

PV/T-Schiefer

Optimierung der Energieeffizienz von Gebäuden durch
gegenseitige Ergänzung von Simulation und Messung am
Beispiel der Hinterlüftung gebäudeintegrierter Photovoltaik

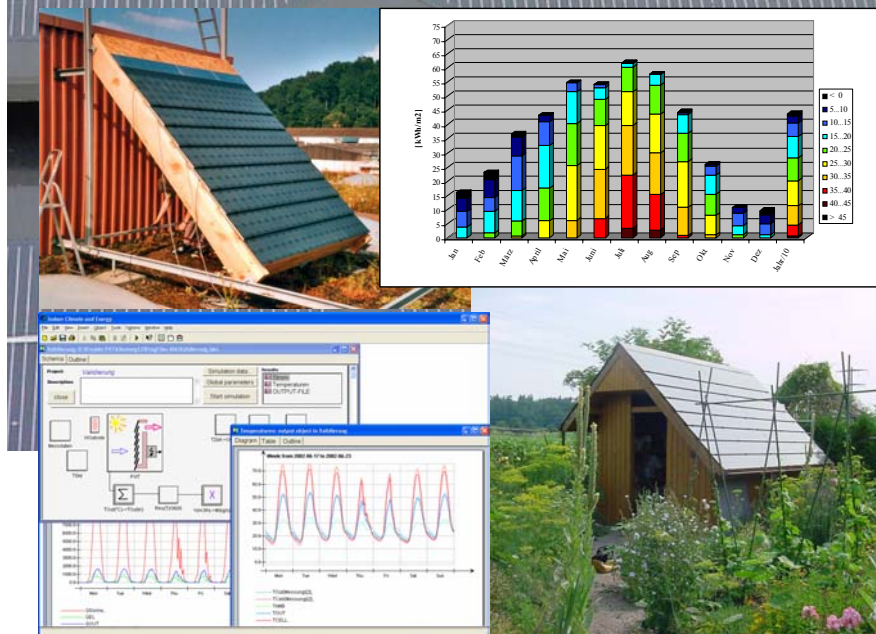
Ausgearbeitet durch

S. Kropf, ETH Zürich

Im Auftrag des

Bundesamtes für Energie

Dezember 2003



Auftraggeber:

Forschungsprogramm Rationelle Energienutzung in Gebäuden
Bundesamtes für Energie

Auftragnehmer:

Institut für Hochbautechnik, ETH Zürich

Autoren:

S. Kropf, ETH Zürich

Begleitgruppe:

A. Moser, ETH Zürich
G. Zweifel, HTA Luzern

M. Zimmermann, EMPA, Programmleiter „Rationelle Energienutzung in Gebäuden“
A. Eckmanns, Bereichsleiter Gebäude BFE

2003, als Dissertation an der ETH Zürich eingereicht

Diese Studie wurde im Rahmen des Forschungsprogrammes „Rationelle Energienutzung in Gebäuden“ des Bundesamtes für Energie erarbeitet. Für den Inhalt ist alleine der/die Studiennehmer/in verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Worblentalstrasse 32, CH-3063 Ittigen • Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. 031 322 56 11, Fax 031 323 25 00 • office@bfe.admin.ch • www.admin.ch/bfe

Vertrieb: EMPA ZEN, Überlandstrasse 129, 8600 Dübendorf, www.empa-ren.ch
ENET, Egnacherstrasse 59, 9320 Arbon, enet@temas.ch, www.energieforschung.ch

Inhaltsverzeichnis

Dieses Heft	Zusammenfassung	7
	Abstract	9
	Einführung	11
	Schlussfolgerungen	15
	Literaturübersicht	19
	Literaturverzeichnis	24
	Verdankungen	29
Heft 1 Labormessungen	1. Hintergrund und Ziele	5
	2. Das System	5
	3. Die Module	6
	4. Die Messung	8
	5. Überblick über die Resultate	11
	Zelltemperaturen	12
	Lufterwärmung	12
	Thermischer Komponenten-Wirkungsgrad	13
	6. Das Leck	14
	7. Einfluss der Spaltweite	15
	8. Einfluss des Neigungswinkels	16
	9. Die Messungen ohne Leck	20
	10. Die Resultate im Detail	21
	12. Literaturverzeichnis	23
	A. Messdaten (sonnige Tage)	25
Heft 2 Obstweg 12, Steinhausen	1. Hintergrund und Ziele	5
	2. Die Situation vor dem Bau der Anlage	5
	3. Die PV/T-Anlage	6
	4. Die Messung	8
	5. Die Simulation	10
	6. Die Optimierungsvorschläge	14
	7. Literaturverzeichnis	28
	A. Messdaten	31
	B. Simulationsresultate	37
Heft 3 Dynamisches Simulationsmodell	1. Hintergrund und Ziele	5
	2. Das physikalische System	6
	3. Die Strömung der Luft	7
	4. Die Energiebilanzen	8
	5. Der Überblick über das Modell	11
	6. Der NMF-Code	12
	7. Alle im Modell verwendeten Grössen	14
	8. Die Validierung	18
	anhand der Labormessung HTA	19
	anhand der Feldmessung Steinhausen	27
	Zusammenfassung	32
	Fazit	33
	9. Literaturverzeichnis	33

Heft 4 Ertragsatlas	1. Hintergrund	5
	2. Die Simulation mit IDA	5
	3. Die Rechenfälle	6
	4. Die Resultate	7
	5. Literaturverzeichnis	9
	A. Ertragsatlas	11
Heft 5 Anwendungsbeispiele und Fallstudien	1. Hintergrund	5
	2. Vorüberlegungen	5
	Nutzungsvariante a:	
	Brauchwasser-Vorwärmung	6
	Nutzungsvariante b:	
	Zuluft-Vorwärmung	7
	Nutzungsvariante c:	
	Zuluft-Vorwärmung alpin	8
	Nutzungsvariante d:	
	Aussenluft-Wärmepumpe	9
	Nutzungsvariante e:	
	Erdreich-Saisonspeicher	10
	Nutzungsvariante f:	
	Latent-Saisonspeicher	13
	3. Hotel in Lugano:	
	Brauchwasser-Vorwärmung	15
	Referenz-System (ohne PV/T)	15
	System mit PV/T	16
	Resultate	18
	Übersicht und Vergleich der Resultate	27
	4. Wohnsiedlung in Davos:	
	Erdreich-Saisonspeicher	28
	Referenz-System (ohne PV/T)	29
	System mit PV/T	31
	Resultate	32
	Übersicht und Vergleich der Resultate	37
	5. Diskussion der Resultate	38
	6. Literaturverzeichnis	38
	A. NMF-Modell Schichtspeicher	39
	B. NMF-Modell Luft-Wasser-Wärmepumpe	43
	C. NMF-Modell Erdwärmetauscher	47
	C.1. Das Modell	47
	C.2. Der NMF-Code	51
	C.3. Die Validierung	55
	C.3.1. Gitterstudie	55
	C.3.2. Vergleich mit FRACTure	62

Das Projekt wurde unterstützt durch:

Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm "Rationelle Energienutzung in Gebäuden"
Hochschule für Architektur Luzern, Zentrum für interdisziplinäre Gebäudetechnik

Zusammenfassung

Ohne Gebäudeintegration ist ein weiteres Wachstum der solaren Stromproduktion in dicht besiedelten Ländern aus Platz- und aus ästhetischen Gründen in heutiger Zeit nicht mehr denkbar.

PV(Photovoltaik)-Dächer und -Fassaden werden aber auf Grund ihrer dunklen Farbe sehr warm, was zu einem im Vergleich zu aufgeständerten Anlagen um bis zu 10 % schlechteren elektrischen Wirkungsgrad führt. Aus diesem Grund werden in der Praxis gebäudeintegrierte PV-Anlagen immer häufiger hinterlüftet geplant und realisiert, um eine optimale Kühlung der Solarzellen zu erreichen. Seit über 10 Jahren werden auch immer wieder Projekte beschrieben, bei denen versucht wird, die dabei in der Hinterlüftung gewonnene Wärme zu nutzen. Dies geschieht aber häufig ohne grossen Erfolg.

Grundsätzlich kann zwar viel Abwärme der Photovoltaik kontrolliert abgeführt werden, die Nutzung ist aber deshalb heikel, weil erstens die Wärme insbesondere im Sommer zur Verfügung steht und zweitens das Temperaturniveau sehr tief und zeitlich (saisonal und im Tagesrhythmus) stark schwankend ist. Um die in der Hinterlüftung gesammelte Energie nutzen zu können, muss deshalb der Wärmebedarf auf einem möglichst tiefen Temperaturniveau anstehen. Zusätzlich muss dieser Wärmebedarf vor allem im Sommer hoch sein oder es muss eine Methode zur Verfügung stehen, die Niedertemperaturwärme vom Sommer in den Winter zu speichern.

In etlichen publizierten Arbeiten über dieses Thema kommt man zum Schluss, eine Nutzung der Abwärme gebäudeintegrierter Photovoltaik lohne sich nicht. Tatsächlich ist es auch so, dass man kaum auf einen nennenswerten thermischen Nutzungsgrad kommt, wenn man den Wärmebedarf der heute gebräuchlichsten Gebäudeheizsystemen direkt mit dem Wärmeangebot einer PV-Hinterlüftung vergleicht.

Tatsache ist aber auch, dass hin und wieder von Projekten geschrieben wird, bei denen die Abwärmenutzung von Photovoltaik zur vollen Zufriedenheit des Bauherrn funktioniert. Die im vorderen Abschnitt erwähnten Aussagen können demzufolge nicht allgemein gültig sein. Die vorliegende Arbeit klärt offene Fragen in diesem Zusammenhang. Dabei wird nicht einfach ein weiteres Beispiel mit positiver oder negativer Schlussfolgerung beschrieben, sondern erstens der Frage nachgegangen, auf was es bei PV/T(photovoltaisch-thermischen)-Anlagen ankommt und zweitens für künftige Projekte die Möglichkeit geschaffen, den Nutzen der Warmluft bereits in der Planungsphase genügend genau abschätzen zu können.

Es wurde dazu ein Modell zur dynamischen Berechnung des Warmluftgewinnes für hinterlüftete Photovoltaik entwickelt. Weil dieses Modell in ein kommerzielles Gebäudesimulationsprogramm integriert ist, welches beliebig mit eigenen Modellen neuer Komponenten erweiterbar ist, kann damit der thermische Nutzen von PV/T-Anlagen für verschiedenste Anwendungen untersucht werden. Dies ermöglicht auch eine genügend genaue Abschätzung des Nutzungsgrades von PV/T-Anlagen für noch wenig oder gar nicht gebräuchliche Systeme. Mit dem Modell kann gezeigt werden, dass durch leichte Anpassungen auch Wärme aus der PV-Hinterlüftung zu einem genügend hohen Anteil genutzt werden kann. Dies insbesondere, weil der Zusatzaufwand für die Hinterlüftung erstens klein ist und zweitens sich schon allein wegen dem elektrischen Mehrertrag finanziell lohnt.

Die Anwendung eines dynamischen Simulationsmodells ist für die gemachten Abschätzungen deshalb notwendig, weil der Wärmenutzungsfahrplan einen direkten Einfluss auf das gewünschte Temperaturniveau und damit auf das Wärmeangebot hat und umgekehrt die Steuerung einer Wärmenutzung auf den Wärmeangebotsfahrplan reagieren kann. Das entwickelte Modell zeigt somit auch prinzipiell auf, wie das Scheitern neu entwickelter Gebäudekomponenten in der Praxis mittels Gebäudesimulation verhindert werden kann. Der Nutzen solcher Simulationen wird leider zu oft unterschätzt.

Heft 1 und Heft 2 stellen die Messberichte einer Labor- und einer Feldmessung dar, welche mit Prototypen eines hinterlüfteten PV-Ziegelsystems (PV/T-Schiefer) durchgeführt wurden.

In Heft 3 wird das Simulationsmodell zur dynamischen Berechnung des Wärmeertrages aus den zur Verfügung stehenden Klimadaten im Detail beschrieben und der sehr zufriedenstellende Vergleich zwischen den Messdaten aus Heft 1 und Heft 2 und den Simulationsergebnissen vorgestellt.

Im Ertragsatlas (Heft 4) ist der zu erwartende Wärmeertrag aufgeteilt in verschiedene Temperaturklassen für drei Orte in unterschiedlichen Klimaregionen der Schweiz (Zürich, Lugano, Davos) in Abhängigkeit von der Bauart (Dach oder Fassade) und der Steuerung der Hinterlüftung übersichtlich dargestellt.

In Heft 5 wird an Hand verschiedener Anwendungsbeispiele gezeigt, wie mit Hilfe des Ertragsatlases grobe Abschätzungen über den Nutzungs- und Deckungsgrad einer PV/T-Anlage gemacht werden können. Die beiden erfolgsversprechendsten Anwendungen (Brauchwasser-Vorerwärmung für ein Hotel in Lugano und Erdreich-Saisonspeicher für ein Minergie-Wohnhaus in Davos) werden ausgewählt und in kleinen Fallstudien mit Hilfe der entwickelten Rechnungsmodelle näher untersucht. Dabei kommt man auf weitere für allfällige Realisierungen wichtige Erkenntnisse, welche den Nutzen des dynamischen Simulationsmodells unterstreichen.

Die Arbeit zeigt, dass die Aussage, die Abwärme gebäudeintegrierter Photovoltaik sei nicht in genügendem Masse nutzbar, nicht a priori stimmt. Bei jeder geplanten gebäudeintegrierten Photovoltaikanlage sollte eine Hinterlüftung zur Kühlung der Zellen in Betracht gezogen werden. Meistens wird sich eine solche lohnen. Als zweites sollte in einem solchen Fall immer untersucht werden, ob allenfalls mit geringem Aufwand die Haustechnik mit Berücksichtigung der sozusagen gratis zur Verfügung stehenden Wärme so angepasst oder ergänzt werden kann, dass diese besser, zuverlässiger und/oder energieeffizienter funktioniert. Dabei kann das dynamische Simulationsmodell offene Fragen beantworten. Ob es schlussendlich gelingt, ein neues Haustechnik-System zu finden, welches im grossen Massstab mit geringem Planungsaufwand für die Einzelprojekte kopiert werden kann, wird sich erst in der Praxis zeigen.

Abstract

A further increase of photovoltaic electricity generation in densely populated countries is not conceivable without building integration for aesthetic reasons and for lack of space. But PV (photovoltaic) roofs and facades are heating up due to their dark colour. This leads to a reduction of the electrical efficiency of up to 10 % compared to free upright panels. For that reason PV plants are more and more planned and realized with a backside ventilation to achieve an optimal cooling of the cells. For more than ten years projects are described time and again where it is attempted to use the heat gained in the ventilation air, though often without much success.

Principally a large amount of PV waste heat can be recovered actively, but the use is delicate because the heat is available first of all in summertime and the temperature level is very low and highly fluctuating during daily and annual cycles. To make the thermal energy of the cooling air usable, the heat demand has to be at a temperature level as low as possible. In addition, this demand should be high during the summer season, or otherwise, there should be a possibility to store the low-temperature heat from the summer to the winter season.

A number of publications about this issue conclude that the use of the waste heat of building integrated PV is not worthwhile. In fact, no significant thermal yield can be achieved if the recovered heat from a PV/T-system is directly fed into a standard building heating system with a typical user profile.

On the other hand, projects are reported where the utilization of the PV waste heat is working to the complete satisfaction of the building owner. Therefore the above statements may not be universally valid. The present work addresses open questions in this context. This is done not by just adding another example with positive or negative conclusions, but by answering the question as to what affects the thermal yield of photovoltaic-thermal (PV/T) plants. In addition, a comprehensive method is introduced to accurately evaluate the optimal use of the heated air during the planning phase of future projects already.

A mathematical model of the dynamic gain from the hot air of ventilated PV systems is developed. Since this model is integrated into a commercial building simulation code that can be expanded with models of any new component, the thermal use of PV/T-plants' waste heat can be investigated for many different kinds of applications. This allows an evaluation of the thermal yield of less common or uncommon systems. In addition the model shows to what degree the heat of PV ventilation can be used in building systems. In particular it has been demonstrated that with proper adjustments, waste heat can be utilized to an extent of practical significance. Economically, the heat recovery pays off because the extra investment for hot air collection is low and because the PV ventilation is already paid by the increased electrical yield.

The use of a dynamic simulation model is necessary for the evaluation because of the direct influence of the utilization schedule on the requested temperature level and with that, on the heat supplied to the building system. In addition, the response of the system controller to the schedule of the heat provided by the PV/T units can accurately be simulated. With these features the developed model clearly shows how the failure of new building components can be avoided. The usefulness of dynamic simulation in that context cannot be overemphasized.

Book 1 and book 2 are reports of an outdoor experimental setup and of an in-situ measurement, which are performed with a prototype of a ventilated PV-tile system (PV/T-Slates).

In book 3 the simulation model for the dynamic calculation of the heat gain from the PV/T-Slates using available climatic data is described in detail. Further, the comparison of the measured data from book 1 and book 2 with the simulation results is presented. Excellent agreement was found.

In the yield atlas (book 4) the expected heat gain subdivided into classes of temperature is graphically presented for three locations in different climatic regions of Switzerland (Zurich, Lugano, Davos) depending on the construction type (roof or facade) and on the controlling strategy of the ventilation.

In book 5 with the help of the yield atlas it is shown how the degree of utilization can be estimated and how much of the end-use heat comes from the solar PV/T-system for any example of application. The two most promising applications (domestic hot water preheating for a hotel in Lugano and seasonal ground heat storage for a Minergie-house in Davos) are selected for detailed investigation by the new numerical model. Thereby other important findings for conceivable realizations result. This again shows the potential and usefulness of the dynamic simulation model.

This work shows that it is not a priori true that the waste heat of building integrated PV is always lost. For any planned building integrated PV system, air cooling should be considered. Quite often it will be energetically and economically worthwhile. In that case it should always be investigated if it is possible to adapt the building technology to the low-temperature heat provided for free in a manner that the whole system works more reliably and efficiently. Thereby the dynamic simulation model can answer essential questions. Time will show whether a new building technology system with the potential for large-scale use can be developed and copied at low planning cost for several projects.

Einführung

Im Bereich der gebäudeintegrierten Photovoltaik ist das Problem der Zellerwärmung und deren Einfluss auf den Stromgewinn ein bekanntes und reichlich abgehandeltes Thema. Eine Übersicht dazu findet man in ([1] Kropf 1999), Kapitel 2. Ergänzend zu dieser Referenzliste seien die Arbeiten [11] - [18] erwähnt (siehe Literaturübersicht). Zusammengefasst kann bei kristallinen Siliziumzellen von einem Temperaturkoeffizienten für die maximale Modulleistung von durchschnittlich $-0.5 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ausgegangen werden. Je nach Solarzellentyp kann dieser Koeffizient auch etwas kleiner oder grösser sein.

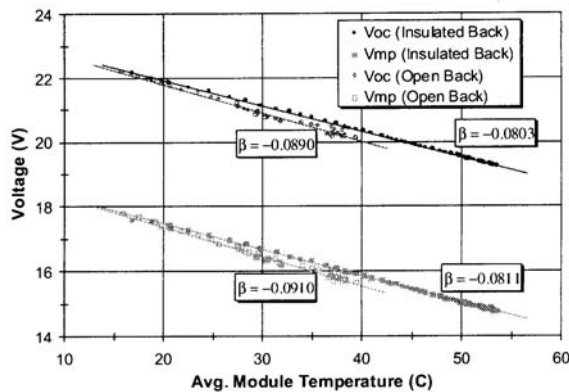


Fig. 1: Temperaturabhängigkeit der Zellspannung (aus [13] King et al. 1997)

Modul	I_{sc}	I_{mp}	U_{oc}	U_{mp}
ASE300, mc-Si	.00091	.00037	-.0036	-.0047
AO8225, Si-Film	.00084	.00026	-.0046	-.0057
M55, c-Si	.00032	-	-.0041	-.0053
SP75, c-Si	.00022	-	-.0039	-.0049
MSX64, mc-Si	.00063	.00013	-.0042	-.0052
SQ-90, c-Si	.00016	-	-.0038	-.0048
MST56, a-Si	.00099	.0023	-.0041	-.0039
UPM880, a-Si	.00082	.0018	-.0038	-.0037
US32, a-Si	.00076	.0010	-.0043	-.0040
SCI50, CdTe	.00019	-.0012	-.0037	-.0044

Tab. 1: Temperaturkoeffizienten für verschiedene kommerzielle Module bei $1'000 \text{ W/m}^2$ Einstrahlung (aus [13] King et al. 1997)

Die Kühlung der gebäudeintegrierten PV mittels Hinterlüftung findet in der Praxis deshalb immer häufiger Anwendung, weil dabei der Zusatzaufwand gegenüber dem elektrischen Mehrgewinn genügend tief gehalten werden kann. Eine Kühlung der Module mit Wasser ist zwar auch vielerorts ein Thema, bietet aber wesentlich mehr Probleme bei der Realisierung (ästhetische Akzeptanz, Dichtigkeit des Systems). Ausserdem liegt bei solchen Systemen das Interesse stärker auf der Seite der Wärmenutzung. Da es sich deshalb stets um geschlossene Kreisläufe handelt, kann ein höheres Temperaturniveau erreicht werden, was aber wiederum die Zellkühlung und damit den elektrischen Wirkungsgrad schmälert. Bei der Luftkühlung hingegen geht es in erster Linie um eine kostengünstige Verbesserung des elektrischen Ertrags und erst in zweiter Linie um die Nutzung der Wärme. Dies wiederum bedeutet, dass sich die Wärmenutzung auf dem tiefen und mit der Aussentemperatur stark schwankenden Temperaturniveau schwierig gestaltet, was nicht zuletzt die Herausforderung der vorliegenden Arbeit war.

Zum Thema "Kühlung gebäudeintegrierter Photovoltaik" findet man einiges an Literatur. Auch hierzu gibt es in ([1] Kropf 1999), Kapitel 2 einen Überblick bis 1998. [21] - [39] ergänzen diese Liste mit Arbeiten insbesondere jüngerer Datums (siehe Literaturübersicht). In den meisten dieser Publikationen wird nur der thermische Komponenten-Wirkungsgrad oder sogar nur die Zelltemperatur gemessen und/oder berechnet. Nur wenige gehen auch auf die Nutzung von durch PV-Kühlung gewonnener Wärme ein, beschreiben in diesem Fall aber lediglich ein konkretes Demonstrationsprojekt. Es fehlen hingegen durchweg die Arbeiten, bei denen ein entwickeltes Simulationsmodell zur Vorhersage des System-Nutzungsgrades einer oder gar mehrerer verschiedener Anwendungen verwendet wird, geschweige denn als Werkzeug zur ausführlichen Diskussion, in welchen Fällen eine Nutzung der PV-Abwärme Sinn macht, dient. Mit dieser Arbeit wird damit begonnen, hier eine Lücke zu schliessen.

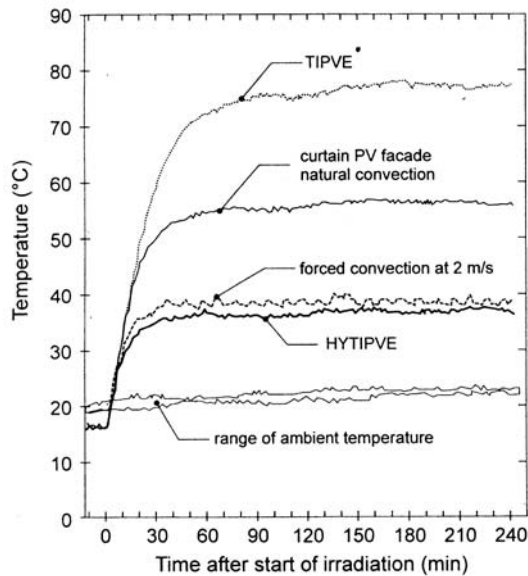


Fig. 2: Zelltemperaturen für verschiedene Kühlstrategien bei 700 W/m^2 Einstrahlung
 TIPVE: Wärme gedämmte Modulrückseite
 curtain PV: Frei hinterlüftetes Modul
 forced convection: Aktiv hinterlüftetes Modul
 HYTIPVE: Wassergekühltes Modul
 (aus [26] Krauter et al. 1999)

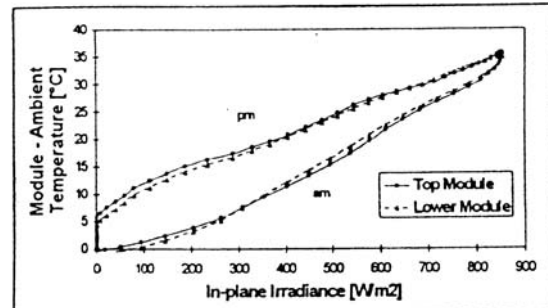


Fig. 3: Modulerwärmung (Unterschied zwischen Modul- und Umgebungstemperatur) in Abhängigkeit der solaren Einstrahlung für eine hinterlüftete Fassade
 (aus [20] Wilshaw et al. 1996)

Für die dynamische Modellierung der Zelltemperatur und der Luft-Austrittstemperatur wird ein möglichst einfacher Ansatz verwendet. Da die Wärme flüsse in den Modulen praktisch ausschliesslich in senkrechter Richtung zur Modulfläche zeigen, genügt ein 1-dimensionales Modell. Dass solche Modelle durchaus gute Übereinstimmung mit der Wirklichkeit zeigen, findet man u.a. in [34], [35], [36], [39], [41] und [42]. Etwas schwieriger gestaltet sich die Bestimmung der einzelnen Wärmeübergangskoeffizienten und anderer Parameter des Modells. Hierzu ist entweder eine äusserst genaue Messung vieler Zwischengrössen oder eine aufwändige Parameteranpassung bei der Validation notwendig.

Um gleichzeitig mit der Produktion der PV-Abwärme praktisch beliebige Anwendungen mitsimulieren zu können, wird das dynamische Modell in eine kommerziell verfügbare Simulationsumgebung eingebettet. Mit IDA ICE (siehe www.equa.se) konnte ein dafür ideales Programm gefunden werden, welches bereits unzählige detaillierte und gut validierte Modelle für die Gebäudesimulation beinhaltet und die Möglichkeit bietet, mit erstaunlich geringem Aufwand eigene Modelle zu schreiben und mit den bestehenden zu verbinden. Die Modellierung geschieht dabei mit dem NMF Translator (NMF = "neutral modelling format"), welcher die für die IDA Simulationsumgebung nötigen Dateien erzeugt (*.eo für die Benutzeroberfläche IDA Modeller und *.for für den IDA Solver). IDA ICE (ICE = "indoor climate and energy") ist eine Anwendung des IDA Modeller für die Gebäudesimulation und beinhaltet eine den IDA Modeller ergänzende benutzerfreundliche Oberfläche sowie eine Modell-Bibliothek.

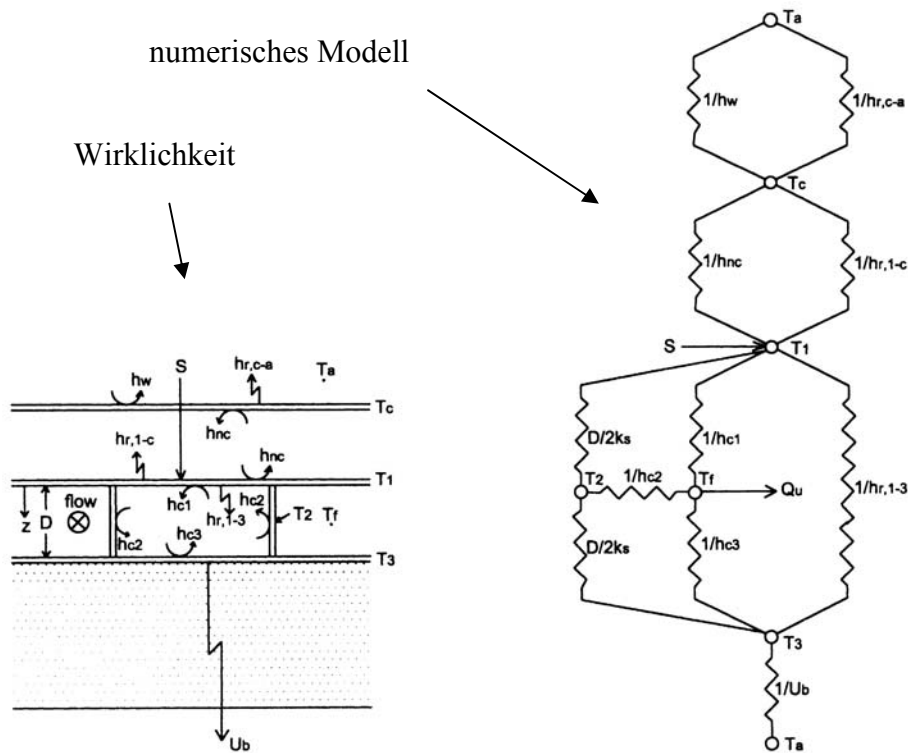


Fig. 4: 1-dimensionale Modelle (hier das eines Luftkollektors mit Lamellen) kommen mit wenigen Knoten, wenigen thermischen Verbindungen und damit mit einer viel kleineren Anzahl Gleichungen aus als 2- oder 3-dimensionale Gitter-Modelle

(aus [42] Ammari 2003)

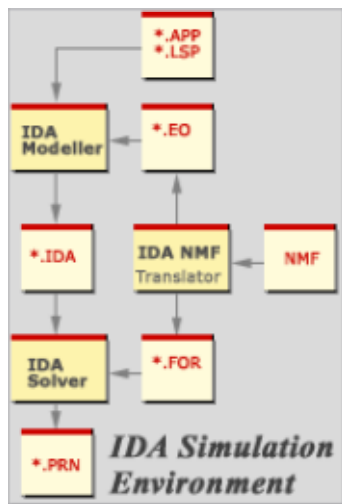


Fig. 5: IDA Simulationsumgebung
(von www.equa.se)

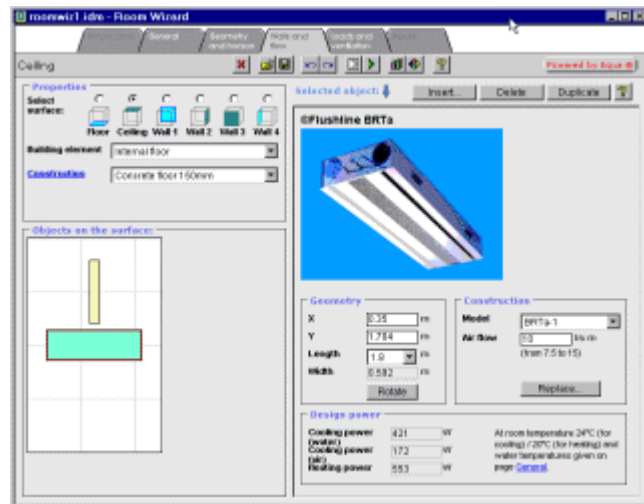


Fig. 6: Benutzeroberfläche von IDA ICE
Beispiel: Parametereingabe für eine Kühldecke
(von www.equa.se)

Bis vor einigen Jahren war in der Schweiz Erdöl oder andere fossile Brennstoffe die weitaus häufigste Form, einem Gebäude die nötige Heizenergie zuzuführen. Die gängigsten Wärmeverteilungssysteme sind den auch auf das bei der Verbrennung dieser Stoffe zur Verfügung stehende hohe Temperaturniveau angepasst. Dieser Umstand macht es für neue Produktionsformen für Heizwärme schwierig, sich in der Praxis durchzusetzen. ([43] Henden et al. 2002) ist eine vieler Arbeiten, welche zeigt, dass durch Anpassung der Haustechnik Wärme tieferer Temperaturen beinahe so effizient genutzt werden kann. Ein einfacher Solarkollektor weist in einer Simulation zusammen mit einer Bodenheizung einen um lediglich 1-6 % schlechteren Systemnutzungsgrad auf als ein idealer Solarkollektor zusammen mit einem herkömmlichen Radiatoren-System.

Ein weiteres Stichwort im Zusammenhang mit Niedertemperatur-Wärme lautet "Latentspeicher". Die Entwicklung solcher Systeme schreitet aber insbesondere deshalb noch langsam voran, weil die bis heute bekannten Materialien andere Probleme bereiten (Umweltverträglichkeit, Brennbarkeit). In ([44] Enibe 2003) wird ein System mit solarem Luftkollektor und Latentspeicher numerisch und experimentell untersucht.

Wärmepumpen können Wärme auf theoretisch beliebig tiefem Temperaturniveau nutzbar machen, indem sie sie auf ein höheres Niveau bringen. Dazu ist Arbeit erforderlich, welche meistens aus elektrischer Energie und seltener mittels thermisch angetriebenen Kompressoren erzeugt wird. Die benötigte Arbeit ist umso geringer, je kleiner die Temperaturdifferenz ist, über welche die Nutzwärme auf ein höheres Niveau gebracht werden muss. Die Wärmepumpe ist somit ein potenzielles Hilfsmittel zur Steigerung des Nutzungsgrades von PV-Abwärme. [51] - [57] beschreiben Systeme mit solar unterstützter Wärmepumpe. ([58] Jin 1995) gibt einen Überblick über verschiedenste Rechenmodelle für Wärmepumpen.

Immer häufiger finden Erdwärmepumpen Anwendung. Durch senkrecht in das Erdreich installierte Wärmesonden wird Wärme aus der Tiefe geholt, welche im Winter ein deutlich höheres Temperaturniveau aufweist als Wärme aus der Umgebungsluft. Dies führt zu einer wesentlichen Verbesserung der Jahresarbeitszahl gegenüber Aussenluft-Wärmepumpen. Den Effekt könnte man noch verstärken, indem man im Sommer das Erdreich mit Abwärme aus PV-Hinterlüftungen zusätzlich erwärmt. Damit dieses System funktioniert und für die Aufwärmung des Erdreiches im Sommer nicht mehr Pumpenenergie aufgewendet werden muss, als bei der Wärmepumpe im Winter gespart wird, muss der Erdreichspeicher und deshalb der Wärmebedarf genügend gross sein. Eine Bedingung, welche erst mit zentralem Erdsondenfeld für mehrere Gebäude erfüllt ist. [61] - [63] behandeln dieses Thema.

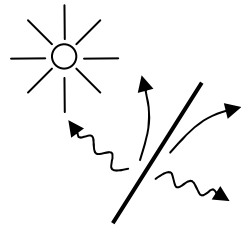
Die Simulation von Erdsonden und Erdsondenfeldern ist nicht einfach. Die sehr kurzzeitigen Effekte des Wärmeübergangs von der Sondenflüssigkeit in Hinterfüllung der Bohrung müssen mit den sehr langzeitigen Effekten der Wärmeleitung durch das Erdreich zur Seite, zur Oberfläche und in die Tiefe überlagert werden. Zur Modellbildung kann auf viel bestehende Literatur zum Thema zurückgegriffen werden ([64] - [77]). ([75] Yavuzturk 1999) beinhaltet eine Übersicht über bestehende Rechenmodelle.

Bei der Warmwasseraufbereitung steigt während des Ladens des Speichers das geforderte Temperaturniveau der Nutzwärme von der Kaltwassertemperatur bis zur Nutztemperatur. Mit grösseren Speichern kann letztere gesenkt werden, was einerseits die Wärmeverluste des Speichers verkleinert und andererseits den Nutzungsgrad einer PV/T-Anlage anheben kann. Vor allem dort, wo im Sommer viel Warmwasser benötigt wird, kann eine Vorerwärmung mit PV-Abwärme sinnvoll sein.

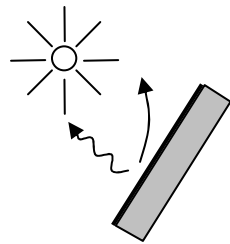
Schlussfolgerungen

Zu den Messungen am PV/T-Schiefer ([2] Kropf 2002)

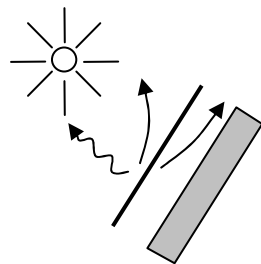
Es wurden ausschliesslich Messungen am PV/T-Schiefer gemacht. Interessant ist der Vergleich mit anderen Systemen zur Luftkühlung gebäudeintegrierter Photovoltaik:



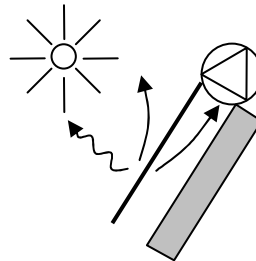
a) frei aufgeständerte PV:
Die Wärme wird beidseitig des Moduls mittels Abstrahlung und Konvektion effizient abgeführt.



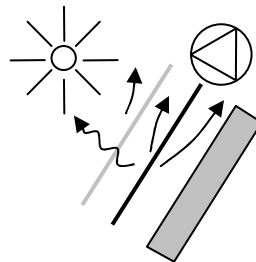
b) unbelüftete PV-Haut:
Die Wärme kann nur noch über die Modul-Vorderseite abgeführt werden.



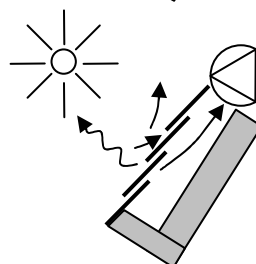
c) frei hinterlüftete PV-Haut:
Die Wärme wird von der Rückseite passiv (mittels freier Konvektion) abgeführt.



d) aktiv hinterlüftete PV-Haut:
Die Wärme wird von der Rückseite aktiv abgeführt. Dieser Anteil wird somit nutzbar.



e) verglaster PV-Luftkollektor:
Eine Glashaut vor dem Modul reduziert den thermischen Verlust und erhöht den Wirkungsgrad.



f) PV/T-Schiefer:
Ein gewisser Anteil der nach vorne konvektiv an die Umgebung abgegebene Wärme kann durch die Spalten wieder eingefangen und zusätzlich nutzbar gemacht werden.

Die Messungen am PV/T-Schiefer ([2] Kropf 2002) haben ergeben, dass die Effizienz der Zellkühlung des Systems f) im Bereich derjenigen der Systeme c) und d) liegt und natürlich abhängig ist vom flächenspezifischen Luftvolumenstrom (siehe Fig. 7). Sie ist somit zwar nicht ganz so gut wie bei ideal gekühlten, nicht integrierten PV-Systemen, aber auch nicht schlechter als bei anderen effizient gekühlten gebäudeintegrierten Anlagen.

System e) zahlt für den besseren thermischen Wirkungsgrad den Preis der sehr viel höheren Zelltemperatur und damit des tieferen elektrischen Wirkungsgrades. Systeme d) und e) haben ausserdem den Vorteil, dass sie auch mit geschlossenen Luftkreisläufen arbeiten können. Weil so das Temperaturniveau gesteigert werden kann, steigt dabei auch die Nutzbarkeit der gewonnenen Wärme. Allerdings bezahlt man auch diesen Vorteil wieder mit einer höheren Zelltemperatur und somit mit einem tieferen elektrischen Wirkungsgrad.

Anders sieht es beim PV/T-Schiefer (System f) aus: Dadurch, dass ein grösserer Anteil der von den PV-Modulen abgeführten Wärme in die Hinterlüftung gelangt, erhöht sich auch hier gegenüber System d) der thermische Wirkungsgrad. Dank etwas höherem Temperaturniveau erreicht man ausserdem eine leicht höhere Nutzbarkeit der gewonnenen Wärme. Trotzdem müssen diese Vorteile nicht mit einer höheren Zelltemperatur bezahlt werden. Dafür sorgt der bessere Wärmeübergangskoeffizient dank höherer Luftgeschwindigkeit in den Spalten zwischen den PV-Modulen.

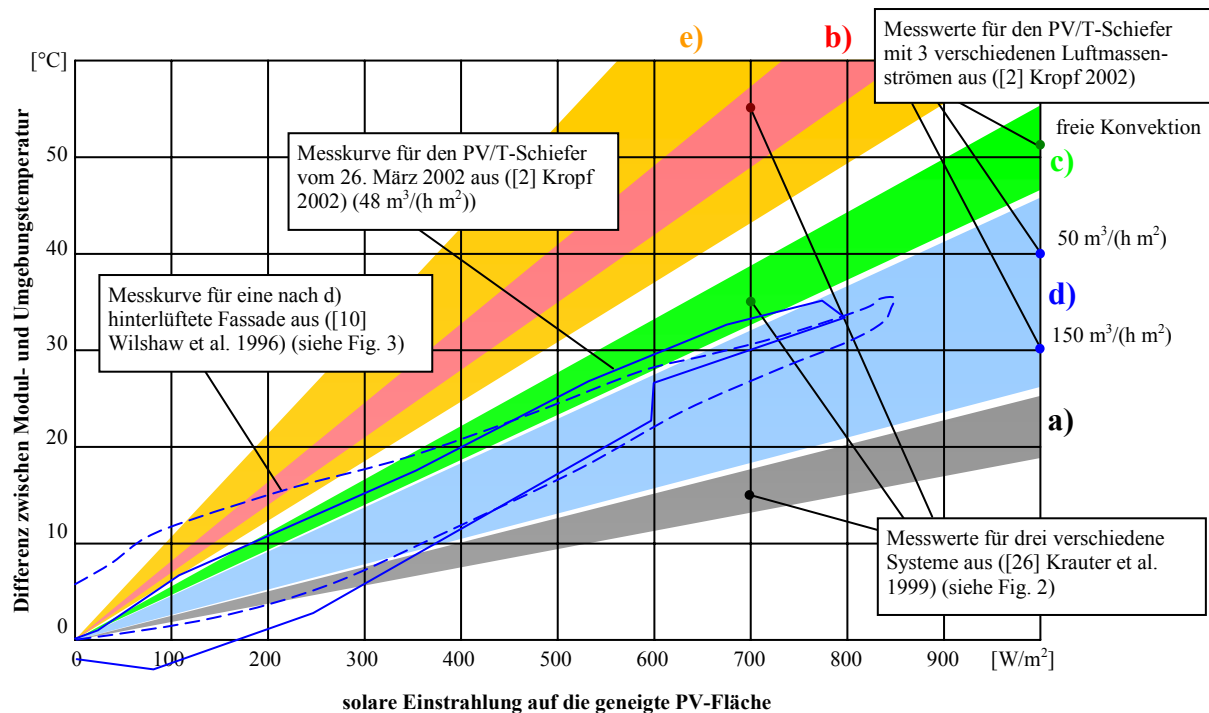


Fig. 7: Zelltemperatur in Abhängigkeit der Einstrahlung für die verschiedenen Systeme.

Zum Pilotprojekt in Steinhausen ([3] Kropf 2002)

Mit der Hinterlüftung der PV/T-Schiefer auf dem Gartenhaus am Obstweg 12 in Steinhausen kann dank der Zellkühlung ein elektrischer Mehrertrag von 10-15 % erreicht werden. Die Einführung der Warmluft in den Keller des Einfamilienhauses entschärft das Problem des durch den Wärmepumpenboiler zu stark gekühlten Kellers und das damit verbundene Feuchtigkeitsproblem.

Der Stromverbrauch der Wärmepumpe wird vorerst nicht wesentlich gesenkt, da diese zu selten gleichzeitig mit der PV-Kühlung in Betrieb ist. Simulationen konnten zeigen, dass mit einem zusätzlichen, dem Wärmepumpenboiler vorgeschalteten Speicher, indem das Brauchwasser mit der PV-Abwärme vorerwärmt würde, der Stromverbrauch der Wärmepumpe um fast 40% reduziert werden könnte. Dies käme einem weiteren elektrischen Mehrertrag von über 20% gleich.

Zum dynamischen Simulationsmodell ([4] Kropf 2003)

Es ist gelungen, für den PV/T-Schiefer ein dynamisches Simulationsmodell zu erstellen, mit dessen Hilfe der zeitliche Verlauf der Zelltemperatur und der Luft-Austrittstemperatur bis auf 2°C genau vorausgesagt werden kann.

Es konnte ausserdem gezeigt werden, dass die kleine Diskrepanz zwischen Modell und Messung mit den Unsicherheiten bei der Kenntnis der Randbedingungen erklärt werden kann. So hat in der Simulation beispielsweise eine Veränderung der Himmelstemperatur um 10°C eine um 2.5°C abweichende Zelltemperatur und eine um 1.5°C abweichende Luft-Austrittstemperatur zur Folge.

Die oben erwähnte Genauigkeit bedingt eine genaue Kenntnis des Wärmeübergangskoeffizienten im Spalt und des Wärme-Erfassungsgrades. Die beiden Größen konnten für die in den Experimenten verwendeten Bauarten bestimmt werden. Ein Ansatz für die Abhängigkeit der beiden Parameter vom Luft-Volumenstrom konnte bestätigt werden. Für Spaltgeometrien, welche stark von denjenigen der Experimente abweichen, fehlt aber die genaue Quantifizierung, so dass in diesen Fällen mit einem grösseren Fehler des Modells von bis zu 5°C gerechnet werden muss.

Mittels CFD und genaueren experimentellen Untersuchungen am Spalt könnten die nötigen Abhängigkeiten der beiden Parameter soweit gefunden werden, dass die anwendungsabhängigen Optimierungen, welche momentan nur auf der System-Ebene möglich sind, auf die Komponenten-Ebene vertieft werden könnten.

Zum Ertragsatlas ([5] Kropf 2003)

Mit Hilfe des neuen Simulationsmodells wurde der elektrische und der thermische Ertrag des PV/T-Schiefers an drei verschiedenen Standorten typischer Klimaregionen der Schweiz (Zürich, Lugano, Davos), für zwei verschiedene Neigungswinkel (Schrägdach, Fassade) und für verschiedene Luft-Volumenströme und Steuerungsstrategien monatsweise bestimmt und graphisch dargestellt. Mit Hilfe dieses Ertragsatlases ist es möglich, Anlagen grob zu planen, ihre Komponenten (PV-Fläche, Ventilatoren, Wärmeverbraucher) zu dimensionieren und ihren Nutzungsgrad abzuschätzen.

Zu den Anwendungsmöglichkeiten des PV/T-Schiefers ([6] Kropf 2003)

Die Nutzung der PV-Abwärme ist schwierig. Mit einigen Fallbeispielen konnte aber gezeigt werden, dass individuell angepasste Lösungen interessant sein können. Für eine Durchsetzung der Anwendung des PV/T-Schiefers in der Praxis ist es nachteilig, dass diese beim Prozess der Entscheidungsfindung erst am Ende einer langen Argumentationskette steht:

- Eine der heute akzeptiertesten Lösungen zur grösseren Nachhaltigkeit der Stromproduktion ist die Photovoltaik.

- ⇒ PV im grossen Massstab ist kaum denkbar ohne Gebäudeintegration.

- ⇒ Bei der PV-Gebäudeintegration lohnt sich die Kühlung der Zellen mittels Hinterlüftung sowohl aus ökonomischer wie auch aus ökologischer Sicht.

- ⇒ Für hinterlüftete Photovoltaik ist der Aufwand für die Nutzung der automatisch zur Verfügung stehenden Warmluft nicht mehr gross. Er beschränkt sich in einer Planung, bei der vor allem die für die Abschätzung des Nutzens nötigen Randbedingungen - insbesondere das Zeitprofil der Qualität (Temperaturniveau) und Quantität (Leistung) des Wärmebedarfs - genau bekannt sein müssen.

- ⇒ Im Fall eines Entscheides für eine PV/T-Doppelnutzung bietet der PV/T-Schiefer gegenüber herkömmlichen Systemen zusätzlich zu allfälligen ästhetischen Vorteilen eine höhere Nutzbarkeit der PV-Abwärme ohne Einbussen im elektrischen Ertrag.

Eine der vielversprechendsten Anwendungen ist die Brauchwasser-Vorerwärmung. Bei einer Zieltemperatur des Warmwassers von 60°C kann dabei ein Deckungsgrad über das ganze Jahr von rund 20% (alleine mit der PV-Abwärme) erreicht werden. Bedingung dafür ist aber ein hoher Warmwasserbedarf und dieser führt seinerseits dazu, dass auch der energetische Aufwand für die Nachheizung hoch ist. Bei einem Boiler mit elektrischem Heizregister fällt dieser Aufwand im Vergleich zum Ertrag der Photovoltaik zu stark ins Gewicht und eine alternative Lösung mit thermischen Kollektoren scheint sinnvoller. Besser sieht es aus, wenn erstens die Warmwassertemperatur gesenkt wird und zweitens eine Wärmepumpe für die Nachheizung zum Einsatz kommt. Ein Vergleich eines solchen Systems mit einer Warmwasser-Bereitstellung mittels thermischen Kollektoren wäre interessant.

Dasselbe gilt für Heizsysteme mit Aussenluft-Wärmepumpen: Die Vorlauftemperatur kann gesenkt werden, indem grossflächige Wärmestrahler verwendet werden, wie dies bei Fussbodenheizungen der Fall ist. Auch hier ist die Frage interessant, wie das System mit Aussenluft-Wärmepumpe und PV/T-Schiefer im Vergleich mit einem System mit thermischen Kollektoren und Wärmespeicher abschneidet. Vorüberlegungen haben ergeben, dass der elektrische Gewinn der Photovoltaik den elektrischen Bedarf der Wärmepumpe bald einmal übersteigen kann, so dass dieses System sicher seine grossen Vorteile hat. Bei der Planung erster Pilotanlagen ist darauf zu achten, dass die Systemsteuerung einfach optimiert werden kann, so dass die Laufzeiten der Wärmepumpen so oft wie möglich auf Zeiten mit hoher Senktemperatur fallen.

Da der PV/T-Schiefer vor allem im Sommer viel Wärme auf relativ tiefem Temperaturniveau liefert, sind Systeme mit saisonalen Niedertemperatur-Wärmespeichern interessant. Sowohl Latentwärmespeicher wie auch Methoden zur Wärmespeicherung im Erdreich wurden deshalb rechnerisch untersucht. Dimensioniert man ein solches System so, dass man einen hohen thermischen Deckungsgrad (idealerweise 100%) erreicht, so erhält man wegen der hohen Überschusswärme auf nicht nutzbarem Temperaturniveau einen sehr kleinen thermischen Nutzungsgrad. Den dadurch verbundenen Aufwand und den relativ grossen Flächenbedarf kann man aber mit der Nutzung des hohen Angebots an Solarstrom, der normalerweise weit über den Eigenbedarf hinausgeht, rechtfertigen.

Für die saisonale Speicherung der PV-Abwärme im Erdreich ist die Frage interessant, ob es allenfalls gelingen könnte, den Speicher im Sommer soweit zu laden, dass bei der Entladung auf die Anwendung einer Wärmepumpe verzichtet werden kann. Zur Beantwortung dieser Frage sind aber Modelle für Erdsondenfelder und für die Bodenheizung nötig, welche dieselbe Genauigkeit garantieren können, wie das entwickelte Modell für den PV/T-Schiefer.

Eine objektive Quantifizierung des Nutzens eines Systems mit PV/T-Schiefer ist nicht möglich. Hierzu ein Beispiel: Bei der Wärmepumpe wird die thermische Energie dadurch genutzt, dass die Wärmepumpe bei höherer Arbeitszahl läuft und somit weniger elektrische Energie benötigt. Im Vergleich des elektrischen Nutzens mit dem dafür benötigten thermischen Aufwand kommt es auf die Gewichtung der beiden Energieformen an. Diese Gewichtung ist abhängig davon, mit welchem alternativen System zur Deckung desselben Energiebedarfs man vergleicht. Gleiches gilt für sämtliche anderen Systeme, weshalb definitive genaue Aussagen über den Nutzen erst im konkreten Fall gemacht werden können.

Mögliches weiteres Vorgehen

Es sind genügend Werkzeuge für die Planung von PV/T-Projekten erstellt worden. Als nächstes müsste deshalb nach einer Vielzahl von realisierbaren Pilot- und Demonstrationsprojekten gesucht werden. Erst die konkreten Beispiele können die Vorteile der Multifunktionalität eines solchen Systems richtig aufzeigen.

Für die Planung solcher Projekte müssen für sämtliche Komponenten des Systems genügend genaue Rechenmodelle zur Verfügung stehen. Um rechnerische Vergleiche neuer mit etablierten Gebäudesystemen zu ermöglichen, ist es durchaus gerechtfertigt, auch für letztere genaue Simulationsmodelle zu entwickeln. Dazu erweisen sich das IDA-Programmpaket immer mehr als zwar nicht das einzige, aber als eines der vielfältigsten und weitestentwickelten Tools.

Literaturübersicht

Problematik der Zellerwärmung

In ([11] Zakzouk et al. 1987) sind allgemein die Einflüsse auf die Effizienz einer PV-Anlage beschrieben. Gezeigt wird dabei aber lediglich die anlagenspezifische Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Umgebungstemperatur und von der Windgeschwindigkeit. In ([12] Zakzouk 1987) wird daraus ein Modell zur Berechnung des Stromgewinns abgeleitet, welches natürlich ebenfalls nur anlagenspezifisch Gültigkeit hat.

In ([13] King et al. 1997) wird demgegenüber viel systematischer mittels Labormessung den Einfluss der Modultemperatur auf die abgegebene Leistungskurve untersucht. Dabei wird auch auf die Temperaturverteilung auf der Modulfläche und auf den Vorgang der Modulerwärmung bei konstanter Bestrahlung eingegangen. Bei einer Einstrahlung von $1'100 \text{ W/m}^2$ erreichen dabei die Module nach ca. 20 Minuten ihre Endtemperatur von 25°C (hinterlüftet) bis 40°C (nicht hinterlüftet) über der Umgebungstemperatur. Von insgesamt 10 Modulen (5 davon mit kristallinen Siliziumzellen) werden die gemessenen Temperatur-Koeffizienten für Kurzschlussstrom, Leerlaufspannung sowie für Strom und Spannung im Betriebspunkt maximaler Leistung angegeben. Aus den Resultaten errechnet sich ein Temperaturkoeffizient für die maximale Modulleistung von durchschnittlich $-0.50 \text{ }^\circ\text{C}$.

([14] Bazilian et al. 2002) beschreibt eine thermographische Untersuchung einer gebäudeintegrierten PV-Anlage ohne nennenswerte Resultate.

Nicht ganz nachvollziehbar ist in ([15] Radziemska 2002) von einem Temperaturkoeffizienten für die maximale Modulleistung von einmal $-0.65 \text{ }^\circ\text{C}$ und einmal $-0.4 \text{ }^\circ\text{C}$ zu lesen. Neben der Modulkühlung werden in den Schlussfolgerungen auch andere allerdings aufwändigere Massnahmen zur Reduktion des unerwünschten Effektes vorgeschlagen.

([16] Ahmad et al. 2003) beschreibt ein sehr detailliertes Modell zur dynamischen Berechnung der Modultemperatur und der daraus resultierenden abgegebenen Leistung.

In einem Vergleich der Messresultate an zwei gebäudeintegrierten PV-Anlagen in Nottingham in ([17] Omer et al. 2003) wird die mangelnde Hinterlüftung der Module bei einer Anlage als ungünstig für die Stromproduktion bewertet.

Auch ([18] Ubertini 2003) beschreibt eine Feldmessung an einer gebäudeintegrierten PV-Anlage. Dabei geht es darum, die jährliche Stromproduktion möglichst genau voraussagen zu können. Die temperaturabhängige Korrektur des Zellwirkungsgrades ist dabei ein Aspekt. Auf den ersten Blick etwas verwirrend ist dabei, dass die Autoren auf einen Temperaturkoeffizienten für den Modulwirkungsgrad von $-0.025 \text{ }^\circ\text{C}$ kommen. Allerdings ist hier die absolute Verschlechterung des Wirkungsgrades bei Zellerwärmung gemeint. Beim gemessenen Wirkungsgrad von $7 \text{ }^\circ\text{C}$ entspricht dies einer relativen Verschlechterung des Wirkungsgrades von $-0.36 \text{ }^\circ\text{C}$.

Kühlung gebäudeintegrierter PV

In ([21] Brinkworth et al. 1997) wird in einem Experiment festgestellt, dass rein durch freie Konvektion die Zelltemperatur gebäudeintegrierter PV um 20°C reduziert werden kann.

([22] Sandberg et al. 1998) untersucht experimentell, wie die Zellkühlung bei freier Konvektion optimiert werden kann. Die Messungen wurden mit verschiedenen Anstellwinkeln, verschiedenen Geometrien des Hinterlüftungskanal, verschiedener Einstrahlung, sowie mit und ohne Kühlrippen durchgeführt. In ([23] Moshfegh et al. 1998) werden diese experimentellen Resultate mittels CFD erfolgreich nachgerechnet.

In ([24] Garg et al. 1999) wird der thermische Ertrag verglaste und hinterlüfteter Photovoltaik berechnet. Je nach Luftvolumenstrom steigt die Luft-Austrittstemperatur dabei in Delhi im Juni auf 45-65 °C. Leider ist dem Paper aber nicht zu entnehmen, wie hoch dabei im Vergleich die Aussenlufttemperatur angenommen wird.

([25] Rockendorf et al. 1999) befasst sich mit der Simulation eines mit PV-Zellen bestückten verglasten Wasserkollektors.

([26] Krauter et al. 1999) vergleicht experimentell die Zelltemperaturen für verschiedene Kühlstrategien. Bei Umgebungstemperaturen von 22-23 °C werden folgende Zelltemperaturen gemessen: 77°C für eine wärmegeämmte Modulrückseite, 57 °C für frei hinterlüftete Module (ohne Ventilator), 39 °C für aktiv hinterlüftete Module (2 m/s) und 37 °C für wassergekühlte Module.

In ([27] Brinkworth 2000) und in ([28] Brinkworth et al. 2000) wird ein Modell zur Berechnung der Zellkühlung bei freier Konvektion entwickelt. Dabei wird von freier resp. durch die Unterstützung vom Winddruck gemischter Konvektion und von laminarer und/oder turbulenter Strömung ausgegangen und nach den Wärmeübergangskoeffizienten an der Modulrückseite gefragt.

[29] - [34] und [39] befassen sich wiederum mit PV/T-Wasserkollektoren. In ([29] Jong 2001) und in ([30] Jong et al. 2001) ist zu lesen, dass ein solcher Kollektor zwar sowohl beim elektrischen wie auch beim thermischen Gewinn jeweils schlechter abschneidet wie ein jeweiliger Kollektor mit nur einfacher Nutzung, übers ganze aber kleinere Energiegestehungskosten erreicht als Vergleichssysteme mit thermischen und elektrischen Kollektoren nebeneinander. ([31] Kalogirou 2001) schreibt demgegenüber von einer gesteigerten elektrischen Effizienz, wobei weder klar wird, mit welchem PV-System hier verglichen wird, noch wie hoch die erreichten Zelltemperaturen sind. ([33] Huang et al. 2001) vergleicht die total eingesparte Primärenergie eines kombinierten Kollektors (60 % der eingestrahnten Sonnenenergie) mit derjenigen eines rein thermischen (50 %) oder rein elektrischen (20 %). In ([34] Zondag et al. 2002) werden 4 verschiedene Modelle zur Berechnung des thermischen Wirkungsgrades von PV/T-Wasserkollektoren untereinander und mit experimentellen Resultaten verglichen.

In ([35] Jones et al. 2001) wird ein Modell zur dynamischen Berechnung der Modultemperatur und der davon abhängigen abgegebenen Leistung einer aufgeständerten PV-Anlage beschrieben und deren Resultate mit Messungen verglichen.

Das in ([36] Bazilian 2002) viel zu knapp beschriebene, dafür offenbar umso detailliertere Modell zur Berechnung des elektrischen und thermischen Ertrags aktiv hinterlüfteter PV soll später PV-Planern die Entscheidung erleichtern, ob eine photovoltaisch/thermische Doppelnutzung angestrebt werden soll oder nicht.

([37] Coventry et al. 2003) ist ein Versuch, den "Wert" des elektrischen und des thermischen Outputs eines PV/T-Systems zu vergleichen.

([38] Tripanagnostopoulos et al. 2002) beschreibt die umfangreichste experimentelle Untersuchung des elektrischen und des thermischen Komponenten-Nutzungsgrades verschiedener PV/T-Systeme. Zwei PV/T-Kollektoren (mit Leitungswasser bzw. mit Umgebungsluft gekühlte PV-Zellen, siehe Fig. 7) wurden einerseits mit und ohne Verglasung (gemäss Fig. 7) und andererseits mit und ohne Reflektoren (gemäss Fig. 8) ausgemessen. Die Resultate sind in Fig. 9 a-g zusammengefasst.

([39] Chow 2003) beschreibt ein thermisches 1-dimensionales Modell für einen mit PV-Zellen bestückten Wasserkollektor und leitet daraus in Simulationsstudien einerseits den vom Wasserfluss abhängigen thermischen und elektrischen Wirkungsgrad und andererseits dynamische Antwortfunktionen auf stufenförmige Veränderungen der Randbedingungen (Wasserfluss und Einstrahlung) ab.

([41] Janjai et al. 2000) und ([42] Ammari 2002) beschreiben numerische 1-dimensionale Modelle für Luftkollektoren.

Nutzung von Niedertemperatur-Wärme

([43] Henden et al. 2002) ist eine vieler Arbeiten, welche zeigt, dass durch Anpassung der Haustechnik Wärme tieferer Temperaturen beinahe so Effizient genutzt werden kann. Ein einfacher Solarkollektor weist in einer Simulation zusammen mit einer Bodenheizung einen um lediglich 1-6 % schlechteren Systemnutzungsgrad auf als ein idealer Solarkollektor zusammen mit einem herkömmlichen Radiatoren-System.

In ([44] Enibe 2003) wird ein System mit solarem Luftkollektor und Latentspeicher in Nigeria numerisch und experimentell untersucht.

Systeme mit solar unterstützten Wärmepumpen

([51] Afjei et al. 2000) präsentiert Planungsgrundlagen für Wärmepumpenheizungssysteme.

([52] Esen 2000) und ([53] Kaygusuz 2000) untersuchen ein System mit zylinderförmigem Latentwärme-Speicher und solar unterstützter Wärmepumpe in der Türkei.

([54] Schuppisser 2001) zeigt auf, wie in der Schweiz Wärmepumpen und Sonnenenergie ideal kombiniert werden können.

([55] Huang et al. 2001), ([56] Aye et al 2002) und ([57] Chyng et al. 2003) beschreiben eine Wärmepumpe, bei welcher direkt das Kühlmittel nach der Expansion in einem Solarkollektor erwärmt und verdampft wird. Eine Anwendung, welche sich gegenüber einer rein solaren Erwärmung nur an Standorten auszahlt, wo die Sonne wenig scheint.

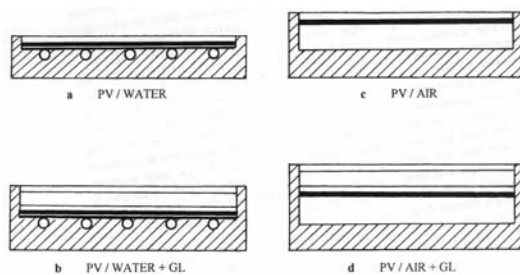


Fig. 7: Die in [38] ausgemessenen PV/T-Kollektoren

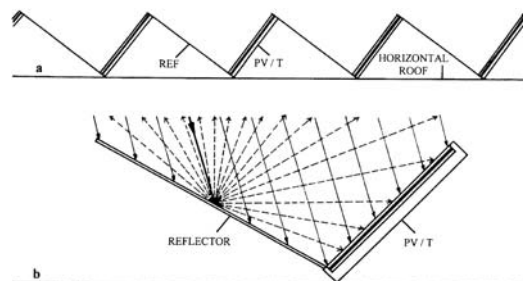


Fig. 8: In [38] verwendete Reflektoren

(aus [38] Tripanagnostopoulos et al. 2002)

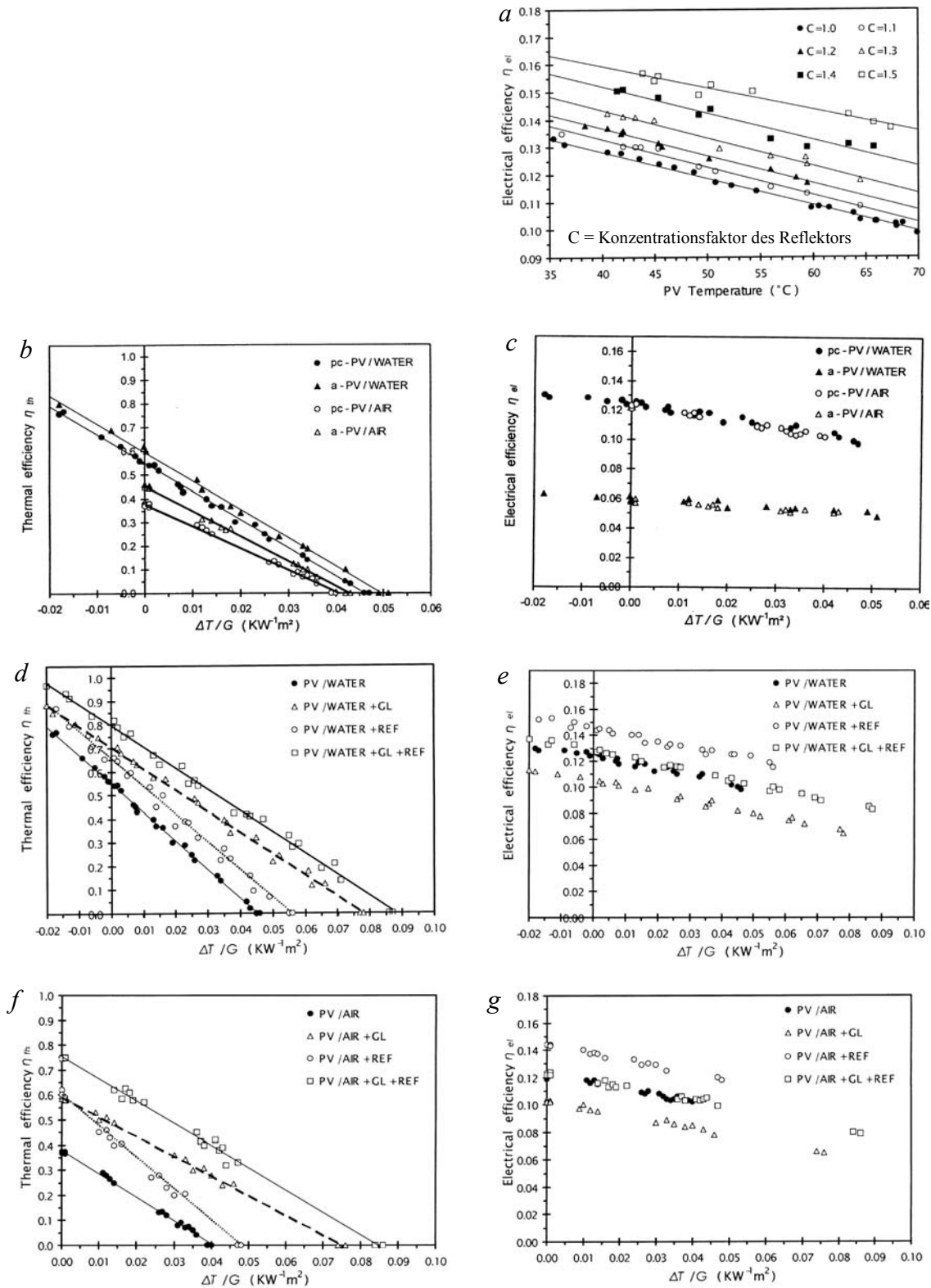


Fig. 9: Thermischer (links) und elektrischer (rechts) Wirkungsgrad für wasser- (WATER) bzw. luftgekühlte (AIR) PV/T-Kollektoren verschiedener Ausführung.

b und c: Vergleich zwischen Wasser- und Luftkühlung und zwischen polykristallinen und amorphen Si-Zellen.

d-g: Vergleich Grundauführung, mit Verglasung (+GL), mit Reflektor (+REF) und mit beidem (+GL +REF).

(aus [38] Tripanagnostopoulos et al. 2002)

Modellierung von Wärmepumpen

([58] Jin 1995) behandelt und beschreibt in einem ausführlichen Überblick verschiedenste Rechenmodelle für Wärmepumpen.

Regeneration von Erdsonden

([61] Huber et al. 1999) befasst sich mit der Frage, woher die den Erdsonden entzogene Wärme nachfließt. ([62] Hässig et al. 1998) geht der Frage nach, ob und in welchen Fällen sich eine Regeneration von Erdsonden lohnt. ([63] Good et al 2001) befasst sich mit Erdwärmesonden zur Kühlung im Sommer und Heizung im Winter.

Modellierung von Erdsonden und Erdsondenfelder

([64] Huber et al. 2002) ist ein Handbuch zum Programm EWS Version 2.8 zur Berechnung von Erdwärmesonden. ([65] Huber et al. 1997) und ([66] Huber et al. 1999) befasst sich mit der Theorie dazu. ([67] Signorelli et al. 2002) vergleicht die Resultate von EWS mit denjenigen von FRACTure (siehe [80]).

([68] Pahud et al. 2000) und ([69] Fromentin et al. 2000) untersuchen den Nutzen eines saisonalen Erdreichspeichers thermischer Sonnenenergie zur Speisung thermoaktiver Bauteile. ([70] Pahud 1996) und ([71] Pahud 1999) geben den theoretischen Hintergrund zum in [68], [69] und [71] verwendeten Erdsondenmodell. [72] beschreibt die Berechnungen zur Dimensionierung eines Erdreich-Wärmespeichers für das SUVA-Gebäude in Grislikon LU.

([73] Eskilson et al. 1988) und ([74] Hellström 1989) geben einen Einblick in das in Lund (S) entwickelte Modell.

([75] Yavuzturk 1999) beinhaltet eine Übersicht über bestehende Rechenmodelle und beschreibt ein an der Universität Oklahoma entwickeltes Modell. ([76] Murugappan 2002) befasst sich mit dessen Implementierung in das Gebäudesimulationsprogramm ENERGYPLUS. ([77] Yavuzturk 1999) ist ein Auszug aus [75].

([80] Kohl et al. 1995) beschreibt das 3D finite Elemente Modell im Programm FRACTure.

Modellierung von Schichtspeicher

In ([81] Rosen 2001) werden verschiedene Modelle für die Temperaturschichtung in Flüssigkeitsspeichern (gestufter Temperaturverlauf und Verlauf mit stückweise konstantem Temperaturgradienten) bezüglich Genauigkeit der Resultate verglichen.

([82] Kang 2002) befasst sich mit Mischvorgängen auf Grund von Störungen während des Ladevorganges.

([83] Oliveski et al. 2003) vergleicht ein 1-dimensionales Modell mit einem wesentlich aufwändigeren 2-dimensionalen Modell nach der Methode der finiten Volumenelemente und kommt auf eine gute Übereinstimmung.

In ([84] Shah et al.) werden Mischeffekte beim Eintritt der Flüssigkeit in den Speicher untersucht.

Literaturverzeichnis

Publikationen zum Projekt

- [1] Sven Kropf; *Multifunktionale Gebäudehülle: Wetterschutz, PV und Luftkollektor*; Nachdiplomarbeit, ETH Zürich, 1999.
- [2] Sven Kropf; *PV/T-Schiefer - Labormessungen*; Heft 1 dieser Dissertation, ETH Zürich, 2002.
- [3] Sven Kropf; *PV/T-Schiefer - Obstweg 12, Steinhausen*; Heft 2 dieser Dissertation, HTA Luzern, 2002.
- [4] Sven Kropf; *PV/T-Schiefer - Dynamisches Simulationsmodell*; Heft 3 dieser Dissertation, ETH Zürich, 2003.
- [5] Sven Kropf; *PV/T-Schiefer - Ertragsatlas*; Heft 4 dieser Dissertation, ETH Zürich, 2003.
- [6] Sven Kropf; *PV/T-Schiefer - Anwendungsbeispiele und Fallstudien*; Heft 5 dieser Dissertation, ETH Zürich, 2003.
- [7] Sven Kropf, Alfred Moser, Gerhard Zweifel; *PV/T-Schiefer - Messresultate*; Poster an der nationalen PV-Tagung, SUPSI Lugano, 16./17. Mai 2002.
- [8] Sven Kropf, Alfred Moser, Gerhard Zweifel; *PV/T-Schiefer - Entwicklung einer neuen Gebäude-Komponente: Messung - Modellierung - Simulation*; Paper und Präsentation am Status-Seminar, ETH Zürich, 12./13. September 2002.
- [9] Sven Kropf, Alfred Moser, Gerhard Zweifel; *Useful Waste Heat of Ventilated PV-Modules: Physical Modelling and Validation Results*; Paper und Präsentation an der Building Simulation Conference, TU Eindhoven, 11.-14. August 2003.
- [10] Sven Kropf, Alfred Moser, Gerhard Zweifel; *Ventilated PV-Modules*; Poster an der CISBAT, EPFL Lausanne, 8. Oktober 2003.

Problematik der Zellerwärmung

- [11] A. K. M. Zakzouk, A. R. M. Alamoud, B. H. Khoshaim; *Factors Affecting the Performance of a Photovoltaic Power System (PVPS)*; Int. J. Solar Energy, 1987, Vol. 5, pp. 67-81.
- [12] A. K. M. Zakzouk; *An Empirical Model for the Performance of a Photovoltaic Power System (PVPS)*; Int. J. Solar Energy, 1988, Vol. 6, pp. 15-32.
- [13] David L. King, Jay A. Kratochvil, Ailliam E. Boyson; *Temperature Coefficients for PV Modules and Arrays: Measurement Methods, Difficulties, and Results*; Paper und Präsentation an der IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Anaheim California, 29. September - 3. Oktober 1997.
- [14] Morgan D. Bazilian, Harry Kamalanathan, D. K. Prasad; *Thermographic analysis of a building integrated photovoltaic system*; Renewable Energy, 2002, Vol. 26, pp. 449-461.
- [15] E. Radziemiska; *The effect of temperature on the power drop in crystalline silicon solar cells*; Renewable Energy, 2003, Vol. 28, pp. 1-12.
- [16] G. E. Ahmad, H. M. S. Hussein, H. H. El-Ghetany; *Theoretical analysis and experimental verification of PV modules*; Renewable Energy, 2003, Vol. 28, pp. 1159-1168.
- [17] S. A. Omer, R. Wilson, S. B. Riffat; *Monitoring results of two examples of building integrated PV (PIPV) systems in the UK*; Renewable Energy, 2003, Vol. 28, pp. 1387-1399.
- [18] Stefano Ubertini, Umberto Desideri; *Performance estimation and experimental measurements of a photovoltaic roof*; Renewable Energy, 2003, Vol. 28, pp. 1833-1850.

Kühlung gebäudeintegrierter PV

- [20] A. R. Wilshaw, J. R. Bates, N. M. Pearsall; *Photovoltaic Module Operating Temperature Effects - Results and Analysis of Three Different Building Integrated Systems Compared to Ideal System Conditions*; Paper und Präsentation an der EuroSun, Freiburg i.Br. 1996.

- [21] B. J. Brinkworth, B. M. Cross, R. H. Marshall, Hongxing Yang; *Thermal Regulation of Photovoltaic Cladding*; Solar Energy, 1997, Vol. 61 Nr. 3, pp. 169-178.
- [22] M. Sandberg, J. Strobach, E. D. Dunlop; *Aspects of Air and Heat Flow for Roof Integrated PV Hybrid Systems*; Paper und Präsentation an der World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Wien, 6.-10. Juli 1998.
- [22b] Mats Sandberg, Bahram Moshfegh; *Ventilated-Solar Roof Air Flow and Heat Transfer Investigation*; Renewable Energy, 1998, Vol. 15, pp. 287-292.
- [23] B. Moshfegh, M. Sandberg; *Flow and Heat Transfer in the Air Gap behind Photovoltaic Panels*; Renewable and Sustainable Energy Reviews, 1998, Vol. 2, pp. 287-301.
- [24] H. P. Garg, R. S. Adhikari; *System Performance Studies on a Photovoltaic/Thermal (PV/T) Air Heating Collector*; Renewable Energy, 1999, Vol. 16, pp. 725-730.
- [25] Gunter Rockendorf, Roland Sillmann, Lars Podlowski, Bernd Litzenburger; *PV-Hybrid and Thermoelectric Collectors*; Solar Energy, 1999, Vol. 67 Nr. 4-6, pp. 227-237.
- [26] Stefan Krauter, Rodrigo Guido Araújo, Sandra Schroer, Rolf Hanitsch, Mohammed J. Salhi, Clemens Triebel, Reiner Lemoine; *Combined Photovoltaic and Solar Thermal Systems for Facade Integration and Building Insulation*; Solar Energy, 1999, Vol. 67 Nr. 4.6, pp. 239-248.
- [27] B. J. Brinkworth; *Estimation of Flow and Heat Transfer for the Design of PV Cooling Ducts*; Solar Energy, 2000, Vol. 69 Nr. 5, pp. 413-420.
- [28] B. J. Brinkworth, R. H. Marshall, Z. Ibarahim; *A Validated Model of Naturally Ventilated PV Cladding*; Solar Energy, 2000, Vol. 69 Nr. 1, pp. 67-81.
- [29] M. J. M. Jong; *System Studies on Combined PV/Thermal Panels*; Paper und Präsentation am Symposium Thermische Solarenergie, Staffelstein, 9.-11. Mai 2001.
- [30] M. J. M. Jong, H. A. Zondag; *System Studies on Combined PV Thermal Panels*; Paper und Präsentation an der International Conference on Solar Energy in High Latitudes, Leiden, 6.-8. Mai 2001.
- [31] Soteris A. Kalogirou; *Use of TRNSYS for modelling and simulation of a hybrid pv-thermal solar system for Cyprus*; Renewable Energy, 2001, Vol. 23, pp. 247-260.
- [32] Bjørnar Sandnes, John Rekstad; *A Photovoltaic/Thermal (PV/T) Collector With a Polymer Absorber Plate Experimental Study and Analytical Model*; Solar Energy, 2002, Vol. 72 Nr. 1, pp. 63-73.
- [33] B. H. Juang, T. H. Lin, W. C. Hung, F. S. Sun; *Performance Evaluation of Solar Photovoltaic/Thermal Systems*; Solar Energy, 2001, Vol. 70 Nr. 5, pp. 443-448.
- [34] H. A. Zondag, D. W. de Vries, W. G. J. van Helden, R. J. C. van Zolingen, A. A. van Steenhoven; *The Thermal and Electrical Yield of a PV-Thermal Collector*; Solar Energy, 2002, Vol. 72 Nr. 2, pp. 113-128.
- [35] A. D. Jones, C. P. Underwood; *A Thermal Model for Photovoltaic Systems*; Solar Energy, 2001, Vol. 70 Nr. 4, pp. 349-359.
- [36] Morgan D. Bazilian, Deo Prasad; *Modelling of a photovoltaic heat recovery system and its role in a design decision support tool for building professionals*; Renewable Energy, 2002, Vol. 27, pp. 57-68.
- [37] J. S. Coventry, K. Lovegrove; *Development of an approach to compare the 'value' of electrical and thermal output from a domestic PV/thermal system*; Solar Energy, 2003, Vol. 75, pp. 63-72.
- [38] Y. Tripanagnostopoulos, T. Nousia, M. Souliotis, P. Yianoulis; *Hybrid Photovoltaic/Thermal Solar Systems*; Solar Energy, 2002, Vol. 72 Nr. 3, pp. 217-234.
- [39] T. T. Chow; *Performance analysis of photovoltaic-thermal collector by explicit dynamic model*; Solar Energy, 2003, Vol. 75, pp. 143-152.

Kollektormodelle

[41] S. Injai, A. Esper, W. Mühlbauer; *Modelling the performance of a large area plastic solar collector*; Renewable Energy, 2000, Vol. 21, pp. 363-376.

[42] H. D. Ammari; *A mathematical model of thermal performance of a solar air heater with slats*; Renewable Energy, 2003, Vol. 28, pp. 1597-1615.

Nutzung von Niedertemperatur-Wärme

[43] L. Henden, J. Rekstad, M. Meir; *Thermal Performance of Combined Solar Systems with Different Collector Efficiencies*; Solar Energy, 2002, Vol. 72 Nr. 4, pp. 299-305.

[44] S. O. Enibe; *Thermal analysis of a natural circulation solar air heater with phase change material energy storage*; Renewable Energy, 2003, Vol. 28, pp. 2269-2299.

[45] Vereinigung Schweizerischer Sanitär- und Heizungsfachleute; *Si-Handbuch Nr. 5*; 1998.

[46] Markus Koschenz, Beat Lehmann; *Thermische Simulationsberechnungen Newspirit Weissfluhjoch / Davos*; Interner Schlussbericht Nr. 203'095, EMPA, 2003.

[47] H. R. Gabathuler, H. Mayer, T. Afjei; *Standardschaltungen für Kleinwärmepumpenanlagen*; Schlussbericht im Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärme-Kraft-Kopplung des Bundesamtes für Energie, Dezember 2002.

Systeme mit solar unterstützten Wärmepumpen

[51] Thomas Afjei, Andreas Bühring, Markus Dürig, Arthur Huber, Patrick Keller, Esfandiar Shafai, Petra Widmer, Gerhard Zweifel; *Kostengünstige Wärmepumpenheizung für Niedrigenergiehäuser*; Schlussbericht im Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärme-Kraft-Kopplung des Bundesamtes für Energie, Dezember 2000.

[52] Mehmet Esen; *Thermal Performance of a Solar-Aided Latent Heat Store Used for Space Heating by Heat Pump*; Solar Energy, 2000, Vol. 69 Nr. 1, pp. 15-25.

[53] Kamil Kaygusuz; *Experimental and theoretical investigation of a solar heating system with heat pump*; Renewable Energy, 2000, Vol. 21, pp. 79-102.

[54] Fritz Schuppisser; *Wärmepumpen und Sonnenenergie - ideal kombiniert*; HeizungKlima, 2001, Vol. 1-01, pp. 66-69.

[55] B. J. Juang, J. P. Chyng; *Performance Characteristics of Integral Type Solar-Assisted Heat Pump*; Solar Energy, 2001, Vol. 71 Nr. 6, pp. 403-414.

[56] Lu Aye, W. W. S. Charters, C. Chaichana; *Solar Heat Pump Systems for Domestic Hot Water*; Solar Energy, 2002, Vol. 73 Nr. 3, pp. 169-175.

[57] J. P. Chyng, C. P. Lee, B. J. Huang; *Performance analysis of a solar-assisted heat pump water heater*; Solar Energy, 2003, Vol. 74, pp. 33-44.

Modellierung von Wärmepumpen

[58] Hui Jin; *Parameter Estimation Based Models of Water Source Heat Pumps*; Dissertation, Oklahoma State University, 2002.

[59] Hui Jin, Jeffrey D. Spitler; *A Parameter Estimation Based Model of Water-to-Water Heat Pumps for Use in Energy Calculation Programs*; ASHRAE Transactions, 2002, p. 3-17.

Regeneration von Erdsonden

[61] Arthur Huber, Daniel Pahud; *Untiefe Geothermie: Woher kommt die Energie?*; Schlussbericht im Forschungsprogramm Geothermie des Bundesamtes für Energie, Oktober 1999.

[62] W. Hässig, D. Sutter, R. Bigler, A. Huber; *Regeneration von Erdwärmesonden*; Schlussbericht im Forschungsprogramm Geothermie des Bundesamtes für Energie, September 1998.

[63] Jürgen Good, Arthur Huber, Petra Widmer, Thomas Nussbaumer, Daniel Trüssel, Christoph Schmid; *Gekoppelte Kälte- und Wärmeerzeugung mit Erdwärmesonden*; Schlussbericht im Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärme-Kraft-Kopplung des Bundesamtes für Energie, Februar 2001.

Modellierung von Erdsonden und Erdsondenfelder

[64] Petra Widmer, Arthur Huber; *Benutzerhandbuch zum Programm EWS - Version 2.8*; Huber Energietechnik, Zürich, 2002.

[65] Arthur Huber, Othmar Schuler; *Berechnungsmodul für Erdwärmesonden*; Schlussbericht im Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärme-Kraft-Kopplung des Bundesamtes für Energie, September 1997.

[66] Arthur Huber, Daniel Pahud; *Erweiterung des Programms EWS für Erdwärmesondenfelder*; Schlussbericht im Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärme-Kraft-Kopplung des Bundesamtes für Energie, Dezember 1999.

[67] Sarah Signorelli, Thomas Kohl; *Validieren des Programms EWS und Optimieren der Erdwärmesondenlänge*; Schlussbericht im Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärme-Kraft-Kopplung des Bundesamtes für Energie, November 2002.

[68] D. Pahud, G. Travaglini; *Etude d'une maison solaire active avec stockage en dalles au Tessin*; Schlussbericht im Forschungsprogramm Wärmespeicherung des Bundesamtes für Energie, September 2000.

[69] A. Fromentin, D. Pahud, G. Travaglini; *Optimisation d'un stockage de chaleur en dalle active dans un immeuble d'habitation*; Schlussbericht im Forschungsprogramm Wärmespeicherung des Bundesamtes für Energie, November 2000.

[70] D. Pahud; *Simulation of Central Solar Heating Plants Using a Duct Store: An Application for Switzerland*; Projektbericht, Universität Lund, Nat. Fonds Grant Nr. 8220 - 042846, 1996.

[71] Daniel Pahud; *PILESIM - LASER - Simulation Tool for Heating/Cooling Systems with Heat Exchanger Piles or Borehole Heat Exchangers - User Manual*; EPFL - LASER, April 1999.

[72] D. Pahud; *Etude pilote pour les bâtiments du centre SUVA Lucerne - Analyse des réponses de 2 sondes tests et optimisation du stockage diffusif*; Zwischenbericht im Forschungsprogramm Wärmespeicherung des Bundesamtes für Energie, Dezember 1999.

[73] Per Eskilson, Johan Claesson; *Simulation Model for Thermally Interacting Heat Extraction Boreholes*; Numerical Heat Transfer, 1988, Vol. 13, pp. 149-165.

[74] Göran Hellström; *Duct Ground Heat Storage Model - Manual for Computer Code*; Universität Lund, März 1989.

[75] Cenk Yavuzturk; *Modelling of Vertical Ground Loop Heat Exchangers for Ground Source Heat Pump Systems*; Dissertation, Oklahoma State University, 1999.

[76] Arunchalam Murugappan; *Implementing Ground Source Heat Pump and Ground Loop Heat Exchanger Models in the Energyplus Simulation Environment*; Diplomarbeit, Oklahoma State University, 2002.

[77] Cenk Yavuzturk, Jeffrey D. Spitler; *A Short Time Step Response Factor Model for Vertical Ground Loop Heat Exchangers*; AHRAE Transactions, 1999, Vol. 105 Nr. 2, pp. 475-485.

[80] T. Kohl, R. J. Hopkirk; *"FRACTure" - A simulation Code for Forced Fluid Flow and Transport in Fractured, Porous Rock*; Geothermics, 1995, Vol. 24 Nr. 3, pp. 333-343.

Modellierung von Schichtspeicher

[81] Marc A. Rosen; *The Exergy of Stratified Thermal Energy Storages*; Solar Energy, 2001, Vol. 71 Nr. 3, pp. 173-185.

[82] Myeong-Gie Kang; *Thermal mixing in a water tank during heating process*; Int. J. of Heat and Mass Transfer, 2002, Vol. 45, pp. 4361-4366.

[83] Rejane De Césaro Oliveski; *Comparison between models for the simulation of hot water storage tanks*; Solar Energy, 2003, Vol. 75, pp. 121-134.

[84] Louise Jivan Shah, Simon Furbo; *Entrance effects in solar storage tanks*; Solar Energy, 2003, Vol. 75, pp. 337-348.

Web-Adressen

www.equa.se (Entwickler und Vertreiber der IDA Software)

www.wpz.ch (Wärmepumpen-Testzentrum)

www.minergie.ch (Alles zum Minergie-Label)

Verdankungen

Diese Doktors-Arbeit wurde am Institut für Hochbautechnik an der ETH Zürich verfasst. Das Projekt wurde im praktischen Bereich unterstützt vom Zentrum für Interdisziplinäre Gebäudetechnik an der HTA Luzern (Messungen) und von der Firma ATLANTIS SOLARSYSTEME AG (Herstellung der Prototypen), welche in der Zwischenzeit in die Firma 3s - SWISS SUSTAINABLE SYSTEMS AG übergegangen ist, und mehrheitlich finanziert durch das Bundesamt für Energie (Forschungsprogramm "Rationelle Energienutzung in Gebäuden").

Mein Dank an dieser Stelle geht an viele Personen, welche mich in meiner Arbeit in irgend einer Form unterstützt haben:

Professor K. Daniels, Professur für Haustechnik, hat sich für die Betreuung meiner Dissertation zur Verfügung gestellt und mir ein angenehmes Arbeitsumfeld mit viel Freiraum für Eigeninitiative ermöglicht.

Robert Hastings hat mir bei der Initialzündung des Projektes die nötigen Tipps gegeben und mich an die richtigen Leute und Institutionen verwiesen.

Dr. A. Moser, Leiter der Fachgruppe Air&Climate am Institut für Hochbautechnik hat mich mit grossem Engagement während der ganzen Zeit bei Problemen aller Art unterstützt und bei vielen Diskussionen wichtige Tipps gegeben.

Gerhard Zweifel und Kurt Hildebrand vom Zentrum für Interdisziplinäre Gebäudetechnik an der HTA Luzern haben mir die umfangreichen Messungen ermöglicht und ebenfalls wertvolle Tipps weitergeben können.

Prof. Karsten Voss

In der Produktionsstätte der Firma 3s - SWISS SUSTAINABLE SYSTEMS AG (damals ATLANTIS SOLARSYSTEME AG) hat mir insbesondere Paul Schmid mit seinem grossen Wissen und seiner Begeisterungsfähigkeit beim Entwerfen und Herstellen der Photovoltaik-Module geholfen. Rosmarie Neukomm war die Kontaktperson für die Projektplanung.

Im Labor der Abteilung HLK fand ich grosse Unterstützung von der ganzen Crew beim Bau und der Installation der Messvorrichtungen. Allen voran sei hier Fritz Schnyder erwähnt, dicht gefolgt von Pascal Bühler, Walter Zurkirchen, Walter Haas, Franz Heggli sowie den Laborleitern Andreas Odermatt und Heinrich Huber.

Kurt Moosberger ermöglichte mir als Bauherr des Pilotprojektes die Feldmessung und zeigte viel Begeisterung und Eigeninitiative bei der Ausführung.

Per Sahlin, Pavel Grozman und Lars Eriksson von der Firma EQUA SA in Stockholm waren für den Support bei der Anwendung des Gebäudesimulations-Programms IDA ICE zuständig und halfen mir sowohl bei Problemen wie auch bei der Entwicklung des Simulationsmodells für senkrechte Erdwärmetauscher. Mika Vuolle von der Firma Sisäilmäyhdistys ry in Espoo (Finnland) unterstützte mich ebenfalls bei der Modellentwicklung.

Sarah Signorelli von der Forschungsgruppe für Geothermik und Radiometrie am Institut für Geophysik der ETH Zürich führte die Vergleichssimulationen mit FRACTure zur Validierung des Simulationsmodells für senkrechte Erdwärmetauscher aus.

Als Lektor meiner Arbeit wirkten Dr. Alfred Moser, Prof. Gerhard Zweifel und Jan Baumann.

Das ganze ZIG Team sorgte während meiner Zeit an der HTA für eine ausgezeichnete Stimmung und ein angenehmes Arbeitsklima. Speziell erwähnt seien hier Matthias Achermann, der mich bei der Einarbeitung in die IDA Programme unterstützte, Mittags-Jogger Reto von Euw, Alleinunterhalter David Burkhardt und Kinderüberraschungs-Experte Peter Schwehr.

An der ETH Zürich waren die Kollegen Peter Rosemann, Daniel Gubler, Philipp Lengweiler, Stefan Barp, Yunlong Liu und Daniel Rusch vom Air&Climate Team für ein ideales Arbeitsumfeld besorgt. Zwischenzeitlich wurde dieses Team von Kazuyoshi Harimoto, Rajat Gupta, Reto Buchmann und Jan Baumann ergänzt.

Schwer vorzustellen ist es für mich, wie ich in dieser Zeit ohne meine Partnerin Karin Moosberger alles gemeistert hätte.

Zürich, Dezember 2003

Sven Kropf

Voilà!