

# RELATIVE FEUCHTE UND UMWANDLUNGSEFFIZIENZ VON DÜNNSCHICHTPHOTOVOLTAIK

M. Nikbakhti<sup>a,d</sup>, M. Rennhofer<sup>a</sup>, K. Berger<sup>a</sup>, J. Wagner<sup>b</sup>, R. Leidl<sup>a</sup>, W. Laube<sup>b</sup>, D. Baumgartner<sup>c</sup>, Ph. Weihs<sup>b</sup>, V. Schlosser<sup>d</sup>

(a) AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Energy Department, Giefinggasse 2, 1210 Vienna, Austria,

(b) Institute for Meteorology, University of Natural Resources and Life Sciences, Peter Jordan Str. 82, 1190 Vienna, Austria;

(c) Observatory Kanzelhöhe, KFU-Graz, Treffen A-9521, Austria

(d) Faculty of Physics, University of Vienna, Strudlhofgasse 4, A1090 Vienna, Austria

## 1. Einleitung

Im Rahmen des Projektes PV-SPEC wurden an klimatisch und meteorologisch unterschiedlichen Standorten verschiedene Modultypen (Mono, CdTe und a-Si) hinsichtlich ihres Verhaltens bezüglich spektraler Änderungen des einfallenden Sonnenlichtes und klimatischer bzw. meteorologischer Parameter untersucht. Das Ziel der laufenden Arbeit ist Schlussfolgerungen über den Zusammenhang der relativen Feuchtigkeit der Luft (RH), sowie weitere Umgebungsbedingungen und den elektrischen Modulparameter zu bestimmen. In verschiedenen Vorgängerstudien wurden Aspekte der spektralen Bestrahlungsstärke und ihres Einflusses auf die Stromumwandlungseffizienz untersucht [1-3]. Weiter wurden Methodologien zur Beurteilung spektraler Zustände im Sonnenspektrum in Relevanz für die Photovoltaik vielfach dargestellt [3-8] und mittels Modellierung untersucht [9-11]

Die vorliegende Studie wurde anhand dreier charakteristischer Tagestypen durchgeführt, („clear sky“-Tage, teilweise bewölkte Tage und vollständig bewölkte Tage). Als Daten für die relative Luftfeuchte (RH) wurden (i) Bodendaten in Modulnähe (1-Minuten-Zeitbasis), (ii) Momentan-RH-Werte aus 200-Meter Höhe eines meteorologischen Tageshöhenprofiles (frei erhältliche), (iii) gewichtete RH-Mittelwerte der Tageshöhenprofile und (iv) gewichtete, gemittelte absolute Feuchtwerte der Tageshöhenprofile herangezogen. Die korrelierenden Umgebungsparameter wurden entsprechend für Tage je Tagesklasse ausgewählt. Die Bewertung des Sonnenspektrums  $E(\lambda)$  erfolgt mittels der Schwerpunktwellenlänge  $\lambda_{ave}$  der beobachteten Sonnenspektren (wobei  $\lambda_{ave} \sim 1/\text{average photon energy (APE)}$ ). Die Ergebnisse für (ii) wurden zuerst analysiert und weiter mit der Analyse der gewichteten RH-Mittelwerte der Tageshöhenprofile und gewichteten, gemittelten absoluten Feuchtwerte der Tageshöhenprofile und hochausgelösten Werten eines engen Zeitraumes mit echten RH-Bodendaten (Modulstandort) verifiziert.

Besonders interessant für die Langzeitbeobachtung bzw. Beurteilung von Daten von Monitoringstandorten mit eingeschränkter Datenlage (z.B. wo etwa kein

Spektralradiometer verfügbar ist) ist die Frage, inwieweit eine einfache Messung der relativen Bodenfeuchte als Maß für (a) die spektralen Bedingungen und (b) die Steigerung oder Verringerung der Umwandlungseffizienz benutzt werden kann.

## 2. Methodologie

Drei PV-Module unterschiedlicher Technologien (monokristallin (Mono), Cadmiumtellurid (CdTe) und amorphes Silizium (a-Si)) wurden auf der Freifeldprüffläche des AIT - Austrian Institute of Technology (Techbase Vienna) [12], montiert. Die Modulständer waren nach Süden, Westen, Osten ausgerichtet und wurden in einen Neigungswinkel von 35° gebracht. Die Module wurden jeweils bezüglich ihrer elektrischen Kennwerte charakterisiert. Zusätzlich wurden die Einstrahlungswerte in Modulebene (POA) –  $E$  [W/m<sup>2</sup>] – sowie horizontal bestimmt. Zur Messung des Sonnenspektrums in der Horizontalen wurde ein Gitterspektrometer verwendet, das über einen Halbraumquarzdom mit einem Diffuser versorgt wurde. Um die Erwärmung der Module während des Betriebes und die dadurch veränderten Stromwerte zu berücksichtigen, wurde an jeder Modulrückseite ein PT100-Temperaturfühler installiert. So konnte die tatsächliche Temperatur jedes Moduls ermittelt und der gemessene Kurzschlussstrom auf den Kurzschlussstrom bei 25°C rückgerechnet werden. Alle beschriebenen Geräte, bis auf das Spektrometer, wurden mit einem Datenlogger aufgezeichnet. Alle Messungen wurden in 1-Minutenintervallen durchgeführt. Alle Geräte sowie die Module wurden vor und nach den Messungen kalibriert um etwaige Alterungserscheinungen zu kontrollieren. Die Module wurden zusätzlich mittels Elektrolumineszenz analysiert. Die Bewertung des Sonnenspektrums  $E(\lambda)$  erfolgte mittels der Schwerpunktwellenlänge  $\lambda_{ave}$  der beobachteten Spektren [2, 3, 9]. In der Folge wurden Korrelationen zwischen spektralen und meteorologischen sowie Modulspezifischen Parametern untersucht und in Relation zu der RH gebracht.

Zwecks genauer Bestimmung des Korrelationsgrades der korrelierenden (oder nicht korrelierenden) Parameter, wurde der Korrelationsmaß  $r$  verwendet. Das Korrelationsmaß ist das Maß, mit dem in der Korrelationsanalyse die Stärke eines Zusammenhangs (Korrelation) zwischen zwei Variablen gemessen werden kann. Es ist zu beachten, dass  $r$  nicht wie  $R$  nur eine Abweichungsmaß darstellt, sondern die Abweichung und den Trend (Steigung) zugleich bewertet. (z.B. Daten entlang einer konstanten, perfekten Geraden  $y(x) = c$  würden  $R = 1$  aber  $r = 0$  ergeben).

### 3. Ergebnisse

In der Folge werden die wesentlichen Ergebnisse für verschiedene Datenlagen und Zeiträume dargestellt und verglichen.

#### 3.1 Ergebnisse aus den Höhenprofilen und Einzeltagen

Für die Auswertungen wurde ein begrenzter Zeitraum von Zeitraum März 2011 bis Juni 2011 wurden die Kurzschlussströme der PV-Module sowie die Spektralgänge der Tage und die einzelnen Wetterfaktoren ausgewertet. Die Auswertung wurde anhand dreier charakteristischer Tag-Typen durchgeführt, an denen die Einstrahlungsverhältnisse möglichst verschieden waren (an Tagen mit durchgehendem Sonnenschein [„clear sky“], an teilweise bewölkten Tagen und an Regentagen). Als Daten für die relative Luftfeuchte (RH) wurden zuerst Auswertungen die Werte aus 200-Meter Höhe eines meteorologischen Tageshöhenprofils der RH herangezogen. Die korrelierenden Umgebungsparameter wurden aus den Tagesgängen entsprechend mit dem 14h-Momentanwert für eine Auswahl an Tagen je Tagesklasse getroffen. Es wurden die Korrelationen zwischen mehrerer Modul und Umgebungsparameter für die oben beschriebenen Klassifikation und die ausgewählten Tage untersucht. Vor allem die Korrelation zwischen RH und E, RH und  $\lambda_{ave}$  haben interessante Ergebnisse geliefert. Weitere aussagekräftige Korrelationen gab es zwischen  $I_{sc}$  und  $\lambda_{ave}$ ,  $I_{sc}$  und RH und zwischen  $\lambda_{ave}$  und E.

Die Diagramme in Abbildung 1 stellen rein meteorologische Kenngrößen dar. Während der Zusammenhang RH vs. E einen klar ersichtlichen Zusammenhang liefert, ist die deutliche Abhängigkeit von  $\lambda_{ave}$  vs. E und insbesondere  $\lambda_{ave}$  vs. RH überraschend. Die Zusammenhänge sind standortspezifisch und damit standortspezifische Kenngrößen.

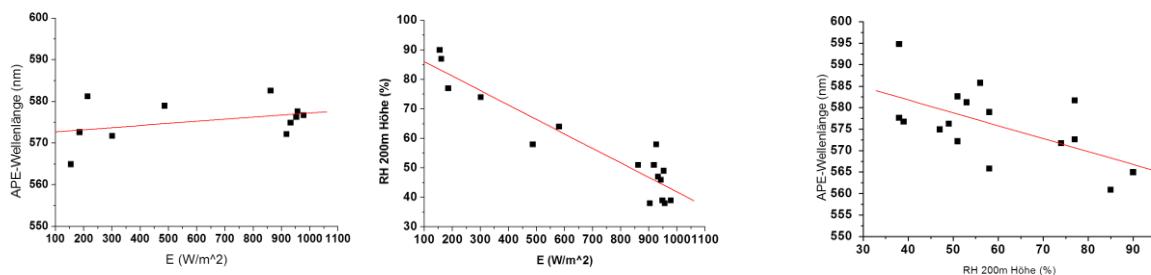


Abbildung 1: Meteorologische Parameter für die untersuchten Tage. Links:  $\lambda_{ave}$  vs. E, Mitte: RH vs. E und Rechts:  $\lambda_{ave}$  vs. RH; Die Linien sind Regressionen. Die Diagramme zeigen jeweils Werte für alle Tagesklassen.

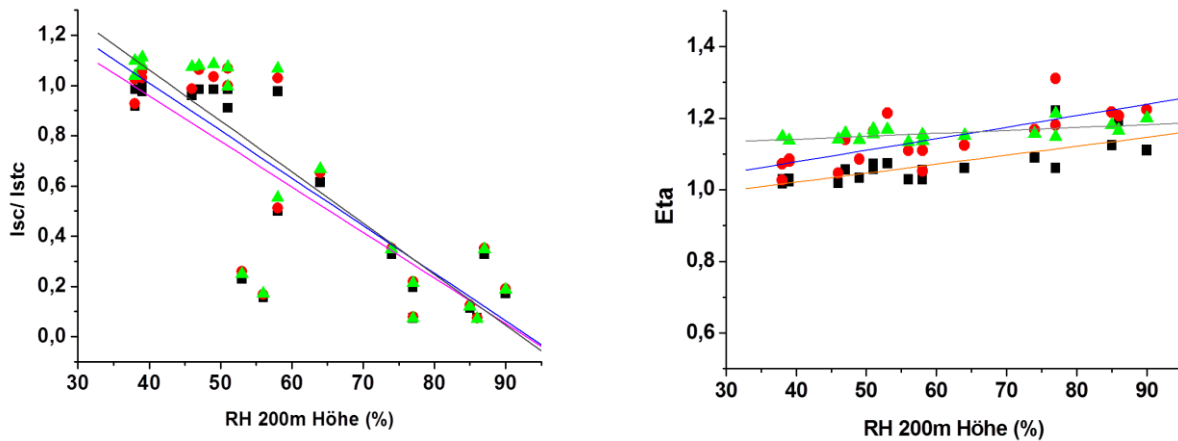


Abbildung 2: Links:  $I_{sc}/I_{sc,STC}$  vs. RH mit: (■) CdTe, (●) a-Si, (Δ) Mono. Rechts:  $\eta_{ISC}$  als Funktion von RH (■) CdTe, (●) a-Si, (Δ) Mono. Die Linien sind lineare Regressionen. Die Diagramme zeigen Werte für Tage aller Tagesklassen.

Die Abhängigkeit von  $I_{sc}$  (jeweils normiert auf  $I_{sc,STC}$ ) der einzelnen Technologien von RH, ist in Abbildung 2, links gezeigt. Die Abhängigkeit der Stromproduktion für alle Technologien hat einen ähnlichen aber nicht identen linearen Verlauf. Steigungen haben einen Wert von  $0,02 / \%$  und  $\sim 0,5\%$  Abweichung voneinander. Durch die Normierung auf  $I_{sc,STC}$  bleibt als einzige Abhängigkeit der Darstellung der Einfluss von RH auf das in Modulebene eintreffende spektrale Sonnenlicht (und damit  $\lambda_{ave}$ ) siehe Abbildung 1, rechts. In der Folge wurde die Korrelation der Stromumwandlungseffizienz zur Stromumwandlungseffizienz bei STC-Bedingungen – hier  $\eta_{rel,ISC}$  – der 3 Technologien mittels  $\kappa = \eta_{rel,ISC} = [I_{sc} / I_{sc,STC}] * [E_{STC} / E_{exp}]$  für Werte von  $E > 150 \text{ W/m}^2$  berechnet und deren Korrelation zu RH dargestellt, siehe Abbildung 2, rechts.  $\eta_{rel,ISC}$  (=  $\kappa$ ) steigt mit steigender RH für alle Modultechnologien. Diese Steigung ist sehr klein und bei der kristallinen Technologie am geringsten. Bei a-Si und CdTe ist die Steigung 3 bis 4 mal größer als bei der kristallinen Technologie. Bemerkenswerter Weise kann damit an Tagen mit erhöhtem RH auch eine gegenüber STC erhöhte Umwandlungs-effizienz auftreten. Die Ergebnisse korrelieren gut mit denen der gesamten Höhenprofile. Um auszuschließen, dass die Ergebnisse lediglich Artefakte der Airmass-Faktoren (AM) des zeitlich sehr großen Zeitraumes sind, wurde dieser Faktor für alle Daten genauer untersucht. Zwar zeigt AM im Jahresverlauf eine starke systematische Änderung für den verwendeten Datenzeitpunkt (14h), aber es war keine Korrelation zwischen RH und AM feststellbar; ein Einfluss auf den systematischen Verlauf des Ergebnisses konnte daher ausgeschlossen werden. Anschaulicher wird das Ergebnis von Abbildung 2 noch, wenn man es auf den monokristallinen Modultyp bezieht, siehe Abbildung 3.

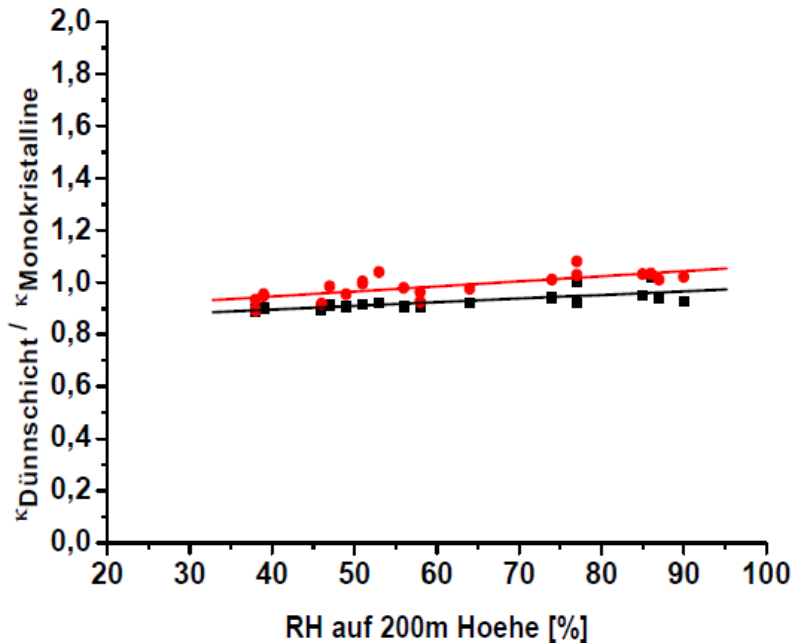


Abbildung 3: Umwandlungseffizienz vs. RH bezogen auf Mono mit: (■) CdTe, (●) a-Si. Die Linien sind lineare Regressionen. Das Diagramm zeigt Werte für Tage aller Tagesklassen.

Nach der Abbildung 3 befindet sich das Verhältnis Dünnschicht / Monokristallin relative zu der RH auf der 200m Höhe im Bereich zwischen 0,9 und 1,0 und übersteigt 1 nur für hohe Feuchtwerte. Die Abweichung der a-Si von Mono ist allerdings kleiner als die Abweichung der CdTe von Mono. Die Abweichungen der Dünnschichttechnologien von der monokristallinen Technologie sowie die Abweichungen voneinander sind im Wesentlichen auf die Unterschiede der Spektralen Empfindlichkeiten ( $SR(\lambda)$ ) der jeweiligen Technologien zurückzuführen.

Die gezeigten Ergebnisse wurden weiter mit der Analyse der gewichteten RH-Mittelwerte der Tagehöhenprofile und gewichteten, gemittelten absoluten Feuchtwerten der Tagehöhenprofile (nicht gezeigt) und hochausgelösten Werten eines engen Zeitraumes mit echten RH-Bodendaten (Modulstandort, siehe unten) verifiziert. Anbei seien noch die Abhängigkeiten von RH zur relativen Feuchte für das gewichtete gemittelte Höhenprofil bis 3000 m (Abbildung 4 links) und zur absoluten Feuchte ( $F_a$ ) (Abbildung 4 rechts) dargestellt. Die Eindeutigkeit der Abhängigkeit zeigt, dass RH als Bodenwert (oder als 200m-Wert) als Maßgröße zulässig ist, da die anderen Größen den selben Zusammenhang liefern.

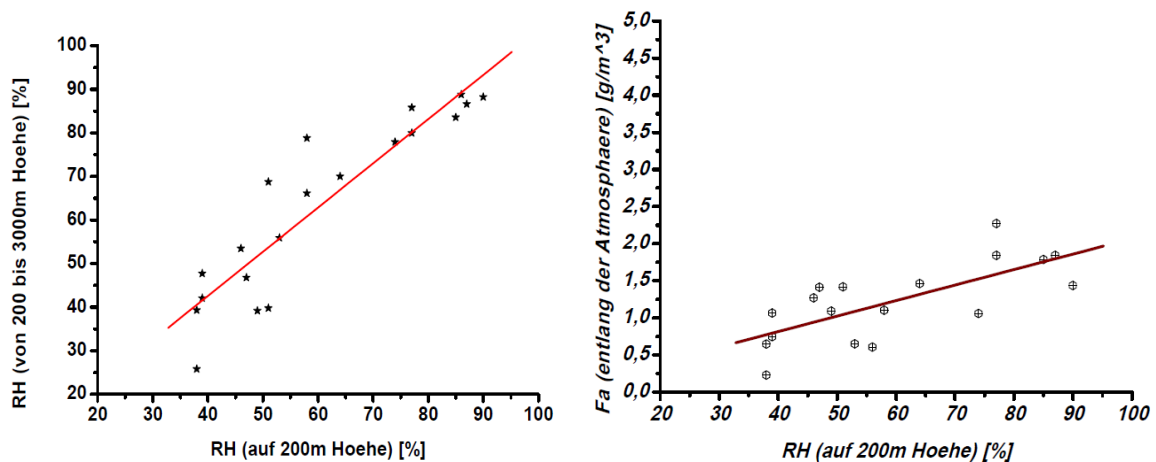


Abbildung 4. Links RH(200m) vs. dem Mittelwert von der RH(200m – 3000m) und rechts: RH(200m) vs. Gesamtwert vom atmosphärischen Fa [g/m<sup>3</sup>]. Die Linie ist die lineare Regression

### 3.2. Ergebnisse aus Bodendaten und begrenztem Zeitraum

Anhand einer Wetterstation wurden, wie oben beschrieben, von in hoher Auflösung alle Wetterparameter und die relative Feuchtigkeit (RH) auf der Bodenniveau (auf der 170m über der Meereshöhe) direkt am Ort der PV-Module im 1 Minutenintervall gemessen.

Um die Ergebnisse der Einzeltage und Höhenprofile zu reproduzieren, zu validieren und ihre Bereichsrelevanz in Bezug auf meteorologische Größen zu untersuchen, wurden jeweils mehrere Tage je Tagesklasse eines engen begrenzten Zeitraumes (gleicher AM-Faktor für Sonnenhöchststand) im Juli 2012 ausgesucht. Es wurden die Daten der korrelierenden Parameter vom täglichen Verlauf von 9h bis 17h (d.h. Werte für  $E < 400 \text{ W/m}^2$  kommen nur durch Wolken zustande und nie bei clear sky Bedingungen!) pro Minute für die ausgesuchte Tage verwendet und die Korrelationen der Modul und Umgebungsparameter untersucht und analysiert.

Die Auswertungen der einzelnen Tagesklassen separat liefert nur unbedeutende Ergebnisse. Eine eingehende Analyse hat gezeigt, dass die zu geringe Parametervariation hierfür verantwortlich ist. Das wird in der Folge für die Auswertung aller Daten aller Tage für die hohen Einstrahlungswerte deutlich.

Als Beispiel sei hier nur der Verlauf der Gleichgewichtswellenlänge der Spektraldaten für einen Clear sky Tag gezeigt, siehe Abbildung 5. Die Variation von  $\lambda_{\text{ave}}$  mit  $E$  ist lediglich 10 nm bei einer Schwankung von  $E$  zwischen  $400 \text{ W/m}^2$  und  $1200 \text{ W/m}^2$ .

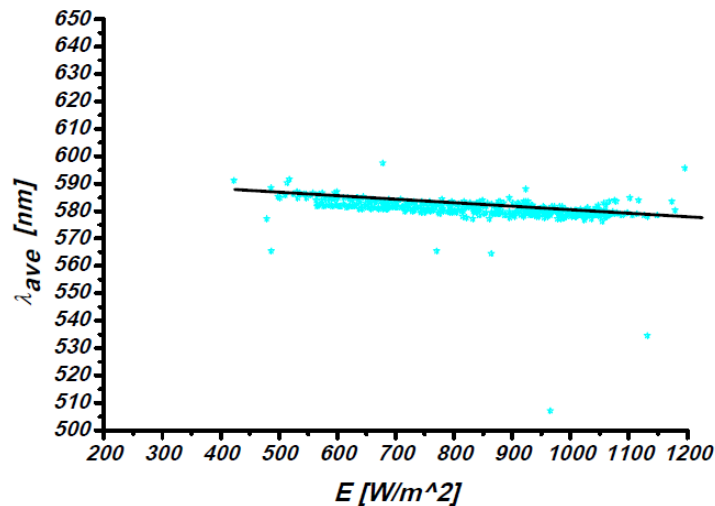


Abbildung 5:  $\lambda_{ave}$  vs.  $E$  an einem clear-sky Tag: 23.07.2012.

Die Analyse der meteorologischen Zusammenhänge  $\lambda_{ave}$  vs. RH in Abbildung 6 und  $\lambda_{ave}$  vs.  $E$  in Abbildung 7 erlauben in Kombination eine genaue Spezifikation der Wetter und Spektralzustände, wie die in den Abbildungen eingezeichneten Bereiche veranschaulichen. Dabei ist zu erinnern, dass keine Clear Sky Daten für  $E < 400 \text{ W/m}^2$  und weiter keine (kaum) Daten für  $RH < 50\%$  und Regentage auftreten. Somit zerfallen die beobachtbaren Bereiche, wenn auch bei großer Streuung, in Bereiche wie

$$\lambda_{ave} < 580 \text{ nm} \ \& \ E < 400 \text{ W/m}^2 \ \leftrightarrow \ RH > 60\% \ \text{oder}$$

$$\lambda_{ave} > 580 \text{ nm} \ \& \ E > 600 \text{ W/m}^2 \ \leftrightarrow \ RH < 50\%.$$

Die folgende Darstellung von RV vs  $E$  mit den jeweiligen Bereichen ist in Abbildung 8 dargestellt.

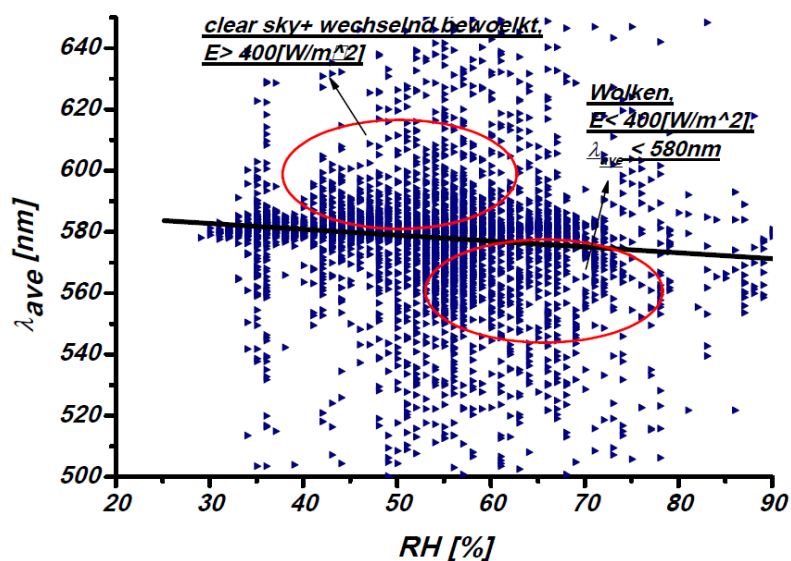


Abbildung 6:  $\lambda_{ave}$  vs. RH [%] im Bereich von 500 nm bis 650 nm. Die Linie ist die lineare Regression.

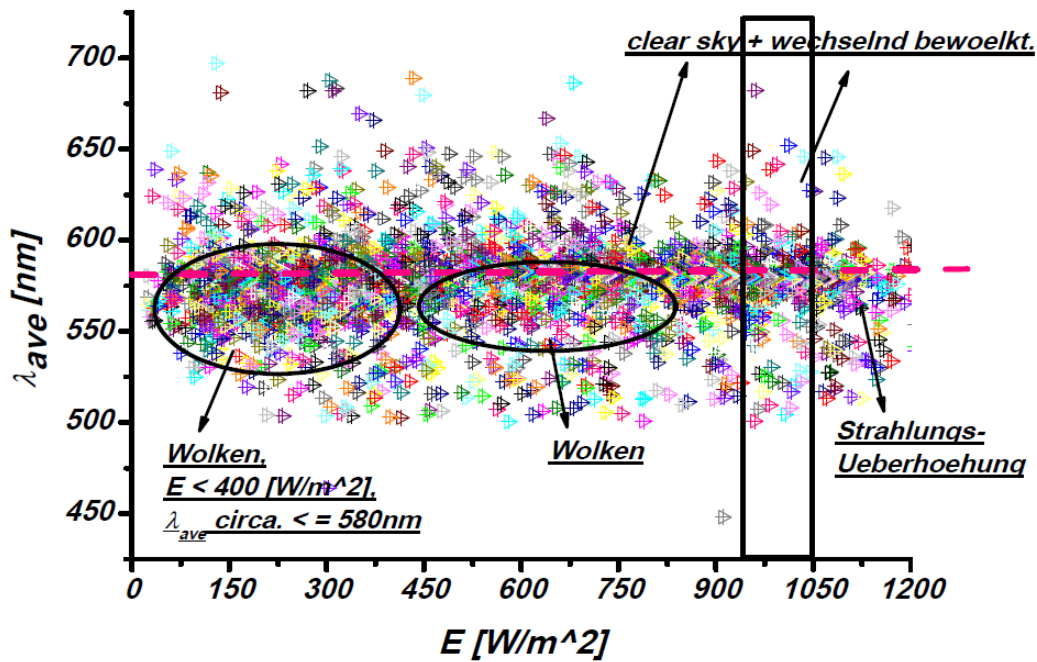


Abbildung 7:  $\lambda_{ave}$  vs.  $E$  im Bereich von 500 nm bis 700 nm. Die Linie ist die lineare Regression.

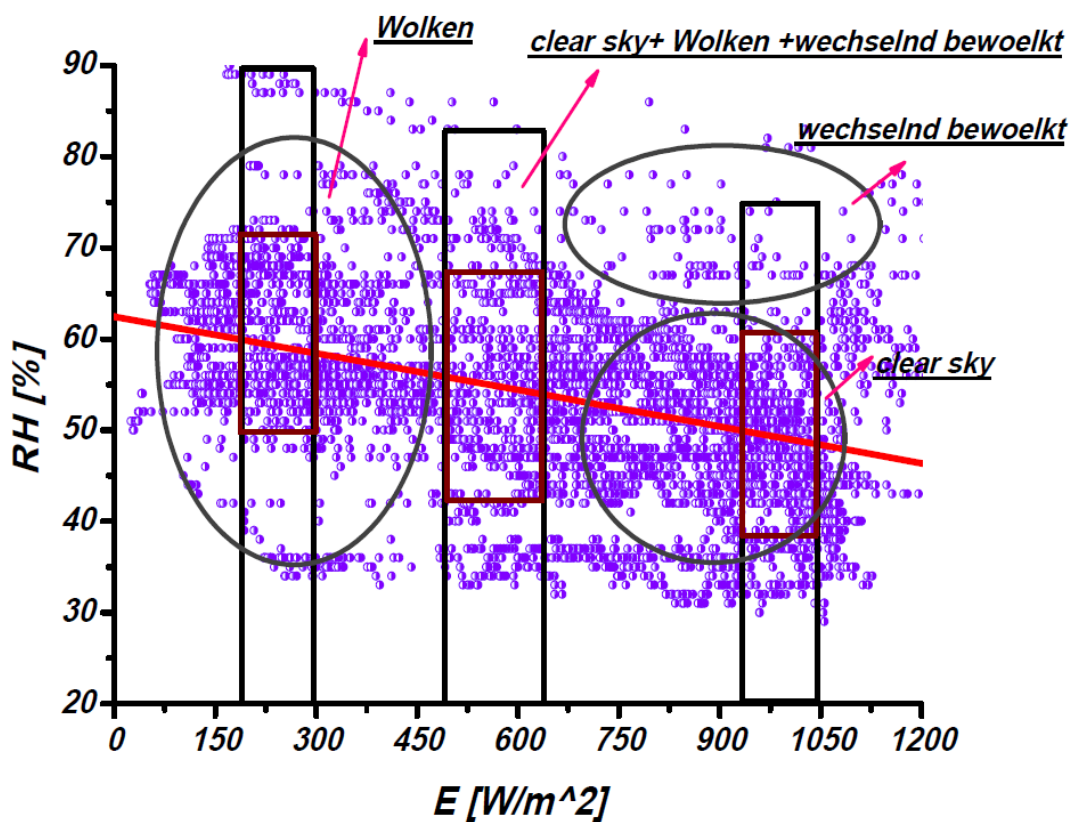


Abbildung 8: RH[%] (aus den Daten der Wetterstation) vs.  $E$  an allen ausgesuchten Tagen aus der Tagesklassifikation. Die Linie ist die lineare Regression.



Der Vergleich der Vorigen Ergebnisse (200m- Daten) zeigt, dass alle Ergebnisse geringere Variation aufzeigen und sehr stark schwanken. Besonders ausgeprägt ist die Schwankung bei reinen Regentagen. Besonders gering ist die Variation bei starker Parameterbegrenzung: E aus 950 nm – 1050 nm, dann ist der AM Faktor immer gleich, da diese Werte nur an clear sky Tagen erreicht werden und somit die Variation in RH gering (30%-50%) und damit auch die Variation in  $\lambda_{ave}$  gering. Der Impact auf die Umwandlungseffizienz  $\kappa$  der Module ist damit praktisch nicht vorhanden. Den stärksten Einfluss kann man im Bereich 550 nm – 650 nm mit RH von 30% - 90% und unterschiedlichen Tagesklassen beobachten.

Abbildung 9 zeigt schließlich, den Einfluss der Feuchte auf die Umwandlungseffizienz und Abbildung 10 die Normierung auf das Mono-Modul analog oben. Wieder verhalten sich beide Dünnschichtmodule ähnlich wie im Fall der Einzeltage, wenn auch schwächer ausgeprägt. Die Ursache hierfür ist wieder in der Eingrenzung der Parameter und damit geringen Variabilität der Parameter zu suchen. Ein möglicher Ansatz ist, statt RH  $RH \cdot AM$  (den Air-Mass Faktor) zu betrachten. Die Werte und damit der Impact sollten sich verstärken.

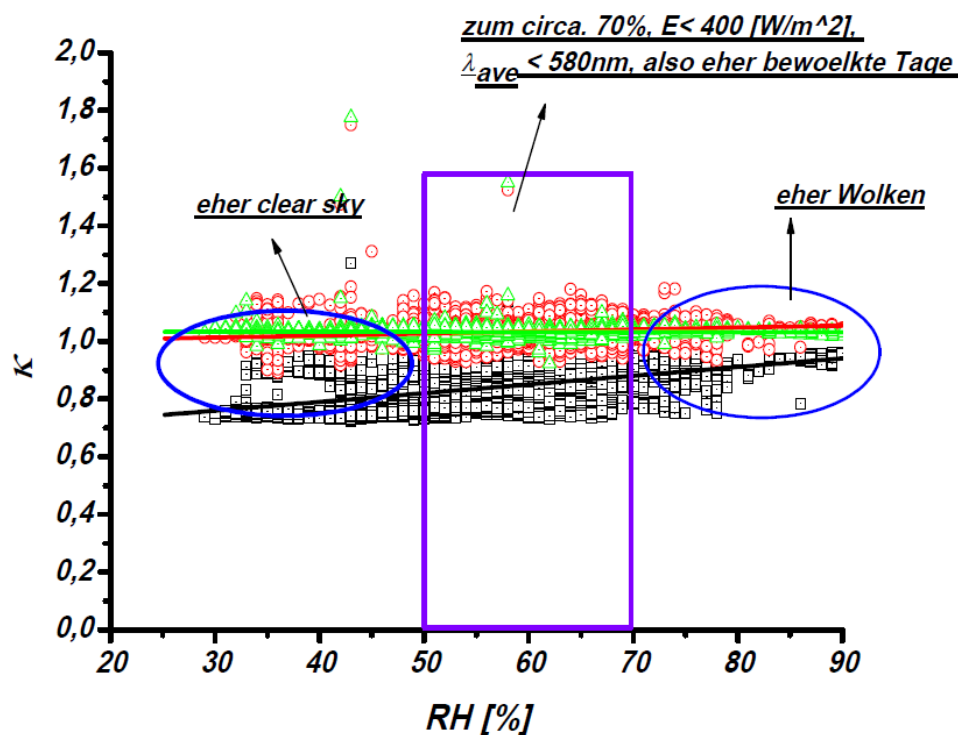


Abbildung 9:  $\kappa$  vs. RH für alle 3 Technologien: (■) CdTe, (●) a-Si, (Δ) Mono. Die Linien sind die lineare Regressionen.

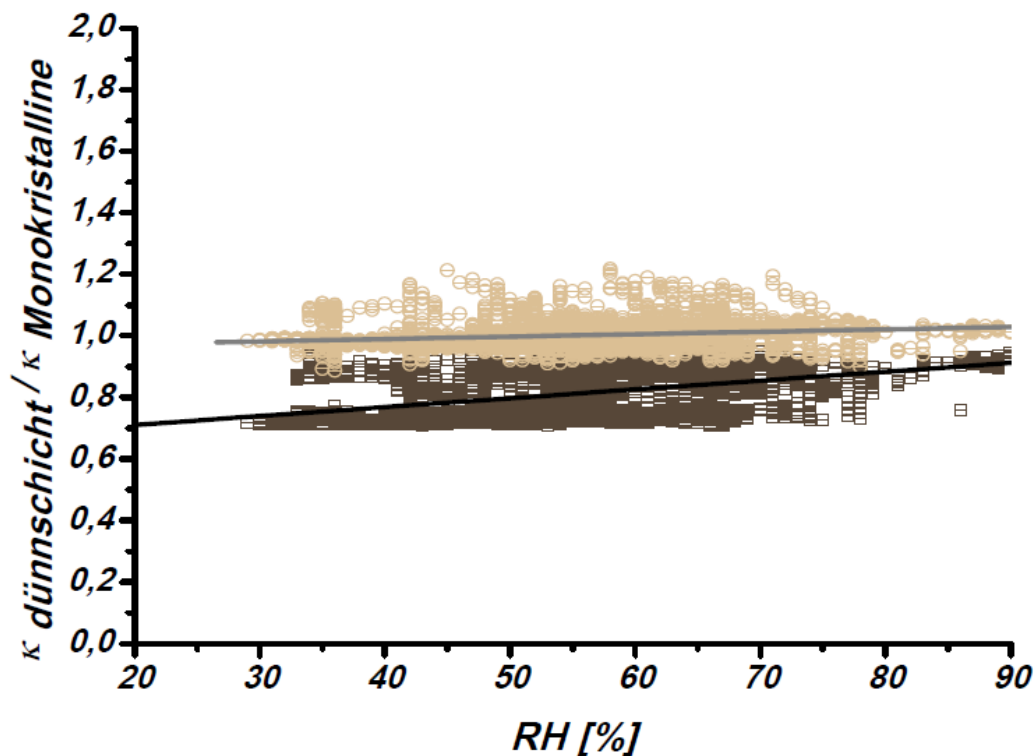


Abbildung 10: Umwandlungseffizienz vs. RH bezogen auf Mono mit: (■) CdTe, (●) a-Si. Die Linien sind lineare Regressionen.

#### 4. Zusammenfassung

Anhand aller Ergebnisse der Auswertungen der Daten des Zeitraums März bis Juni 2011 korrelieren die relative Luftfeuchte (entlang der Atmosphäre) und der (fast auf der Bodenhöhe) und die absolute Luftfeuchte (entlang der Atmosphäre) alle stark und positive miteinander. Weiters korreliert die relative Luftfeuchte auf der Bodenhöhe mit anderen Parameter stark.

Das bedeutet, dass die relative Luftfeuchte oder absolute Luftfeuchte entlang der Atmosphäre nicht nur deutlich Einflüsse auf die relative Luftfeuchte auf der Bodenhöhe haben oder zum Teil auf die anderen Umgebungs- oder Modulparameter, sondern insbesondere, dass ein Messen von RH am Boden (oder Bodennahe) Rückschlüsse auf die spektralen Parameter und Umwandlungseffizienzen zulässt! Dennoch ist die RH auf der Bodenhöhe selbst ein besseres Maß, um Einflüsse auf die Sonneneinstrahlung, auf das Sonnenspektrum, und auf weitere für PV- Technologie entscheidende Parameter zu berechnen und zu analysieren.

Aus den Ergebnissen der Auswertungen der Daten des Monats Juli 2012 folgt dass, es unter begrenzten (klassifizierten) Wetterbedingungen kaum Korrelationen der Umgebungs- und Modulparameter mit der relativen Luftfeuchte erkennen lässt. Unter den Wetterbedingungen aller Tagestypen lassen sich dennoch Ergebnisse erkennen, die denen der Einzeltage für relative und absolute Feuchte entsprechen. Interessant ist, dass eine kombinierte Betrachtung von Gleichgewichtselllänge, Einstrahlung und Feuchte einen Rückschluss auf die Tagesklassifikation zulassen, also die meteorologischen Kenngrößen eindeutig charakterisieren. Im Sinne eines Einflusses auf die elektrischen Modulparameter ist die Einflussstärke von RH auf die Modulparameter und Umwandlungseffizienz nur mittelbar.  $\lambda_{ave}$  hängt von RH ab, gesteuert über die Mie- und Rayleigh-Streuung [13-14]. Weiter hängt  $I_{SC}$  von E und über die SR von  $\lambda_{ave}$  ab. Damit wird klar, warum, wenn RH, E und  $\lambda_{ave}$  in ihrem Wertebereich stark eingeschränkt werden, kein Einfluss von RH auf  $\kappa$  messbar bleibt. Im Gegenzug ist eine Verstärkung des Einflusses durch andere Parameter, die ebenfalls über Streuung  $\lambda_{ave}$  beeinflussen (z.B. Aerosole oder AM-Faktor) möglich.

Bemerkenswert ist schließlich, dass damit offenbar eine Beurteilung der (a) Strahlungsverhältnisse und (b) Moduleffizienzen mittels einer Untersuchung der nur bodennahen RH-Werte möglich wird, wenn gewisse Rahmenbedingungen wie Parametervariation, Datenlage, Ausschluss weiterer Einflussfaktoren in ausreichender Güte vorhanden sind.

## 5. Referenzen

[1] A. Bamberger; Diploma thesis (2009)

[2] M. Rennhofer, Sh. Zamini, K. Berger, Th. Krametz, R. Leidl, A. Bamberger, 25th Symposium Photovoltaische Solarenergie; Bad Staffelstein, Germany (2010)

[3] M. Rennhofer, Sh. Zamini, K. Berger, Th. Krametz, R. Leidl, A. Bamberger; International Conference Thin-Film Photovoltaics; Würzburg, (2010)

[4] H. Müllejjans, W. Zaaiman and R. Galleano; Meas. Sci. Technol. 20, 075101, p12, (2009).

[5] J. Roy, Thomas R. Betts, R. Gottschalg, S. Mau, S. Zamini, R.P. Kenny, H. Müllejjans, G. Friesen, H.G. Beyer; 23rd European PVSEC, Valencia, Spain, (2008).

[6] Herrmann, S. Zamini, F. Fabero, T. Betts, N. van der Borg, K. Kiefer, G. Friesen, W. Zaaiman. 23rd EU-PVSEC, Valencia (2008)

[7] H. D. Mohring, D. Stellbogen; 23rd EU-PVSEC, Valencia (2008)

[8] T. Minemoto, Sh. Nagae, H. Takakura in Solar Energy Materials & Solar Cells 91, p. 919–923 (2007). Modules – Systems – Applications, 7th July, Munich, Germany (2011).

- [9] J.E. Wagner, P. Weihs, M. Rennhofer, S. Zamini, F. Brence, G. Fallent, E. Feitzinger; 25th Symposium „Photovoltaische Solarenergie“, Bad Staffelstein, Germany (2010)
- [10] J.E. Wagner, P. Weihs, M. Rennhofer, S. Zamini, F. Brence, G. Fallent, E. Feitzinger, W. Laube, D. Baumgartner; 25th EU-PV SEC, Valencia (2010)
- [11] J. Wagner, S. Hasel, P. Weihs, M. Rennhofer, R. Leidl, K. Berger, W. Laube, D.J. Baumgartner, Third International Conference on Thin-Film Photovoltaics, 6 June, Munich (2011)
- [12] Shokufeh Zamini, Marcus Rennhofer, Karl Berger, Thomas Krametz, Roman Leidl; 24th EU-PVSEC, Hamburg, Germany (2009)
- [13] Stoecker H., Taschenbuch der Physik, Frankfurt am Main, (1997)
- [14] C. F. Bohren, D. R. Huffman: Absorption and scattering of light by small particles. New York, Wiley-Interscience (1983)