



S O L A R .
UNI-KASSEL.DE

U N I K A S S E L
V E R S I T Ä T

Praktikumsskript

Thermische Messtechnik

TEIL 3: METEOROLOGISCHE MESSGRÖßEN

Universität Kassel

Fachgebiet Maschinenbau

Fachgebiet Solar- und Anlagentechnik

Datum: 28.07.2020

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Grundlagen	3
2.1	Solarstrahlung.....	3
2.1.1	Differenzierung der Strahlungsarten	3
2.1.2	Einstrahlungswinkel.....	4
2.1.3	Messtechnik	4
2.2	Luftfeuchte	8
2.2.1	Relative und absolute Feuchte	8
2.2.2	Messtechnik	10
2.2.3	Kalibrierung von Feuchtemesser	11
2.3	Niederschlag	12
2.3.1	Kenngrößen und Maßeinheiten des Niederschlags	12
2.3.2	Messtechnik	12
2.4	Windrichtung und Windgeschwindigkeit.....	14
2.4.1	Standortwahl	14
2.4.2	Messtechnik	14
2.4.3	Erfassung und Auswertung der Messdaten	15
3	Versuchsaufbau	17
3.1	Solarstrahlung.....	17
3.2	Relative Feuchte der Umgebungsluft	18
3.3	Niederschlag	19
3.4	Windrichtung und Windgeschwindigkeit.....	20
4	Versuchsdurchführung.....	20
4.1	Solarstrahlung.....	20
4.2	Relative Luftfeuchte	22
4.3	Niederschlag	22
4.4	Windrichtung und Windgeschwindigkeit.....	23
5	Versuchsauswertung.....	23
5.1	Solarstrahlung.....	23
5.2	Relative Luftfeuchte	24
5.3	Niederschlag	24
5.4	Windrichtung und Windgeschwindigkeit.....	25

**Die Durchführung des Versuchs ist nur
nach Teilnahme an der Laborunterweisung und
nach dem Lesen der Betriebsanweisung
„Versuch – Meteorologische Messgrößen“ erlaubt!**

Lernziele

- Kennenlernen von Messverfahren und Messgeräten zur Erfassung meteorologischer Messgrößen sowie deren Eigenschaften
- Durchführung von Messungen und Auswertung von Messdaten
 - Solarstrahlung (Global-, Diffus- und Direkt-Normal-Strahlung, Ansprechverhalten)
 - Luftfeuchte (Kalibrierung eines kapazitiven Feuchtesensors mit Hilfe von Salzlösungen)
 - Niederschlag (Überprüfung der Genauigkeit eines Niederschlagsmessers)
 - Windrichtung und Windgeschwindigkeit

1 Einleitung

Die Erfassung von meteorologischen Messgrößen ist für eine Vielzahl von Anwendungsbe-
reichen von großem Interesse. Die VDI-Richtlinie VDI 3786 beschäftigt sich mit der Umweltme-
teorologie und benennt unter anderem folgende Aufgabenstellungen:

- Feststellung und Beurteilung des lokalen Klimas und seines Einflusses auf Mensch, Tier,
Pflanze und Material (z. B. Bauleitplanung, Verkehrsplanung, Anlagen-Standortplanung,
wasserwirtschaftliche Planungen, Stadtklima, Kurortklima)
- allgemeine Wettervorhersage und klimatologische Fragestellungen
- Wind- und Solarenergieanlagen
- hydrologische Fragestellungen (z. B. Hochwasserwarnung, Verdunstungs- und Wasserbi-
lanzbestimmungen, Bauwerksbemessungen)
- Eingangsdaten für Modellrechnungen zu Ausbreitung und Transport von Luftverun-
reinigungen (Immissionsprognose, Luftreinhalte- und Vorsorgepläne, Smogsituationen),
ferner für Strahlenschutz, Störfälle und Katastrophenschutz, Umweltverträglichkeitsprü-
fung

Im Folgenden werden die wesentlichen Messgrößen im Bereich der Umweltmeteorologie aufgeführt. Die VDI 3786 gibt für jede der genannten Größen umfangreiche Angaben zu Messtechnik und Messverfahren. Im Rahmen dieses Praktikums werden nur einige der genannten Messgrößen betrachtet.

- Windgeschwindigkeit und -richtung
- Lufttemperatur
- Luftfeuchte
- Luftdruck
- Niederschlag
- solare und terrestrische Strahlung
- Lufttrübung

2 Grundlagen

2.1 Solarstrahlung

Die Messung der Solarstrahlung ist in vielen Bereichen wie z.B. in der Meteorologie, der Klimatologie, der Bauphysik und im Bereich der Solarenergienutzung von großem Interesse.

2.1.1 Differenzierung der Strahlungsarten

In den meisten Anwendungsfällen wird die Globalstrahlung gemessen. Dies ist die solare Einstrahlung auf eine horizontale Ebene. Der entsprechend horizontal ausgerichtete Sensor empfängt die Globalstrahlung, die aus der Himmelshalbkugel über ihm eintrifft. Die Globalstrahlung setzt sich aus zwei Anteilen zusammen, der horizontalen Direktstrahlung und der horizontalen Diffusstrahlung.

Bei der Direktstrahlung handelt es sich um gerichtete und damit schattenwerfende Strahlung. Bei der Diffusstrahlung handelt es sich um ungerichtete, gestreute Strahlung. Die Globalstrahlung ist die Summe aus direkter und diffuser Strahlung in einer horizontalen Ebene.

Globalstrahlung G = horizontale Direktstrahlung $G_{b,hor}$ + horizontale Diffusstrahlung $G_{d,hor}$

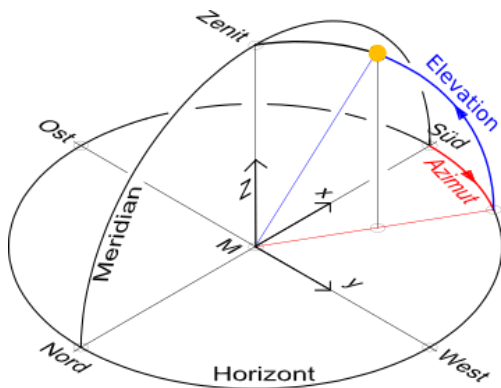
Eine weitere wichtige Messgröße ist die Direkt-Normalstrahlung (DNI – direct normal irradiation). Sie bezeichnet die solare Einstrahlung auf eine senkrecht zur Sonne ausgerichteten Ebene.

In der Regel wird die Strahlung (Strahlungsfluss) in der Einheit Watt pro Quadratmeter angegeben.

2.1.2 Einstrahlungswinkel

Bei der Betrachtung von Einfallswinkeln der Solarstrahlung ist die Unterscheidung zwischen Azimutwinkel und Höhenwinkel hilfreich.

Der Azimutwinkel kann auch als Horizontalwinkel bezeichnet werden und beschreibt einen Winkel in waagerechter Ebene. Je nach Gebiet sind verschiedene Definitionen des Azimutwinkels gebräuchlich. Im Bereich der Solarthermie bezeichnet ein Azimutwinkel von 0° die Himmelsrichtung Süden. Steht die Sonne z.B. in Südwesten entspricht dies einem Azimutwinkel von $+45^\circ$ (leider existieren hier keine einheitlichen positiven und negativen Winkelrichtungen).



Der Höhenwinkel beschreibt einen Winkel in senkrechter Ebene und gibt den Einfallswinkel der Sonne ausgehend von der Horizontalebene an. Hier entspricht ein Höhenwinkel von 0° dem Horizont. Nebenstehende Grafik veranschaulicht den Zusammenhang.

Abbildung 1: Winkel

[Quelle: <https://de.wikipedia.org/wiki/Azimut>, Zugriff: 08.09.2018]

2.1.3 Messtechnik

Messtechnische Geräte zur Erfassung der Bestrahlungsstärke werden als Pyranometer bezeichnet. Einen guten Überblick über die verschiedenen Messverfahren gibt z.B. VDI 3786 Blatt 5. Bzgl. des Sensorelements sind zwei grundlegenden Typen zu unterscheiden: Halbleitersensoren und thermische Sensoren.

Halbleitersensoren basieren meist auf Silizium und erzeugen aufgrund des photoelektrischen Effekts bei Bestrahlung einen Strom der proportional zur Bestrahlungsstärke ist. Über einen Messwiderstand wird dieser Strom in ein Spannungssignal umgewandelt. Das Prinzip entspricht dem eines Photovoltaikmoduls zur Stromerzeugung. Halbleitersensoren weisen für verschiedene Wellenlängenbereiche eine unterschiedliche spektrale Empfindlichkeit auf, woraus eine nur eingeschränkte Genauigkeit resultiert. [Quaschnig 2002]



Thermische Sensoren arbeiten nach dem Prinzip der Thermosäule. Als Sensorelement dient hierbei eine meist kreisrunde schwarze Fläche auf der ringförmig, in Reihe geschaltete Thermoelemente angeordnet sind. Bei Absorption der Solarstrahlung erwärmt sich das Sensorelement und es entsteht eine Temperaturdifferenz zum umgebenden kälteren Bereich. Hierfür wird meist das Gehäuse des Pyranometers, in einigen Fällen aber auch eine weiße Fläche innerhalb des Geräts genutzt. Die Thermoelemente erzeugen ein Spannungssignal proportional zur Bestrahlungsstärke. Die Sensoren sind in einem Gehäuse mit einem Glasdom untergebracht, der das Sensorelement vor Witterungseinflüssen schützt, Wärmeverluste an die Umgebung reduziert und eine gleichmäßige Transmission der Solarstrahlung bei jedem Einfallswinkel zulässt. Folgende Abbildung zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Pyranometers mit Thermosäule.

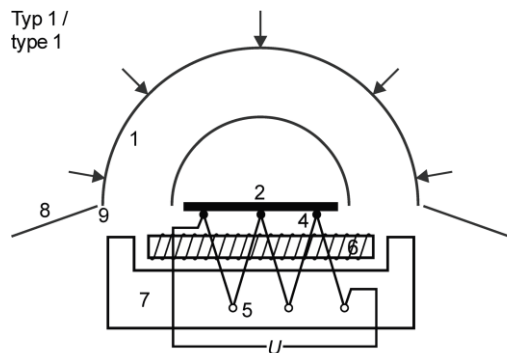


Abbildung 3: Prinzip Pyranometer mit Thermosäule
[VDI 3786 Blatt 5]

- 1 Glashaube (gegebenenfalls zweifach)
- 2 schwarzes Empfangselement
- 4 heiße Kontaktstelle
- 5 kalte Kontaktstelle
- 6 thermische Isolierung
- 7 Gehäusekörper (Metall)
- 8 Strahlungsschirm
- 9 Belüftungsspalt
- U Spannung

Folgende Abbildung zeigt ein Pyranometer der Fa. Kipp&Zonen, das nach dem Thermosäulen-Prinzip arbeitet.



Abbildung 4: CMP11 Pyranometer (thermischer Sensor) [Kipp&Zonen]

Thermische Sensoren sind präziser aber auch deutlich teurer als Halbleitersensoren. Die Genauigkeitsklassen von Pyranometern werden in der internationalen Norm ISO 9060 festgelegt. Hierin erfolgt die Festlegung von Anforderungen an Pyranometer anhand der Unterteilung in „secondary standard“, „first class“ und „second class“. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick.

Tabelle 1: Pyranometer Kategorien nach ISO 9060 [Kipp&Zonen 2015]

Referenz	ISO Pyranometer Kategorien		
ISO 9060:1990 Klassifizierung	Second Class	First Class	Secondary Standard
1 Ansprechzeit (95 %)	< 60 s	< 30 s	< 15 s
2 Null-Offsets (a) (b)	$\pm 30 \text{ W/m}^2$ $\pm 8 \text{ W/m}^2$	$\pm 15 \text{ W/m}^2$ $\pm 4 \text{ W/m}^2$	$\pm 7 \text{ W/m}^2$ $\pm 2 \text{ W/m}^2$
3a Stabilitätsabweichung	$\pm 3.0 \%$	$\pm 1.5 \%$	$\pm 0.8 \%$
3b Nichtlinearität	$\pm 3 \%$	$\pm 1 \%$	$\pm 0.5 \%$
3c Richtungsverhalten (Direkteinstrahlung)	$\pm 30 \text{ W/m}^2$	$\pm 20 \text{ W/m}^2$	$\pm 10 \text{ W/m}^2$
3d Spektrale Selektivität	$\pm 10 \%$	$\pm 5 \%$	$\pm 3 \%$
3e Temperaturverhalten	8 %	4 %	2 %
3f Neigungsverhalten	$\pm 5 \%$	$\pm 2 \%$	$\pm 0.5 \%$

Für den „secondary standard“ (höchste Qualität) gibt die World Meteorological Organization (MWO) eine maximale Unsicherheit von 3 % in der stündlichen und eine Unsicherheit von 2 % in der täglichen Gesamtstrahlung an [Kipp&Zonen 2015]. Dabei wird von einem guten Zustand der Pyranometer ausgegangen, was vor allem den Verschmutzungsgrad des Glaskonstrukts betrifft, der in regelmäßigen Zyklen gereinigt werden muss.

Im Folgenden wird auf die für das Praktikum wesentlichen in der vorangehenden Tabelle aufgeführten Kenngrößen eingegangen.

- **Ansprechzeit**

Die Ansprechzeit gibt die Zeitdauer an, bis das Ausgangssignal eines Pyranometers nach einer sprunghaften Änderung der Strahlung 95 % des Endwertes erreicht hat.

- **Richtungsverhalten**

Das Richtungsverhalten bezieht sich auf die Direktstrahlung. „Die Intensität einer Strahlung, die von einem bestimmten Zenitpunkt auf eine ebene, horizontale Fläche fällt, verhält sich proportional zum Kosinus des Zeniteinfallswinkels. Dies wird manchmal auch Kosinusetz oder Kosinusverhalten genannt und ist in der untenstehenden Abbildung veranschaulicht.“ [Kipp&Zonen 2015]

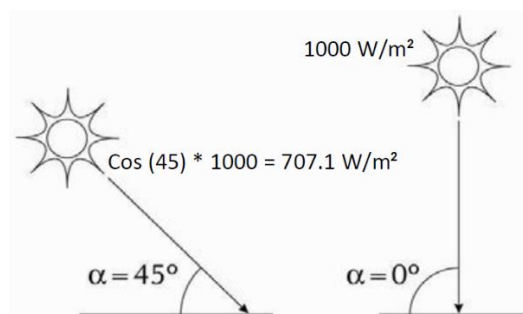


Abbildung 5: Richtungsverhalten [Hukseflux 01]

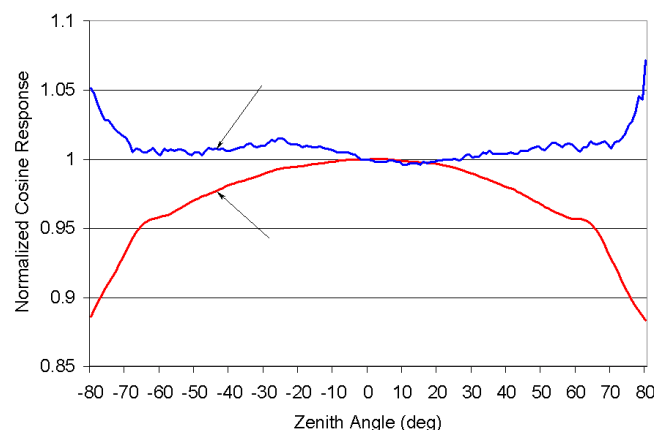


Abbildung 6: gutes (blau) und schlechtes (rot) Richtungsverhalten [Hukseflux 01]

Ein ideales Pyranometer weist ein Richtungsverhalten auf, das exakt dem Kosinusgesetz entspricht. In der Realität kommt es je nach Qualität des Pyranometers jedoch zu mehr oder weniger großen Abweichungen. Abbildung 6 zeigt Beispiele für ein gutes sowie ein schlechtes Richtungsverhalten.

Soll mithilfe eines Pyranometers die Diffusstrahlung gemessen werden, können vollautomatische Nachführungssysteme (Sun Tracker) zum Einsatz kommen, die ein auf den Sensor schattenwerfendes Element (Kugel, runde Platte) entsprechend der aktuellen Sonnenposition ausrichten (vgl. Abbildung 7 und Abbildung 8). Alternativ kommen sogenannte Schattenringe zum Einsatz, die das Pyranometer vor der direkten Solarstrahlung abschirmen. Das Pyranometer misst in diesen Fällen nur die Diffusstrahlung. Der Schattenring selber schirmt zusätzlich einen Teil der Himmelshalbkugel ab, daher müssen die Messwerte entsprechend den Herstellerangaben korrigiert werden. Da sich die Sonnenbahn täglich ändert, muss der Schattenring außerdem regelmäßig händisch nachjustiert werden (je nach Jahreszeit und Standort bis zu alle 2 Tage). Eine Tabelle mit Angaben zur Ausrichtung des Schattenrings und mit den Korrekturwerten befindet sich am Anhang.



Abbildung 7: Sun Tracker Solys2 [Kipp&Zonen]

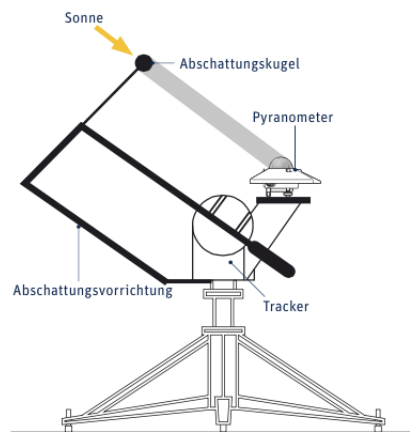


Abbildung 8: Prinzip - Sun Tracker [Uni Kassel 2018]



Abbildung 9: Schattenring CM121B/C [Kipp&Zonen]

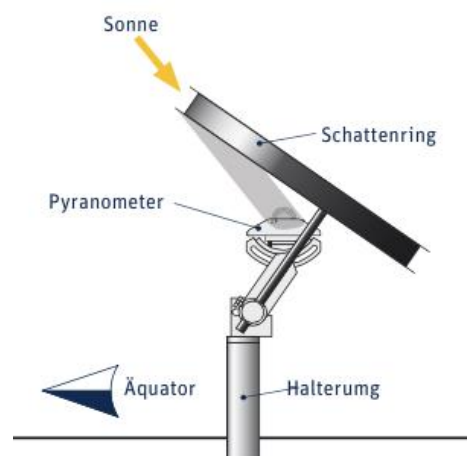


Abbildung 10: Prinzip - Schattenring [Uni Kassel 2018]

Die vorangehenden Abbildungen zeigen ein Pyranometer mit automatischer Abschattung durch eine nachgeführte schattenwerfende Kugel (Abbildung 7 und Abbildung 8) und mit Schattenring (Abbildung 9 und Abbildung 10).

Zur Messung der Direkt-Normalstrahlung werden sogenannte Pyrheliometer eingesetzt. Dabei handelt es sich um zylinderförmige Strahlungssensoren, die einen sehr geringen Einfallswinkel der Sonne aufweisen, so dass annähernd nur direkte Einstrahlung parallel zur Flächennormale auf das Sensorelement trifft. Pyrheliometer müssen mit einem automatischen Nachführungssystem möglichst kontinuierlich und sehr exakt der Sonnenposition nachgeführt werden und sind daher stets normal zur Sonne ausgerichtet.



Abbildung 11: Kipp&Zonen, CHP1 Pyrheliometer



Abbildung 12: Kipp&Zonen, Nachführungs-System [Kipp&Zonen]

2.2 Luftfeuchte

2.2.1 Relative und absolute Feuchte

Als Luftfeuchtigkeit wird der Gehalt an Wasser(dampf) in der Luft bezeichnet. In Abhängigkeit von Druck und Temperatur kann (trockene) Luft nur eine bestimmte Menge an Wasserdampf aufnehmen. Ist die Sättigungsfeuchte erreicht, kann die Luft keinen weiteren Wasserdampf aufnehmen und das Wasser kondensiert aus.

Es wird zwischen absoluter und relativer Luftfeuchtigkeit unterschieden. Als absolute Feuchte x wird die Masse Wasser in trockener Luft bezeichnet. Folgende Formel beschreibt dies.

$$x = \frac{m_w}{m_L} \quad [\text{kg Feuchtigkeit} / \text{kg trockene Luft}]$$

m_w ... Masse der Feuchtigkeit [kg]
 m_L Masse der trockenen Luft [kg]

Die Masse der feuchten Luft ist die Summe der Masse der trockenen Luft und der Masse des Wassers. Folgende Formel zeigt die Massenbilanz.

$$m_f = m_L + m_w = m_L \cdot (1 + x) \quad m_f \dots \text{Masse der feuchten Luft [kg]}$$

Der Luftdruck setzt sich zusammen aus dem Partialdruck der trockenen Luft und dem Partialdruck des Wasserdampfes (Partialdampfdruck).

$$p = p_L + p_D$$

$p \dots$ Gesamtdruck der feuchten Luft [Pa]
(im Rechenprogramm wird p in bar eingegeben)
 $p_L \dots$ Teildruck der trockenen Luft [Pa]
 $p_D \dots$ Teildruck des Dampfes in der feuchten Luft [Pa]

Der Partialdampfdruck der feuchten Luft kann nach folgender Formel berechnet werden. Der Faktor 0,622 resultiert aus dem Verhältnis der Molmassen des Dampfes und der trockenen Luft.

$$p_D = \frac{p \cdot x}{0,622 + x} \quad (\text{mit: } R_L = 287,08 \text{ J/(kg K)} \dots \text{Gaskonstante der tr. Luft})$$

$$R_D = 461,53 \text{ J/(kg K)} \dots \text{Gaskonstante des Dampfes}$$

$$\rightarrow \frac{R_L}{R_D} = \frac{M_D}{M_L} = 0,622$$

Nach Umstellung der Formel wird Zusammenhang zur absoluten Feuchte deutlich.

$$x = 0,622 \cdot \frac{p_D}{p - p_D}$$

$M_D \dots$ Molmasse des Dampfes
 $M_L \dots$ Molmasse der tr. Luft

Im Sättigungszustand ist der Partialdruck des Wasserdampfes gleich dem Sättigungspartialdruck.

$$p_D = p_{D,S} \quad p_{D,S} \dots \text{Dampfdruck im Sättigungszustand [Pa]}$$

$$x = x_S$$

Die relative Feuchte φ wird durch das Verhältnis aus Partialdruck zum Sättigungspartialdruck des Wasserdampfes angegeben. Damit beschreibt die relative Feuchte die in der Luft enthaltene Menge an Wasser zur maximal möglichen Menge Wasser.

$$\varphi = \left(\frac{p_D}{p_{D,S}} \right)_T \cdot 100 [\%]$$

Der Sättigungspartialdruck des Wasserdampfes ist eine temperaturabhängige Größe. Sie lässt sich z.B. nach folgender empirischen Formel approximieren (Temperatur t in Grad Celsius) [Glück 1991].

$$p_{D,S} = 611 \exp \left(-1,91275 \cdot 10^{-4} + 7,258 \cdot 10^{-2} t - 2,939 \cdot 10^{-4} t^2 + 9,841 \cdot 10^{-7} t^3 - 1,92 \cdot 10^{-9} t^4 \right) \text{ [Pa]}$$

(Geltungsbereich: $0,01 \text{ } ^\circ\text{C} \leq t < 100 \text{ } ^\circ\text{C}$, max. Fehler: 0,02%)

Unter Anwendung der vorangehenden Gleichungen, ist es möglich die relative Feuchte in eine absolute Feuchte umzurechnen.

2.2.2 Messtechnik

Für die Messung der Luftfeuchte werden in der Literatur zahlreiche verschiedene Verfahren angegeben. Die gängigen Verfahren können in 4 Gruppen eingeteilt werden. [Testo 01]

- **Längenänderungen**
 - Haarhygrometer
 - Faserhygrometer
- **Temperaturänderungen**
 - Psychrometer (Assmann-Aspirationspsychrometer)
- **Elektrische Änderungen**
 - Keramische Sensoren
 - Lithium-Chlorid-Sensoren
 - Resistive Polymersensoren
 - kapazitive Polymersensoren
- **Optische Änderungen**
 - Taupunktspiegel
 - IR-Absorption

Kapazitive Sensoren zur Feuchtemessung haben im Klimabereich eine sehr weite Verbreitung. Auch im Praktikum wird mit einem kapazitiven Feuchtesensor gearbeitet. Aus diesem Grund wird im Rahmen dieses Skripts lediglich auf diese Art von Sensoren eingegangen. Weiterführende, detaillierte Erläuterungen können entsprechender Literatur entnommen werden (z.B. VDI 3786 Blatt 4, Meteorologische Messungen - Luftfeuchte).

Bei Kapazitiven Sensoren wird üblicherweise die feuchteabhängige (hygroskopische) Kapazität einer Polymerschicht zwischen zwei Elektroden als Messgröße ausgewertet. Die Kapazitätsänderung wird von einer Elektronik in ein elektrisches Ausgangssignal umgewandelt. [Testo 01]

Um die Beeinflussung durch Umwelteinflüsse zu minimieren, werden Sensoren zur Messung der Luftfeuchtigkeit meist in einer sogenannten Wetterschutzhütte (Strahlenschutzhütte) installiert. Diese verhindert z.B. eine Erwärmung des Sensors durch Sonneneinstrahlung damit eine Verfälschung des Messwertes. Weiter dient die Wetterschutzhütte vor allem um Regen vom Sensor abzuschildern.

2.2.3 Kalibrierung von Feuchtemesser

Es gibt verschiedene Methoden um Feuchtemesser zu kalibrieren. Im Rahmen des Praktikums soll eine Kalibrierung mit Hilfe zweier gesättigter Salzlösungen durchgeführt werden. Im Folgenden wird dieses Verfahren beschrieben. Andere Verfahren können der Literatur entnommen werden (z.B. [Testo 01]).

Gesättigte Salzlösungen verringern den Dampfdruck des Wassers oberhalb der Lösung. Wird in einem luftdicht verschließbaren Gefäß eine gesättigte Salzlösung angesetzt, stellt sich nach einiger Zeit ein konstantes Klima oberhalb der Lösung ein. Um dies zu erreichen sollte immer ein Überschuss an ungelöstem Salz als Bodensatz im Gefäß vorhanden sein. Je nach Wahl des Salzes ergibt sich eine andere Luftfeuchtigkeit im Gefäß. In DIN 50008 Teil 1 werden Beispiele angegeben.

Tabelle 2: Relative Luftfeuchte in % über wässrigen gesättigten Salzlösungen bei verschiedenen Temperaturen [DIN 50008]

Gesättigte Salzlösung			Löslich- keit L g/100 g H_2O	Relative Luftfeuchte U bei t °C													
Kenn- zeichen SL	Name	chemische Bezeichnung		5	10	15	20	23	25	30	35	40	45	50	55	60	
				%													
96	Kaliumhydrogen- phosphat	KH_2PO_4	23	—	—	—	96	96	96	95	95	94	93	93	—	—	
93	Kaliumnitrat	KNO_3	32	97	96	95	94	93	93	91	89	88	87	85	84	82	
90	Bariumchlorid	$BaCl_2$	36	93	93	92	91	90	90	89	88	87	—	—	—	—	
85	Kaliumchlorid	KCl	34	88	87	86	86	85	85	84	84	83	82	81	81	80	
75	Natriumchlorid	$NaCl$	36	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	
65	Natriumnitrit	$NaNO_2$	82	—	—	—	66	65	64	63	62	61	60	60	59	58	
53	Magnesiumnitrat	$Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	71	58	57	56	54	53	53	51	50	48	47	46	44	43	
43	Kaliumcarbonat	$K_2CO_3 \cdot 2H_2O$	112	46	45	44	44	43	43	42	41	40	39	38	37	36	
33	Magnesiumchlorid	$MgCl_2 \cdot 6H_2O$	54	34	34	34	33	33	33	33	32	32	31	31	31	30	
22	Kaliumacetat	CH_3COOK	228	25	24	24	23	22	22	22	21	20	—	—	—	—	
12	Lithiumchlorid	$LiCl \cdot H_2O$	83	12	12	12	12	12	12	11	11	11	11	11	11	11	

Wie die Tabelle zeigt, lassen sich mit verschiedenen Salzlösungen große Feuchtebereiche abdecken. Auf diese Weise kann ein Konstantklima für die Kalibrierung von Feuchtesensoren hergestellt werden. Der zu kalibrierende Sensor wird in das Kalibriergefäß eingebracht (ohne in direkten Kontakt mit der Lösung zu kommen). Nach einiger Zeit stellt sich ein konstantes Messsignal ein. Aufgrund der Kenntnis der vorherrschenden relativen Feuchte kann nun die Kalibrierung vorgenommen werden.

Je nach verwendetem Salz, ist die sich einstellende relative Feuchte temperaturabhängig. Aus diesem Grund sollte die Temperatur immer mit gemessen werden.

Im Praktikum wird eine Kalibrierung mit Hilfe einer Natriumchlorid- und einer Lithiumchlorid-Lösung durchgeführt.

2.3 Niederschlag

Die Messung des Niederschlags ist für verschiedene Bereiche von Interesse, z.B. in der Meteorologie als Hilfsmittel für die Wetterprognose oder in der Klimatologie für statistische Betrachtung bzgl. des Klimas. Zum Niederschlag zählen sowohl flüssige Niederschläge wie Regen und Tau als auch feste Niederschläge wie z.B. Schnee, Graupel, Hagel. Auch in anderen Bereichen kann die Messung des Niederschlags von Interesse sein, wie z.B. der in Solarenergieforschung, wenn es um die Untersuchung von Verschmutzung von Solarkollektoren geht.

2.3.1 Kenngrößen und Maßeinheiten des Niederschlags

Bei der Messung des Niederschlags können verschiedene Kenngrößen in verschiedenen Maßeinheiten von Interesse sein [Koch]:

- **Niederschlagshöhe in der Einheit mm:**
Gibt die Höhe einer Wassersäule an. Dabei entspricht eine Höhe von 1 mm einer Wassermenge von 1 Liter pro Quadratmeter.
- **Regenintensität in der Einheit mm/Zeit**
Gibt die zeitliche Veränderung der Niederschlagshöhe an. Wird eine Messdatenerfassung genutzt, ergibt sich die Intensität aus der Steigung der Summenlinie der Niederschläge.
- **Regendauer in der Einheit min oder h**
Gibt die Zeitdauer von Niederschlagsbeginn bis Niederschlagsende an.
- **Trockendauer in der Einheit min, h oder d**
Gibt an wie lange kein Niederschlag fällt.
- **Verteilung der Niederschläge über das Jahr**
Die jährliche Verteilung der Niederschläge ist z.B. im Bereich der Landwirtschaft von Interesse.

2.3.2 Messtechnik

Niederschlagsmesser (auch bez. als Regenmesser, Ombrometer, Hyetometer, Pluviometer) stehen mit verschiedenen Messverfahren und in diversen Ausführungen zur Verfügung. Einen guten Überblick gibt bspw. die VDI-Richtlinie VDI 3786 Blatt 7.

Die Messgeräte lassen sich in analoge und digitale Geräte einteilen. Analoge Geräte verfügen über einen Auffangbehälter in dem sich der Niederschlag sammelt. Die Niederschlagshöhe wird dann anhand einer Skala abgelesen. In Deutschland ist der Niederschlagsmesser nach Hellmann weit verbreitet. Abbildung 13 zeigt einen derartigen Regenmesser (Prinzipiskizze siehe Abbildung 14).



Abbildung 13: Niederschlagsmesser nach Hellmann
[www.wetterdienst.de, Zugriff 11.09.18]

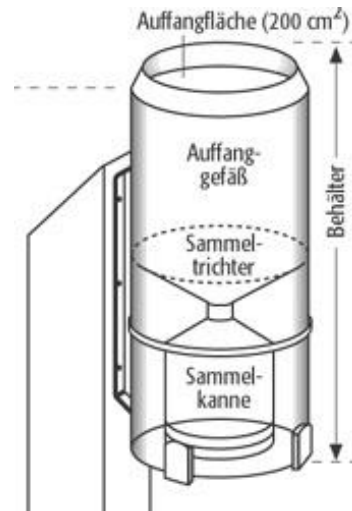
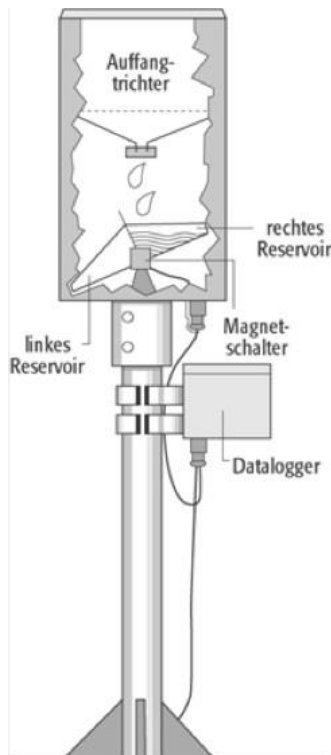


Abbildung 14: Niederschlagsmesser nach Hellmann
(Prinzip)

[www.spektrum.de, Zugriff 11.09.18]



Digitale Messgeräte sind mit einer Messdatenerfassung ausgestattet und erlauben die Erfassung von Niederschlägen kontinuierlich über längere Zeiträume. Hier kommen verschiedene Messverfahren zum Einsatz. Als Beispiel wird im Folgenden ein automatischer Regenmesser mit Wippe beschrieben. Andere Verfahren basieren z.B. auf dem Einsatz von Lichtschranken zur Erfassung der Tropfen [Riedl] oder auf der Erfassung der Wassermasse mit Hilfe einer Waage.

Abbildung 15: Niederschlagsmesser mit Wippe

[www.spektrum.de, Zugriff 11.09.18]

Ein Regenmesser mit Wippe (vgl. Abbildung 15) verfügt über eine reibungsarm gelagerte Kippwaage. Der Niederschlag wird zunächst in einem meist trichterförmigen Behälter aufgefangen. Von dort tropft das Wasser durch eine Bohrung im unteren Bereich des Behälters auf eine darunter angebrachte Kippwaage. Dort füllt sich solange die eine der beiden Waagschalen (Reservoir) mit Wasser, bis das Gewicht so groß ist, dass die Wippe kippt und sich die Waagschale entleert. Dann füllt sich die andere Waagschale. Bei jedem Kippvorgang wird ein

berührungsfrei arbeitender Reedkontakt geschlossen. Die Messdatenerfassung erfasst einen Messimpuls und speichert diesen ab.

Die World Meteorological Organization (WMO) hat als Standard eine Auffangfläche von 200 cm^2 vorgegeben. Der Niederschlagsmesser sollte in einer Höhe von einem Meter über der Erdoberfläche aufgestellt werden.

Um auch Schnee erfassen zu können, verfügen einige Geräte über eine integrierte Heizung. Dies verhindert auch das Einfrieren im Winter.

Als Einflussfaktoren auf das Messergebnis ist vor allem der Wind zu nennen. Wind führt zu einer Ablenkung des fallenden Niederschlags und führt dazu, dass i.d.R. zu geringe Niederschlagshöhen erfasst werden [Koch].

2.4 Windrichtung und Windgeschwindigkeit

Die Anforderungen an Messtechnik, Messdatenaufnahme und Datenauswertung im Bereich Windrichtung und Windgeschwindigkeit werden in der VDI 3786 Blatt 2 detailliert beschrieben. Im Folgenden werden nur die für das Praktikum wesentlichen Aspekte angesprochen und erläutert.

2.4.1 Standortwahl

Der Wind in einer Höhe von 10 m über ebenem, hindernisfreiem Gelände wird als „Bodenwind“ bezeichnet. Dies ist i.d.R. die Höhe in der gemäß internationalen Festlegungen gemessen werden sollte. Im Speziellen muss der Standort natürlich entsprechend der Messaufgabe bewertet und ausgewählt werden.

Wird auf einem Gebäude gemessen, müssen die Messgeräte 6 bis 10 m über der durchschnittlichen Gebäudehöhe installiert sein

Hinweis: Für das Praktikum wurde auf letztere Vorgaben aus didaktischen Gründen verzichtet.

2.4.2 Messtechnik

Für die Messung der Windgeschwindigkeit stehen verschiedene Messverfahren zur Verfügung. Als Beispiele sind Schalenstern-Anemometer, Flügelrad-Anemometer, Staudruck-Anemometer, thermische Anemometer zu nennen. Die Messung der Windrichtung erfolgt i.d.R. mit einer Windfahne. Die Richtlinie VDI 3786 Blatt 2 gibt einen guten Überblick über die verschiedenen Messverfahren. Im Praktikum werden ein Schalenstern-Anemometer und eine Windfahne eingesetzt. Daher wird im Folgenden auf diese Verfahren näher eingegangen.



Abbildung 16: Schalenstern-Anemometer und Windfahne [VDI 3786 Blatt 2]

Abbildung 16 zeigt die genannten Messwertaufnehmer. Das Schalenstern-Anemometer gehört zur Gruppe der Rotationsanemometer. Wird das Gerät vom Wind angeströmt, dreht sich der Schalenstern. Die Drehzahl ist proportional zum dynamischen Druck der Luftströmung. Ein Impulsgeber erzeugt Impulse, die von einer Messdatenerfassung ausgewertet werden können.

Die Windfahne ist senkrecht zur Achse drehbar gelagert und richtet sich entsprechend der Strömungsrichtung der Luft aus. Die Position der Windfahne wird z.B. mit Hilfe eines Potentiometers oder einer Winkelencoders bestimmt. Daher ist es wichtig bei der Installation auf eine korrekte Positionierung des Sockels der Windfahne zu achten. Nur so kann dem Messsignal die richtige Windrichtung zugeordnet werden. Als Windrichtung ist die Richtung definiert, aus der der Wind weht. Die Strömungsrichtung ist immer entgegengesetzt.

2.4.3 Erfassung und Auswertung der Messdaten

Auswerteverfahren

Üblicherweise werden die Messdaten mit einer hohen zeitlichen Auflösung von unter 5 Sekunden als Momentanwerte aufgenommen.

Für die Auswertung werden aus den Messdaten für Windrichtung und Windgeschwindigkeit Mittelwerte über einen Zeitraum von mindestens 10 Minuten erstellt. Für die Bildung der Mittelwerte empfiehlt die VDI 3786 zwei verschiedene Auswerteverfahren: die vektorielle Mittelwertbildung und die skalare Mittelwertbildung.

Die Richtlinie weist darauf hin, dass eine Mittelwertbildung für Zeiträume größer als eine Stunde nicht sinnvoll anzuwenden ist, da in diesem Fall keine Aussage mehr auf die tatsächliche Windrichtung zu treffen ist. Gleiches gilt bei zu stark schwankenden Windverhältnissen innerhalb des gewählten Zeitraums. In diesen Fällen sollte entweder der Zeitraum für die Mittelwertbildung verkleinert werden, oder es sollte direkt aus den Messwerten eine Häufigkeitsverteilung gebildet werden (s.u.).

Vektorielle Mittelwertbildung

Die Messgröße „Wind“ ist eine dreidimensionale Größe. Bezogen auf ein kartesisches Koordinatensystem kann die Wind aus x-, y- und z-Richtung auf das Messgerät treffen. Die Aufteilung in die Verschiedenen Richtungsanteile ist z.B. für die Berechnung von Schadstoffaus-

breitungen im Bereich der Luftreinhaltung erforderlich. Für eine detaillierte Beschreibung kann die VDI 3786 Blatt 2 herangezogen werden.

Skalare Mittelwertbildung

Die mittlere Windgeschwindigkeit kann wie folgt berechnet werden.

$$\bar{u} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^n u_i$$

Dabei ist:

- \bar{u} mittlere Windgeschwindigkeit in $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
- N Anzahl der Einzelmesswerte im Mittelungsintervall
- i Summationsindex
- u_i skalarer Einzelwert im Mittelungsintervall

Für die Bildung der Mittelwerte der Windrichtung kann im Prinzip auf gleiche Weise verfahren werden. Jedoch weist die Windrichtungsskala bei Nord eine Unstetigkeit auf, so dass bei Richtungsänderungen die über Nord laufen (innerhalb des Zeitraums zur Mittelwertbildung) die Windrichtungsskala über 360° hinaus „verlängert“ werden muss.

Bildung einer Häufigkeitsverteilung

Sollen die Windverhältnisse über längere Zeiträume (z.B. 1 Jahr) beschrieben werden, sollten die Mittelwerte (bzw. Messdaten) zur Bildung einer Häufigkeitsverteilung genutzt werden. Hierfür müssen Klassen für Windrichtung und Windgeschwindigkeit festgelegt werden, die sich an dem Ziel der Messaufgabe orientieren.

In der Meteorologie und der Klimatologie sind für die Windrichtung 30° -Richtungssektoren üblich. Beginnend bei Nord resultieren daraus 12 Klassen zzgl. einer weiteren Klasse für „umlaufende Winde“ (s.u.). Eine andere verbreitete Klassierung ist die Einteilung in 8 Klassen, die den Windrichtungen Nord, NordOst, Ost, etc. entsprechen. Die gemessenen Windrichtungen sind in ganzen Graden anzugeben (keine Nachkommastellen). Für die Windgeschwindigkeit bietet sich eine Klassenbreite von 1 m/s an. Die Häufigkeitsverteilung kann wie folgt dargestellt werden (Abbildung 17, links: Windgeschwindigkeit, rechts: Windrichtung mit einer Klassenbreite von 10°).

Zur Bewertung der Höhe der Windgeschwindigkeit werden in der VDI 3786 folgende Sonderfälle benannt:

- Windstille : Windgeschwindigkeit $< 0,3 \text{ m/s}$
- Schwachwindlage : Windgeschwindigkeit $\leq 1 \text{ m/s}$
- umlaufender Wind : Richtungsschwankungen von über 180° (innerhalb des Mittelungszeitraums)

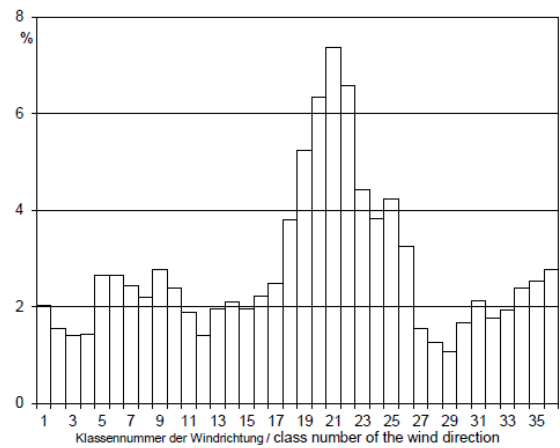
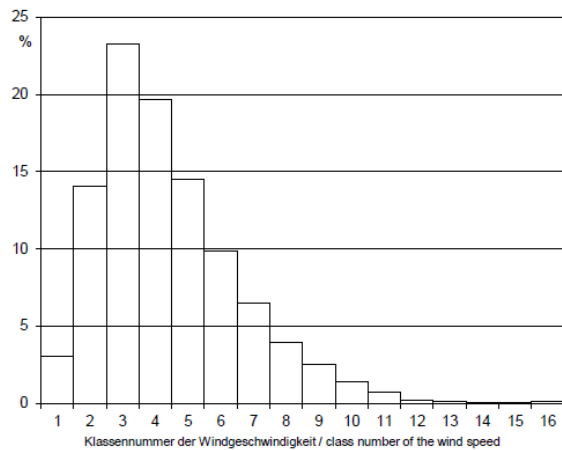


Abbildung 17: Häufigkeitsverteilung von Windgeschwindigkeit und Windrichtung
[VDI 3786 Blatt 2]

3 Versuchsaufbau

3.1 Solarstrahlung

Im Praktikumsversuch kommen verschiedene Strahlungssensoren zum Einsatz. Darunter befinden sich zwei Pyranometer mit thermischem Sensor und drei mit einem Halbleitersensor. Darüber hinaus kommt ein Pyrheliometer zur Messung der Direkt-Normalstrahlung zum Einsatz. Folgende Tabelle 3 gibt einen Überblick.

Tabelle 3: Übersicht über Strahlungssensoren

	Bezeichnung	Hersteller / Anbieter	Sensortyp	Kategorie nach ISO 9060*
1	CM11	Kipp&Zonen	Thermosäule	Secondary standard
2	CM3	Kipp&Zonen	Thermosäule	Second class
3	SSR81	ENNOS	Halbleiter	k.A.
4	CS10	Resol Regelungstechnik	Halbleiter	k.A.
5	TA GBS	Technische Alternative	Halbleiter	k.A.
6	CH1	Kipp&Zonen	Thermosäule	First class

* Herstellerangabe

Die Pyranometer sind auf einer Plattform montiert, die sowohl um die eigene Achse gedreht als auch geneigt werden kann. So ist es möglich den Azimut- und Neigungswinkel der Sensoren einzustellen. Folgende Abbildung zeigt den Messaufbau mit den Sensoren 1 bis 5 von links nach rechts. Das Pyrheliometer ist oberhalb der Plattform angebracht.



Abbildung 18: Sensor-Plattform

Unterhalb der drehbaren Plattform befindet sich eine Skala, um den Drehwinkel einzustellen. Hier gilt es zu beachten, dass ein Winkel von 0° **nicht** Süden entspricht. Die Skala ist um ca. 25° (dieser Wert sollte überprüft werden!) aus Süden in Richtung Westen verschoben. Um den Azimutwinkel der Sensor-Plattform zu verstellen, kann die Plattform vorsichtig gedreht werden. Hierzu müssen die beiden Drehgriffe links und rechts der Plattform gelöst werden. Um einen bestimmten Neigungswinkel einzustellen, steht ein digitaler Winkelmesser zur Verfügung. Zur Ausrichtung der Plattform in eine horizontale Position, kann der Winkelmesser oder eine auf der Oberfläche der Plattform angebrachte Libelle genutzt werden.

Zur Ausrichtung der Plattform normal zur Sonne, befindet sich ein Schattenstab auf der Plattform. Azimutwinkel und Neigungswinkel müssen so eingestellt werden, dass kein Schatten vom Stab zu sehen ist. Dies funktioniert nur bei Vorhandensein von Direktstrahlung.

Zur Messung der Diffusstrahlung ist ein weiteres Pyranometer CM11 mit einem Schattenring vorhanden.

3.2 Relative Feuchte der Umgebungsluft

Bei dem im Praktikum eingesetzten Feuchtemesser handelt es sich um einen kapazitiven Feuchte- und Temperatursensor. Der Sensor befindet sich in einer Wetterschutzhütte und kann nach dem Lösen der Verschraubung unterhalb der Hütte aus dieser herausgezogen werden. Abbildung 19 und Abbildung 20 zeigen den Sensor und die Wetterschutzhütte.



Abbildung 19: Kapazitiver Feuchte- und Temperatursensor



Abbildung 20: Wetterschutzhütte

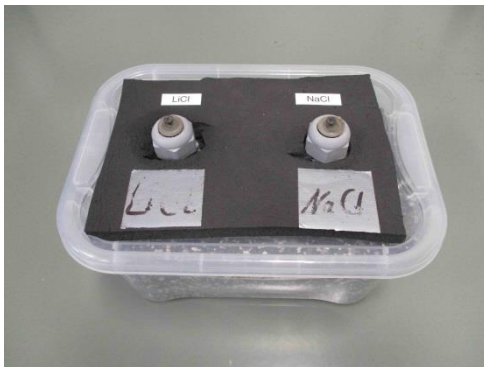


Abbildung 21: Kalibrierlösungen

Für die Kalibrierung stehen zwei Kalibrierlösungen bereit. Bei der ersten Lösung handelt es sich um eine Lithiumchlorid-Lösung, bei der zweiten um eine Natriumchlorid-Lösung. Der Sensor kann von oben durch die Kunststoffverschraubungen im Deckel in die Behälter eingebracht werden. In der nebenstehenden Abbildung sind die Kalibrierlösungen zu sehen.

3.3 Niederschlag

Für das Praktikum steht ein Regenmesser nach dem Wippenprinzip der Firma Davis Instruments zur Verfügung. In Abbildung 22 und Abbildung 23 sind der Sammeltrichter (links) und die Wippe des Messgeräts (rechts) zu erkennen.

Bei jedem Kippvorgang wird ein Impuls durch die Messdatenerfassung gespeichert. Der Hersteller gibt ein Fassungsvermögen einer Waagschale der Kippwaage von 2 cm^3 an.



Abbildung 22: Regenmesser Davis AeroCone 6465



Abbildung 23: Wippe (Kippwaage)

3.4 Windrichtung und Windgeschwindigkeit

Es steht ein Schalenstern-Anemometer und eine Windfahne der Fa. PCE Instruments zur Verfügung (Abbildung 24). Das Anemometer kann Windgeschwindigkeiten bis 50 m/s erfassen. Die Windfahne zeigt 0° bzw. 360° im Norden an. Die Messgrößen beider Sensoren werden mit der Messdatenerfassung gespeichert.



Abbildung 24: Schalenstern-Anemometer und Windfahne

4 Versuchsdurchführung

4.1 Solarstrahlung

Durchführung Teil A: Globalstrahlung und Diffusstrahlung

- Stellen Sie den Schattenring des Pyranometers so ein, dass vom Pyranometer CM11 nur die diffuse Solarstrahlung gemessen wird.
 - Lösen Sie hierfür die Befestigungsschrauben der Gleitschienen.
 - Scheint die Sonne mit einem ausreichend hohen Anteil an Direktstrahlung, kann der Schattenring durch Beobachtung des Schattenwurfs eingestellt werden. Der Dom des Pyranometers muss vollständig vom Ring beschattet werden.

-
- Bei diffuser Strahlung kann der Ring mit Hilfe der Tabelle im Anhang eingestellt werden. Hierfür müssen Sie anhand des Datums und des Breitengrad (Kassel ca. 51° N) die Einstellziffer der Gleitschienen ermitteln.
 - Für die Einstellung wird die relevante Einstellziffer an der Oberseite der Querschienen abgelesen. Beachten Sie, dass die Skalierung auf der Gleitschiene zweigeteilt ist. Bei aufsteigender Sonnendeklination (21. März bis 23. September) müssen Sie die südliche bzw. untere Skalierung nutzen, bei absteigender Sonnendeklination die nördliche bzw. obere Skalierung.
 - Bringen Sie die Sensor-Plattform in eine horizontale Position. Nutzen Sie für die Ausrichtung die auf der Plattform angebrachte Libelle bzw. einen Neigungsmesser. Arretieren Sie nun die Plattform mit Hilfe der links und rechts angebrachten Drehgriffe.
 - Öffnen Sie am Rechner die Konfiguration „PRAKTIKUM_MeteoMess“ und starten Sie die Messdatenerfassung. (Messintervall: 1 Sekunden). Die Messwerte aller Pyranometer werden nun aufgezeichnet.
 - Beobachten Sie auf dem Bildschirm die Verläufe der gemessenen Solarstrahlung. Wenn die Strahlung scheinbar konstant ist, warten Sie ca. 2 Minuten.
 - Stoppen Sie dann die Messung und speichern Sie die Daten ab.

Durchführung Teil B: Ansprechzeit

Voraussetzung: Es ist direkte Solarstrahlung vorhanden.

- Richten Sie die Sensor-Plattform mit Hilfe des auf der Plattform angebrachten Schattenstabs normal zur Sonne aus (Stab wirft keinen erkennbaren Schatten mehr). Arretieren Sie nun die Plattform mit Hilfe der links und rechts angebrachten Drehgriffe.
- Starten Sie die Messdatenerfassung. (Messintervall: 1 Sekunden).
- Beobachten Sie auf dem Bildschirm die Verläufe der gemessenen Solarstrahlung. Wenn die Strahlung scheinbar konstant ist, warten Sie ca. 60 Sekunden.
- Verschatten Sie nun die Sensor-Plattform mit Hilfe des bereitgestellten Pappkartons, so dass möglichst wenig Strahlung auf die Sensoren trifft.
- Warten Sie ca. 60 Sekunden und entfernen Sie dann zügig den Pappkarton, so dass die Sensoren wieder der Solarstrahlung ausgesetzt sind.
- Lassen Sie weitere 60 Sekunden aufzeichnen und wiederholen Sie dann den Vorgang.
- Stoppen Sie die Messung und speichern Sie die Daten ab.

4.2 Relative Luftfeuchte

Durchführung Teil C: Temperatur und relative Feuchte der Umgebungsluft

- Starten Sie die Messdatenerfassung.
- Bei dem Messsignal der relativen Feuchte handelt es sich um eine Spannung (0-10)V. Beobachten Sie das Messsignal in der Schnellansicht. Stellen Sie hierfür die Skalierung der Diagramm-Achsen entsprechend ein.
- Warten Sie bis die Messwerte einen scheinbar stationären Zustand erreicht haben (mindestens 60 Messwerte bei einer Messrate von 1 Sekunden). Notieren Sie sich die Nummer des letzten Scan-Durchlaufs.

Durchführung Teil D: Kalibrierung des Feuchtesensors

- Entnehmen Sie nun den Feuchtesensor aus der Wetterschutzhütte. Lösen Sie hierfür die Kunststoffverschraubung unterhalb der Wetterschutzhütte und ziehen Sie den Sensor nach unten aus der Hütte heraus.
- Platzieren Sie nun den Feuchtesensor in dem Gefäß mit der Natriumchlorid-Lösung. Entnehmen Sie dafür den Stopfen aus der Kunststoffverschraubung der Flasche und stecken Sie stattdessen den Sensor hinein. Drehen Sie die Kunststoffverschraubung handfest, so dass das Gefäß wieder abgedichtet ist. Der Sensor sollte sich nun oberhalb der Salzlösung der Flasche befinden.
- Beobachten Sie den Verlauf des Messsignals in der Schnellansicht der Messdatenerfassung. Stellen Sie hierfür die Skalierung der Diagrammachsen entsprechend ein.
- Nachdem der Messwert einen scheinbar stationären Zustand erreicht hat, lassen Sie weitere 60 Messwerte bei einer Messrate von 1 Sekunden aufzeichnen.
- Führen Sie nun den entsprechenden Vorgang für den zweiten Kalibrierpunkt mithilfe der Lithiumchlorid-Lösung durch.
- Beenden Sie die Messung und speichern Sie die Daten ab.

4.3 Niederschlag

Durchführung Teil E: Kalibrierung des Regenmessers

- Messen Sie den Durchmesser der Auffangöffnung des Regenmessers und notieren Sie sich diesen Wert.

-
- Entfernen Sie das Oberteil des Regenmessers, so dass Sie Zugang zur Wippe haben. Machen Sie sich mit dem Messprinzip des Regenmessers vertraut und sorgen Sie dafür, dass keiner der beiden Schaufeln der Wippe Wasser enthält.
 - Setzen Sie nun das Oberteil wieder auf den Regenmesser und arretieren Sie es.
 - Starten Sie die Messdatenerfassung. Lassen Sie sich ein Diagramm mit den Messdaten des Regenmessers anzeigen. Der Regenmesser misst Impulse und sollte zu diesem Zeitpunkt Null Impulse anzeigen.
 - Füllen Sie den bereitgestellten 1 Liter Messzylinder mit Wasser.
 - Gießen Sie nun **langsam** das Wasser aus dem Messzylinder in den Regenmesser hinein.
 - Notieren Sie sich die von der Messdatenerfassung gezählten Impulse.
 - Wiederholen Sie diesen Vorgang nun dreimal.
 - Beenden Sie die Messung und speichern Sie die Daten ab.

4.4 Windrichtung und Windgeschwindigkeit

Durchführung Teil F:

- Machen Sie sich mit der Funktionsweise des Schalenstern-Anemometers und der Windfahne vertraut.
- Verdeutlichen Sie sich den Unterschied zwischen Windrichtung und Strömungsrichtung. Hinweis: Der Kabelanschluss der Windfahne zeigt nach Norden.
- Für die spätere Auswertung bekommen Sie einen Datensatz mit Messdaten von Windrichtung und Windgeschwindigkeit zur Verfügung gestellt.

5 Versuchsauswertung

5.1 Solarstrahlung

Auswertung Teil A:

- Berechnen Sie für alle Sensoren die Mittelwerte und Standardabweichungen der gemessenen Strahlung. Nutzen Sie hierfür Messdaten aus einem möglichst stationären Messzeitraum.
- Berechnen Sie die Direktstrahlung im gewählten Messzeitraum auf Basis von Global- und Diffusstrahlung der beiden Pyranometer CM11.

-
- Stellen Sie Ihre Ergebnisse in einem Diagramm dar und diskutieren Sie ihre Ergebnisse.

Auswertung Teil B:

- Stellen Sie in einem geeigneten Diagramm das Ansprechverhalten der Strahlungssensoren dar. Berechnen Sie die Ansprechzeiten der einzelnen Sensoren (95% des Endwertes). Nutzen Sie hierfür die ansteigenden Flanken der Strahlungskurven. Stellen Sie die Ergebnisse in einer Tabelle dar.
- Beschreiben und diskutieren Sie die unterschiedlichen Ansprechverhalten der Sensoren. Nennen Sie mögliche Anwendungsbereiche für die verschiedenen Sensoren bzw. Sensortypen.

5.2 Relative Luftfeuchte

Auswertung Teil C und D:

- Berechnen Sie aus Ihren Messdaten die Mittelwerte für relative Feuchte in Volt und Temperatur in °C sowie deren Standardabweichungen für die Messung in der Umgebungsluft (Teil C) und für die beiden Kalibrierpunkte oberhalb der NaCl- und LiCl-Lösung (Teil D).
- Ermitteln Sie aus den Tabellenwerten die tatsächliche relative Feuchte oberhalb der Salzlösungen. Interpolieren Sie hierfür ggf. zwischen den Tabellenwerten.
- Erstellen Sie anhand der Tabellenwerte und Ihrer Messwerte eine Kalibrierfunktion $\varphi = m \cdot U_{\text{Messung}} + b$ und bestimmen Sie die Steigung m und den y-Achsenabschnitt b .
- Berechnen Sie nun mit Hilfe dieser Kalibrierfunktion aus Ihren Messwerten (Teil C) die relative Feuchte der Umgebungsluft.
- Berechnen Sie auf Grundlage der relativen Feuchte und der Temperatur die absolute Feuchte der Umgebungsluft.
- Diskutieren Sie Ihre Ergebnisse. Benennen Sie die Einflussgrößen auf die Kalibriergenauigkeit und diskutieren Sie mögliche Optimierungen um die Genauigkeit zu erhöhen.

5.3 Niederschlag

Auswertung Teil E:

- Berechnen Sie für die drei Messungen jeweils einen Wert in der Einheit Liter / Impuls.
- Stellen Sie die drei Werte in einer Tabelle dar und diskutieren Sie Ihr Ergebnis.

- Berechnen Sie welcher Niederschlagshöhe (in der Einheit mm) das Volumen von 1 Liter Wasser entspricht, das Sie in den Regenmesser hineingegeben haben.

5.4 Windrichtung und Windgeschwindigkeit

Auswertung Teil F:

- Stellen Sie die zur Verfügung gestellten Messdaten für Windrichtung und Windgeschwindigkeit in einem geeigneten Diagramm dar.
- Beschreiben Sie den Verlauf der Graphen für Windrichtung und -geschwindigkeit und treffen Sie Aussagen bzgl. der Auswertbarkeit der Daten.
- Bilden Sie nun eine Häufigkeitsverteilung aus den Messdaten. Verzichten Sie dafür auf eine Mittelwertbildung und nutzen Sie die Messdaten direkt in ihrer vorliegenden zeitlichen Auflösung (1 Sekunde).
 - Nutzen Sie für die Erstellung der Häufigkeitsverteilung ein geeignetes Tabellenkalkulationsprogramm wie z.B. MS Excel.
 - Für die Klassierung der Windrichtung nutzen Sie bitte eine Klassenbreite von 45° . Wie in folgender Tabelle dargestellt, ergeben sich somit 8 Klassen.

Tabelle 4: Klassierung der Windrichtung

Klasse	Winkelbereich	Windrichtungsbereich
1	$< 45^\circ$	Nord bis Nordost
2	46° bis 90°	Nordost bis Ost
3	91° bis 135°	Ost bis Südost
4	136° bis 180°	Südost bis Süd
5	181° bis 225°	Süd bis Südwest
6	226° bis 270°	Südwest bis West
7	271° bis 315°	West bis Nordwest
8	$< 316^\circ$	Nordwest bis Nord

- Als Klassenbreite für die Windgeschwindigkeit nutzen Sie bitte 1 m/s.
- Berechnen Sie zunächst die absolute Häufigkeit und dann die relative Häufigkeit.
- Stellen Sie die relative Häufigkeit für Windrichtung und Windgeschwindigkeit in jeweils einem eigenen Balkendiagramm in Abhängigkeit ihrer jeweiligen Klasse dar.
- Beschreiben und diskutieren Sie Ihre Ergebnisse.

Anhang

Werte für die Einstellung der Gleitschienen am Schattenring (L in mm). Die Werte gelten für den Standort Kassel, Kurt-Wolters-Straße 3.

Tabelle 5: Einstellung der Gleitschienen [OTT HydroMet]

shadow ring's V, rad.	latitude of loc., B, °	day of a year	DATE		sun rise, h	sun set, h	daytime span, h	time of noon, h	minutes of noon	shadow ring bars scale L
			month	day						
0,185	51,32097	244	September	1	6,4046	20,3274	13,9228	13,3660	81,96	-44,76
10,6°		245	September	2	6,4339	20,2874	13,8534	13,3607	81,64	-42,85
		246	September	3	6,4636	20,2469	13,7834	13,3553	81,32	-40,93
longitude of locality E, °		247	September	4	6,4935	20,2061	13,7126	13,3498	80,99	-39,00
9,50415		248	September	5	6,5237	20,1649	13,6412	13,3443	80,66	-37,06
		249	September	6	6,5541	20,1233	13,5692	13,3387	80,32	-35,11
		250	September	7	6,5848	20,0813	13,4965	13,3330	79,98	-33,16
time zone:		251	September	8	6,6157	20,0390	13,4233	13,3273	79,64	-31,20
2		252	September	9	6,6468	19,9964	13,3496	13,3216	79,30	-29,24
		253	September	10	6,6781	19,9535	13,2753	13,3158	78,95	-27,27
solar Hour angle, °		254	September	11	6,7097	19,9103	13,2006	13,3100	78,60	-25,30
20,49585		255	September	12	6,7414	19,8668	13,1254	13,3041	78,25	-23,32
		256	September	13	6,7733	19,8231	13,0498	13,2982	77,89	-21,33
		257	September	14	6,8054	19,7792	12,9738	13,2923	77,54	-19,34
		258	September	15	6,8377	19,7351	12,8974	13,2864	77,18	-17,35
		259	September	16	6,8701	19,6908	12,8207	13,2805	76,83	-15,35
		260	September	17	6,9027	19,6464	12,7437	13,2745	76,47	-13,35
shadow ring:		261	September	18	6,9354	19,6018	12,6665	13,2686	76,12	-11,35
Kipp&Zonen		262	September	19	6,9682	19,5571	12,5889	13,2627	75,76	-9,34
model CM 121B		263	September	20	7,0011	19,5123	12,5112	13,2567	75,40	-7,33
		264	September	21	7,0342	19,4675	12,4333	13,2508	75,05	-5,32
values L, mm:		265	September	22	7,0673	19,4225	12,3552	13,2449	74,70	-3,31
"-" value from 0 down,		266	September	23	7,1006	19,3776	12,2770	13,2391	74,34	-1,29
"+" value from 0 up		267	September	24	7,1339	19,3326	12,1987	13,2333	74,00	0,73
the scale		268	September	25	7,1673	19,2877	12,1204	13,2275	73,65	2,75
		269	September	26	7,2007	19,2428	12,0420	13,2217	73,30	4,77
		270	September	27	7,2342	19,1979	11,9637	13,2160	72,96	6,79
		271	September	28	7,2678	19,1531	11,8853	13,2104	72,62	8,81
		272	September	29	7,3013	19,1084	11,8071	13,2048	72,29	10,83
		273	September	30	7,3349	19,0638	11,7289	13,1993	71,96	12,85

Literaturverzeichnis

Quaschnig 2002

Quaschnig, Geuder, Ortmanns; Vergleich und Bewertung verschiedener Verfahren zur Solarstrahlungsbestimmung; 13. Internationales Sonnenforum Berlin – 12. bis 14. September 2002

Kipp&Zonen 01

Bedienungsanleitung CM11 Pyranometer und CM14 Albedometer

Kipp&Zonen 2015

Bedienungsanleitung CMP Serie Pyranometer, CMA Serie Albedometer, Bedienungsanleitung Version: V1501, Herausgegeben am: 1st January 2015

ISO9060

International Organization for Standardization: ISO 9060: Solar Energy – Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation. Genf, 1990.

Hukseflux

Hukseflux USA, Thermal Sensors; ISO-9060 Standard & Pyranometer Measurement Accuracy, presentation

Testo 01

Testo industrial services GmbH, Feuchtefibel, Messtechnik und Kalibrierung, 3. Auflage

Uni Kassel 2018

Vajen, Jordan; Universität Kassel, FG Solar- und Anlagentechnik, Solarthermie, Messung von Solarstrahlung; Vorlesungsunterlagen

Glück 1991

Glück, Bernd: Zustands- und Stoffwerte, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 2. Auflage, 1991

Din 50008

DIN 50008 Teil 1, Konstantklimate über wässrigen Lösungen, Februar 1981

Koch

Koch, Universität Kassel, FG Geohydraulik und Ingenieurhydrologie, Ingenieurhydrologie

Riedl

J. RIEDL, O. PLÖRER, 9 Messungen der Niederschlagsintensität mit Ombrometer Hp

VDI 3786

VDI 3786, Blatt 1 bis Blatt 5, Umweltmeteorologie, Meteorologische Messungen, Oktober 2015

OTT HydroMet

Datei „shadow ring adjustment.xls”, per E-Mail bereitgestellt von OTT HydroMet am 29.07.2020

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Winkel.....	4
Abbildung 2: Resol CS 10 Halbleitersensor	4
Abbildung 3: Prinzip Pyranometer mit Thermosäule [VDI 3786 Blatt 5]	5
Abbildung 4: CMP11 Pyranometer (thermischer Sensor) [Kipp&Zonen]	5
Abbildung 5: Richtungsverhalten [Hukseflux 01]	6
Abbildung 6: gutes (blau) und schlechtes (rot) Richtungsverhalten [Hukseflux 01]	6
Abbildung 7: Sun Tracker Solys2 [Kipp&Zonen]	7
Abbildung 8: Prinzip - Sun Tracker [Uni Kassel 2018]	7
Abbildung 9: Schattenring CM121B/C [Kipp&Zonen]	7
Abbildung 10: Prinzip - Schattenring [Uni Kassel 2018]	7
Abbildung 11: Kipp&Zonen, CHP1 Pyrheliometer	8
Abbildung 12: Kipp&Zonen, Nachführungs-System [Kipp&Zonen]	8
Abbildung 13: Niederschlagsmesser nach Hellmann	13
Abbildung 14: Niederschlagsmesser nach Hellmann (Prinzip)	13
Abbildung 15: Niederschlagsmesser mit Wippe	13
Abbildung 16: Schalenstern-Anemometer und Windfahne [VDI 3786 Blatt 2]	15
Abbildung 17: Häufigkeitsverteilung von Windgeschwindigkeit und Windrichtung	17
Abbildung 18: Sensor-Plattform	18
Abbildung 19: Kapazitiver Feuchte- und Temperatursensor	19
Abbildung 20: Wetterschutzhütte	19
Abbildung 21: Kalibrierlösungen	19
Abbildung 22: Regenmesser Davis AeroCone 6465	20
Abbildung 23: Wippe (Kippwaage)	20
Abbildung 24: Schalenstern-Anemometer und Windfahne	20

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Pyranometer Kategorien nach ISO 9060 [Kipp&Zonen 2015]	6
Tabelle 2: Relative Luftfeuchte in % über wässrigen gesättigten Salzlösungen bei verschiedenen Temperaturen [DIN 50008]	11
Tabelle 3: Übersicht über Strahlungssensoren	17
Tabelle 4: Klassierung der Windrichtung	25
Tabelle 5: Einstellung der Gleitschienen [OTT HydroMet]	26