



Interdisziplinäres Zentrum für
Lebenswissenschaften
Frauenstuhlweg 31
D-58644 Iserlohn
Tel.: +49-2371-566-272
Fax: +49-2371-566-274
eMail: ihrig@fh-swf.de
http://www3.fh-swf.de/fbin/team/ihrig_d.htm
priv.: Graf-von-Galen-Str. 6
D-58706 Menden/Sauerland
Tel.: +49-2373-4653
Fax: +49-2373-4655

[Ihre Zeichen/Ihre Nachricht vom]

[Unsere Zeichen/Unsere Nachricht vom]

Telefon

Abschlussbericht

Zuwendungsempfänger: Fachhochschule Südwestfalen, Interdisziplinäres Zentrum für
Lebenswissenschaften

Förderkennzeichen: FKZ 02WD0458

Vorhabensbezeichnung: **Wassergewinnung durch Strahlungsaustausch**, Teilprojekt 1

Laufzeit des Vorhabens: 01. 04. 2004 bis 30. 11. 2009

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 02WD0458 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

1 Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

Ziel des Projektes war die Entwicklung einer Methode zur Gewinnung von Wasser aus Luftfeuchtigkeit. Hierfür wird Kälteleistung benötigt, die man durch Strahlungsaustausch gewinnen kann. Dabei wird Wärmeenergie durch Strahlungsaustausch mit der höheren Atmosphäre abgeführt. Das Prinzip ist keinesfalls fundamental neu. Allerdings sind die früher vorgeschlagenen Vorrichtungen entweder ineffizient, da ungerichtet, oder aber sie bedürfen einer aufwändigen, teuren Regelung. Es sollte eine an die Bedingungen eines Drittweltlandes angepasste Technologie entwickelt werden, die physikalisch geregelt ist, für die also keine Elektronik notwendig ist. Außerdem sollte durch Integration eines Wärmetauschers die Effizienz gesteigert werden.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

1.2.1 Zusammensetzung des Verbundes

Das Vorhaben sollte ursprünglich von einem internationalen Verbund durchgeführt werden. Die geplanten Partner waren:

- FH Südwestfalen, Interdisziplinäres Zentrum für Lebenswissenschaften, Iserlohn; Projektleiter und Gesamtprojektkoordinator: Prof. Dr. Dieter F. Ihrig
- Fa. Koch Anhängerwerke GmbH & Co KG, Werner-Forßmann-Straße 60, 21423 Winsen/L.
- Fa. Seybold GmbH & Co KG, 52317 Düren
- Dar es Saalam Institute for Technology, P. O. Box 2958, Dar es Saalam, Tanzania
- Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, P. R. China

Da nach deutschem Förderrecht eine Förderung ausländischer Institutionen auch in Drittstaaten nicht möglich ist, konnten diese nicht gefördert werden. Die Projektpartner aus China waren darauf nicht mehr zu einer Zusammenarbeit bereit, die Projektpartner aus Afrika nur noch zu einer passiven Unterstützung des Projektes.

Da der Anteil der Fa. Seybold zu gering war, konnte diese keinen Förderantrag stellen, sie war aber dennoch bereit, das Projekt aktiv zu unterstützen. Die Firma war zunächst dennoch bereit, das Projekt durch Beratungsleistung und Baumuster zu unterstützen. Außer der Lieferung von Folienproben zur spektroskopischen Vermessung erbrachte sie aber keine Beiträge; die erbetenen Baumuster wurden trotz mehrfacher Anmahnungen nicht geliefert und zur Beratung stand letztlich weder, wie zugesagt, der Firmeninhaber noch einer seiner Mitarbeiter bereit.¹

Die Antrag stellenden Verbundpartner waren damit lediglich die FH Südwestfalen als Koordinator und Fa. Koch Anhängerwerke.

Auch die Beiträge von Fa. Koch waren von Anfang an sehr spärlich. Da Fa. Koch ein reiner Metallverarbeiter ist und bei der Bearbeitung der Projektes alles auf die Verwendung von Kunststoffen zulief, sah man nur wenige Möglichkeiten, sich einzubringen. Im Jahre 2006 schied dann auch Fa. Koch aus dem Verbund aus. Da Fa. Koch zugesagt hatte, über seine Vertriebspartner in Spanien und Afrika weitere Partner für Tests zu interessieren, war diese Entwicklung ausgesprochen problematisch.

Der Vorschlag von Fa. Koch, an ihrer Statt die neu gegründete Fa. Seifert in den Verbund aufzunehmen, war aus förderrechtlichen Gründen nicht möglich, da es dem Projektträger bei einer in Gründung befindlichen Firma nicht möglich war, deren Bonität zu prüfen. Dr. Seifert hatte zwar in Aussicht gestellt, seine Kontakte zur Universität Murcia in Spanien einzubringen, war aber dann natürlich nicht mehr dazu bereit. Der Versuch einer Kontaktaufnahme zu seinem dortigen Kooperationspartner durch den Projektleiter wurde nicht beantwortet.

Die FH Südwestfalen als nunmehr einziger Verbundpartner konnte allerdings neue Kontakte erfolgreich knüpfen, wodurch das Projekt Unterstützung erfuhr:

- Fa. Münchenbernsdorfer – Folien GmbH, Großbockaer Straße 1, 07589 Münchenbernsdorf lieferte unendgültig diverse Folienmaterialien.

¹ Es gehört zu den Merkwürdigkeiten des deutschen Förderrechtes, dass Projektpartner, wenn ihr Beitrag unter einer Bagatellgrenze liegt, weder einen Antrag stellen können noch wenigstens in der Liste der Projektteilnehmer aufgeführt werden, womit ihre Beiträge dann auch nicht als Eigenanteile gewertet werden. Es nimmt nicht wunder, dass das Engagement von Firmen, die eine solche Behandlung erfahren, schnell erlahmt!

- Das Instituto de Radio Astronomia Milimétrica (IRAM), Granada, Spanien gestattete den mehrwöchigen Testbetrieb eines Wassersammlers auf dem Dach seines Observatoriums.

1.2.2 Abschätzung der erzielbaren Wasserernten

Vor der Antragstellung hatte das Projektteam Simulationsrechnungen durchgeführt. In Abb. 1 ist das Ergebnis dieser Simulationen für verschiedene Schichtdicken des Kältespeichers angegeben. Die Abbildung zeigt, dass bei einer entsprechenden Optimierung auch in Gebieten mit geringerer relativer Feuchte noch eine Wasserernte von 0,5 bis 1 L pro Nacht möglich sein sollte.

Abb. 2 zeigt die minimale relative Feuchte, die abhängig von der Lufttemperatur notwendig ist, um wenigstens eine Wasserernte von 100 mL pro Nacht zu ermöglichen. Danach sollte diese minimale Wasserernte auch unter Wüstenbedingungen noch möglich sein.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Bei Antragstellung waren als Projektschritte geplant:

- Literaturrecherche zur Gewinnung spektroskopischer Daten zu Kunststofffolien sowie Auswahl eines Folienmaterials, das möglichst gut an das Atmosphärische Fenster angepasst ist.
- Entwicklung einer Oberflächenbeschichtung zwecks Optimierung des spektroskopischen Verhaltens
- Untersuchung der Fügetechnik zur Verarbeitung des gewählten Folienmaterials zwecks Aufbau von wasserführenden Kanälen
- Aufbau von Testmustern und Tests in einer Klimakammer
- Aufbau eines Wassersammlers
- Durchführung von Feldmessungen
 - In Iserlohn
 - In Spanien
 - In Afrika

Die Literaturrecherche führte zu LDPE und LLDPE als spektroskopisch sehr gut an das Atmosphärische Fenster angepasstes Material.

Das spektroskopische Verhalten war so gut, dass die Entwicklung einer Oberflächenbeschichtung überflüssig erschien. Dieses Teilprojekt wurde daher nicht durchgeführt.

Da PE ein Thermoplast ist, konnte als Fügetechnik thermisches Verschweißen eingesetzt werden. Diese Technologie ist zwar bei der Herstellung von Unikaten aufwändig, bei Großserien aber stark vereinfachbar.

Messungen mit Testmustern in einer Klimakammer waren sehr viel versprechend; erste Feldmessungen auf dem Dach der Hochschule mit reinen Absorbern ebenfalls.

Daraufhin wurde ein Wassersammler aufgebaut. Aus Zeitgründen wurde auf ein Feldtest in Iserlohn verzichtet und der erste Feldtest auf dem Dach eines radioastronomischen Observatoriums in Spanien durchgeführt. Da erhebliche technische Probleme aufgetreten waren, schlug dieser Feldtest fehl.

Die Auswertung meteorologischer Daten zeigte die Möglichkeit, die Konstruktion von Wassersammlern erheblich zu vereinfachen. Aus diesem Grund wurde ein neues Design

entwickelt. Die im Antrag vorgeschlagene Konstruktion wurde wegen weiterer technischer Probleme, deren Lösung erheblichen Aufwand befürchten ließen, nicht weiter verfolgt.

Da sich gezeigt hatte, dass mehr technische Entwicklung notwendig sein würde als ursprünglich geplant, also geringere Reisewege sinnvoll erschienen, wurde Feldtests fortan in Frankreich durchgeführt. In mehreren Feldtests konnte gezeigt werden, dass Wasserernten bis zu 970 mL pro m² und Nacht möglich sind.

Bereits bei den ersten Feldmessungen hatte sich gezeigt, dass das hydrophobe Verhalten von LLDPE und LDPE problematisch ist. Daher wurde eine Methode zur hydrophilen Ausrüstung von Folien basierend auf einer Aktivierung im Niedertemperaturplasma und einer anschließenden organischen Beschichtung entwickelt. Dieser ergibt eine dauerhafte Reduzierung des Kontaktwinkels für Wasser von ca. 100 auf 55 °.

1.4 Wissenschaftlich-technischer Stand zu Projektbeginn

Zum Zeitpunkt des Projektbeginns waren erfolgreich nur Vorrichtungen zur Trinkwassergewinnung aus Nebel in Küstenregionen zum Einsatz gekommen. Bei geringerer Luftfeuchtigkeit waren nur Anlagen mit erhöhtem technischen Aufwand in Form von Patenten (DE19811275 A, DE19838463 A, DE19903649 A, DE 19734887) vorgeschlagen worden, die aber eher in direkter Konkurrenz zu einer häufig nur geringfügig teureren Tiefbrunnenbohrung standen.

In den Patentschriften GB 2199474 A und DE 3830647 A werden Vorrichtungen vorgeschlagen, in denen die abstrahlenden Flächen auch die Kondensationsflächen bilden. Im Patent GB 2209683 A wird diese gegen den Boden isoliert und/oder bei Tage beschattet. Die Abstrahlung der Wärme in den kalten Sonnen abgewandten Himmel gelingt bei den vorgeschlagenen Vorrichtungen aber nur über einen relativ kleinen Raumwinkel. Begrenzt wird die Abstrahlung durch die beschattende Fläche oder die Erde selbst, die den Abstrahlbereich begrenzt. (z.B. kann der im Patent GB 2199474 A abstrahlende Erdbodenkörper im Mittel nur mit 50% seiner Oberfläche mit dem kalten Nachthimmel kommunizieren). Außerdem wirkt sich Luftfeuchtigkeit umso stärker aus, je größer der Neigungswinkel der Strahlung gegen die Normale ist, da die effektive Absorptionslänge zunimmt.

Ein weiterer Nachteil der in den Patentschriften GB 2199474 A, DE 3830647 A oder GB 2209683 A vorgeschlagenen Vorrichtungen und Verfahren ist die geringe Umsetzung der durch Abstrahlung gewonnenen Kälteleistung in die Kondenswasserbildung. In den meisten vorgeschlagenen Vorrichtungen findet die Kondenswasserbildung auf der Wärme abstrahlenden Oberfläche statt, die somit direkt mit der Umgebungsluft in Kontakt tritt. Ein Großteil der Umgebungsluft wird dabei von dieser kalten Oberfläche abgekühlt, ohne dass die Taupunkttemperatur unterschritten wird. Die dabei verbrauchte Kälteleistung führt somit nicht zur Kondenswasserbildung. Im Patent GB 2209683 A werden Vorrichtungen beschrieben, in denen die zur Kondensation genutzte Oberfläche durch Wärmeleitung mit einer Wärme abstrahlenden Oberfläche verbunden ist. Die Umgebungsluft wird dort mittels natürlicher Konvektion oder durch Zuhilfenahme eines Sonnenerwärmten Schornsteins angesaugt und an dieser Oberfläche vorbeigeführt.

Zusammenfassend kann man sagen, dass zum Projektbeginn das Prinzip der Wassergewinnung aus Luftfeuchtigkeit unterstützt durch Strahlungsaustausch durchaus bekannt war, wegen erheblicher Effizienzprobleme und hohem technischem Aufwand aber nicht genutzt wurde.

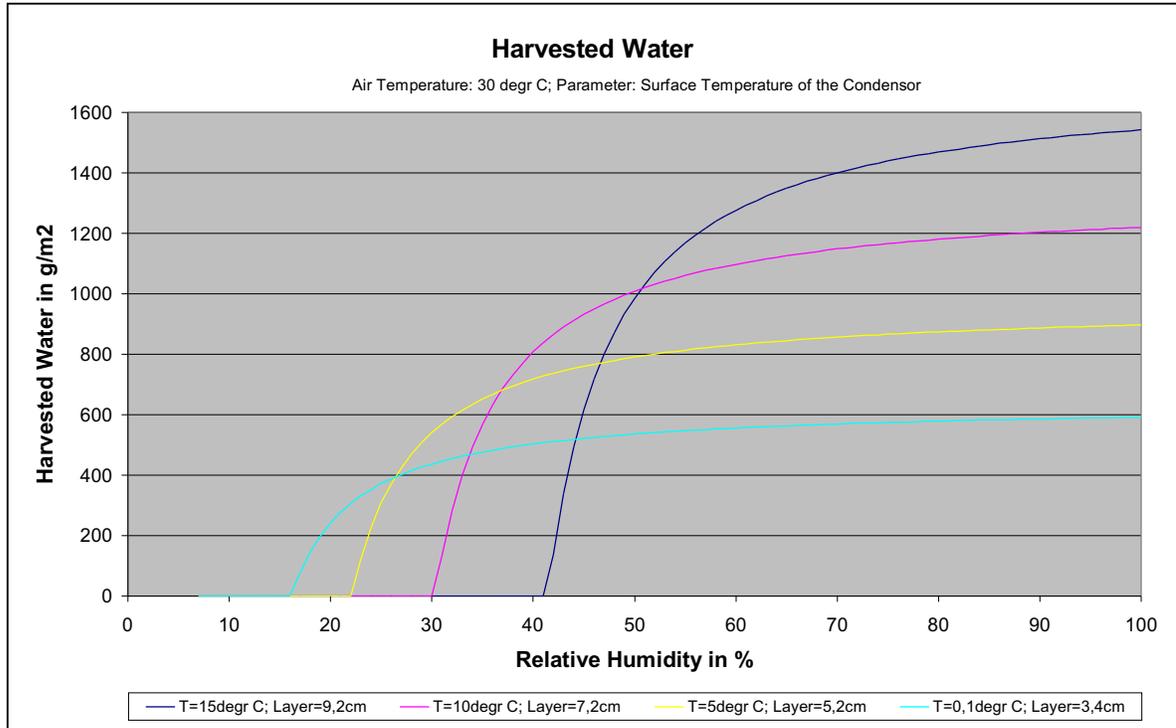


Abbildung 1: Wasserernte abhängig von der Lufttemperatur für verschiedene Oberflächentemperaturen des Kondensators als Parameter (Die Schichtdicke des Speichermediums Wasser ergibt sich aus der abgestrahlten Energie.)

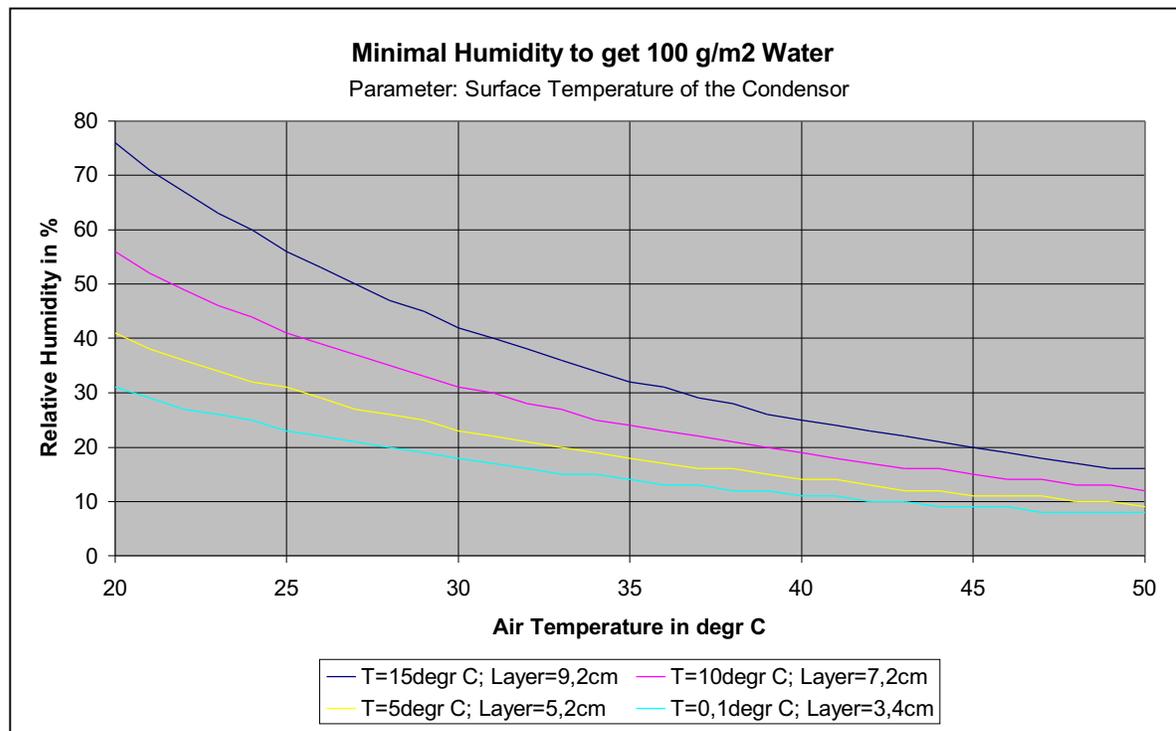


Abbildung 2: Für eine Wasserernte von mindestens 100 g/m² notwendige minimale relative Feuchte. Parameter wie Abb. 7

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Wie bereits oben erwähnt, ließ sich die ursprünglich geplante Zusammensetzung des Verbundes nicht dauerhaft etablieren, so dass letztlich die FH Südwestfalen als einziger Verbundpartner gefördert wurde. Es konnten aber auch Kooperationspartner neu gewonnen werden:

- Fa. Münchenbernsdorfer – Folien GmbH, Großbockaer Straße 1, 07589 Münchenbernsdorf lieferte unendgeldlich diverse Folienmaterialien.
- Das Instituto de Radio Astronomia Milimétrica (IRAM), Granada, Spanien gestattete den mehrwöchigen Testbetrieb eines Wassersammlers auf dem Dach seines Observatoriums.

Der Projektleiter hat für die Durchführung von Tests ein Grundstück in der Bretagne unendgeldlich zur Verfügung gestellt.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Vorgehensweise, Verwendung der Mittel

2.1.1 Wirtschaftliche Überlegungen

Bereits in der Antragsphase hatte das Projektteam die Wirtschaftlichkeit der Wassersammler abgeschätzt. Nimmt man an, dass die Herstellungskosten vergleichbar zu jenen der von Fa. Koch Anhängerwerke gefertigten Solarkocher sind, also Gestehungskosten in Höhe von ca. 100 €/m². Aus diesem Wert und den durch die in Abschnitt 1.2.2 angegebenen Ergebnissen der Simulationsrechnungen ergeben sich für die Daten verschiedener meteorologischer Stationen die in Tab. 2 angegebenen Kosten für das gewonnene Wasser. Vergleicht man dies mit den Kosten der Meerwasserentsalzung, die sich aus einer kleinen Umfrage ergab, wie sie in Tab. 1 gezeigt sind, so wird deutlich, dass eine Senkung der Gestehungskosten um einen Faktor 10 bis 20 notwendig ist.

Preis		Quelle
€/m ³	€/m ³	
0,30	0,70	Bundeszentrale für politische Bildung
0,60	0,80	Universität Kassel
0,70		Kurdistan-Rundbrief
1,75	2,00	Deutsch. Zentr. F. Luft- und Raumfahrttechnik
1,75		Uni Münster

Tab. 1: Ergebnisse einer kurzen Erhebung zu den Kosten der Meerwasserentsalzung

2.1.2 Vorbereitungen in der Anfangsphase

Die mit dem Projekt verbundene Stelle eines wissenschaftlichen Mitarbeiters wurde zum 01. 04. 2004 durch einen Absolventen aus dem Labor besetzt. Dieser war vor Projektbeginn als wissenschaftliche Hilfskraft beschäftigt; er konnte daher schon an Vorarbeiten vor Projektbeginn beteiligt werden. Allerdings erhielt er Anfang April 2004, also praktisch mit Projektbeginn seitens der Bezirksregierung Arnsberg das Angebot, in den Vorbereitungsdienst für eine Tätigkeit in der Umweltverwaltung einzutreten. Er schied daher bereits zum 31. 04. 2004 wieder aus. Die Stelle konnte zunächst nicht wieder besetzt werden. Erst Anfang Dezember 2004 wurde sie erneut durch einen Absolventen des Labors besetzt. In den ersten Monaten wurde daher das Projekt durch den Projektleiter, seinen Assistenten und eine ungeprüften wissenschaftlichen Hilfskraft vorangetrieben.

Station	mittlerer Jahresniederschlag	Monat	mittlere Maximaltemperatur	rel. Feuchte	Wasserernte	Verfügbarkeit	Jahresernte	Kosten	
								mm/a	°C
Rapid City, South Dakota (USA)	413	Juni	25,5	62	1110	330	0,3663	9,60	19,10
Dallas-Fort Worth, Texas (USA)	856	Juni	33,3	65	1130	250	0,2825	12,40	24,80
El Paso, Texas (USA)	222	Juni	35,8	30	540	330	0,1782	19,60	39,30
Chihuahua (Mexiko)	349	Juni	33,7	36	670	330	0,2211	15,80	31,70
La Quiaca (Argentinien)	336	Dezember	20,4	64	1120	330	0,3696	9,50	18,90
Pisco (Peru)	4,5	Dezember	25,7	82	1480	330	0,4884	7,20	14,30
Valladolid (Spanien)	442,5	Juni	25,6	52	1030	250	0,2575	13,60	27,20
Agades (Niger)	111	Juni	41,6	24	350	330	0,1155	30,30	60,60
Assjut (Ägypten)	1,8	Juni	37,1	27	400	330	0,132	26,50	53,00
Dar-es-Salam (Tanzania)	1148	August	29,2	76	1450	120	0,174	20,10	40,20
Atbara (Sudan)	72	Juni	42,9	19	200	330	0,066	53,00	106,10
Mogadischu (Somalia)	428	Juni	29,6	80	1470	250	0,3675	9,50	19,00
Xi'an (China)	575	Juni	31,6	59	1090	250	0,2725	12,80	25,70
Hyderabad (Indien)	824	Januar	28,7	56	1070	150	0,1605	21,80	43,60

Tab. 2: Kalkulierte Kosten für die Wassergewinnung. (Quelle der Klimadaten: Deutscher Wetterdienst)

Bereits zur Formulierung des Antrages hatte der Projektleiter einzelne meteorologische Stationen abgefragt, um die Leistungsfähigkeit des vorgeschlagenen Verfahrens unter verschiedenen Klimabedingungen abschätzen zu können. Diese Erhebung von Daten wurde zunächst systematisiert. Ab März 2004 wurden im Stundentakt 10 Wetterstationen über das Internet abgefragt. Es ist dadurch gelungen einen lückenlosen Datensatz zu erzeugen. Während der General Assembly 2004 der European Geosciences Union in Nizza konnte der Projektleiter das Projekt in Form eines Posters und eines 5-minütigen Kurzvortrages vorstellen und um Kooperationen werben. Während dieser Tagung erhielt er von einem Kollegen einen 2-Jahres-Datensatz einer Station in Jemen. Durch diese Maßnahmen standen Datensätze mit besserer Qualität zur Verfügung als dies durch eigene Messungen, wie ursprünglich geplant und beantragt, möglich gewesen wäre. Von der Durchführung eigener Messungen (und der Beschaffung des hierfür notwendigen Equipments) wurde daher vorerst abgesehen.

Um Langzeittests und Messungen mit Wassersammlermodellen durchführen zu können, wurde ein Klimaschrank beschafft. Um die Strahlungsaustauscheigenschaften der Absorber zu testen, musste in die Klimakammer eine „kalte Korrespondenzfläche“ eingebaut werden. Im Projektantrag war hierfür der Aufbau einer Flüssigstickstoff-Kühlung geplant. Da der Aufbau einer LN₂-Infrastruktur und der LN₂-Verbrauch einen sehr hohen Aufwand bedeutet hätte, wurde zunächst geprüft, ob die Nutzung von Laborkühlgeräten möglich ist. Es zeigte sich, dass durch Reihenschaltung zweier Laborkühlgeräte der Fa. Julabo mittels eines Glycol-Wasser-Gemisches (Kühlerfrostschutzmittel) eine Temperatur -10 °C erreicht werden kann, was völlig ausreichend ist. Dieser Teil des Projektes konnte also sehr viel kostengünstiger dargestellt werden, da die beiden Kühlgeräte zur Verfügung standen also nicht beschafft werden mussten. Dadurch war es möglich verschiedene Materialien und Konstruktionsmodelle zu testen. Zur berührungsfreien Messung von Temperaturen aber auch zur Bestimmung der Emissionsfaktoren der verwendeten Materialien wurde ein Pyrometer, dessen Messfenster mit dem Atmosphärischen Fenster nahezu identisch ist, beschafft.

Ab Projektbeginn wurden Literaturstudien zwecks Auswahl eines geeigneten Folienmaterials durchgeführt. Die Wahl fiel auf eine LLDPE-Folie, die an das atmosphärische Fenster optimal

angepasst, chemisch sehr inert (PE!) und mechanisch stabil ist. Diese Eigenschaften sind für den beabsichtigten Einsatz angesichts der Rahmenbedingungen sehr günstig. Für die Fertigung sind sie allerdings angesichts der sehr schlechten Verklebbarkeit von PE sehr problematisch! Nach dem Ausscheiden des Kooperationspartners Fa. Seybold, stand HF-Schweißen als Fügetechnik nicht zur Verfügung. Es musste daher auf klassisches thermisches Verschweißen zurückgegriffen werden. Dies ist natürlich bei einer dünnen Folie immer problematisch, da Schweißversuche oft wegen Perforationen scheitern. Gleichwohl konnten mittels dieser Technik erste Absorber/Speicher-Modelle gefertigt werden, um die Strömungskanäle hydraulisch zu optimieren. Es wurden mit solchen Modellen außerdem Langzeitversuche zur Wassertransmission durchgeführt, die einen geringen Wasserverlust ergaben.

2.1.3 Feldmessungen

2.1.3.1 Ursprüngliches Konstruktionsprinzip

Um die praktische Umsetzbarkeit des Strahlungsaustausches als Mittel zur Gewinnung von Kälteenergie zu zeigen, wurden zwischen August 2005 und Januar 2006 mehrere Feldversuche auf dem Dach des Hochschulgebäudes durchgeführt. Die Ergebnisse (s. Abschnitt 2.2.2) waren sehr viel versprechend.

Für Feldmessungen unter realistischeren Bedingungen waren bereits im Projektantrag Versuche in Spanien avisiert. Der Verbundpartner Koch Anhängerwerke sah sich allerdings außer Stande, einen Kontakt in Spanien herzustellen. Er schlug vor, diese Aufgabe an Dr. Dieter Seifert zu delegieren, wollte aber diesem keinen Unterauftrag erteilen, sondern diesen als Verbundpartner nachträglich installieren, was förderrechtlich nicht machbar war. Wir sahen uns damit vor das Problem gestellt, dass wir den Part des Verbundpartners mit erledigen mussten.

Eine Kontaktaufnahme mit dem Instituto de Radio Astronomia Milimétrica (IRAM) in Granada verlief sehr positiv. Der Institutsleiter, Dr. Mauersberger, stimmte spontan zu, auf dem Dach des Institutsgebäudes einen Versuch durchzuführen. Die Durchführung wurde durch einen Kooperationsvertrag rechtlich abgesichert. Feldversuche beim IRAM hatten natürlich den Vorteil, dass wir dessen wissenschaftliche Infrastruktur nutzen konnten. Allerdings liegt das Institutsgebäude in eine Höhe von 2900 m über NN, man findet dort also meteorologische Verhältnisse ähnlich jenen in den Anden vor.

Bei Konstruktion bzw. Aufbau des Feldmoduls zeigte sich sehr schnell, dass die Zusammenarbeit mit Fa. Koch bei konstruktiven Arbeiten sehr schleppend war. Am IRAM sind Feldversuche nur in den Sommermonaten sinnvoll durchzuführen. Der Termin musste mehrfach werden, was dazu führte, dass die Feldmessungen erst Ende August begonnen werden konnten. Beim Aufbau des Feldmoduls wurden soweit möglich Standardbauteile genutzt (DEXION); notwendige Spezialanfertigungen wurden in der mechanischen Werkstatt der Hochschule hergestellt. Konstruktionspläne wurden soweit notwendig von uns selbst angefertigt. Wegen der zu erwartenden schwierigen meteorologischen Verhältnisse und wegen der Probleme beim Kondensieren von Wasser wurde das Feldmodul teilweise aus Aluminiumblech gefertigt.

Da der Aufbau suboptimal war und der Wintereinbruch in der Siera Nevada relativ früh eintrat, war die Wasserernte sehr schlecht. (s. Abschnitt 2.2.2.3)

Beim Aufbau des Wassersammlers in Spanien hatte sich gezeigt, dass die anfangs verwendete LLDPE-Folie keine ausreichende mechanische Stabilität hatte. Auf Nachfrage konnte der Hersteller zwar eine dickere Folie anbieten, der Preis war aber erheblich höher. Dies hätte die wirtschaftlichen Probleme der Methode weiter verschärft, weswegen dieser Weg nicht weiter verfolgt wurde. Spektroskopische Messungen an Baumarktfolien aus LDPE zeigten allerdings, dass auch diese gut an das atmosphärische Fenster adaptiert sind. Es war aber schwierig, dichtes

Folienmaterial zu bekommen, da die meisten Baumarktfolien aus Rezyklat hergestellt werden. Es konnte aber eine LDPE-Folie aus Neumaterial der Dicke 200 μm beschafft werden.



Abbildung 3: Wassersammler auf dem Dach des Observatoriums des Instituto de Radio Astronomia Milimétrica (IRAM) in Granada; links: Frontansicht, rechts: Seitenansicht

Mit diesem Material konnte eine neue Absorber/Kondensator-Einheit hergestellt werden. (Da wir nur sehr unzureichende Möglichkeiten hatten, Folien zu schweißen, war dies ein sehr zeitaufwändiger Prozess!) Eingebaut wurde diese Einheit in ein zweites Feldmodul, das in seiner Grundkonstruktion analog zum ersten Feldmodul aufgebaut war. Völlig neu designed wurde allerdings die Luftführung des Kondensators. Der Kondensator ist jetzt aus Kunststoff und Holz aufgebaut.

Das neue Feldmodul wurde einem mehrwöchigen Dichtigkeitstest unterzogen. Leider zeigte sich, dass die Absorber/Kondensator-Einheit nach einigen Wochen undicht wurde, obwohl sie keinerlei mechanischer und thermischer Beanspruchung ausgesetzt war. Es scheint so, dass Wasser in das Folienmaterial eindringt und dieses aufquillt. Wir sahen uns daher gezwungen, das Konzept „Ein Kunststoff für das gesamte Modul“ aufzugeben. Ein handelsübliches Material, das sich gut für einen dauernden Kontakt mit Wasser eignet, ist Teichfolie. Sie wird in den Dicken 0,5 mm, 0,7 mm und 1 mm angeboten. Teichfolie ist allerdings nicht an das atmosphärische Fenster adaptiert.

Obwohl klar ist, dass eine Konstruktion, die mehrere verschiedene Materialien benötigt teurer zu fertigen ist, als eine solche aus einem Material, haben wir deshalb die wassergefüllten Teile der Absorber/Kondensator-Einheit aus Teichfolie gefertigt. Teichfolien werden aus PVC hergestellt; es gibt Klebstoffe für dieses Material. Mittels eines Pyrometers, dessen Messbereich auf das atmosphärische Fenster begrenzt ist, konnten wir an Folien, die auf eine definierte Temperatur gebracht waren, den Emissionsfaktor bestimmen. Mit $\varepsilon = 0,95$ bis $0,98$ im Bereich von 8 bis 13 μm ist Teichfolie sehr gut als Absorbermaterial geeignet.

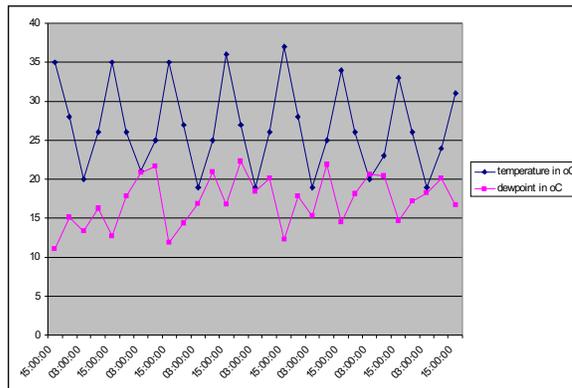
Ausgedehnte Messungen der Zugfestigkeit von Klebeverbindungen bei Teichfolie aus PVC zeigten sehr gute Werte. Gleichwohl erwies sich die Fügetechnik als äußerst problematisch. Da das Material nach Behandlung mit Kleber aufquillt, kommt es zu Verwerfungen, die sehr häufig sofort oder mit kurzer Zeitverzögerung auftretenden Undichtigkeiten verbunden waren. Auch Hochfrequenzverschweißen erwies sich als schwierig. Da die Hochschule über diese Technologie nicht verfügt, mussten Lohnverarbeiter beauftragt werden. Auch die so gefertigten Module zeigten nicht die erforderliche Sicherheit der Dichtigkeit, was nach Aussage der Verarbeiter daran lag, dass für ein optimales Schweißergebnis speziell gefertigte Elektroden notwendig wären, was noch

aufwändiger wäre. Zudem war bei allen so gefertigten Moduln der Austausch zwischen Absorber und Kondensor behindert.

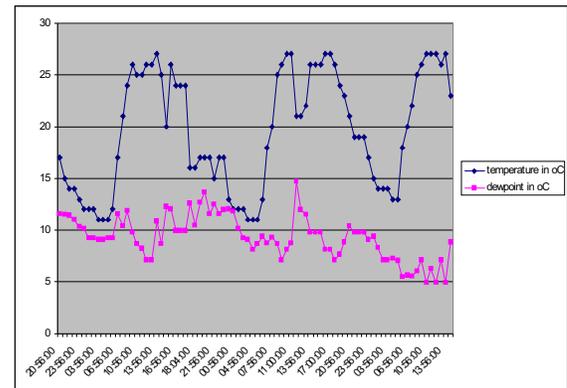
Wegen der auftretenden großen technischen Probleme, deren Lösung durchgängig zu einer weiteren Verteuerung Wassersammler geführt hätte, und wegen der im nächsten Abschnitt dargestellten leistungsfähigeren Konstruktion wurde die Entwicklungslinie nicht mehr weiter verfolgt.

2.1.3.2 Wassersammler ohne Kältespeicher

Meteorologische Daten des Solarforschungszentrum PSA in Almeria zeigten ein Maximum der Taupunkttemperatur während der Nacht. Eine kritische Durchsicht der Daten, die wir von diversen Stationen per Internet abfragen, zeigte, dass ein solches Verhalten in einigen Halbwüsten vorkommt. Abb. 4 zeigt dieses Verhalten am Beispiel von zwei Stationen. Man könnte also in einigen Halbwüsten Wasser gewinnen, ohne Kälte zwischenspeichern zu müssen. Der konstruktive Aufwand wird dadurch sehr gering. (Nach einer groben Abschätzung sind Modulkosten von 5 bis 10 € pro m² denkbar. Dann wären die Kosten für das gewonnene Wasser mit denen der Meerwasserentsalzung vergleichbar!) Ein solches System ist also wirtschaftlich sehr interessant.



a) Nekhel, Ägypten



b) Flagstaff, USA

Abbildung 4: Vergleich Lufttemperatur und Taupunkt für 2 Stationen

Es wurden reine Absorbermodule für erste Tests aufgebaut. (Größe etwa DIN A4) Diese zeigten ein sehr positives Abkühlverhalten. Die ersten Tests in der Klimakammer und auf dem Dach der Hochschule verliefen sehr positiv. Beigefügte Abbildung zeigt ein etwas größeres Modul auf dem Dach der Hochschule. In systematischen Messungen in der Klimakammer wurde das System optimiert. Der beste Messwert auf dem Dach der Hochschule zeigte mit einer Abkühlung von 6 K ein sehr positives Verhalten.

Abb. 5 zeigt zwei Testmodelle auf dem Dach der FH-SWF. Um die Messungen zu vereinfachen, wurde für Feldmessungen ein äußerst leichtes Modul hergestellt. Dieses ist in Abb. 5 b) gezeigt. Dieses Modul kann auf eine Laborwaage montiert werden. Da es keinen Wasserablauf hat, sammelt sich das Wasser während einer Sammelphase an; die Gewichtszunahme, die leicht zu detektieren ist, entspricht der Menge an gesammeltem Wasser. Auch in diesem Modul wurde als Absorberfolie PVC-Teichfolie genutzt und als Filter zur Anpassung an das atmosphärische Fenster LDPE-Folie. Es wurde eine Abkühlung des Moduls gegenüber der Umgebungstemperatur von ca. 3 K erreicht.



a) Erstes Testmodell



b) Leichtbaumodul für Feldmessungen

Abbildung 5: Kombinierte Absorber/Kondensor-Module ohne Kältespeicherung

Der Wassersammler wurde im September 2007 in Loctudy in der Bretagne getestet. Entgegen einer weit verbreiteten Meinung ist die Bretagne keineswegs durchgängig feucht! Insbesondere die Südküste des Pays Bigouden im Süden des Département Finistère gilt als trocken. In Penmarch, einem ca. 14 km vom Messort entfernten Ort, ist der durchschnittliche Jahresniederschlag 679 mm also deutlich unter dem globalen Mittel. Nach lokalen Berichten gilt die Region Pont l'Abbé, Loctudy und Plobannalec-Lesconil als noch trockener. Abb. 6 zeigt die Niederschlagsverteilung im Département Finistère im August 2007. Danach fielen am Messort zwischen 30 und 40 mm Niederschlag, allerdings in der ersten Hälfte des Monats.

Es konnten pro Nacht 150 bis 460 mL/m² gesammelt werden. (Näheres in Abschnitt 2.2.3)

Die Projektbearbeitung wurde in der Folgezeit schwieriger, da keine Mittel mehr für einen normalen Beschäftigten vorhanden waren. Daher war der Projektleiter darauf angewiesen, die Bearbeitung mit Unterstützung ungeprüfter wissenschaftlicher Hilfskräfte voran zu treiben. Dies hat die Bearbeitung natürlich sehr stark verlangsamt.

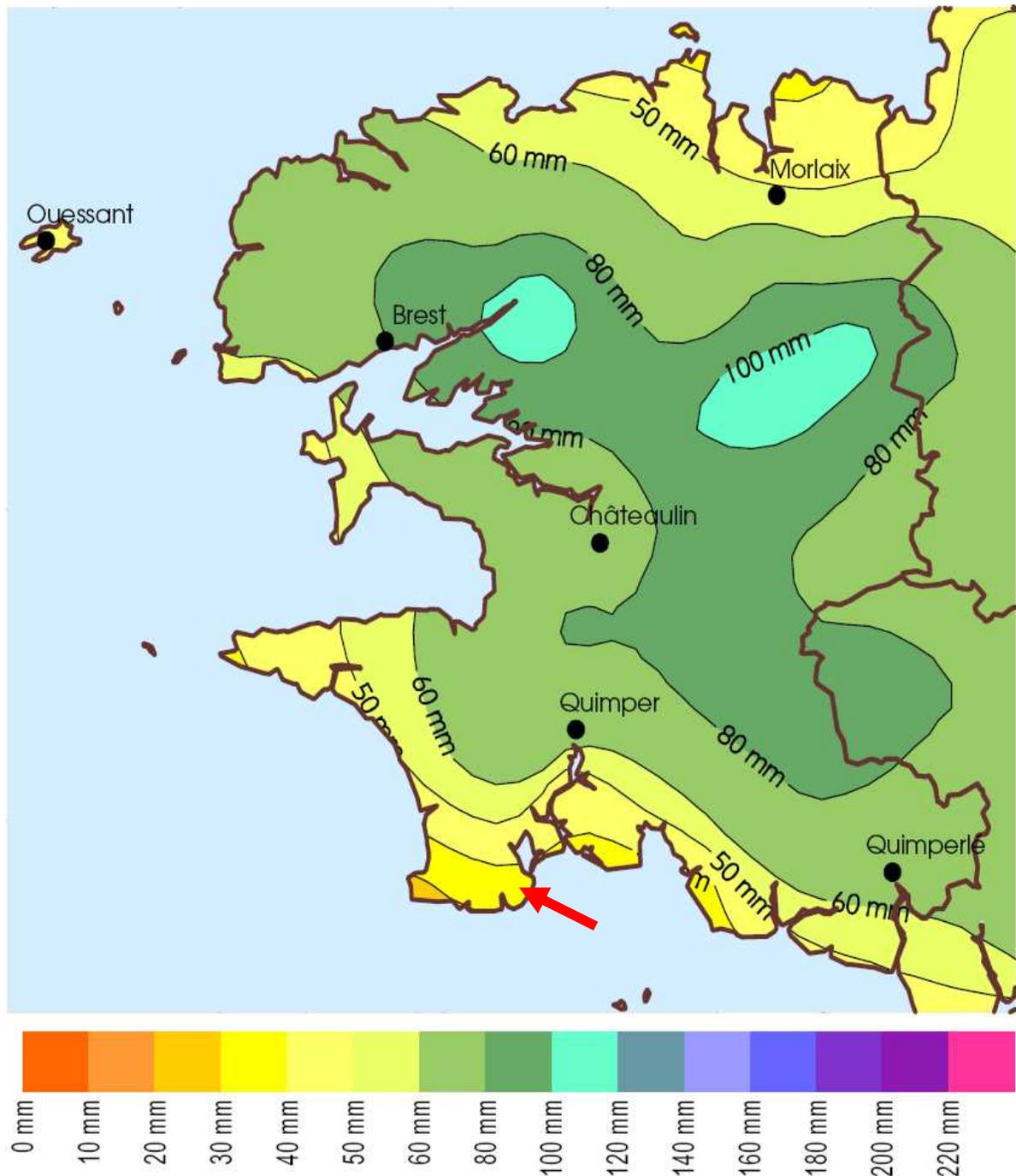


Abbildung 6: Niederschlagsverteilung im Département Finistère im August 2007 (Quelle: Meteo France)

Im ersten Halbjahr 2008 wurde aus Hartplastikplatten, in die durch die Hochschulwerkstatt Strömungskanäle gefräst wurden, ein Redesign eines Wassersammlers ohne Kältespeicher aufgebaut. (s. Abb. 7)

Im Spätsommer 2008 wurde versucht, diesen Sammler ebenfalls in Loctudy in der Bretagne zu testen. Wegen eines Montagefehlers, der vor Ort nicht zu beheben war, musste dieser Test abgebrochen werden. Ein erneuter Versuch Anfang Februar 2009 schlug wetterbedingt ebenfalls fehl. (In der einzigen niederschlagsfreien Nacht gingen die Daten durch einen Computerfehler verloren.) Der Testaufbau von 2008 ist in Abb. 8 wiedergegeben.



Abbildung 7: Redesign des Wassersammlers ohne Kältespeicher



Abbildung 8: Testaufbau

In der Zeit von 06. bis 09. August und 07. bis 15. September 2009 konnten dann erfolgreiche Feldmessungen durchgeführt werden. Die Wasserernten lagen im August zwischen 590 und 810 mL/m² d und im September zwischen 350 und 970 mL/m² d.

2.1.4 Problemfeld Wasseraffinität des Folienmaterials

Bereits bei der Auswahl des Materials war klar, dass eine Abscheidung von Wassertropfen auf den sehr hydrophoben LLDPE-Folien schwierig sein würde. Wie die Besprühung mit feinen Wassertropfchen zeigte, liefen gebildete Tropfen nicht ab. Da Wasser einen thermischen Isolator darstellt, behindern Wassertropfen die Kondensation und somit die Wasserabscheidung. Natürlich ist eine mögliche Lösung die Verwendung unterschiedlicher Materialien. Dies verschärft aber die Fügeproblematik weiter; dennoch wurde dieser Weg im weiteren Projektverlauf beschritten. Alternative ist eine (partielle) Oberflächenmodifikation des Folienmaterials. Vorbild hierfür ist



die Oberflächenstruktur des Panzers des Wüstenkäfers *stenocara*, dem es gelingt, in der südafrikanischen Namib-Wüste zu überleben. Sein Panzer ist in hydrophobe und hydrophile Segmente unterteilt. Dies begünstigt die Tropfenbildung und deren Ablauf zum Mund.¹ In orientierenden Versuchen ist es gelungen, durch Aufdrucken einer ähnlichen Struktur auf die Folie mittels eines Tintenstrahldruckers und anschließender Hydrophilisierung durch Niedertemperatur-Plasmabehandlung die Eigenschaften der Folien zu verbessern.

Abbildung 9: Wüstenkäfer *stenocara*

In systematischen Versuchen wurden die Möglichkeiten einer Hydrophilierung im Niedertemperaturplasma untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass dies möglich ist. Allerdings war die Modifizierung der Oberflächeneigenschaften nicht dauerhaft. Daher wurde eine organische Beschichtung entwickelt, die die hydrophilen Eigenschaften stabilisiert. Über die Ergebnisse wird in Abschnitt 2.2.4 berichtet.

2.1.5 Zahlenmäßiger Verwendungsnachweis

Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Verwendungsnachweises sind:

Personalausgaben – Angestellte	154.306,84 €
Personalausgaben – studentische Hilfskräfte	19.551,03 €
Gegenstände bis zu 400 €	907,66 €
Gegenstände über 400 €	15.395 €
Sonstige allgemeine Verwaltungsausgaben	17.385,62 €
Dienstreisen	<u>11.595,52 €</u>
Summe	219.395,00 €

¹ A. R. Parker & C. R. Lawrence: Water capture by a desert beetle; Nature 414, 33 -34 (2001)

2.2 Wissenschaftliche Ergebnisse

2.2.1 Spektroskopische Ergebnisse des Folienmaterials

Das Aufbauprinzip basiert auf einem Strahlungsaustausch, beschrieben durch das Stephan-Boltzmann-Gesetz mit höheren, kälteren atmosphärischen Schichten. Nimmt man an, dass der Emissionsfaktor $\varepsilon \approx 1$ ist, was für eine Wasseroberfläche und eine Reihe weiterer Materialien im Bereich des atmosphärischen Fensters (vgl. Abb. 10) näherungsweise gilt, so ergibt sich für eine Temperatur von 21 °C für die Absorberoberfläche und -10 °C für die kommunizierende Luftschicht der oberen Atmosphäre als Kälteleistung, die man ernten kann

$$\Delta S = \sigma \cdot |T_K^4 - T_A^4| = 5,67051 \cdot 10^{-8} \cdot |294^4 - 263^4| = 152,4 \frac{W}{m^2}$$

Aus Literaturstudien hatte sich LDPE und LLDPE als günstige Materialien ergeben. Eigene spektroskopische Messungen zeigten, dass diese Materialien in der Tat gut an das atmosphärische Fenster angepasst sind. (s. Abb. 11)

Da zunächst ein Aufbau mit interner Speicherung der geernteten Kälte entwickelt wurde, ist die Dichtigkeit des Materials gegenüber Wassertransport von Bedeutung. Abb. 12 zeigt diesbezügliche Langzeitmessungen.

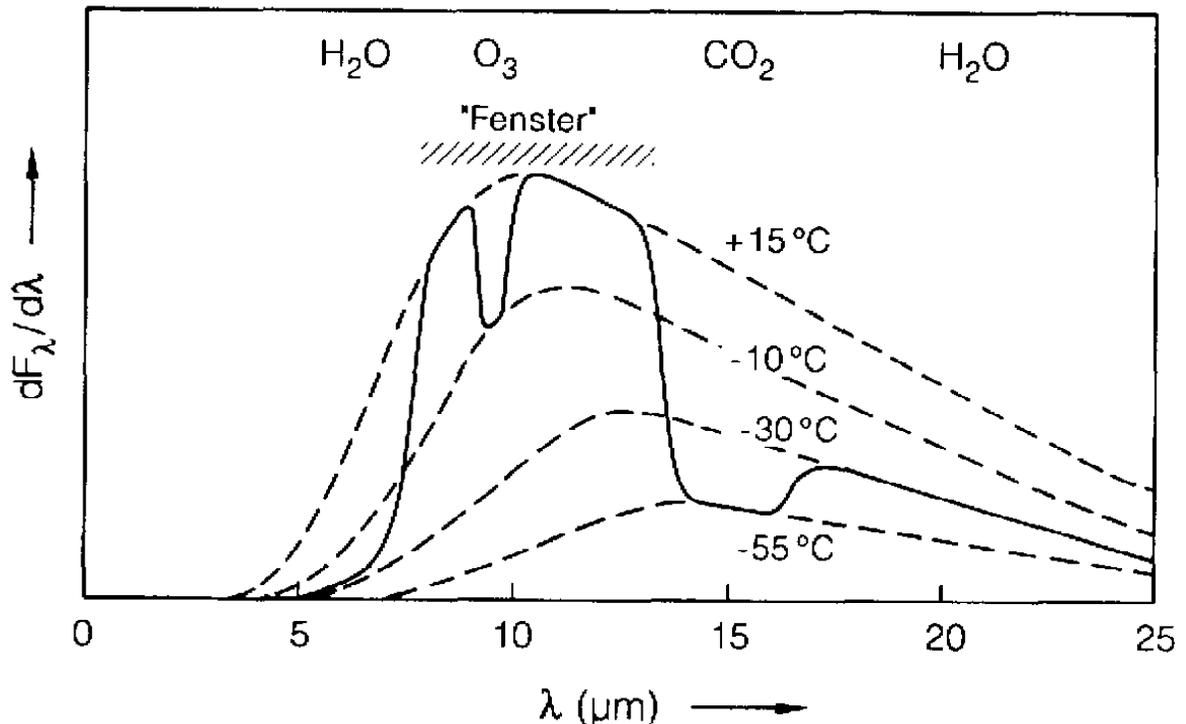


Abbildung 10: Atmosphärisches Fenster (Quelle: W. Roedel: Physik unserer Umwelt: Die Atmosphäre; Springer 1992)

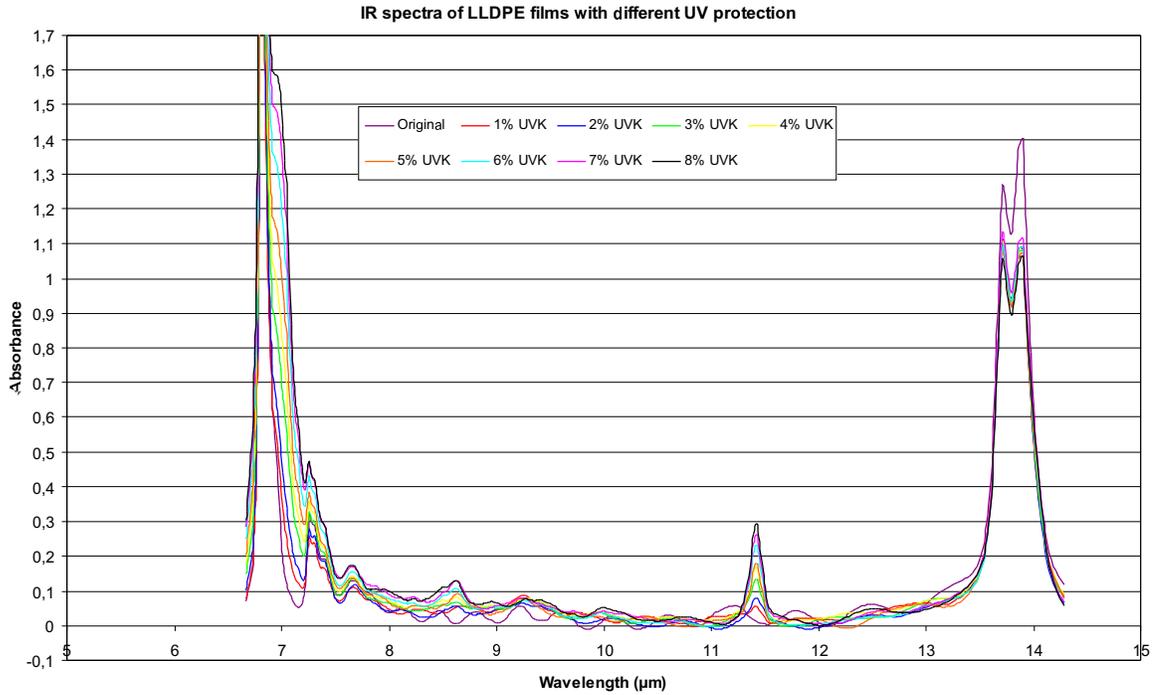


Abbildung 11: IR-Spektren verschiedener Folien aus LLDPE. Variiert wurde die Beimengung von UV-Schutz

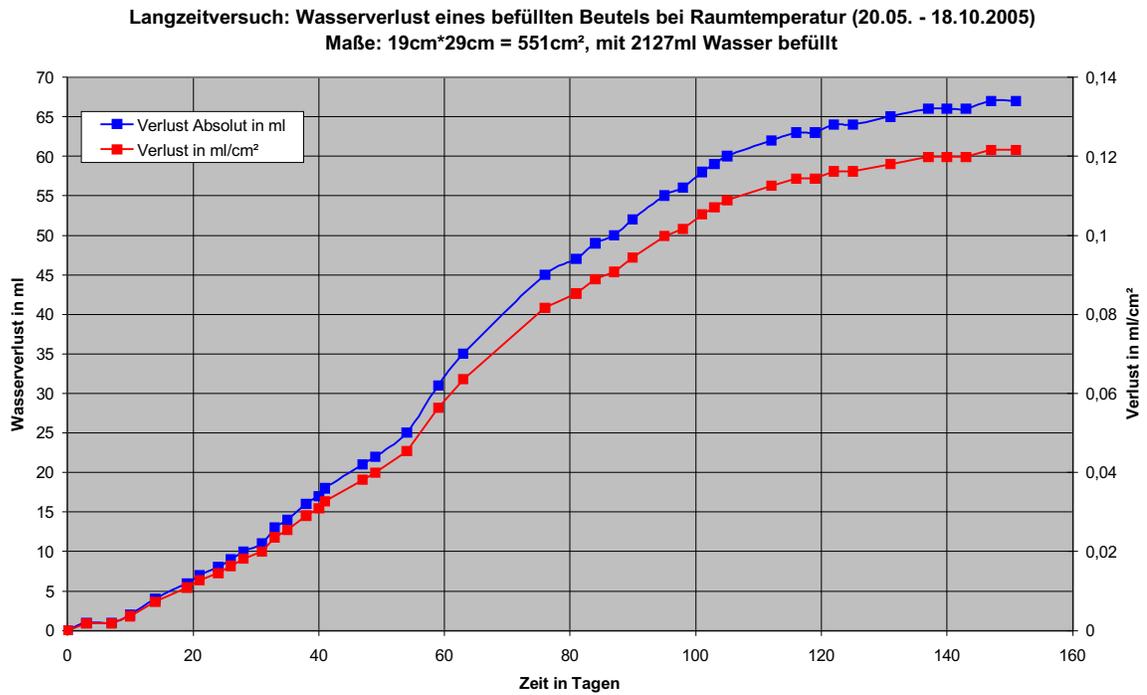


Abbildung 12: Bestimmung des Wasserverlustes durch Transport durch die Folie

2.2.2 Modullinie mit Kältespeicher

2.2.2.1 Vorversuche in einer modifizierten Klimakammer

Wie bereits oben dargestellt, wurde eine Klimakammer mit einer kühlbaren Fläche ausgerüstet, die die kalten atmosphärischen Schichten simuliert. Abb. 13 zeigt den Aufbau.

In der so modifizierten Klimakammer wurden erste Baumuster getestet, um die Wirksamkeit des Aufbauprinzips zu untersuchen. Abb. 14 zeigt die Temperaturverhältnisse in einem Wassersammler. Wie der Vergleich der Eingangs- und Ausgangstemperatur zeigt, wirkt sich der integrierte Wärmetauscher sehr positiv aus. Die ausströmende Luft ist nur um 2 bis 3 K abgekühlt. Der Verlust an Kälteleistung ist also relativ gering. Gleichwohl werden deutliche Temperaturabsenkungen im Verlauf der Luftströmung erzielt. Abb. 15 zeigt die zugehörigen Feuchtemessungen. Nach einer Einschwingphase liegt die relative Feuchte am Kondensorausgang um ca. 15 % unter jener am Lufteintritt.



Abbildung 13: Modifikation der Klimakammer. Die eingebaute Stahlplatte kann durch Kupferrohre mittels der Reihenschaltung zweier Laborthermostate auf -10 °C abgekühlt werden, um kalte atmosphärische Schichten zu simulieren.

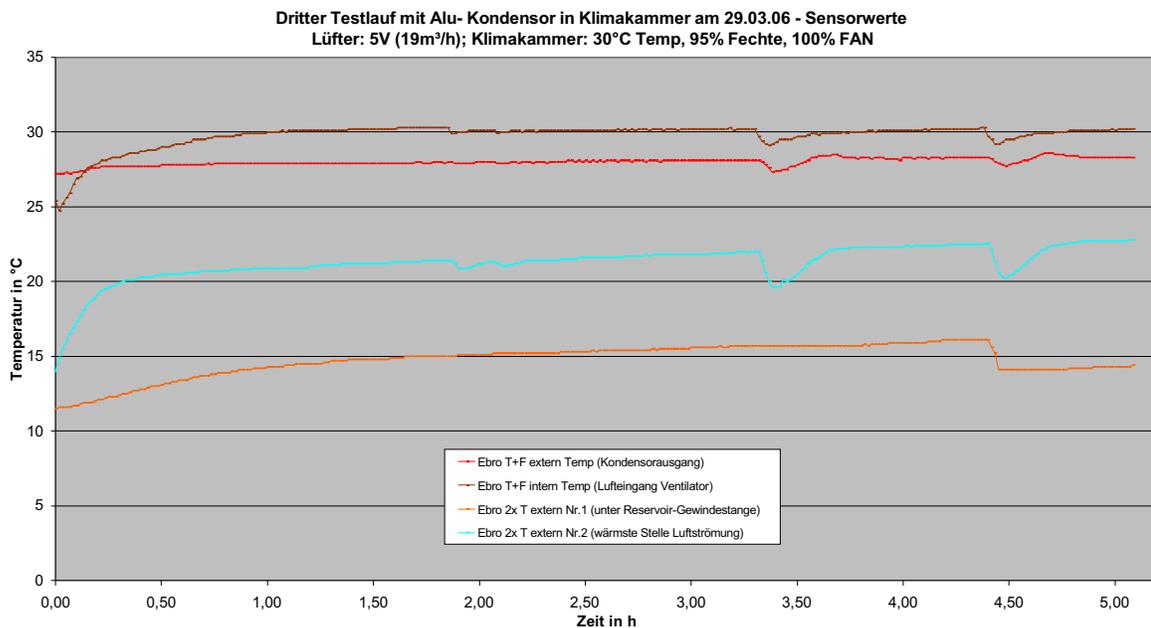


Abbildung 14: Vergleich der Temperatur am Lufttrittpunkt, dem Luftaustritt sowie zwei Messpunkten im Verlauf des Luftweges.

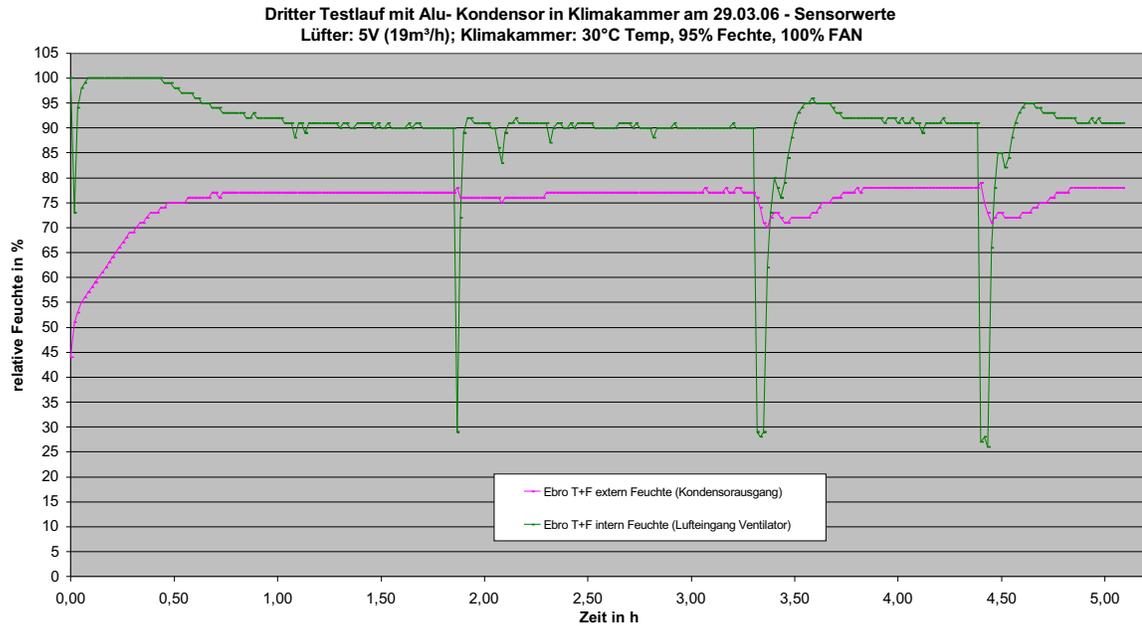


Abbildung 15: Relative Feuchte am Luften- bzw. Luftaustrittspunkt. (Gleiche Messung wie in Abb. 14)

2.2.2.2 Feldversuche in Iserlohn

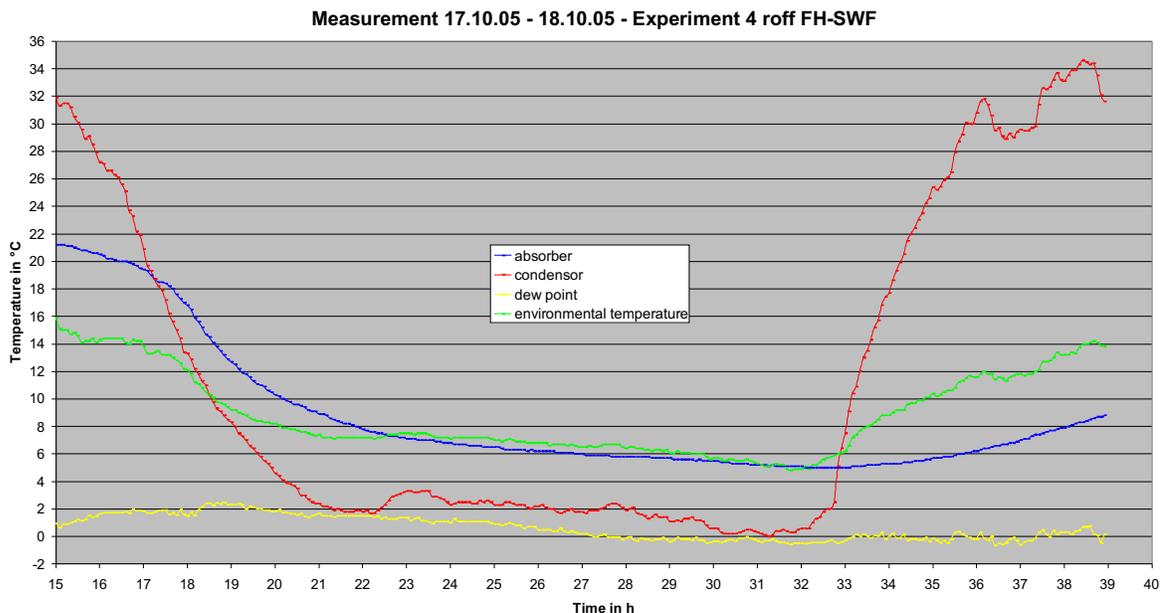


Abbildung 16: Ergebnis einer Feldmessung auf dem Dach der Hochschule in Iserlohn. Angeben sind die Umgebungstemperatur, die Temperatur am Luftentrittspunkt, die Temperatur im Kondensor und der aus der relativen Feuchte und der Umgebungstemperatur berechnete Taupunkt.

Um die praktische Umsetzbarkeit des Strahlungsaustausches als Mittel zur Gewinnung von Kälteenergie zu zeigen, wurden zwischen August 2005 und Januar 2006 mehrere Feldversuche auf dem Dach des Hochschulgebäudes durchgeführt. Wie die Abb. 16 zeigt, konnten Abkühlungen bis zu 5 K gegenüber der Umgebungstemperatur gemessen werden. Die typischen Werte liegen allerdings bei ca. 2 K. Dieses Ergebnis ist durchaus erstaunlich. Das atmosphärische Fenster wird durch Wasserdampf in der Atmosphäre „verschlossen“. Da im Sauerland die Niederschlagsmenge

sehr hoch ist, ist das atmosphärische Fenster immer mehr oder weniger verschlossen. Es konnte aber sogar im Anschluss an eine mehrwöchige Regenperiode im August 2005 eine Abkühlung um 2 K erreicht werden. Allerdings wurde in Iserlohn die Taupunkttemperatur nie unterschritten. Daher war eine Wasserernte nicht möglich!

2.2.2.3 Feldmessungen in Spanien

Wie bereits in Abschnitt 2.1.3.1 dargestellt, konnte als Kooperationspartner für Feldmessungen in Spanien das Instituto de Radio Astronomia Milimétrica (IRAM) in Granada gewonnen werden. Der Feldtest wurde vom 28. 08. 2006 bis 11. 10. 2006 durchgeführt. Bei der Montage des Feldmoduls zeigten sich Probleme mit dem Material LLDPE; der kombinierte Absorber und Kondensator war während des Transportes undicht geworden. Es musste daher ein Bauteil aus einem anderen Material eingesetzt werden, das natürlich spektroskopisch suboptimal war.

Zur Messdatenerfassung wurden für die Messung von Temperaturen und Feuchtwerten autarke Sensoren mit integriertem Datalogger eingesetzt. Zur Erfassung des geernteten Wassers wurde eine Laborwaage mit RS232-Schnittstelle eingesetzt. Die Daten dieser Waage wurden durch ein älteres Notebook abgefragt und gespeichert. Dieses Notebook steuerte eine kleine Bilgepumpe, die das Sammelgefäß auf dem Wägeteller einmal pro Tag entleerte, und einen Ventilator, der einen Luftstrom durch den Kondensator sicherstellte.

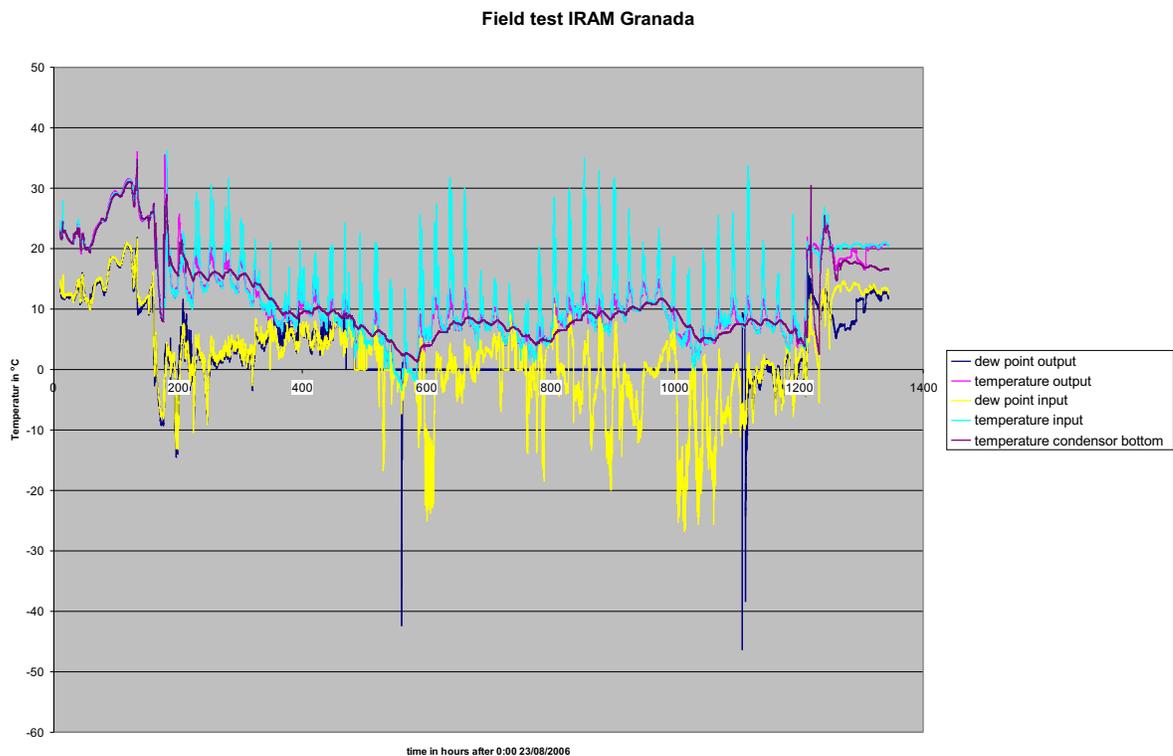


Abbildung 17: Messwerte während des Feldversuches vom 28. 08. – 11. 10. 2006 (Temperatur der ein- bzw. ausströmenden Luft sowie des Kondensators, Feuchte der ein- bzw. ausströmenden Luft als Taupunkt.)

Abb. 17 zeigt die Messwerte. Wiedergegeben sind die Temperatur der in den Kondensator ein- bzw. ausströmenden Luft, die Temperatur des Kondensators sowie die Feuchte der ein- bzw. ausströmenden Luft als Taupunkt. Es sind deutliche Probleme beim Betrieb des Moduls zu sehen. Die erzielte Temperaturspanne erreicht zwar ca. 6 K, die Temperatur im Kondensator unterschreitet den Taupunkt aber fast nie. Dies ist sicherlich teilweise auf das suboptimale Material

zurückzuführen; teilweise auch auf die niedrige Umgebungstemperatur, was daran lag, dass der Temperatureinbruch in der Sierra Nevada im Jahr 2006 früher eintrat als erwartet. Dies ist auch der Grund dafür, dass der Taupunkt der einströmenden Luft sehr niedrig war; teilweise lag er bei -20°C . Der Taupunkt der ausströmenden Luft ist praktisch immer identisch zu dem der einströmenden. Nur in wenigen Zeitbereichen ist er niedriger, zu diesen Zeiten wurde Wasser gesammelt. Aus diesen Gründen war die Wasserernte insgesamt sehr niedrig; insgesamt wurde nur ca. 0,5 L Wasser geerntet.

Wie bereits im Abschnitt 2.1.3.1 dargestellt, wurde die Entwicklung dieser Entwicklungslinie aufgrund großer technischer Probleme, deren Lösung die Gesteungskosten weiter erhöht hätten, und da ein leistungsfähigeres Prinzip gefunden worden war, eingestellt. Aus diesem Grund wurden keine weiteren Feldmessungen durchgeführt.

2.2.3 Absorbereinheit ohne Kältespeicher

2.2.3.1 Feldmessungen in Iserlohn

Wie bereits im Abschnitt 2.1.3.2 dargestellt, ergab sich durch Auswertungen meteorologischer Daten, in den interessantesten geographischen Zielgebieten, den semi-ariden Zonen, auf eine Zwischenspeicherung der Kälteleistung verzichtet werden kann. Daher wurde eine neue Entwicklungslinie aufgenommen. Da der Aufbau von Baumustern sehr viel einfacher war und da das Projekt weit vorangeschritten war, wurden nur wenige orientierende Versuche in der Klimakammer durchgeführt, die nicht dokumentiert sind. Die ersten Feldmessungen auf dem Dach der Hochschule waren aber, wie Abb. 18 zeigt, sehr erfolgversprechend; die Innentemperatur lag 3 K unter der Außentemperatur.

Messung am 19./20. 06. 2007 auf dem Dach der FH SWF

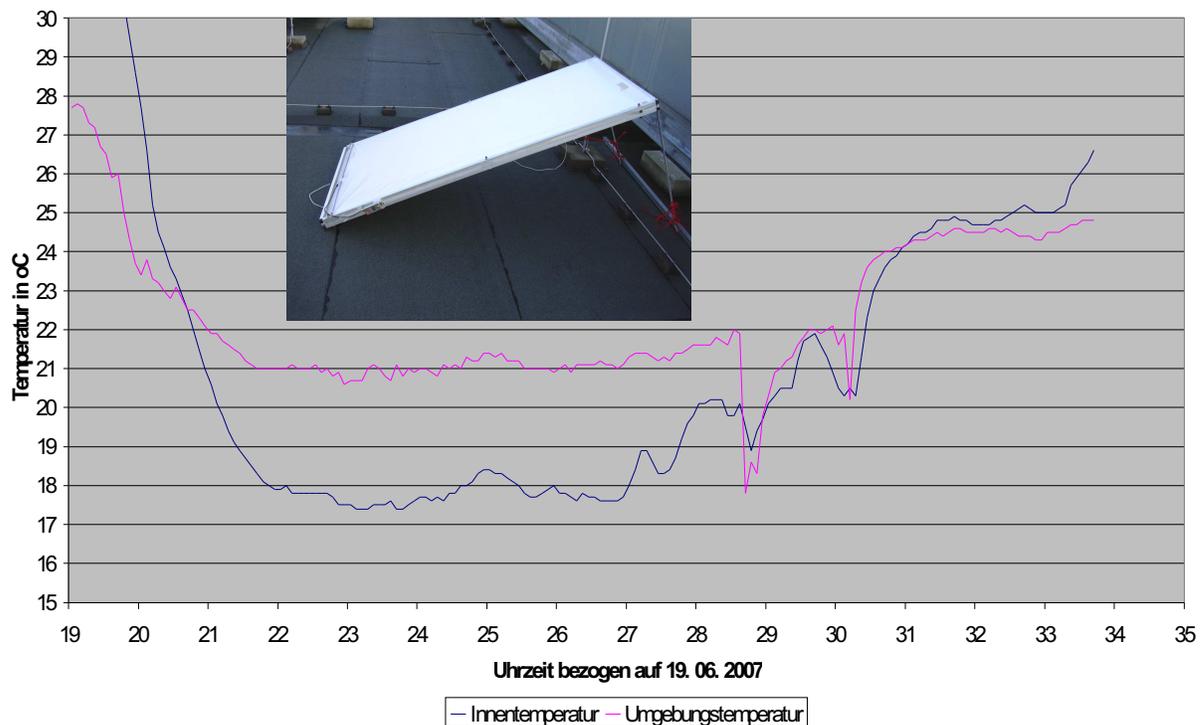


Abbildung 18: Abkühlversuch auf dem Dach der FH SWF. Es handelt sich um einen passiven Absorber, der nicht von Luft durchströmt war, es wurde also auch kein Wasser gesammelt.

2.2.3.2 Feldmessungen mit einem Leichtbaumodell in Loctudy, Frankreich

Die Frage, ob Messungen zur Wasserernte in der Bretagne aussagekräftig sein können, wurde bereits in Abschnitt 2.1.3.2 erörtert.

Für die Feldmessungen wurde eine Leichtbauversion gebaut, die auf eine Laborwaage montiert werden konnte. Diese kann per RS232-Schnittstelle abgefragt werden, wodurch die Gewichtszunahme bei Abscheidung von Wasser detektiert wurde. Mittels eines kleinen Lüfters wurde ein konstanter Luftstrom durch den Sammler erzeugt. Im Bereich der Ansaugstelle wurde die rel. Luftfeuchte und mit zwei getrennten Sensoren die Umgebungstemperatur gemessen. Mit einem weiteren Sensor wurde die Innentemperatur im Sammler gemessen. Abb. 19 zeigt die Temperaturmessungen während 5 Messtagen. Wiedergegeben sind die Umgebungstemperatur, die Innentemperatur und der aus Umgebungstemperatur und relativen Feuchte errechnete Taupunkt. Mit ca. 1 K ist die Temperaturabsenkung unter Umgebungstemperatur zwar geringer als während der Messung in Iserlohn, es wurde aber, wie Abb. 20 zeigt, der Taupunkt unterschritten und Wasser auskondensiert. Durch die frei werdende Kondensationswärme ist die Temperaturabsenkung begrenzt. In Abb. 21 sind die Wasserernten zusammengefasst. Dort ist auch eine kleine Abb. des Aufbaus, aufgenommen auf dem Dach der Hochschule, eingeblendet.

Die Ergebnisse sind mit ca. 150 bis 460 mL/m² d sehr viel versprechend. Aus diesem Grund wurde ein stabilerer Aufbau hergestellt, mit dem dauerhaftere Messungen möglich sein sollten. Über diesen wird im nächsten Abschnitt berichtet

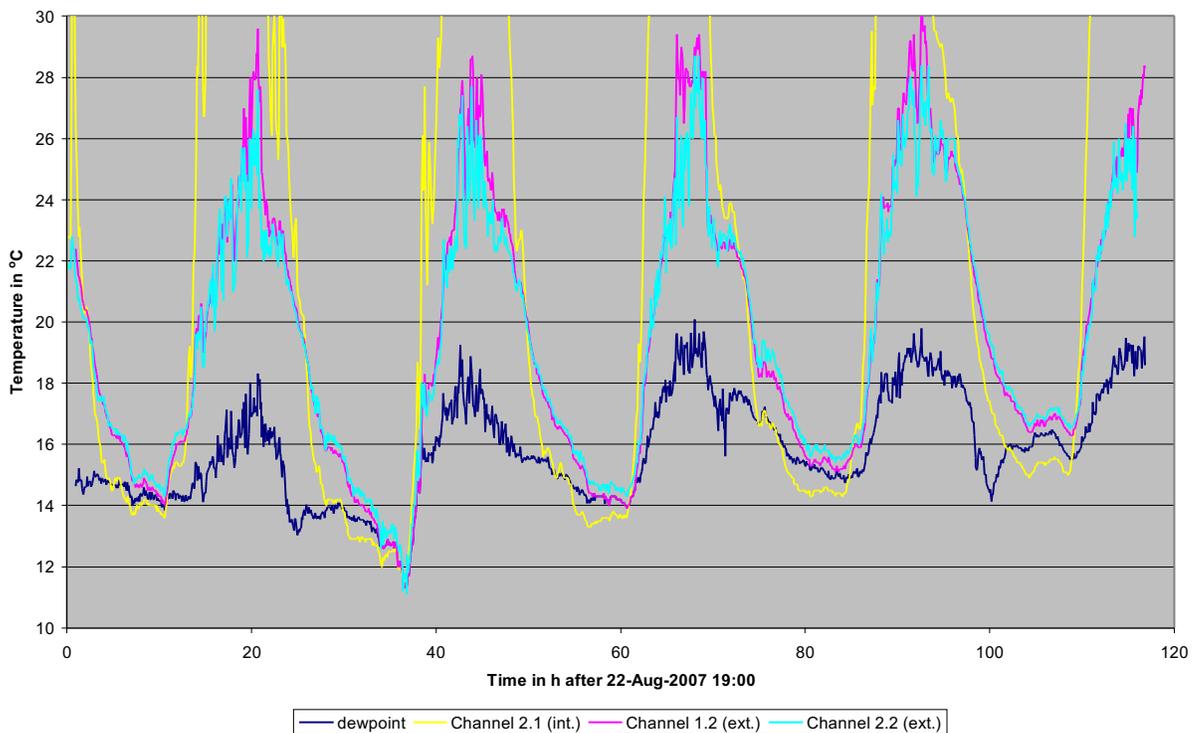


Abbildung 19: Messwerte aus Loctudy im August 2007. Angegeben sind die Umgebungstemperatur (Channel 1.2 und 2.2), die Innentemperatur im Modul (Channel 2.1) und der aus der relativen Feuchte und der Umgebungstemperatur errechnete Taupunkt

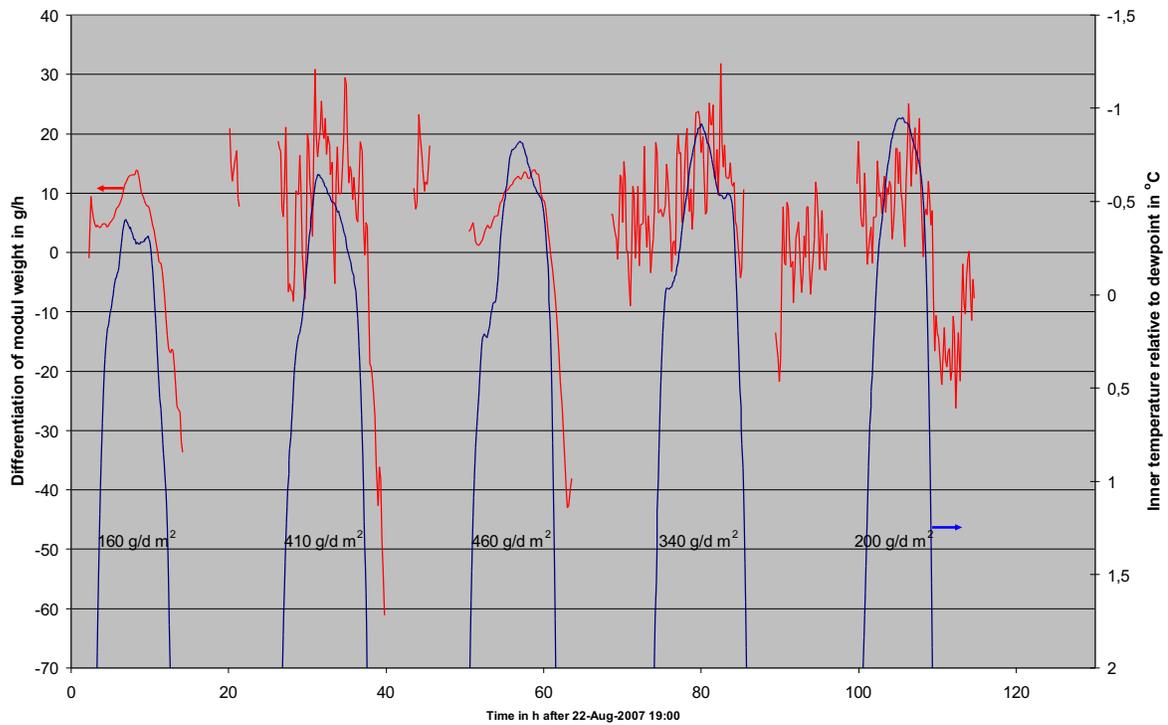


Abbildung 20: Messwerte aus Loctudy im August 2007. Angegeben ist die Differenz zwischen dem Taupunkt und der Innentemperatur (rechte Skala, negative Halbachse zeigt nach oben); negative Werte bedeuten eine Unterschreitung des Taupunktes. Außerdem die Zeitableitung des Modulgewichtes (linke Skala); positive Werte bedeuten eine Abscheidung von Wasser. Eingetragen sind auch die Wasserernten.

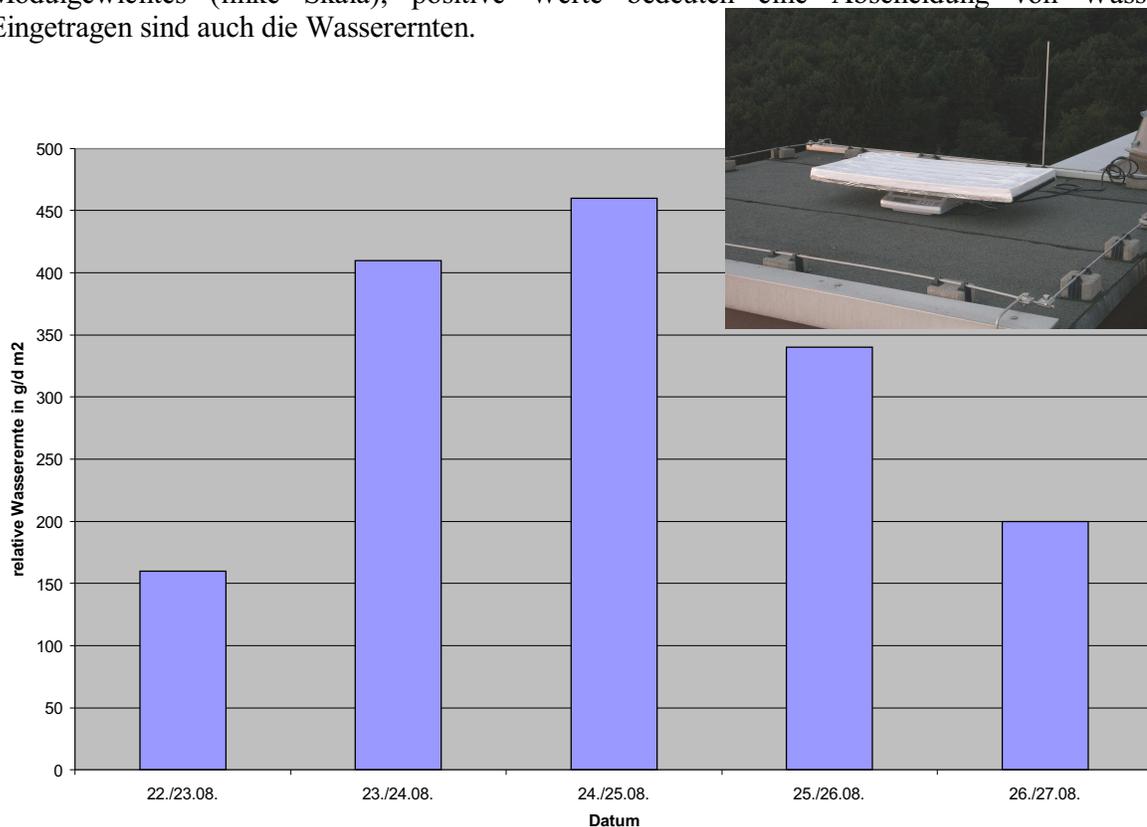


Abbildung 21: Zusammenfassung der Wasserernte bezogen auf die Modulfläche

2.2.3.3 Feldmessungen mit einem Redesign in Loctudy, Frankreich

Über die Probleme, die erfolgreiche Tests im Jahr 2008 verhindert haben, wurde bereits in Abschnitt 2.1.3.2 berichtet. In zwei Messzeiträumen im Spätsommer 2009, 06. – 09. 08 und 07. – 15. 09., konnten dann erfolgreiche Messungen durchgeführt werden. Abb. 22 zeigt den Aufbau des Wassersammlers und der Wetterstation von Spätsommer 2009.

Bei den Versuchen wurde die Betriebsspannung der Ventilatoren, die den Luftstrom durch den Wassersammler aufrechterhalten, variiert. Dadurch wurde der Sammler mit unterschiedlichen Volumenströmen durchströmt. Wie Abb. 23 zeigt, ergaben sich Wasserernten zwischen 480 und 810 mL/m² d. Die Wasserernte hing linear von der Ventilatorspannung ab. Aufgetragen ist die Temperatur am Eingang des Absorbers und im mittleren Bereich jeweils bezogen auf den Taupunkt, negative Werte zeigen also gute Bedingungen für Kondensation. Außerdem ist das Gewicht des Wassersammlers aufgetragen.

Diese lineare Abhängigkeit konnte allerdings im zweiten Messzeitraum nicht bestätigt werden. Wie die Abb. 26 zeigt, sind die Wasserernten im September bei einer Ventilatorspannung von 9 V durchweg niedriger als im August. Für eine Ventilatorspannung von 9 V ergaben sich Wasserernten von 260 bis 510 mL/m² d; bei einer Ventilatorspannung von 12 V ergaben sich Wasserernten von 300 bis 970 mL/m² d. (s. Abb. 24 und 25) Die Messwerte mit den Mittelwerten und der Standardabweichung sind in Tab.3 zusammengefasst.



Abbildung 22: Messaufbau von Spätsommer 2009. Links: Wassersammler; rechts: Wetterstation

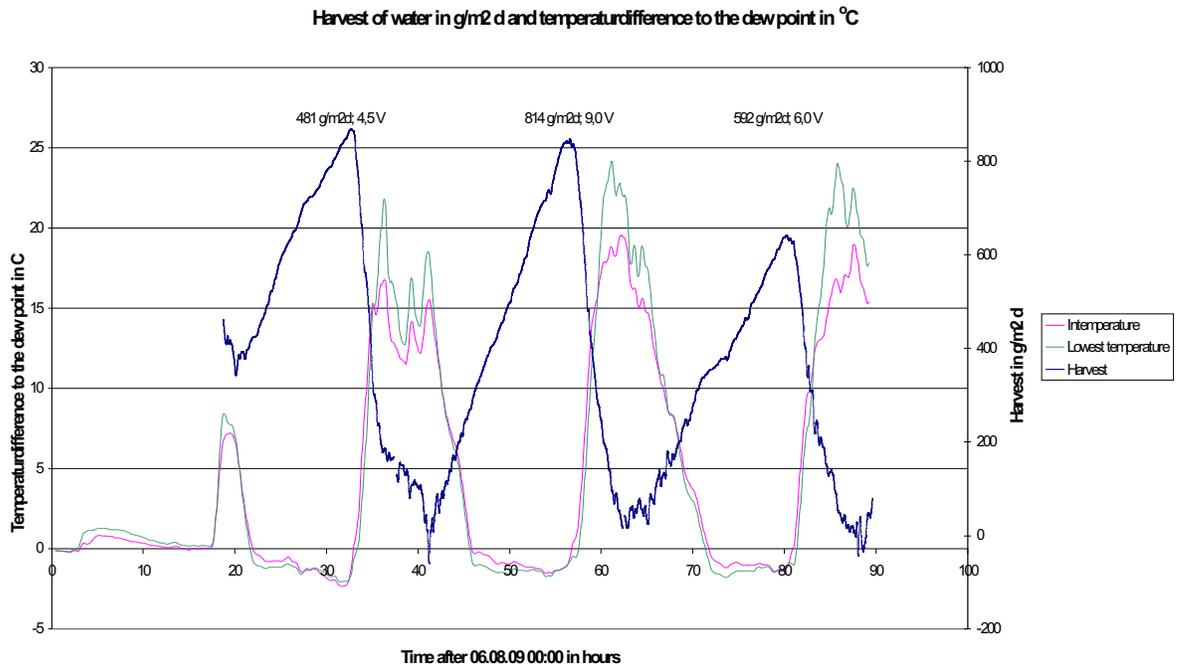


Abbildung 23: Messergebnisse für die Zeit vom 06. bis 09. 08. 2009

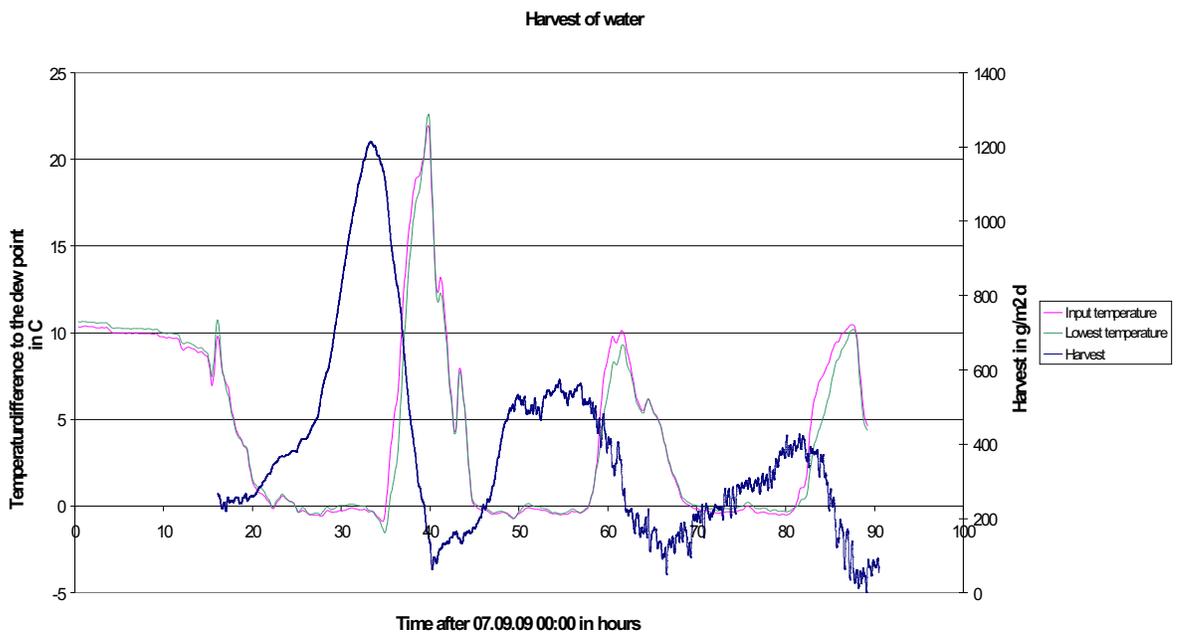


Abbildung 24: Messergebnisse für die Zeit vom 07. bis 10. 09. 2009

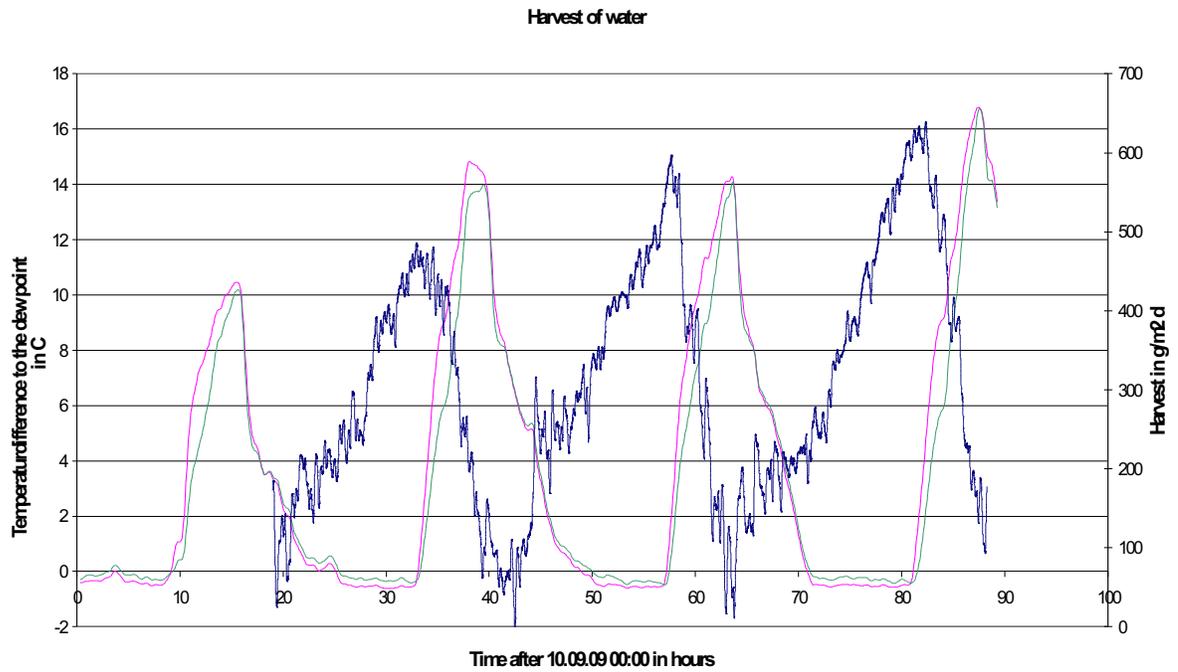


Abbildung 25: Messergebnisse für die Zeit vom 10. bis 13. 09. 2009

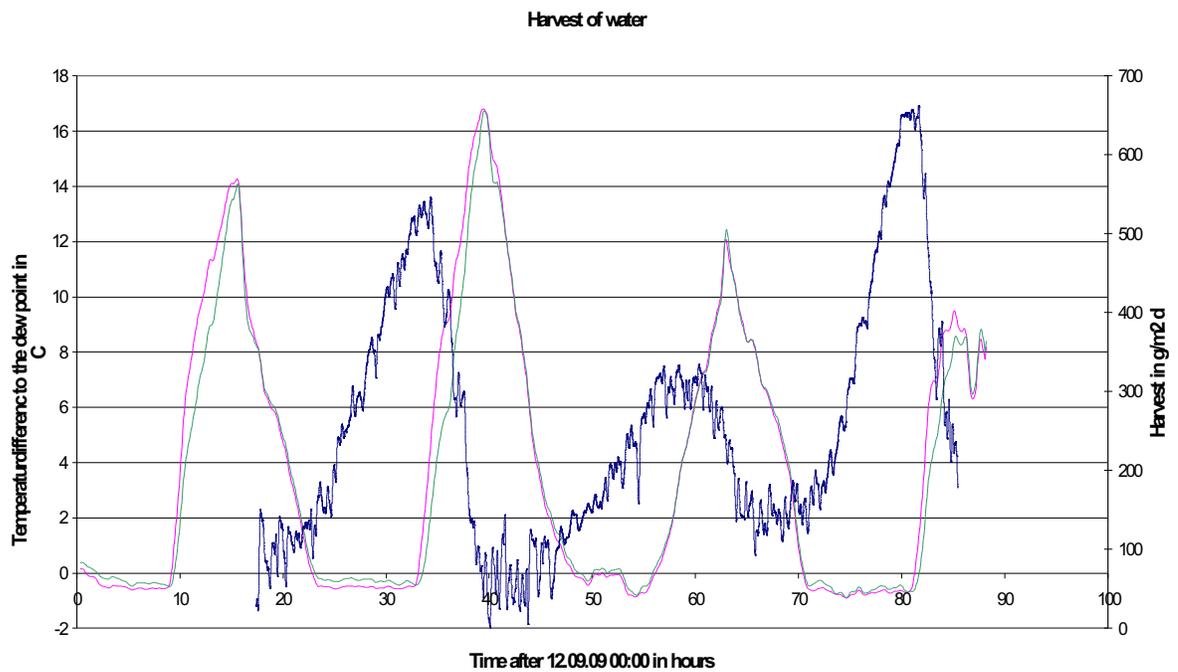


Abbildung 26: Messergebnisse für die Zeit vom 12. bis 15. 09. 2009

Tabelle 3: Zusammenfassung der Messwerte vom 07. bis 15. 09. 2009

Harvest of water in September 2009	
Voltage of fan	12 V
07.-08.	970 mL/m ² d
08.-09.	471 mL/m ² d
09.-10.	295 mL/m ² d
10.-11.	353 mL/m ² d
11.-12.	513 mL/m ² d
Mean value	520 mL/m ² d
Standarddeviation	266 mL/m ² d
Voltage of fan	9 V
12.-13.	439 mL/m ² d
13.-14.	256 mL/m ² d
14.-15.	508 mL/m ² d
Mean value	401 mL/m ² d
Standarddeviation	130 mL/m ² d

2.2.4 Hydrophilierung von LDPE

Wie bereits mehrfach dargestellt, ist LLDPE-Folie sehr gut an das atmosphärische Fenster angepasst. Allerdings ist der Kontaktwinkel für Wasser mit 100° sehr hoch; es ist sehr hydrophob. LDPE ist mit einem Kontaktwinkel von 95° nur geringfügig günstiger. Auf solchen hydrophoben Oberflächen bilden sich auch bei einer Übersättigung nur einzelne Wassertropfchen. An diesen kondensiert dann weiteres Wasser aus. Da Wasser kein guter Wärmeleiter ist, kann allerdings die Kondensationswärme nur schlecht abgeleitet werden. Man benötigt daher deutlich niedrigere Kondensortemperaturen.

Bereits Abschnitt 2.1.4 wurde wurde dargelegt, dass wir versuchen, im Sinne eines bionischen Ansatzes die Oberflächenstruktur des Wüstenkäfers *stenocara* nachzubilden. Genutzt wurde dafür die Technologie der Niedertemperatur-Plasma-Modifikation.

Mittels Sauerstoff- bzw. CO₂ Niederdruckplasmen können gezielt OH-, C=O- und COOH-Gruppen auf Kunststoffoberflächen erzeugt werden, welche die Oberflächenenergie erhöhen. Diese sind jedoch nicht langzeitstabil, da sie Quervernetzungen mit anderen Ketten innerhalb des Polymers bilden. Durch eine einfache organische Nachbehandlung konnte dieser Prozess jedoch verzögert und so die behandelte Kunststoffolie dauerhaft hydrophiliert werden. Die Nachbehandlung hatte keine optische Veränderung der Folie zur Folge.

Wie in Abb.27 zu erkennen, kann mittels einer Nachbehandlung der Kontaktwinkel von Wasser im Gegensatz zu einer reinen Sauerstoffplasmabehandlung bei etwa 55° stabilisiert werden. Dies entspricht einer Abnahme des Kontaktwinkels im Vergleich zu einer unbehandelten Folie um 40°.

Der Alterungsprozess der im Plasma induzierten, polaren Gruppen ist stark von den Umgebungsbedingungen abhängig. Daher war es notwendig, die nachbehandelten Folien unter extremen klimatischen Bedingungen zu testen. Auf diese Weise kann die Stabilität der Nachbehandlung unter den späteren Einsatzbedingungen getestet werden. Die Ergebnisse sind in Abb. 28 wiedergegeben.

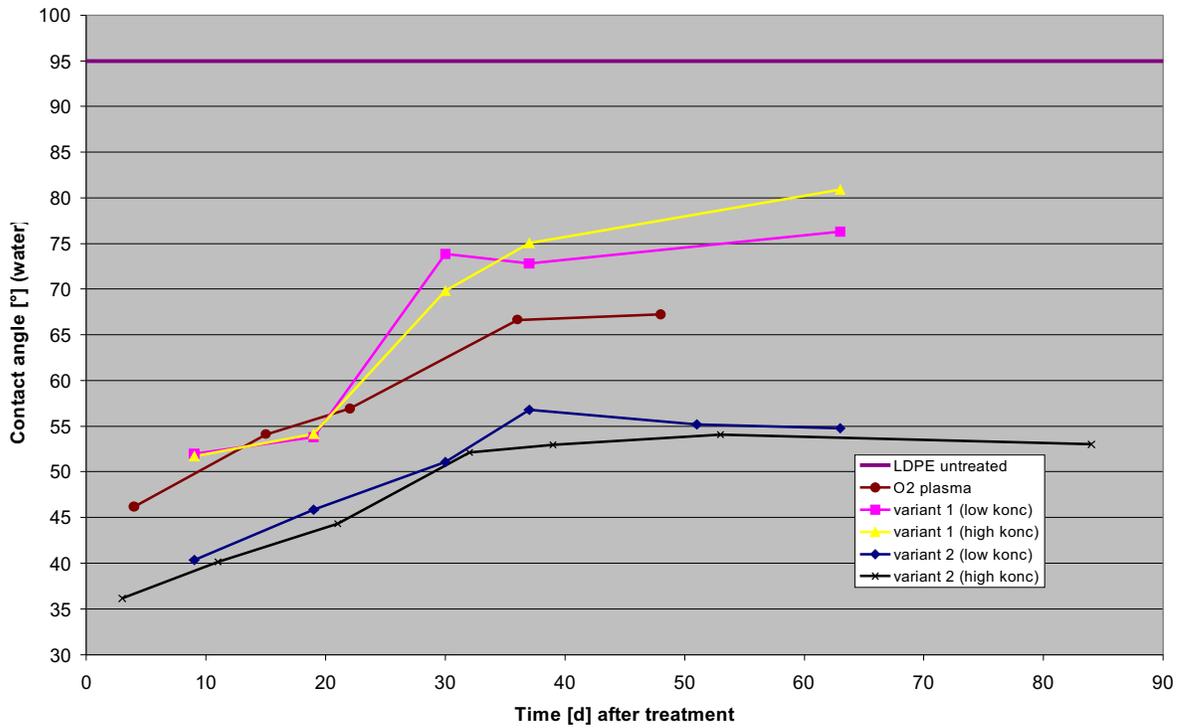


Abbildung 27: Kontaktwinkel der behandelten LDPE Folien bei Lagerung unter Normalbedingungen

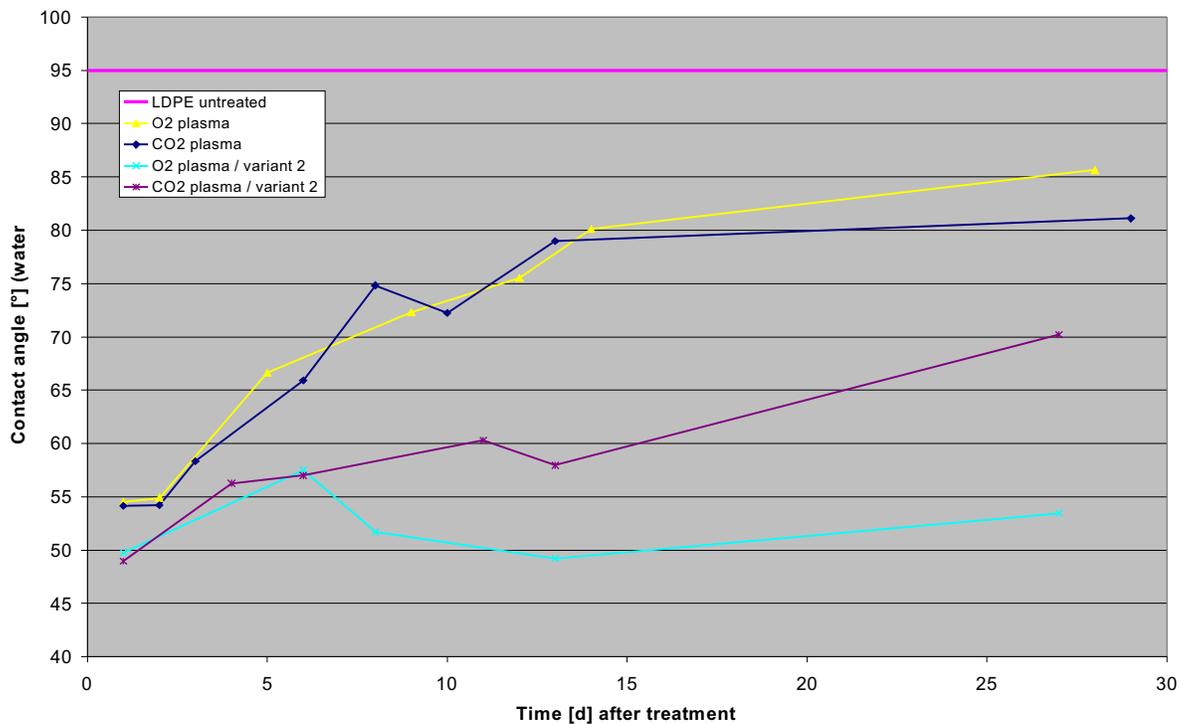


Abbildung 28: Kontaktwinkel der behandelten Folien bei Lagerung unter extremen, klimatischen Bedingungen 45°C, 85% Feuchte

Es zeigt sich, dass durch die Nachbehandlung der Kontaktwinkel auch bei extremen Bedingungen im Gegensatz zu der reinen Plasmabehandlung stabil bleibt; auch nach 27 Tagen weist das Material noch einen um ca. 40° niedrigeren Kontaktwinkel auf. Dies zeigt die Effizienz der hier eingesetzten Nachbehandlung.

Die behandelten Folien wurden durch XPS-Messungen charakterisiert. Abb. 29 zeigt einen Teil der Resultate. Es zeigt sich, dass mittels der Nachbehandlung die im Plasma erzeugten funktionellen Gruppen über längere Zeit stabilisiert werden können.

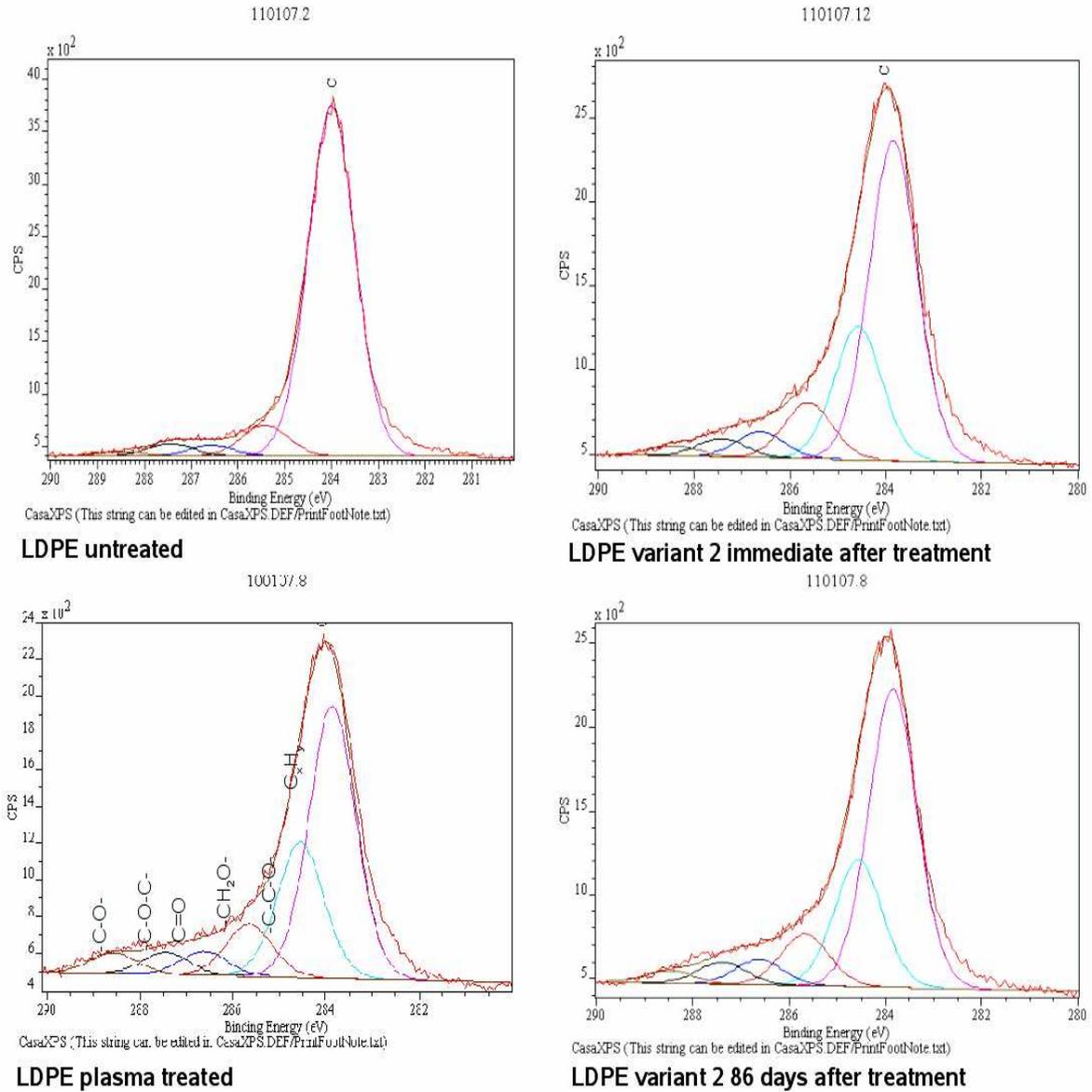


Abbildung 29: Vergleich der XPS-Resultate einer unbehandelten mit einer im Niedertemperaturplasma behandelten Probe sowie einer nachbehandelten und 86 Tage gelagerten Probe.

2.3 Relevante Ergebnisse Dritter

Während der Bearbeitung des Projektes sind über die in Abschnitt 1.3 dargelegten Arbeiten keine relevanten Ergebnisse Dritter bekannt geworden.

2.4 Veröffentlichungen von Projektergebnissen

Seit Projektbeginn wurden Ergebnisse veröffentlicht:

- Dieter F. Ihrig, Michael Licht: Win drinking-water using radiation exchange; Poster zur General Assembly der European Geosciences Union, Wien 26. – 30. April 2004
- Dieter F. Ihrig, Michael Licht, Ulrich Brunert, Jens Eggemann: Win drinking-water using radiation exchange; Poster zur General Assembly der European Geosciences Union, Wien 02. – 07. April 2006
- Präsentation des Projektes im Rahmen der Veranstaltung „Lebendige Forschung an Fachhochschulen“ im Landtag Nordrhein-Westfalen 22. Januar bis 02. Februar 2007
- Jens Eggemann, Dieter Ihrig, Michael Licht, Hubert Paulus, Karl-Heinz Müller: Dauerhafte Hydrophilierung von Kunststofffolien mittels Niederdruckplasmatechnik; Poster zur Plasmatechnologie PT13 der Deutschen Gesellschaft für Plasmatechnologie, Bochum 05. – 07. März 2007-06-10
- Dieter Ihrig, Michael Licht, Ulrich Brunert, Jens Eggemann, Andreas Vach, and Rainer Mauersberger: Water harvest enhanced by radiation exchange; Vortrag zur Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Regensburg 26. – 30. März 2007
- Dieter Ihrig, Jens Eggemann, Michael Licht, Ulrich Brunert, and Hubert Paulus: Hydrophilic finishing of LDPE films using plasma treatment; Vortrag zur Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Regensburg 26. – 30. März 2007
- Dieter F. Ihrig, Michael Licht, Ulrich Brunert, Jens Eggemann: Win drinking-water using radiation exchange; Journal for Physics and Chemistry of the Earth, Elsevier **33**, 86 – 91 (2008)
- Dieter Ihrig, Michael Licht, Ulrich Brunert, Jens Eggemann, and Andreas Vach: Harvesting water from humidity of the air; Vortrag zur Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Darmstadt 10. – 14. März 2008
- D. F. Ihrig, M. Licht, U. L. Brunert, A. Vach, J. Eggemann, and M. Poschmann: Harvesting water from humidity of the air; Vortrag zur General Assembly der European Geosciences Union, Wien 13. – 18. April 2008
- Dieter F. Ihrig, Jens Eggemann, Michael Licht, Ulrich Brunert, and Andreas Vach: Hydrophilic finishing of LDPE films using plasma treatment; Vortrag zur 15. Arbeitstagung Angewandte Oberflächenanalytik AOFA 15, Soest 08.–10. September 2008
- Dieter F. Ihrig, Michael Licht, Ulrich Brunert, Jens Eggemann, Andreas Vach: Harvesting water from humidity of the air; Vortrag zur 12th European Roundtable on Sustainable Consumption and Production (erscp2008), Berlin 23. – 25. 09. 2008

Iserlohn, den 20. Mai 2010