2014 / 14:00 Uhr
Messgerät:	MicroBio MB 2 eco
Ansaugvolumen für Luftkeimzahl:	400 L
Nährböden (NB):	Oxoid TSA-Agar für die Erfassung der aerobe, mesophile Gesamtkreimzahl, 30°C 1 bis 3 Tage Oxoid DG18-Agar für die Erfassung der Schimmel pilze, 22°C 2 bis 3 Tage Bioteest HYCON Keimindikatoren für Oberflächen TC [25 cm²], 30°C 1 bis 3 Tage
Prüfobjekt erhalten:	06.11.2014 / 07:45 Uhr
Prüfung durchgeführt:	06.11.2014 bis 10.11.2014 / ausgewertet nach 24 h und 4 d / Frau Lanz

ProbenNr.	Untersuchungsmethode	AK: GKZ [KBE/NB], LK: GKZ [KBE/1000L] davon Schimmelpilze [KBE/NB resp KBE/1000L]	Bemerkung
3	AK	2	2 (<i>Aspergillus niger</i> , Mycel)
1	LK aussen	490	378 (<i>Aspergillus niger</i> , <i>Aspergillus sp.</i> , <i>Penicillium sp.</i> , Mycel)
2	LK innen	328	273 (<i>Aspergillus niger</i> , <i>Aspergillus sp.</i> , <i>Penicillium sp.</i> , Mycel)

Anforderungen:	Abklatz (AK): < 25 KBE (gut), 25 -100 KBE (grenzwertig) > 100 KBE (unzureichend)
	Luftkeimmessung (LK): > 1000 KBE (unzureichend) / 1000 L
	Wasserproben Befeuelter:
	Bakterien < 1000 KBE/ml, Legionellen < 100 KBE/100 ml, Schimmelpilze < 100 KBE/ml, < 100 KBE/100 ml Pseudomonas sp.
	Wasserproben Rückkühlwasser:
	Bakterien < 10000 KBE/ml, Legionellen < 1000 KBE/100 ml, Schimmelpilze < 1000 KBE/ml, < 100 KBE/100 ml Pseudomonas sp.

Abbildung 17: Auszug aus dem Laborbericht Konzentrationsangaben für die Luft- (LK) und Oberflächenproben (AK).

7.5. Energiemonitoring

Während des Projektverlaufs wurde das Demonstrationsgebäude, das in der Realität eher als Lager dient, extrem selten durch Mitarbeitende genutzt. Deshalb wurde wegen Energiesparvorgaben das solare Luftheizsystem stets im Modus "temperaturgesteuert" betrieben. Das Gebläse lief erst, wenn

die Bestrahlung stark genug war, um 18 °C im Kollektorzwischenraum zu übersteigen.

Abbildung 18 zeigt die Tageswerte der Solarwärme für die „kalte Jahreszeit“ (1. Oktober bis 31. März). An manchen Tagen konnte wegen zu niedriger Bestrahlung und tiefen Außentemperaturen vom Kollektor keine Solarwärme über 18 °C erzeugt werden und das Gebläse blieb aus (s. Zeitintervall um den 1. Dezember). Wenn die Anlage im Betrieb war, lieferte sie in der Regel mehr Wärme als notwendig um die Außenluft auf Raumtemperaturniveau zu heizen. Am Kollektoraustritt wurden höhere Temperaturen erreicht, als in der Halle. Diese überschüssige Wärme (auch „Raumheizungsunterstützung“ genannt) wurde dazu verwendet, ein Teil der Transmissionswärmeverluste zu decken. So konnte das Heizungssystem des Gebäudes (im vorliegenden Fall Heissluftgebläse) z. T. entlastet und Energie und Geld gespart werden.

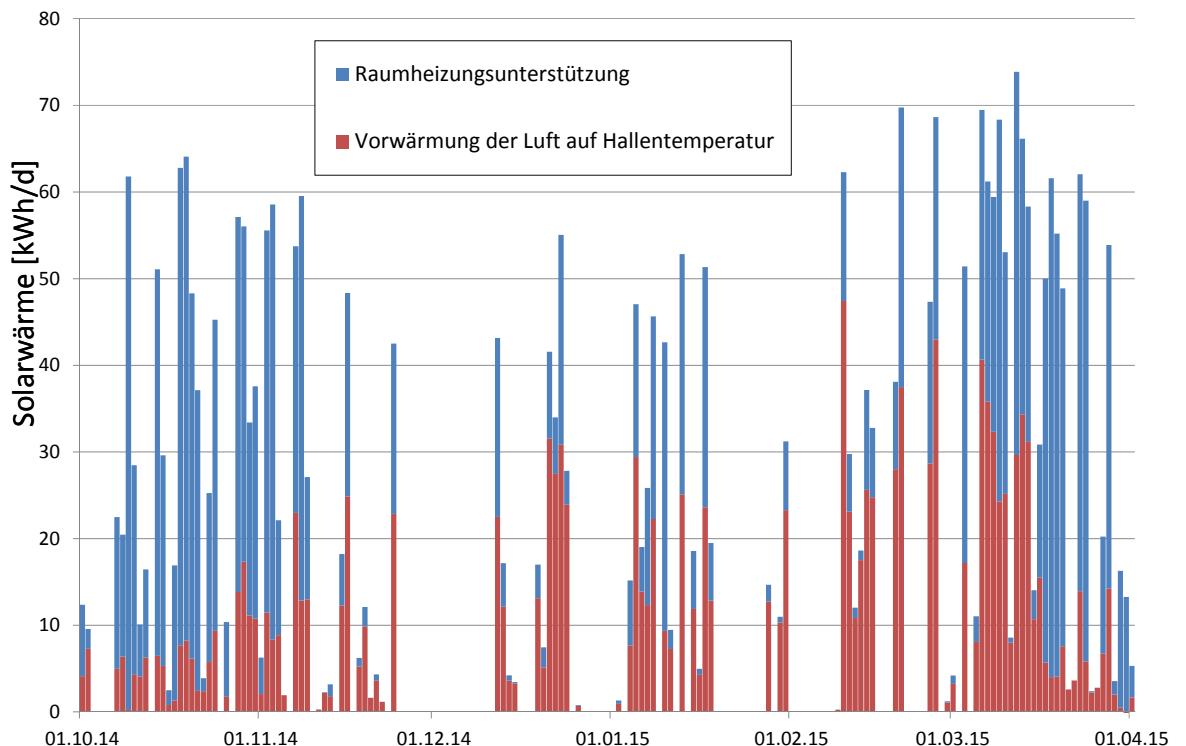


Abbildung 18: Tageswerte der Solarwärme für die „kalte Jahreszeit“ (1. Oktober bis 31. März). Zusätzlich wurde die Solarwärme aufgeteilt in „Vorwärmung der Luft auf Hallentemperaturniveau“ (ähnlich der Luftvorwärmung in einer „idealen“ Wärmerückgewinnungsanlage mit einer Rückwärmezahl von 100%) und in eine „Raumheizungsunterstützung“, den Anteil für das Heizen der Halle (ähnlich wie die Raumheizung mit Konvektoren).

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die Ergebnisse des Monitorings:

Solar-Wärmeleistung des Kollektors für die „kalte Jahreszeit“ (1. Oktober 2014 bis 31. März 2015)	3320 kWh (140 kWh/m ² Kollektorfläche)
Anteil davon für „Vorwärmung bis Hallentemperatur“	42%
Anteil davon für „Raumheizungsunterstützung“	58%
Mittlerer Kollektornutzungsgrad, wenn Anlage in Betrieb	58%
Mittlerer Kollektornutzungsgrad, im Verhältnis zu der gesamten normalen Globalstrahlung während der Heizperiode	43%
Geschätzter anteiliger Strombedarf für den Ventilator aufgrund des Druckverlustes des Luftkollektors (Annahme: 25 W Dauerleistung. Betrieb 6:00-18:00 an Arbeitstage, insg. 1560 Std. für die „kalte Jahreszeit“)	40 kWh

Tabelle 2: Ergebnisse des Energie-Monitorings für die „kalte Jahreszeit“ (1. Oktober bis 31. März). Die flächenspezifischen Werte beziehen sich auf die Aperturfläche des Kollektors (d.h. 24 m²)

Im unteren Bereich der Südfassaden der VeGaSin-Halle wurden PV-Laminate der Firma Unisolar [Unisolar 2009] streifenweise an die Wand angebracht. Die Stromerträge wurden mitgelogggt und in Abbildung 19 grafisch aufbereitet. Tabelle 3 fasst die Monitoringergebnisse zusammen.

Stromerträge für die „kalte Jahreszeit“ 2014/15 (1. Oktober bis 31. März)	371 kWh (15.5 kWh/m ²)
Mittlerer Kollektornutzungsgrad während der kalten Jahreszeit (bezogen auf die normale horizontale Globalstrahlung)	4.9%

Tabelle 3: Monitoringergebnisse für das PV-Laminat der Südfassade

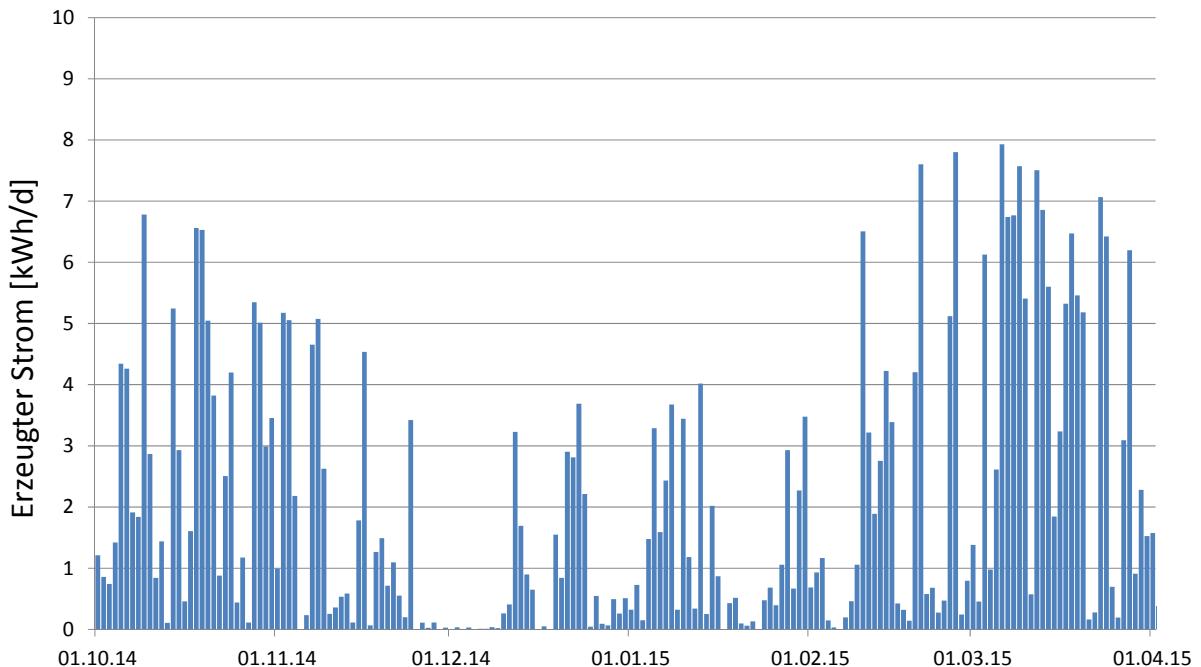


Abbildung 19: Tageserträge der PV-Anlage für die „kalte Jahreszeit“ (1. Oktober bis 31. März).. Die Gesamtfläche der Module beträgt 24 m². Der Hersteller gibt einen Wirkungsgrad von 6% an.

7.6. Simulationsstudie

Parallel zu dem P&D-Projekt fand eine Studentenarbeit mit dem Ziel statt [Zakovorotnij et al 2015]:

1. ein Kennlinien-Modell für den unabgedeckten perforierten Luftkollektor zu entwickeln,
2. dieses mit den Messdaten zu kalibrieren,
3. unterschiedliche Betriebsszenarien zu untersuchen.

Simulationsaufbau

In der Arbeit wurde die Gebäude-Simulationsumgebung namens IDA-ICE 4.6.2 eingesetzt. Die Wetterdaten stammten aus der Meteonorm-Wetterdatenbank (Durchschnittswerte für den Zeitraum 1990 bis 2010) für den Standort *Altdorf* (Schweiz), der ähnliche Witterungsbedingungen wie Horw aufweist (insbesondere hinsichtlich der Einflüsse von Bergen und See). Für die Stadt Horw waren keine Messdaten in der Datenbank vorhanden.

Das Gebäudemodell wurde nach den wichtigsten Merkmalen der Vegasin-Halle parametert (Grösse, Ausrichtung, Wärmedämmstandard, Fensteranteile etc.). Für den Luftkollektor wurde ein Modell für quasi-dynamische Bedingungen entwickelt, beruhend auf dem Modell der momentanen Kollektorleistung (s. [EN ISO 9806] Gl. 27), wobei die Parameter der Korrekturglieder mit den Messdaten aus dem Anlagenmonitoring in Horw für den Zeitraum Juni 2014 bis April 2015 (300 Messtage) ermittelt wurden. Das Modell berücksichtigt den Einfluss auf den Solarertrag von:

- der Einstrahlung auf senkrechter Fläche

- der Aussenlufttemperatur
- der Himmelstemperatur

Für die Windgeschwindigkeit konnte keine eindeutige Abhängigkeit bzw. Korrelation beobachtet werden. Der windabhängige Wärmedurchgang und der windgeschwindigkeitsabhängige Konversionsfaktor konnten somit nicht mitberücksichtigt werden (Näheres in [Zakovorotnij et al 2015]).

Für das Erdluftregister (ERL) wurde ein Wärmewiderstands-Knotenmodell entwickelt und mit den Messdaten eines anderen Messprojekts kalibriert [Zakovorotnij et al 2015].

7.7. Thermischer Komfort im Sommer und passive Kühlung

Unter Verwendung des Luftkollektor-Kennlinienmodells und des dynamischen Erdluftregister-Modells wurden 3 passive Kühlungsstrategien mit Simulation verglichen:

1. die Aussenluft stetig mit dem ELR vorkühlen,
2. die Aussenluft mit dem LuKo in der Nacht (10.00 Uhr bis 06.00 Uhr) vorkühlen (durch u.a. Nutzung des Strahlungsaustausches mit dem Himmel),
3. reine passive Kühlung in der Nacht anwenden (Strahlungsaustausch mit dem Himmel wurde dabei vernachlässigt)

Abbildung 20 illustriert die Variation der Hallenlufttemperatur im Laufe des Monats Juli 2014. Im Hinblick auf die thermische Behaglichkeit erzielt das Konzept mit dem ELR im Dauerbetrieb (Konzept 1) die beste Kühlausbeute, gefolgt von dem Solarluftkollektor (Konzept 2). Tabelle 4 fasst die durchschnittliche Kühlleistung der drei Konzepte für den Sommerzeitraum (13 Wochen) zusammen. Mit einer Laufzeit von 24 Stunden/Tag bietet der ELR (Konzept 1) im Durchschnitt fast doppelt so viel Kühlenergie wie die beiden anderen Konzepte. Der Beitrag des Strahlungsaustausches mit dem Himmel vom Luftkollektor beträgt ca. 1 kWh/d und ist somit von geringerer Bedeutung.

24-stündige Kühlung mittels ERL	28.8 kWh/d
Luftkollektor Nachtkühlung (1200 m ³ /h)	17.2 kWh/d
Passive Nachtkühlung mit Aussenluft „Standardlüftungsanlage“ (1200 m ³ /h)	16.2 kWh/d

Tabelle 4: Mittlere Kühlleistung im Sommer für 3 Konzepte der passiven Kühlung (Luftwechsel: 0,5)

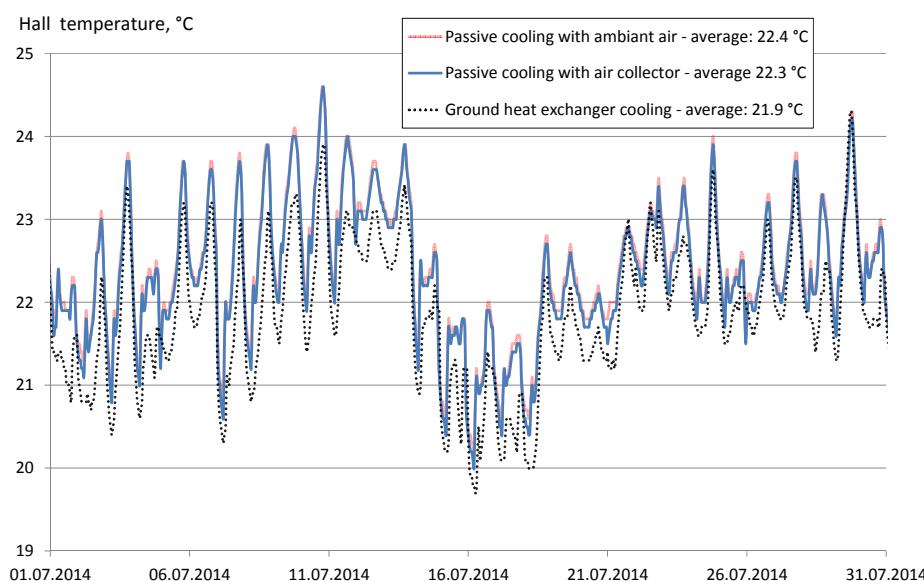


Abbildung 20: Vergleich der Kühlleistung von 3 passiven Kühlstrategien im Hinblick auf die erzielte Raumtemperatur in der Werkhalle

7.8. Jahreserträge und Effizienz

Im Rahmen einer Jahressimulation wurden unterschiedliche Anlagenkonzepte bei gleichem Nutzungsprofil miteinander verglichen (s. Abbildung 21).

1. *Referenzfall:* keine Nutzung von erneuerbaren Energieträgern. Die Aussenluftzufuhr wird nicht vorgewärmt. Die Raumheizung erfolgte durch ein Standard-Heissluftgebläse,
2. *WRG allein:* wie Referenzfall, aber die Aussenluftzufuhr wird durch einen Luft- Lufts-Wärmeüberträger mit einer Rückwärmezahl von 90% vorgewärmt,
3. *LuKo+WRG, das ganze Jahr:* Der LuKo und die WRG sind das ganze Jahr über in Betrieb. Die Wärmerückgewinnung wird umgangen, wenn der LuKo brauchbare Nutzwärme bietet. In der Halle können Temperaturen über 26 ° C auftreten, vor allem im Sommer,
4. *LuKo+WRG 10.10. bis 15.05.:* die WRG läuft das ganze Jahr, der LuKo erst ab 10. Oktober bis zum 15. Mai. Dies ist in der Simulation der optimalste Betriebszeitraum für den LuKo am Standort Altdorf. Keine Überhitzung fand in der Halle statt,
5. *LuKo+WRG 1.10. bis 31.03.:* gleich wie vorher, aber der LuKo läuft beschränkt auf die kalte Jahreszeit (1.10. bis 3.03),
6. *LuKo+WRG 10.10. bis 15.05. mit LuKo Kühlung in der Nacht:* wie oben, aber mit passiver Kühlung in der Nacht im Sommer mit Hilfe vom LuKo (. 8 h / d, 5 Tage pro Woche, 13 Wochen lang),
7. *LuKo+WRG 10.10. bis 15.05. mit passiver Kühlung:* wie oben, aber passive Kühlung in der Nacht nur durch Aussenluft (kein Strahlungsaustausch mit Himmel),
8. *ERL+WRG:* Luft durch ein Erdluftregister vorgewärmt resp. vorgekühlt. Die WRG wird umgangen, wenn Vorkühlung mit ELR möglich.

Entsprechend den Simulationsergebnissen beträgt der Heizwärmebedarf der Lagerhalle ca. 24 MWh/a. Dabei sind sowohl Transmissionswärmeverluste als auch die Lüftungswärmeeverluste mit berücksichtigt. Der Beitrag der WRG zur Energieeinsparung beläuft sich auf ca. 5 MWh/a. Der Ganzjahresbetrieb des LuKo ermöglicht eine Energieeinsparung von ca. 9 MWh, führt jedoch manchmal zur Überhitzung der Halle (Temperatur über 26 °C, vor allem im Sommer). Besser geeignet ist ein Betriebszeitraum für den LuKo vom 10. Okt. bis zum 15. Mai. Bei ähnlichen Energieeinsparungen tritt jedoch keine Überhitzung auf. Beschränkt man den Betriebszeitraum des LuKo auf die „kalte Jahreszeit“ (1.10. bis 31.03.), so sinkt das Energiesparpotenzial auf 8 MWh/a.

Der Betrieb des LuKo im Sommer in der Nacht erzeugt einen Kühleffekt von 1,1 MWh / a, der ca. 70 kWh/a höher ausfällt als der Beitrag der passiven Kühlung durch Aussenluft. Die höchste Kühlwirkung wird allerdings durch ein ELR erreicht, das den ganzen Sommer (Tag und Nacht) betrieben wird. Das Vorwärmepotential des ELR liegt jedoch mit 1 MWh/a wesentlich tiefer als das eines LuKo (6,7 MWh/a). In der Praxis besteht die Aufgabe des ELR im Winter darin, das Einfrieren der WRG dank Vorerwärmung der Aussenluft auf über 0 °C zu verhindern. In der Tat besteht bei einem ELR keine "direkt nutzbare Heizleistung", da die Aussenluft im ELR im Winter kaum über 10 °C erwärmt werden kann (unter mitteleuropäischen Wetterverhältnissen).

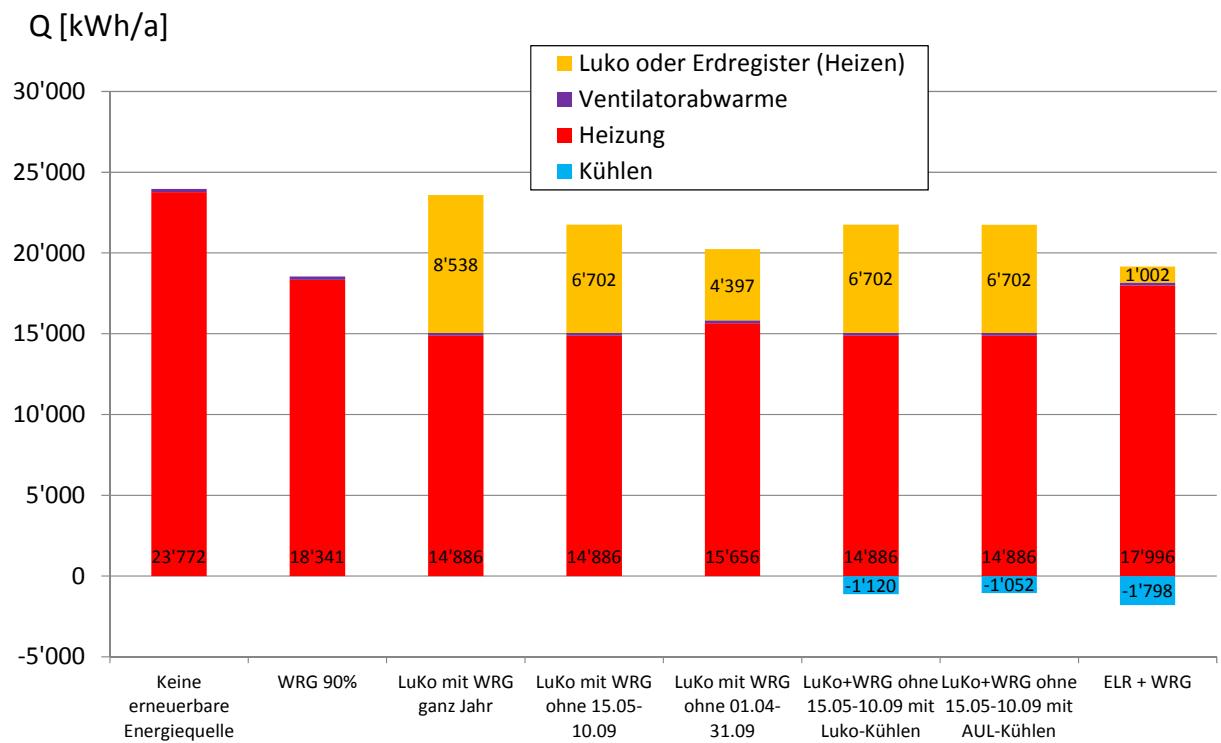


Abbildung 21: Ergebnisse einer Jahressimulation (Endenergiebedarf).

8. Fazit

Im vorliegenden Projekt wurde eine Pilot- und Demonstrationsanlage an einem bestehenden Nichtwohn-Gebäude gebaut und ein Jahr lang vermessen. Neben der Energieeffizienz bildeten Aspekte wie Wartungsbedarf, Hygiene, Schallemission und Regelstrategie die weiteren Schwerpunkte der Untersuchung.

Trotz unterdurchschnittlicher Jahreseinstrahlung stimmen die Messergebnisse mit Literaturangaben gut überein. Während der kalten Jahreszeit lieferte der Luftkollektor 140 kWh/m^2 Nutzwärme, bezogen auf der Kollektorfläche. Erweitert man den Beobachtungszeitraum auf die Zeit zwischen dem 10. Oktober und dem 15. Mai (Zeitraum mit realem Heizbedarf), steigen die Solarerträge auf rund 200 kWh/m^2 – ein Resultat, das gut mit der Fachliteratur korreliert. Wird der Hilfsenergiebedarf miteinbezogen, kann gemäss den Messergebnissen ein Luftkollektor genau so effizient arbeiten, wie ein wasser durchströmter Kollektor, ist aber in der Herstellung i.d.R. weniger aufwändig.

Bei der Auswertung der Messergebnisse wurde zwischen den Anteilen Luftvorerwärmung und solarer Raumheizungsunterstützung unterschieden. Der Erstgenannte gibt den energetischen Aufwand an, um die Aussenluft auf Hallentemperatur zu erwärmen, während der Zweite den Beitrag zur Raumheizung beschreibt. Mit einem Anteil von 58% überwiegt die Funktion „Raumheizungsunterstützung“. Im Gegensatz zu einem Luftregister kann ein solares Zuluftheizsystem, neben der Vorerwärmung der Aussenluft, einen substantiellen Beitrag zur Deckung der Transmissionswärmeverluste vom Gebäude liefern.

Im Messzeitraum funktionierte das Lüftungssystem störungsfrei. Die gewählte Steuerstrategie und die verwendete Hardware ermöglichen einen stabilen und zuverlässigen Betrieb der Anlage. Auch das eingesetzte Monitoringequipment erwies sich als belastbar und wartungsarm. Die automatisierte Tagauswertung hatte viele Hilfsfunktionen, wie z.B. Überwachung der Messtechnik und Generierung von Warnmeldungen (Watchdog-Funktionen).

Im Rahmen der Hygieneinspektion wurde das Leitungsnetz mit einer Kanalkamera inspiziert. Trotz fehlendem Aussenluftfilter lag die Staubansammlung im Kanal im üblichen Mass für diesen Typ von Zuluftanlagen. Auch die Laborergebnisse wiesen keinen Hygienemangel in der Anlage auf. Aufgrund der geringen Betriebsdauer der Anlage (ca. 4000 Stunden) haben diese Laborergebnisse aber eine beschränkte Aussagekraft.

An der Pilotanlage wurde ebenso eine Schallmessung durchgeführt. Da Luftkollektoren noch über keine Prüf norm verfügen, wurde ersatzweise auf die Vollzugshilfe 6.21 des Cercle Bruit zurückgegriffen. Werden die Grenzwerte für Schallemissionen aus Industriehallen der Lärmschutzverordnung als Grundlage der Beurteilung herangezogen, erfüllen die Schallwerte die Anforderungen der Personen kategorie „sehr empfindlich“. Auch bei höheren Volumenströmen als in dieser Arbeit empfohlen, liegen die Schallemissionen in einem zulässigen Bereich, auch ohne aufwendigen Schalldämpfer.

In dem Projekt wurde der Versorgungsfall „Lagerhalle“ abgebildet, ergo ohne durchgehende Belegung der Halle. Deshalb musste im Messzeitraum nicht ständig gelüftet werden, sondern lief die Anlage im Betriebsmodus „temperaturgesteuert“. Solange die Temperatur im Kollektor nicht 18°C überschritt, ruhte die Anlage. So entstanden nachts oder an sonnenarmen Tagen keine Lüftungswärmeverluste. Wäre die Anlage allerdings im Betriebsmodus „zeitgesteuert“ betrieben worden, wären auch bei einer Temperatur unter 18°C Solarerträge entstanden. Somit wären die Jahreserträge höher gewesen.

In ihrem Beschluss vom 9. Januar 2015 hat die Konferenz der kantonalen Energiedirektoren der Schweiz, im Rahmen der MuKE 2014, eine Wärmerückgewinnungsanlage für Lüftungsanlage mit einem Volumenstrom von mehr als $1000 \text{ m}^3/\text{h}$ vorgeschrieben. Simulationen haben gezeigt, dass die Kombination eines solaren Zuluftheizsystems mit einer WRG durchaus sinnvoll sein kann. Dank eines Bypasses kann die WRG umgangen werden: Somit kann der Luftkollektor ungehindert seinen Beitrag zur Raumheizungsunterstützung liefern. Die Simulation empfiehlt zudem, dem Luftkollektor Vorrang zu geben, da dieser tendenziell weniger Druckverlust erzeugt und somit weniger Hilfsenergie benötigt.

Aus Sicht der Wirtschaftlichkeit lässt sich festhalten, dass wegen der Einfachheit des Kollektoraufbaus und seiner Montage, die in der Literatur zitierten Mehrinvestitionen von ca. 50 CHF/m² realistisch erscheinen. Die Messung hat zudem gezeigt, dass bei einem Volumenstrom von 1200m³/h der Stromverbrauch für die Überwindung des Druckverlustes vom Luftkollektor bei ca. 40 kWh/a liegt. Zudem bedurfte der Luftkollektor im Messzeitraum keiner besonderen Wartung. Mit einem Return on Investment von –denkbar– weniger als fünf Jahren sind solare Luftheizsysteme eine günstige, ökologische und einfache Lösung zur Frischluftversorgung und Raumheizungsunterstützung, speziell für Gebäude mit geringen thermischen Komfortansprüchen.

9. Diskussion / Würdigung der Ergebnisse / Erkenntnisse

9.1. Monitoring

Bevor die Ergebnisse des Monitorings diskutiert werden können, muss geprüft werden, ob die Ein-Jahres-Messung hinsichtlich Bestrahlung und Aussentemperatur in einem Durchschnittsjahr stattfand. Tabelle 5 fasst die Ergebnisse zusammen. An der Südwand betrug die gemessene normale Jahreseinstrahlung in Horw 680 kWh/ (m².a). Als 20 Jahre Mittelwert gibt die Meteonorm Datenbank 825 kWh/(m².a) an. Schlussfolgernd kann festgehalten werden, dass das Jahr der Messung kein "durchschnittliches" Jahr war, denn es wies weniger Sonneneinstrahlung, aber dafür eine höhere Aussentemperatur auf. Die Aussentemperatur wirkt sich sowohl auf Solarerträge und als auch auf Wärmeverluste aus. Modellrechnungen zeigen, dass die Gewichtung bei dem Parameter „Einstrahlung“ höher ist als bei dem Parameter „Aussentemperatur“. Somit ist für das Jahr 2014 weniger Solarerträge zu erwarten, als im „Durchschnittsjahr“.

	Meteonorm average for Lucerne (Switzerland). 1990-2010	Measured data in Horw (nearby Lucerne)
Global radiation on vertical south facing surface	824 kWh/(m ² .a)	680 kWh/(m ² .a)
Average daily outside temperature	10.0	11.3 °C

Tabelle 5: Vergleich der Durchschnittswerte für den Zeitraum 1991 bis 2010 und den Zeitraum der Messung

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die Ergebnisse des Monitorings. Im Zeitraum 1. Oktober 2014 bis 31. März 2015 betrug der gemessene Solarertrag 140 kWh/(m².a) Nutzwärme. Würde man diesen Zeitraum auf diejenigen Tage erweitern, die real einen Heizbedarf aufweisen (d.h. vom 10. Oktober 2014 bis zum 15. Mai 2015) steigt der Solarertrag auf ca. 200 kWh/m².a, ein Ergebnis, das gut mit der Literatur übereinstimmt.

Zudem wurde das Demonstrationsprojekt an einem "unbemannten" Gebäude (VeGaSin-Halle) durchgeführt. Wegen Energiesparvorgaben wurde die Lüftungsanlage die ganze Zeit im "temperaturgesteuerten" Modus betrieben. Das Gebläse lief erst, wenn der Kollektor Wärme auf einem brauchbaren Niveau (d.h. wärmer als 18 °C) lieferte. Dieses Szenario illustriert ausgesprochen gut den Fall, in dem Solarluftkollektoren in Lagerhäusern eingesetzt werden, bei denen die Belegung weniger als 3 Stunden pro Tag beträgt und somit eine Dauerlüftung nicht zwingend ist. Für Gebäude mit Dauernutzung (z.B. eine Produktionshalle) ist der "temperaturgesteuerte" Betriebsmodus nicht geeignet. In diesem Fall muss die Zuluftanlage solange betrieben werden, wie sich Menschen in der Halle aufhalten. In diesem Fall würde Abbildung 18 ein wenig anders ausfallen, denn der Luftkollektor müsste auch Nutzwärme an Tagen mit geringer Bestrahlung bereitstellen, ohne den Sollwert von 18 °C zu erreichen. Daher ist zu erwarten, dass die Jahres-Solarerträge mit dem Betriebmodus "gemäss Fahrplan" ein wenig höher sein dürften.

9.2. Hygiene

Die Hygieneuntersuchung wurde nach ca. 2 Jahren Anlagenbetrieb durchgeführt. Zu diesem Zeitpunkt wurden keine Mängel festgestellt. Mit aber ca. 2000 Betriebsstunden pro anno ist die Aussagekraft dieses Befundes in Frage zu stellen. Bei der Kontamination von Lüftungsanlagen spielt der Faktor Zeit eine essentielle Rolle. In der Tat muss ein Biofilm eine bestimmte Grösse erreicht haben, bis Bakterien oder Pilze von der vorbeiströmenden Luft mitgerissen werden können. Bei der Wachstumskinetik von Biofilm spielen die Parameter Temperatur und Feuchte eine ausschlaggebende Rolle.

Generell empfiehlt die SWKI VA106-1 eine Hygieneinspektion alle 2 bzw. 3 Jahre, abhängig vom Betrieb einer Befeuchtungsanlage. Für Anlagen im Wohnbereich werden sogar höhere Inspektionsintervalle von bis zu 5 Jahren empfohlen [Sicre et al. 2011].

Reichen 4000 Betriebsstunden für die Beurteilung der Anfälligkeit von solaren Luftheizsystemen gegenüber hygienischen Mängeln?

Zwar weist die Anlage in Horw gegenüber herkömmlichen Lüftungsanlagen in Büro- oder Wohngebäuden eine relativ niedrige Laufzeit auf. Der Luftkollektor steht jedoch draussen an der Fassade und wurde den Witterungsbedingungen, insbesondere Temperaturschwankungen und der Gefahr von Kondensationswasser stetig ausgesetzt. Deshalb schränkt die niedrige Laufzeit der Anlage nicht die Aussagekraft ein. Obendrein wurde die Anlage ohne Filter betrieben, was theoretisch den Staubeintritt in die Anlage begünstigen würde. Übermäßig viel Staub wurde aber bei der Sichtprüfung im Kanalnetz nicht festgestellt. Die Mikroperforationen des Luftkollektors übernehmen die Rolle eines Grob-filters und halten z. T. die Grobpartikel und die Kerbtiere vom Lüftungssystem fern.

Zudem wird vermutet, dass die wechselnden Lufttemperaturen, mit Spitzen bis zu 45 °C im Winter, das Wachstum von Biofilmen verhindern. Die resultierende niedrige Luftfeuchtigkeit im Kanalnetz erschwert ebenso eine starke Keimvermehrung.

Die vorliegenden Resultate erlauben keine generelle Aussage zum Hygienerisiko. Hierfür müsste regelmässig eine Hygieneuntersuchung durchgeführt werden. Es kann aber behauptet werden, dass solare Zuluftsysteme keine grössere Hygienegefahr darstellen als andere Luftvorerwärmungstechnologien. Solare Zuluftsysteme sollten, wie von der SWKI VA 106 verlangt, alle 3 Jahre von einem Fachmann hygienisch untersucht werden.

9.3. Hygiene und Energieeinsparung

Erdwärmetauscher sind beliebte Systeme zum Kühlen (und Heizen) in Gebäuden mit Lüftungsanlagen. Durch die Nutzung der nahezu konstanten Erdtemperatur bei 8 bis 10 °C reduzieren sie den Aufwand für die thermische Behandlung der Aussenluft. Im Sommer aber kondensiert ein Teil der Feuchtigkeit der warmen Aussenluft im vergrabenem Rohr. Das Kondensat lässt sich nicht immer gut abführen und damit wurden Bedenken hinsichtlich Luftqualität und Hygiene laut. Im Falle eines LuKo ist die Gefahr von stehendem Kondensationswasser im Kollektorzwischenraum aufgrund wiederkehrender Temperaturanstiege in der Regel eher gering. In dem Projekt wurde eine Hygieneuntersuchung mit Keimuntersuchung durchgeführt. Diese zeigte, dass nach zwei Jahren Betrieb der Luftkollektor in Horw die Zuluft nicht mit Keimen anreichert.

In Bezug auf Energieeinsparungen zeigte die Simulation im Kap. 7.6 obendrein, dass der LuKo das Potenzial hat, sechs mal mehr Nutzwärme an das Gebäude zu liefern, als das ELR. Allerdings kann das ELR doppelt soviel Kühlenergie im Sommer bereitzustellen als der LuKo (s. Abbildung 21). In Bezug auf Hilfsenergie (d.h. den Strom für das Gebläse um Druckverluste zu überwinden) sollten die Druckverluste der beiden Vorwärmseinrichtungen der Literatur zufolge in der gleichen Größenordnung sein [Eicker 2005].

Im Vergleich zu etablierten Technologien wie ELR zeigt der LuKo keinen wesentlichen Nachteil in Bezug auf Energieeinsparung oder Betriebskosten. Ob man sich für einen LuKo oder ein ELR entscheiden sollte, hängt im Wesentlichen vom Kühlbedarf im Sommer ab. Muss die Aussenluft im Sommer gekühlt werden, wie z.B. in einem Bürogebäude, ist ein ELR von Vorteil. Reicht die Nachtkühlung aus, empfiehlt sich ein LuKo.

9.4. Energieeffizienz

Der Begriff Effizienz ist immer relativ, d.h. er bezieht sich auf eine Vergleichsgröße. Im Fall solarer Luftheizsysteme könnte eine wasser durchströmte thermische Solaranlage ein gutes Benchmark sein, dieser liegt aber in Horw physisch nicht zur Verfügung. Deshalb wurden die PV-Laminate als Refe-

renzanlage herangezogen, obwohl dem Autor bewusst ist, dass es sich mit 6% Modulwirkungsgrad (Herstellerangabe) dabei nicht um eine State-of-the-Art-Anlage handelt.

Die Diskussion bezieht sich auf die Messergebnisse aus den Tabellen Tabelle 2 und Tabelle 3. Die Ausrichtung und Neigung, die Witterungsbedingen, die Beschattungsbedingungen sind für beide Anlagen identisch. Der Betrieb unterscheidet sich darin, dass das solare Luftheizsystem temperaturgesteuert⁵ war und somit nicht das ganze Strahlungsangebot verwenden konnte.

Bei PV-Laminat wurden Stromerträge von 15.5 kWh/m² in den 6 Wintermonaten erzeugt. Wird angenommen, dass sich Stromerträge linear zum Wirkungsgrad verhalten, käme man bei einem Wirkungsgrad von 22% (für die modernsten PV-Anlagen) zu dem Ergebnis von 58.3 kWh. Möchte man mit der PV-Anlage genau so viel Wärme erzeugen wie der Luftkollektor (140 kWh/m²), so benötigt man eine Wärmepumpe mit einer Jahresarbeitszahl von umgerechnet 2.4, was bei modernen Wärmepumpen angesichts des Temperaturniveaus zweifellos zu erzielen ist.

Betrachtet man allerdings den Investitions- und Installationsaufwand sowie den Grauenergieeinsatz, fällt einem die Entscheidung nicht mehr so leicht. Wer nur einen Teil der Fassade für Energiegewinnungszwecke nutzen kann und eine hohe Luftwechselrate sichern muss, für den bleibt ein solares Luftheizsystem eine echte Alternative.

10. Ausblick

Die Messung zeigte, dass der LuKo mindestens genauso effizient und zuverlässig arbeitet wie andere, besser etablierte erneuerbare Energietechnologien.

Das Demonstrationsprojekt lässt derzeit aber noch Fragen offen. Werden die Hygieneanforderungen an die Fassadenkollektoren eingehalten? Entwickeln sich z.B. Spuren von Rost? Wie verhalten sich die solaren Kollektoren nach 20 Betriebsjahren? Entstehen massgebliche gesundheitliche und technische Probleme, die eine ausführliche Wartung nötig machen? Wie sind diese durchzuführen? Verändern diese Massnahmen eventuell die Wirtschaftlichkeit?

Zudem stand im Projekt eine verhältnismässig kleine Kollektorfläche (Höhe: 2m, Breite: 12 m, total 24 m²) zur Verfügung. Für die Zielsetzung des Projekts war das in Ordnung, denn der wichtigste Aspekt der Untersuchung war das Verhalten der solaren Kollektoren. Fassadenkollektoren werden allerdings vorzugsweise an sehr grossen Fassaden montiert. Flächen von etwa 500 m², mit einer Höhe von über 10 Metern, sind keine Seltenheit. Hier müsste folglich untersucht werden, wie sich die solaren Luftkollektoren bei grossen Flächen verhalten und ob auch hier Wirkungsgrade von 50% oder sogar mehr erreicht werden können. Dabei würden die Anzahl und die Anordnung der Ansaugungen wesentliche Rollen spielen.

Den grössten Untersuchungsbedarf sehen die Autoren allerdings bei der Kombination einer Wärmerückgewinnungsanlage mit einem Luftkollektor. Die Simulation belegt die energetische Sinnhaftigkeit dieses Konstruktes. Diese muss aber noch messtechnisch validiert werden. Zukunftsnahe, vorm Inkrafttreten der MuKE 2014, soll eine Versuchsanlage ausgestattet werden, damit Betriebserfahrung und Auslegungsempfehlungen generiert werden können.

⁵ Der Zielwert betrug 18 °C und die Hysterese 2 K.

11. Literaturverzeichnis

- [Banse 2010] Banse, S. (2010): upswing for hot air. Sun & Wind Energy 12. Bielefelder Verlag; GmbH & Co. KG. Bielefeld
- [Biermayr et al. 2011] Biermayr,P., Eberl, M. et al: Innovative Energietechnologien in Österreich, Marktentwicklung 2010. BMVIT Bericht. Kap. 8.1. Wien
- [Cercle 2013] Cercle bruit (2013): Lärmtechnische Beurteilung von Luft / Wasser-Wärmepumpen. Vollzugshilfe 6.21 der Vereinigung kantonaler Lärmschutzfachleute. Solothurn
- [Eicker 2005] Eicker, U. et al (2005): Evaluierung Passiv-Bürohaus Lamparter. Report of Stuttgart University of applied science, p. 26, Stuttgart. In German.
- [Eicker 2012] Eicker, U. (2012): Solare Technologien für Gebäude. Grundlage und Praxisbeispiele. 2. Überarbeitete Auflage. Vieweg+Tebner Verlag. ISBN 978-3-8348-1281-0. Wiesbaden.
- [EN ISO 9806] ISO 9806 (2014): Solarenergie – Thermische Sonnenkollektoren – Prüfverfahren. Deutsche Fassung. Beuth Verlag, Berlin
- [Filleux und Gütermann 2010] Filleux, C., Gütermann, A (2010). solare Luftheizsysteme, 2nd edition, 2010, Staufen, Germany: Ökobuch-Verlag.
- [Hastings et al. 2000] Hastings R, Mørck O, editors. Solar air systems a design handbook (2000). London: James & James.
- [Hollick 1998] Hollick, J.L. (1998): Solar cogeneration panels. Renewable Energy, 15, 195-200.
- [ISE 2014] Fraunhofer ISE (2014): Test report according to EN 12975-1:2006+A1:2010 /EN ISO 9806:2013. Prüfbericht Nr. 2014-26. Freiburg/Breisgau
- [Kramer 2013] Kramer, K.: IEA-SHC task 43: Solar rating and certification procedure. IEA SHC. Bericht IEA SHC task 43. Heruntergeladen von <http://task43.iea-shc.org/> (letzter Zugriff: Juli 2015)
- [Kreher 2011] Kreher, K.(2011): Versuchsstand für die ganzheitliche Sanierung von Industriehallen VEGASIN. Schlussbericht zum Forschungsprojekt Vegasin. Hochschule Luzern. Luzern.
- [LSV 2015] Lärmschutzverordnung (2015): Gesetz des Schweizerischen Bundesrates. Bern
- [SFHF 2013] Schweizerischer Fachverband für hinterlüftete Fassaden (2013): persönliche Mitteilung, Luzern
- [SIA 181] SIA 181 (2006): Schallschutz im Hochbau. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein. Zürich
- [Sicre et al. 2011] Sicre, B., Ganz, R., Nägeli, A., et al (2011): Hygienezustand von Raumlufttechnischen Anlagen in der Schweiz ; Schlussbericht; Hochschule Luzern, Luzern
- [Sicre 2012] Sicre, B. (2012). Solar air collectors for the refurbishment of factory buildings. Paper presented at the 6th Energy Forum on Advanced Building Skins, Brixen
- [Sicre und Dürr 2013] Sicre, B.; Dürr, M. (2013). Solar air collectors for the refurbishment of factory buildings. field experiment. Paper presented at CISBAT 2013, Lausanne.
- [Stryip-Hipp et al. 2010] Stryip-Hipp, G., Kramer, K., Hermann, M., et al. (2010): neue Perspektiven für Luftkollektorsysteme, Konferenzband OTTI thermische Solarenergie, p. 37-42, Bad Staffelstein

- [Sun Wind 2010] Sun and Wind energy(2010): upswing for hot air – a market study for air collector. Sun and Wind Energy s. 62-65 Ausgabe 12/2010. Bielefeld
- [Unisolar 2009] Unisolar (2009). Solar Laminate PVL-Series - Model: PVL-144
- [Ventilator 2015] Ventilator 5. Publikation des Schweizerischer Fachverbands für hinterlüftete Fassaden SFHF.
http://www.sfhf.ch/wAssets/docs/Hilfsmittel/Ventilator_5_Fassade-als-Kraftwerk.pdf (letzter Zugriff: Sept. 2015)
- [Wip 2014] Wip, E. (2014): Test eines unabgedeckten perforierten Luftkollektors nach ISO 9620. Persönliche Kommunikation. Luzern
- [Zakovorotnij et al 2015] Zakovorotnij, A., Sicre, B., Zwahlen M. (2015): Simulationsstudie von solaren Zuluftheizsystemen; interner Bericht, Hochschule Luzern. Luzern

12. Glossar

Symbole

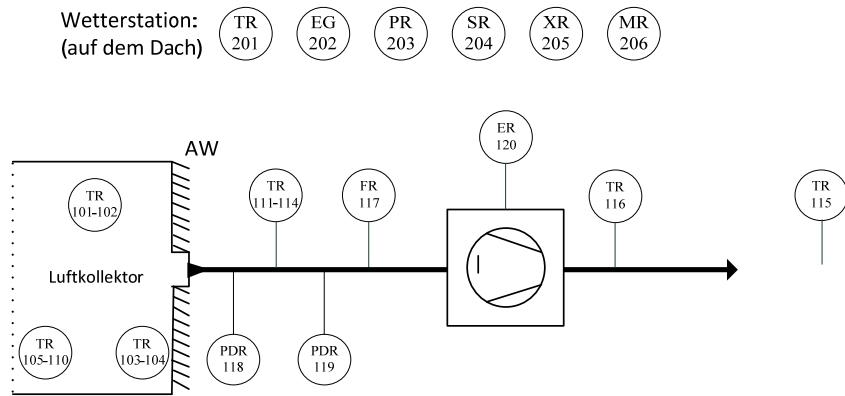
Q_{LuKo}	Heizleistung Luftkollektor	(W)	ϑ_e	Kollektoraustritttemperatur	(°C)
A	Absorberfläche	(m ²)	ϑ_s	Himmeltemperatur	(K)
G_{90}	Globalstrahlung auf eine senkrechte Fläche	(W/m ²)	u	Windgeschwindigkeit	(m/s)
ϑ_a	Aussenlufttemperatur	(°C)	η	Kollektorkoeffizient	-
ρ	Luftdichte	kg/m ³	V_p	Luftvolumenstrom	m ³ /s
k	Steigung der Kollektorkennlinie	K*m ² /W	Cp	Spez. Wärmekapazität der Luft	J/(kg.K)

Abkürzungen

ABL	Abluft
AUL	Aussenluft
DIN	Deutsches Institut für Normung
ELR	Erdluftregister
KBE	Kolonienbildende Einheit
LuKo	Unabgedeckter perforierter Luftkollektor
MuKEN	Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich
VegaSin	Versuchsstand für ganzheitliche Sanierung von Industriehallen
WRG	Wärmerückgewinnung
ZUL	Zuluft

13. Anhang

Anhang 1: Messkonzept für das solare Luftheizsystem



Gemessene Größen

Lüftungsanlage

Temperaturen:

- TR101-TR102 Lufttemperatur Kollektor
- TR103-TR104 Oberflächentemperatur Aussenfassade
- TR105-TR110 Oberflächentemperatur am Luftkollektor
- TR111-TR114 Temperatur nach Luftkollektor
- TR115 Raumlufttemperatur
- TR116 Zulufttemperatur nach dem Ventilator

Sonstiges:

- FR117 Durchfluss Luft
- PDR118-119 Differenzdruck

Elektrische Größen:

- ER120 elektr. Leistungsaufnahme Ventilator

Wetterstation:

- TR201 Aussenlufttemperatur
- EG202 Temperatur Globalstrahlung
- PR203 Barometerdruck
- SR204 Luftgeschwindigkeit
- XR205 Luftrichtung
- MR206 Aussenluftfeuchte

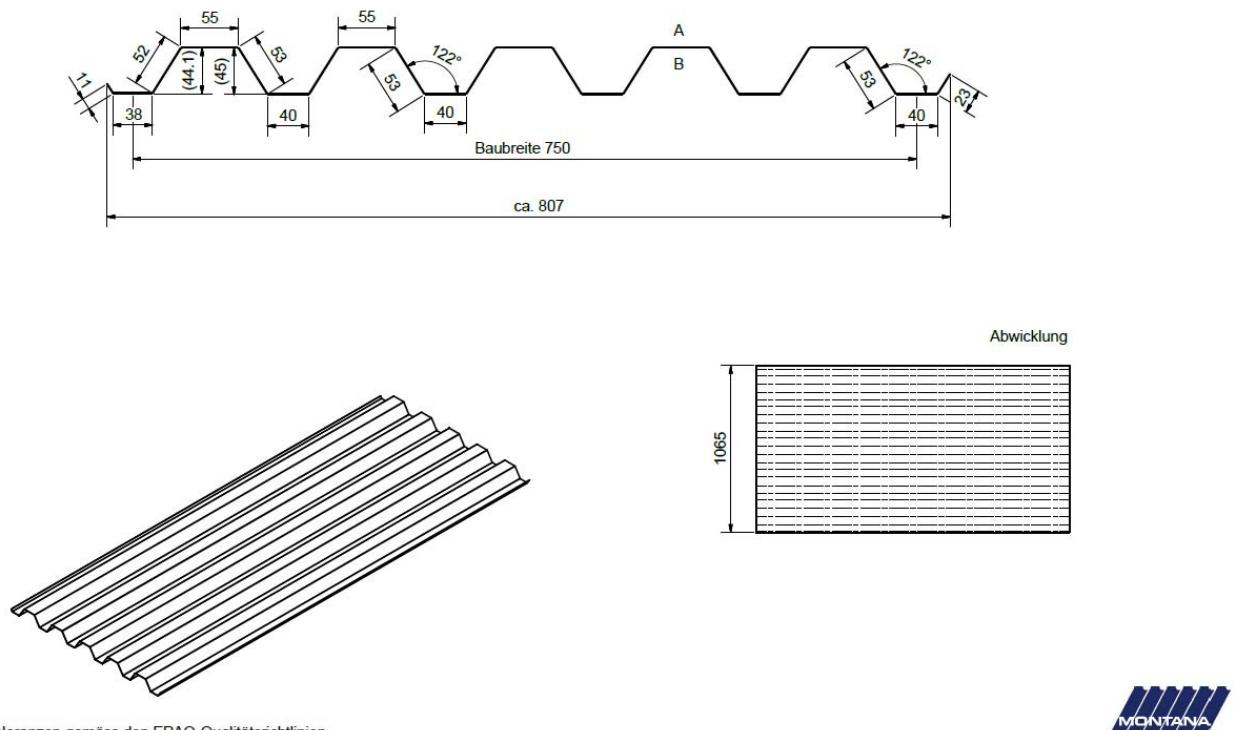
Abbildung 22: Messkonzept für das System Luftkollektor + Lüftungsanlage

Berechnete Größen

Formelzeichen	Einheit	Definition
$T_{Koll_{\text{m}}} = \frac{\text{TR105} + \dots + \text{TR110}}{6}$	°C	Mittlere Kollektoroberflächentemperatur
$T_{Koll_{\text{a}}} = \frac{\text{TR111} + \dots + \text{TR114}}{4}$	°C	Mittlere Kollektoraustrittstemperatur
$v_L = 237.83 \cdot PDR117^{0.3}$	m³/h	Volumenstrom am Staudruckmesskreuz (gemäss Kalibrierschein)
$m_L = \frac{384.3}{(273.15 + \text{TR121})} \cdot v_L$	kg/h	Umrechnung Massenstrom am Staudruckmesskreuz [Eicker 2012]
$dT_{Koll_{\text{w}}} = T_{Koll_{\text{a}}} - \text{TR115}$	°C	Temperaturdifferenz Kollektoraustritt-Halle (brauchbarer Temperaturgradient für Heizzwecke)

$dT_{Plen} = T_{Plen} - TR115$	°C	Temperaturgradient Kollektorinnen-Halle (Temperaturgradient für Transmissionswärmeverluste durch die Innenwand des Kollektors)
$dT_{Koll_au\bar{x}} = T_{Koll_au\bar{x}} - TR201$	°C	Temperaturanstieg im Kollektor
$dT_{ab\bar{s}er\bar{u}ng} = T_{Koll_au\bar{x}} - TR201$	°C	Temperaturdifferenz zwischen Absorber und Umgebung
$Q_{Koll_H} = \frac{m_E}{3600} \cdot \left(1006 + 0.05 \cdot \frac{T_{Koll_H} + TR115}{2} \right) \cdot (T_{Koll_H} - TR115)$	W	Heizleistung Luftkollektor/Halle
$Q_{Koll_A} = \frac{m_E}{3600} \cdot \left(1006 + 0.05 \cdot \frac{T_{Koll_A} + TR201}{2} \right) \cdot (T_{Koll_A} - TR201)$	W	Leistung Aussenluftherwärmung
$COP = \frac{(Q_{Koll_H} + ER120)}{ER120}$	-	Leistungsfaktor Kollektor (vereinfachte Berechnungsmethode)

Anhang 2: der perforierte Trapezblechsolarkollektor



Toleranzen gemäss den EPAQ-Qualitätsrichtlinien.



Abbildung 23: Technische Details zum eingesetzten Luftkollektor vom Typ SP45 (Quelle: Montana AG)

Anhang 3: automatisierte Datenverarbeitung

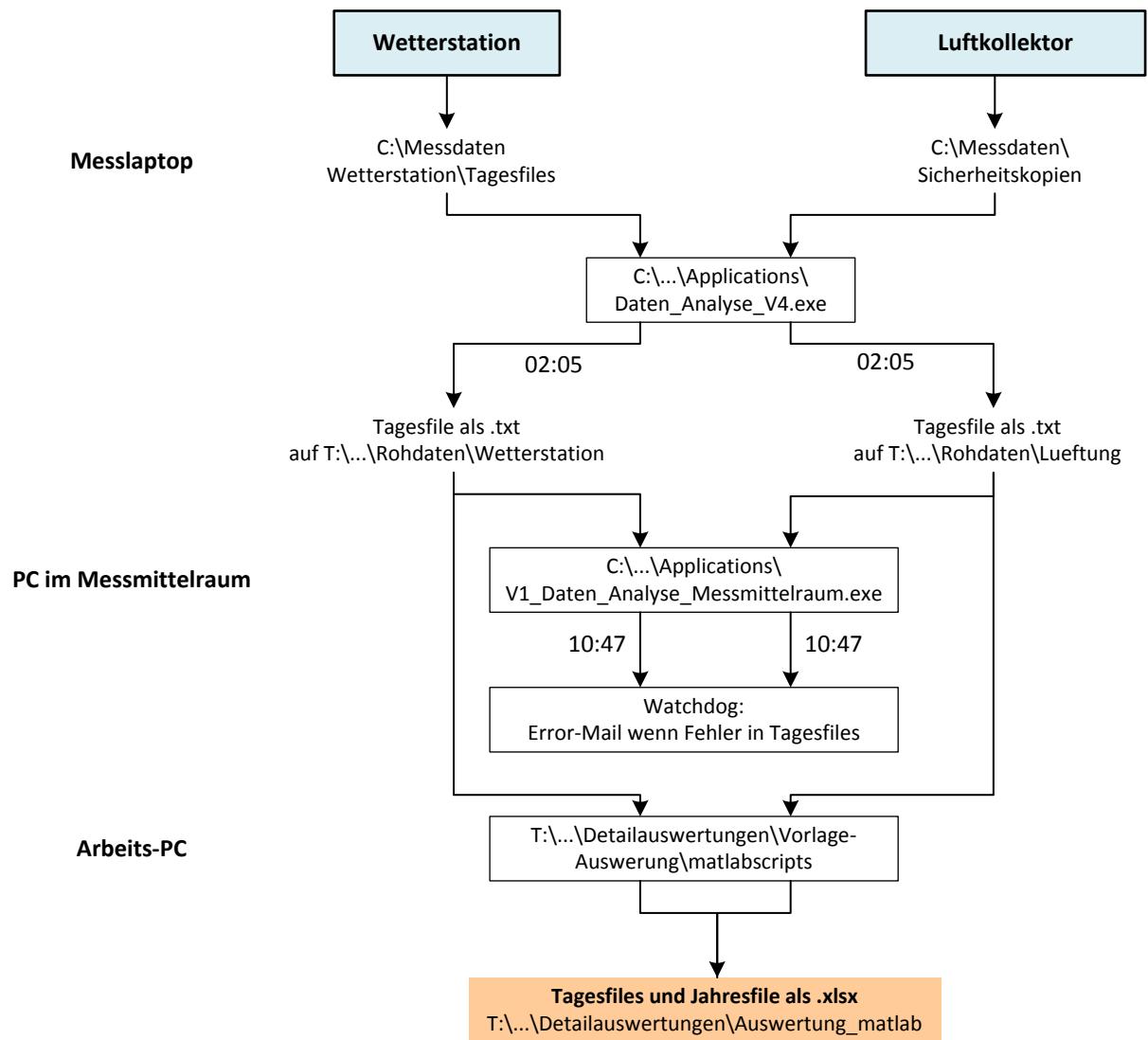


Abbildung 24: Aufbau des Systems zur Datenverarbeitung im Projekt mit Watchdog-Funktion und Daten-Feinauswertung. Der Luftkollektor und die Wetterstation werden separat geloggt. Eine Matlab-Routine vereint die Daten in einem Excel-File.