

# Meteorologische Vorhersage zur Tauprognose im Heliostatenfeld

## Master Thesis

zur Erlangung des akademischen Grades  
Master of Engineering (M. Eng.)

angefertigt am  
Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)  
Institut für Solarforschung  
Jülich

Vorgelegt von	Sarah Bour (Matrikelnummer: 3713644) Goebenstraße 40 66117 Saarbrücken
Betreut durch	Dipl.-Ing. (FH) Danjana Theis Dr. Olivia Freitag-Weber Dr. Bärbel Schlögl-Knothe Dr. Torsten Baumann
Abgabedatum	15.03.2018

# I Eidesstattliche Versicherung

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie alle wörtlich oder sinngemäß übernommenen Stellen in der Arbeit gekennzeichnet habe.

Dieses Thema beziehungsweise diese Arbeit wurde bisher weder in gleicher noch in ähnlicher Form von mir in einem anderen Prüfungsverfahren vorgelegt.

Saarbrücken, den 15. März 2018

---

Sarah Bour

## II Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meines Maschinenbaustudiums am Deutsch-Französischen Hochschulinstitut in Saarbrücken (DFHI) in Kooperation mit der „Université de Lorraine“ in Metz.

Der Wunsch, die Masterarbeit am Deutschen Zentrum für Luft und Raumfahrt am Standort Jülich zu absolvieren, ist durch mein persönliches Interesse, diverse Bereiche der Solarforschung kennen zu lernen, entstanden. An dieser Stelle möchte ich mich herzlich beim ganzen Arbeitsteam für die gute Zusammenarbeit bedanken.

Mein besonderer Dank gilt allen, die mich während der Entstehung dieser Arbeit unterstützt haben:

- Frau Dipl.-Ing. (FH) Danjana Theis und Frau Dr. Freitag-Weber, die mich von der HTW des Saarlandes aus betreut haben,
- Frau Dr. Bärbel Schlögl-Knothe und Herr Dr. Torsten Baumann, die mir beim DLR ihr Wissen für den Arbeitsfortschritt vermittelt haben.

Schließlich danke ich auch meinen Nächsten, die mir bei der Korrekturlesung geholfen haben.

### III Inhaltsangabe

Am Standort des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt in Jülich wird als Versuchskraftwerk der Solarturm Jülich betrieben. Das solarthermische Kraftwerk bedeckt eine Grundfläche von circa zehn Hektar, auf der 2153 bewegliche Spiegel, die sogenannten Heliostaten, stehen. Die Heliostaten fokussieren das Sonnenlicht auf dem Turm, um schlussendlich die Wärme an den Wasser-Dampfkreislauf abzugeben (1).

In diesem Forschungsrahmen werden ungefähr einmal im Monat Deflektometrie-Messungen durchgeführt, um die Spiegelgüte zu überprüfen. Die Messmethode basiert auf der Reflexion eines bestimmten Musters durch den Spiegel. Um äußere Einflüsse zu minimieren, werden diese Messungen in der Dunkelheit durchgeführt. Dazu müssen Mitarbeiter bei Nachtanbruch oder am früheren Morgen zur Arbeit kommen. Außerdem erfordern die Deflektometrie-Messungen die Abwesenheit von irgendeiner Form von Wasser auf den Spiegeln. Um die Tage zu bestimmen, an denen die Deflektometrie-Messungen durchgeführt werden können, muss das Vorhandensein von Tau auf den Spiegeln prognostiziert werden.

In der vorliegenden Arbeit wurde hierfür das von Beysens (2) entwickelte Tauvorhersagemodell eingesetzt. Die Eignung des Modells von Beysens für die Tauprognose auf dem Heliostat-Spiegel wurde auf zwei Arten geprüft. Im ersten Schritt wurden Taumengen durch das Modell mittels Messwerten aus dem Heliostatenfeld berechnet. Zu diesem Zweck wurde im Voraus ein Messstand an der Stelle des Heliostats AL34 aufgebaut. Im zweiten Schritt wurde die Verwendung von Vorhersagen aus dem Deutschen Wetterdienst zur Berechnung von Taumengen durch das Modell getestet. Über mehrere Nächte erwies sich die Tauprognose durch die Berechnung mittels der Vorhersagen als korrekter als mithilfe der Messwerte. Dies erklärt sich, basierend auf den anhand der Messwerte erzielten Ergebnissen, zum einen dadurch, dass das Modell Unzulänglichkeiten zur Tauprognose im Heliostatenfeld aufweist. Bei zu hohen Bedeckungsgradwerten hat das Modell von Beysens das Nichtvorhandensein von Tau ermittelt, während Tau zu diesen Zeitpunkten im Feld festgestellt wurde. Außerdem hat das Modell bei einem zu niedrigen Luftfeuchtebereich positive Taumengen berechnet. Zum anderen hat die Abweichung zwischen den Vorhersagen und den Messwerten des Bedeckungsgrades ermöglicht, die falsche Prognose für zwei Nächte auszugleichen. Diese korrekten Prognosen mittels der Vorhersagen scheinen aber einen Zufall darzustellen, da die Vorhersagen des Bedeckungsgrades keine anhaltende Tendenz im Vergleich zu den Messwerten gezeigt haben.

Schließlich hat das Modell anhand von Messwerten im Heliostatenfeld nur zwei von 14 Fällen aufgewiesen, in denen ein Mitarbeiter zur Arbeit gekommen wäre und dabei das Vorhandensein von Tau verhindert hätte, die Deflektometrie-Messungen vorzunehmen.

Von den fünf Nächten ohne Tau hat das Modell für drei Nächte die komplette Abwesenheit von Tau über die gesamte Nacht ermittelt. Dies bedeutet, dass 3 Nächte von fünf hätten für die Deflektometrie-Messungen genutzt werden können.

Bezüglich der anderen falschen Prognosen hätten die Zweifel an dem Vorhandensein von Tau zur Planung der Deflektometrie-Messungen nicht geführt.

Außerdem wurde die Verlässlichkeit des Modells durch eine Fehlerfortpflanzung berücksichtigt. In seinem Unsicherheitsbereich erweist sich das Modell als korrekt für fast jede stündliche Prognose.

Das Verwendungspotenzial des Modells von Beysens wurde für den Anwendungsfall des Heliostat-Spiegels geprüft und seine Beschränkungen definiert und erläutert.

## IV Abstract

The Juelich Solar Tower is operated by the „Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt“ on its Juelich site. The solar thermal power plant covers an area of about ten hectares and utilizes 2153 mirrors, called heliostats. The heliostats focus the solar radiation on the tower where the heat is absorbed and transferred to the water-steam cycle to produce electricity (1). In this context, surface measurements of the mirrors for monitoring their optical quality are performed once a month by the measuring method deflectometry. These measurements have to be realized during darkness, since it is based on the reflection of known patterns. Therefore, employees need to work at the beginning of the night or in the early morning hours. Furthermore, these measurements can only be carried out in the absence of any water, in the form of rain or dew, on the mirror since those would affect the reflection of the patterns. To help predicting suitable time spans for carrying out the deflectometry, a forecast of dew has been established.

In the present work the dew forecast model developed by Beysens (2) was used. The suitability of the model for the application to the heliostat mirror has been tested in two ways. As a first step, dew yields have been calculated by the model from measurements from the heliostat field. For this purpose, a measuring stand was set up in advance at the location of one of the heliostats. In a second step, the use of predictions from Germany's National Meteorological Service (Deutscher Wetterdienst) for the calculation of dew yields by the model was tested. The dew forecast based on the weather predictions was more accurate than those based on the measurements. This could be explained by the fact that the model presents two big deficiencies in the dew forecast for the heliostat field. On one hand, Beysens' model determined the absence of dew when high cloud cover was measured, although dew has been detected in the field at those times. On the other hand, the model has calculated positive dew yields although the humidity was too low for dew formation. However, the difference between the predictions and the measurements of the cloud cover made it possible to compensate for the wrong forecast for two nights. Still, these correct calculations of dew yields using the predictions seem to be a coincidence, since the forecasts of the cloud cover did not show any lasting tendency compared to the measured values.

Finally, based on measurements in the heliostat field, the model revealed only two cases in which an employee would have come to work without being able to carry out the measurements. Among the five nights without dew, the model determined the complete absence of dew for three nights. This means that three of five nights could have been utilized for the deflectometry measurement. Regarding the other false predictions, the doubts about the presence of dew wouldn't have led to plan the measurements.

In addition, the reliability of the model was taken into account by error propagation. In its area of uncertainty, the model proves to be correct for almost every hourly forecast. The potential use of the Beysens' model has been examined for the heliostat mirror application and its limitations have been defined and explained.

# Inhaltsverzeichnis

I	Eidesstattliche Versicherung.....	II
II	Vorwort.....	III
III	Inhaltsangabe.....	IV
IV	Abstract.....	VI
1	Einleitung.....	1
1.1	Hintergrund.....	1
1.2	Problematik.....	1
1.3	Zielsetzung.....	2
2	Theoretischer Hintergrund der Tautentstehung.....	3
2.1	Strahlungsbilanz der Erde.....	3
2.2	Entstehung von Tau auf der Spiegeloberfläche.....	3
2.2.1	Taupunkttemperatur.....	3
2.2.2	Abkühlung der Spiegeloberfläche.....	6
2.3	Einflussparameter der Tautentstehung.....	7
2.4	Modelle zur Taubildung.....	10
3	Vorarbeiten zur Tauprognose.....	12
3.1	Beschreibung des Modells von Beysens.....	12
3.2	Begründung für die Auswahl des Modells von Beysens.....	16
3.2.1	Vergleich der Modelle von Beysens und Xiao et al.....	16
3.2.2	Zusammenfassung der mit dem Modell von Xiao et al. erzielten Ergebnisse	19
4	Methodik der Tauvorhersage.....	21
4.1	Messungen im Heliostatenfeld.....	21
4.1.1	Ziel der Messungen.....	21
4.1.2	Beschreibung des Teststands.....	21
4.2	Akquise von Wetterdaten.....	26
4.3	Beschreibung des Tauprognose-Verfahrens.....	27
5	Zwischenanpassungen und Analysen.....	29
5.1	Sensitivitätsanalyse.....	29
5.2	Anpassungen der gemessenen Daten und der Vorhersagen zur Erzielung von Ergebnissen.....	33
5.2.1	Aufbereitung der Excel-Tabelle.....	33
5.2.2	Änderung der Koordinaten im MATLAB-Code.....	36
5.3	Analyse der Sensorsignale.....	37
5.4	Analyse der Kameraaufnahmen.....	38

6	Ergebnisse und Diskussion .....	40
6.1	Ergebnisse zur Tauprognose mit DWD-Daten und gemessenen Daten .....	40
6.2	Vergleich vorhergesagter und gemessener Parameter .....	53
6.3	Validierung des Modells von Beysens mit der Fehlerfortpflanzung.....	60
7	Fazit und Ausblick.....	63
8	Literaturverzeichnis .....	66
A	Anhang Teil 1 .....	i
B	Anhang Teil 2 .....	xi

# Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1:</b> Verfahren zur Stromerzeugung durch das solarthermische Turmkraftwerk in Jülich (3).....	1
<b>Abbildung 2:</b> Mollier-h-x-Diagramm bei einem Luftdruck von 1,013 bar (4).....	5
<b>Abbildung 3:</b> Unterschied des Wärmeaustauschs zwischen dem Spiegel und dem Himmel am Tag und bei Nacht .....	6
<b>Abbildung 4:</b> Einfluss der Trägerstruktur auf die Tauentstehung .....	9
<b>Abbildung 5:</b> Reduzierte Taumenge $h^*$ in Abhängigkeit vom Neigungsgrad für auf Holzkisten befestigte Textilien (bearbeitet aus (11)) und für gedämmte sowie nicht gedämmte planare Kondensationsoberflächen (bearbeitet aus (10)). (12).....	10
<b>Abbildung 6:</b> Einrichtung des Messstands während Beysens Experiment (2) .....	13
<b>Abbildung 7:</b> Kondensierte Masse pro Stunde $d\mu/dt$ ( $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ ) in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz $T_d-T_a$ . (2) .....	15
<b>Abbildung 8:</b> Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse von Schwedhelm (19) .....	19
<b>Abbildung 9:</b> Position des Heliostats Al34 und der Wetterstation im Feld (Quelle: Ulrich Kieselbach) .....	22
<b>Abbildung 10:</b> Fühler FHAD46C42L05 zur Messung der Lufteigenschaften.....	23
<b>Abbildung 11:</b> auf Pins 1 und 3 angeschlossener Betaungssensor SHS-A5 .....	25
<b>Abbildung 12:</b> Datenlogger Almemo 710 .....	25
<b>Abbildung 13:</b> Vorderseite des Messstands .....	26
<b>Abbildung 14:</b> Beschreibung der Überprüfung des Tauprognose-Verfahrens.....	28
<b>Abbildung 15:</b> Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse mit den in der Tabelle 3 aufgelisteten Basiswerten .....	30
<b>Abbildung 16:</b> Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse mit gleichen Taupunkttemperatur- und Lufttemperaturwerten .....	30
<b>Abbildung 17:</b> Einfluss der Lufttemperaturvariation auf den Bedeckungsgrad .....	32
<b>Abbildung 18:</b> Einfluss der Variation der Taupunkttemperatur auf den Bedeckungsgrad .....	32
<b>Abbildung 19:</b> Verhältnis des Bedeckungsgrades in Abhängigkeit der Nettostrahlung für berechnete Emissivitätswerte mittels der Gleichung von Beysens und der von Berger et al. ....	35
<b>Abbildung 20:</b> Kameraaufnahme vom 06. November 2017 um 19:57 (Tau).....	38
<b>Abbildung 21:</b> Kameraaufnahme vom 19. Oktober 2017 um 19:01 (kein Tau). In der Abbildung ist das Spiegelbild eines vorne stehenden Heliostaten erkennbar. ....	39
<b>Abbildung 22:</b> Unterschied zwischen der gemessenen Spiegeltemperatur $T_s$ und Taupunkttemperatur $T_d$ .....	44
<b>Abbildung 23:</b> Gemessene relative Luftfeuchtigkeit RH über die 14 Messnächte .....	46
<b>Abbildung 24:</b> Berechnete Taumengen im Vergleich zu den gemessenen Bedeckungsgradwerten für die Messnacht vom 28. auf den 29. September.....	48
<b>Abbildung 25:</b> Berechnete Taumengen im Vergleich zu den gemessenen Bedeckungsgradwerten für die Messnacht vom 12. auf den 13. Oktober .....	48
<b>Abbildung 26:</b> Berechnete Taumengen im Vergleich zu den gemessenen Bedeckungsgradwerten für die Messnacht vom 25. auf den 26. Oktober .....	49
<b>Abbildung 27:</b> Berechnete Taumengen im Vergleich zu den gemessenen Bedeckungsgradwerten für die Messnacht vom 2. auf den 3. November .....	49
<b>Abbildung 28:</b> Berechnete Taumengen im Vergleich zu den gemessenen Bedeckungsgradwerten für die Messnacht vom 06. auf den 07. November .....	50

<b>Abbildung 29:</b> Maximale erfasste Temperaturdifferenz zwischen der Taupunkt- und der Lufttemperatur bei Bedeckungsgrade von acht Okta im Vergleich zu der gemessenen Nettostrahlung .....	52
<b>Abbildung 30:</b> Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse mit einer Lufttemperatur von 12,38 °C als Basiswert .....	52
<b>Abbildung 31:</b> Temperaturdifferenz zwischen vorhergesagter und gemessener Taupunkttemperatur .....	54
<b>Abbildung 32:</b> Temperaturdifferenz zwischen vorhergesagter und gemessener Lufttemperatur .....	55
<b>Abbildung 33:</b> Anteil der vorhergesagten relativen Luftfeuchte zu der gemessenen relativen Luftfeuchte .....	56
<b>Abbildung 34:</b> Gemessene und vorhergesagte Bedeckungsgradwerte N für die Nächte, in denen die gemessenen Bedeckungsgradwerte von acht Okta eine falsche Prognose geliefert haben .....	57
<b>Abbildung 35:</b> Vergleich der im Heliostatenfeld und im Forschungszentrum gemessenen Windgeschwindigkeit mit den DWD Vorhersagen .....	59
<b>Abbildung 36:</b> Aus Vorhersagen berechnete Taumengen und aus Messparametern berechnete Taumengen mitsamt ihrer Messunsicherheit für die Nacht vom 19. auf den 20. Oktober 2017 .....	61

## Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 1:</b> Verwendete Messgeräte und ihrer Messunsicherheit .....	23
<b>Tabelle 2:</b> Basiswert und Änderungsbereich der Parameter für die Sensitivitätsanalyse .....	29
<b>Tabelle 3:</b> Alte und neue in MATLAB eingegebene Koordinaten.....	36
<b>Tabelle 4:</b> Ergebnisse der drei Verfahren für die Nacht vom 18. auf den 19. Oktober....	40
<b>Tabelle 5:</b> Zusammenfassende Tabelle der Prognosequalität über eine gesamte Nacht	42

# Formelzeichen- und Symbolverzeichnis

## Lateinische Symbole

Zeichen	Parameter	Einheit
$a$	Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
$A$	Wärmeübertragende Fläche	$m^2$
$c_c$	Spezifische Wärmekapazität der Kondensationsoberfläche	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
$c_w$	Spezifische Wärmekapazität des Kondensats	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
$H$	Ortshöhe	km
$L_c$	Verdampfungswärme	$J \cdot kg^{-1}$
$m$	Masse des Kondensats	kg
$M$	Masse der Kondensationsoberfläche	kg
$N$	Bedeckungsgrad	Okta
$P_B$	Wärmestrahlung des Bodens	$W \cdot m^{-2}$
$P_{Rückseite}$	Wärmestrahlung der Spiegelrückseite	$W \cdot m^{-2}$
$P_S$	Wärmestrahlung der Spiegelvorderseite	$W \cdot m^{-2}$
$q$	Kühlleistung der Edelstahlplatte	$W \cdot m^{-2}$
$q_{latent}$	Latente Wärmestromdichte (19)	$W \cdot m^{-2}$
$R_{cond}$	Latente Wärme	$W \cdot m^{-2}$
$R_G$	Gegenstrahlung	$W \cdot m^{-2}$
$R_{he}$	Sensible Wärme	$W \cdot m^{-2}$
$R_i$	Kühlleistung der Kondensationsoberfläche	$W \cdot m^{-2}$
$R_N$	Nettostrahlung	$W \cdot m^{-2}$
$RH$	Relative Luftfeuchtigkeit	%
$RH_{,V}$	Vorhergesagte relative Luftfeuchtigkeit	%
$R_x$	Widerstand	kOhm
$S_c$	Fläche der Kondensationsoberfläche	$m^2$
$t$	Zeit	s
$t_{q0}$	Zeitpunkt, ab dem die latente Wärmestromdichte das erste Mal in der Nacht grösser null ist (19)	h
$t_{q+}$	Zeitpunkt, ab dem die latente Wärmestromdichte in der Nacht dauerhaft grösser null ist (19)	h
$T_a$	Lufttemperatur	$^{\circ}C$
$T_{a,V}$	Vorhergesagte Lufttemperatur	$^{\circ}C$
$T_B$	Bodentemperatur	$^{\circ}C$
$T_c$	Temperatur der Kondensationsoberfläche	$^{\circ}C$
$T_d$	Taupunkttemperatur	$^{\circ}C$

$T_p$	Temperatur der Kupferplatte	°C
$T_s$	Spiegeltemperatur	°C
$V$	Gemessene Windgeschwindigkeit in einer Höhe von 10 m	m·s <sup>-1</sup>
$V_o$	Schwellenwert-Windgeschwindigkeit	m·s <sup>-1</sup>
$x$	Angezeigter Messwert	Digit

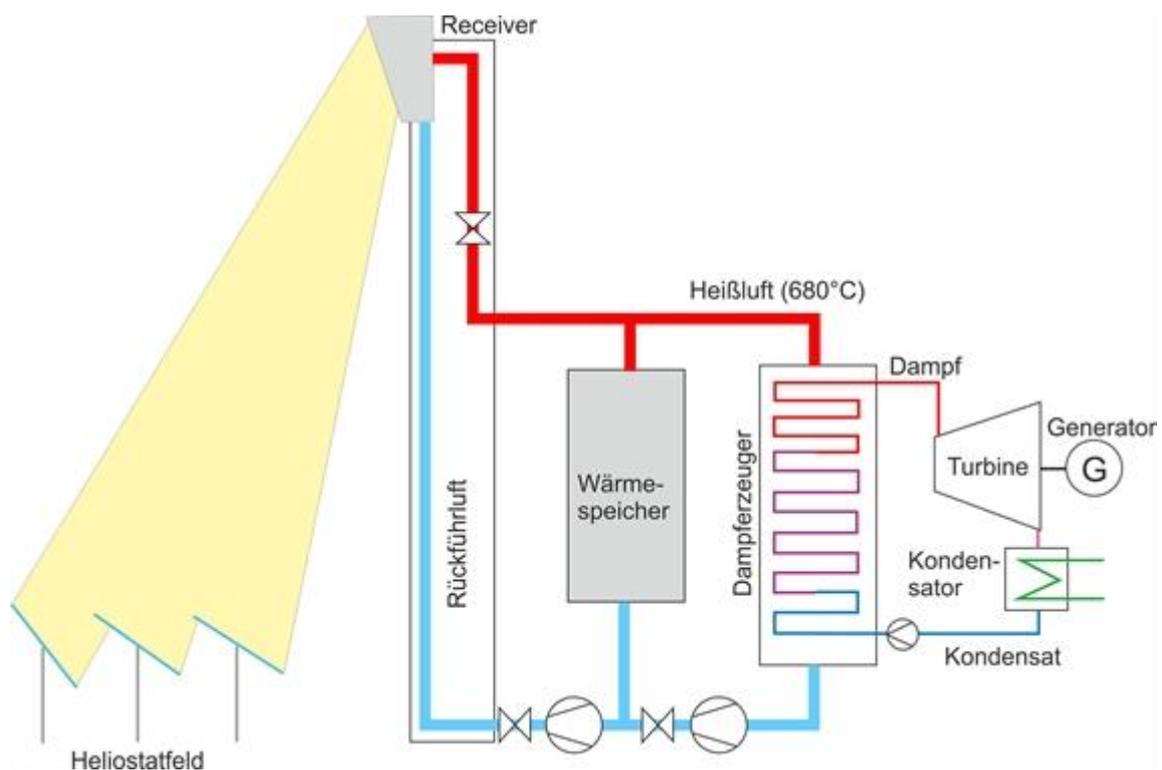
### Griechische Symbole

Zeichen	Parameter	Einheit
$\Delta h$	Absolute Messunsicherheit der Taumenge	mm/h
$\Delta N$	Absolute Messunsicherheit des Bedeckungsgrades	Okta
$\Delta T_a$	Absolute Messunsicherheit der Lufttemperatur	°K
$\Delta T_d$	Absolute Messunsicherheit der Taupunkttemperatur	°K
$\Delta V$	Absolute Messunsicherheit der Windgeschwindigkeit	m·s <sup>-1</sup>
$\varepsilon_A$	Emissionsgrad der Atmosphäre	-
$\varepsilon_B$	Emissionsgrad des Bodens	-
$\varepsilon_S$	Emissionsgrad der Spiegelvorderseite	-
$\mu$	Kondensierte Masse pro Flächen- und Zeiteinheit	kg·h <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup>
$\mu_o$	Kondensierte Masse pro Stunde-Temperatur- Korrelationsparameter	kg·h <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup>
$\sigma$	Stefan-Boltzmann-Konstante	W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-4</sup>

# 1 Einleitung

## 1.1 Hintergrund

Die Durchführung dieser Masterarbeit erfolgt im Rahmen der Solarforschung. Am Standort Jülich des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) befinden sich ein Solarturm und ein Heliostatenfeld, die die Hauptbauelemente eines punktfokussierenden Systems eines Solarkraftwerks darstellen. Innerhalb des Turmes wird Strom durch Wärmekraftmaschine erzeugt. Hierzu bündeln die Spiegel der Heliostaten das Sonnenlicht auf einem Luftreceiver. Dieser wird an der Spitze des Turmes angebracht und besteht aus porösen keramischen Elementen. Im Receiver wird die Luft bis zu 700 °C erhitzt und wird dann zum Aufheizen des Speisewassers in den Turm gesaugt. Der erzeugte Dampf ermöglicht dann, eine Dampfturbine zur Stromerzeugung zu versorgen.



**Abbildung 1:** Verfahren zum Stromerzeugung durch das solarthermische Turmkraftwerk in Jülich (3)

## 1.2 Problematik

Die Oberflächengüte und die Reflektionseigenschaften des Heliostat-Spiegels werden mit Deflektometrie-Messungen überprüft. Die Messmethode basiert auf der Reflexion eines bestimmten Musters durch den Spiegel. Hierfür wird das Muster zunächst auf die

sogenannte Target-Fläche des Turmes projiziert. Durch Ausrichten des Spiegels wird die Reflexion dieses Musters auf der Spiegelfläche mittels einer Kamera betrachtet. Die Abweichungen dieser Reflexion zum ursprünglichen Muster liefern schließlich Erkenntnisse über die Güte des Spiegels. Damit das Spiegelbild ohne Reflexionen der Umgebung betrachtet werden kann, müssen die Deflektometrie-Messungen durchgeführt werden, wenn es dunkel ist. Abends kann es jedoch geschehen, dass sich Tau auf bestimmten Oberflächen ablagert. Wenn Tau oder Regentropfen auf den Spiegeln liegen, können diese Deflektometrie-Messungen nicht durchgeführt werden, da das Wasser in beliebiger Form das Spiegelbild verzerrt. Daraus folgt die Problematik, dass eine mögliche Taubildung im Heliostatenfeld vor den Deflektometrie-Messungen prognostiziert werden muss.

### **1.3 Zielsetzung**

Das Ziel dieser Arbeit ist es, das Vorhandensein von Tau auf den Heliostaten vorhersagen zu können, damit die Durchführung der Deflektometrie-Messungen geplant werden kann. Einem Mitarbeiter kommen zu lassen, ohne, dass die Deflektometrie-Messungen durchgeführt werden können, stellt tatsächlich einen Geldverlust dar. Im Jahr 2017 konnten die Deflektometrie-Messungen in nur einer der elf geplanten Messnächte durchgeführt werden. Zu diesem Zweck sollen Wettervorhersagen verwendet werden, die von einem Anbieter kostenlos zur Verfügung gestellt werden. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, diese Vorhersagen einzusetzen. Eine davon besteht darin, eines der Tauvorhersagemodelle heranzuziehen, die von unterschiedlichen Wissenschaftlern ausgearbeitet wurden. Eine andere besteht darin, den mathematischen Zusammenhang zwischen den Wettervorhersagen und dem Tauvorhandensein im Heliostatenfeld herzustellen. In dieser Arbeit wird im ersten Schritt der Taubildungsprozess untersucht. Im zweiten Schritt wird die Auswahl eines der Tauvorhersagemodelle begründet. Danach wird dieses Modell durch den Aufbau eines Messstands im Heliostatenfeld getestet. Die Möglichkeit, Wettervorhersagen zur Tauermittlung im Heliostatenfeld anhand dieses Modells einzusetzen, wird gleichzeitig untersucht. Letztlich werden die Prognosen, einerseits ermittelt mit Messparametern und andererseits mit Vorhersagen, miteinander verglichen und analysiert.

## 2 Theoretischer Hintergrund der Tauentstehung

### 2.1 Strahlungsbilanz der Erde

Um den Tauentstehungsprozess verstehen zu können, ist es im ersten Schritt nötig, den Strahlungshaushalt der Erde zu betrachten. Dies bedeutet, den Strahlungsaustausch zwischen dem Weltraum, der Atmosphäre und der Erdoberfläche zu berücksichtigen. Die Heliostaten gehen dabei als Teil der Erdoberfläche in die Strahlungsbilanz ein.

Die aus dem Weltraum ankommende Sonnenstrahlung wird zunächst entweder von der Atmosphäre und der Erdoberfläche absorbiert oder gestreut.

Der größte Teil des Sonnenlichts, welches von der Erdoberfläche absorbiert und in Wärme umgewandelt wird, wird an die Atmosphäre abgegeben. Dies kann auf verschiedene Weisen geschehen, entweder durch Konvektion, welche zur Erwärmung der atmosphärischen Luft führt oder durch Kondensation in Höhenlage des Wasserdampfes zur Bildung der Wolken. Infolge ihrer Temperatur strahlt die Erdoberfläche auch Wärme im infraroten Bereich in die Atmosphäre ab.

In der Atmosphäre wird die Infrarotstrahlung von bestimmten Partikeln und Gasen wie zum Beispiel Aerosolen, Kohlenstoffdioxid und Wasserdampf absorbiert. Die von der Atmosphäre absorbierte Energie wird erneut in Richtung der Erde als Infrarotstrahlung emittiert. Diese Strahlen werden Gegenstrahlung genannt und entsprechen dem Phänomen des Treibhauseffektes. Andere Partikeln und Moleküle der Atmosphäre, wie Sauerstoff, die weder das Sonnenlicht noch die Infrarotstrahlung aus der Erde absorbieren, streuen oder reflektieren diese Strahlen.

### 2.2 Entstehung von Tau auf der Spiegeloberfläche

#### 2.2.1 Taupunkttemperatur

Um zu verstehen, wie sich Tau auf dem Spiegel bildet, ist es wichtig den thermodynamischen Begriff der Taupunkttemperatur zu kennen.

Je niedriger die Lufttemperatur ist, bei konstantem Luftdruck, desto geringer ist die maximale Wasserdampfmenge, die die Luft aufnehmen kann. Anders gesagt, je niedriger bei einem konstanten Luftdruck die Lufttemperatur ist, desto größer ist bei einer bestimmten Wasserdampfmenge ihre relative Luftfeuchtigkeit. Bei einer bestimmten Temperatur gilt die Luft als gesättigt, sobald ihre relative Luftfeuchtigkeit 100 % beträgt.

Der Taupunkt für Luft ist die bei gegebener Luftfeuchtigkeit und gegebenem Luftdruck niedrigste Temperatur, auf die eine Luftmasse gekühlt werden kann, bevor Wasser kondensiert, beziehungsweise bevor die Luft gesättigt wird. Dies bedeutet, dass die maximale Wasserdampfmenge, die die Luft enthalten kann, erreicht ist.

Liegen die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit vor, ist es möglich mittels verschiedener Näherungsformeln wie der von Magnus Tetens (siehe **Gleichung 1**) die Taupunkttemperatur zu berechnen.

$$T_d = \frac{b \left( \frac{aT_a}{b + T_a} + \ln RH \right)}{a - \left( \frac{aT_a}{b + T_a} + \ln RH \right)} \quad (1)$$

In dieser Gleichung ist  $T_d$  die Taupunkttemperatur,  $T_a$  ist die Lufttemperatur und  $RH$  die relative Luftfeuchte. Die Werte von  $a$  und  $b$  sind die folgenden:  $a = 17,27 \text{ °C}$  und  $b = 237,7 \text{ °C}$ .

Ein anderes Mittel zur Bestimmung der Taupunkttemperatur ist das Mollier-h-x-Diagramm (siehe **Abbildung 2**)

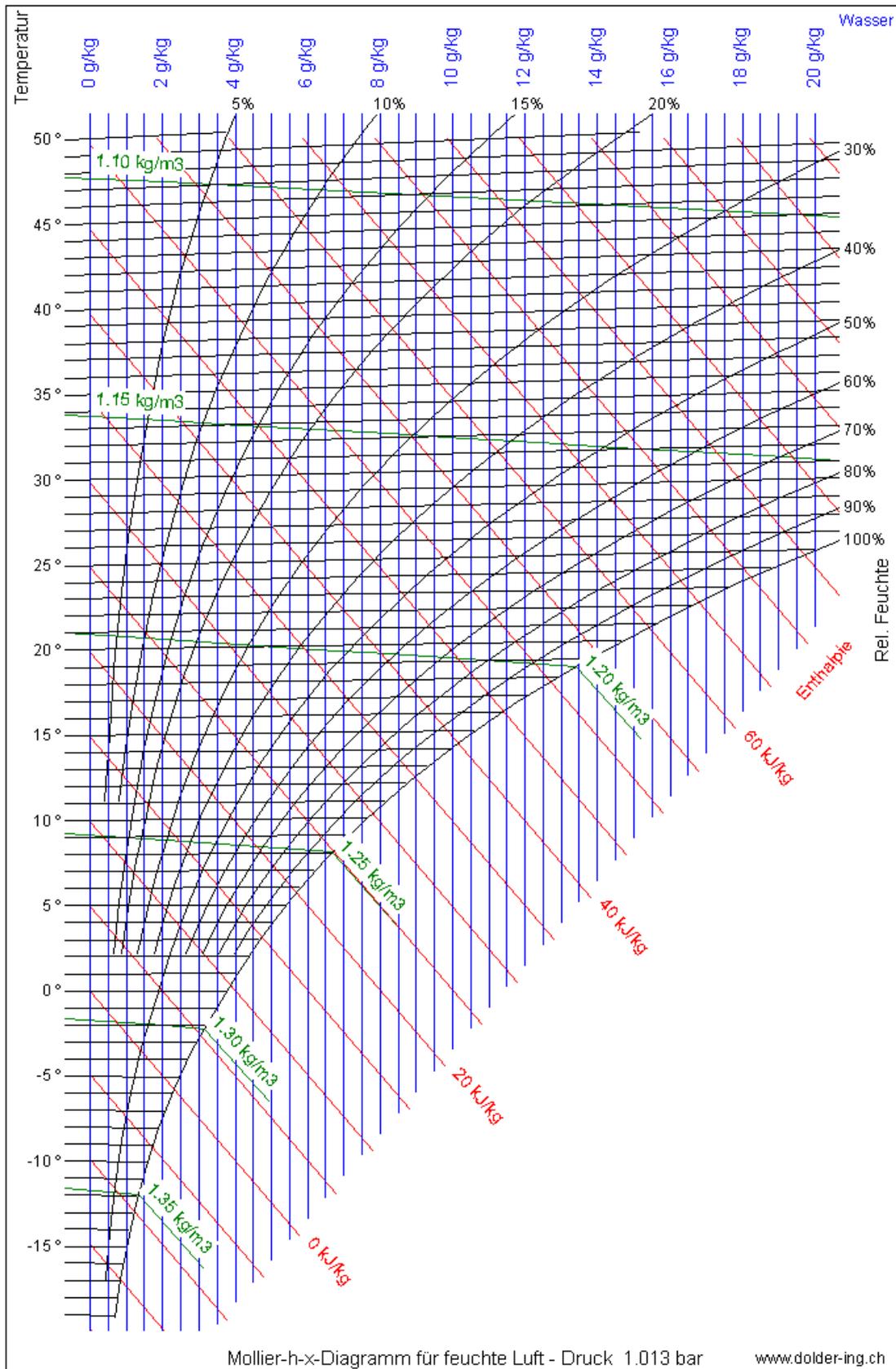
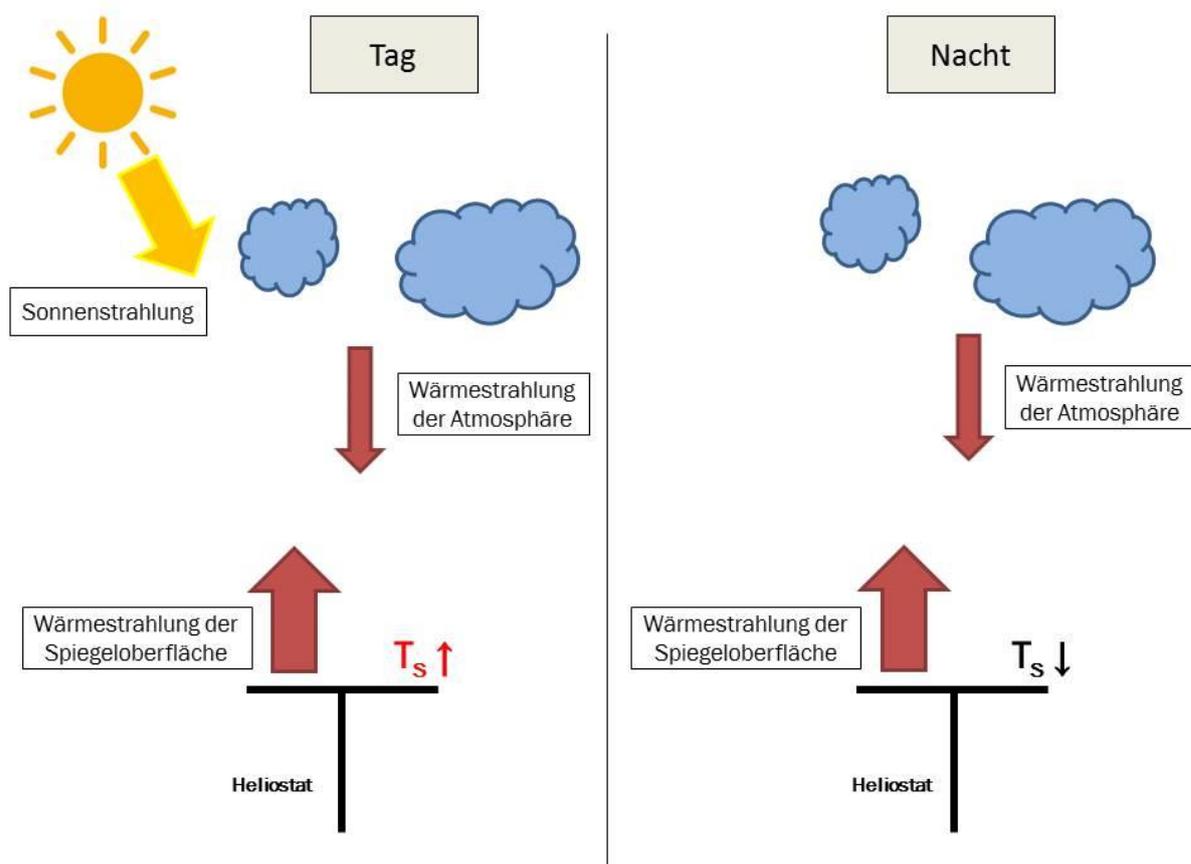


Abbildung 2: Mollier-h-x-Diagramm bei einem Luftdruck von 1,013 bar (4)

## 2.2.2 Abkühlung der Spiegeloberfläche

Bei Dunkelheit wird der Spiegeloberfläche lediglich noch die Strahlungsenergie der atmosphärischen Infrarotstrahlung, beziehungsweise der Gegenstrahlung, zugeführt. Dabei strahlt der Spiegel infolge seiner Temperatur Wärme als Infrarotstrahlung in Richtung des Weltraums ab. Da das Gleichgewicht zwischen solarer Strahlungszufuhr und Strahlungsemission während der Nacht nicht mehr erreicht wird, erfährt die Spiegeloberfläche einen Energieverlust. Dies führt zur Temperaturminderung des Spiegels. Die **Abbildung 3** stellt den Unterschied des Wärmeaustauschs zwischen dem Spiegel und dem Himmel am Tag und bei Nacht dar.



**Abbildung 3:** Unterschied des Wärmeaustauschs zwischen dem Spiegel und dem Himmel am Tag und bei Nacht

Tauentstehung setzt ein, sobald der Spiegel auf die Taupunkttemperatur der die Spiegeloberfläche umgebenden Luft abgekühlt wird. Taubildung besteht aus zwei Schritten: einer Abkühlungsphase und einer Zustandsänderung. Die Abkühlungsphase erfolgt durch verschiedene Wärmeübertragungsarten. Zunächst finden eine Wärmeleitung und auch eine durch Wind verstärkte Konvektion zwischen der Luft und dem Spiegelglas statt. In einem zweiten Schritt erfolgen Diffusion und Konvektion, welche es ermöglichen die Luft zu homogenisieren. Diese Energie zur Abkühlung wird

sensible Wärme genannt. Sobald die Luft die Taupunkttemperatur erreicht hat, dient die Kühlleistung zur Kondensation des Wasserdampfes. Letztere entspricht der sogenannten latenten Wärme.

Hierbei ist es wichtig Tau vom Nebel zu unterscheiden, welcher kleine Wasser Tröpfchen in der Luft und nicht auf einer Oberfläche darstellt. In der Literatur wird eine auf maximal 1 Kilometer reduzierte Sichtbarkeit als Nebel bezeichnet (5).

## 2.3 Einflussparameter der Tauentstehung

Tau bildet sich sobald die den Spiegel umgebende Luft ihre Taupunkttemperatur erreicht hat. Daraus lassen sich schon zwei selbstverständliche Parameter der Tauentstehung ableiten: die Lufttemperatur und die Luftfeuchtigkeit. Der Einfluss der Windgeschwindigkeit wurde durch verschiedene Studien untersucht und ihre Relevanz ist nicht unumstritten, insbesondere bei kleinen Geschwindigkeiten. Aus den Studien geht dennoch hervor, dass ab einem bestimmten Grenzwert keine Taubildung mehr stattfinden kann. Gemäß Muselli et al. (6) liegt diese Schwelle bei 4,5 m/s. Analog dazu gibt Beysens (2) an, dass es in der Praxis relativ schwierig ist, bei Windgeschwindigkeiten von mehr als 4,4 m/s, die in einer Höhe von 10 m gemessenen werden, Taubildung zu beobachten. Ein anderer meteorologischer Parameter, der am Tauentstehungsprozess beteiligt ist, ist der Bedeckungsgrad. Letzterer weist eine negative Korrelation mit dem Energieverlust einer von unten wärmegeämmten Oberfläche auf. Je geringer der Bedeckungsgrad ist, desto niedriger ist die tatsächlich von der Atmosphäre absorbierte und reemittierte Wärmemenge. Dadurch steigt die Kühlleistung der Spiegeloberfläche. Zusätzlich greift der Boden direkt und indirekt in die Taubildung ein. Als erstes strahlt er Wärme in Richtung der Spiegelrückseite aus, weswegen die Spiegeltemperatur sich auch durch Absorption dieser Strahlung und Wärmeleitung an die Spiegelfläche verändert. Gemäß Stefan-Boltzmann Gesetz (siehe **Gleichung 2**) ist die aus dem Boden durch Einstrahlung übertragene Wärme abhängig von der Bodentemperatur und seinem Emissionsgrad.

$$P_B = \varepsilon_B \cdot \sigma \cdot A \cdot T_B^4 \quad (2)$$

mit der Wärmestrahlung des Bodens  $P_B$ , dem Emissionsgrad des Bodens  $\varepsilon_B$ , der Stefan-Boltzmann-Konstante  $\sigma$ , der Wärmeübertragende Fläche  $A$  und der Bodentemperatur  $T_B$ .

Der Boden greift auch in den Prozess ein, indem er die Temperatur und die Feuchtigkeit der Luft verändert. Dabei findet während der Nacht ein von der Bodenfeuchte abhängiger Wärmestrom von unten nach oben statt (7). Da die Bodenfeuchte sehr stark von den Niederschlägen (8) und der Bodenbeschaffenheit abhängig ist und da die zu

betrachtende Bodenoberfläche aus Erde besteht, kann auf diese Weise der Bodenwärmestrom durch Verdunstung die Luftfeuchte insbesondere nach kräftigen Niederschlagsereignissen örtlich erheblich beeinflussen. Die Bodentemperatur, die Bodenfeuchte und der Bodenemissionskoeffizient sind damit auch Parameter der Tauentstehung.

Andere Parameter, welche die Eigenschaften der Spiegeloberfläche beschreiben, wie zum Beispiel das verwendete Material und die Form, beeinflussen auch den Taubildungsprozess. Je nach Werkstoff kühlt sich die Oberfläche langsamer oder schneller ab und somit bildet sich eine größere oder geringere Menge an Tau. Dies hängt von Temperatur und Emissionskoeffizient des Spiegels ab. Wenn diese Parameter vorliegen, kann die Leistung der vom Spiegel emittierten Infrarotstrahlung auch auf der Basis des Stefan-Boltzmann-Gesetzes bestimmt werden. Außerdem strahlen die Heliostaten Wärme nicht nur in Richtung der Atmosphäre, sondern auch in Bodenrichtung.

Wenn die gesamte Strahlungsbilanz des Spiegels und nicht nur der Wärmeaustausch zwischen dem Boden und der Spiegelrückseite berücksichtigt wird, ergibt sich die Gleichung für die Nettostrahlung, die während der Nacht negativ ist, wie folgt:

$$R_N = P_B - P_{\text{Rückseite}} + R_G - P_S \quad (3)$$

mit der Nettostrahlung  $R_N$ , der Gegenstrahlung  $R_G$ , der Wärmestrahlung des Bodens  $P_B$ , der Spiegelrückseite  $P_{\text{Rückseite}}$  und der Spiegelvorderseite  $P_S$ .

Hinzu kommt noch der durch Wärmeleitung erfolgende Wärmeaustausch mit der Trägerstruktur, die aus horizontalen und vertikalen Metallstäben und Verbindungspads besteht. Es wurde in dieser Arbeit (siehe **Abbildung 4**) und in früheren Studien beobachtet, dass diese Wärmeleitung einen gewissen Einfluss auf die Tauentstehung hat. Tau bildet sich zuletzt an den Verbindungspads, da der Spiegel an diesen Stellen wärmer ist.

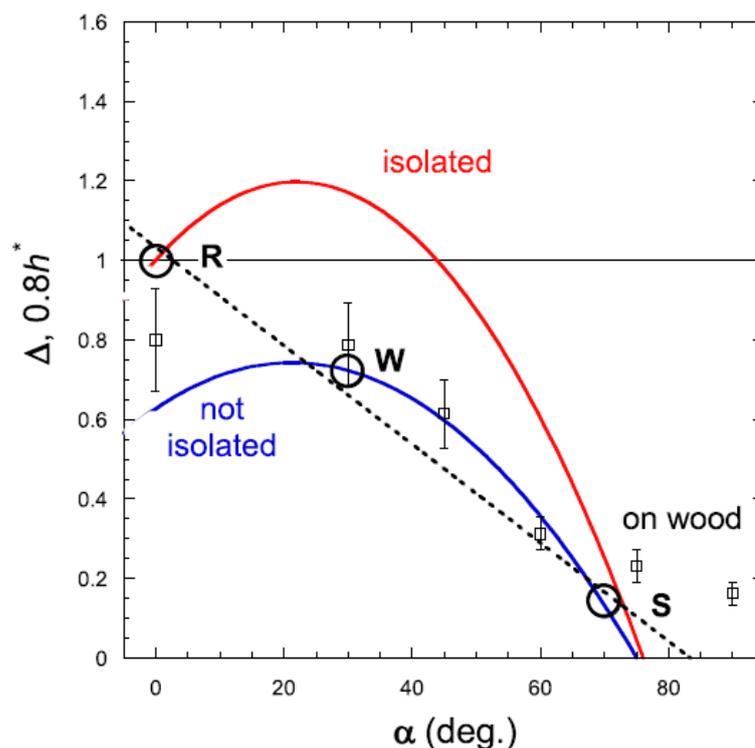


**Abbildung 4:** Einfluss der Trägerstruktur auf die Tauentstehung

Die Geometrie der zu betrachtenden Oberfläche spielt auch eine wichtige Rolle im Taubildungsprozess. So erlaubt eine Trichterform, im Vergleich zu einer flachen schiefen Ebene, nicht denselben Wärmeaustausch durch Strahlung und Konvektion mit der Atmosphäre. Bei ähnlichen Wetterbedingungen können tatsächlich bei Oberflächen mit unterschiedlichen Geometrien regelmäßig Schwankungen der kumulativen Taumenge von 40 % auftreten (9).

Außerdem müssen bei Deflektometrie-Messungen die Heliostaten entsprechend ihrer Position im Feld eine bestimmte Neigung aufweisen. Diese Neigung hat Einfluss auf die Kühlleistung des Spiegels (entspricht der Nettostrahlung mit umgekehrtem Vorzeichen) und daher auch auf die Taumenge, wie Beysens et al. (10) und Kidron (11) für gedämmte und nicht gedämmte Oberflächen festgestellt haben.

Wie die Verbindung ihrer Experimentergebnisse zeigt (siehe **Abbildung 5**), wird die maximale Taumenge für eine um zwischen  $20^\circ$  und  $30^\circ$  geneigte rückseitig wärmegeämmte Oberfläche erreicht. Betrachtet man die Variationen der nicht wärmegeämmten Oberflächen, wie dem Spiegel (untere blaue Kurve), wird auch sichtbar, dass die maximale Taumenge für die gleichen Neigungswinkel als für die wärmegeämmten Oberflächen (zwischen  $20^\circ$  und  $30^\circ$ ) erhalten wird.



**Abbildung 5:** Reduzierte Taumenge  $h^*$  in Abhängigkeit vom Neigungsgrad für auf Holzkisten befestigte Textilien (bearbeitet aus (11)) und für gedämmte sowie nicht gedämmte planare Kondensationsoberflächen (bearbeitet aus (10)). (12)

Die Studie von Beysens et al. (12) besteht aus der Beobachtung der Taubildung auf bestimmten Teilen eines Autos. In **Abbildung 5** entsprechen die Buchstaben R, W und S jeweils dem Dach, der Windschutzscheibe und den Autofenstern.

Schließlich gehen Umweltparameter wie die Landschaft (ländliche oder urbane Umgebung) und die Umweltverschmutzung auch in den Tauentstehungsprozess ein, indem sie örtlich das Klima verändern.

## 2.4 Modelle zur Taubildung

Viele Studien befassen sich mit dem Wetterphänomen der Taubildung, sowohl um die Vorteile als auch die damit verbundenen Schäden zu untersuchen. Im Bereich der Landwirtschaft beispielsweise kann Tau die Entwicklung von Pflanzenkrankheiten fördern (12). Tau kann auch zu Rost auf Außenflächen führen und insbesondere den Karosserielack beschädigen (13). Für die Vegetation stellt Tau auch eine Feuchtigkeitsquelle dar (14). Obwohl die Taumenge oft relativ niedrig ist, kann diese in ariden und halbtrockenen Umgebungen auch als Trinkwasserquelle dienen (15).

Aus diesem Grund haben sich viele Wissenschaftler damit beschäftigt, physikalische Modelle zu finden, um Tau vorherzusagen. Neben Tauentstehungsstudien, wurden

statistische Methoden, wie zum Beispiel Regressionsanalysen verwendet (14), um günstige Ergebnisse zu erzielen. Die Studie von Lekouch et al. (17) erlaubt unter Verwendung von künstlichen neuronalen Netzen genaue Vorhersagen für den jeweils betrachteten Ort. Die Umsetzung dieser Ergebnisse in andere Studiengebiete unterliegt jedoch noch immer großen Unsicherheiten (2).

Hinsichtlich der physikalischen Modelle beruhen alle auf der Energiebilanz der zu betrachtenden Oberfläche. Dies bedeutet, dass die Modelle alle schon oben erwähnten Transformationen und Austausche zwischen der Oberfläche und dem umgebenden Raum in Betracht ziehen. Aus der Energiebilanz wird ein Term extrahiert, der es ermöglicht, die Taubildung zu ermitteln. Je nach entwickeltem Modell ist dieser mathematische Ausdruck unterschiedlich. So haben Xiao et al. (14) als Ziel gehabt, für einen gegebenen Zeitpunkt aus der Energiebilanz den Wert der latenten Wärme in Abhängigkeit von allen Wetterparametern und Materialeigenschaften zu berechnen, die in den Taubildungsprozess einfließen. Dabei entspricht diese latente Wärme nur, wie im Abschnitt **2.2.2** schon erwähnt, der bei der Kondensation frei werdenden Energie des in der umgebenden Luft enthaltenen Wasserdampfs, aus dem sich beim Kontakt mit der Oberfläche Tau bildet. Sobald die latente Wärme positiv wird, kann daher angenommen werden, dass Taubildung einsetzt.

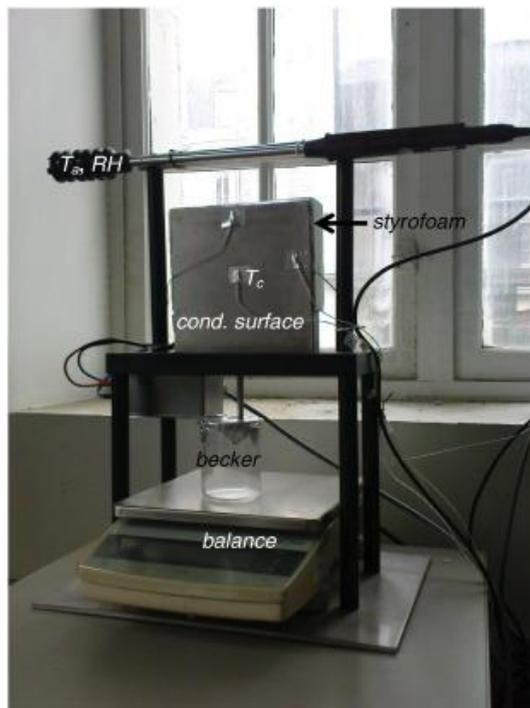
Das Modell von Beysens (2), welches im Rahmen dieser Masterarbeit verwendet wird, betrachtet als Größe die Taumenge pro Tag. Diese Taumenge ist eine Funktion der verschiedenen meteorologischen Parameter. Zu diesem Zweck führt Beysens ein Experiment durch, das es ermöglicht, die theoretische Gleichgewichtsgleichung zwischen sensiblem und latentem Wärmestrom und die Ergebnisse des Experiments zu vergleichen. Abschließend werden die Ergebnisse verifiziert, indem ein Vergleich mit in der Literatur angegebenen Koeffizienten stattfindet.

## 3 Vorarbeiten zur Tauprognose

### 3.1 Beschreibung des Modells von Beysens

Beysens' Ziel (2) ist es, in einem ersten Schritt ein Modell zu entwickeln, um das weltweite Tauertragungspotenzial abzuschätzen. Aus diesem Grund will Beysens ein einfaches Modell erstellen, das die Parameter Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, relative Luftfeuchtigkeit und Bewölkung einbezieht. Dabei können diese Parameter leicht überall auf der Welt, insbesondere auch in Entwicklungsländern, ermittelt werden. Zu diesem Zweck wird ein Experiment durchgeführt, das es ermöglicht, Beziehungen zwischen der Taumenge und den oben genannten meteorologischen Parametern herzustellen. Diese Versuchsergebnisse ermöglichen die Eliminierung bestimmter Größen, deren Ausdruck relativ komplex und von vielen Parametern abhängig ist. Hinzu kommt, dass diese stark vom Anwendungsort abhängen. Dies ist zum Beispiel der Fall für den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten  $a$ , welcher von den Grenzschicht-Bedingungen und der Windgeschwindigkeit weit entfernt von der Spiegeloberfläche abhängig ist (2). Der betreffende Abstand entspricht einer Höhe zur Oberflächennormalen, in der die Windgeschwindigkeit nicht mehr von der Oberfläche des Spiegels gestört wird.

Beysens wählt aus Vereinfachungsgründen für sein Experiment eine ebene und senkrecht gestellte Oberfläche, die vom Boden gedämmt ist und deren Emissionsgrad dem eines schwarzen Körpers entspricht, das heißt maximal und gleich 1. Er sieht dennoch eine Fehlermarge von 30 bis 40 % bei seinen Ergebnissen vor, die bei Oberflächen mit unterschiedlichen Geometrien auftreten kann (siehe Abschnitt **2.3**). Dabei wird der Wärmeverlust durch Strahlung abgebildet, indem eine quadratische Platte aus Edelstahl mit einer Kantenlänge von 200 mm und einer Dicke von 2 mm, die als Kondensationsoberfläche dient, auf einer luftdichten, wärmegeämmten und durch Peltier-Element abgekühlten Kupferplatte der gleichen Größe geschraubt wird. Eine Leistung von 0 bis 60 W kann dem Peltier-Element zugeführt werden. Aufgrund des Joule-Effekts und der Wärmeverluste der Kupferplatte ist diese Leistung jedoch nicht proportional zu der auf der Edelstahlplatte verfügbaren Kühlleistung. Das Experiment findet in einem Labor statt, welches die äußeren Bedingungen reproduziert. Hierfür ist das Fenster des Labors durchgehend halb geöffnet, um zunächst nur einen ruhigen Wind ( $< 0,5$  m/s) für die natürliche Konvektion und im zweiten Schritt eine Lufttemperatur- und relative Luftfeuchtedifferenz zwischen Tag und Nacht zu erzeugen. Die Parameter Lufttemperatur  $T_a$ , Luftfeuchte oder Taupunkttemperatur  $T_d$ , sowie die Temperaturen der Kupferplatte  $T_p$  und der Kondensationsoberfläche  $T_c$  werden alle 15 Minuten aufgenommen.



**Abbildung 6:** Einrichtung des Messstands während Beysens Experiment (2)

Aus den Experimentdaten ermittelt Beysens wie folgt die Höhe der Kühlleistung, die auf der Oberfläche der Edelstahlplatte verfügbar ist:

$$q \approx a(T_a - T_p) \quad (4)$$

mit der Kühlleistung der Edelstahlplatte  $q$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ), dem konvektiven Wärmeübergangskoeffizient  $a$ , der Lufttemperatur  $T_a$  und der Kupferplattentemperatur  $T_p$ .

Durch die Temperaturdifferenz  $T_a - T_p$  beschreibt Beysens den aufeinanderfolgenden Wärmeaustausch zwischen der Kupferplatte und der Edelstahlplatte und dann zwischen der Kupferplatte und der Luft. Um die mit dieser Temperaturdifferenz verbundene Leistung nach der **Gleichung 4** zu ermitteln, legt Beysens den Näherungskoeffizient für diesen Prozess auf den Wert  $a = 6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ . Zu diesem Zweck vernachlässigt er den Wärmeleitungskoeffizienten des Edelstahls und betrachtet nur den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten  $a$ . Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient kann mit der Nußelt-Zahl berechnet werden (18).

Beysens zeigt eine logarithmische Beziehung zwischen der dem Peltier-Element zugeführten Energie und der Kühlleistung der Edelstahlplatte auf.

Um schließlich eine Gleichung für die Taumenge zu erstellen, verwendet Beysens die folgende theoretische Gleichung, die die verschiedenen Energieübertragungsarten

darstellt, die zwischen der Luft und der Kondensationsoberfläche in Bezug auf die Temperaturänderung der letzteren auftritt:

$$\frac{dT_c}{dt}(Mc_c + mc_w) = R_i + R_{he} + R_{cond} \quad (5)$$

mit der Temperatur der Kondensationsoberfläche  $T_c$ , der Zeit  $t$ , der Kondensationsoberfläche- und Kondensatmasse  $M$  und  $m$ , der spezifischen Wärmekapazität der Kondensationsoberfläche  $c_c$  und des Kondensats  $c_w$ , der Kühlleistung  $R_i$  (entspricht bei Beysens' Experiment dem Ausdruck von  $q$  in der **Gleichung 4**), der sensiblen Wärme  $R_{he}$  und der latenten Wärme  $R_{cond}$ .

Der Term  $R_{cond}$  beschreibt die von der Kondensationsoberfläche gespeicherte Energie, während das Wasser aus der Luft darauf kondensiert. Er ist als Funktion der kondensierten Masse pro Zeiteinheit  $dm/dt$  und der Verdampfungswärme  $L_c$  beschrieben, wie die folgende Formel zeigt:

$$R_{cond} = L_c \frac{dm}{dt} \quad (6)$$

Betrachtet man eine stationäre Strömung, dann ist in der **Gleichung 5**  $dT_c/dT = 0$ . Damit kann  $R_{cond}$ , beziehungsweise die Taumenge, als Funktion der durch Strahlung übertragenen Energie (Kühlleistung)  $R_i$  und der sensiblen Wärme  $R_{he}$  ausgedrückt werden.

Bei den durchgeführten Messungen zieht Beysens es vor, die in dem Becher gesammelte kondensierte Masse pro Stunde  $\mu$  im Verhältnis zur Temperaturdifferenz  $T_a - T_c$  auszudrücken. Diese Temperaturdifferenz stellt einen Term der sensiblen Wärme dar, wie die folgende Gleichung zeigt:

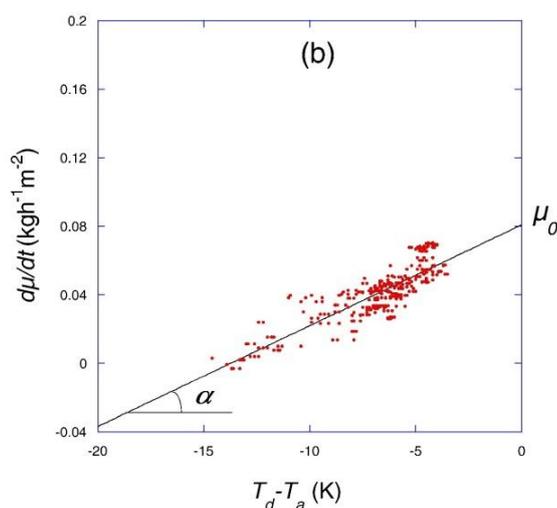
$$R_{he} = aS_c(T_a - T_c) \quad (7)$$

mit dem konvektiven Wärmeübergangskoeffizient  $a$  ( $\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ) und der Kondensatorfläche  $S_c$  ( $\text{m}^2$ ).

$T_a - T_c$  wurde vereinfacht und durch  $T_a - T_d$  ersetzt, da Beysens davon ausgeht, dass Tau nur ab der Taupunkttemperatur einsetzt. Dies ist streng genommen wahr mit der Ausnahme von Flächen mit hydrophilen Beschichtungen und beschädigten Oberflächen (2).

In ähnlicher Weise untersucht Beysens die Beziehung zwischen der maximalen erreichbaren Taumenge und der Kälteleistung der Edelstahlplatte  $R_i$ . Die maximale

kondensierte Masse pro Stunde  $\mu_o$  wird durch den Schnittpunkt mit der Y-Achse des vorigen Verhältnisses zwischen dem im Becher gesammelten Wasser pro Stunde und der Temperaturdifferenz  $T_d - T_a$  bei einer gegebenen elektrischen Leistung des Peltier-Elementes erhalten. In **Abbildung 7** wird die kondensierte Masse pro Stunde  $\mu$  in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz  $T_d - T_a$  gezeichnet. In **Abbildung 7** stellt der Begriff  $\mu_o$  die maximale kondensierte Masse pro Stunde dar, die erzielt werden kann. Beysens geht dabei davon aus, dass die Kühlleistung der Kondensationsoberfläche nur noch dazu dient den Dampf zu flüssigem Wasser zu kondensieren, sobald die Lufttemperatur die Taupunkttemperatur erreicht hat. Die maximale kondensierte Masse pro Stunde  $\mu_o$  ist abhängig von der Kühlleistung der Kondensationsoberfläche.



**Abbildung 7:** Kondensierte Masse pro Stunde  $d\mu/dt$  ( $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ ) in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz  $T_d - T_a$ . (2)

Schließlich werden zwei Beziehungen als Funktion der kondensierten Masse pro Stunde hergestellt, die in einer Gleichung zusammengesetzt werden.

Beysens vergleicht die Steigungen der Versuchsergebnisse mit den Werten von  $a$  und  $L_c$  aus der Literatur. Er validiert sein Experiment dadurch, dass er die gleiche Größenordnung für diese Parameter erreicht hat.

Anschließend passt Beysens seine Gleichung einer allgemeinen Verwendung des Modells an, indem er den Bedeckungsgrad des Himmels in den Ausdruck von  $R_i$  und die Windgeschwindigkeit als Proportionalitätsfaktor des Ausdrucks von  $R_{he}$  eingehen lässt.

Die endgültige durch Beysens erarbeitete Gleichung lautet wie folgt:

$$\left(\frac{dh}{dt}\right) = \left\{ 0,37 * [1 + 0,204323H - 0,0238893H^2 \right. \tag{8}$$

$$\left. - (18,0132 - 1,04963H + 0,21891H^2) * 10^{-3} * T_d \right]$$

$$* \left(\frac{T_d + 273,15}{285}\right)^4 \left(1 - \frac{N}{8}\right) \left. \right\} + [0,06(T_d - T_a)]$$

$$* \left(1 + 100 * \left\{1 - \exp\left[-\left(\frac{V}{V_0}\right)^{20}\right]\right\}\right)$$

mit der während einer 12-Stunden Nacht erhaltenen Taumenge  $dh/dt$  (mm-d<sup>-1</sup>), der Ortshöhe  $H$  (km), dem Bedeckungsgrad  $N$  (Okta), der Taupunkttemperatur  $T_d$  (°C), der Lufttemperatur  $T_a$  (°C), der Windgeschwindigkeit  $V$  (m/s) und  $V_0 = 4,4$  m/s.

In der obigen Gleichung wird die Kälteleistung als Funktion der Emissivität der Atmosphäre ausgedrückt, die selbst eine Funktion der Taupunkttemperatur  $T_d$  und der Höhe  $H$  darstellt (2).

## 3.2 Begründung für die Auswahl des Modells von Beysens

### 3.2.1 Vergleich der Modelle von Beysens und Xiao et al.

Damit das Beysens' Modell ausgewählt werden konnte, wurden zunächst die Eigenschaften des Modells mit denen vom Xiao's Modell verglichen. Die Ergebnisse, die mit dem Modell von Xiao erzielt werden können, wurden auch betrachtet und analysiert.

#### 3.2.1.1 Kontext des Modells von Beysens

Das Beysens-Modell wurde auf der Grundlage von experimentellen Ergebnissen entwickelt, bei dem eine vertikale quadratische Platte aus Edelstahl als Kondensationsoberfläche verwendet wurde. Aus geometrischer und materieller Sicht spiegelt die während dieses Experiments verwendete Oberfläche schematisch die Heliostatenspiegel wider, indem sie einer planaren Oberfläche entspricht. Darüber hinaus geht Beysens bei der Modellaufstellung davon aus, dass die Emissivität der zu berücksichtigenden Oberfläche gleich 1 ist. Dabei ist der Emissionsgrad eines Spiegels hoch ( $\varepsilon_s \approx 0,84$ ) (16). Im Vergleich zu anderen Studien, wie der von Xiao, die sich mit der Ablagerung von Tau auf dem Boden und Pflanzen befassen, sind größere Ähnlichkeiten zwischen den Heliostatenspiegeln und dem Modell von Beysens festzustellen.

### 3.2.1.2 Stärken und Schwächen des Modells von Xiao et al.

Ein Modell, das auf dem von Xiao et al. basiert, wurde in einer früheren Masterarbeit am Institut für Solarforschung getestet, um Tau auf dem Heliostatspiegel AJ60 zu prognostizieren. Die Untersuchung von Schwedhelm (19) hat gezeigt, dass das Modell von Xiao et al. im Anwendungsfall des Heliostatspiegels eingesetzt werden kann. Dabei zeigen die Ergebnisse von neun Nächten, dass es einen bestimmten Zeitpunkt  $t_{q+}$  gibt, ab dem das Modell überwiegend das Vorhandensein von Tau für den Rest der Nacht oder für eine bestimmte Dauer berechnet (berechneter Wert für den Ausdruck der latenten Wärme  $q_{latent}$  überwiegend positiv). Dieser Zeitpunkt weist eine maximale Abweichung von 2:39 h und eine durchschnittliche Abweichung von 00:34 h mit dem Zeitpunkt auf, an dem Tau auf den Kameraaufnahmen beobachtet werden kann.

Der Unterschied zwischen dem durch das Modell berechneten Ende der Tauablagerung (Wert von  $q_{latent}$  wieder negativ) und dem Zeitpunkt, der das Ende des Vorhandenseins von Tau auf Kameraaufnahmen markiert, wurde nicht untersucht. Es erweist sich jedoch als brauchbar für beide Fälle, in denen Tau vor dem Sonnenaufgang aufhört.

Eine durchschnittliche Abweichung von 00:34 h ist für die Anwendungen beim DLR akzeptabel. Diese Abweichung erlaubt es, Nächte zu identifizieren, für die die Dauer zwischen dem Sonnenuntergang und dem Beginn der Taubildung lang genug ist, um Deflektometrie-Messungen durchzuführen. Zusätzlich zeigen acht von neun Fälle, dass das Modell Tau vor dem Auftreten von Tau auf den Kameraaufnahmen berechnet. Diese Feststellung ist für die Deflektometrie-Messungen positiv zu betrachten, da sie die Tatsache verstärkt, dass sich vor dem Zeitpunkt  $t_{q+}$  kein Tau bildet. Dies gewährleistet Mitarbeitern auch, mehrere Messungen durchzuführen.

Es besteht jedoch ein gegebener Zeitpunkt  $t_{q0}$  vor  $t_{q+}$ , an dem der Wert von  $q_{latent}$  geringfügig positiv ist, bevor er wieder negativ wird. Dieser Zeitpunkt kann als vernachlässigbar betrachtet werden, da er über mehrere Nächte beobachtet wurde. Es kann jedoch irreführend zum Schluss führen, dass gar kein Abend für die Deflektometrie-Messungen genutzt werden kann, da Taubildung zu früh einsetzt. Weiterhin zeigen die Ergebnisse, dass  $q_{latent}$  während der Tauablagerungsdauer sehr nahe bei 0, im positiven Bereich oder auch für einige Minuten im negativen Bereich liegt. Die von Schwedhelm (19) durchgeführte Fehlerfortpflanzung des Modells von Xiao et al. bezeugt zudem, dass bei der Verwendung des Modells eine gesamte Messunsicherheit von 50 W/m<sup>2</sup> zu betrachten ist. Kein berechneter positiver Wert von  $q_{latent}$  übersteigt jedoch 50 W/m<sup>2</sup>. In etwa 3 von 9 Nächten befindet sich jedoch der Wert von  $q_{latent}$  am frühen Abend und für mindestens 1:30 h einschließlich seiner Messabweichung im negativen Bereich. Diese Dauer kann ausreichend sein, um mehrere Spiegel vermessen zu können. Das Modell kann daher die Identifizierung von Nächten gewährleisten, in denen die Tauabwesenheit während einer bestimmten Dauer am frühen Abend sowohl von den Kameraaufnahmen als auch von den Sensoren unter Berücksichtigung der

gesamten Messunsicherheit bestätigt wurde. Die kleinsten positiven Werte von  $q_{latent}$ , die im Unsicherheitsbereich liegen, müssen jedoch berücksichtigt werden, um das Vorhandensein von Tau zu bestätigen. Wie die Berechnung einer durchschnittlichen Abweichung sowie die Nichtbeachtung der Fehlerfortpflanzung im positiven Bereich gezeigt hat, besitzt das Modell von Xiao et al. eine gewisse Reproduzierbarkeit. Allerdings ermöglicht aus wissenschaftlicher Sicht keine der verwendeten Methoden Tau mit Präzision zu vorherzusagen.

### 3.2.1.3 Vergleich der jeweiligen Modelleigenschaften

Beysens' Ziel ist es, ein einfaches Modell zu entwickeln, das einfach zu erfassende Parameter verwendet. Als Ergebnis erarbeitet er ein Modell, indem eine größtmögliche Zahl von Parametern durch das Experiment festgelegt wurde, wobei zu berücksichtigen ist, dass Variationen in der Taumenge in Abhängigkeit von der Geometrie der Kondensationsoberfläche und dem geographischen Standort auftreten können. Dies ist beispielsweise der Fall für die Festlegung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  zu  $1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ . Im Gegensatz dazu orientieren sich Xiao et al. näher an der Theorie, indem jede Größe durch ihren aus der Literatur resultierenden Ausdruck betrachtet wird. Weiterhin berücksichtigen Xiao et al. den Bodenwärmefluss, während Beysens nur den Wärmeaustausch zwischen der Luft und dem Spiegel in Betracht zieht. Obwohl der Bodenwärmefluss häufig einem weniger einflussreichen Anteil der Energiebilanz der Bodenoberfläche entspricht, kann dessen Vernachlässigung zu großen Fehlern führen, insbesondere bei kleineren Zeitskalen (7).

Dabei ist der Bodenwärmefluss abhängig von vielen Parametern wie beispielsweise der Bodenstruktur, Feuchtigkeit, Temperatur und Vegetation (14, 20). Die Oberflächentemperatur des Bodens weist dabei eine negative Korrelation mit der Bodenfeuchte auf. Dies hat damit zu tun, dass die eintretende Solareinstrahlung bei feuchtem Boden mehr durch Verdampfen als durch Wärmeleitung neu verteilt wird (8).

Das Ziel dieser Studie ist es zu betrachten, ob es mit einem vereinfachten Modell wie dem von Beysens möglich ist, für den Anwendungsfall des Heliostatspiegels geeignete Ergebnisse zu erhalten wie Beysens es für 10 verschiedene geographische Standorte ohne Modellanpassung getestet hat. Aus diesem Grund wurde die Sensitivitätsanalyse des Modells von Schwedhelm untersucht (siehe **Abbildung 8**), in dem die Bodenwärme als Funktion der Bodentemperatur und der Bodenemissivität ausgedrückt ist. Im Vergleich dazu nutzen Xiao et al. eine Wertebandbreite vom während mehreren Nächten auftretenden Bodenwärmefluss. In **Abbildung 8** wurde festgestellt, dass die Bodenemissivität den größten Einfluss auf den Wert von  $q_{latent}$  hat. Angesichts von Unsicherheit und Variabilität im zeitlichen Verlauf der Bodenemissivität ist es sinnvoll ein Modell zu verwenden, das weniger empfindlich auf die Anwendungsfallmerkmale reagiert. Die Einfachheit des Beysens-Modells beruht auch auf der Tatsache, dass es

nicht notwendig ist, die Spiegeltemperatur  $T_s$  sondern nur die Lufttemperatur und die Taupunkttemperatur zu kennen. Im Gegensatz dazu ist im Modell von Xioa et al. für die Berechnung von  $q_{latent}$  die Berechnung von  $T_s$  durch Iteration erforderlich. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Modell von Beysens auf weniger Parametern basiert als das von Xioa et al.

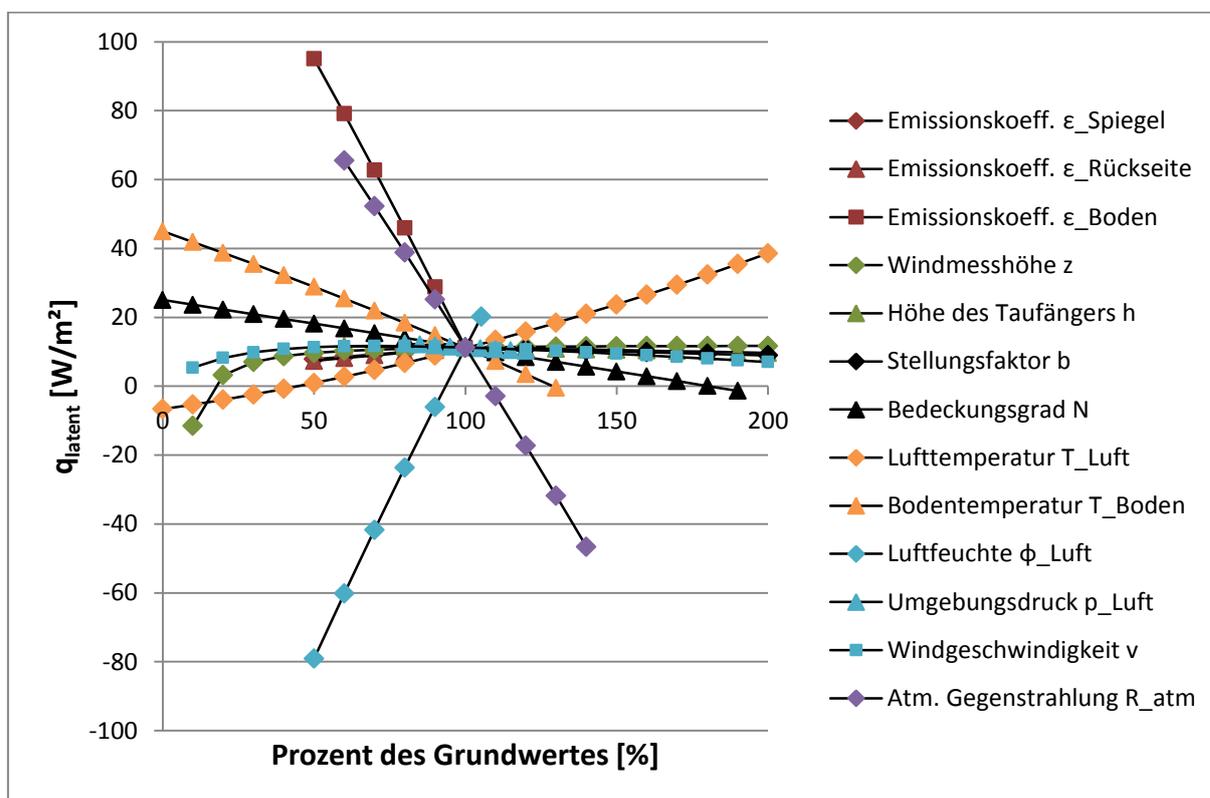


Abbildung 8: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse von Schwedhelm (19)

### 3.2.2 Zusammenfassung der mit dem Modell von Xioa et al. erzielten Ergebnisse

Zusätzlich zu den Ergebnissen, die durch die Berechnung der latenten Wärme anhand von Messungen von Schwedhelm am Standort des Heliostats AJ60 erhalten wurden, wurde die Anpassung des Modells von Xioa et al. auch mit Vorhersagen des Deutschen Wetter Dienstes getestet. Die Ergebnisse zeigen, dass die mit den Vorhersagen berechneten Werte von  $q_{latent}$  nicht mit den durch die Messungen berechneten Werten übereinstimmen. Darüber hinaus kann keine Beziehung zwischen diesen beiden Reihen von Werten gezogen werden. Um diese Abweichung zu verstehen, wurde jeder gemessene und prognostizierte meteorologische Parameter verglichen. Die Studie der relativen Luftfeuchte zeigt ein völliges Missverhältnis zwischen Messungen und Vorhersagen. Dies liegt an der Tatsache, dass die heruntergeladenen Vorhersagen nicht für 2 m über dem

Boden vorgesehen waren, sondern für eine 700 hP entsprechende Höhe. Dieser Druck entspricht tatsächlich einer Höhe von ungefähr 3000 m. Die absolute Luftfeuchtigkeit nimmt mit der Höhe jedoch ab. Die Untersuchung anderer Parameter wie die Lufttemperatur oder die atmosphärische Gegenstrahlung zeigt, dass sich hier Messungen und Vorhersagen weniger unterscheiden. Zwischen diesen beiden Reihen konnte jedoch keine Beziehung hergestellt werden. Im Hinblick auf die eigene Untersuchung der Parameter erweist sich angesichts der Bedeutung der Genauigkeit eines Parameters wie der Lufttemperatur die Festlegung eines Korrekturfaktors als zu ungenau. Außerdem wurde das Modell auch mit einer anderen meteorologischen Datenquelle, der von Wetterspiegel.de, getestet. Die gleiche Schlussfolgerung wie für die mit den DWD-Vorhersagen hat sich ergeben. Es besteht eine große Lücke in der Bestimmung von  $q_{latent}$  auf Basis der Messungen und auf Basis der Prognosen und es konnte kein belastbarer Zusammenhang aus der Parameteruntersuchung gezogen werden.

Daher ist es schwierig einen mathematischen Zusammenhang zwischen den Messungen und den Vorhersagen herzustellen, der eine auf den Anwendungsfall des Heliostatenfeldes angepasste Prognose auf Basis der Vorhersagen des DWD oder Wetterspiegels erlaubt.

## 4 Methodik der Tauvorhersage

### 4.1 Messungen im Heliostatenfeld

#### 4.1.1 Ziel der Messungen

Im Laufe der letzten 30 Jahre wurden physikalische Modelle zur Tauvorhersage durch unterschiedliche Wissenschaftler entwickelt. In diesen Modellen kommen mehrere meteorologische Parameter und Größen zum Einsatz, die es ermöglichen, den Stoff, dessen Austausch und Umwandlung zu beschreiben. Meteorologische Parameter ermöglichen es, zu jedem Zeitpunkt Aussagen über den Zustand der Atmosphäre zu treffen. Eines der Ziele dieser Arbeit ist es, die Eignung des Modells von Beysens zur Tauvorhersage im Heliostatenfeld zu bestimmen. Für diesen Zweck werden Messungen von meteorologischen Parametern im Heliostatenfeld durchgeführt, um den Zustand des Untersuchungsortes beschreiben zu können. Außerdem soll das Vorhandensein von Tau anhand von bestimmten Vorrichtungen auch bestimmt werden, damit die Modellergebnisse überprüft werden können.

#### 4.1.2 Beschreibung des Teststands

Die verwendeten Messgeräte können in zwei Kategorien unterteilt werden: die Vorrichtungen, die Tau erkennen, und die, die meteorologische Parameter messen. Um Tau auf den Spiegeln erkennen zu können, müssen die zu diesem Zweck verwendeten Sensoren direkt auf einem Spiegel befestigt werden. Die Messungen werden dann weitgehend an der Stelle des Heliostats AL34 durchgeführt, an dem die Tausensoren positioniert sind. Diese Stelle wird in der **Abbildung 9** durch einen roten Kreis gekennzeichnet.

Idealerweise sollten sich alle Messgeräte am selben Punkt befinden, um die Messbedingungen möglichst von örtlichen Einflüssen zu befreien. Jedoch werden die Windgeschwindigkeit und die Nettostrahlung nicht am Heliostaten aufgenommen, sondern an der Wetterstation, die sich am nordwestlichen Rand des Feldes befindet. Die Stelle der Wetterstation wird in der **Abbildung 9** durch einen schwarzen und grünen Punkt dargestellt. Die Gründe, warum der Versuchsheliostat ebenfalls nicht an diesem Ort gewählt wurde, liegen darin, dass der Heliostat AL34 neben einer Stromversorgung steht. Weiterhin befindet sich das Anemometer zur Messung der Windgeschwindigkeit in einer Höhe von 10 m und nicht auf Höhe der Heliostaten, welche 1,65 m beträgt. Werden zudem die Heliostaten als Hindernisse für den Wind betrachtet, ist die Windgeschwindigkeit in der Mitte des Feldes niedriger als an den Rändern. In diesem

Sinne repräsentieren die sich in der Mitte befindlichen Heliostaten wie der Heliostat AL34 die Mehrheit.

Obwohl die Windgeschwindigkeit in einer Höhe von 2 m geringer als die in einer Höhe von 10 m ist, wird die Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe im Beysens' Modell berücksichtigt. Dies stellt angesichts der Gestaltung der Wetterstation einen Vorteil für diese Arbeit dar. Es gibt jedoch Gleichungen, die eingesetzt werden können, um die Windgeschwindigkeit in einer Höhe zu berechnen, wenn sie in einer anderen Höhe bekannt ist.



*Abbildung 9: Position des Heliostats AL34 und der Wetterstation im Feld (Quelle: Ulrich Kieselbach)*

Die anderen meteorologischen Parameter wie die Lufttemperatur, die Luftfeuchtigkeit, die Taupunkttemperatur und die Bodentemperatur werden nah am Spiegel gemessen. Da der Spiegel für die Messungen genauso wie bei dem Experiment von Beysens senkrecht ausgerichtet wird, wird aus praktischen Gründen der zur Messung der Lufteigenschaften verwendete Fühler hinter dem Spiegel an die Trägerstruktur gehängt (siehe **Abbildung 10**).



**Abbildung 10:** Fühler FHAD46C42L05 zur Messung der Lufteigenschaften

Obwohl die Bodentemperatur nicht in Beysens' Gleichung eingeht, wird diese mit Blick auf eine etwaige Modellkorrektur gemessen. Der Bodensensor wird hierfür in den Boden eingestochen. Die Spiegeltemperatur wird in Beysens' Gleichung auch nicht berücksichtigt. Jedoch kann ihre Messung dazu dienen, sie mit der Taupunkttemperatur zu vergleichen. Die Temperaturdifferenz zwischen den beiden kann als Bezugspunkt für die Existenz von Tau dienen.

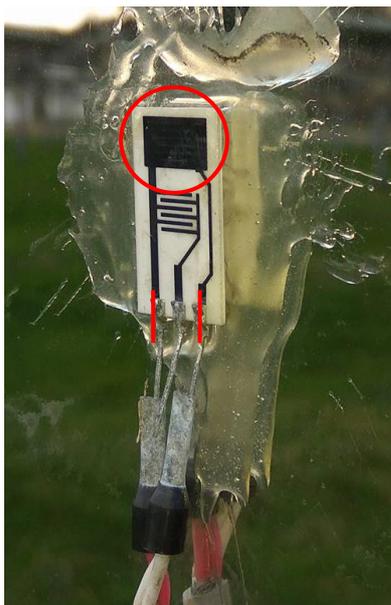
In der **Tabelle 1** werden die eingesetzten Messgeräte mitsamt ihrer Messunsicherheit aufgelistet.

**Tabelle 1:** Verwendete Messgeräte und ihrer Messunsicherheit

Messgerät	Gemessener Parameter	Einsatzbereich Messunsicherheit
Anemometer „First Class“ (21)	Windgeschwindigkeit $V$	0,3...75 m/s < 1 % (0,3 ... 50 m/s) oder < ±0,2 m/s
CGR3 Pyrgeometer (22, 23)	Nettostrahlung $R_N$	-250...250 W/m <sup>2</sup> ±6,1 % $R_N$
Fühler FHAD46C42L05 (24)	Lufttemperatur $T_a$	-20...+80 °C max. ±0,4 K bei 5...60°C

Fühler FHAD46C42L05 (24)	Luftfeuchte $RH$ Taupunkttemperatur $T_d$	5...98 % (relative Feuchtigkeit) $\pm 2,0$ % r.F. im Bereich 10... 90 % r.F. $\pm 4,0$ % r.F. im Bereich 5 ... 98 % r.F.
Tragbare Pt-100 (25)	Bodentemperatur $T_B$	bis 250 °C $\pm(0,15 + 0,002 T_B)$ (27)
Selbstklebendes Pt- 100 Thermometer (26)	Spiegeltemperatur $T_s$	-50...+150 °C $\pm(0,15 + 0,002 T_s)$ (27)

Die zur Tauerkennung verwendeten Sensoren sind die Betauungssensoren SHS-A5. Die von diesen Sensoren gemessenen Werte sind davon abhängig, wie diese angeschlossen werden. Diese Sensoren bestehen aus zwei Sensorbereichen, die die relative Luftfeuchtigkeit messen beziehungsweise die Betauung erkennen. Der Feuchtemessbereich liefert einen Widerstandswert, der mit wachsender Luftfeuchte exponentiell ansteigt und an der Betauungsgrenze stabil wird. Der Kondensaterkennungsbereich ermittelt einen Leitwert, wenn sich Kondensat auf den Sensoren (Betauungsfilm oder flüssiges Wasser) bildet (28). Zwischen Pin 1 und 2 wird der Leitwert in Mikroohm gemessen und zwischen Pin 1 und 3 die relative Feuchte in Kiloohm gemessen. Zwei Sensoren wurden als Feuchtesensor und zwei als Leitwertsensor verwendet. Dabei wurden einer der zwei Feuchtesensoren und einer der zwei Leitwertensoren an eine Stelle geklebt, an der sich ein Metallstab hinter dem Spiegel befindet, die anderen Sensoren an eine Stelle, an der der Spiegel nicht auf einem Strukturelement liegt. Der Grund hierfür liegt darin, dass die Trägerstruktur einen Einfluss auf das Abkühlen des Spiegels hat (Abschnitt 2.3). In der **Abbildung 11** wird ein Betauungssensor SHS-A5, dessen Pins 1 und 3 zur Luftfeuchtemessung angeschlossen sind, dargestellt.



**Abbildung 11:** auf Pins 1 und 3 angeschlossener Betauungssensor SHS-A5

Alle durchgeführten Messungen werden durch den Datenlogger Almemo 710 aufgezeichnet. Jedes Messgerät wird mit dem Datenlogger durch einen Stecker verbunden. Die Stecker definieren den maximalen Widerstandswert, der gemessen werden kann.



**Abbildung 12:** Datenlogger Almemo 710

Zusätzlich zu den Betauungssensoren wurde eine Kamera aufgebaut, die den Spiegel während der Nacht permanent überwacht. Wenn die Uhrzeiten gut synchronisiert sind geben die Kameraaufnahmen sicheren Aufschluss über das Vorhandensein von Tau.

In der **Abbildung 13** wird die Vorderseite des Messstands dargestellt. In dieser Abbildung wurden die Feuchtesensoren (1), die Leitwertsensoren (2), der Pt-100 Sensor (3), die Kamera (4), der Bodensensor (5) und die Lampe zur Spiegelbeleuchtung (6) hervorgehoben.



*Abbildung 13: Vorderseite des Messstands*

## 4.2 Akquise von Wetterdaten

Die Messungen werden durchgeführt, um das Modell von Beysens mit aktuellen und möglichst präzisen Wetterdaten vom Heliostatenfeld zu testen. Um Deflektometrie-Messungen besser organisieren und mindestens ein Tag vorher planen zu können, werden verlässliche Tauprososen benötigt.

Zu diesem Zweck sollen die Vorhersagen für den betroffenen Tag, an dem die Existenz von Tau bekannt sein soll, akquiriert werden. Und zwar von allen meteorologischen Parametern, die in der Gleichung von Beysens berücksichtigt werden. Damit kann durch das Modell eine Taumengenberechnung anhand der Parametervorhersagen durchgeführt werden. So kann eine Tauproggnose gestellt werden.

Es gibt unterschiedliche Quellen, die Wettervorhersagen zur Verfügung stellen. Im Rahmen dieses Projektes wurden die Vorhersagen des Deutschen Wetterdiensts (DWD) verwendet. Der DWD ist der nationale meteorologische Dienst der Bundesrepublik Deutschland. Wettervorhersagen werden vom DWD anhand von numerischen Modellen ermittelt. In ähnlicher Weise wie die Tauvorhersagemodelle bieten die DWD-Modelle eine mathematische Beschreibung der verschiedenen physikalischen Prozesse an, die in der Atmosphäre und an der Erdoberfläche stattfinden. Sie beschreiben zusätzlich den

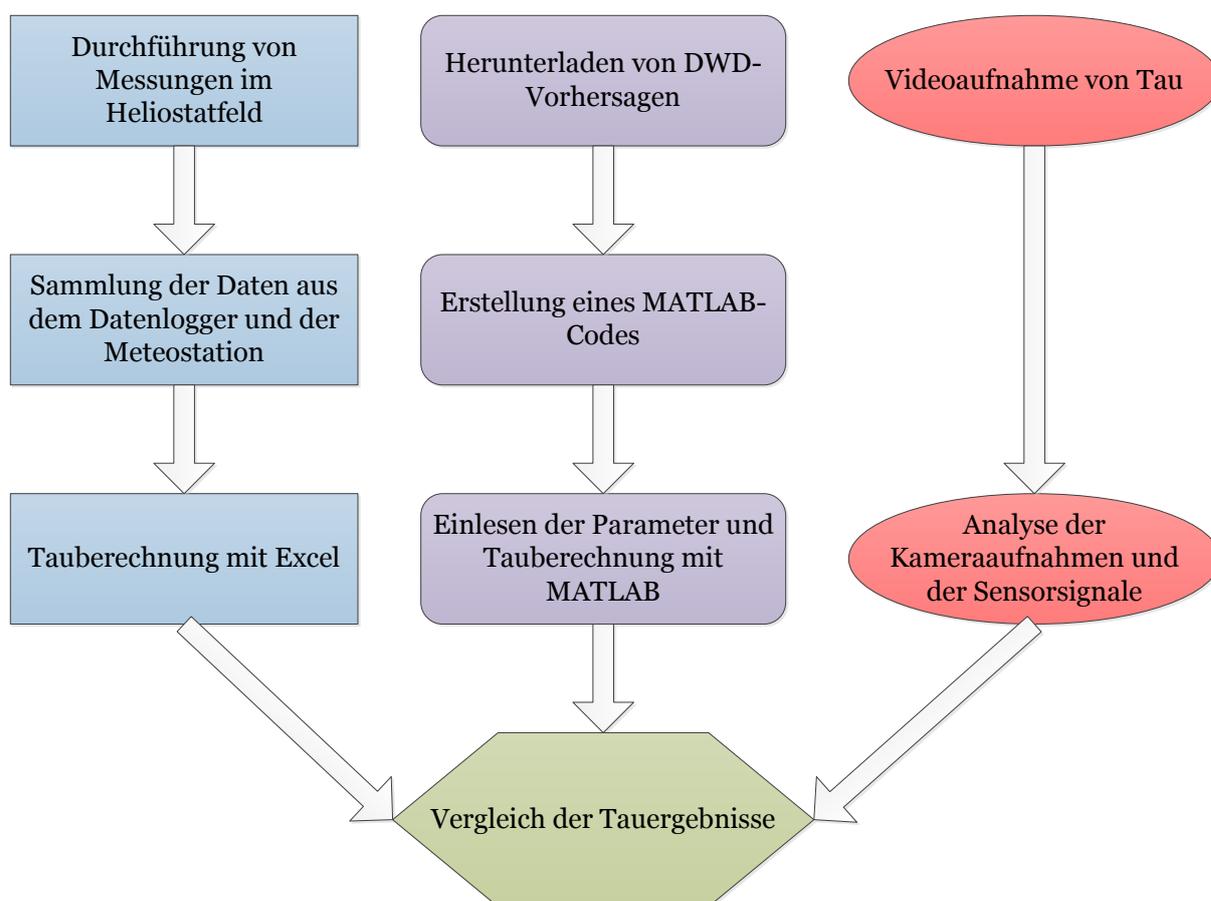
Einfluss dieser Prozesse auf die verschiedenen meteorologischen Variablen über die Zeit. Diese Gleichungssysteme werden numerisch durch Gitterpunktmodelle gelöst. Diese Gitterpunktmodelle ermöglichen es, die meteorologischen Variablen über die Zeit in einem dreidimensionalen Raum zu bestimmen. Die Genauigkeit der Vorhersagen variiert in Abhängigkeit von dem horizontalen Abstand zwischen zwei Punkten des Netzes. Je kleiner die Maschenweite ist, desto präziser ist das Modell. Zurzeit bietet der DWD die drei folgenden Modelle an: das Globalmodell ICON, das ICON-EU und das hochauflösende Regionalmodell COSMO-DE. Die zur Tauvorhersage im Heliostatenfeld verwendeten Vorhersagen stammen aus dem ICON-EU Modell. Dies verfügt über ein eingebettetes Netz mit einer Maschenweite von 6,5 km, aus dem globalen ICON-Modell. Die Berechnung mit dem ICON-EU Modell wird alle drei Stunden gestartet und stellt Vorhersagen für 30 oder 120 Stunden bereit, je nach Modellstart (29). Eine heruntergeladene Datei entspricht einer Vorhersage eines Parameters für ein bestimmtes Datum und eine bestimmte Uhrzeit. Die Dateien stehen im GRIB-Format zur Verfügung. Die Vorhersagen der Parameter, die zur Taumengenberechnung im Heliostatenfeld verwendet wurden, sind Vorhersagen, deren Modellstart am Tag der Messnacht um 24 Uhr stattgefunden ist. Dies bedeutet, dass die Wetterprognose Vorhersagen für 18 bis 32 Stunden vor dem Messzeitpunkt entspricht. Die Vorhersagen für 18 Stunden entsprechen den Vorhersagen für den Beginn der Nacht und die Vorhersagen für 32 Stunden entsprechen den Vorhersagen für das Ende der Messungen, beziehungsweise für den nächsten Morgen.

### **4.3 Beschreibung des Tauproggnose-Verfahrens**

Um das Tauvorhersagemodell von Beysens einzusetzen, muss es zuerst für den Anwendungsfall des Heliostatspiegels validiert werden. Hierfür geht es zum einen darum, das Modell anhand von Messungen, die an der Stelle des Spiegels vorgenommen werden, zu validieren. Dies bedeutet, dass bestimmt werden muss, ob die Taumenge, die das Modell anhand der im Heliostatenfeld gemessenen Parameterwerte berechnet hat, mit dem Vorhandensein von Tau auf dem Spiegel zum Zeitpunkt dieser Messungen übereinstimmt. Andererseits ist es notwendig zu wissen, ob dieses Modell für die Anwendung von meteorologischen Vorhersagen geeignet ist. Dies bedeutet, dass bestimmt werden muss, ob die Taumenge, die das Modell anhand von Vorhersagen berechnet hat, der Existenz von Tau im Feld entspricht, zu Zeitpunkten, für die die Vorhersagen erstellt werden.

Letztlich führt dies zu einem Vergleich der anhand von Messungen und Vorhersagen über einen Zeitraum berechneten Taumenge mit den Taubeobachtungen über den gleichen Zeitraum.

Dazu werden drei parallel-laufende Verfahren durchgeführt, die in der **Abbildung 14** durch ein Flussdiagramm dargestellt werden. Die in der ersten Zeile des Flussdiagramms dargestellten Aktivitäten entsprechen der ersten Phase. Das Ziel bei dieser Phase ist es, die Daten zu erfassen. Diese Phase besteht sowohl in dem Aufbau von Messgeräten und der Durchführung von Messungen als auch in dem Herunterladen von DWD-Vorhersagen (30) und schließlich in dem Aufbau von Sensoren zur Tauererkennung mitsamt der Videoaufnahme von Tau auf dem Spiegel. Die zweite Phase entspricht der Aufbereitung der Ergebnisse. Dabei geht es zum einen um die Sammlung der Daten aus der Wetterstation und aus den am Standort des Spiegels durchgeführten Messungen. Diese Daten werden in einer Excel-Datei gesammelt und eingelesen. Parallel dazu wird ein MATLAB-Code geschrieben, um das Lesen der GRIB-Dateien, die Berechnung der Taumenge und das Schreiben der Ergebnisse in eine Textdatei zu ermöglichen. Die letzte Phase besteht darin, Ergebnisse zu erhalten. Dies bedeutet, die Taumenge mit Excel zu berechnen, den MATLAB-Code zu starten und die Kameraaufnahmen sowie die Sensorsignale zur Bestimmung der Anwesenheit von Tau auszuwerten. Um schließlich das Modell von Beysens zu validieren, werden die Ergebnisse der drei Verfahren miteinander verglichen.



**Abbildung 14:** Beschreibung der Überprüfung des Tauprognose-Verfahrens

## 5 Zwischenanpassungen und Analysen

### 5.1 Sensitivitätsanalyse

Um das Verhalten des Modells von Beysens vorherzusagen und die Variation der Taumenge in Abhängigkeit der Parameterwerte zu bewerten, wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Die hier eingesetzte Methode entspricht der in der Arbeit von Schwedhelm beschriebenen Vorgehensweise für das Modell von Xiao et al. (siehe Abschnitt **3.2.1.3**). Dazu wurden Basiswerte für jeden der Parameter ausgewählt. Das Ziel dieser Sensitivitätsanalyse besteht darin, den Wert dieser Parameter zu variieren, indem der Modellansatz berücksichtigt wird. Durch die Variation der Parameterwerte soll das Verhalten der Atmosphäre reproduziert werden. Wird die **Gleichung 8** betrachtet, wird festgestellt, dass es nicht möglich ist, den Einfluss der Windgeschwindigkeit zu ermitteln, indem dieselben Basiswerte für die Lufttemperatur und die Taupunkttemperatur gewählt wurden (siehe **Abbildung 16**). Auf diese Weise wird der Ausdruck der im Abschnitt **3.1** erläuterten sensiblen Wärme  $R_{he}$  annulliert.

In **Tabelle 2** werden die Basiswerte jedes Parameters und deren Änderungsbereich aufgelistet.

Die Werte der Lufttemperatur und der Taupunkttemperatur wurden so ausgewählt, dass die Lufttemperatur größer oder gleich der Taupunkttemperatur ist. Der Grund hierfür liegt darin, dass, sobald die Lufttemperatur die Taupunkttemperatur erreicht hat, die Kühlleistung der Spiegeloberfläche nur noch dazu dient den Dampf zu flüssigem Wasser zu kondensieren und nicht mehr zum Abkühlen der Lufttemperatur.

***Tabelle 2:** Basiswert und Änderungsbereich der Parameter für die Sensitivitätsanalyse*

Parameter	Basiswert	Änderungsbereich	Prozentwert [%]
Lufttemperatur	13 °C	12 °C...18 °C	92...138
Taupunkttemperatur	12 °C	12 °C...6 °C	50...100
Windgeschwindigkeit	3 m/s	0,5 m/s...6 m/s	17...200
Bedeckungsgrad	4 Okta	0 Okta...8 Okta	0...200
Ortshöhe	0,5 km	0,01 km...1 km	2...200

In **Abbildung 15** werden die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse dargestellt. Diese zeigen, dass die Lufttemperatur, die Taupunkttemperatur und der Bedeckungsgrad die einflussreichsten Parameter sind. Dagegen weisen die Windgeschwindigkeit und die Ortshöhe keinen großen Einfluss auf die Taumenge auf. In Bezug auf die

Windgeschwindigkeit gibt es jedoch einen Schwellwert von 4 m/s, ab dem keine Taubildung mehr stattfindet.

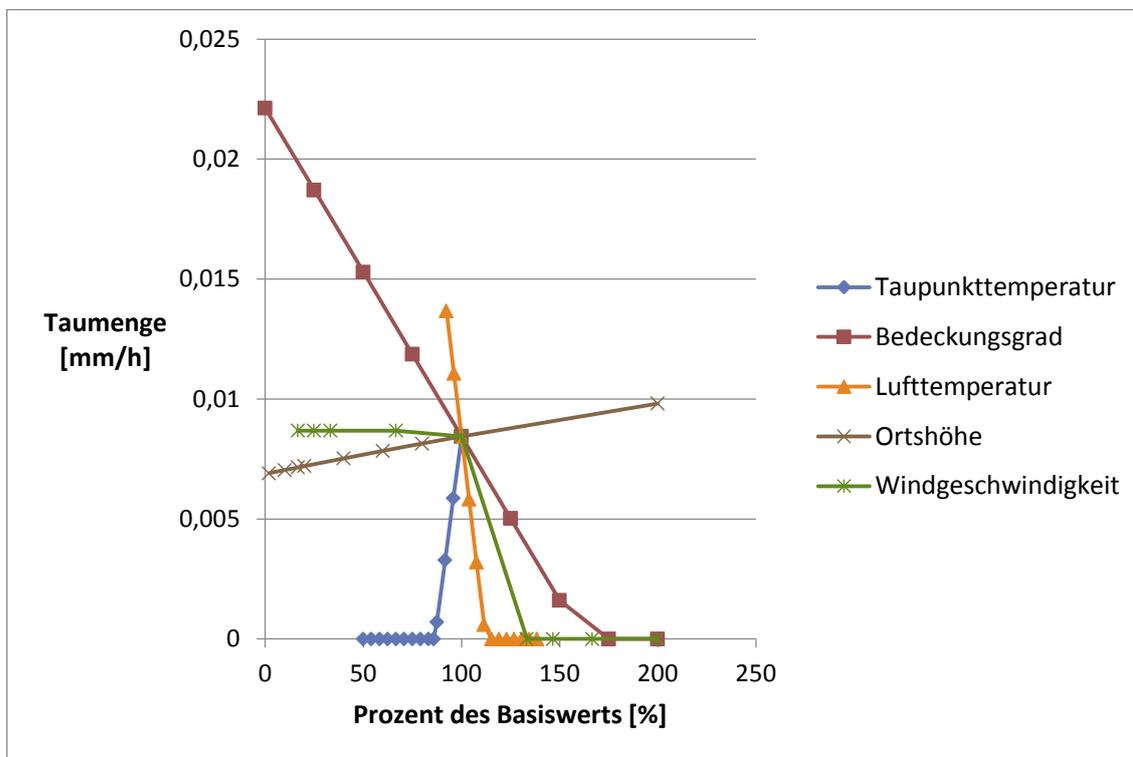


Abbildung 15: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse mit den in der Tabelle 3 aufgelisteten Basiswerten

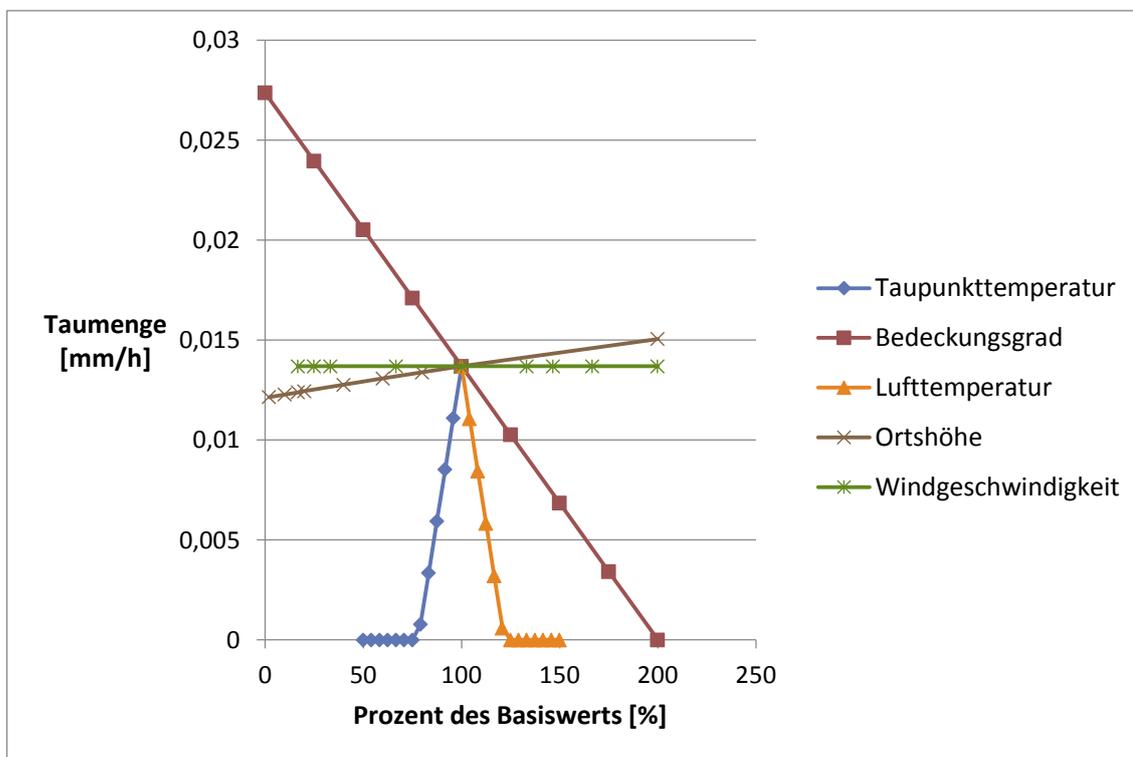


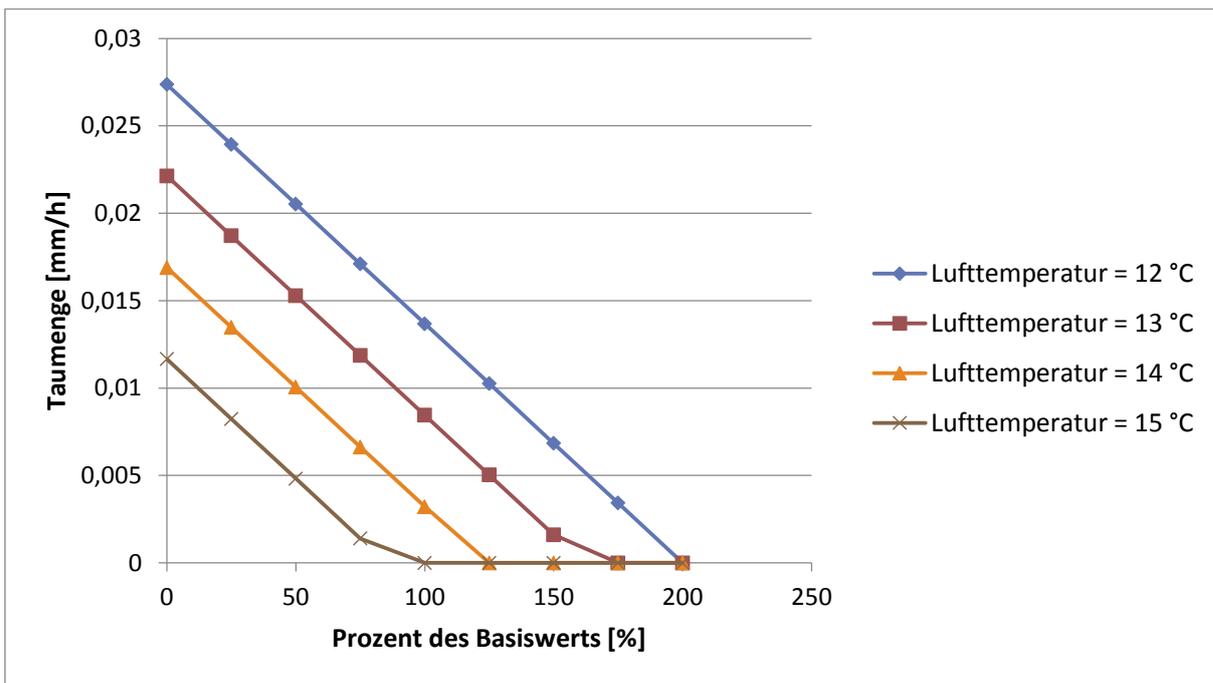
Abbildung 16: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse mit gleichen Taupunkttemperatur- und Lufttemperaturwerten

Der Verlauf der blauen Kurve in den Abbildungen (15) und (16) zeigt, dass bei einer bestimmten Lufttemperatur eine maximale Taupunkttemperatur existiert, unter der sich kein Tau mehr bildet. Bei einer Lufttemperatur von 13 °C (siehe **Abbildung 15**) liegt dieser Taupunkttemperaturwert zwischen 86 % und 88 % des Basiswertes, das heißt, zwischen 10,3 und 10,5 °C. Nach dem Mollier-h-x-Diagramm entspricht diese Taupunkttemperatur einer relativen Luftfeuchtigkeit von ungefähr 85 %.

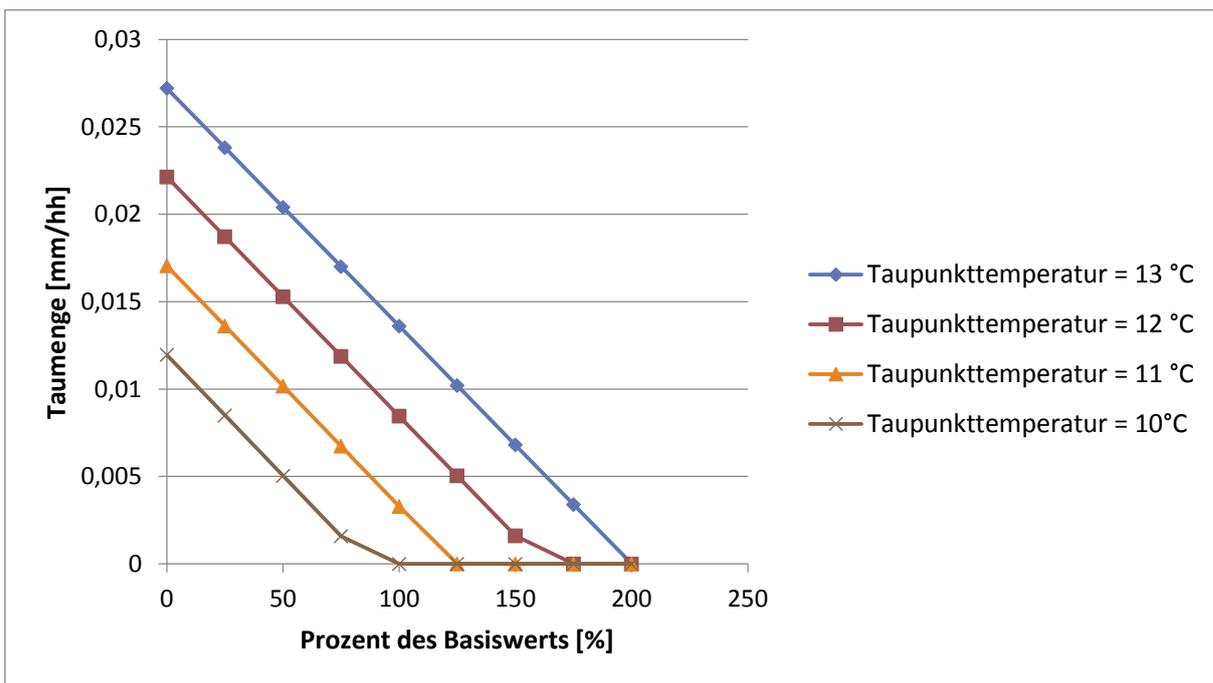
Auf ähnliche Weise gibt es bei einer bestimmten Taupunkttemperatur, mit anderen Worten, bei einer bestimmten absoluten Luftfeuchtigkeit, eine maximale Lufttemperatur, an der sich kein Tau mehr bildet.

Der Verlauf der orangen Kurve in den Abbildungen (15) und (16) zeigt, dass der Einfluss der Lufttemperaturvariation auf die Taumenge leicht größer ist als der der Variation der Taupunkttemperatur. Die Gründe hierfür liegen zum einen darin, dass es sich um zwei unterschiedliche Variationsvorgänge handelt. Es geht zuerst darum, die absolute Luftfeuchtigkeit zu variieren, indem die Werte der Taupunkttemperatur geändert werden. Andererseits handelt es sich im Fall der Lufttemperaturvariation um eine Veränderung der relativen Luftfeuchtigkeit. Nach dem Mollier-h-x-Diagramm entsprechen die zwei Vorgänge einem Wechsel der relativen Luftfeuchte-Kurve beziehungsweise einer Verschiebung auf die 100 % relative Luftfeuchte-Kurve. Der zweite Grund liegt darin, dass die Taupunkttemperatur mehrmals in die allgemeine Gleichung durch die Ausdrücke von  $R_i$  und  $R_{he}$  eingeht, im Gegensatz zu der Lufttemperatur.

Werden die Abbildungen (15) und (16) verglichen, wird festgestellt, dass die Auswahl des Basiswertes der Lufttemperatur nicht nur einen Einfluss auf die Taumengenvariation in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit hat, sondern auch auf die Taumengenvariation in Abhängigkeit des Bedeckungsgrads. Der **Abbildung 17** kann die folgende Information entnommen werden: je größer die Lufttemperatur ist, desto kleiner ist der Wert des Bedeckungsgrades, ab dem sich kein Tau mehr bildet. Wird die Taupunkttemperatur im gleichen Umfang wie die Lufttemperatur geändert, wird festgestellt, dass der Einfluss der Variation der Taupunkttemperatur auf den Bedeckungsgrad nahezu gleich dem der Lufttemperaturvariation ist. In der **Abbildung 18** wird der Einfluss der Variation der Taupunkttemperatur auf den Bedeckungsgrad dargestellt.



**Abbildung 17:** Einfluss der Lufttemperaturvariation auf den Bedeckungsgrad



**Abbildung 18:** Einfluss der Variation der Taupunkttemperatur auf den Bedeckungsgrad

## 5.2 Anpassungen der gemessenen Daten und der Vorhersagen zur Erzielung von Ergebnissen

Um vergleichbare Ergebnisse aus den drei parallelen Verfahren (Abschnitt **4.3**) erhalten zu können, sollten im ersten Schritt einige Anpassungen durchgeführt werden. Dies betrifft unter anderem die Tatsache, dass die Wetterstation des Feldes und die Wetterstation des DWD nicht immer dieselben Parameter messen. Außerdem liefern die Tauererkennungssensoren keine Taumenge, sondern Signale, die im ersten Schritt ausgewertet werden sollen.

### 5.2.1 Aufbereitung der Excel-Tabelle

Bevor die Taumenge mittels der durchgeführten Messungen und der aus der Wetterstation gesammelten Daten berechnet wird, wurden einige Anpassungen hinsichtlich der Excel-Tabelle vorgenommen.

#### 5.2.1.1 Berechnung des Bedeckungsgrades

In der allgemeinen Gleichung des Tauvorhersagemodells von Beysens, wird die Kühlleistung der Spiegeloberfläche in Abhängigkeit von dem Bedeckungsgrad ausgedrückt. Die Wetterstation des Heliostatenfeldes liefert ihrerseits Strahlungsdaten. Der Bedeckungsgrad wurde auf Basis der von Beysens formulierten Gleichung mittels der von der Wetterstation gemessenen Nettostrahlungswerte wie folgt berechnet:

$$N = \left( \frac{R_N}{(1 - \varepsilon_A)\sigma(T_d + 273,15)^4} + 1 \right) * 8 \quad (9)$$

mit dem Bedeckungsgrad  $N$ , der Nettostrahlung  $R_N$ , der Emissivität der Atmosphäre  $\varepsilon_A$  und der Taupunkttemperatur  $T_d$  in °C.

Laut Beysens (2) kann die Emissivität der Atmosphäre als Funktion der Taupunkttemperatur und der Ortshöhe beschrieben werden. Basierend auf der Regressionsanalyse von Berger et al. (31) formuliert Beysens die Emissivität der Atmosphäre folgendermaßen (siehe **Gleichung 10**):

$$\varepsilon_A = 1 + 0,204323H - 0,0238893H^2 - (18,0132 - 1,04963H + 0,21891H) * 10^{-3}T_d \quad (10)$$

Berger et al. dagegen erarbeiten nach ihrer Regressionsanalyse die **Gleichung 11**, um die Emissivität der Atmosphäre zu berechnen.

$$\begin{aligned}\varepsilon_A = & 0,75780 - 0,049487H + 0,0057086H^2 \\ & + (4,3628 - 0,25422H + 0,05302H^2) * 10^{-3}T_d\end{aligned}\tag{11}$$

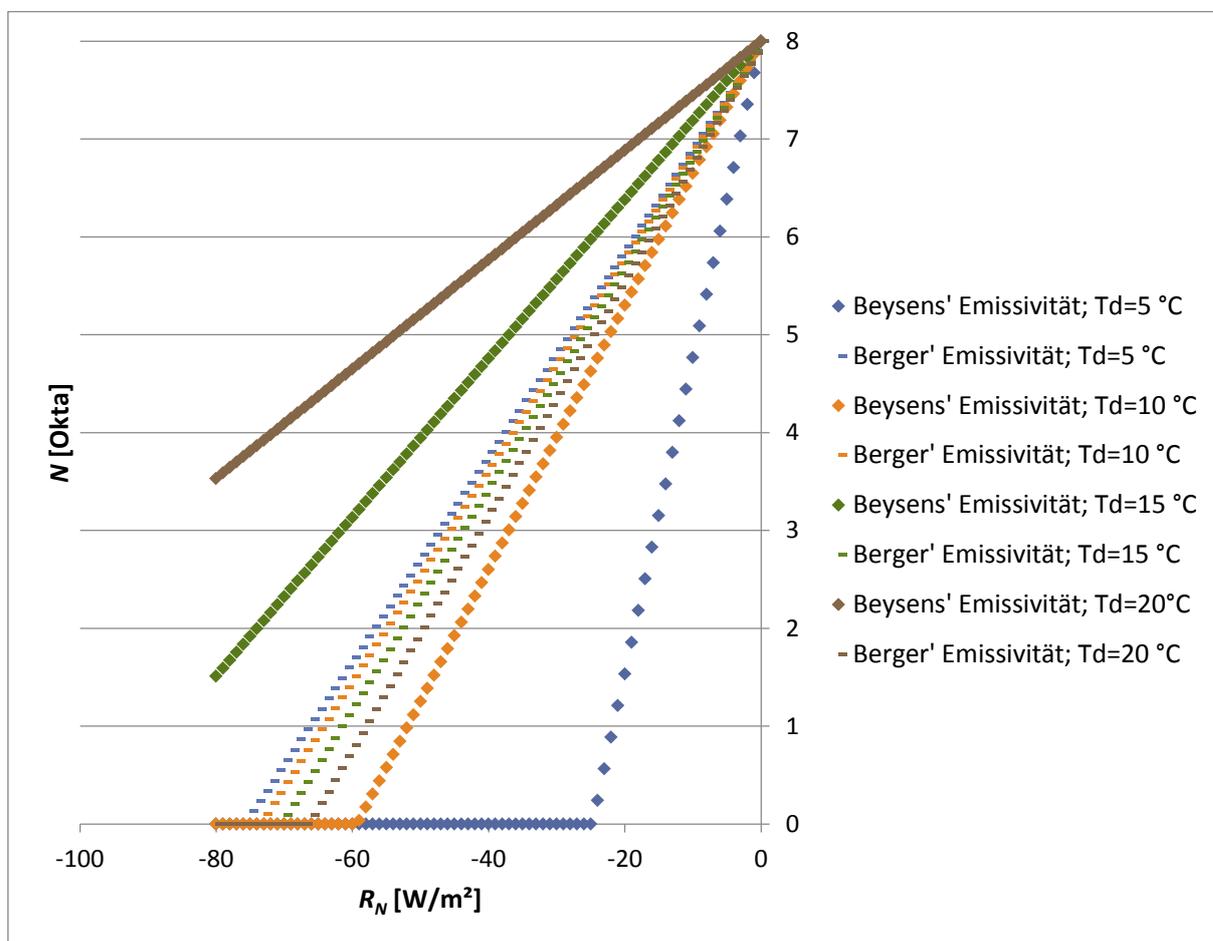
Da sich die beiden Gleichungen unterscheiden, wurden die Emissivitätswerte in dieser Arbeit in einem ersten Schritt auf der Grundlage der Gleichung von Beysens ermittelt. Dann wurden die Emissivitätswerte in einem zweiten Schritt anhand der Gleichung von Berger et al. ermittelt. Günstigere Ergebnisse des Bedeckungsgrades zur Berechnung der Taumenge wurden unter Heranziehung des Ausdrucks von Berger et al. erhalten. Aus diesem Grund wurde die **Gleichung 11** zur Ermittlung des Bedeckungsgrades in dieser Arbeit für die gesamten Nächte bevorzugt.

Je nachdem, ob die Emissivität mittels der Gleichung von Beysens oder der von Berger et al. berechnet wird, ist der Einfluss der Taupunkttemperatur beziehungsweise der absoluten Luftfeuchte auf das Verhältnis des Bedeckungsgrades in Abhängigkeit der Nettostrahlung unterschiedlich. Die atmosphärische Emissivität steigt tatsächlich mit der absoluten Feuchte an, wenn letztere mittels der Gleichung von Berger et al. ermittelt wird. Gemäß **Gleichung 9** steigt bei konstanter Nettostrahlung die Emissivität der Atmosphäre mit sinkendem Bedeckungsgrad an. Darum nimmt der durch die Emissivität von Berger et al. berechnete Bedeckungsgrad mit wachsender Taupunkttemperatur ab. Dies wird in **Abbildung 19** hervorgehoben. Im Gegensatz dazu steigt der Bedeckungsgrad mit wachsender Taupunkttemperatur an, wenn die atmosphärische Emissivität mittels der Gleichung von Beysens berechnet wird. Allerdings hat die Regressionsanalyse von Berger et al. gezeigt, dass die Emissivität mit der Taupunkttemperatur sowohl im Laufe des Tages als auch in der Nacht ansteigt.

In **Abbildung 19** kann festgestellt werden, dass die Bedeckungsgradwerte, die mit der Emissivität von Beysens für unterschiedliche Luftfeuchten berechnet wurden, zudem eine große Streuung aufweisen. Im Rahmen dieser Arbeit konnte nicht überprüft werden, ob bei gegebener Nettostrahlung die Taupunkttemperatur tatsächlich einen so großen Einfluss auf den Bedeckungsgrad hat. Jedoch konnte der folgende Schluss gezogen werden: der Einsatz der Gleichung von Berger et al. zur Berechnung des Bedeckungsgrades erlaubt einen besseren Überblick über den gesamten Leistungsbereich der Nettostrahlung, der im Feld gemessen wurde.

In **Abbildung 19** kann beispielweise festgestellt werden, dass bei einer Taupunkttemperatur von 5 °C ein Bedeckungsgrad von null Okta schon ab einer Nettostrahlung von -25 W/m<sup>2</sup> erhalten wird, wenn die **Gleichung 10** angewendet wird. Dieser Nettostrahlungswert entspricht nur ungefähr einem Drittel des maximalen Nettostrahlungswertes, der von der Wetterstation während des Messzeitraums aufgenommen wurde. Die maximalen Werte werden jedoch bei wolkenlosem Himmel erreicht. Analog dazu wird bei einer Taupunkttemperatur von 20 °C ein Bedeckungsgrad von ungefähr 3,5 Okta für einen Nettostrahlungswert von 80 W/m<sup>2</sup> gemäß der

**Gleichung 10** berechnet. Für das Heliostatenfeld würde dies bedeuten, dass maximale Nettostrahlungswerte für einen leicht wolkigen bis wolkigen Himmel erhalten werden.



**Abbildung 19:** Verhältnis des Bedeckungsgrades in Abhängigkeit der Nettostrahlung für berechnete Emissivitätswerte mittels der Gleichung von Beysens und der von Berger et al.

### 5.2.1.2 Verwendung von mittleren Werten der Windgeschwindigkeit

Eine andere Anpassung betrifft die Zeiteinheit der Messungen und der Vorhersagen. Während die Wetterstation Messungen alle Sekunden aufzeichnet, liefert der Datenlogger Messungen alle 2 Minuten. Der DWD bietet dagegen eine Vorhersage pro Stunde an. Die von der Wetterstation und dem Datenlogger gelieferten Excel-Dateien stimmen daher nicht überein. Aus diesem Grund soll eine Messung pro Stunde aus der Wetterstation in die durch den Datenlogger gelieferte Tabelle übertragen werden. Bezüglich der Windgeschwindigkeit wurden mittlere Werte von einer Stunde berechnet. Ein Windstoß könnte tatsächlich zu falschen Schlüssen führen, wenn die Messungen von jeder vollen Stunden übertragen würden. Bezüglich der Nettostrahlung wurden Messungen von vollen Stunden übertragen, da davon ausgegangen wurde, dass sich der Bedeckungsgrad nicht so schnell verändert. Der Grund, weshalb die für die anderen

Parameter verwendeten Werte den zu den vollen Stunden erfassten Werten entsprechen und nicht den durchschnittlichen Stundenwerten, erklärt sich aus dem Wunsch, die neu entstehende Taubildung pünktlich zu bestimmen.

### 5.2.2 Änderung der Koordinaten im MATLAB-Code

Der neue MATLAB-Code basiert auf dem von Schwedhelm entwickelten Code insofern, dass dieselbe MATLAB-Toolbox (nctoolbox) zum Einlesen der für die Messzeit heruntergeladenen Wetterdaten vom DWD verwendet wurde, als auch zum Einlesen der von Schwedhelm hochgeladenen Dateien. Jedoch wurde der Code angepasst. Erstens, weil die Modelle von Beysens und Xioa unterschiedlich sind, und zweitens weil der DWD den Inhalt der GRIB-Dateien verändert hat. Die vorgenommenen Änderungen betreffen einerseits die Anzahl von Vorhersagen pro Datei und andererseits die entsprechenden Nummern der Koordinaten der DWD-Messstationen. Diese Nummern beziehen sich tatsächlich nicht direkt auf die Koordinaten der Messstationen, aber sie entsprechen einer Reihenfolge.

Jede Datei gibt Auskunft über den Wert eines Wetterparameters gemäß seiner Position in einem vier dimensionalen Raum. Dies bedeutet, dass der Parameterwert über die Zeit durch seinen Breitengrad, seinen Längengrad und seine Höhe über dem Boden bestimmt wird. Die geographischen Koordinaten müssen vom Benutzer eingegeben werden, um den Parameterwert zu erhalten, der dem Vorhersageort entspricht. Die von Schwedhelm eingegebenen Werte waren 368 für den Breitengrad und 652 für den Längengrad. Diese Werte entsprachen einem Breitengrad von  $50,8750^\circ$  und einem Längengrad von  $6,3750^\circ$ . Dasselbe gilt nicht für die neuen heruntergeladenen Dateien. Dies liegt möglicherweise daran, dass der DWD Messstationen hinzugefügt hat. Würden diese Werte beibehalten, würde dies bedeuten, dass Vorhersagen aus einer Messstation mit einem Breitengrad von  $52,4375^\circ$  und einem Längengrad von  $-0,5625^\circ$  heruntergeladen werden würden. Die neuen Werte sind 344 für den Breitengrad und 478 für den Längengrad. Diese Zahlen entsprechen einem Breitengrad von  $50,9375^\circ$  und einem Längengrad von  $6,3125^\circ$ . Nach einer Prüfung in Google Maps (32) sind die Koordinaten für den Solarturm die folgenden:  $(50.913194^\circ, 6.387583^\circ)$ . In **Tabelle 3** werden die eingesetzten Koordinaten dargestellt.

**Tabelle 3:** Alte und neue in MATLAB eingegebene Koordinaten

	<b>in MATLAB eingegebene Zahlen</b>	<b>Lat Long</b>
<b>Vorherige Koordinaten</b>	$(:,1,368,652)$	$(50.8750^\circ, 6.3750^\circ)$

<b>Neue Koordinaten</b>	(:,1,344,478)	(50.9375 °, 6.3125 °)
-------------------------	---------------	-----------------------

### 5.3 Analyse der Sensorsignale

Um zu ermitteln, ob es während der Messzeit tatsächlich Tau auf dem Spiegel gab oder nicht, müssen die Sensorsignale verstanden werden. Bezüglich der zwei Sensoren, die so angeschlossen wurden, dass sie einen Feuchtefilm oder flüssiges Wasser auf dem Spiegel erkennen, lässt sich das Signal folgendermaßen interpretieren: wird ein Ausgangssignal vom Datenlogger angezeigt, bedeutet es, dass ein elektrischer Strom geleitet wird. Das heißt, dass Wasser auf den Sensoren diese elektrische Stromleitung ermöglicht hat.

Im Fall der zwei anderen Sensoren, die so angeschlossen wurden, dass sie die relative Luftfeuchte messen, muss der Wert des Signals analysiert werden. Hierbei wurde ein Problem mit der Anwendung für diese Sensoren des Steckers ZA 9003-SS5 entdeckt. Anstatt Werte wurden sporadisch Striche vom Datenlogger angezeigt. Durch einen Vergleich zwischen diesen Strichen und den durch den Fühler FHAD46C42L05 gemessenen Luftfeuchten wurde festgestellt, dass diese Striche weder einem konstanten noch einem maximalen Wert entsprechen können. Mit hoher Wahrscheinlichkeit hat der Datenlogger diese Striche angezeigt, weil der Messbereich des Steckers überschritten wurde (33). Bevor die Striche angezeigt werden, liegt die Größenordnung der durch die Sensoren gemessenen Werte um die 64600 Digit. Jedoch beträgt der maximale Wert, der durch den Stecker gemessen werden kann, 65000 Digit (entspricht einer maximalen Spannung von 1,3 V). Nach der **Gleichung 12**, die auf dem Datenblatt angegeben wird, werden die Digits in kOhm umgerechnet:

$$Rx = \frac{10}{\frac{65000}{x} - 1} \quad (12)$$

In der **Gleichung 12** entspricht der in Digits angezeigte Wert  $x$  einem Widerstandswert  $Rx$  in kOhm.

Gemäß dem Datenblatt entspricht ein unter 20 kOhm liegender Widerstandswert einer relativen Luftfeuchte niedriger als 75 %. Ein Widerstand größer als 100 kOhm entspricht einer relativen Luftfeuchte kleiner als 93 % und ein Widerstand größer als 150 kOhm einer relativen Luftfeuchte größer als 97 %. Der vom Datenlogger angezeigte maximale Wert von 64600 Digit entspricht nach diesen Angaben einer relativen Luftfeuchte größer als 97 %. Obwohl sich dieser Wert in der maximalen Luftfeuchtespanne, die gemessen werden kann befindet, kann nicht erkannt werden, ob die Luft die Taupunkttemperatur

erreicht hat. Nach dem Datenblatt werden die Widerstandswerte stabil, sobald die Luft, die in Kontakt mit den Sensoren kommt, die Taupunkttemperatur erreicht hat. Die Signale der Feuchtesensoren können daher nicht verwendet werden, um das Vorhandensein von Tau zu vorhersagen. Jedoch können diese Signale dazu dienen, das Nichtvorhandensein von Tau zu bestätigen.

Dieser begrenzte Messbereich kann auch zu Schwierigkeiten bei der Auswertung der Signale der Leitwertsensoren führen. Wenn eine ausreichend große Wassermenge auf den Leitwertsensoren liegt, kann der Messbereich auch überschritten werden. Da bei fehlendem Signal ebenfalls ein Strich angezeigt wird, kann das Vorhandensein von Tau mit dem Nichtvorhandensein von Tau verwechselt werden.

## 5.4 Analyse der Kameraaufnahmen

Anhand der Kameraaufnahmen wurde erkannt, ob Tau in der jeweils betrachteten Stunde vorhanden ist. Um die genaue Uhrzeit zu erfahren, zu der Taubildung eingesetzt hat, war es notwendig, alle minütlichen Kameraaufnahmen zu untersuchen. Dies gilt auch für die Erkennung von Regen, wenn die Leitwertsensoren flüssiges Wasser erfasst haben.

Da die Beleuchtung des Spiegels für einige Nächte unzureichend war, wurde der Schluss gezogen, dass die Lampe und die LEDs der Kamera so eingestellt werden sollten, dass sie zusammen den möglichst größten Teil des Spiegels beleuchten.

Die Abbildungen (20) und (21) stellen Kameraaufnahmen dar, für die der Tautzustand deutlich erkennbar ist. Die **Abbildung 20** zeigt eine Kameraaufnahme mit Tau, während die **Abbildung 21** eine Kameraaufnahme ohne Tau darstellt.



*Abbildung 20: Kameraaufnahme vom 06. November 2017 um 19:57 (Tau)*



**Abbildung 21:** Kameraaufnahme vom 19. Oktober 2017 um 19:01 (kein Tau). In der Abbildung ist das Spiegelbild eines vorne stehenden Heliostaten erkennbar.

## 6 Ergebnisse und Diskussion

### 6.1 Ergebnisse zur Tauprognose mit DWD-Daten und gemessenen Daten

Die Auswertung der Ergebnisse besteht in der Erstellung von zusammenfassenden Tabellen, die die Ergebnisse der drei Verfahren nebeneinander stellen. Eine solche Darstellung ermöglicht einen Vergleich der drei Verfahren. In den Tabellen werden die Ergebnisse so dargestellt, dass wenn es möglich ist, das Vorhandensein oder das Nichtvorhandensein von Tau angezeigt wird. Andernfalls wird eine andere Art von Information bereitgestellt, um das Vorhandensein oder das Nichtvorhandensein von Tau zu approximieren. Die **Tabelle 4** stellt eine Vorlage für die Tabelle dar, die für die 14 aufgenommenen Messnächte angewendet wurde. Das Vorhandensein von Tau wird in der Tabelle durch die Ziffer „1“ und das Nichtvorhandensein von Tau durch die Ziffer „0“ repräsentiert. Wenn die Ergebnisse für eine gegebene Uhrzeit nicht zur Verfügung stehen, wird die Zelle in einem Grauton dargestellt. Mittels der Feuchtesensoren konnte nicht erkannt werden, ob die die Feuchtesensoren umgebende Luft die Taupunkttemperatur überschritten hat (siehe Abschnitt 5.3). Aus diesem Grund wurden die gemäß dem Datenblatt ermittelten Luftfeuchten in die Tabelle eingetragen. Falls ein Zweifel an der Auswertung besteht, wird ein Fragezeichen in die Tabelle eingetragen. Bezüglich der Kameraaufnahmen und der Leitwertsensoren bedeutet die Ziffer „1“, dass flüssiges Wasser oder ein Betauungsfilm zum Zeitpunkt der Aufnahme beobachtbar ist, aber nicht, dass Taubildung zum Zeitpunkt der Aufnahme einsetzt.

**Tabelle 4:** Ergebnisse der drei Verfahren für die Nacht vom 18. auf den 19. Oktober

Datum	Uhrzeit	Tauberechnung		Kamera	Sensoren			
		Beysens' Modell			Feuchtesensoren		Leitwertsensoren	
		Messungen	Vorhersagen		2	3	4	5
18.10.17	18:00		0					
18.10.17	19:00	1	0	1	> 97 %	< 97%	?	?
18.10.17	20:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	?	?
18.10.17	21:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	?	?
18.10.17	22:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	?	?
18.10.17	23:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	?	?
18.10.17	00:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	?	?

19.10.17	01:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	?	?
19.10.17	02:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	?	?
19.10.17	03:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	?	?
19.10.17	04:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	?	?
19.10.17	05:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	?	?
19.10.17	06:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	?	?
19.10.17	07:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	?	?
19.10.17	08:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	?	?

Aufgrund der unzufriedenen Qualität einiger Kameraaufnahmen und der Schwierigkeiten bei der Signalauswertung, wurden für einige Nächte die Kameraaufnahmen und die zwei Sensortypen miteinander verglichen und nicht einzeln ausgewertet. Dies hat ermöglicht, in einer zweiten Phase einen Schluss über das Vorhandensein von Tau ziehen zu können. Wenn die Kameraaufnahmen deutlich verwertbar und flüssiges Wasser oder ein Betauungsfilm auf diesen festzustellen sind, ist es in Abwesenheit von Regen tatsächlich unbestreitbar, dass sich Tau vor oder zu dem Zeitpunkt der Beobachtungen gebildet hat. Dies ist zum Beispiel der Fall für die Nächte, in denen das Tauvorhandensein auf den Kameraaufnahmen deutlich erkennbar ist aber die Leitwertsensoren kein Signal geliefert haben, wie die in **Tabelle 4** dargestellte Nacht vom 18.10.2017 auf den 19.10.2017 zeigt.

Dies geschieht auch, wenn kein Tau auf den Leitwertsensoren liegt und nicht nur wenn, das Signal den Messbereich überschritten hat. Ein Grund für die Existenz von Tau auf dem Spiegel und nicht auf den Sensoren kann einerseits sein, dass sich bei niedrigen Taumengen die Sensoren nicht in derselben Weise wie der Spiegel abkühlen. Dadurch kann sich kein Tau auf den Leitwertsensoren bilden. Andererseits kann es daran liegen, dass die Sensoren schneller als der Spiegel trocknen, sodass der vor der Aufzeichnung der Messungen gebildete Tau schon verschwunden ist. Die Ergebnisse der anderen Nächte sind im Anhang **A** dargestellt.

Nachdem die Ergebnisse der Tauberechnung mittels der Messungen und der Vorhersagen mit dem tatsächlichen Vorhandensein von Tau im Feld verglichen wurden, geht es dann darum festzulegen, in welchem Umfang das Modell eine richtige Tauprognose anhand der Messungen und der Vorhersagen liefert. Dazu wird eine Tabelle erstellt, welche zusammenfasst, ob die Prognose über eine gesamte Nacht richtig oder falsch ist.

Die **Tabelle 5** wurde auf der Grundlage der 14 ersten Tabellen erstellt. Diese gibt an, ob die Tauberechnung mittels gemessener Parameter und Vorhersagen eine richtige oder falsche Prognose über die gesamte Nacht im Vergleich zum tatsächlichen Tauzustand für

die fragliche Nacht, geliefert hat. Wenn das Modell eine falsche Prognose für eine einzige Stunde der Nacht geliefert hat, wurde diese Stunde vernachlässigt, da davon ausgegangen wird, dass das Modell auf eine Parameterveränderung reagiert hat aber dass, diese Veränderung nicht angedauert hat. Die falsche Prognose in der Mitte der Nacht wurde nicht in Betracht gezogen, da die Deflektometrie-Messungen oft am Beginn der Nacht geplant werden. Zudem wurden die falschen Prognosen um 7 und 8 Uhr morgens auch vernachlässigt, da die Sonne in diesem Messzeitraum zwischen 7 und 8 Uhr aufgegangen ist. Dies ist der Fall für die Nächte vom 24. auf den 25. Oktober und vom 06. auf den 07. November, für die die falsche Prognose durch die Berechnung mittels der Messwerte um 7 und 8 Uhr nicht in **Tabelle 5** angegeben wird.

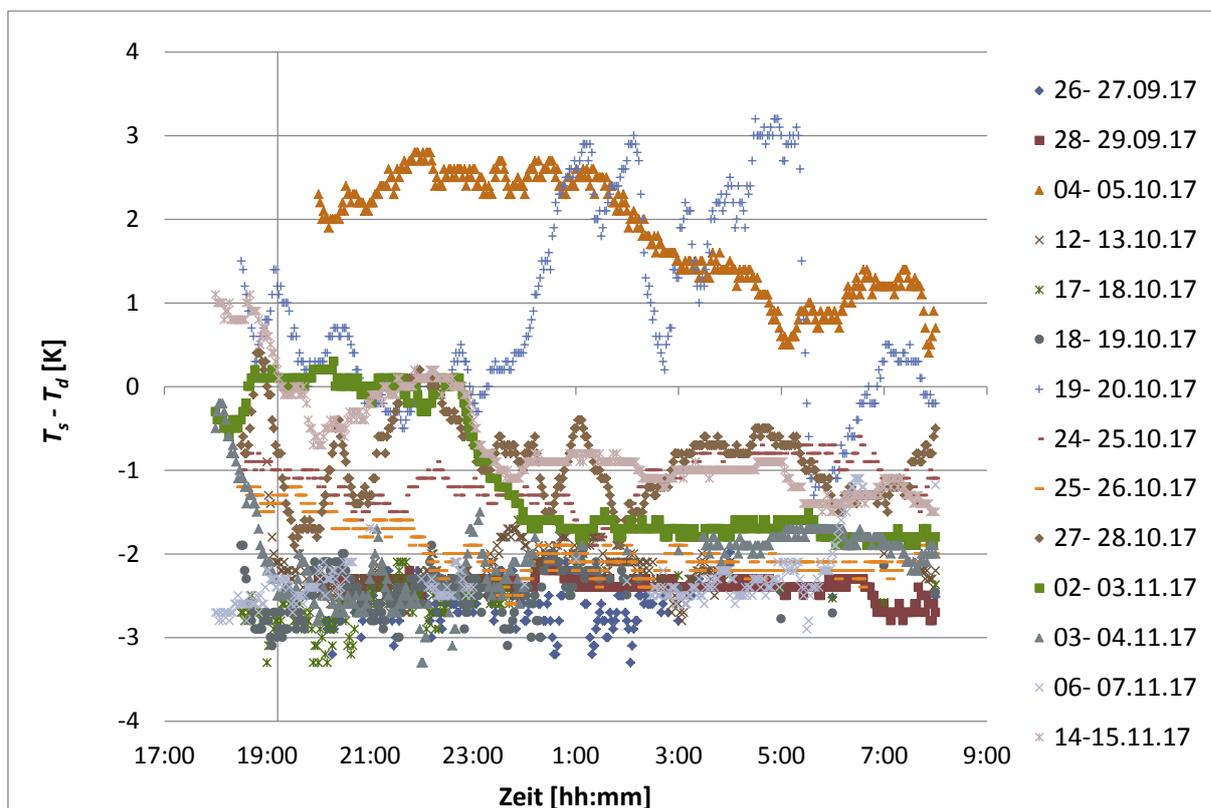
Außer dem Fall des Zeitraums zwischen 7 und 8 Uhr, wurde die falsche Prognose am frühen Morgen berücksichtigt, da sich die Stunden vor dem Sonnenaufgang zur Deflektometrie-Messung auch eignen.

**Tabelle 5:** Zusammenfassende Tabelle der Prognosequalität über eine gesamte Nacht

Datum	Überprüfung der Tauberechnung mittels Messungen	Überprüfung der Tauberechnung mittels Vorhersagen	Tau	Regen
26- 27.09.2017	✓	✓	Tau	
28- 29.09.2017	✗	✓	Tau	
04- 05.10.2017	✓	✓	kein Tau	
12- 13.10.2017	✗	✗	Tau	
17- 18.10.2017	✓	✓	Tau	
18- 19.10.2017	✓	✓	Tau	
19- 20.10.2017	✗	✗	kein Tau	Regen
24- 25.10.2017	✓	✓	kein Tau	Regen
25- 26.10.2017	✗	✗	Tau	
27- 28.10.2017	✗	✗	kein Tau	
02- 03.11.2017	✗	✓	Tau	Regen
03- 04.11.2017	✓	✓	Tau	
06- 07.11.2017	✓	✓	Tau	
14- 15.11.2017	✓	✓	kein Tau	Regen

Im ersten Schritt wurde laut **Tabelle 5** festgestellt, dass die Tauberechnung mittels der Vorhersagen mehr Nächte als die Tauberechnung mittels der Messungen richtig prognostiziert hat. Diese Feststellung erweist sich als unerwartet, da davon ausgegangen wird, dass die Messungen genauer als die Vorhersagen sind. Um zu verstehen, warum

das Modell eine Taumenge mit entgegengesetztem Vorzeichen als im Feld beobachtet ermittelt, wurden die meteorologischen Bedingungen, die das Vorzeichen ins Gegenteil verkehren können, aufgelistet. Dazu zählen laut Literatur und Sensitivitätsanalyse des Modells unter anderem eine zu hohe Windgeschwindigkeit, ein viel zu stark bedeckter Himmel und eine zu geringe relative Luftfeuchtigkeit. Außerdem kann sich kein Tau bei einer Spiegeltemperatur, die über der Taupunkttemperatur der umgebenden Luft liegt, bilden. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass bei der Ausarbeitung seines Modells Beysens den Ausdruck der Taumenge vereinfacht hat, indem er die Temperatur der Kondensationsoberfläche durch die Taupunkttemperatur ersetzt hat (Abschnitt **3.1**). Beysens geht davon aus, dass Taubildung nur ab der Taupunkttemperatur einsetzt. Jedoch besteht das Ziel von Beysens darin, eine Taumenge abschätzen zu können. Dies entspricht nicht genau dem Ziel des DLR, das Vorhandensein von Tau oder dessen Nichtvorhandensein zu bestimmen. Dies bedeutet, dass das Modell eine positive Taumenge berechnen kann, auch wenn die Spiegeltemperatur noch nicht die Taupunkttemperatur erreicht hat. Dies stellt eine Fehlerquelle des Modells für den Anwendungsfall des Heliostats dar, so dass sie als Ursache der falschen Prognose der Tauberechnung mittels der Messparameter für einige Nächte erkannt wurde. Wie **Abbildung 22** zeigt, wurde der Unterschied zwischen der gemessenen Spiegeltemperatur  $T_s$  und der gemessenen Taupunkttemperatur  $T_d$  genauer untersucht und danach mit **Tabelle 5** verglichen. Es wurde erwartet, dass für die Nächte, in denen diese Temperaturdifferenz positiv oder sich dem Wert null im negativen Bereich nähert, kein Tau aufgenommen würde.



**Abbildung 22:** Unterschied zwischen der gemessenen Spiegeltemperatur  $T_s$  und Taupunkttemperatur  $T_d$

Es ist in **Abbildung 22** festzustellen, dass sich die Temperaturdifferenz zwischen der Spiegeloberfläche und dem Taupunkt  $T_s - T_d$  während der Nächte vom 04. auf den 05. Oktober und vom 19. auf den 20. Oktober überwiegend im positiven Bereich befindet. Vom Beginn der Nächte vom 02. auf den 03. November bis ungefähr 23:30 Uhr und vom 14. auf den 15. November bis ungefähr 5 Uhr lässt sich eine Temperaturdifferenz, die zwischen 1 und -1 K liegt, erkennen. Dies gilt auch für den Beginn zwischen 18 und 20 Uhr und das Ende der Nacht vom 24. auf den 25. Oktober. Im Laufe der Nacht vom 27. auf den 28. Oktober oszilliert die Temperaturdifferenz zwischen 0 und -2 K.

Im Vergleich mit **Tabelle 5** wurde für fünf der sechs aufgelisteten Nächte im Feld gar kein Tau festgestellt. Am Anfang der Nacht vom 02. auf den 03. November wurde ebenfalls kein Tau beobachtet. Dies weist die Theorie nach, dass sich kein Tau oberhalb der Taupunkttemperatur bilden kann. Laut **Abbildung 22** kann dann auch von der Annahme ausgegangen werden, dass sich erst Tau bildet, wenn die Spiegeltemperatur die Taupunkttemperatur um 1,5 K unterschreitet. Diese Annahme gilt nur, wenn andere Parameter auch nicht die Taubildung verhindern. Eine falsche Prognose wurde dabei am 28. Oktober um 2 Uhr für eine Temperaturdifferenz geliefert, die -1,6 K beträgt. Jedoch soll überprüft werden, ob das Modell keine andere Fehlerquelle aufweist, die auch zu einer falschen Prognose führen können hätte.

Von den 5 Nächten, einschließlich des Beginns der Nacht vom 02. auf den 03. November, in denen die Spiegeltemperaturen zur Taubildung zu hoch sind, hat das Modell für 2

Nächte Tau berechnet. Das heißt, eine falsche Prognose geliefert. Die falschen Prognosen um 7 und 8 Uhr für die Nacht vom 24. auf den 25. Oktober wurden vernachlässigt. Dies bedeutet, dass, während der 4 bleibenden Nächte, für die die Prognose richtig ist, andere Parameter die Taubildung verhindert haben. Während der Nacht von 14. auf den 15. November beispielweise, wurde eine Nettostrahlung von  $0 \text{ W/m}^2$  nahezu über die ganze Nacht aufgenommen. Im Fall des Anfangs der Nacht vom 02. auf den 03. November kann davon ausgegangen werden, dass die relative Luftfeuchtigkeit unter Berücksichtigung des Bedeckungsgrads zu niedrig war (relative Luftfeuchte zwischen 85 % und 90 % zwischen 18:00 und 23:00 Uhr). Dies gilt auch für die Nacht vom 24. auf den 25. Oktober. Während der Nacht vom 04. auf den 05. Oktober wurden Windgeschwindigkeiten höher als  $4 \text{ m/s}$  und bis  $8 \text{ m/s}$  aufgenommen. Der Fall der Nacht vom 04. auf den 05. Oktober ist ein Indiz dafür, dass bei Windgeschwindigkeit größer als  $4 \text{ m/s}$  kein Tau auftritt. Dies wurde bereits in der Sensitivitätsanalyse festgestellt.

In der Praxis berücksichtigt das Modell von Beysens die Temperatur der Spiegeloberfläche nicht. Bei der Ausarbeitung seines Modells ist Beysens davon ausgegangen, dass die Temperatur der Kondensationsoberfläche nahe der Lufttemperatur liegt. Dies würde für den Fall des Heliostatenfeldes bedeuten, dass sich der Spiegel gleichzeitig und in gleichem Maße wie die Luft abkühlt. Der Spiegel kühlt sich allerdings schneller als die Luft ab. Dies bedeutet, dass die reale Kühlleistung niedriger wäre als die modellierte, da die Wärmestrahlung aus der Atmosphäre höher als die modellierte wäre. Dies würde erklären, warum das Modell Tau berechnet hat, während sich der Spiegel nicht genug abgekühlt hat.

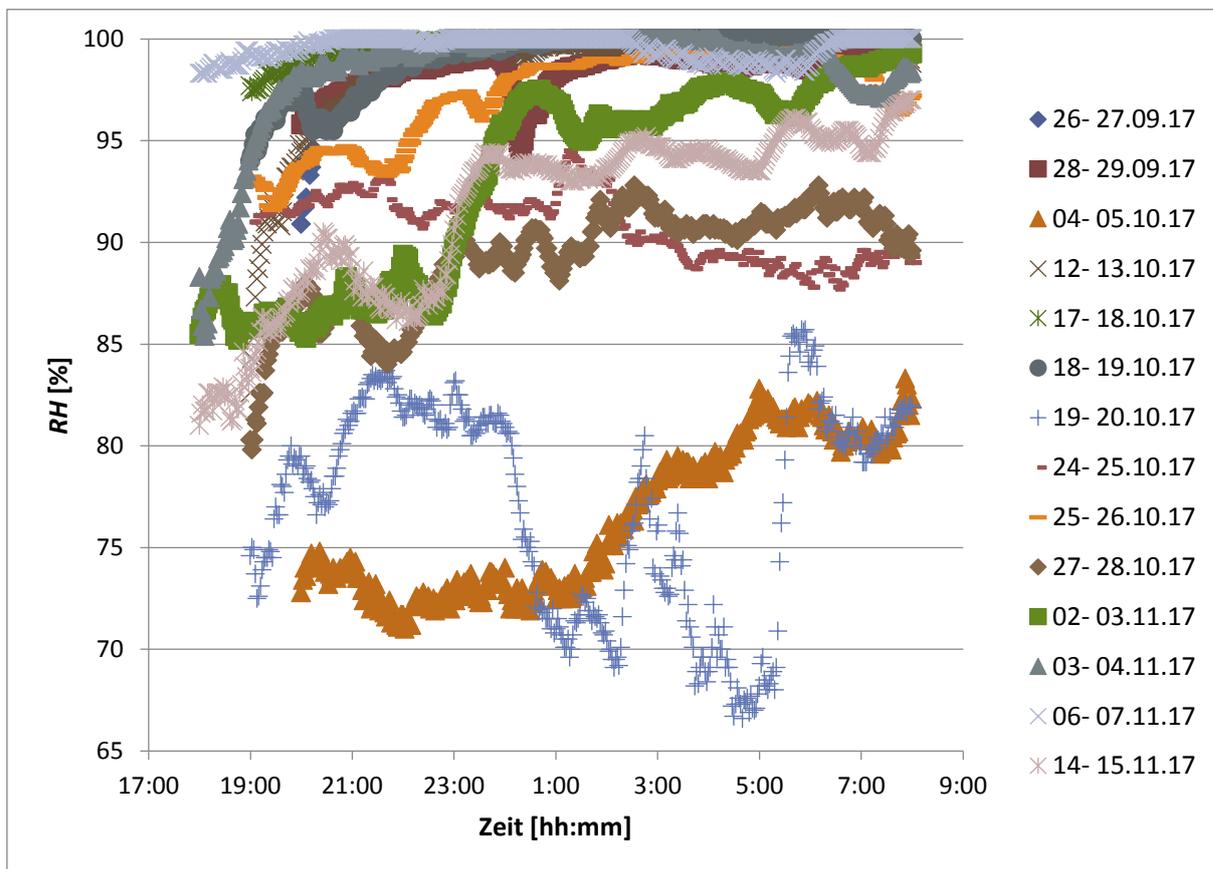
Das Modell wurde so entwickelt, dass die Kühlleistung in Abhängigkeit des Bedeckungsgrads zum Ausgleich der Temperaturdifferenz zwischen der Taupunkttemperatur und der Lufttemperatur dient. Jedoch wurde das Erreichen der Taupunkttemperatur durch die Spiegeloberfläche nicht berücksichtigt. Wenn die Kühlleistung der Spiegeloberfläche tatsächlich niedriger ist als die durch das Modell berechnete, bedeutet das, dass das Modell Tau für einen zu großen Unterschied zwischen  $T_d$  und  $T_a$  annimmt. Die Temperaturdifferenz zwischen  $T_d$  und  $T_a$  zu berechnen bedeutet nahezu die relative Luftfeuchte zu betrachten. Wird in diesem Zusammenhang das Mollier-h-x-Diagramm (**Abbildung 2**) betrachtet, kann davon ausgegangen werden, dass bei einer relativen Luftfeuchte zwischen 50 % und 100 % die Temperaturdifferenz zwischen der Taupunkt- und der Lufttemperatur für hohe Temperaturen wie für niedrige Temperaturen gleich ist.

Es wurde festgestellt, dass der Ausdruck der Kühlleistung im Modell nicht zu einer falschen Prognose über alle Messnächte führt. Dies bedeutet dass, der Ausdruck der Kühlleistung im Modell über einen bestimmten Luftfeuchtebereich nicht an die tatsächliche Kühlleistung angepasst ist. Es wurde angenommen, dass dieser

Luftfeuchtebereich die niedrigeren Luftfeuchten betrifft. Diese Annahme beruht darauf, dass bei einer gegebenen Lufttemperatur je niedriger die relative Luftfeuchte ist, desto größer wird die Temperaturdifferenz beim Übergang von einer relativen Luftfeuchte in eine 10 % größere Luftfeuchte.

Um erkennen zu können, für welche Werte der relativen Luftfeuchte das Modell Tau berechnet hat, obwohl sich kein Tau zu diesen Zeitpunkten im Feld gebildet hat, werden die relativen Luftfeuchten der Teile der Nächte untersucht, die durch das Modell falsch prognostiziert wurden und in denen, die Spiegeltemperaturen zur Taubildung zu hoch waren. Die betreffenden Teile der Nächte sind die folgenden: vom 19. auf den 20. Oktober um 21 und 22 Uhr, vom 24. auf den 25. Oktober um 7 und 8 Uhr und vom 27. auf den 28. Oktober um 19, 21, 23 und 2 Uhr.

Dazu werden in der **Abbildung 23** die gemessenen relativen Luftfeuchten *RH* für die gesamten Nächte dargestellt.



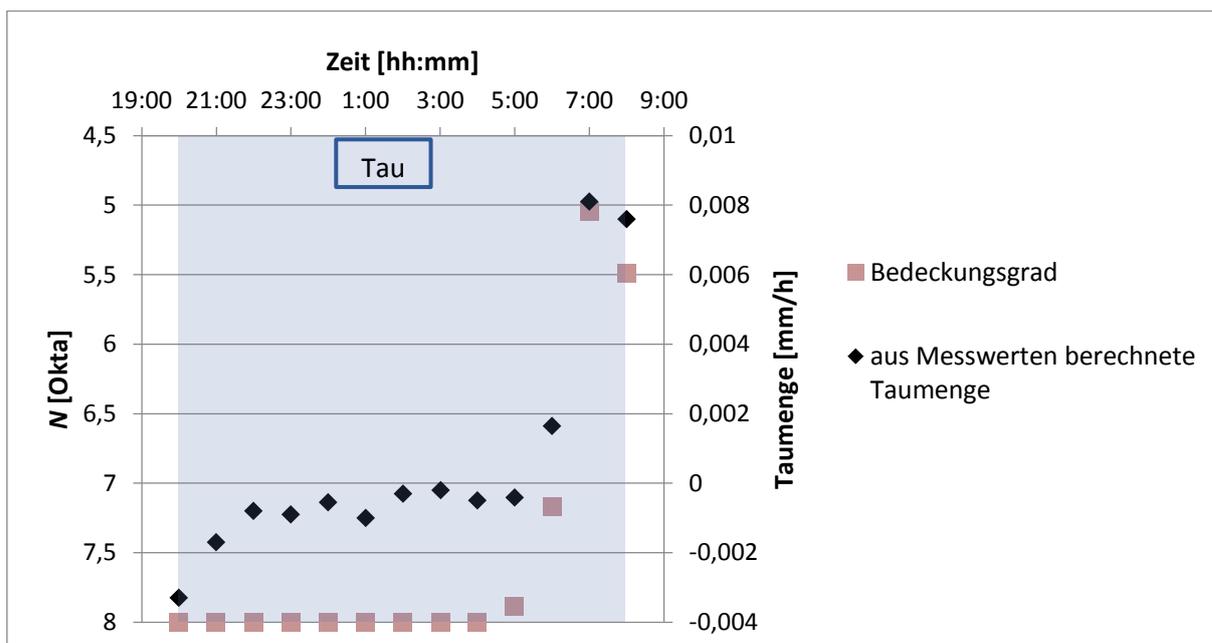
**Abbildung 23:** Gemessene relative Luftfeuchtigkeit *RH* über die 14 Messnächte

In **Abbildung 23** ist festzustellen, dass die relativen Luftfeuchten für die oben erwähnten Teile der Nächte wie folgt liegen: zwischen 81,4 und 81,6 % für die Nacht vom 19. auf den 20. Oktober, zwischen 89 und 89,6 % für die Nacht vom 24. auf den 25. Oktober und schließlich zwischen 80,3 und 91,1 % für die Nacht vom 27. auf den 28. Oktober. Insgesamt wurde für Werte von relativer Luftfeuchte zwischen 80,3 und 91,1 %

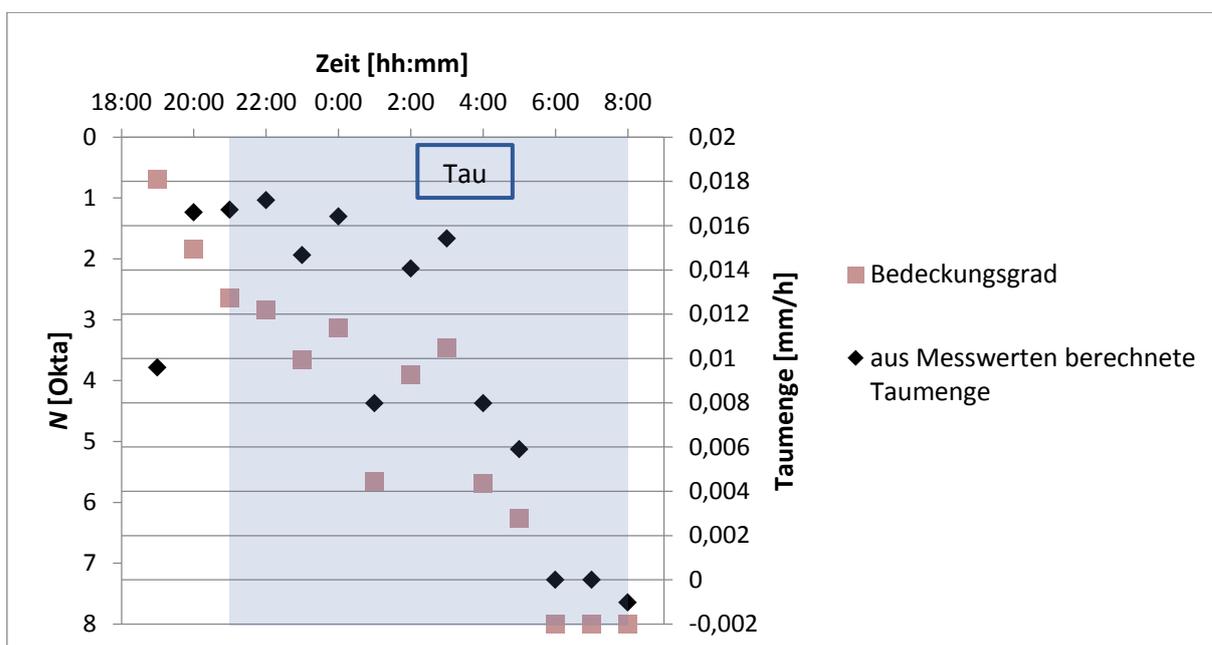
Tau falsch prognostiziert. Diese Werte von relativer Luftfeuchte gelten für unterschiedliche Werte des Bedeckungsgrads. Theoretisch und laut dem Modell gilt, dass je kleiner der Bedeckungsgrad ist, desto kleiner sind die relativen Luftfeuchten, ab denen sich kein Tau mehr bildet. Der Wert von 80,3 %, für den sich kein Tau im Feld gebildet hat und für den die Taumenge falsch prognostiziert wurde, entspricht einem Bedeckungsgrad von null Okta (gemessene Nettostrahlung gleich  $-76,7 \text{ W/m}^2$ ). Dies bedeutet, dass 80,3 % der minimalen Luftfeuchte entspricht, an dem im Anwendungsfall des Heliostat-Spiegels das Modell eine falsche Prognose liefert. Zudem bedeutet dies, dass die relative Luftfeuchte größer als 80,3 % sein muss, um Taubildung im Feld zu erreichen, auch wenn der Himmel wolkenlos ist. Unterhalb dieses Messbereichs kann davon ausgegangen werden, dass sich kein Tau bildet, da die Prognose richtig ist. Für höhere Bedeckungsgrade liegt der Wert der relativen Luftfeuchte zur Taubildung höher.

Wenn die Nächte, die richtig prognostiziert wurden, auch betrachtet werden, lässt sich allgemein durch den Vergleich zwischen der **Abbildung 23** und der Tabellen im Anhang **A** ableiten, dass sich keiner Tau im Heliostatenfeld während der 14 Messnächte bei einer relativen Luftfeuchte niedriger als 90 % gebildet hat.

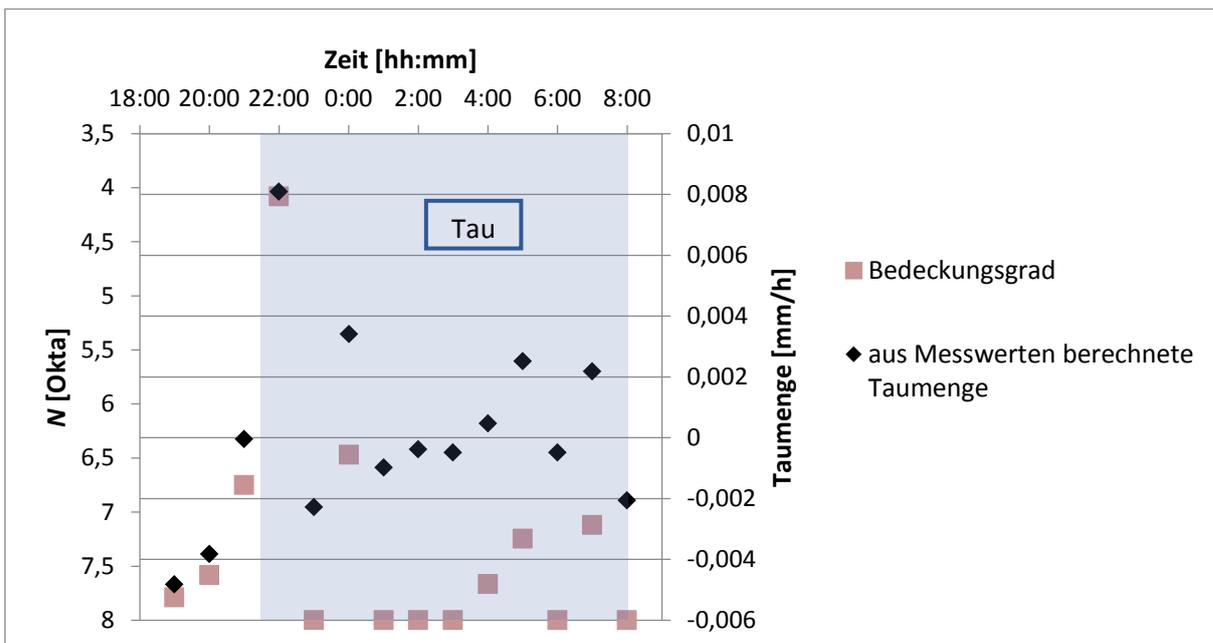
Von den durch die Tauberechnung mittels der Messwerte falsch prognostizierten 6 Nächten, gibt es jedoch nur 2 Nächte, für die die Spiegeltemperatur zur Taubildung zu hoch ist. Dies bedeutet, dass der Ausdruck in dem Modell anderer meteorologischer Parameter auch nicht vollständig an den Anwendungsfall des Heliostatenfeldes angepasst ist. Um diese Parameter zu erkennen, wurden die vier verbleibenden Nächte untersucht, und zwar die Nächte vom 28. auf den 29. September, vom 12. auf den 13. Oktober, vom 25. auf den 26. Oktober und vom 02. auf den 03. November. Die vernachlässigte Nacht vom 06. auf den 07. November wurde ebenfalls untersucht. Es fiel auf, dass bei Bedeckungsgraden  $N$  von acht Okta das Modell eine falsche Tauprognose liefert. Dies wird in den Abbildungen **(24)**, **(25)**, **(26)**, **(27)** und **(28)**, in denen die berechneten Taumengen entsprechend den Bedeckungsgradwerten  $N$  während dieser Nächte dargestellt werden, gezeigt.



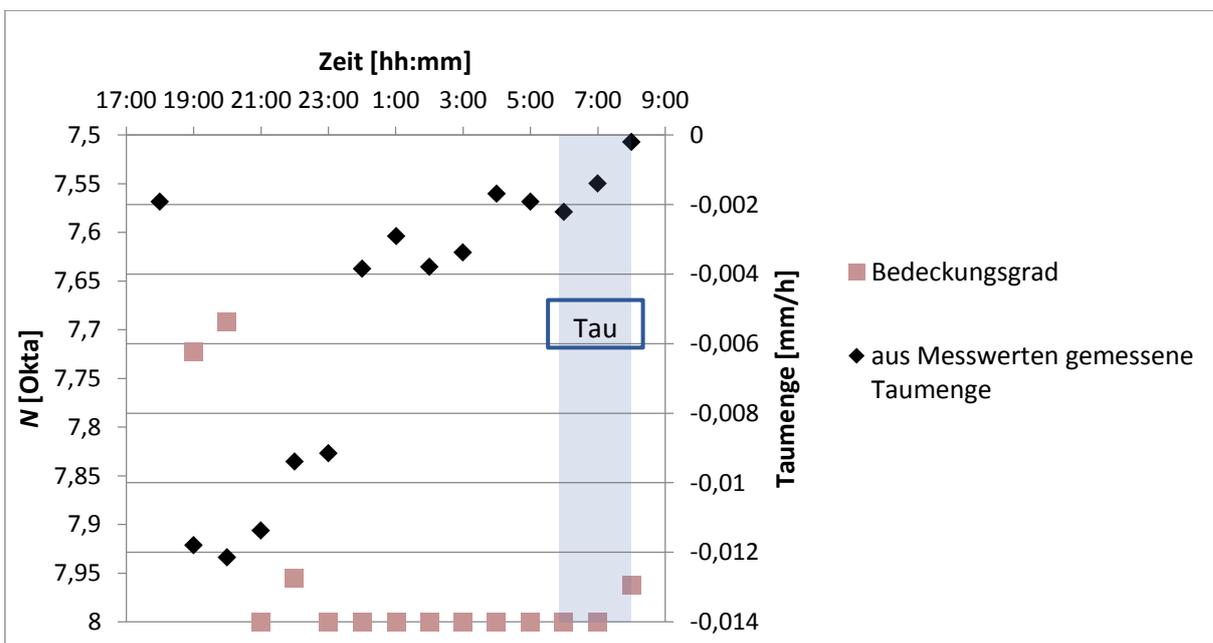
**Abbildung 24:** Berechnete Taumengen im Vergleich zu den gemessenen Bedeckungsgradwerten für die Messnacht vom 28. auf den 29. September



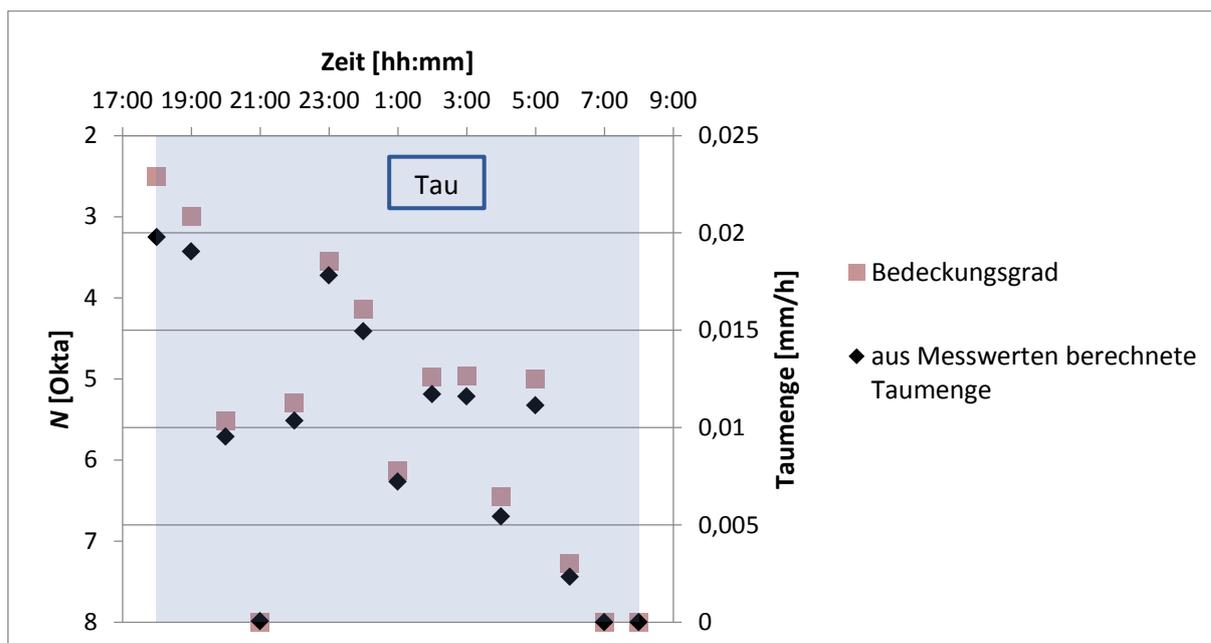
**Abbildung 25:** Berechnete Taumengen im Vergleich zu den gemessenen Bedeckungsgradwerten für die Messnacht vom 12. auf den 13. Oktober



**Abbildung 26:** Berechnete Taumengen im Vergleich zu den gemessenen Bedeckungsgradwerten für die Messnacht vom 25. auf den 26. Oktober



**Abbildung 27:** Berechnete Taumengen im Vergleich zu den gemessenen Bedeckungsgradwerten für die Messnacht vom 2. auf den 3. November



**Abbildung 28:** Berechnete Taumengen im Vergleich zu den gemessenen Bedeckungsgradwerten für die Messnacht vom 06. auf den 07. November

Dabei berechnet das Modell laut der **Gleichung 8** und der Sensitivitätsanalyse für einen Bedeckungsgrad von acht Okta keinen Tau. Laut **Gleichung 9** entspricht ein Bedeckungsgrad von acht Okta einem durch das Pyrgeometer der Wetterstation gemessenen Nettostrahlungswert von  $0 \text{ W/m}^2$ . Es wurde jedoch bei gemessenen Nettostrahlungswerten von  $0 \text{ W/m}^2$  Tau im Feld festgestellt. Anhand der Abbildungen (24) und (27) wurde erkannt, dass bei Bedeckungsgraden zwischen 7,8 und 8 Okta, die Tauberechnung auch eine falsche Prognose als Ergebnis liefert. Dies kann darauf beruhen dass, bei einer gegebenen Lufttemperatur eine sinkende relative Luftfeuchte, das heißt eine im negativen Bereich ansteigende Temperaturdifferenz zwischen der Taupunkttemperatur und der Luft, dazu führt, dass der Bedeckungsgrad, ab dem sich kein Tau mehr bildet, kleiner wird (Abschnitt 5.1). Im Allgemeinen kann also davon ausgegangen werden, dass der Bedeckungsgrad kleiner sein sollte, damit vom Modell Tau berechnet wird.

Die Tatsache, dass bei gemessenen Nettostrahlungswerten von  $0 \text{ W/m}^2$  Tau im Heliostatenfeld festgestellt wurde, kann auf verschiedene Weise interpretiert werden. Wird zuerst die Messunsicherheit des Pyrgeometers betrachtet, kann davon ausgegangen werden, dass bei gemessenen Nettostrahlungswerten von  $0 \text{ W/m}^2$  tatsächlich eine höhere austretende Strahlung in die Atmosphäre entweicht. Auf eine andere Weise kann angenommen werden, dass auch bei bedecktem Himmel immer noch eine Kühlung der Spiegeloberfläche stattfindet. Es hätte sich als sinnvoller erwiesen, mit mittleren Werten der Nettostrahlung zu arbeiten. Obwohl kein großer Unterschied zwischen zwei Messungen von  $0 \text{ W/m}^2$  in aufeinanderfolgenden Stunden auftreten kann, könnte ein Wert, der ungleich null ist, auch die Kühlung des Spiegels erklären.

Um zu ermitteln, wie viele Grade des Bedeckungsgrads  $N$  im Modell subtrahiert werden sollten, damit das Modell für höhere Werte des Bedeckungsgrades Tau berechnen kann, wurde die maximale gemessene Temperaturdifferenz zwischen dem Taupunkt und der Luft betrachtet, für die sich im Feld bei einem Bedeckungsgrad von acht Okta Tau gebildet hat.

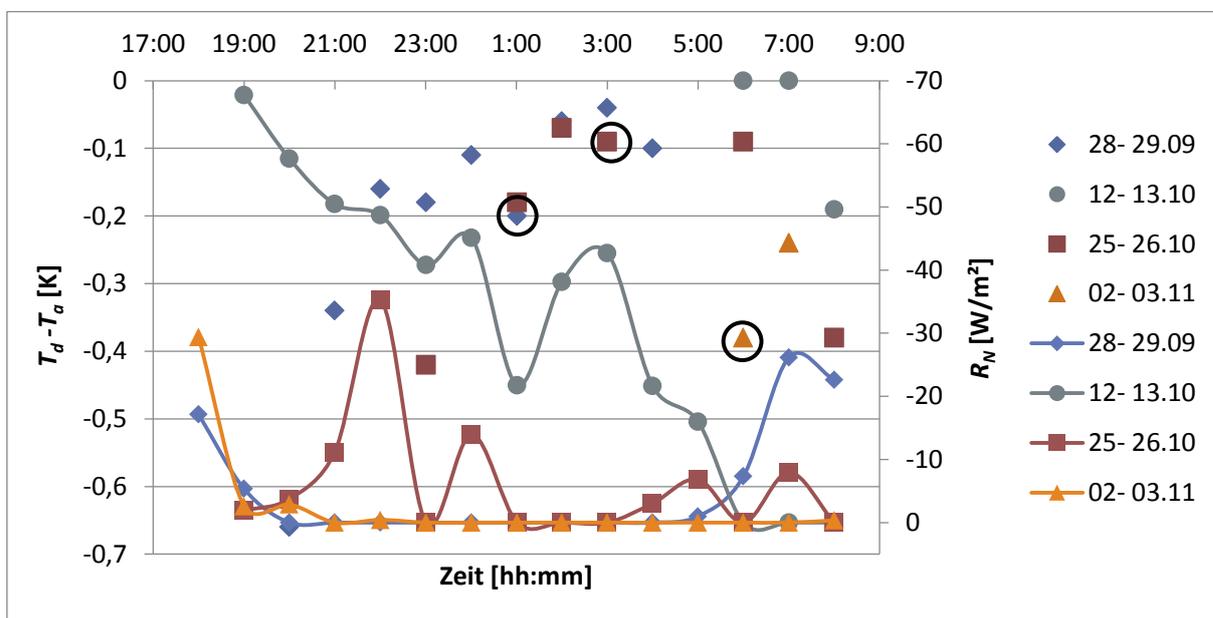
Anhand der Sensitivitätsanalyse kann im zweiten Schritt erkannt werden, wie hoch der maximale Bedeckungsgrad  $N$  ist, ab dem das Modell für diese gemessene maximale Temperaturdifferenz keinen Tau mehr berechnet. Daher kann dieser Wert des Bedeckungsgrades im letzten Schritt von acht Okta subtrahiert werden. Dieses Ergebnis kann vom Bedeckungsgrad  $N$  im Modell (**Gleichung 8**) zur Modellanpassung subtrahiert werden, da die Sensitivitätsanalyse eine lineare Abhängigkeit zwischen der Taumenge und dem Bedeckungsgrad gezeigt hat.

Um bei einem Bedeckungsgrad von acht Okta die maximale Temperaturdifferenz zwischen der Taupunkttemperatur und der Luft zu kennen, an der sich Tau noch bildet, soll betrachtet werden, dass sich kein neuer Tau unbedingt bildet, wenn Tau zu jeder vollen Stunde festgestellt wurde. Aus diesem Grund soll die Nettostrahlung  $R_N$  berücksichtigt werden, in den Stunden bevor und nachdem ein Bedeckungsgrad von acht Okta aufgenommen wurde. In der Tat kann eine große erfasste Temperaturdifferenz bei einem Bedeckungsgrad von acht Okta auch bedeuten, dass sich Tau in den Stunden vorher gebildet hat, während deren der Bedeckungsgrad kleiner war. Die **Abbildung 29** zeigt zum einen anhand von Punkten die Temperaturdifferenz zwischen der Taupunkttemperatur und der Luft  $T_d - T_a$  bei Nettostrahlungswerten von  $0 \text{ W/m}^2$ , die während der oben erwähnten Nächte gemessen wurden. Die Temperaturdifferenz  $T_d - T_a$  wird in **Abbildung 29** nur für die Zeiträume, in denen Tau im Feld festgestellt wurde, angegeben. Die Nacht vom 06. auf den 07. November wurde in **Abbildung 29** nicht dargestellt, da die Temperaturdifferenz bei erfassten Werten des Bedeckungsgrades von acht Okta  $0 \text{ K}$  beträgt.

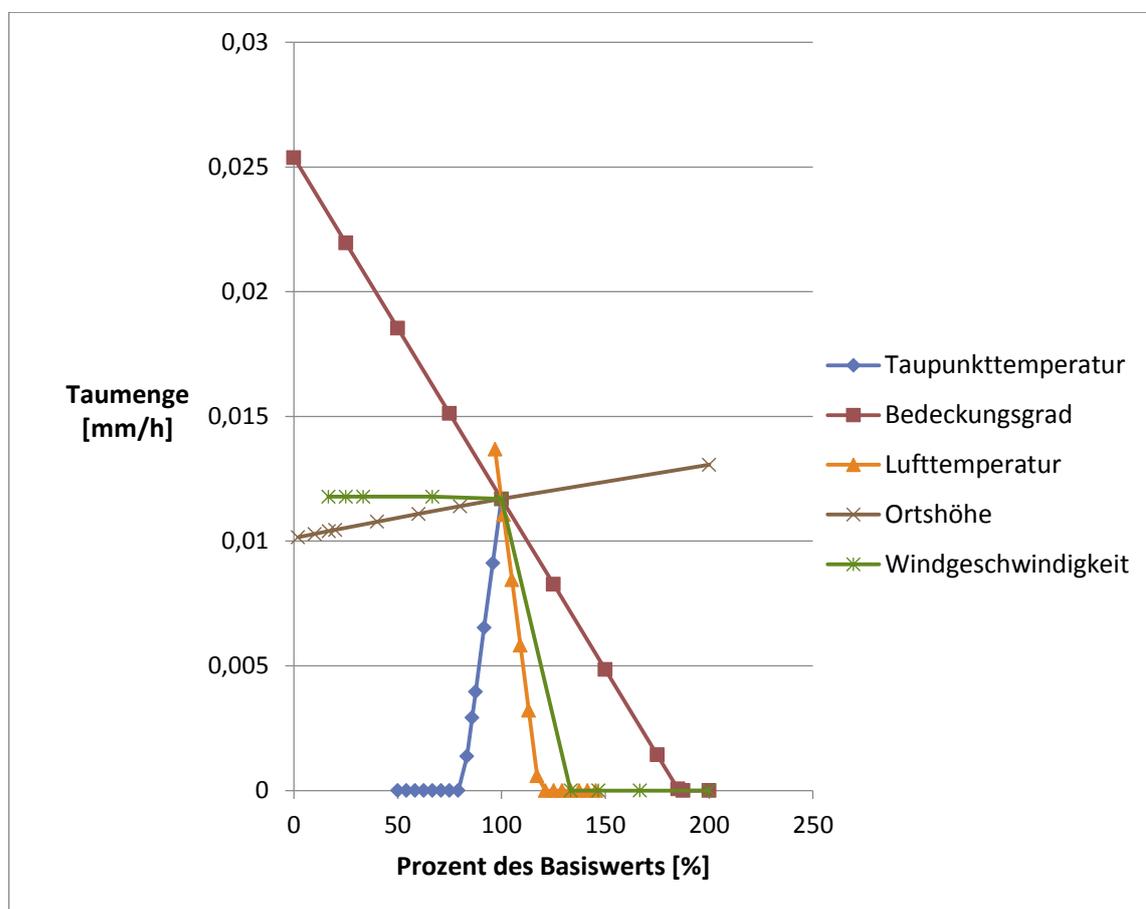
Andererseits zeigt diese Abbildung anhand von Linien die gesamten stündlichen Werte der Nettostrahlung  $R_N$ , die für diese Nächte aufgenommen wurden. Die maximalen Werte von  $T_d - T_a$ , die in Abhängigkeit von der Nettostrahlungsvariation über die Nacht ausgewählt wurden, sind in der Abbildung schwarz eingekreist. Bezüglich der Nacht vom 12. auf den 13. Oktober wurde die maximale Temperaturdifferenz von  $-0,19 \text{ K}$  um 8 Uhr nicht berücksichtigt, da die Nettostrahlung sehr hoch während der vorangegangenen Stunden war und nur ab 6 Uhr null wird. Zudem ist es auf den Kameraaufnahmen festzustellen, dass die Sonne zwischen 7 und 8 Uhr aufgegangen ist.

Die maximale verzeichnete Temperaturdifferenz  $T_d - T_a$ , die für diese vier Nächte aufgenommen wurde, beträgt  $-0,38 \text{ K}$ . Wenn der Basiswert der Lufttemperatur in der Sensitivitätsanalyse durch  $12,38 \text{ °C}$  ersetzt wird, wird nach **Abbildung 30** ein maximaler Bedeckungsgrad zwischen 7,4 und 7,5 Okta erhalten, ab dem sich kein Tau

mehr bildet. Dies bedeutet, dass ungefähr 0,5 Okta von  $N$  zur Modellanpassung im Modell subtrahiert werden sollten.



**Abbildung 29:** Maximale erfasste Temperaturdifferenz zwischen der Taupunkt- und der Lufttemperatur bei Bedeckungsgrade von acht Okta im Vergleich zu der gemessenen Nettostrahlung

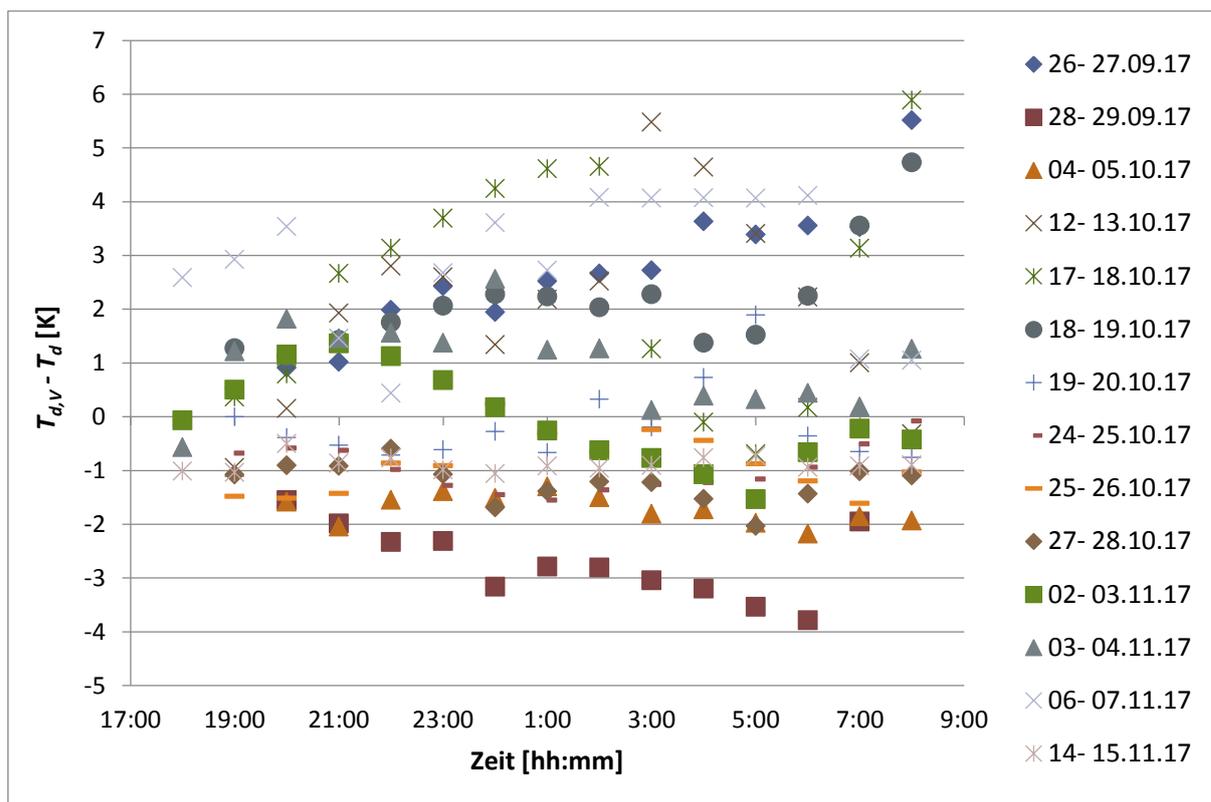


**Abbildung 30:** Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse mit einer Lufttemperatur von 12,38 °C als Basiswert

Um zu verstehen, warum die Tauberechnung mittels der Vorhersagen eine bessere Prognose über die gesamten Nächte liefert als die Tauberechnung mittels der Messwerte, sollen nun die Messwerte mit den Vorhersagen verglichen werden.

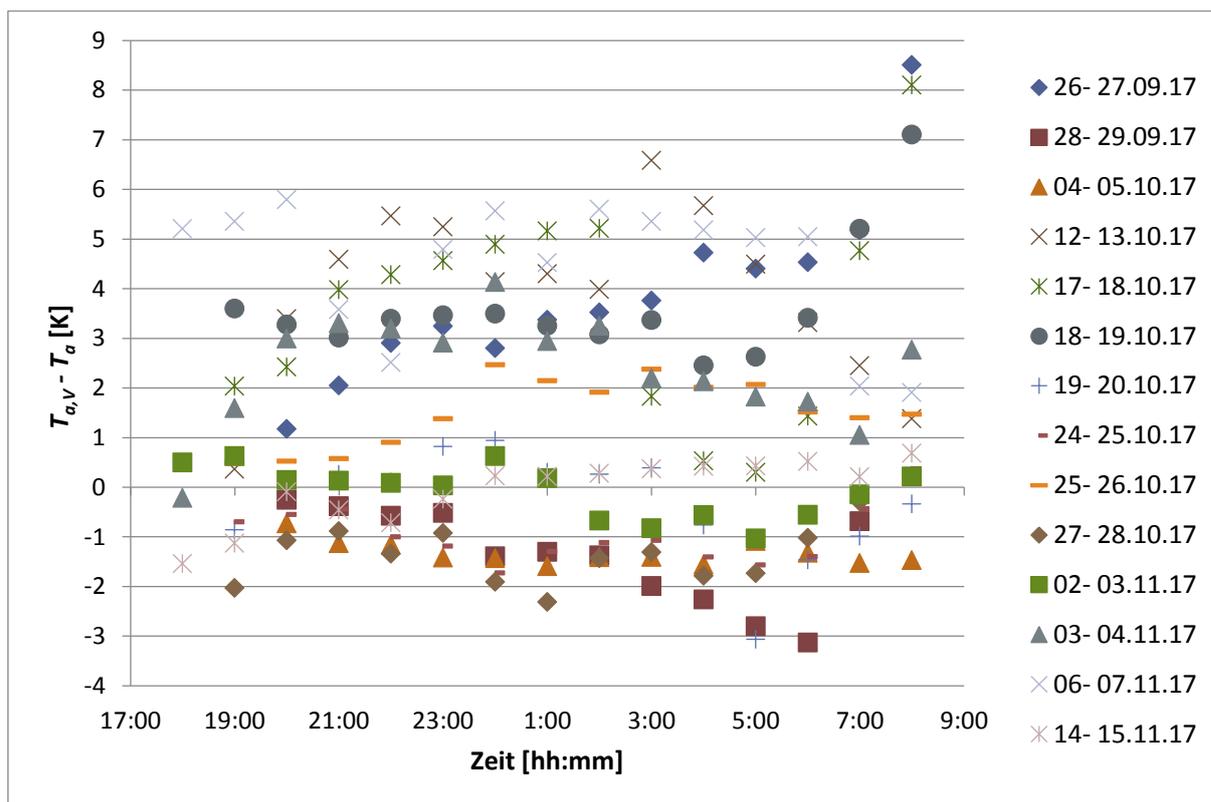
## 6.2 Vergleich vorhergesagter und gemessener Parameter

Im ersten Schritt geht es dabei um die Frage, ob die Unzulänglichkeiten des Modells von Beysens zur Tauproggnose im Heliostatenfeld Auswirkungen auch auf die Tauberechnung mittels der Vorhersagen haben. Dazu muss zunächst bekannt sein, wie sich die Vorhersagen der Taupunkttemperatur  $T_{d,v}$  und der Lufttemperatur  $T_{a,v}$  im Vergleich zu den gemessenen Taupunkt-  $T_d$  und Lufttemperaturen  $T_a$  verhalten. Dadurch lässt sich erkennen, ob bei einer gemessenen Spiegeltemperatur, die höher als die gemessene Taupunkttemperatur ist, das Modell anhand der Vorhersagen der Taupunkt- und der Lufttemperatur eine falsche Prognose auch liefert. In **Abbildung 31** wird festgestellt, dass die Vorhersagen der Taupunkttemperatur  $T_{d,v}$  für die Nächte vom 19. auf den 20. Oktober, vom 24. auf den 25. Oktober und vom 27. auf den 28. Oktober überwiegend niedriger sind als die an diesen Tagen gemessenen Taupunkttemperaturen  $T_d$ . Da die gemessenen Taupunkttemperaturen  $T_d$  für diese Nächte niedriger oder ungefähr 1 K größer als die gemessenen Spiegeltemperaturen  $T_s$  sind, konnte sich während dieser Nächte kein Tau bilden (Abschnitt **6.1**). Die Tatsache, dass die vorhergesagten Taupunkttemperaturen  $T_{d,v}$  überwiegend niedriger als die gemessenen Taupunkttemperaturen  $T_d$  für diese Nächte sind, führt dazu, dass die Temperaturdifferenz zwischen den gemessenen Spiegeltemperaturen und den vorhergesagten Taupunkttemperaturen  $T_s - T_{d,v}$  für diese Nächte entweder größer im positiven Bereich oder kleiner im negativen Bereich ist, als die Temperaturdifferenz zwischen den gemessenen Spiegeltemperaturen und den gemessenen Taupunkttemperaturen  $T_s - T_d$ . Dies bedeutet, dass eine Ursache für die falsche Prognose der Nächte vom 19. auf den 20. Oktober, vom 24. auf den 25. Oktober und vom 27. auf den 28. Oktober mittels der Vorhersagen, daran liegen kann, dass bei Spiegeltemperaturen höher als die Taupunkttemperatur das Modell Tau berechnet. Jedoch ist in **Abbildung 31** festzustellen, dass die Vorhersagen der Taupunkttemperatur  $T_{d,v}$  keine anhaltende Tendenz im Vergleich zu den gemessenen Taupunkttemperaturen  $T_d$  aufweisen. Es kann noch festgestellt werden, dass die Vorhersagen tendenziell genauer am Anfang der Nacht sind.



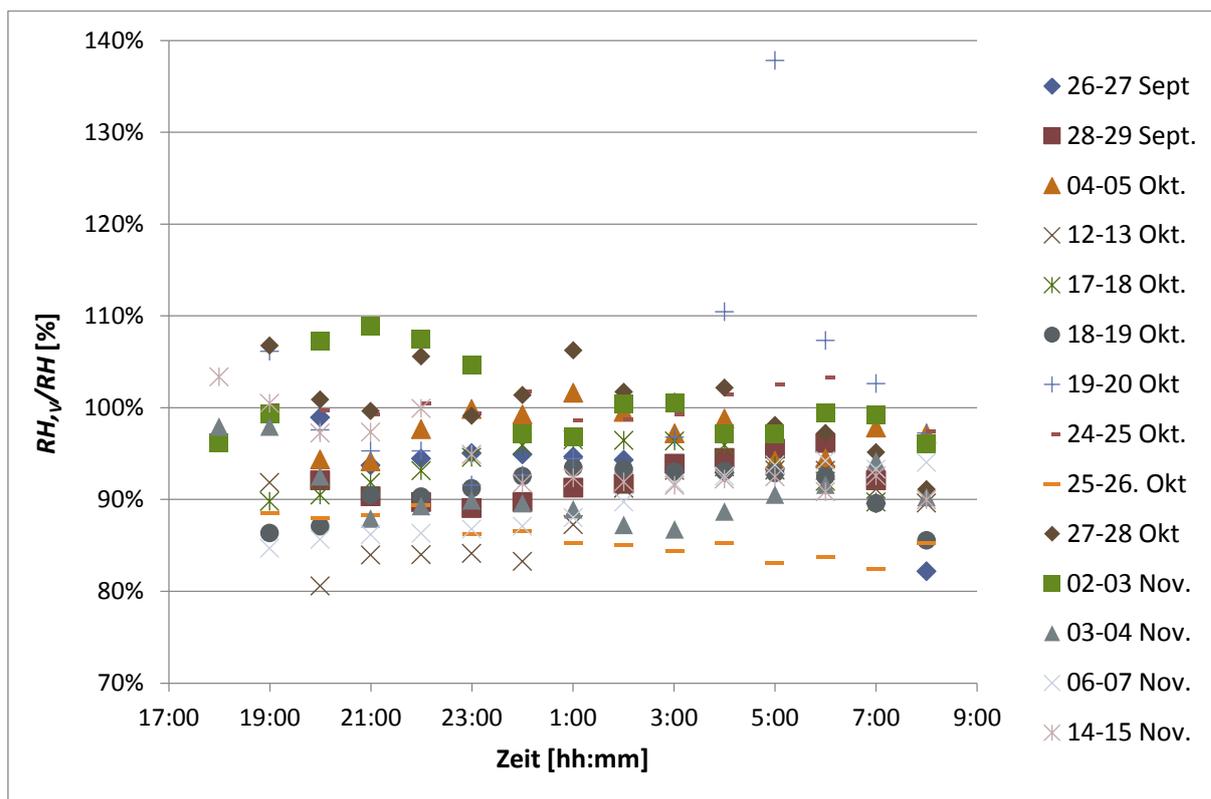
**Abbildung 31:** Temperaturdifferenz zwischen vorhergesagter und gemessener Taupunkttemperatur

Außerdem bestimmt die Taupunkttemperatur allein das Vorhandensein von Tau nicht. Dies bedeutet, dass auch wenn die vorhergesagten Taupunkttemperaturen  $T_{d,v}$  für die Nächte, für die der Spiegel zur Taubildung tatsächlich nicht genug abgekühlt wurde, größer als die Spiegeltemperaturen sein würden, könnte die falsche Prognose auf diese Weise nicht korrigiert werden. Das Vorhandensein von Tau wird gemäß dem Modell von Beysens durch die Temperaturdifferenz  $T_d - T_a$  und den Bedeckungsgrad ermittelt. In **Abbildung 32** wird dazu der Unterschied zwischen den vorhergesagten und den gemessenen Lufttemperaturen  $T_{a,v} - T_a$  dargestellt.



**Abbildung 32:** Temperaturdifferenz zwischen vorhergesagter und gemessener Lufttemperatur

In **Abbildung 32** kann festgestellt werden, dass die Vorhersagen der Lufttemperatur  $T_{a,v}$  auch eine sehr große Variation im Vergleich zu den gemessenen Lufttemperaturen  $T_a$  aufzeigen. Jedoch ist eine nahezu gleiche Tendenz mit den vorhergesagten Taupunkttemperaturen  $T_{d,v}$  im Vergleich zu den gemessenen Taupunkttemperaturen  $T_d$  zu beobachten, außer für den Anfang der Nacht vom 02. auf den 03. November und das Ende der Nacht vom 19. auf den 20. Oktober. Da die Temperaturdifferenz  $T_d - T_a$  nahezu der relativen Luftfeuchte entspricht, könnte dies bedeuten, dass sich die Abweichung zwischen den Vorhersagen und den Messungen der Taupunkt- und der Lufttemperatur durch eine korrekte vorhergesagte relative Luftfeuchte ausgleicht. Zum Beispiel weisen die Luftvorhersagen der Nacht vom 25. auf den 26. Oktober eine gleiche Tendenz auf wie die der Vorhersagen der Taupunkttemperatur, außer dass die Vorhersagen der Taupunkttemperatur kleiner als die Messungen sind und die Vorhersagen der Lufttemperatur größer als die Messungen sind. Dies bedeutet, dass die Vorhersagen der relativen Luftfeuchte für diese Nacht sehr niedrig im Vergleich zu den Messungen sein sollten. In **Abbildung 33** wird zum Vergleich das Verhältnis von vorhergesagter relativer Luftfeuchte  $RH_v$  zu der gemessenen relativen Luftfeuchte  $RH$  dargestellt.



**Abbildung 33:** Anteil der vorhergesagten relativen Luftfeuchte zu der gemessenen relativen Luftfeuchte

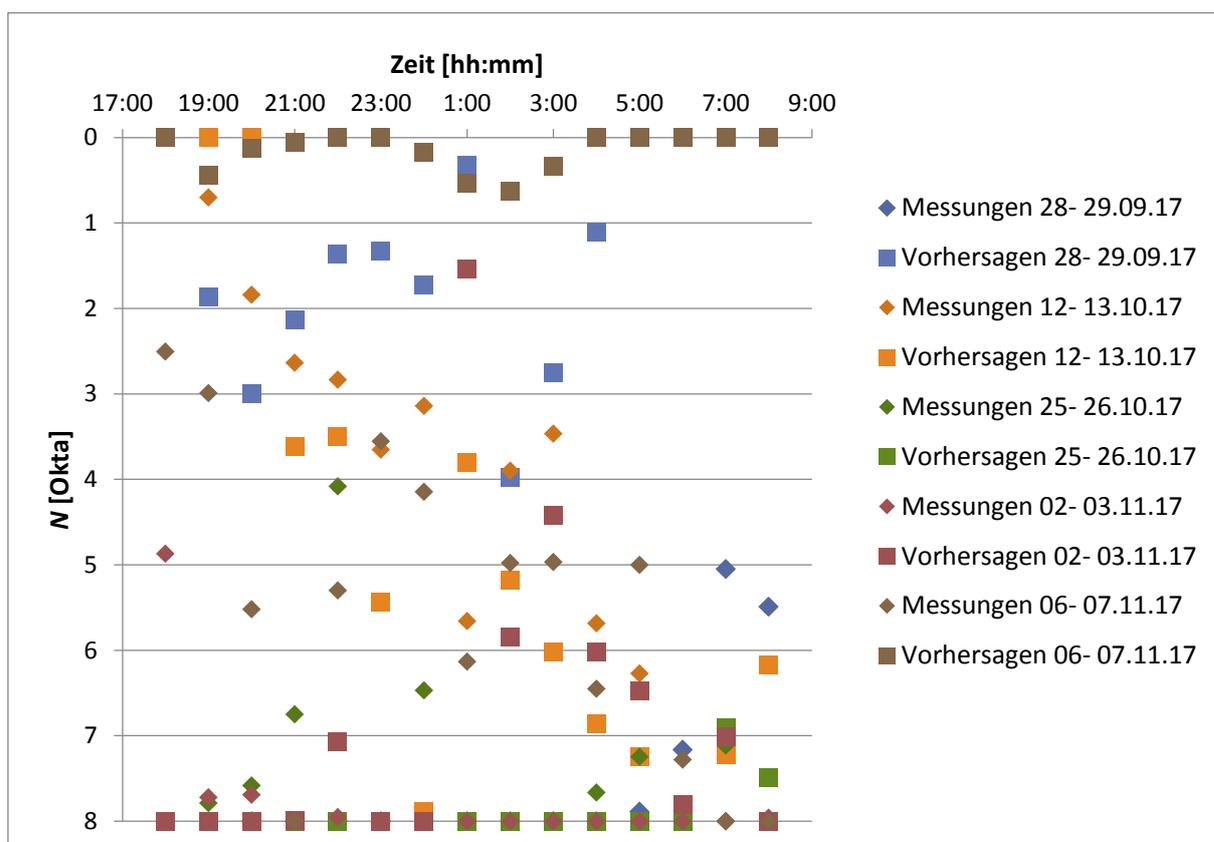
In **Abbildung 33** wird festgestellt, dass die Vorhersagen der relativen Luftfeuchte tendenziell niedriger als die Messwerte sind. Wie die unterschiedliche Tendenz zwischen den Vorhersagen der Taupunkt- und der Lufttemperatur erwarten lässt, sind zwei Ausnahmen beobachtbar: der Beginn der Nacht vom 02. auf den 03 November und das Ende der Nacht vom 19. auf den 20. Oktober. Wie die Vorhersagen der Luft- und der Taupunkttemperatur es auch vorsehen, weist die Nacht vom 25. auf den 26. Oktober 10 bis 20 % niedrigere Vorhersagen als die Messungen auf.

Da das Modell Tau für zu niedrige Luftfeuchten berechnet, erweisen sich die zu niedrigen Vorhersagen der relativen Luftfeuchte als Vorteil, wenn die Vorhersagen des Bedeckungsgrades nicht zu niedrig sind.

Jedoch konnte sich die falsche Prognose durch die Berechnung mittels der Messwerte für die Nächte vom 19. auf den 20. Oktober und vom 27. auf den 28. Oktober, für die die Spiegeltemperaturen zur Taubildung zu hoch waren durch die Vorhersagen nicht ausgleichen. Zu Zeitpunkten der falschen Prognose durch die Berechnung mittels der Vorhersagen sind die Vorhersagen für die Nacht vom 19. auf den 20. Oktober weniger als 10 % kleiner und bis 6 % grösser als die Messungen. Für die Nacht vom 27. auf den 28. Oktober sind die Vorhersagen zu Zeitpunkten der falschen Prognose weniger als 1 % kleiner und bis 6 % grösser als die Messungen.

Im zweiten Schritt wurden die Vorhersagen des Bedeckungsgrades berücksichtigt, um zu erkennen, woher die genauere Prognose anhand der Vorhersagen kommt.

Dabei kann angenommen werden, dass die Werte des Bedeckungsgrades, die weniger empfindlich auf lokale Änderungen über dem Feld sind, einen Vorteil darstellen. Dazu werden die Vorhersagen des Bedeckungsgrades für die oben erwähnten Nächte untersucht, für die die hohen gemessenen Werte des Bedeckungsgrads zu einer falschen Prognose geführt haben. In **Abbildung 34** werden die Vorhersagen durch ein Viereck und die mittels der gemessenen Nettostrahlung berechneten Werte des Bedeckungsgrads durch einen Rhombus dargestellt.



**Abbildung 34:** Gemessene und vorhergesagte Bedeckungsgradwerte  $N$  für die Nächte, in denen die gemessenen Bedeckungsgradwerte von acht Okta eine falsche Prognose geliefert haben

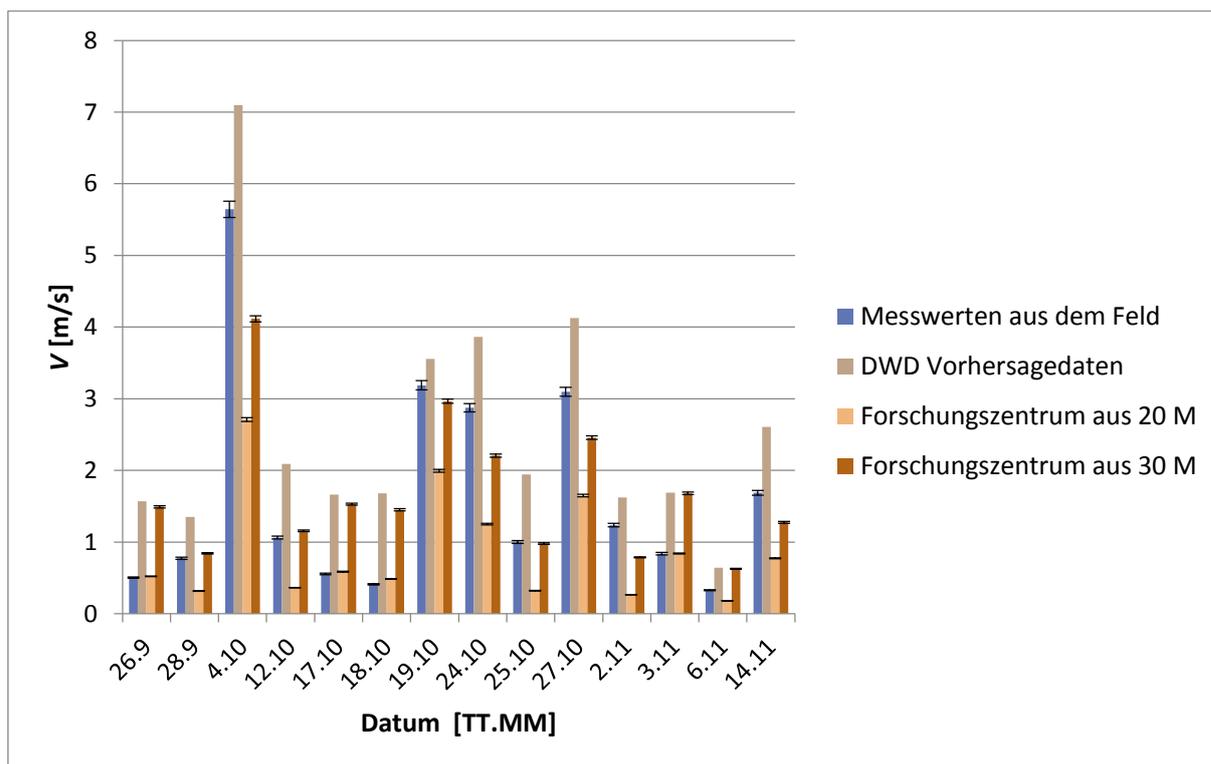
In **Abbildung 34** ist keine anhaltende Tendenz der Vorhersagen im Vergleich zu den Messungen festzustellen. Es kann nach **Abbildung 34** auch angenommen werden, dass es wahrscheinlich möglich ist, dass eine falsche Prognose anhand der Vorhersagen für die Nacht vom 25. auf den 26. Oktober, für den Beginn und das Ende der Nacht vom 02. auf den 03. November und für die Nacht vom 12. auf den 13. Oktober um 24 Uhr und 6 Uhr geliefert wurde, da sich die Vorhersagen des Bedeckungsgrads dem Wert acht Okta nähern. Wenn die Tabellen im Anhang A überprüft werden, wird festgestellt, dass eine falsche Prognose während der ganzen Nacht vom 25. auf den 26. Oktober und für den 12. auf den 13. Oktober um 21, 23 und 24 Uhr und von 4 bis 8 Uhr festgestellt wurde. Dies

bedeutet, dass ein anderer Faktor als der Bedeckungsgrad ebenfalls dazu führt, dass die Prognose für die Nacht vom 12. auf den 13. Oktober falsch ist. Während der Nacht vom 02. auf den 03. November wurde kein Tau im Feld am Beginn der Nacht aufgenommen, sondern ab ungefähr 6 Uhr. Das heißt, dass die Prognose am Anfang der Nacht richtig ist. Bezüglich dem frühen Morgen haben die hohen Vorhersagen des Bedeckungsgrads zu falscher Prognose geführt. Diese falsche Prognose konnte jedoch vernachlässigt werden. Es wurde nach den Tabellen im Anhang A festgestellt, dass die falsche Prognose für die Nächte vom 12. auf den 13. Oktober und vom 25. auf den 26. Oktober nicht dieselben Stunden für die Berechnung mittels der Messungen betrifft wie für die Berechnung mittels der Vorhersagen.

Wenn weniger falsche prognostizierte Nächte durch die Tauberechnung mittels der Vorhersagen aufgenommen werden, statt mittels der Messungen, kann zusammenfassend davon ausgegangen werden, dass es sich um einen Zufall handelt. Beispielsweise wurde zufällig eine richtige Prognose für die Nacht vom 06. auf den 07. November erhalten, da es Tau während der ganzen Nacht war und sich die Werte des Bedeckungsgrades gleichzeitig dem Wert 0 näherten. Jedoch sind die gemessenen Werte des Bedeckungsgrads für die gesamte Nacht viel höher.

Dies gilt auch für die Nächte vom 28. auf den 29. September und vom 02. auf den 03. November, für die die Vorhersagen des Bedeckungsgrades teilweise oder über die gesamte Nacht niedriger als die Messungen sind.

Schließlich wurden noch die mittleren Vorhersagen der Windgeschwindigkeit für die unterschiedlichen Nächte anhand der **Abbildung 35** untersucht.



**Abbildung 35:** Vergleich der im Heliostatenfeld und im Forschungszentrum gemessenen Windgeschwindigkeit mit den DWD Vorhersagen

In **Abbildung 35** werden dazu die mittleren Windgeschwindigkeiten dargestellt, die an der Wetterstation des Forschungszentrums von Jülich während der betreffenden Nächte gemessen wurden. Die Messungen vom Forschungszentrum wurden als Vergleich verwendet, da sich die Vorhersagen im Vergleich zu den Messungen im Feld zu hoch erwiesen haben. Die Windgeschwindigkeiten vom Forschungszentrum wurden in einer Höhe von 20 und 30 m gemessen. Der Grund hierfür liegt darin, dass die Wetterstation vom Forschungszentrum von einem Wald umringt ist. Wie es in **Abbildung 35** festgestellt werden kann, sind die Vorhersagen immer höher als das, was im Forschungszentrum und im Heliostatenfeld gemessen wurde. Die Vorhersagen der Windgeschwindigkeit erweisen sich jedoch als verlässlich für die Tauprognose im Heliostatenfeld, da die Überschreitung des Schwellwertes für die hier dargestellten Messzeiten gewahrt wird, außer für die Nacht vom 27. auf den 28. Oktober. Von den fünf Nächten, in denen kein Tau im Feld festgestellt wurde, weisen 3 Nächte eine mittlere Windgeschwindigkeit von mehr als 3 m/s auf. Während einer vierten Nacht nähert sich die Windgeschwindigkeit dem Wert 3 m/s. Es erweist sich hier als sinnvoll zu untersuchen, ob der Schwellwert, ab dem sich kein Tau mehr im Heliostatenfeld bildet, einen niedrigeren Wert darstellt, als der, der durch die Sensitivitätsanalyse hervorgehoben wurde.

### 6.3 Validierung des Modells von Beysens mit der Fehlerfortpflanzung

Das Ziel dieses Abschnittes liegt darin, zu erkennen, ob es möglich ist, mit der Messunsicherheit der Taumenge eine richtige Prognose über die gesamten Nächte zu erhalten. Diese Messunsicherheit muss auch gewährleisten, dass sich genug Nächte oder Teile von Nächten zur Deflektometrie-Messung eignen. Die Messunsicherheit der Taumenge wird mittels der Messunsicherheit aller Parameter berechnet, die in den Ausdruck der Taumenge eingehen. Die gesamte Messunsicherheitsberechnung ist die sogenannte Fehlerfortpflanzung. Die Gleichung, die im Rahmen dieser Arbeit zur Berechnung der gesamten Messunsicherheit eingesetzt wurde, ist das Gaußsche Fehlerfortpflanzungsgesetz. Die **Gleichung 13** stellt das Gaußsche Fehlerfortpflanzungsgesetz dar, das an den Ausdruck der Taumenge aus **Gleichung 8** angepasst wurde

$$\Delta h = \sqrt{\left(\left(\frac{\partial h}{\partial T_d}\right)^2 (\Delta T_d)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial T_a}\right)^2 (\Delta T_a)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial N}\right)^2 (\Delta N)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial V}\right)^2 (\Delta V)^2\right) \left(\frac{1}{12}\right)^2} \quad (13)$$

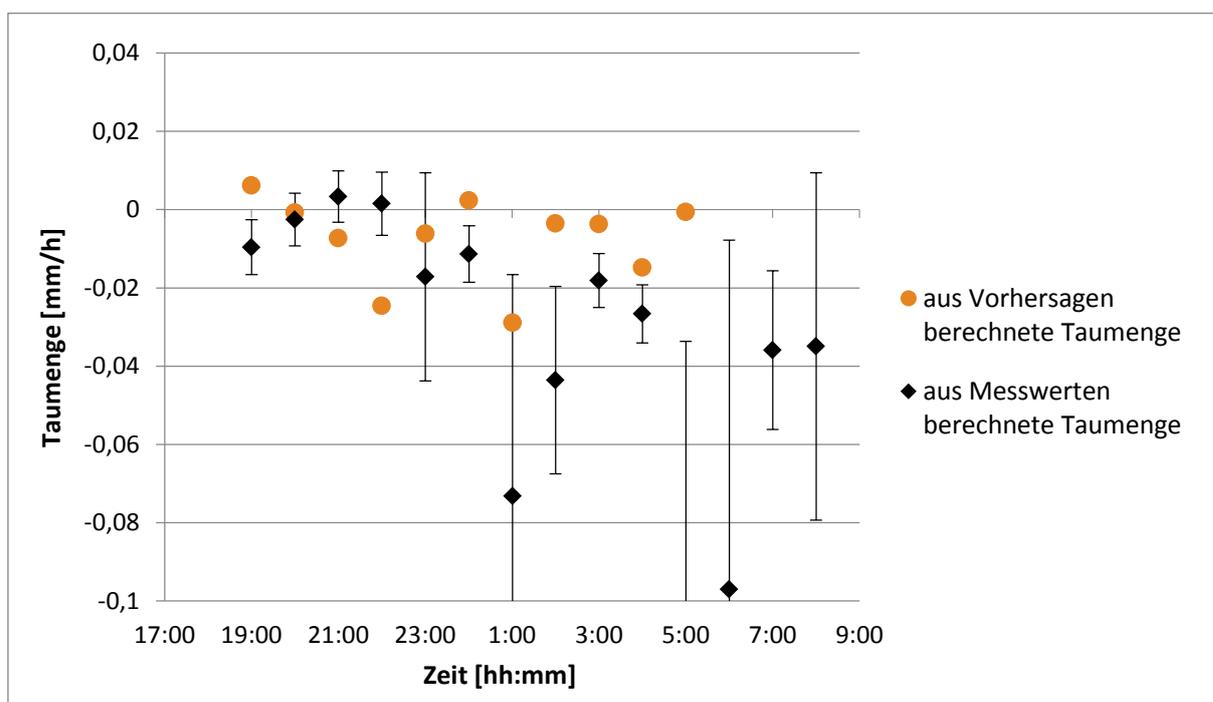
In dieser Gleichung stellen  $dh/dT_d$ ,  $dh/dT_a$ ,  $dh/dN$  und  $dh/dV$  die partiellen Ableitungen von der Taumenge nach den Parametern Taupunkttemperatur  $T_d$ , Lufttemperatur  $T_a$ , Bedeckungsgrad  $N$  und Windgeschwindigkeit  $V$ .

Die Messunsicherheit wird durch 12 geteilt, da im Rahmen dieser Arbeit die Taumenge in mm/h berechnet wurde. Durch 12 wird geteilt, da eine Nacht mit 12 Stunden betrachtet wird.

Das Gaußsche Fehlerfortpflanzungsgesetz sollte vor der endgültigen Auflösung der **Gleichung 13** zur Berechnung der Messabweichung von der Taupunkttemperatur und dem Bedeckungsgrad angewendet werden. Diese zwei Größen wurden ebenfalls nicht direkt gemessen, sondern sind abhängig von anderen Parametern. Dies gilt auch für die Messunsicherheit der Emissivität der Atmosphäre, die zur Messunsicherheitsberechnung des Bedeckungsgrades eingesetzt wurde aber die auch abhängig von der Taupunkttemperatur ist.

Die Ergebnisse der Fehlerfortpflanzung weisen über die gesamten Messnächte eine mittlere Messunsicherheit der Taumenge von ungefähr 0.006 mm/h auf. Die gesamte Messunsicherheit entspricht keiner Konstanten, da sie von den in jeder Nacht unterschiedlichen Größen der Messwerte abhängig ist. Sie weicht aber nicht viel von dem Wert 0.006 mm/h ab, außer in Fällen, in denen die Windgeschwindigkeit zu hoch wird. Wenn die Windgeschwindigkeit ungefähr den Wert von 3,5 m/s überschreitet, wird die

Messunsicherheit so groß, dass der Unsicherheitsbereich nicht belastbar betrachtet werden kann. Jedoch ist in diesem Fall aus der Sensitivitätsanalyse schon bekannt, dass sich kein Tau wegen der zu hohen Windgeschwindigkeit bilden kann. In **Abbildung 36** werden die Messunsicherheiten der Taumenge pro Stunde für die Nacht vom 19. auf den 20. Oktober durch Fehlerbalken dargestellt. Die größeren Windgeschwindigkeiten am Ende der Nacht bewirken die größeren Fehlerbalken zu dieser Zeit.



**Abbildung 36:** Aus Vorhersagen berechnete Taumengen und aus Messparametern berechnete Taumengen mitsamt ihrer Messunsicherheit für die Nacht vom 19. auf den 20. Oktober 2017

Die Messunsicherheiten der anderen Nächte sind im Anhang **B** zu finden. Aus dem Anhang wurde festgestellt, dass das Modell im Rahmen der Messunsicherheit für nahezu alle falsch prognostizierte Zeiträume eine Taumenge berechnet hat, die entweder positiv oder negativ ist. Werden die Taumengen einschließlich ihrer Messunsicherheit betrachtet, erweist sich das Modell als korrekt für die Nächte vom 28. auf den 29. September, vom 12. auf den 13. Oktober, vom 25. auf den 26. Oktober, vom 02. auf den 03. November, vom 03. auf den 04. November und vom 06. auf den 07. November. Außer am 25. Oktober um 7 Uhr und zwischen dem 27. und dem 28. Oktober um 19 und 2 Uhr sind die durch das Modell berechneten Taumengen zu hoch, damit das Modell im Rahmen der Messunsicherheit als verlässlich betrachtet werden kann. Die berechneten positiven Taumengen für den Anfang der Nacht vom 12. auf den 13. Oktober einschließlich ihrer Messunsicherheit können nicht als falsche Prognose betrachtet werden, da der Beginn der Taubildung schwer erkennbar ist. Obwohl das Modell eine gute Zuverlässigkeit aufweist, wenn die Messunsicherheit in Betracht gezogen wird, ist es

jedoch relativ schwer anhand der Messunsicherheit, Nächte zu erfassen, während deren die Deflektometrie-Messungen durchgeführt werden können. Laut der Abbildungen im Anhang **B**, würden die Deflektometrie-Messungen am Anfang der Nächte vom 02. auf den 03. November und vom 14. auf den 15. November realisierbar sein. Aus Zeitgründen konnte die gesamte Messunsicherheit der Taumengen, die mittels der DWD-Vorhersagen berechnet wurden, nicht im Rahmen dieser Arbeit berücksichtigt werden.

## 7 Fazit und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde das Tauvorhersagemodell von Beysens (2) zur Tauvorhersage im Heliostatenfeld zum Einsatz gebracht. Das Modell von Beysens wurde zur Prognose der Taumenge auf ebenen Kondensationsoberflächen ausgearbeitet und getestet. Im Vergleich zu den Modellen, die zur Tauprognose im Bereich der Landwirtschaft entwickelt wurden, entspricht das Experiment von Beysens mehr dem Anwendungsfall des Heliostatspiegels.

Ein Messstand wurde an der Stelle eines der Heliostaten aufgebaut, um die Eignung des Modells von Beysens für die Verwendung im Heliostatenfeld zu testen. Die Ergebnisse der Berechnung der Taumenge mittels gemessener Parameterwerte haben eine falsche Tauprognose für acht von 14 Messnächten geliefert. Jedoch kann diese falsche Prognose für zwei Nächte vernachlässigt werden, da sie die vollen Stunden zwischen 7 und 8 Uhr betrifft, wenn die Sonne aufgeht.

Außerdem wurden die Ursachen der falschen Prognose durch das Modell teilweise erkannt. Sobald sich die, an der Wetterstation des Heliostatenfelds, gemessene Nettostrahlung dem Wert  $0 \text{ W/m}^2$  nähert oder gleich  $0 \text{ W/m}^2$  wird, berechnet das Modell von Beysens keinen Tau. Jedoch wurde im Feld zu Zeitpunkten dieser Messungen Tau festgestellt. Keine gemessenen Ergebnisse geben an, dass dieser festgestellte Tau immer, an demselben Zeitpunkt, neu entstehender Taubildung entspricht. Jedoch konnte auf den Kameraaufnahmen beobachtet werden, dass der Tau zu diesen Zeitpunkten präsent war. In diesem Sinne konnten keine Deflektometrie-Messungen durchgeführt werden. Aus diesem Grund wurde eine Modellkorrektur vorgeschlagen, diese ermöglicht die Berechnung einer positiven Taumenge für kleinere Nettostrahlungswerte.

Zudem berechnet das Modell auch in einem zu geringen Luftfeuchtigkeitsbereich eine positive Taumenge. Die Einsetzung einer anderen Modellkorrektur bezüglich der Luftfeuchte erweist sich als sehr anspruchsvoll. Die Verkleinerung des absoluten Wertes der Temperaturdifferenz, bei welchem das Modell keinen Tau mehr berechnet, führt im Endeffekt dazu, dass der Bedeckungsgrad, an dem das Modell keinen Tau mehr berechnet, kleiner wird.

Trotz der Unstimmlichkeiten des Modells, wäre einer der Mitarbeiter, wenn man die Deflektometrie-Messungen geplant hätte, nur an zwei Nächten von den angesetzten, unnötig Vorort gewesen, da die Messungen nicht hätten durchgeführt werden können. Bezüglich der anderen falschen Prognosen hätten diese nicht zur Planung der Deflektometrie-Messungen geführt, da Zweifel wegen Tauanwesenheit bestanden.

Vorhersagen zur Berechnung der Taumenge durch das Modell von Beysens wurden ebenfalls in dieser Arbeit verwendet und getestet.

Die erzielte Prognose mittels der Vorhersagen des Deutschen Wetter Dienstes erwies sich als genau für mehrere Nächte als mittels der Messwerte. Ein Grund dafür liegt wahrscheinlich darin, dass die Vorhersagen des Bedeckungsgrades für diese Nächte überwiegend niedriger waren, als die im Heliostatenfeld festgestellten Bedeckungsgrade. Dies erweist sich jedoch als ein Zufall, da die Vorhersagen des Bedeckungsgrades überhaupt nicht mit den Messungen des Bedeckungsgrades übereinstimmen.

Obwohl die Vorhersagen der Luftfeuchte tendenziell niedriger waren als die Messungen, gab es Ausnahmen. Die Vorhersagen sind in drei Fällen höher als die Messungen. Darüber hinaus weisen die Vorhersagen überwiegend Luftfeuchten, die nur 10 % niedriger als die Messungen sind, auf. Dies hat dazu geführt, dass die Vorhersagen die Unstimmigkeiten des Modells betreffend den Luftfeuchtebereich nicht ausgleichen konnten.

Mit Bezug auf das Ziel der Tauprognose hat sich während fünf von den 14 Messnächten kein Tau gebildet. Von diesen fünf Nächten hat die Tauberechnung mittels der Vorhersagen ermöglicht, drei Nächte richtig zu prognostizieren. Von den 14 Messnächten hat die Tauprognose mittels der Vorhersagen einmal die komplette Abwesenheit von Tau während der ganzen Nacht erweist, während Tau im Feld festgestellt wurde. Dies bedeutet, dass von den fünf Nächten ohne Tau, drei für die Durchführung der Deflektometrie-Messungen hätten genutzt werden können. Jedoch wäre es einmal passiert, dass ein Mitarbeiter Vorort keine Deflektometrie-Messungen durchführen könnte.

Aus der Erfahrung der Masterarbeit von Schwedhelm (19) und basierend auf dieser Arbeit kann der Schluss gezogen werden, dass unabhängig vom ausgewählten Modell, Vorhersagen gefordert sind, die präziser auf den meteorologischen Zustand des Heliostatenfeldes angepasst werden.

Eine Alternative zur Einsetzung eines Tauvorhersagemodells wäre, die DWD-Vorhersagen der Windgeschwindigkeit zu analysieren. Die Vorhersagen der Windgeschwindigkeit haben nämlich, im Vergleich zu den Messwerten, eine anhaltende Tendenz aufgewiesen. Zudem entspricht diese Größe einem Parameter, der allein zum Nichtvorhandensein von Tau führen kann. Aus diesen Gründen können die Vorhersagen des Parameters „Windgeschwindigkeit“ ein Indikator zum Nichtvorhandensein von Tau darstellen. Aus dem Vergleich der gemessenen und der vorhergesagten Windgeschwindigkeit, wurde die Überschreitung des Schwellwertes von 4 m/s durch die DWD-Vorhersagen bewahrt. Wenn die Vorhersagen der Windgeschwindigkeit nicht zu hoch sind, sodass sie nicht das Wackeln der Spiegel zur Folge haben, kann die Analyse der Überschreitung des Schwellwertes ermöglichen, Deflektometrie-Messungen zu planen.

Eine andere Alternative wäre, die Künstlichen Neuronalen Netzwerke heranzuziehen. Diese würden ermöglichen, eine statistische Analyse zwischen den, während den Tagen

vor der Prognose gemessenen, Parameterwerten aus der Wetterstation und der Taupräsenz, am Tag der Prognose, durchzuführen. Dies verlangt aber eine große Rechenkapazität.

## 8 Literaturverzeichnis

1. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt. Der Solarturm Jülich [Internet]. o.J. [zitiert am 28.02.2018]. URL: [http://www.dlr.de/sf/Portaldata/73/Resources/dokumente/grossanlagen/juelich/Solarturm\\_Juelich.pdf](http://www.dlr.de/sf/Portaldata/73/Resources/dokumente/grossanlagen/juelich/Solarturm_Juelich.pdf).
2. Beysens D. Estimating dew yield worldwide from a few meteo data. Atmospheric Research. 2016; 167: 146-155.
3. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt. Volumetric receivers - heat conductors under extreme temperatures [Internet]. o.J. [zitiert am 28.02.2018]. URL: [http://www.dlr.de/sf/en/desktopdefault.aspx/tabid-10693/18599\\_read-43284/](http://www.dlr.de/sf/en/desktopdefault.aspx/tabid-10693/18599_read-43284/)
4. [Mollier-h-x-Diagramm][Internet].o.J. [zitiert am 28.02.2018]. URL: [https://www.doldering.ch/wissen/Lueftung-Klima/h-x-diagramm/Mollier\\_h-x-diagramm\\_Bild.htm](https://www.doldering.ch/wissen/Lueftung-Klima/h-x-diagramm/Mollier_h-x-diagramm_Bild.htm)
5. OFCM (Office of the Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research). Chapter 8: Present Weather. In: Federal Meteorological Handbook No. 1. FCM-H1-2017. Washington, D.C.: Office of the Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research; November 2017.
6. Muselli M, Beysens D, Marcillat J, Milimouk I, Nilsson T, Louche A. Dew water collector for potable water in Ajaccio (Corsica Island, France). Atmospheric Research. 2002; 64: 297-312.
7. Jansen JHAM, Stive PM, Van de Giesen NC, Tyler SW, Steele-Dunne SC, Williamson L. Estimating soil heat flux using Distributed Temperature Sensing. IAHS Publication. 2011; 343: 140-144.
8. Jin MS, Mullens T. A Study of the Relations between Soil Moisture, Soil Temperatures and Surface Temperatures Using ARM Observations and Offline CLM4 Simulations. Climate. 2014; 2: 279-295.
9. Clus O, Ouazzani J, Muselli M, Nikolayev V, Sharan G, Beysens D. Comparison of various radiation-cooled dew condensers using computational fluid dynamics. Desalination. 2009; 249: 707-712.
10. Beysens D, Milimouk I, Nikolayev V, Muselli M, Marcillat J. Using radiative cooling to condense atmospheric vapor: a study to improve water yield. Journal of Hydrology. 2003; 276: 1-11.
11. Kidron GJ. Angle and aspect dependent dew and fog precipitation in the Negev desert. Journal of Hydrology. 2005; 301: 66-74.
12. Beysens D, Pruvost V, Pruvost B. Dew observed on cars as a proxy for quantitative measurements. Journal of Arid Environments. 2016; 135: 90-95.
13. Schulz U. Kurzzeitbewitterung – Natürliche und künstliche Bewitterung in der Lackchemie (Farbe und Lack Edition). Hannover: Vincentz Network; 2007.
14. Xiao H, Meissner R, Seeger J, Rupp H, Borg H, Zhang Y. Analysis of the effect of meteorological factors on dewfall. Science of the Total Environment. 2013; 452-453: 384-393.

15. Sharan G, Clus O, Singh S, Muselli M, Beysens D. A very large dew and rain ridge collector in the Kutch area (Gujarat, India). *Journal of Hydrology*. 2011; 405: 171-181.
16. Vitro Architectural Glass Education Center. What is Low-E Glass? [Internet]. o.J. [zitiert am 28.02.2018]. URL: [http://glassed.vitroglazings.com/glasstopics/how\\_lowe\\_works.aspx](http://glassed.vitroglazings.com/glasstopics/how_lowe_works.aspx)
17. Lekouch I, Lekouch K, Muselli M, Mongruel A, Kabbachi B, Beysens D. Rooftop dew, fog and rain collection in southwest Morocco and predictive dew modeling using neural networks. *Journal of Hydrology*. 2012; 448: 60-72.
18. Incropera FP, Dewitt DP, Bergman TL, Lavine AS. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (6th ed.). Hoboken: John Wiley & Sons; 2007: 371.
19. Schwedhelm L. *Tauprognose in Heliostatfeldern, Modellierung und Validierung anhand des Solarturms Jülich* [Master Thesis]. TH Köln; 2016.
20. Santanello JA, Friedl MA. Diurnal relationships between soil heat flux and net radiation over a range of surface conditions applied to land surface energy balance modeling. JP1.5, Land Atmosphere Interactions (Joint with the 16th Conference on Hydrology and the 13th Symposium on Global Change and Climate Variations). 2002.
21. Adolf Thies GmbH & Co. KG. Windgeber „First Class“. Bedienungsanleitung 021435/01/07. 2008.
22. Kipp & Zonen B.V. Pyrgeometers for the precise measurement of far infrared radiation [Brochure]. o.J.
23. Kipp & Zonen B.V. Calibration Certificate 012809150154. 2015.
24. Ahlborn Meß- und Regelungstechnik GmbH. Digitaler Fühler für Luftfeuchte, Temperatur, Luftdruck FHAD 46-Cx. Datenblatt. 2017 [zitiert am 28.02.2018]. URL: <http://www.ahlborn.com/download/pdfs/kap08/fhad46d.pdf>.
25. TC Direct. Universal Pt-100 Thermometer. o.J. [zitiert am 28.02.2018]. URL: [https://www.tcdirect.de/Default.aspx?level=2&department\\_id=136/1](https://www.tcdirect.de/Default.aspx?level=2&department_id=136/1).
26. TC Direct. Selbstklebendes Pt-100 Thermometer - Robuste Ausführung. o.J. [zitiert am 28.02.2018]. URL: [https://www.tcdirect.de/Default.aspx?level=2&department\\_id=230/25](https://www.tcdirect.de/Default.aspx?level=2&department_id=230/25).
27. Metzger K. Temperaturmessung mit Widerstandsthermometern (z.B. Pt100) und Thermoelementen. o.J. [zitiert am 28.02.2018]. URL: [http://www.smarterworld.de/fileadmin/media/whitepaper/files/Additive\\_WP2007\\_Temperaturmessung.pdf](http://www.smarterworld.de/fileadmin/media/whitepaper/files/Additive_WP2007_Temperaturmessung.pdf).
28. B+B Thermo-Technik GmbH. Betaungssensor SHS-A5. Datenblatt 0141 0316-138. 2008.
29. Deutscher Wetterdienst. Das aktuelle numerische Wettervorhersage- und Notfallsystem. o.J. [zitiert am 28.02.2018]. URL: [https://www.dwd.de/DE/forschung/wettervorhersage/num\\_modellierung/o6\\_num\\_wettervorhersage\\_notfallsystem/num\\_wettervorhersage\\_notfallsystem\\_node.html](https://www.dwd.de/DE/forschung/wettervorhersage/num_modellierung/o6_num_wettervorhersage_notfallsystem/num_wettervorhersage_notfallsystem_node.html)
30. Deutscher Wetterdienst. Open Data Server. [zitiert am 28.02.2018]. URL: [https://opendata.dwd.de/weather/icon/eu\\_nest/grib/](https://opendata.dwd.de/weather/icon/eu_nest/grib/)

31. Berger X, Bathiebo J, Kieno F, Awanou CN. Clear sky radiation as a function of altitude. Renewable Energy. 1992; 2: 139-157.
32. Google Maps. [zitiert am 28.02.2018]. URL:  
<https://www.google.de/maps/place/50%C2%B054'47.5%22N+6%C2%B023'15.3%22E/@50.9138431,6.3848508,16.73z/data=!4m5!3m4!1soxo:oxo!8m2!3d50.913206!4d6.387571>
33. Ahlborn Meß- und Regelungstechnik GmbH. ZA 9003-SS5: Sonderstecker zur Widerstandsmessung. Datenblatt. 2015.

# A Anhang Teil 1

## A.1.1 Ergebnisse der drei Verfahren für die Nacht vom 26. auf den 27. September 2017

Datum	Uhrzeit	Tauberechnung		Kamera	Sensoren			
		Beysens' Modell			Feuchtesensoren		Leitwertsensoren	
		Messungen	Vorhersagen		2	3	4	5
26.09.17	18:00		1					
26.09.17	19:00		1					
26.09.17	20:00	1	1	1	> 97 %	< 97 %	1	1
26.09.17	21:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
26.09.17	22:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
26.09.17	23:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
27.09.17	00:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
27.09.17	01:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
27.09.17	02:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
27.09.17	03:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
27.09.17	04:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
27.09.17	05:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
27.09.17	06:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
27.09.17	07:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
27.09.17	08:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1

## A.1.2 Ergebnisse der drei Verfahren für die Nacht vom 28. auf den 29. September 2017

Datum	Uhrzeit	Tauberechnung		Kamera	Sensoren			
		Beysens' Modell			Feuchtesensoren		Leitwertsensoren	
		Messungen	Vorhersagen		2	3	4	5
28.09.17	18:00							
28.09.17	19:00		1					
28.09.17	20:00	0	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1

A Anhang Teil 1

28.09.17	21:00	0	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
28.09.17	22:00	0	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
28.09.17	23:00	0	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
29.09.17	00:00	0	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
29.09.17	01:00	0	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
29.09.17	02:00	0	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
29.09.17	03:00	0	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
29.09.17	04:00	0	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
29.09.17	05:00	0	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
29.09.17	06:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
29.09.17	07:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
29.09.17	08:00	1		1	> 97 %	> 97 %	1	1

A.1.3 Ergebnisse der drei Verfahren für die Nacht vom 04. auf den 05. Oktober 2017

Datum	Uhrzeit	Tauberechnung		Kamera	Sensoren			
		Beysens' Modell			Feuchtesensoren		Leitwertsensoren	
		Messungen	Vorhersagen		2	3	4	5
04.10.17	18:00		0					
04.10.17	19:00		0					
04.10.17	20:00	0	0		< 75 %	< 75 %	0	0
04.10.17	21:00	0	0		> 75 %	> 75 %	0	0
04.10.17	22:00	0	0		< 75 %	< 75 %	0	0
04.10.17	23:00	0	0		< 75 %	< 75 %	0	0
05.10.17	00:00	0	0		< 75 %	< 75 %	0	0
05.10.17	01:00	0	0		< 75 %	< 75 %	0	0
05.10.17	02:00	0	0		< 75 %	< 75 %	0	0
05.10.17	03:00	0	0		< 75 %	< 75 %	0	0
05.10.17	04:00	0	0		< 75 %	< 75 %	0	0
05.10.17	05:00	0	0	0	< 75 %	< 75 %	0	0
05.10.17	06:00	0	0	0	< 75 %	< 75 %	0	0

A Anhang Teil 1

<b>05.10.17</b>	07:00	0	0	0	< 75 %	< 75 %	0	0
<b>05.10.17</b>	08:00	0	0	0	< 75 %	< 75 %	0	0

A.1.4 Ergebnisse der drei Verfahren für die Nacht vom 12. auf den 13. Oktober 2017

Datum	Uhrzeit	Tauberechnung		Kamera	Sensoren			
		Beysens' Modell			Feuchtesensoren		Leitwertsensoren	
		Messungen	Vorhersagen		2	3	4	5
<b>12.10.17</b>	18:00		1					
<b>12.10.17</b>	19:00		1		< 75 %	< 75 %	?	?
<b>12.10.17</b>	20:00	1	1		> 97 %	< 97 %	?	?
<b>12.10.17</b>	21:00	1	0	1	> 97 %	> 97 %	?	?
<b>12.10.17</b>	22:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	?	?
<b>12.10.17</b>	23:00	1	0	1	> 97 %	> 97 %	?	?
<b>13.10.17</b>	00:00	1	0	1	> 97 %	> 97 %	?	?
<b>13.10.17</b>	01:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	?	?
<b>13.10.17</b>	02:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	?	?
<b>13.10.17</b>	03:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	?	?
<b>13.10.17</b>	04:00	1	0	1	> 97 %	> 97 %	?	?
<b>13.10.17</b>	05:00	1	0	1	> 97 %	> 97 %	?	?
<b>13.10.17</b>	06:00	0	0	1	> 97 %	> 97 %	?	?
<b>13.10.17</b>	07:00	0	0	1	> 97 %	> 97 %	?	?
<b>13.10.17</b>	08:00	0	0	1	> 97 %	> 97 %	?	?

A.1.5 Ergebnisse der drei Verfahren für die Nacht vom 17. auf den 18. Oktober 2017

Datum	Uhrzeit	Tauberechnung		Kamera	Sensoren			
		Beysens' Modell			Feuchtesensoren		Leitwertsensoren	
		Messungen	Vorhersagen		2	3	4	5
<b>17.10.17</b>	18:00		1					
<b>17.10.17</b>	19:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1

A Anhang Teil 1

17.10.17	20:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
17.10.17	21:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
17.10.17	22:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
17.10.17	23:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
18.10.17	00:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
18.10.17	01:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
18.10.17	02:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
18.10.17	03:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
18.10.17	04:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
18.10.17	05:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
18.10.17	06:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
18.10.17	07:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
18.10.17	08:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1

A.1.6 Ergebnisse der drei Verfahren für die Nacht vom 18. auf den 19. Oktober 2017

Datum	Uhrzeit	Tauberechnung		Kamera	Sensoren			
		Beysens' Modell			Feuchtesensoren		Leitwertsensoren	
		Messungen	Vorhersagen		2	3	4	5
18.10.17	18:00		0					
18.10.17	19:00	1	0	1	> 97 %	< 97 %	?	?
18.10.17	20:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	?	?
18.10.17	21:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	?	?
18.10.17	22:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	?	?
18.10.17	23:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	?	?
19.10.17	00:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	?	?
19.10.17	01:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	?	?
19.10.17	02:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	?	?
19.10.17	03:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	?	?
19.10.17	04:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	?	?
19.10.17	05:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	?	?

A Anhang Teil 1

19.10.17	06:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	?	?
19.10.17	07:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	?	?
18.10.17	08:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	?	?

A.1.7 Ergebnisse der drei Verfahren für die Nacht vom 19. auf den 20. Oktober 2017

		Tauberechnung		Kamera	Sensoren			
		Beysens' Modell			Feuchtesensoren		Leitwertsensoren	
Datum	Uhrzeit	Messungen	Vorhersagen		2	3	4	5
19.10.17	18:00		1					
19.10.17	19:00	0	1	0	< 75 %	< 75 %	0	0
19.10.17	20:00	0	0	0	< 75 %	< 75 %	0	0
19.10.17	21:00	1	0	0	< 75 %	< 75 %	0	0
19.10.17	22:00	1	0	0	< 93 %	< 75 %	0	0
19.10.17	23:00	0	0	0	< 75 %	< 75 %	0	0
20.10.17	00:00	0	1	0	< 75 %	< 75 %	0	0
20.10.17	01:00	0	0	0	< 75 %	< 75 %	0	0
20.10.17	02:00	0	0	0	< 75 %	< 75 %	0	0
20.10.17	03:00	0	0	0	< 93 %	< 75 %	0	0
20.10.17	04:00	0	0	0	< 75 %	< 75 %	0	0
20.10.17	05:00	0	0	0	< 75 %	< 75 %	1	1
20.10.17	06:00	0	0	0	> 97 %	< 97 %	0	0
20.10.17	07:00	0	0	0	< 93 %	< 75 %	0	0
20.10.17	08:00	0	0	0	< 93 %	< 75 %	0	0

A.1.8 Ergebnisse der drei Verfahren für die Nacht vom 24. auf den 25. Oktober 2017

		Tauberechnung		Kamera	Sensoren			
		Beysens' Modell			Feuchtesensoren		Leitwertsensoren	
Datum	Uhrzeit	Messungen	Vorhersagen		2	3	4	5
24.10.17	18:00		0	0				

A Anhang Teil 1

24.10.17	19:00	0	0	0	< 93 %	< 75 %	0	0
24.10.17	20:00	0	0	0	> 97 %	< 93 %	0	0
24.10.17	21:00	0	0	0	> 97 %	> 97 %	0	0
24.10.17	22:00	0	0	0	> 97 %	< 93 %	0	0
24.10.17	23:00	0	0	0	> 97 %	< 93 %	0	0
25.10.17	00:00	0	1	0	> 97 %	< 93 %	0	0
25.10.17	01:00	0	0	0	> 97 %	< 93 %	0	0
25.10.17	02:00	0	0	0	> 97 %	> 97 %	0	0
25.10.17	03:00	0	0	0	> 97 %	< 93 %	0	0
25.10.17	04:00	0	0	0	> 97 %	< 93 %	0	0
25.10.17	05:00	0	0	0	> 97 %	< 93 %	0	0
25.10.17	06:00	0	0	0	> 97 %	< 93 %	0	0
25.10.17	07:00	1	0	0	> 97 %	< 93 %	0	0
25.10.17	08:00	1	0	0	> 97 %	< 93 %	0	0

A.1.9 Ergebnisse der drei Verfahren für die Nacht vom 25. auf den 26. Oktober 2017

Datum	Uhrzeit	Tauberechnung		Kamera	Sensoren			
		Beysens' Modell			Feuchtesensoren		Leitwertsensoren	
		Messungen	Vorhersagen		2	3	4	5
25.10.17	18:00		0	?				
25.10.17	19:00	0	0	?	> 97 %	< 93 %	?	?
25.10.17	20:00	0	0	?	> 97 %	> 97 %	?	?
25.10.17	21:00	0	0	?	> 97 %	> 97 %	?	?
25.10.17	22:00	1	0	1	> 97 %	> 97 %	?	?
25.10.17	23:00	0	0	1	> 97 %	> 97 %	?	?
26.10.17	00:00	1	0	1	> 97 %	> 97 %	?	?
26.10.17	01:00	0	0	1	> 97 %	> 97 %	?	?
26.10.17	02:00	0	0	1	> 97 %	> 97 %	?	?
26.10.17	03:00	0	0	1	> 97 %	> 97 %	?	?
26.10.17	04:00	1	0	1	> 97 %	> 97 %	?	?

A Anhang Teil 1

<b>26.10.17</b>	05:00	1	0	1	> 97 %	> 97 %	?	?
<b>26.10.17</b>	06:00	0	0	1	> 97 %	> 97 %	?	?
<b>26.10.17</b>	07:00	1	0	1	> 97 %	> 97 %	?	?
<b>26.10.17</b>	08:00	0	0	1	> 97 %	> 97 %	?	?

A.1.10 Ergebnisse der drei Verfahren für die Nacht vom 27. auf den 28. Oktober 2017

Datum	Uhrzeit	Tauberechnung		Kamera	Sensoren			
		Beysens' Modell			Feuchtesensoren		Leitwertsensoren	
		Messungen	Vorhersagen	2	3	4	5	
<b>27.10.17</b>	18:00		1	0				
<b>27.10.17</b>	19:00	1	1	0	< 93 %	< 75 %	0	0
<b>27.10.17</b>	20:00	0	1	0	> 97 %	> 97 %	0	0
<b>27.10.17</b>	21:00	1	1	0	> 97 %	> 97 %	0	0
<b>27.10.17</b>	22:00	0	1	0	< 97 %	< 93 %	0	0
<b>27.10.17</b>	23:00	1	1	0	> 97 %	< 93 %	0	0
<b>28.10.17</b>	00:00	0	0	0	> 97 %	< 93 %	0	0
<b>28.10.17</b>	01:00	0	0	0	> 97 %	< 93 %	0	0
<b>28.10.17</b>	02:00	1	0	0	> 97 %	> 97 %	0	0
<b>28.10.17</b>	03:00	0	0	0	> 97 %	> 97 %	0	0
<b>28.10.17</b>	04:00	0	0	0	> 97 %	> 97 %	0	0
<b>28.10.17</b>	05:00	0	0	0	> 97 %	< 97 %	0	0
<b>28.10.17</b>	06:00	0	0	0	> 97 %	> 97 %	0	0
<b>28.10.17</b>	07:00	0	0	0	> 97 %	> 97 %	0	0
<b>28.10.17</b>	08:00	0	0	0	> 97 %	> 97 %	0	0

A.1.11 Ergebnisse der drei Verfahren für die Nacht vom 02. auf den 03. November 2017

Datum	Uhrzeit	Tauberechnung		Kamera	Sensoren			
		Beysens' Modell			Feuchtesensoren		Leitwertsensoren	
		Messungen	Vorhersagen	2	3	4	5	
02.11.17	18:00	0	0	0	< 93 %	< 75 %	0	0
02.11.17	19:00	0	0	0	< 93 %	< 75 %	0	0
02.11.17	20:00	0	0	0	< 93 %	< 75 %	0	0
02.11.17	21:00	0	0	0	< 93 %	< 93 %	0	0
02.11.17	22:00	0	0	0	> 97 %	> 97 %	0	0
02.11.17	23:00	0	0	0	> 97 %	> 97 %	1	1
03.11.17	00:00	0	0	0	> 97 %	> 97 %	1	1
03.11.17	01:00	0	1	0	> 97 %	> 97 %	1	1
03.11.17	02:00	0	1	0	> 97 %	> 97 %	0	1
03.11.17	03:00	0	1	0	> 97 %	> 97 %	0	1
03.11.17	04:00	0	1	0	> 97 %	> 97 %	0	1
03.11.17	05:00	0	1	?	> 97 %	> 97 %	0	0
03.11.17	06:00	0	0	1	> 97 %	> 97 %	0	1
03.11.17	07:00	0	1	1	> 97 %	> 97 %	0	1
03.11.17	08:00	0	0	1	> 97 %	> 97 %	0	1

A.1.12 Ergebnisse der drei Verfahren für die Nacht vom 03. auf den 04. November 2017

Datum	Uhrzeit	Tauberechnung		Kamera	Sensoren			
		Beysens' Modell			Feuchtesensoren		Leitwertsensoren	
		Messungen	Vorhersagen	2	3	4	5	
03.11.17	18:00	0	1	0	> 97 %	> 97 %	0	0
03.11.17	19:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	0	0
03.11.17	20:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	0	0
03.11.17	21:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	0	0
03.11.17	22:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	0	0

A Anhang Teil 1

<b>03.11.17</b>	23:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
<b>04.11.17</b>	00:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
<b>04.11.17</b>	01:00	1	0	1	> 97 %	> 97 %	1	1
<b>04.11.17</b>	02:00	1	0	1	> 97 %	> 97 %	1	1
<b>04.11.17</b>	03:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
<b>04.11.17</b>	04:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
<b>04.11.17</b>	05:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
<b>04.11.17</b>	06:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
<b>04.11.17</b>	07:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
<b>04.11.17</b>	08:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1

A.1.13 Ergebnisse der drei Verfahren für die Nacht vom 06. auf den 07. November 2017

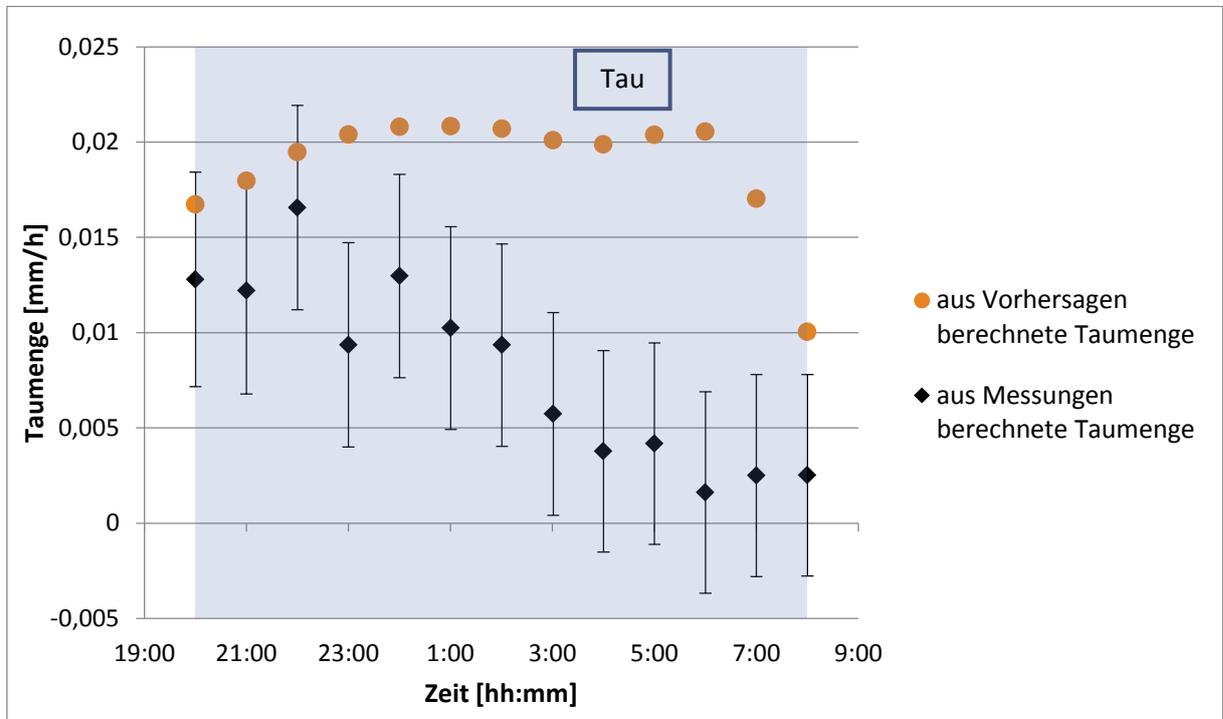
Datum	Uhrzeit	Tauberechnung		Kamera	Sensoren			
		Beysens' Modell			Feuchtesensoren		Leitwertsensoren	
		Messungen	Vorhersagen		2	3	4	5
<b>06.11.17</b>	18:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
<b>06.11.17</b>	19:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
<b>06.11.17</b>	20:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
<b>06.11.17</b>	21:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
<b>06.11.17</b>	22:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
<b>06.11.17</b>	23:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
<b>07.11.17</b>	00:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
<b>07.11.17</b>	01:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
<b>07.11.17</b>	02:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
<b>07.11.17</b>	03:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
<b>07.11.17</b>	04:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
<b>07.11.17</b>	05:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
<b>07.11.17</b>	06:00	1	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
<b>07.11.17</b>	07:00	0	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1
<b>07.11.17</b>	08:00	0	1	1	> 97 %	> 97 %	1	1

## A.1.14 Ergebnisse der drei Verfahren für die Nacht vom 14. auf den 15. November 2017

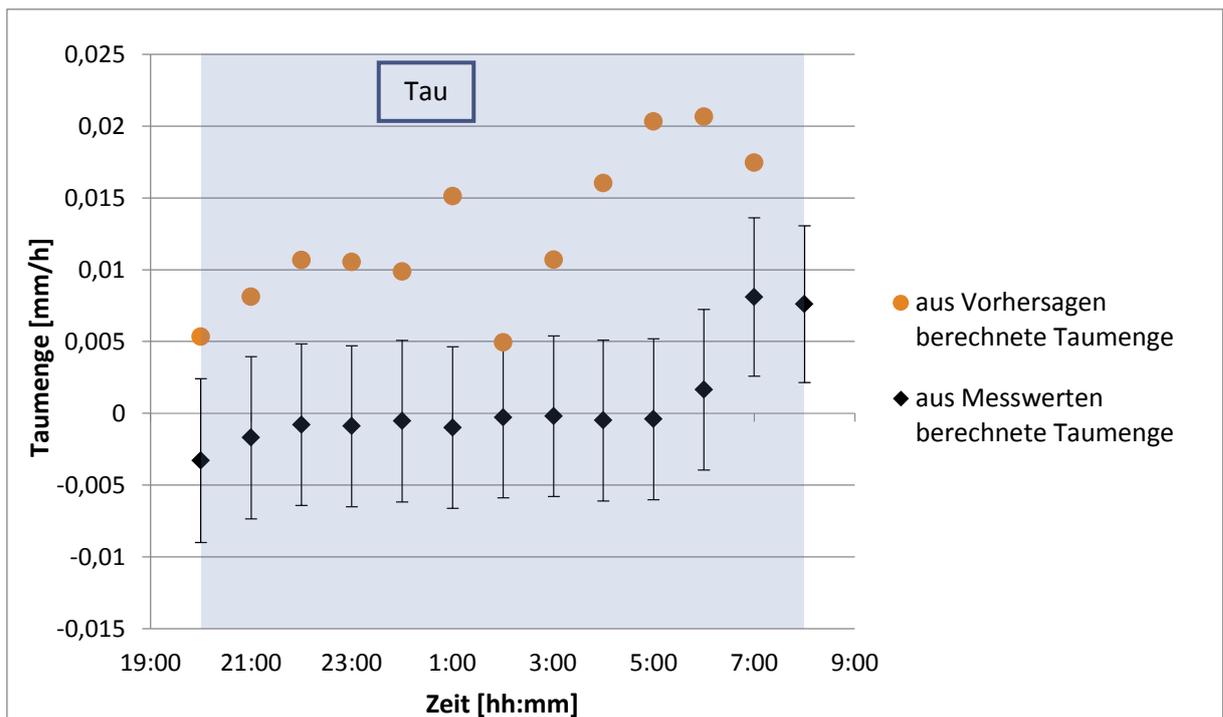
Datum	Uhrzeit	Tauberechnung		Kamera	Sensoren			
		Beysens' Modell			Feuchtesensoren		Leitwertsensoren	
		Messungen	Vorhersagen		2	3	4	5
14.11.17	18:00	0	0	0	< 93 %	< 75 %	0	0
14.11.17	19:00	0	0	0	< 97 %	< 93 %	0	0
14.11.17	20:00	0	0	0	< 93 %	< 75 %	0	0
14.11.17	21:00	0	0	0	< 93 %	< 75 %	0	0
14.11.17	22:00	0	0	0	< 93 %	< 93 %	0	0
14.11.17	23:00	0	0	0	> 97 %	> 97 %	0	0
15.11.17	00:00	0	0	0	> 97 %	> 97 %	0	0
15.11.17	01:00	0	0	0	> 97 %	> 97 %	0	0
15.11.17	02:00	0	0	0	> 97 %	< 97 %	0	0
15.11.17	03:00	0	0	0	> 97 %	> 97 %	0	0
15.11.17	04:00	0	0	0	> 97 %	> 97 %	0	0
15.11.17	05:00	0	0	0	> 97 %	< 97 %	0	0
15.11.17	06:00	0	0	0	> 97 %	> 97 %	0	0
15.11.17	07:00	0	0	0	> 97 %	> 97 %	0	0
15.11.17	08:00	0	0	0	> 97 %	> 97 %	0	0

## B Anhang Teil 2

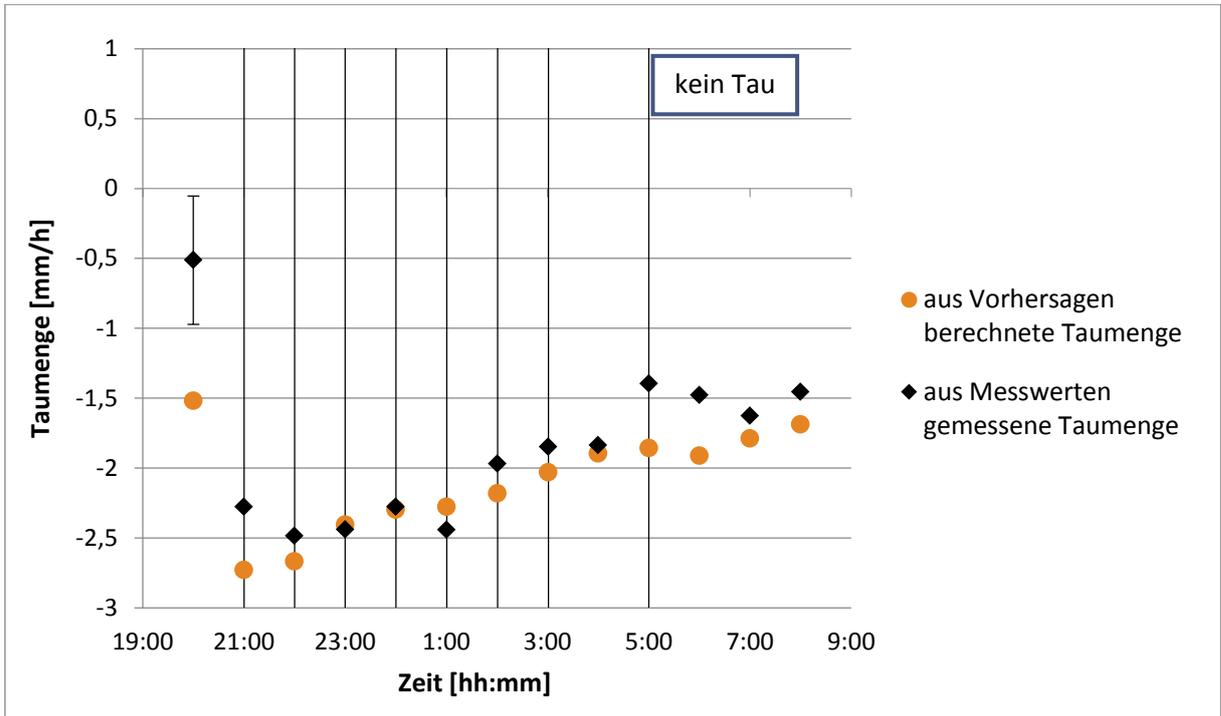
### A.2.1 Nacht vom 26. auf den 27. September 2017



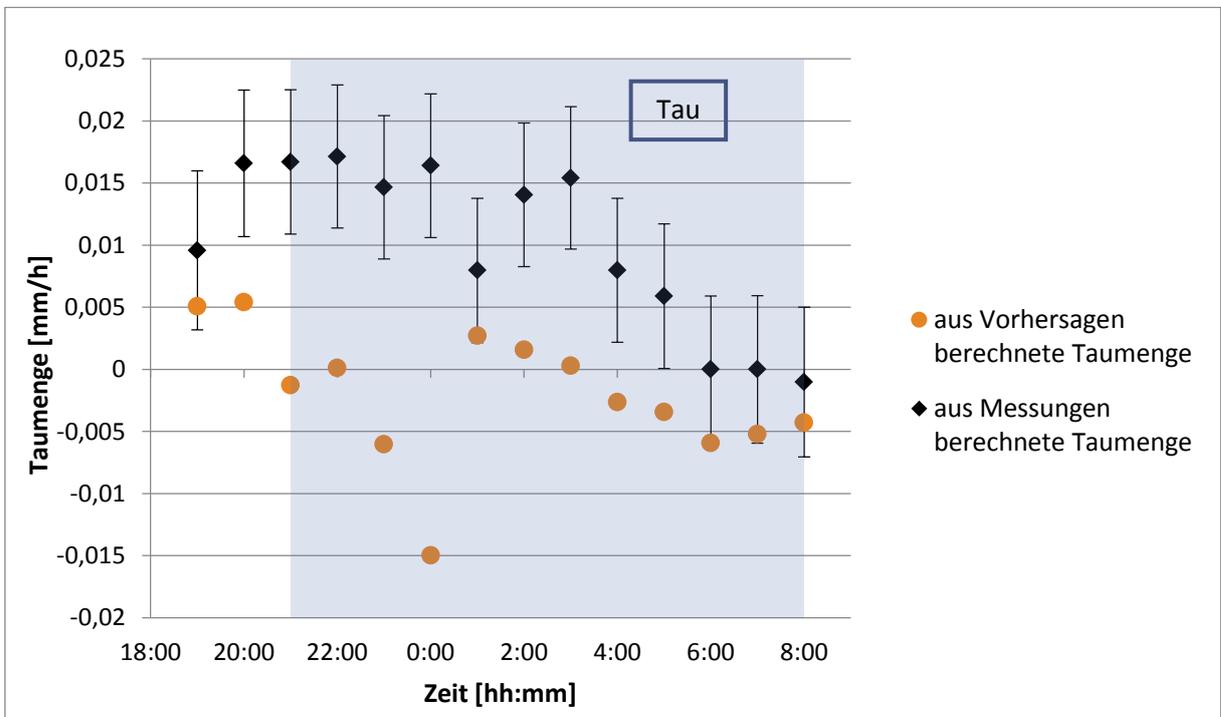
### A.2.2 Nacht vom 28. auf den 29. September 2017



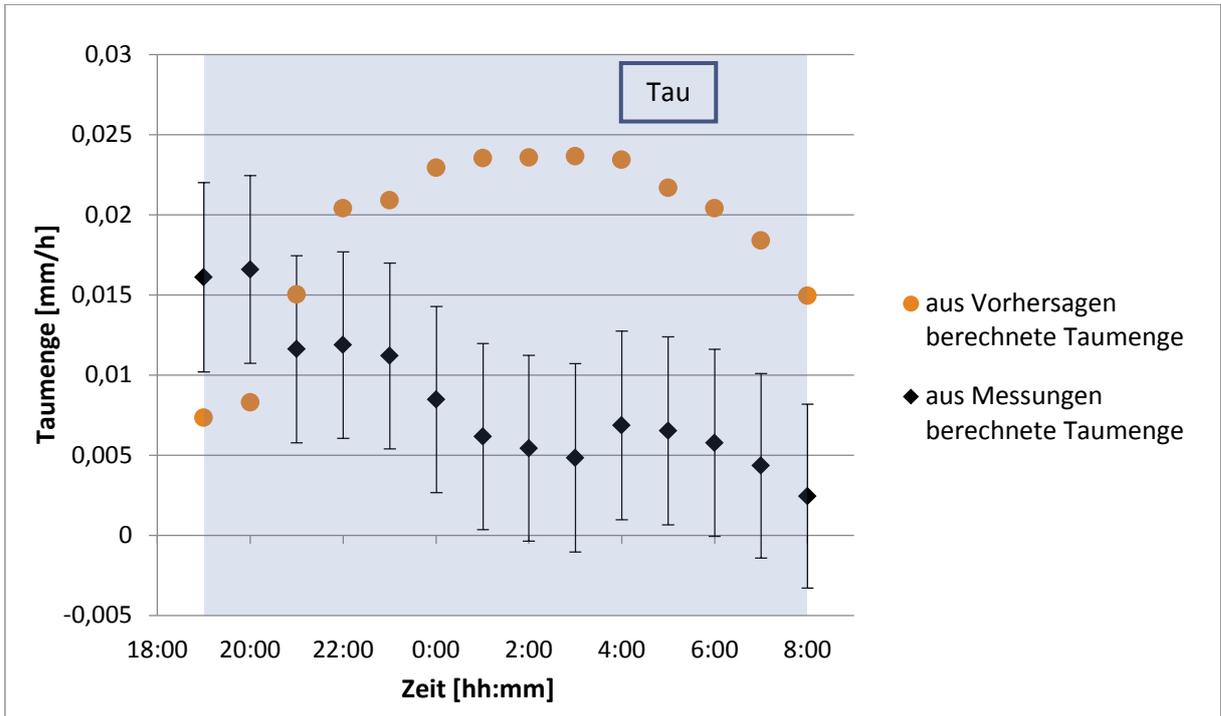
A.2.3 Nacht vom 04. auf den 05. Oktober 2017



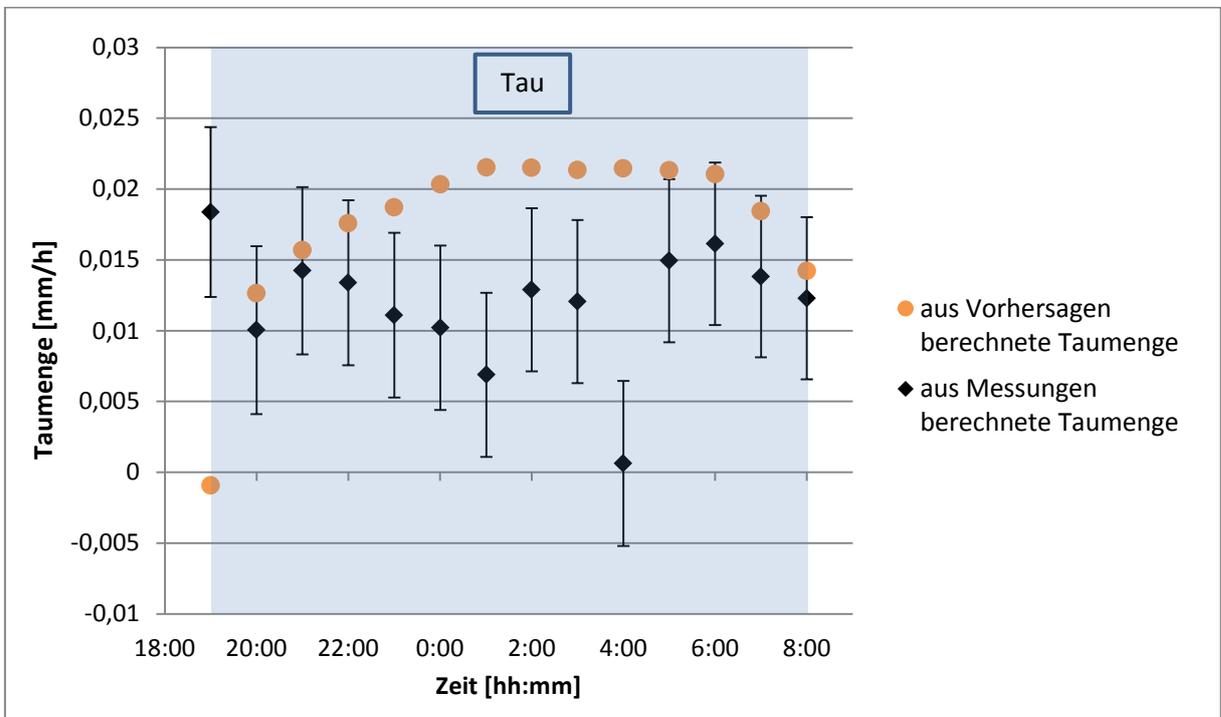
A.2.4 Nacht vom 12. auf den 13. Oktober 2017



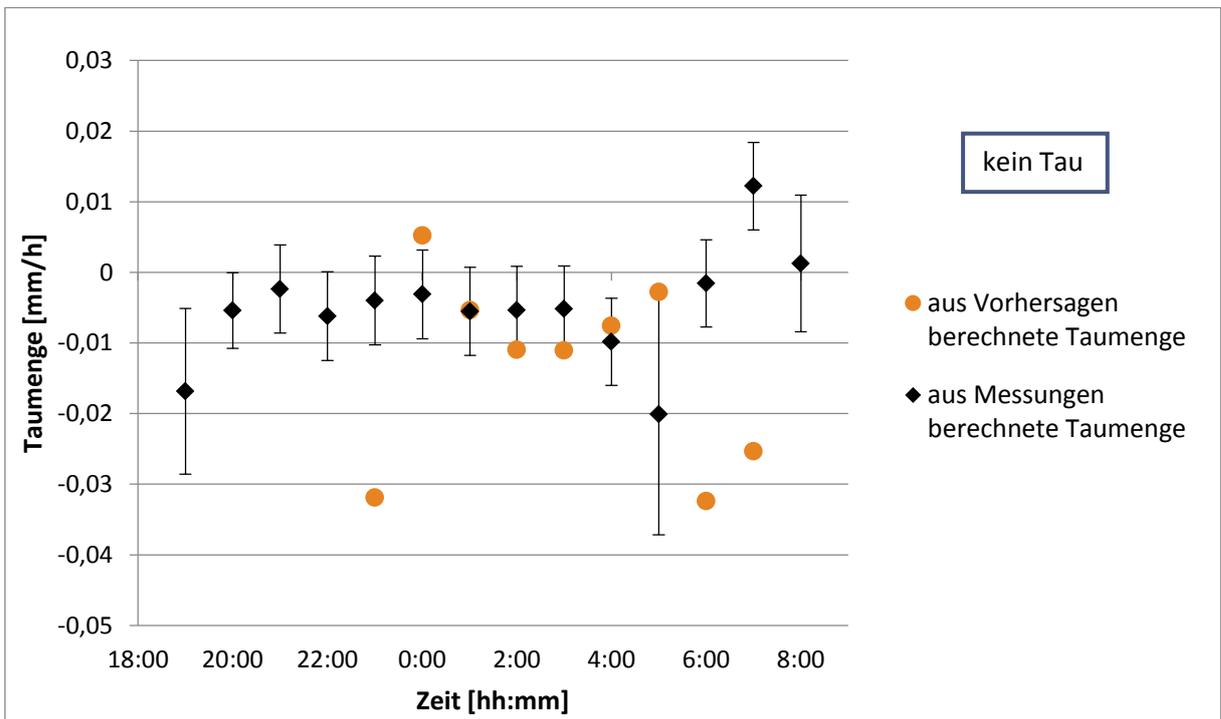
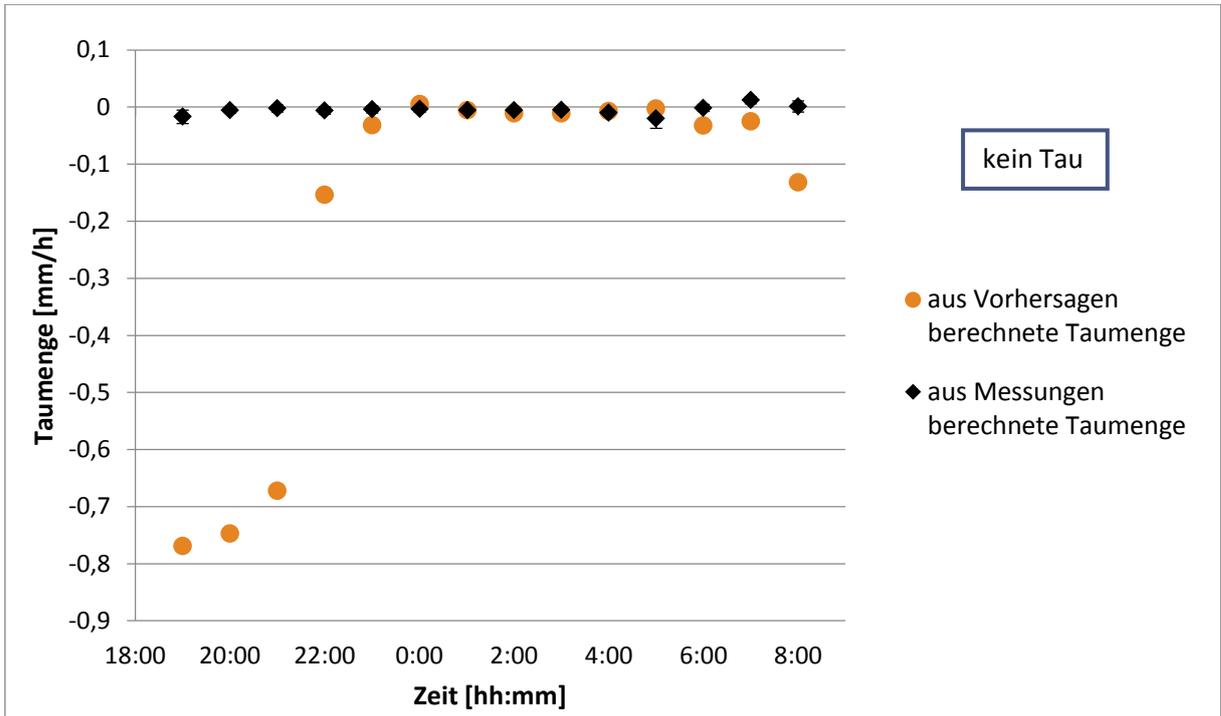
A.2.5 Nacht vom 17. auf den 18. Oktober 2017



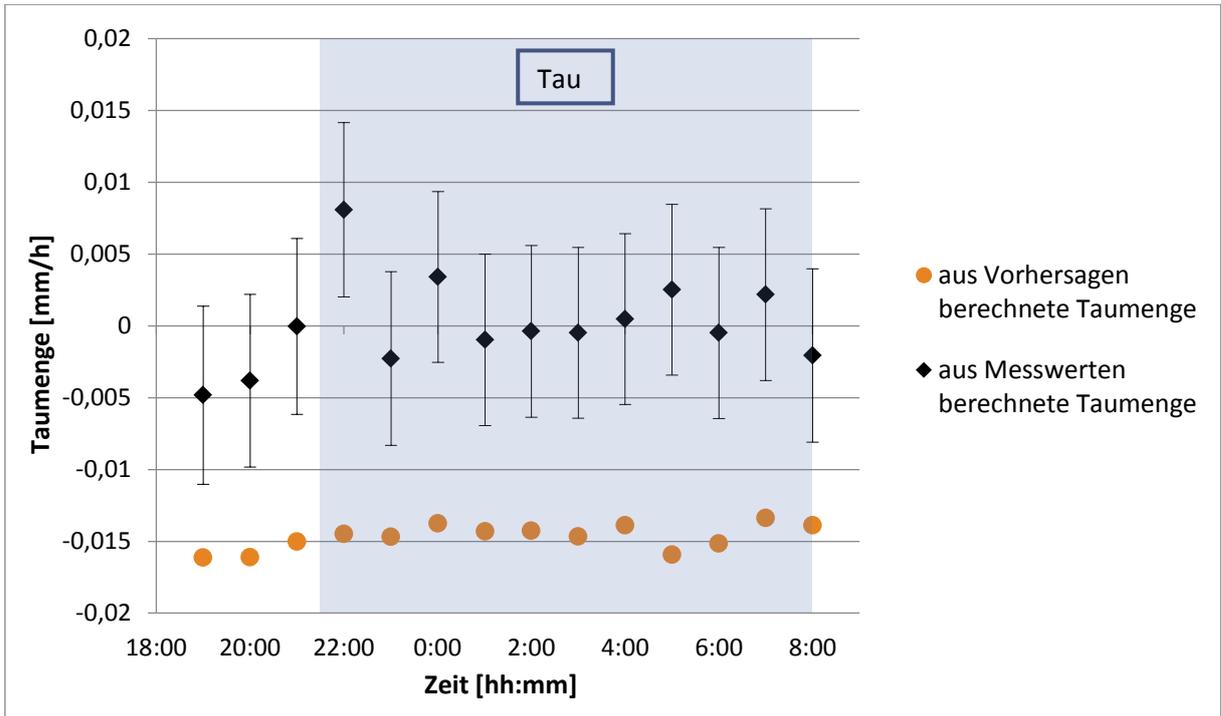
A.2.6 Nacht vom 18. auf den 19. Oktober 2017



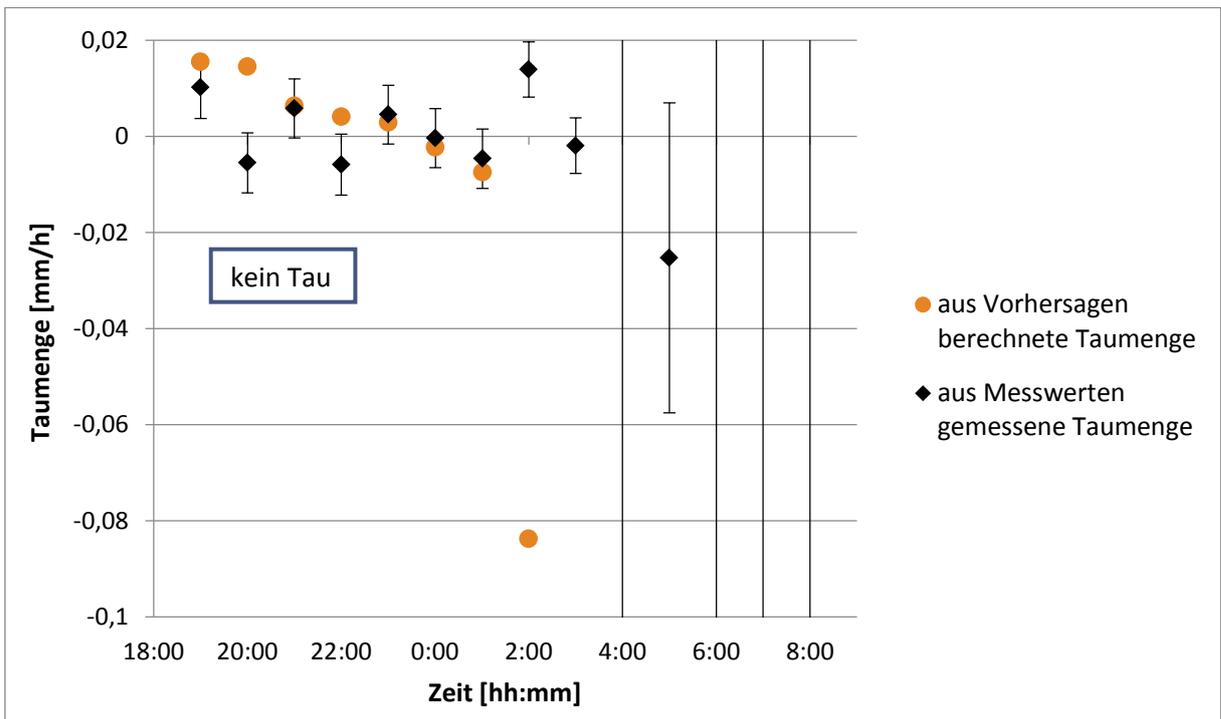
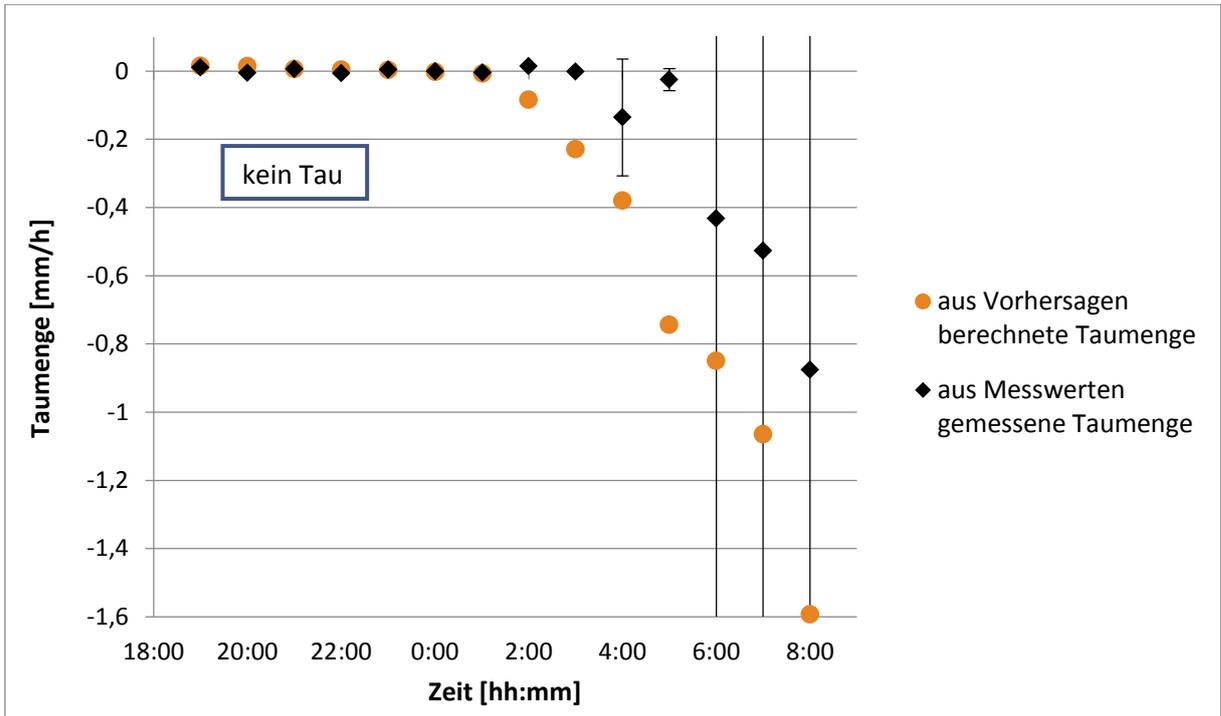
A.2.7 Nacht vom 24. auf den 25. Oktober 2017



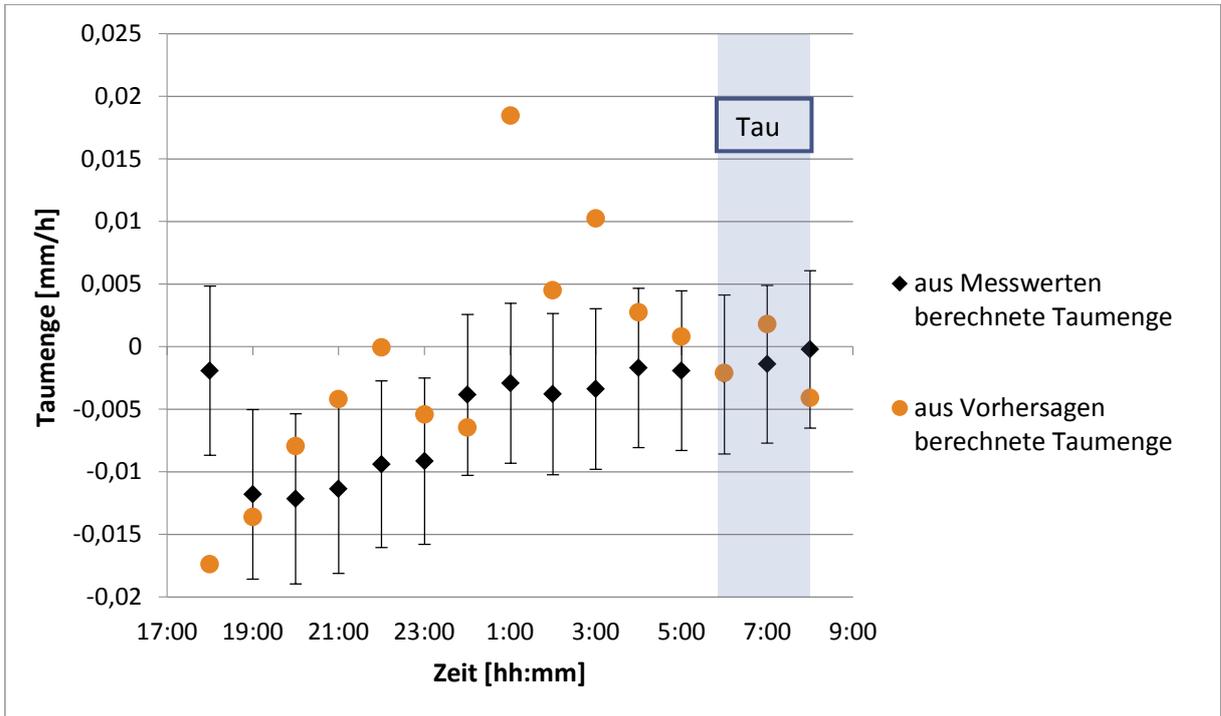
A.2.8 Nacht vom 25. auf den 26. Oktober 2017



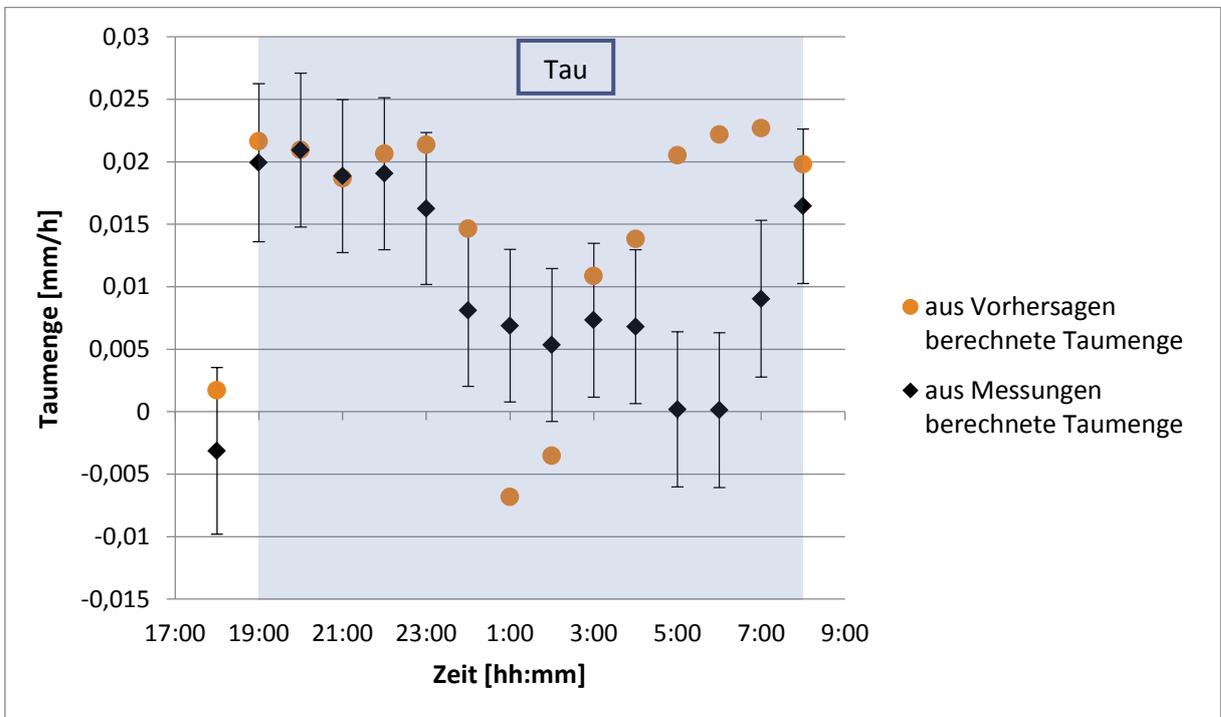
A.2.9 Nacht vom 27. auf den 28. Oktober 2017



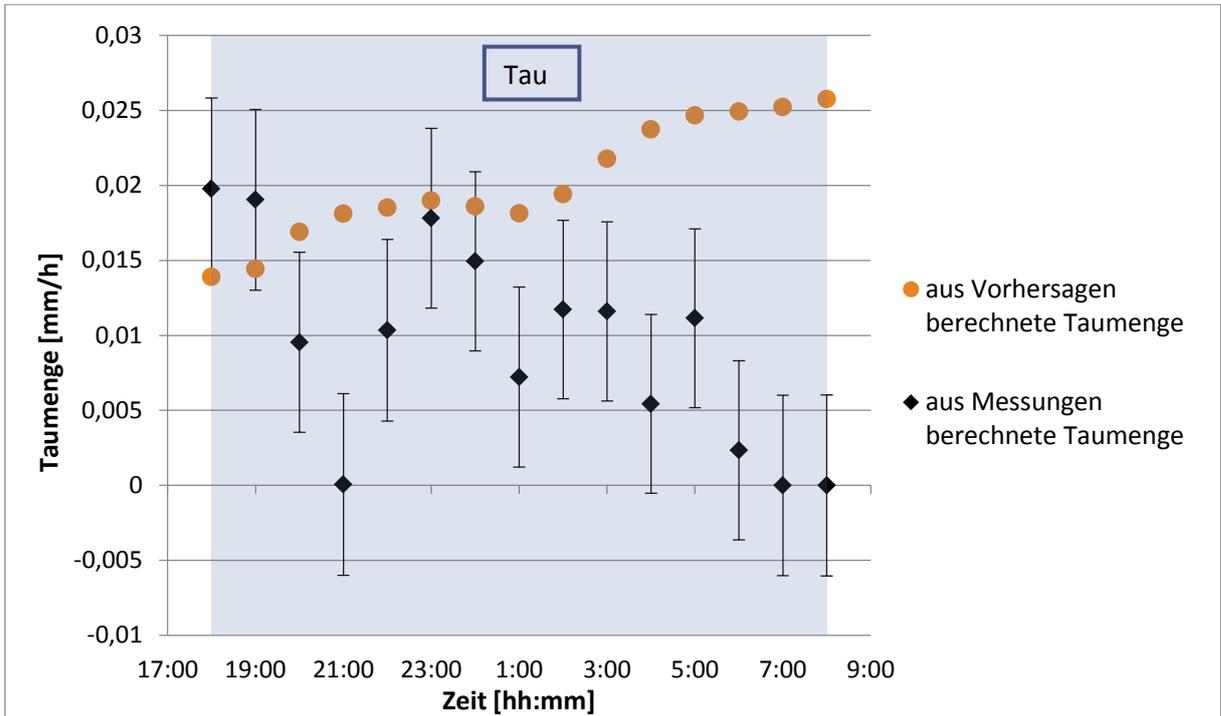
A.2.10 Nacht vom 02. auf den 03. November 2017



A.2.11 Nacht vom 03 auf den 04. November 2017



A.2.12 Nacht vom 06. auf den 07. November



A.2.13 Nacht vom 14. auf den 15. November 2017

