

Hochschule Merseburg
Fachbereich Ingenieur- und Naturwissenschaften

Masterarbeit

zum Thema

Charakterisierung von Staubeigenschaften zur Reduktion von Soiling-Prozessen an Glasoberflächen

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

vorgelegt von

Patrick Alexander Farago

Matrikel: 26340

Erstgutachter: Prof. Dr. Dietmar Bendix

Hochschule Merseburg, Eberhard-Leibnitz-Straße 2, 06217 Merseburg

Zweitgutachter: Dipl.-Ing. Guido Willers

Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP, Otto-Eißfeldt-Straße 12, 06120 Halle (Saale)

Abgabetermin am: 12.03.2023

Inhaltsverzeichnis

ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	IV
TABELLENVERZEICHNIS.....	VII
FORMELVERZEICHNIS	VII
ABKÜRZUNGS- UND SYMBOLVERZEICHNIS	VIII
1 EINLEITUNG	1
2 STAND DER TECHNIK.....	2
2.1 PHOTOVOLTAIK.....	2
2.1.1 <i>Geschichte</i>	2
2.1.2 <i>Grundlagen</i>	3
2.2 ÖKONOMISCHE UND ÖKOLOGISCHE BEDEUTUNG EINER GEEIGNETEN VERMEIDUNGSSTRATEGIE	4
2.3 SOILING	6
2.3.1 <i>Grundlagen</i>	6
2.3.2 <i>Physikalische Mechanismen</i>	7
2.3.3 <i>Typen</i>	9
2.3.4 <i>Chemische Komponenten</i>	10
2.4 VERMEIDUNGSSTRATEGIEN.....	11
2.4.1 <i>Anti-Soiling-Coat</i>	11
2.4.2 <i>Winkeleinstellung</i>	12
2.4.3 <i>Heizsysteme</i>	13
3 ZIELSTELLUNG DER ARBEIT.....	14
4 MATERIAL UND METHODEN.....	15
4.1 HYGROSKOPIE	15
4.2 LICHTMIKROSKOP.....	16

4.3	PH-MESSUNG.....	17
4.4	SENSORSTROMMESSUNG	18
4.4.1	<i>TOPAS - Soilingstand</i>	18
4.4.2	<i>Messungen zur Korrelation von Sensorstrom und Belegungsrate</i>	19
4.4.3	<i>Messungen zur Korrelation von Sensorstrom und Belegungsrate</i>	20
4.4.4	<i>zur Luftfeuchtigkeit</i>	20
5	ERGEBNISSE	21
5.1	HYGROSKOPIE	21
5.2	PH - MESSUNG.....	25
5.3	OPTISCHE ANALYSEN	26
5.3.1	<i>Lichtmikroskop</i>	26
5.3.2	<i>Rasterelektronenmikroskop</i>	29
5.4	STATISTISCHE AUSWERTUNG	33
5.5	SENSORSTROMMESSUNG	38
5.5.1	<i>Korrelation von Sensorstrom und Belegungsrate zur Luftfeuchtigkeit bei Staub aus Qatar</i>	38
5.5.2	<i>Korrelation von Sensorstrom und Belegungsrate zur Luftfeuchtigkeit bei Staub aus Morocco</i>	41
5.5.3	<i>Korrelation von Sensorstrom und Belegungsrate bei Staub aus Qatar</i>	42
5.5.4	<i>Korrelation von Sensorstrom und Belegungsrate bei Staub aus Marocco</i>	45
5.5.5	<i>Korrelation von Sensorstrom und Belegungsrate bei Staub aus Middle-East</i>	47
6	DISKUSSION	49
6.1	HYGROSKOPIE	49
6.2	PH-MESSUNGEN	53
6.3	OPTISCHE ANALYSE	54
6.4	STATISTIK.....	55
6.5	SENSORSTROMAUSWERTUNG.....	56
6.5.1	<i>Messungen zur Korrelation von Sensorstrom und Belegungsrate zur Luftfeuchtigkeit</i>	56

6.5.2	<i>Messungen zur Korrelation von Sensorstrom und Belegungsrate</i>	57
7	ZUSAMMENFASSUNG	59
8	ANHANG	61
9	LITERATUR- UND QUELLENVERZEICHNIS	62
10	EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG	66

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1.: BEZUG VON I – U UND P – U DEMONSTRIEREN DIE ZUSAMMENSETZUNG DES MAXIMAL-POWER-POINT EINER SOLARZELLE ^[7]	3
ABBILDUNG 2.: BRUTTOSTROMERZEUGUNG AUS ERNEUERBAREN ENERGIEN IN DEUTSCHLAND IM JAHR 2021 ^{[15][16]}	5
ABBILDUNG 3.: <i>DOMINANT VORHERRSCHENDE PARTIKELGRÖÙE VON STAUB IN ABHÄNGIGKEIT DER VORLIEGENDEN KRAFTEINWIRKUNG OHNE SPEZIFISCHE SOILING-MECHANISMEN^[19] ...</i>	7
ABBILDUNG 4.: SOILING-MECHANISMUS CEMENTATION, CAKING UND CAPILLARY AGING ^[19]	
ABBILDUNG 5.: <i>MINERALBESTANDTEILE DER STÄUBE MIT EINEM DURCHMESSER VON <38 µM^{[24][25]}</i>	10
ABBILDUNG 6.: ENERGIEVERLUST UND STAUBGEWICHT IN ABHÄNGIGKEIT VON WINKLEINSTELLUNG ^[29]	12
ABBILDUNG 7.: AUFNAHME DES VERLAUFES DER TEMPERATUR- UND FEUCHTIGKEITSANALYSE VON PV-MODULEN, UMGEBUNGSTEMPERATUR UND TAUPUNKTTEMPERATUR ÜBER MEHRERE TAGE IN DOHA ^[19]	13
ABBILDUNG 8.: DELIQUESZENZ REINER SALZE FÜR NaCl, KCl UND K ₂ SO ₄ ^[31]	15
ABBILDUNG 9.: MANUELLE UND DIGITALE SETTINGS ZUR OPTISCHEN ANALYSE MIT DEM LICHTMIKROSKOP	16
ABBILDUNG 10.: TOPAS C117 DER TOPAS GMBH – SOILINGSTAND	18
ABBILDUNG 11.: ABLAUF DER MESSUNGEN ZUR KORRELATION VON SENSORSTROM UND BELEGUNGSRATE	19
ABBILDUNG 12.: MESSUNGEN ZUR KORRELATION VON SENSORSTROM UND BELEGUNGSRATE ZUR LUFTFEUCHTIGKEIT IM AUTOKLAVEN	20
ABBILDUNG 13.: GEMITTELTE GEWICHTSVERLUSTE VON STÄUBEN UNTER AUSSETZUNG VON DELIQUESZENZ REINER SALZE UNTER RAUMTEMPERATUR ZU DEFINIERTEN LUFTFEUCHTIGKEITEN MIT STANDARDFEHLER.....	21
ABBILDUNG 14.: GEMITTELTEN GEWICHTSVERLUST VON STÄUBEN. FEUCHTIGKEITSAUFNAHME BEI RH 75,47 % ZU UNTERSCHIEDLICHEN TEMPERATUREN. DARSTELLUNG DER MITTELWERTE SOWIE STANDARDFEHLER.....	22
ABBILDUNG 15.: GEMITTELTEN GEWICHTSVERLUST VON STÄUBEN. FEUCHTIGKEITSAUFNAHME BEI RH 85,11% ZU UNTERSCHIEDLICHEN TEMPERATUREN. DARSTELLUNG DER MITTELWERTE SOWIE STANDARDFEHLER.....	23
ABBILDUNG 16.: GEMITTELTEN GEWICHTSVERLUST VON STÄUBEN. FEUCHTIGKEITSAUFNAHME BEI RH 97,59 % ZU UNTERSCHIEDLICHEN TEMPERATUREN. DARSTELLUNG DER MITTELWERTE SOWIE STANDARDFEHLER.....	24

ABBILDUNG 17.: AUSGEHEND DER GLEICHEN INITIALEN BELEGUNGSRATE ALLER PROBEN FÜR MOROCCO-STAU SIND NACH DER BETAUUNG ZU UNTERSCHIEDLICHEN TAUPUNKTUNTERSCHIEDEN ZUR UMGEBUNGSTEMPERATUR VERSCHIEDENE BELEGUNGSRATEN NACH WINDSTOß ZU BEOBACHTEN	26
ABBILDUNG 18.: AUSGEHEND DER GLEICHEN INITIALEN BELEGUNGSRATE ALLER PROBEN FÜR MIDDLE-EAST-STAU SIND NACH DER BETAUUNG ZU UNTERSCHIEDLICHEN TAUPUNKTUNTERSCHIEDEN ZUR UMGEBUNGSTEMPERATUR VERSCHIEDENE BELEGUNGSRATEN NACH WINDSTOß ZU BEOBACHTEN ^[33]	27
ABBILDUNG 19.: A) CAKING-FORMATION UM AGGLOMERIERTE PARTIKELVERBUND. BILD VON QATAR-STAU BEI EINER ΔT_{DP} VON 0 K NACH BETAUUNG UND WINDSTOß MIT EINEM 20X OBJEKTIV. B) NADELSTRUKTURBILDUNG VOR PARTIKEL BEIM CEMENTATION. AUFNAHME MIT EINEM 100X OBJEKTIV	28
ABBILDUNG 20.: REM-BILD BEI EINER ΔT_{DP} VON 2 K VON MIDDLE-EAST-STAU. A) AGGLOMERATION VON PARTIKEL. B) ÜBERSICHT DER PROBE ^[33]	29
ABBILDUNG 21.: REM-BILD BEI EINER ΔT_{DP} VON 1,5 K VON MIDDLE-EAST-STAU. A) AGGLOMERATION VON PARTIKEL. B) ÜBERSICHT DER PROBE ^[33]	30
ABBILDUNG 22.: REM-BILD BEI EINER ΔT_{DP} VON 0 K VON MIDDLE-EAST-STAU. A) AGGLOMERATION VON PARTIKEL. B) ÜBERSICHT DER PROBE ^[33]	30
ABBILDUNG 23.: REM-BILD VON QATAR-STAU BEI EINER ΔT_{DP} VON 7 K. IM BILD A) OHNE NADELSTRUKTUREN UND VORHÖFEN. IM BILD B) FEINE NADELSTRUKTUREN AN DER OBERFLÄCHE DES PARTIKELS	31
ABBILDUNG 24.: REM-BILD VON QATAR-STAU BEI EINER ΔT_{DP} VON 1,5 K. BILD A) NADELSTRUKTURBILDUNG AN GLASOBERFLÄCHE OHNE PARTIKEL IM ZENTRUM. BILD B) MIT PARTIKEL ALS AUSGANGSPUNKT FÜR NADELSTRUKTURBILDUNG.....	31
ABBILDUNG 25.: REM-BILD FÜR QATAR-STAU BEI EINER ΔT_{DP} VON 0,5 K. BILD A) I)AGGLOMERATION UND II) KREISRUNDE NADELSTRUKTURBILDUNG OHNE PARTIKEL IM ZENTRUM. BILD B) DIE NAHAUFNAHME DER AGGLOMERIERTEN PARTIKEL VOM II).....	32
ABBILDUNG 26.: REM-BILD FÜR QATAR-STAU BEI EINER ΔT_{DP} VON 0 K. IM BILD A) GRÖßERES UND IM BILD B) KLEINERES AGGLOMERIERTER PARTIKELVERBUND MIT MEHREREN VORHÖFEN	32
ABBILDUNG 27.: GRÖßENVERTEILUNG ANHAND DER RELATIVEN HÄUFIGKEITSVERTEILUNG IN % VON QATAR-STAU VOR DER BETAUUNG UND NACH DER BETAUUNG UND WINDSTOß BEI EINER ΔT_{DP} VON 5 K	33
ABBILDUNG 28.: ERMITTLUNG DER ANTEILE AN OBERFLÄCHENVERSCHATTUNG IN % DURCH PARTIKELDURCHMESSER SORTIERT IN GRUPPEN VOR UND NACH BETAUUNG UND WINDSTOß. BETAUUNG ERFOLGTE BEI EINER ΔT_{DP} VON 5 K	34
ABBILDUNG 29.: GRÖßENVERTEILUNG ANHAND HÄUFIGKEITSVERTEILUNG VOM QATAR-STAU BEI EINER ΔT_{DP} VON 1 K – VOR DER BETAUUNG UND NACH DER BETAUUNG UND WINDSTOß	35

ABBILDUNG 30.: ERMITTLUNG DER ANTEILE AN OBERFLÄCHENVERSCHATTUNG IN % DURCH PARTIKELDURCHMESSER SORTIERT IN GRUPPEN VOR UND NACH BETAUUNG UND WINDSTOß. DIE BETAUUNG ERFOLGTE BEI EINER ΔT_{DP} VON 1 K	36
ABBILDUNG 31.: GRÖßENVERTEILUNG ANHAND HÄUFIGKEITSVERTEILUNG VOM QATAR-STAUB BEI ΔT_{DP} 0 K – VOR DER BETAUUNG NACH DER BETAUUNG UND WINDSTOß.....	36
ABBILDUNG 32.: ERMITTLUNG DER ANTEILE AN OBERFLÄCHENVERSCHATTUNG IN % DURCH PARTIKELDURCHMESSER SORTIERT IN GRUPPEN VOR UND NACH BETAUUNG UND WINDSTOß. BETAUUNG ERFOLGTE BEI EINER ΔT_{DP} VON 0 K.....	37
ABBILDUNG 33.: LEITSTROMMESSUNGEN IM AUTOKLAVEN UNTER VERSCHIEDENER LUFTFEUCHTIGKEITEN NACH EINER STAUBDEPOSITION OHNE ZWISCHENREINIGUNGEN QATAR-STAUB MIT RH 75,47 %, RH 85,11 % UND MIT RH 97,59 %.....	38
ABBILDUNG 34.: KORRELATIONSMESSUNG VON SENSORSTROM UNTER 85,11 % LUFTFEUCHTIGKEIT MITTELS KCL ZUR STAUBBELEGUNGSGRAD VON 34,31 % NACH VIER STAUBDEPOSITIONEN MIT QATAR-STAUB MIT BETAUUNG	39
ABBILDUNG 35.: MESSUNG VON LECKSTROM ZU BELEGUNGSGRAD VON QATAR-STAUB IN ABHÄNGIGKEIT VON UNTERSCHIEDLICHEN LUFTFEUCHTIGKEITEN.	40
ABBILDUNG 36.: MESSUNG VON LECKSTROM ZU BEDECKUNGSGRAD VON MOROCCO-STAUB IN ABHÄNGIGKEIT VON UNTERSCHIEDLICHEN LUFTFEUCHTIGKEITEN	41
ABBILDUNG 37.: MESSUNGEN VON STROM, TEMPERATUR DER PROBENKAMMER (PC) UND LUFTFEUCHTIGKEIT (TC) BEI STAUBDEPOSITION FÜR QATAR-STAUB MIT EINER ΔT_{DP} VON 0,3 K BEI STAUBDEPOSITION.....	42
ABBILDUNG 38.: BETAUUNG VON QATAR-STAUB BEI 1,5 K UNTERSCHIED ZUM TAUPUNKTTEMPERATUR IN DER PROBENKAMMER VON BETAUUNG	43
ABBILDUNG 39.: VERHÄLTNIS VON BEDECKUNGSRATE UND LEITSTROMMESSUNG ZUR ΔT_{DP} BEI KONstanter UMWELTBEDINGUNG MIT QATAR-STAUB. GEMESSEN MIT EINEM OBERFLÄCHENSSENSOR AUS ZWEI AG-EPOXID-STREIFEN	44
ABBILDUNG 40.: BETAUUNG VON MOROCCO-STAUB BEI EINER ΔT_{DP} VON 0,5 K IN DER PROBENKAMMER NACH BETAUUNG UND WINDSTOß.....	45
ABBILDUNG 41.: VERHÄLTNIS VON BEDECKUNGSRATE UND LEITSTROMMESSUNG ZUR ΔT_{DP} BEI KONstanter UMWELTBEDINGUNG MIT MOROCCO-STAUB	46
ABBILDUNG 42.: BETAUUNG VON MIDDLE-EAST-STAUB BEI EINER ΔT_{DP} VON 0,5 K.....	47
ABBILDUNG 43.: VERHÄLTNIS VON BELEGUNGSRATE UND LEITSTROMMESSUNG ZUR ΔT_{DP} MIT MIDDLE-EAST-STAUB. GEMESSEN MIT EINEM OBERFLÄCHENSSENSOR AUS ZWEI AG-EPOXID-STREIFEN	48
ABBILDUNG 44.: VERHÄLTNIS VON BELEGUNGSRATE UND LEITSTROMMESSUNG ZUR ΔT_{DP} MIT MIDDLE-EAST-STAUB. MIDDLE EAST MESSUNGEN MIT DEUTLICHEM UNTERSCHIED AB 2 K DIFFERENZ ZUM TAUPUNKT. GEMESSEN WURDE MIT EINEM AL-OBERFLÄCHENFEUCHTESENSOR ^[33]	48

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1.: GEMITTELTE PH/MV – WERTE DER MESSERGEBNISSE MIT STANDARTFEHLER (SEM).....	25
TABELLE 2.: MINERALBESTANDTEILE DER STÄUBE MIT ANGABE DER MENGE IN MASSE% FÜR PM10 ^{[24][25]}	50
TABELLE 3.: ANTEIL AN LÖSLICHEN IONEN DER STÄUBE IN MASSE% FÜR PM10 ^{[20][21]}	51
TABELLE 4.: PH-WERTE DER BASEN AUS VORHANDENEN KATIONEN UND VORHANDENEN CARBONATE DER STÄUBE BEI 1MMOL/L	53

Formelverzeichnis

FORMEL 1.:BERECHNUNG DES WIRKUNGSGRADS VON PV-MODULEN	3
FORMEL 2.: BERECHNUNG DER KAPILLARKRAFT	8
FORMEL 3.: BERECHNUNG DER VDW-KRAFT BEI GLATTEN OBERFLÄCHEN	8
FORMEL 4.: BERECHNUNG DER KRAFTEINWIRKUNG AUF PARTIKEL DURCH GRAVITATION.....	8
FORMEL 5.: BERECHNUNG DES GEWICHTSVERLUSTES IN MASSE% VON STÄUBEN BEI DER HYGROSKOPIE	15
FORMEL 6.: BERECHNUNG DER BELEGUNGSRATE	17
FORMEL 7.: ABRUNDFUNKTION DER GRUPPIERUNG VON PARTIKELDURCHMESSER VON IMAGEJ	17

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

ARC	Anti-Reflection-Coat	PM	Particular Matter [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
ASC	Anti-Soiling-Coat	PV	Photovoltaik
C	Celcius	R	Widerstand
C_{ini}	Initialer Belegungsgrad	REM	Rasterelektronenmikroskop
C_{wb}	Belegungsgrad nach Windstoß	RH	Luftfeuchtigkeit
d	Durchmesser	s	Sekunde
eV	Elektronenvolt	SEM	Standardfehler
F_G	Gravitationskraft	STF	Standard Test Field
F_K	Kraft der Kapillarbindung	T	Temperatur
h	Stunde	TC	Testkammer
I	Amper	U	Spannung
IR	Infrarot	VdW	Van der Waals
I_{sc}	Kurzschlußstrom	V_{oc}	Leerlaufspannung
K	Kelvin	WCA	Water-Contact-Angle
max	maximal	ΔT_{dp}	Temperaturdifferenz der Umgebungstemperatur zur Tautemperatur
min	Minute	η	Wirkungsgrad
MPP	Maximal-Power-Point	Δ	Differenz
P	Leistung	Θ	Kontaktwinkel
PC	Probenkammer	Z	Ganze Zahlen
pH	Wasserstoffpotential		
PID	Proportional-Integral- Differenzierend		

1 Einleitung

Nachhaltige Energiegewinnung durch Photovoltaik-Module (PV-Module) erlangt insbesondere in den ariden und semi-ariden Gegenden entlang des *Dustbelts*¹ immer höhere Aufmerksamkeit. Durch die hohe Stundenzahl und Intensität von Sonneneinstrahlung sind Solaranlagen dort, im Vergleich zur gemäßigten Klimazone, besonders effektiv. Bereits heute werden in diesen Gebieten daher verstärkt Solar-Parks gebaut und auch für zukünftige Planungen priorisiert. So verfolgt zum Beispiel die Bundesrepublik Deutschland seit 2020 eine Agenda des Wasserstoffimports aus Marokko. Die energieintensive Synthese soll dabei ausschließlich aus Solarstrom erfolgen^[3]. Trotz günstiger Bedingungen leiden die Anlagen in Wüstennähe unter hohem Staubaufkommen, der sich an den Oberflächen der Module absetzt und diese verschattet. Diese Ablagerung von Staub und anderen Kontaminationen wird als *Soiling* bezeichnet und kann Verluste der maximalen Energieausbeute von über 1 % täglich verursachen^[4]. Zudem werden unter nächtlichem Tau und folgender Trocknung am Tag Mechanismen ausgelöst, die die Haftfestigkeit des *Soiling* an der Oberfläche immens erhöhen und eine Reinigung erschweren. Diese Phänomene werden wiederum als *Cementation*, *Caking* und *Capillary Aging* bezeichnet. Die Entwicklung einer geeigneten Vermeidungsstrategie von *Soiling* ist daher von herausragender Bedeutung, um eine stabile ökonomische und ökologische Stromversorgung zu gewährleisten. Hierbei beeinflussen viele Faktoren das *Soiling*-Verhalten, z.B. Partikelgröße, vorherrschende Luftfeuchtigkeit, aber auch Oberflächeneigenschaften der Glasoberfläche selbst. Zur Reduktion von *Soiling* fokussieren aktuelle Vermeidungsstrategien häufig jedoch nur eine Staubeigenschaft und sind noch insgesamt ungenügend in ihrem Potenzial. Verschiedene Stäube besitzen allerdings diverse spezifische Eigenschaften die einen Einfluss auf ihr *Soiling*-Verhalten haben. Die Vermutung liegt nahe, dass multiple Variablen die Haftfestigkeit beim *Soiling* generell, als auch beim Tau-induziertem *Soiling* bedingen.

¹ Dustbelt beschreibt die überwiegend in der subtropischen Klimazone vorhandenen, interkontinentalen Gebiete zwischen dem 15°N und 45°N Breitengrad mit hohem Staubaufkommen durch Wüstennähe ^{[1][2]}.

2 Stand der Technik

2.1 Photovoltaik

2.1.1 Geschichte

Seit der ersten wissenschaftlichen Erwähnung von Photovoltaik im Jahre 1954 bis zur heutigen industriellen Anwendung, hat sich viel verändert, wenn auch das Grundkonzept nach wie vor unverändert blieb. Von der Sonne emittiertes Licht tritt durch die Atmosphäre der Erde und trifft auf ein PV-Modul. Dieses Licht wird zunächst anteilig an der Oberfläche durch Reflexion wieder im gleichen Einfallswinkel von der Erde gelenkt. Der restliche Anteil der Lichteinstrahlung kann durch die Oberfläche transmittieren und absorbiert werden. Durch die Anregung von Elektronen im Halbleiter wird dabei Wärme und Strom erzeugt.

Ihr Debüt erlebte die PV-Technik in der Luft-Raumfahrttechnik im Jahre 1958 durch den Start des zweiten US-amerikanischen Satelliten in den Weltraum. Dessen Batterien hielten 19 Tage, während die PV-Anlage den Betrieb um weitere 7 Jahre aufrechterhalten konnte. Die erste Großindustrielle Anwendung auf der Erde fand jedoch 1973 aufgrund der Ölkrise im selben Jahr statt. Alternative und unabhängige Modelle zur Energiegewinnung wurden gesucht, erforscht und gefördert, sodass die ersten größeren PV-Plantagen entstanden.

Schnell fiel dabei jedoch die Wirtschaftlichkeit als größtes Kriterium für die Etablierung von PV-Anlagen ins Gewicht. Durch den Eigenbedarf und somit Einstieg Chinas in die PV-Produktion sanken die Herstellungskosten und somit Erwerbskosten weltweit. Somit konnten erstmalig Anlagen auch von Privatinvestoren günstig erworben werden und eine dezentral-orientierte Energiegewinnung stattfinden.

2.1.2 Grundlagen

Gewöhnlich bestehen Photovoltaik-Module aus Solarzellen, welche wiederum auf Wafern aus Halbleitermaterialien, wie z.B. kristallisiertem Silizium (Si), basieren. Die Wafer besitzen eine n- und p- dotierte Schicht die, je nach verwendetem Material, nur ein bestimmtes Spektrum des Sonnenlichts absorbieren und in elektrischen Strom umsetzen können. Für Si-PV ist der Bereich der Wellenlänge der Sonneneinstrahlung bei ca. 400-1109 nm^[5]. Dagegen kann bei Tandemsolarzellen aus vier Materialien das Spektrum bereits 300-1780 nm betragen^[6]. Generell gilt je größer das Spektrum, desto höher die Leistung und somit der Wirkungsgrad der PV-Anlage (Abb.1).

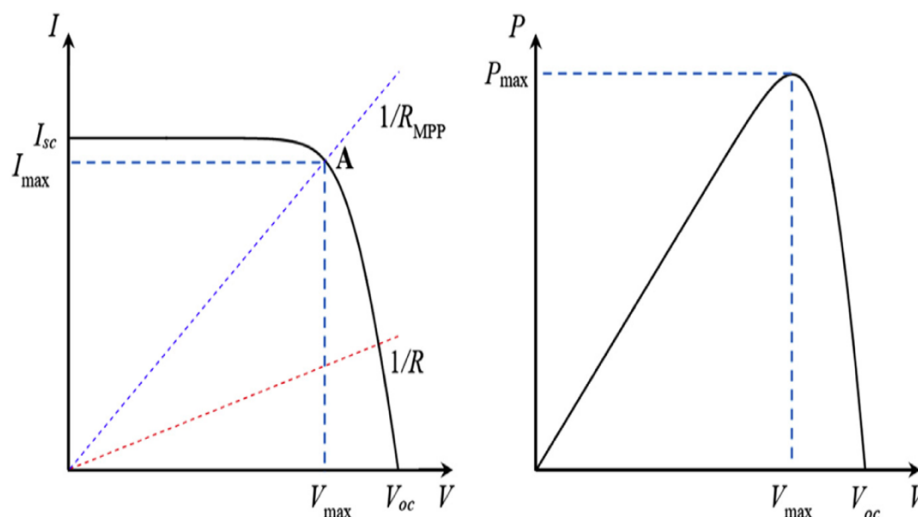


Abbildung 1.: Bezug von $I - U$ und $P - U$ demonstrieren die Zusammensetzung des Maximal-Power-Point einer Solarzelle^[7]

Die maximale Leistung einer PV-Zelle ergibt sich aus dem maximalen Strom und Spannungswerten wie in Abb. 1 demonstriert und wird zur Berechnung des Wirkungsgrades herangenommen (Formel 1):

$$\eta_{max} = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{V_{max}I_{max}}{P_{in}} \quad (1)$$

Nach Shokley und Queisser lag das theoretische Maximum des Wirkungsgrades von monokristallinem Si-PV bei 30 %. Technisch umsetzbar war zu dieser Zeit jedoch nur 14 %^[8]. Heutzutage laufen Si-PV-Module in der praktischen Anwendung mit ca. 19 %

Wirkungsgrad^[9]. Unter Laborbedingungen schaffen Tandemzellen wie z.B. die Vierfachzelle des Fraunhofer ISE einen Wirkungsgrad von 47,6 %^[6]. Obwohl der maximale Wirkungsgrad von PV-Anlagen unter Laborbedingungen innerhalb der letzten Jahrzehnte demnach evident erhöht werden konnte, wird dieser in der Praxis weiterhin unterschritten. So reduzieren Faktoren, wie Modultemperatur, Sonnenstrahlintensität, Winkeleinstellung und Verschattung den tatsächlichen Wirkungsgrad deutlich.

2.2 Ökonomische und ökologische Bedeutung einer geeigneten Vermeidungsstrategie

Bei Erhöhung der Durchschnittstemperatur geraten Ökosysteme ins Wanken. Im Jahr 2016 ratifizierten Klimaabkommen von Paris verpflichteten sich daher alle Staaten dazu den weltweiten Temperaturanstieg deutlich unter 2 °C im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter zu beschränken^[10]. Da die globale CO₂-Emission zu den führenden Ursachen des vom Menschen gemachten Treibhauseffekts gehört, kann als Lösungsansatz die Reduktion CO₂-verursachender Prozesse, sowie der Umstieg auf CO₂-neutrale Energien genannt werden. Windkraftwerke und PV-Anlagen gehören hierbei zu den führenden Quellen nachhaltiger CO₂-neutraler Energien. Innerhalb der Bundesrepublik Deutschlands war der erzeugte Strommix im Jahr 2021 zu 41,1 % erneuerbar und davon zu 21,4 % durch PV generiert^[11] (Abb. 2). Das aktuelle Ziel der Bundesregierung ist bis 2030 den Anteil an erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch auf 80 % zu erhöhen^[12]. In den letzten zwei Jahrzehnten konnte die Leistung von PV-Modulen zwar um 10% erhöht werden, jedoch reduzieren *Soiling*-Prozesse die Leistungssteigerung bereits nach wenigen Wochen^[13]. 2018 lagen die durch *Soiling* verursachten Energieverluste weltweit bei 3 - 4%, was mit einem finanziellen Verlust von mind. 3 - 8 Milliarden Euro einherging^[14].

Um den Ausgangswirkungsgrad wieder zu erreichen, ist es zwar möglich die Oberflächen mechanisch zu reinigen, jedoch verbrauchen die dafür notwendigen automatischen Systeme wie Heizungen oder Waschroboter wiederum viel Energie und Installationskosten. Der Einsatz von Personal zur manuellen Reinigung kann in Abhängigkeit der örtlichen Wirtschaft hierbei ökonomischer sein^[13]. Daher ist die optimale Vermeidung von *Soiling* ökonomisch und ökologisch äußerst relevant.

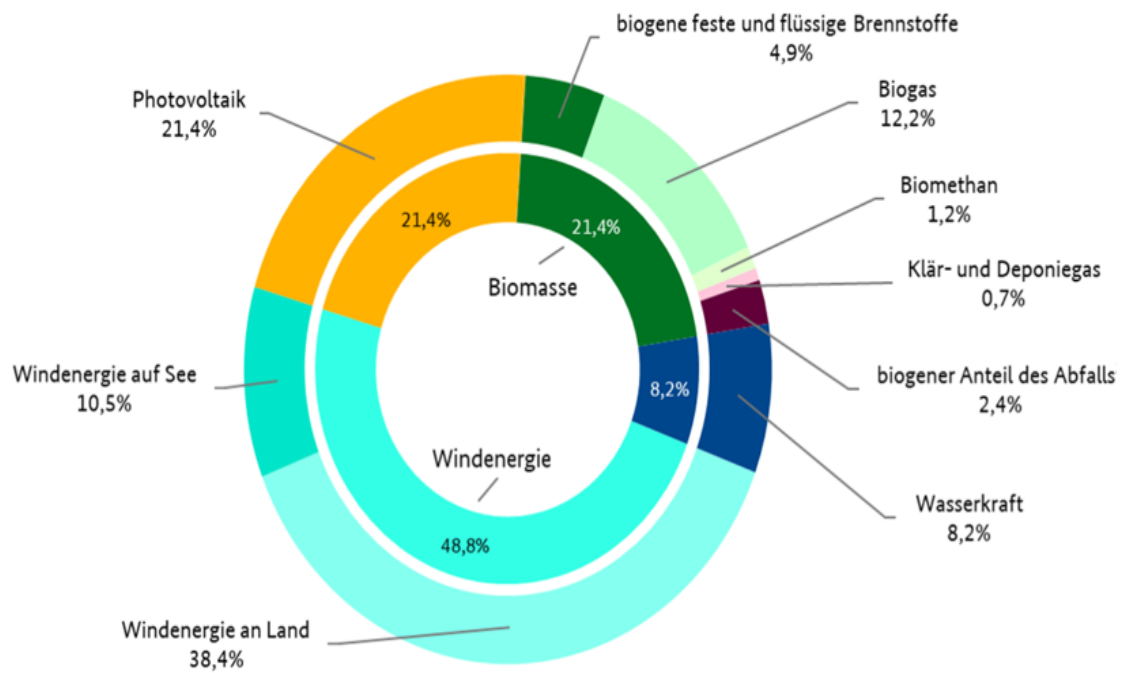


Abbildung 2.: Bruttostromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2021^{[15][16]}

2.3 Soiling

2.3.1 Grundlagen

Während an der Erhöhung der Leistung von PV-Modulen geforscht wird, bedarf es zudem an Optimierung am aktiven, betrieblichen Prozess. Unter realen Bedingungen stellt besonders das *Soiling* in ariden und semi-ariden Gegenden das größte Problem dar. Dabei haften sich Staub, Sand und Schmutz an die PV-Oberfläche und verschatten diese, was zu Leistungseinbußen führt. Weitere Umweltfaktoren begünstigen zudem das *Soiling*. So leiden Anlagen in ariden Gegenden mit Wüstenzugang, unter wenig bis kaum Regenfall, da Effekte wie Kapillarkondensation, durch Ausbildung von Wasser-menisken, zu einer verstärkten Bindung von Partikeln und somit zu einer erhöhten Soilingrate führen. Die Menisken sind wenige μm bis sogar nm groß und entstehen bereits bei einer Luftfeuchtigkeit (RH) von 30 %^[17]. Tägliche Regenraten von über 4-5 mm reinigen dagegen die PV-Oberflächen^[18]. Ein weiterer Umweltfaktor, der das *Soiling* begünstigt, ist ein Ausbleiben von ausreichend starkem Wind, um die Oberflächenbelege aus an- und organischen Materialien zu entfernen. Während Sand und Staub den anorganischen Bestandteil beschreibt wie Quarz und Calciumcarbonat, kann Schmutz beides sein. Über 90 % des Belags lässt sich auf anorganisches Material zurückführen, welches weniger als 60 μm im Durchmesser misst, da größere Partikel leichter vom Wind aufgewirbelt und in die Luft transportiert werden können. Faktoren, welche das *Soiling*-Verhalten begünstigen sind neben der o.g. Größenverteilung auch Dichte, Form, chemische und mineralische Zusammensetzung, sowie Ladung der Stäube. Aber auch Erdanziehung, Elektrostatik und chemische Bindestellen verstärken die Haftung von Soiling, wobei Kapillarkondensation und Van-der-Waals-Kraft (VdW) zu den treibenden Faktoren zählen. Wissen um die Bindungsart und Beschaffenheit, beeinflusst das Design für mögliche Gegenmaßnahmen. Hauptproblem bei Adhäsion sind die unterschiedlich stark ausgeprägten Typen von kapillaren Kräften. Eine einteilende Charakterisierung dieser Kräfte erfolgt im Kapitel 2.3.3.

2.3.2 Physikalische Mechanismen

In Abhängigkeit der Partikelgröße wirken verschiedene, physikalische Kräfte im *Soiling* (Abb. 3). Größere Partikel über 63 μm im Durchmesser können gut bereits von mittelstarken Winden ($>3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$) abgetragen werden. Dagegen werden kleinere Partikel kaum von Winden abgetragen. Als stärkste, bindende Kraft wirkt die kapillare Adhäsion getrieben durch den Effekt der Kapillarkondensation. So wie Regen die Module reinigen kann, stellen z.B. Tau und hohe Luftfeuchtigkeit ein großes Problem dar, denn makroskopischer Tau löst die Partikel ab und führt zu Agglomeration.

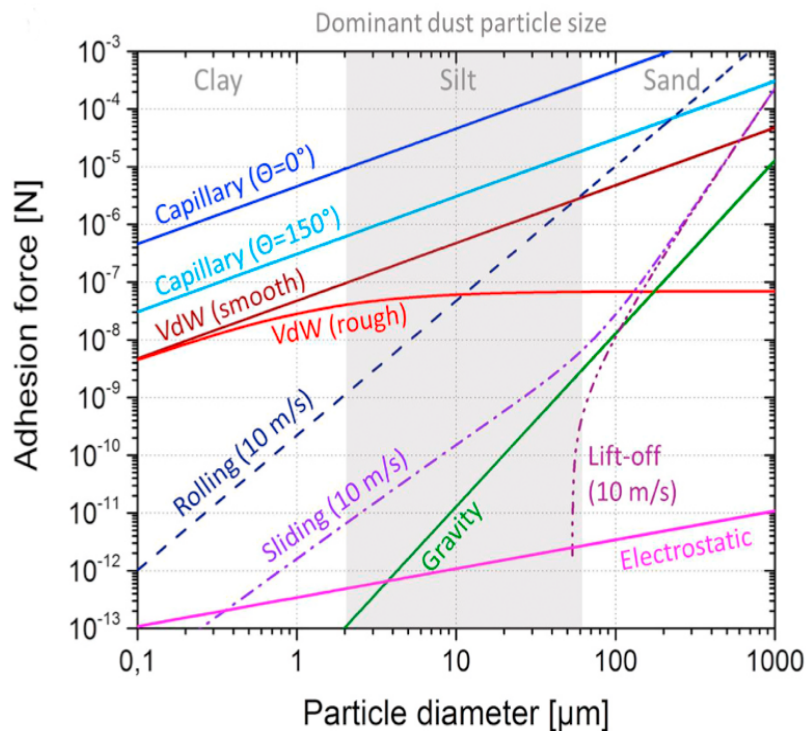


Abbildung 3.: Dominant vorherrschende Partikelgröße von Staub in Abhängigkeit der vorliegenden Kräfteinwirkung ohne spezifische Soiling-Mechanismen^[19]

Bei einer Luftfeuchtigkeit von weniger als 20 % kann Tau nicht entstehen, sodass VdW-Kräfte dominant sind. Bei über 20 % Luftfeuchtigkeit überwiegt der Effekt der kapillaren Kondensation^{[20] [21]}. Der Effekt nimmt jedoch ab Werten nahe 100 % wieder ab^[22]. Hier bereitet die Oberflächenbeschaffenheit bereits Unterschiede.

Bei kapillaren Kräften erhöhen raue Oberflächen die Adhäsion, da sich mehr Wasser in den Unebenheiten einlagern kann. Zudem entscheiden weitere Oberflächeneigenschaften wie Kontaktwinkel über die Stärke der kapillaren Bindung nach folgender Formel (2)^[17]:

$$F_K = \pi d \gamma_w (\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \quad (2)$$

$$\gamma_w = 0,0728 \frac{N}{m} \text{ surface tension }^{[23]}$$

Nach der Gleichung (2) ist die Kapillarhaftung zwischen hydrophilen Körpern ($\Theta < 45^\circ$) maximal, wenn die Kontaktwinkel Θ_1 und Θ_2 klein sind und minimal zwischen hydrophoben Körpern ($\Theta > 90^\circ$). Bei der VdW-Kraft bieten raue Oberflächen weniger Fläche und dadurch Möglichkeiten zur Bindung, sodass eine geringere Oberflächenbindungskraft vorherrscht als bei glatten Oberflächen (Formel 3). Die Berechnung der VdW-Kraft für glatte Oberflächen^[23] lautet wie folgt:

$$F_{VdW} = \frac{Ad}{12s^2} \quad (3)$$

$$A = 7 \times 10^{-20} \text{ J Hamakerkonstante für } SiO_2 - SiO_2; s = 0,35 \text{ nm Abstand der Trennung}$$

Eine weitere stetig wirkende Kraft, welche Soiling begünstigt, ist die Erdanziehung auf ein Partikel. Die Erdanziehung kann für Partikel wie folgt beschrieben werden:

$$F_G = \frac{1}{6} \varphi \pi d^3 g \quad (4)$$

$$g = 9,81 \frac{m}{s^2} ; \varphi_{Glas} = 2500 \frac{kg}{m^3}$$

Nach der Formel (4) ist die einzige Variable der Partikeldurchmesser d , der die Kraft der Erdanziehung beeinflusst, der Rest sind Konstanten.

2.3.3 Typen

Der dominierende Einflussfaktor beim Tau-induziertem *Soiling* ist die Kapillarkondensation. Dabei werden auf der Oberfläche des Moduls durch Oberflächenspannung des Wassers Verbindungen zum Partikel hergestellt, die diese an der Oberfläche halten. Innerhalb dieser kapillaren Adhäsion spielen die drei verschiedenen Typen *Caking*, *Cementation* und *Capillary Aging* eine entscheidende Rolle (Abb. 4).

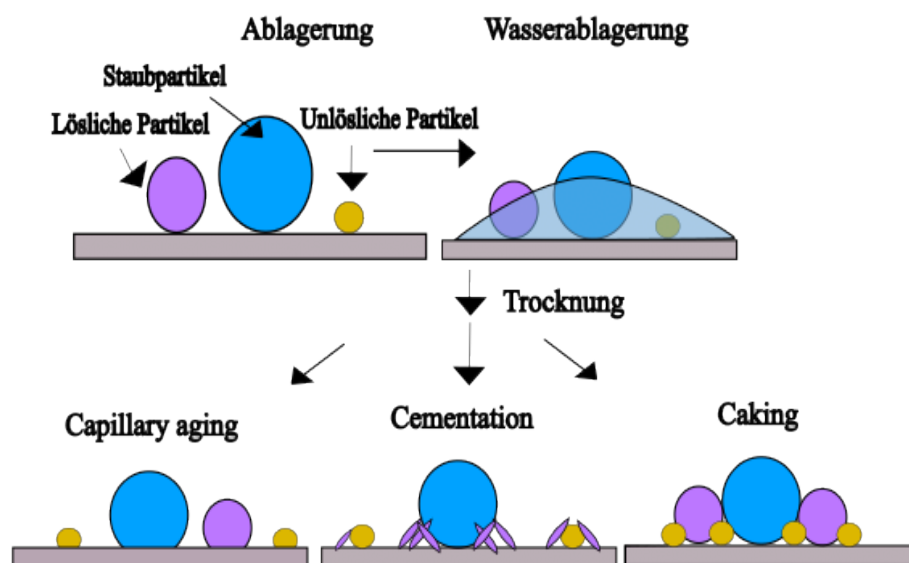


Abbildung 4.: Soiling-Mechanismus Cementation, Caking und Capillary Aging^[19]

Bei der *Cementation* bilden die wasserlöslichen Partikel nach Tau und folgender Trocknung Festkörperbrücken aus, mit denen sie selbst und die nicht-wasserlöslichen Partikel und Staubpartikeln an der Oberfläche haften. Die Adhäsion wird durch die Nadelstrukturen immens gesteigert und ist auch hauptsächlich für die Haftung verantwortlich. Beim *Caking* gelangen beim Tauprozess Wasser und Partikel in Kontakt und bilden eine Suspension und Agglomerate. Durch die Suspension werden Partikel angehoben, sodass der Einfluss der VdW-Kraft immens schwindet, während der der Kapillarkraft nun dominiert (Formel 2 und 3). Beim Trocknen konzentrieren sich suspendierte Partikel und setzen sich an der Glasoberfläche ab. Durch die erhöhte Mobilität der Suspension, kann diese besser in die Zwischenräume auf der bereits verunreinigten Glasoberfläche gelangen und ebenfalls große Partikel verbinden. Beim *Capillary Aging* kondensiert Flüssigkeit zwischen den Partikeln, sodass diese durch Kapillarkräfte an die Oberfläche gepresst werden, was mit einer Verformung der Partikel einhergeht. Nach der

Trocknung ist die VdW-Kraft durch Abstandsverkürzung des Partikels zur Oberfläche erhöht. Diese Partikel besitzen wiederum eine größere bindende Oberfläche und somit erhöhte Adhäsion.

2.3.4 Chemische Komponenten

Die chemische Betrachtung im *Soiling* fällt häufig auf Mineralogie und Vermeidungsstrategien wie dem *Coating* von Oberflächen. Die Bestandteile und chemische Zusammensetzung der in den Stäuben vorhandenen Mineralien sind hinreichend bekannt. Dabei unterscheiden sie sich deutlich je Örtlichkeit (Abb. 5).

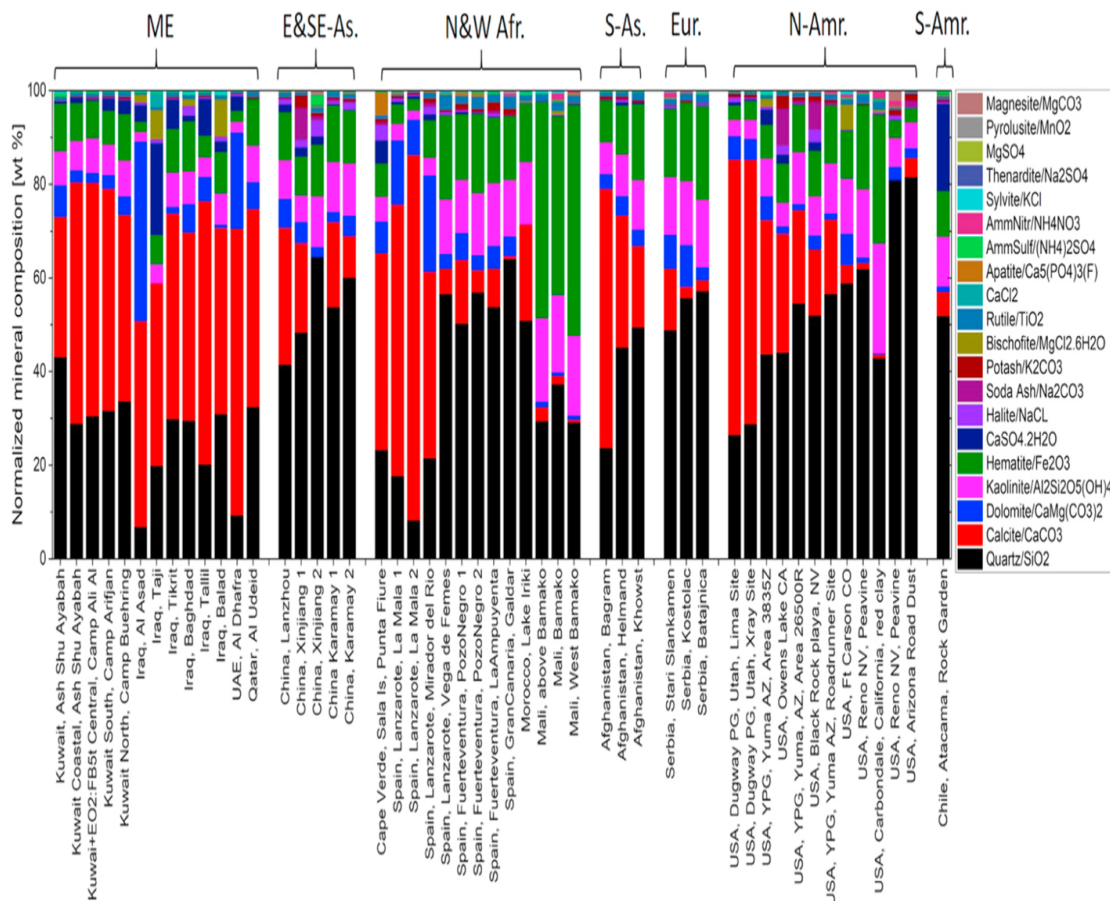


Abbildung 5.: Mineralbestandteile der Stäube mit einem Durchmesser von $<38 \mu\text{m}$ [24][25]

Außerdem stehen verschiedene lösliche Komponenten im Verdacht, Effekte wie z.B. *Cementation* zu begünstigen. Den Mineralien Palygorskit, Calcit und Dolomit wird hierbei besondere Aufmerksamkeit zuteil, da sie bei der *Cementation* die charakteristischen Nadelstrukturen ausbilden und somit für eine starke Haftung sorgen [26][27]. Es ist

davon auszugehen, dass die Mineralien unterschiedliche pH-Werte und Ionizität besitzen, sodass diese bei Kontakt mit Wasser und Wärme miteinander reagieren können.

2.4 Vermeidungsstrategien

2.4.1 Anti-Soiling-Coat

Ein Anti-Reflection-Coation (ARC) kann die Reflexionsrate verringern und somit die Transmissionsrate von 92 % auf 99 % erhöhen^[28]. Folglich kann mehr Transmission und Absorption an der Halbleiterschicht stattfinden und somit der Stromertrag erhöht werden. Beim Anti-Soiling-Coat (ASC) wird *Soiling* häufig durch Veränderung des *Water-Contact-Angle* (WCA) reduziert, indem der Oberfläche eine erhöhte Hydrophobie oder Hydrophilie verliehen wird. Durch die Änderung der Oberflächeneigenschaften kann die Mobilität der Tropfen an der Oberfläche erhöht oder verringert werden und somit die Adhäsion der Partikel verringert. Dies hat ebenfalls einen Einfluss auf die Kapillare Kraft, die sich wie in der Formel (2) in Kap.2.3.2 berechnen lässt. Die Reduktion der Kapillarkraft erfolgt, da es die kapillare Adhäsion für hydrophobe Oberflächen durch das Verhindern der Bildung von stabilen Menisken oder durchgehenden kapillaren Brücken beeinflusst und reduziert. Auf die VdW-Kraft jedoch, besitzt die ASC keinen Einfluss da der Winkel der Kontaktfläche nach der Formel (3) irrelevant ist. Lediglich Partikelgröße und Abstand der Partikelfläche zur Trägerfläche sind Variablen die einen Einfluss auf die Kraft der VdW haben.

Durch die Veränderung der Winkelkontaktstelle reduzieren ASCs generell kein *Soiling*, dass nach den Mechanismen *Caking*, *Capillary Aging* und *Cementation* an den Oberflächen verstärkt haftet. Daher sind ASCs für eine Vermeidungsstrategie Tau-induzierte *Soiling*-Prozesse nur bedingt geeignet.

2.4.2 Winkeleinstellung

In der Regel ist die Grundeinstellung der meisten PV-Anlagen zwischen 30° und 45°. Manche sind unveränderbar, manche stellen sich, je nach Sonnenstand, automatisch neu über verschiedene Achsen optimal ein. Die Winkeleinstellung hat für den regulären Betrieb zur Energiegewinnung eine immense Bedeutung, sodass das Tracking der Sonnenposition durchaus relevant ist. Steilere Winkel reichen aus, damit Staub durch Gravitationskraft nicht dauerhaft anhaften kann. Besser ist jedoch die Module komplett um 180° über Nacht verdeckt zu halten als Schutz vor Tau und Staubablagerung. Bei fixierten Anlagen steht die Verschiebung der Positionen zur Energiegewinnung im Konflikt zur Staubdeposition (Abb. 6).

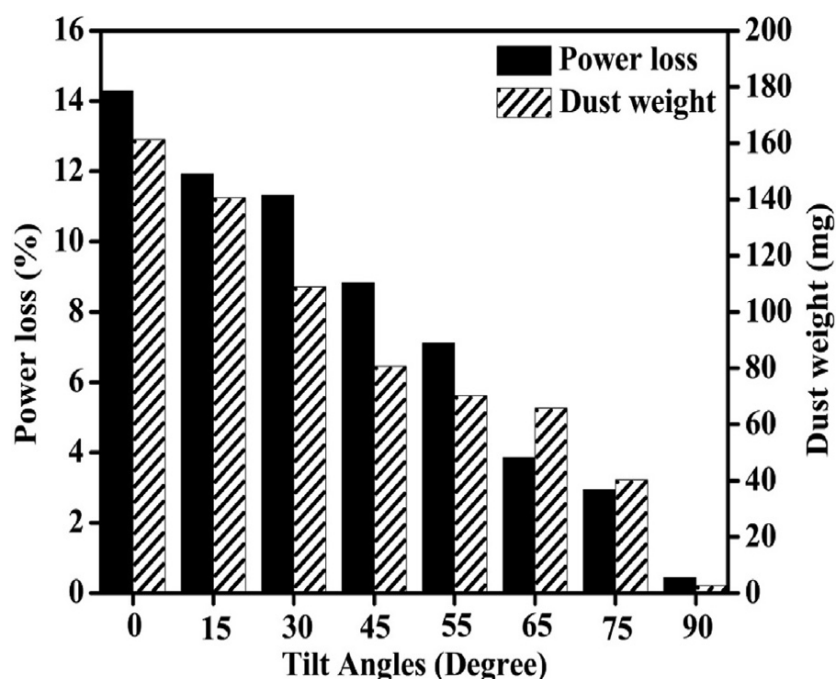


Abbildung 6.: Energieverlust und Staubgewicht in Abhängigkeit von Winkeleinstellung^[29]

Der Energiegewinn durch Neuausrichtung der Anlagen soll unter Stromeinsatz insgesamt positiv sein. Zudem soll die Ausrichtung aber möglichst steil sein, damit Staub sich schlechter ablagern kann. Ein Optimum gilt es zu finden. Gewisse Fakten lassen sich außerhalb der Abb. 6 noch einkalkulieren, wie z.B. Zeit. Im Nahen Osten sind Winde i.d.R. bei Nacht schwach, sodass steilere Winkel nur nachts ausreichen könnten, was gleichzeitig Taubildung erschwert.

2.4.3 Heizsysteme

Die Taubildung in Wüstengebieten entsteht an PV-Oberflächen durch Beteiligung des Phänomens der radiativen Kühlung² und ihrer hohen Infrarotemission. Die Oberflächen der PV-Module kühlen nachts besonders stark aus, sodass die Temperatur der Oberfläche bis zu 5 K niedriger ist als die der Umgebungstemperatur^[17]. In Kombination mit erhöhter, nächtlicher Luftfeuchtigkeit, entsteht Tau, der sich an der Oberfläche niederschlägt und sich mit Staubablagerungen verbinden kann (Abb. 6). Ein ASC könnte bei dem Entstehen vom Tau-induziertem *Soiling* in diesem Fall nicht unterstützen, da diese auf größere Mengen Wasser zur Selbstreinigung angewiesen sind^[34], sodass verschiedene Heizsysteme und Heizverhalten getestet wurden. Um diese Temperaturdifferenz zu erhöhen, werden Heizmodule eingesetzt, um Tau und somit Tau-induzierte *Soiling*-Prozesse zu reduzieren. In Versuchen unter Outdoor-Bedingungen, weisen beheizte Oberflächen niedrigere Staub-Konzentrationen auf^[30].

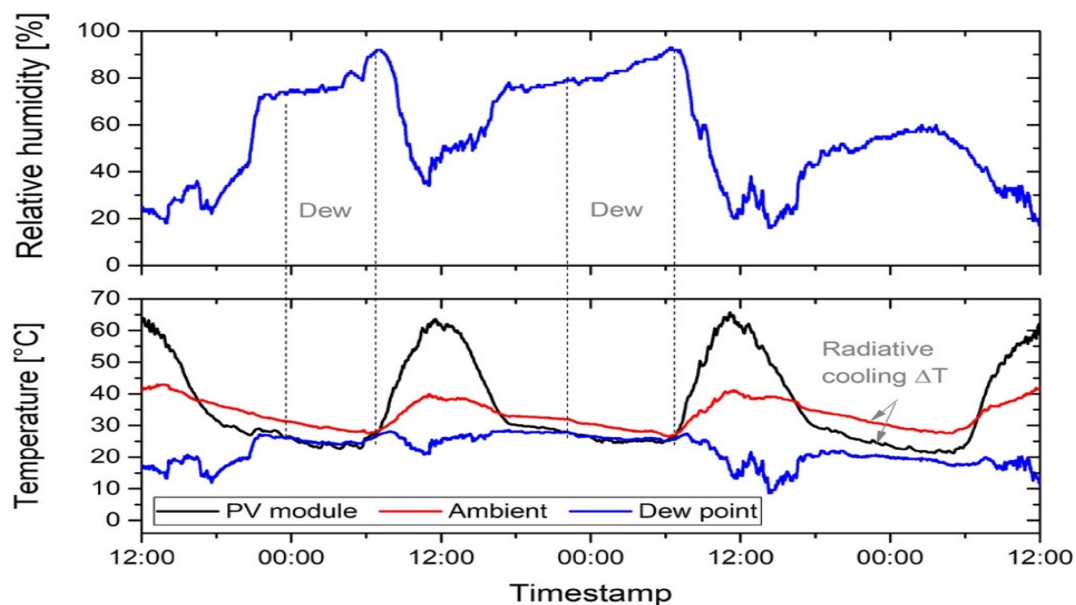


Abbildung 7.: Aufnahme des Verlaufes der Temperatur- und Feuchtigkeitsanalyse von PV-Modulen, Umgebungstemperatur und Taupunkttemperatur über mehrere Tage in Doha^[19]

In der Praxis verwendete Heizsysteme stellen z.B. Heizmodule (Zwei-Stufen-Regelung oder PID-Regelung) und Latentwärmespeicher (organisch oder paraffinhaltig) dar.

² Radiative Kühlung: Synonym für Strahlungskühlung

3 Zielstellung der Arbeit

Die primäre Zielstellung der vorliegenden Arbeit ist die Charakterisierung und Erfassung der Haftfestigkeit verschiedener Stäube, um Rückschlüsse auf deren Verhalten bei Tau-induzierten *Soiling*-Prozessen ziehen zu können. Dies schließt physikalisch-chemische Untersuchungen, als auch Versuche zum Initialisieren eines selbst hergestellten Oberflächenfeuchte-Sensors ein. Dieser ist Teil einer aktiven Potential-Integral-Heizregelung (PI-Heizregelung) und soll anhand der hier ermittelten Ergebnisse und Erkenntnisse ausgelegt und optimiert werden, um in Zukunft Tau zu vermeiden und somit die Phänomene *Cementation*, *Caking* und *Capillary Aging*, die die Erhöhung der Haftfestigkeit von Verschmutzungen an der Photovoltaik-Oberfläche verursachen, zu verhindern.

4 Material und Methoden

4.1 Hygroskopie

Zur Messung der Aufnahmefähigkeit von Wasser, wurde eine Hygroskopie mit allen Stäuben auf zwei Weisen durchgeführt. Zunächst wurden 5 g aller Stäube in Flaschen gefüllt und offen in ein weiteres aber verschließbares, luftdichtes Gefäß positioniert. Das Gefäß wurde je nach eingesetztem, gelöstem Salz auf eine bestimmte Luftfeuchtigkeit (RH%) befüllt und eingestellt. Die Staubflaschen lagen erhöht und waren nicht im Kontakt mit der Lösung. Die Bestimmung der Feuchtemasse der Stäube erfolgte nach 24 h Okulation. Das Trockengewicht wurde nach 1 h bei 140 °C gemessen und das Aufnahmevermögen in % nach der Formel 5 berechnet.

$$Masse_{Gewichtsverlust} [\%] = \frac{Masse_{feucht} - Masse_{trocken}}{\frac{Masse_{sand}}{100}} \quad (5)$$

Weitere Ergebnisse wurden durch die Variationen Luftfeuchtigkeiten und Temperaturen während der Okulation ermittelt. Hierfür wurde die Temperatur während der Okulation im Ofen auf 20° C, 40 °C und 60 °C zu je unterschiedlicher RH% eingestellt und anschließend wieder getrocknet, um das Trockengewicht zu bestimmen. Insbesondere für KCl ist zu beachten, dass die RH% stärker abhängig von der Temperatur ist und sich somit verändert (Abb. 8).

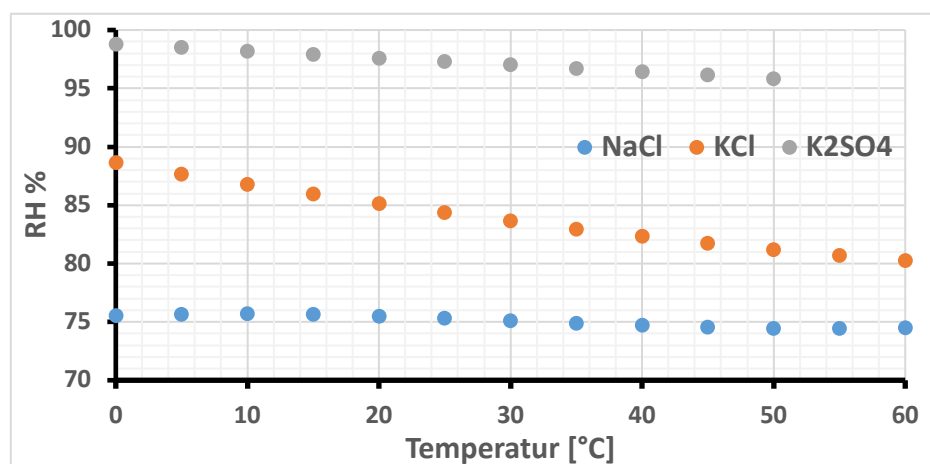


Abbildung 8.: Deliqueszenz reiner Salze für NaCl, KCl und K₂SO₄ [31]

4.2 Lichtmikroskop

Die Staubbedeckung aller Proben wurde vor und nach der Betauung lichtmikroskopisch untersucht und mittels dem Software-Programm ImageJ ausgewertet. Zunächst wurden Bilder zur Auswertung des Leckstromes mit einem 5x-Objektiv im Dunkelfeld-Modus 5x8 (Reihe/Zeile) aufgenommen. Anschließend wurde das Mosaik-Aufnahmeverfahren der integrierten Software des Mikroskops von Carl Zeiss Axio Scope.A1 mit motorisierten XYZ-Achsen verwendet. Nach diesen Einstellungen und Verfahren in Abb. 9 wurden alle Bilder aufgenommen.

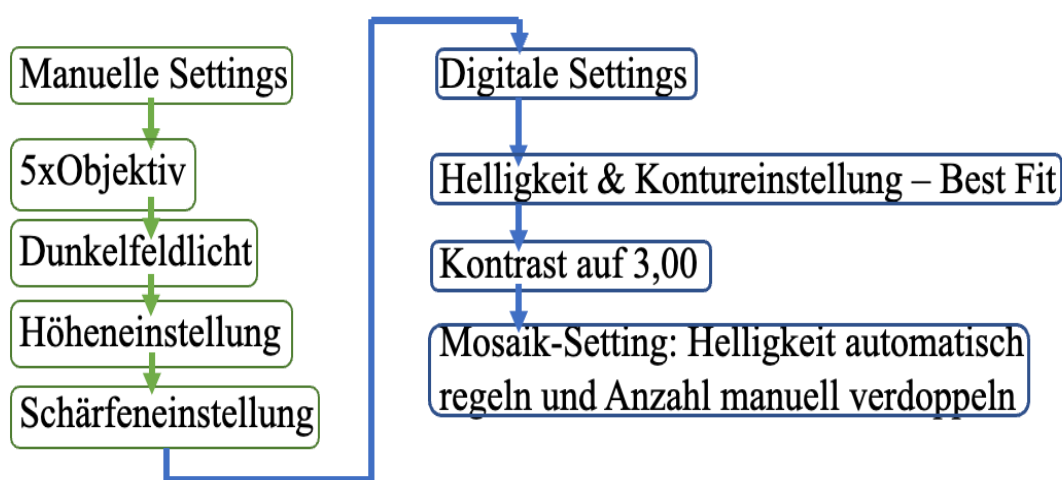


Abbildung 9.: Manuelle und digitale Settings zur optischen Analyse mit dem Lichtmikroskop

Vor und nach der Betauung wurden die erhobenen Daten in ImageJ analysiert und ausgewertet. Dabei wurde ermittelt, welche Partikel mit welchem Durchmesser wie häufig an der Glasoberfläche vorhanden waren und wie stark diese die Oberfläche verdeckten. Darüber hinaus wurde die Anzahl und der Durchmesser der Partikel ermittelt, welche sich nach der Betauung und nach einem Windstoß von ca. $15 \frac{m}{s}$ noch auf der Glasoberfläche befanden.

Die Ermittlung der Verteilung erfolgte in Abhängigkeit von den Partikeldurchmessern, Betaungsgrad, initialem Belegungsgrad und Belegungsgrad nach Windstoß, aus welcher sich folglich die Belegungsrate nach Formel 6 berechnen lässt:

$$\text{Belegungsrate} = \frac{c_{wb}}{c_{ini}} \quad (6)$$

Die Berechnungen für die Statistische Auswertung erfolgten unter der Annahme von perfekt-kreisrunden Partikelformen. Zudem erfolgte die Einteilung in ein Partikeldiameter nach folgender Definition:

$$\lfloor x \rfloor = \max\{k \in \mathbb{Z} \mid k \leq x\} \quad (7)$$

Partikeldurchmesser unter 1 μm konnten mit dem gewählten Objektiv des Lichtmikroskops nicht erkannt werden und Werte darüber wurden automatisch zu Partikeldiameter 2 μm gezählt.

4.3 pH-Messung

Mittels einer pH-Messsonde wurde der pH-Wert und die korrelierende Spannung der Stäube nach der Methode 9045D: „*Soil and Waste pH*“ bestimmt^[32]. Hierfür wurden die Stäube in Gefäße 1:2 (w/v) 5 g Staub und 10 ml destilliertem Wasser zusammengegeben und für 5 Minuten verrührt. Anschließend konnten die Proben für eine Stunde ruhen, bis der Überstand klar war. Danach wurde der Überstand in ein schmaleres Gefäß zum einfacheren Messen mit der Sonde dekantiert. Die Proben zur Messung, als auch die verwendeten Pufferlösungen zur Kalibrierung befanden sich bei konstant 21 °C.

4.4 Sensorstrommessung

4.4.1 TOPAS - Soilingstand

Der TOPAS-Soilingstand (Abb. 10) wurde zur Herstellung aller Proben für die optischen und statistischen Analysen, als auch für die Messungen der Korrelationsverhältnisse verwendet.

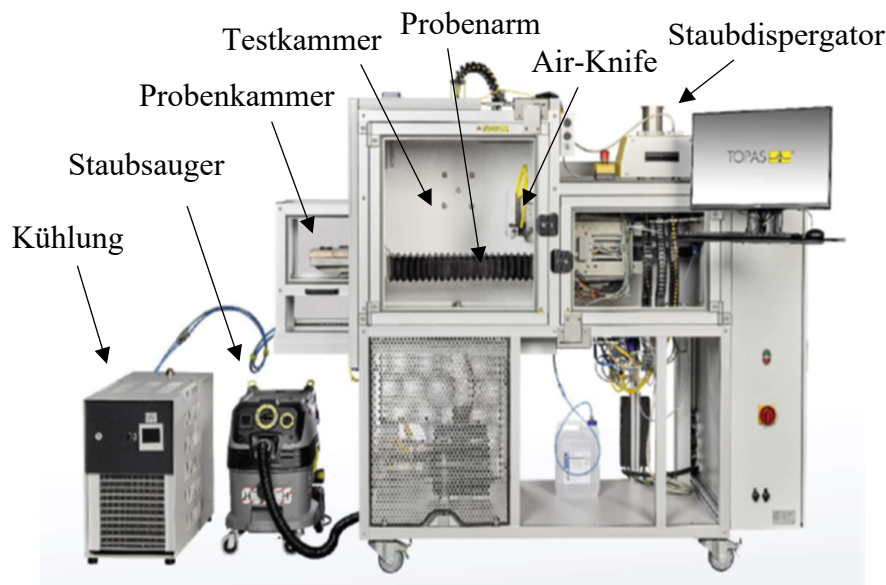


Abbildung 10.: TOPAS C117 der TOPAS GmbH – Soilingstand

Der Staub wurde innerhalb des Staubdispergator ausgewechselt und mittels Druckluft über die Decke in die Testkammer befördert. Dabei wurde auf eine gleichmäßige Staubverteilung geachtet, da diese zur initialen Staubdeposition und zur Vergleichbarkeit von Proben unerlässlich ist. Die Glasproben mit dem Oberflächenfeuchte-Sensor wurden in die Probenkammer auf die Platte des Probenarms gelegt. Der Oberflächenfeuchte-Sensors bestand aus zwei Ag-Epoxid-Streifen und maß den Strom bei 40V Einspeisung. Die Platte war beheizbar und durch den Probenarm mobil, sodass die Proben zwischen Probenkammer und Testkammer befördert werden konnten. Der Windstoß wurde durch den *Air-Knife* simuliert, der fünf Mal über die Probe fuhr. Durch Ankopplung an den Staubsauger wurde ein Windstoß von $15 \frac{m}{s}$ verursacht, der die größeren Partikel nach der Betaung von der Oberfläche weggestoßen hat.

4.4.2 Messungen zur Korrelation von Sensorstrom und Belegungsrate

Insgesamt wurde der TOPAS und die Messung zur Korrelation von Sensorstrom und Belegungsrate nach folgendem Schema in Abb. 11 durchgeführt.

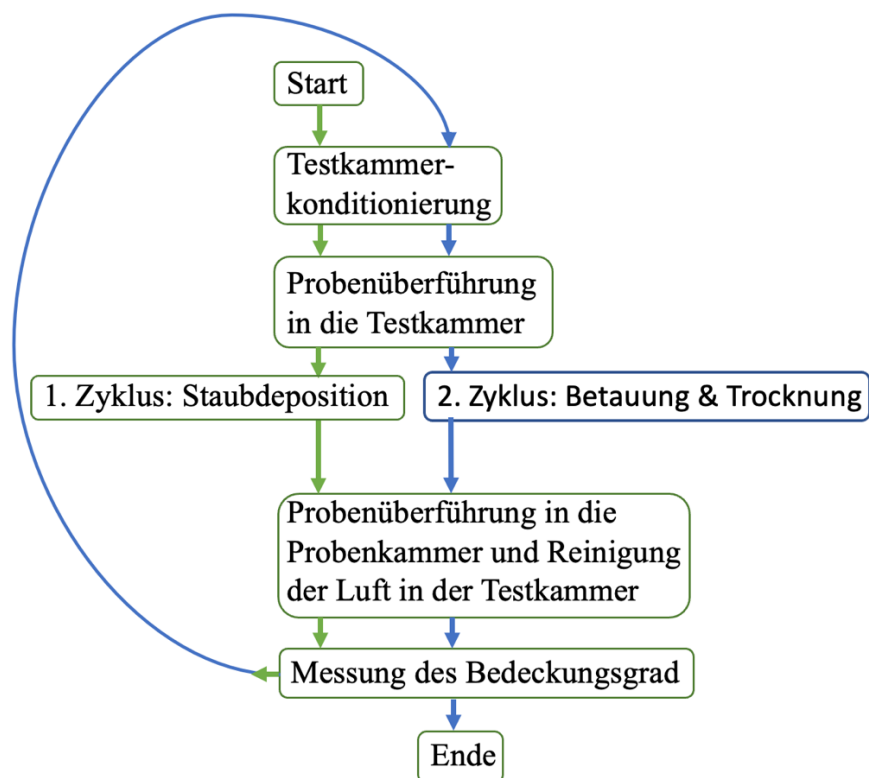


Abbildung 11.: Ablauf der Messungen zur Korrelation von Sensorstrom und Belegungsrate

Wie in Abb. 11 dargestellt, wurde der Sensorstrom über den gesamten Zeitraum gemessen und darüber hinaus weitere Parameter wie Testkammer-Temperatur und Luftfeuchtigkeit aufgezeichnet. Die Lufttemperatur in der Probenkammer betrug $22\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$ und RH 60 %. Die Akklimatisierung nach Probenüberführung in die Testkammer dauerte 10 Minuten. Die Staubdeposition erfolgte mit einer Deposition von 12 % mit einer Dispersionszeit ($t\text{-Disp.}$) von einer Minute und Depositionsdauer von 30 Minuten. Die Betauung erfolgte bei einer voreingestellten ΔT_{dp} über einen Zeitraum von 20 Minuten. Die Trocknung wiederum wurde 10 Minuten bei 40 °C durchgeführt.

4.4.3 Messungen zur Korrelation von Sensorstrom und Belegungsrate

4.4.4 zur Luftfeuchtigkeit

Zur Ermittlung vom Stromverhalten des Oberflächenfeuchte-Sensors unter steigendem Benetzungsgrad der Oberfläche, sowie unter Aussetzung unterschiedlicher Luftfeuchtigkeiten wurde verschiedene Messreihen durchgeführt, mit dem Ziel festzustellen, wie das Verhalten der Strommesswerte ausfällt oder gar eine Abhängigkeit besteht. Ein gereinigtes *Float-Glass* mit einem Maß von 10x10x2 cm (FG10) wurde für 1h bei definierter Luftfeuchtigkeit durch Verwendung einer gesättigten Salzlösung (75,47 %, 85,11 % oder 97,59 %) im Autoklaven (Abb. 12) inkubiert. Am Rand des FG10s war der Ag-Oberflächenfeuchtesensor positioniert. Unter dem Autoklaven war eine Heizplatte auf 21 – 22 °C eingestellt und auf halber Höhe des Autoklaven befand sich zudem ein Ventilator zur gleichmäßigen Verteilung der Feuchtigkeit in der Luft. Die Strommesswerte der letzten 20 Minuten wurden zur Auswertung verwendet.

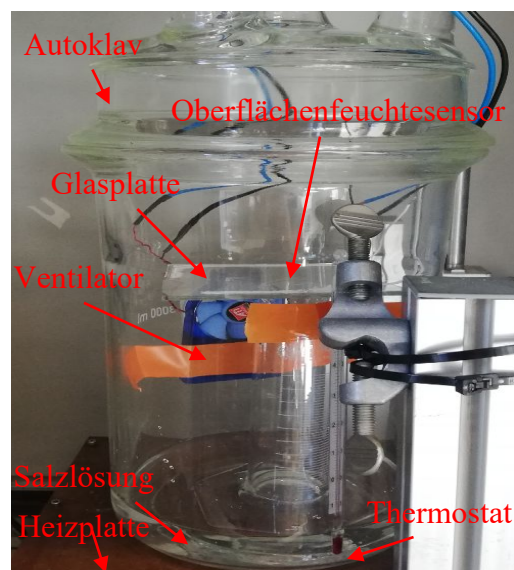


Abbildung 12.: Messungen zur Korrelation von Sensorstrom und Belegungsrate zur Luftfeuchtigkeit im Autoklaven

Im Anschluss erfolgten der Staubdepositions- und Betauungszyklus im Soilingstand wie in Abb. 11 beschrieben für FG10 und FG5 (Maß: 5x5x2 cm) bei stets 1 K ΔT_{dp} . Das FG5 wurde im Gegensatz zum FG10 dem Windstoß entzogen um vorher die Belegungsrate zu ermittelt und im Anschluss zu reinigen. Für das FG10 erfolgten ohne Zwischenreinigung insgesamt 5 Zyklen mit je einer eingestellten Luftfeuchtigkeit.

5 Ergebnisse

5.1 Hygroskopie

Das Aufnahmevermögen konnte anhand des gemittelten Gewichtsverlustes der Stäube zu unterschiedlichen Bedingungen erfolgreich untersucht und ermittelt werden (Abb. 13). Dabei zeigten die Stäube aus *Cerro Paranal*, *Jordan*, *Qatar STF*, *Morocco* und aus *Atacama Desert* einen Tal- oder fallenden Verlauf, während das Aufnahmevermögen bei allen Versuchen mit Stäuben aus *Dunhuang* und *Middle East* bei steigender Luftfeuchtigkeit und konstanter Raumtemperatur stiegen. Die Aufnahmefähigkeit von *Arizona quarzfrei* war bei allen RH% vergleichbar gering bei ca. 0,27 % und ist so-

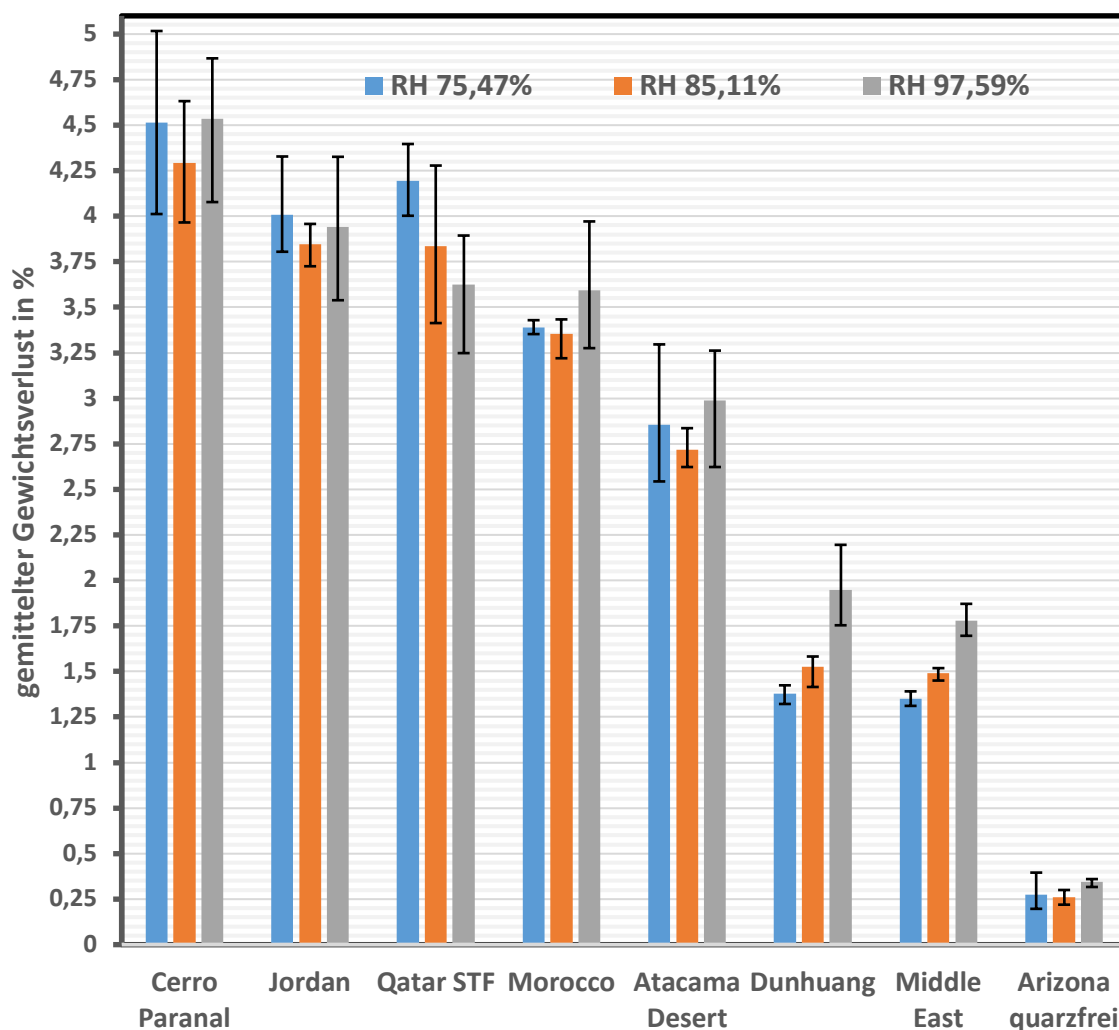


Abbildung 13.: Gemittelte Gewichtsverluste von Stäuben unter Aussetzung von Deliqueszenz reiner Salze unter Raumtemperatur zu definierten Luftfeuchtigkeiten mit Standardfehler

mit der Staub, mit der geringsten Aufnahmefähigkeit. Kein Staub ist in den Ergebnissen nach Abb. 13 nach Definition hygroskopisch (>5 % Feuchtigkeitsaufnahme), lediglich *Cerro Paranal* nähert sich diesem Wert mit über 4,5 % Aufnahmefähigkeit. Weitere Ergebnisse konnten wie in Abb.14 generiert werden. Deutlich zu erkennen ist das gestiegene Vermögen der Feuchtigkeitsaufnahme von *Cerro Paranal*. Bei einer Temperatur von 40 °C und 60 °C während der Okulation lag die Aufnahmemenge von *Cerro Paranal* bei 5,98 % und 6,88 % und ist somit zu den gegebenen Konditionen hygroskopisch. Alle anderen untersuchten Stäube zeigten kaum Veränderung im Vergleich zu den Ergebnissen in Abb. 13.

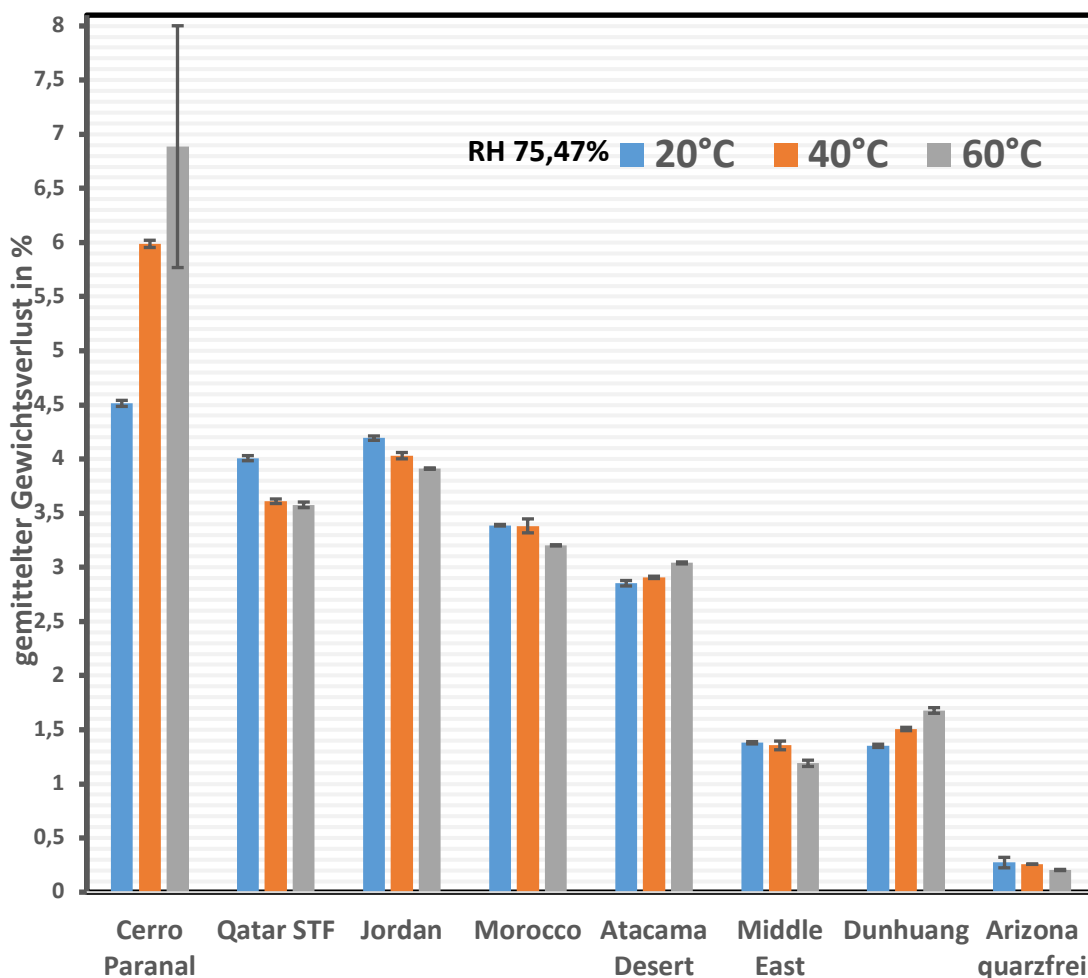


Abbildung 14.: Gemittelter Gewichtsverlust von Stäuben. Feuchtigkeitsaufnahme bei RH 75,47 % zu unterschiedlichen Temperaturen. Darstellung der Mittelwerte sowie Standardfehler

Bei der Untersuchung der Feuchtigkeitsaufnahme bei RH 85,11% zu unterschiedlichen Temperaturen während der Okulation erhöhte sich das Vermögen bei *Cerro Paranal* weiter. Alle anderen Stäube verhielten sich nach wie vor unverändert. Das Vermögen von *Cerro Paranal* machte einen immensen Sprung von einem gemittelten Gewichtsverlust von 4,6 % auf knapp 15 % (Abb.15). Ähnlich dem Verlauf bei RH 75,45 % überschritt es in den bereits erreichten maximalen Wert von 6,88 % (Abb. 14).

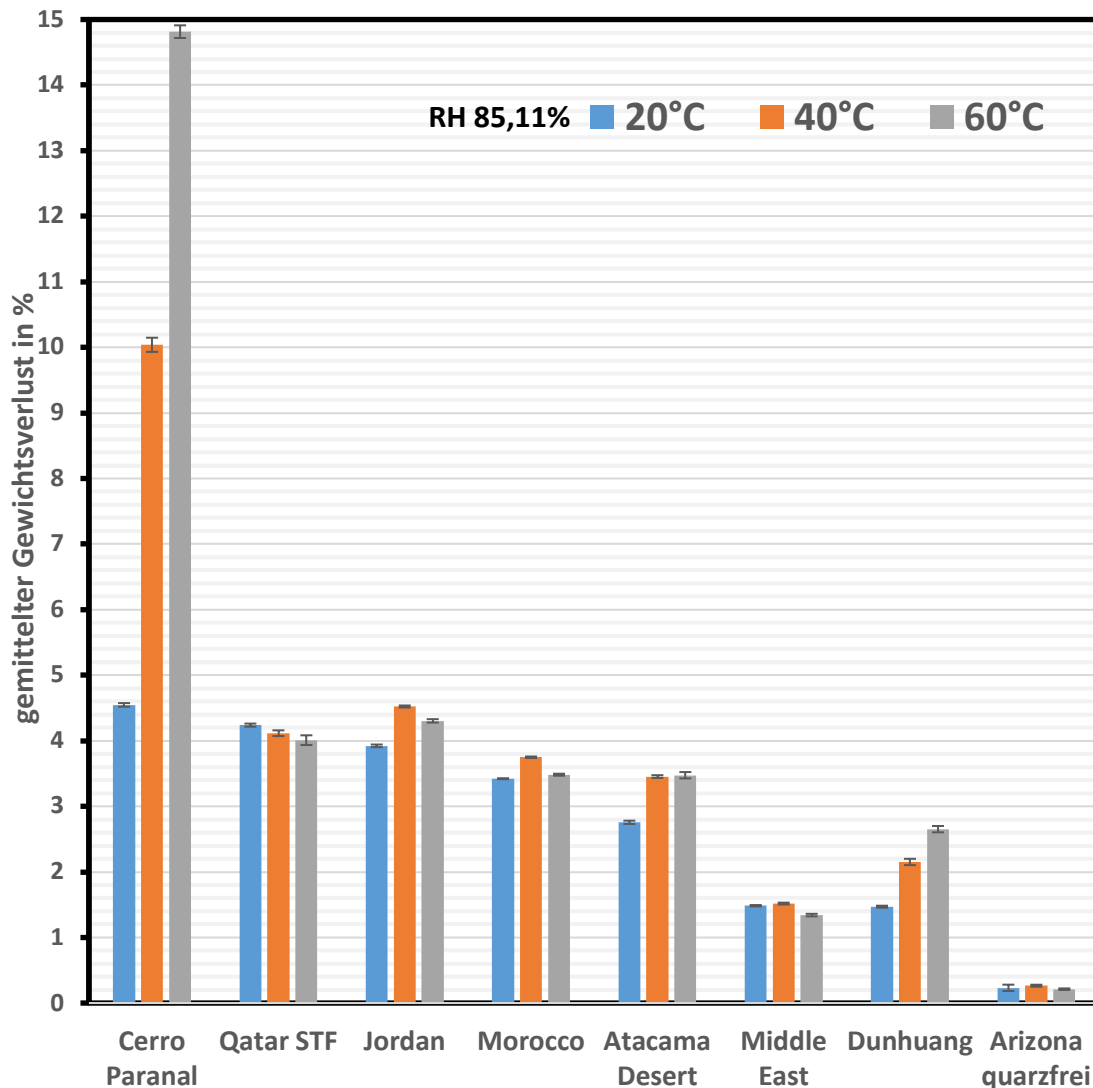


Abbildung 15.: Gemittelter Gewichtsverlust von Stäuben. Feuchtigkeitsaufnahme bei RH 85,11% zu unterschiedlichen Temperaturen. Darstellung der Mittelwerte sowie Standardfehler

Dieser Wert von knapp 15 % Gewichtsverlust konnte bei einer Erhöhung der RH% nicht gesteigert werden.

Letztlich ist der Verlauf bei RH 97,59 % und dem bei RH 85,11 % vergleichbar. *Cerro Paranal* erreichte lediglich bereits bei 40 °C Okulationstemperatur seinen Maximalwert und alle anderen Stäube außer *Middle East* und *Arizona quarzfrei* zeigten ein deutlich gesteigertes Aufnahmevermögen mit steigender Okulationstemperatur. So lagen die Werte der Aufnahmevermögen von *Qatar STF*, *Jordan* und *Atacama Desert* erstmalig bei 60 °C Okulationstemperatur über 5 %.

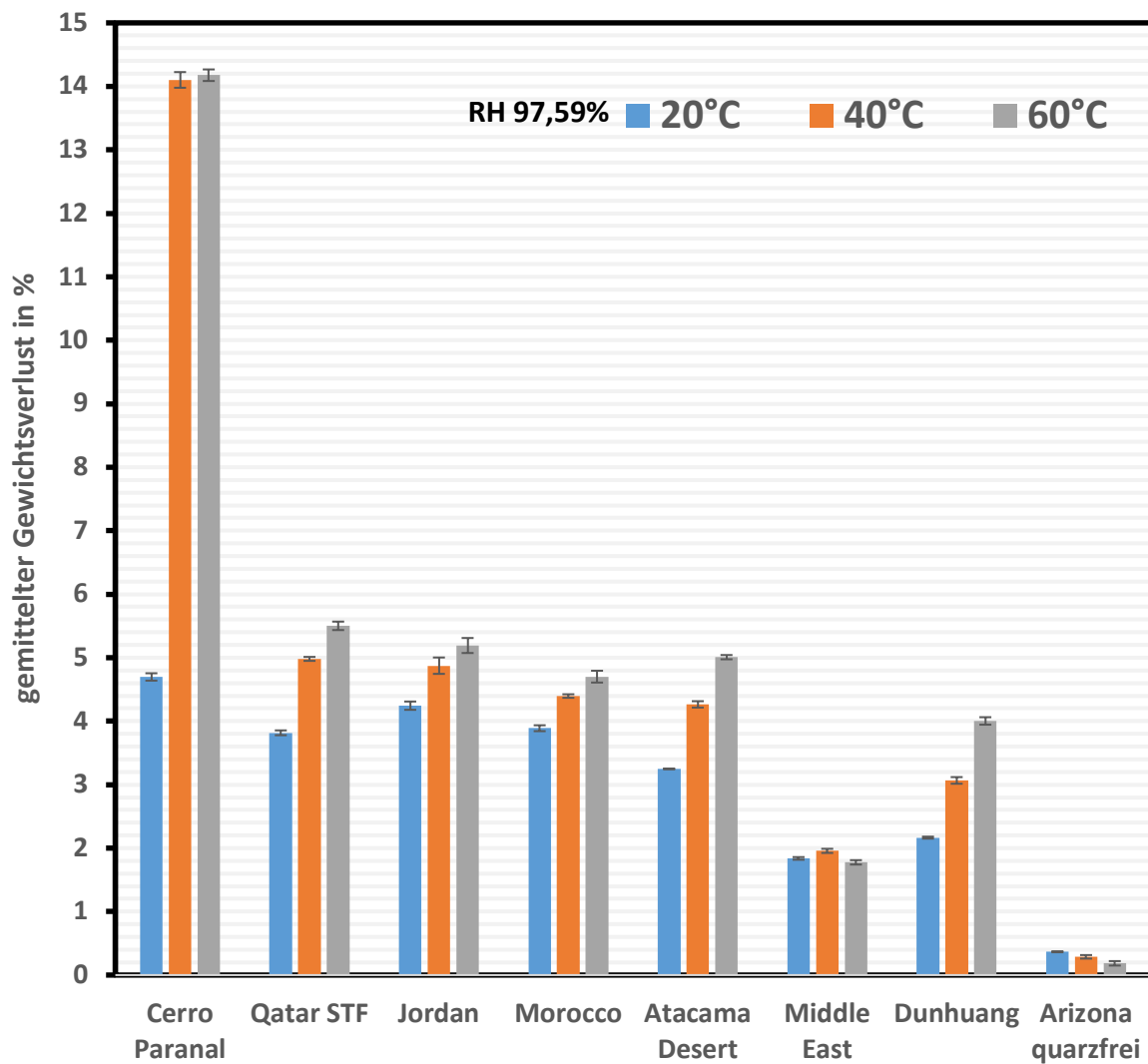


Abbildung 16.: Gemittelter Gewichtsverlust von Stäuben. Feuchtigkeitsaufnahme bei RH 97,59 % zu unterschiedlichen Temperaturen. Darstellung der Mittelwerte sowie Standardfehler

5.2 pH - Messung

Die Ergebnisse der pH-Messungen von Stäuben zeigen, dass kein Staub sich im neutralen (pH 7) oder aziden (pH 4-7) Bereich befand. Alle gemessenen pH-Werte lagen bei 7 (Tab. 1). Die pH-Messungen begannen ab einem gemittelten Wert von 7,89 bei *Morocco* und stiegen in kleinen Intervallen bis zu einem pH-Wert von 8,18 für *Atacama Desert*. Leicht basisch dagegen waren die Stäube *Dunhuang* und *Middle East* mit einem pH-Wert von 8,4. Herausstechend war der Wert von *Arizona quarzfrei* mit einem pH-Wert von 9,38.

Tabelle 1.: Gemittelte pH/mV – Werte der Messergebnisse mit Standardfehler (SEM)

	pH	SEM	mV	SEM
<i>Morocco</i>	7,89	0,01	-40,00	0,99
<i>Qatar STF</i>	7,92	0,03	-41,33	1,39
<i>Jordan</i>	7,94	0,02	-42,30	1,00
<i>Cerro Paranal</i>	7,95	0,01	-43,37	0,14
<i>Atacama Desert</i>	8,18	0,03	-55,93	2,32
<i>Dunhuang</i>	8,40	0,03	-68,57	1,77
<i>Middle East</i>	8,41	0,04	-69,47	1,52
<i>Arizona quarzfrei</i>	9,38	0,11	-124,67	6,09

5.3 Optische Analysen

5.3.1 Lichtmikroskop

Die lichtmikroskopischen Untersuchungen der Belegungsrate in Abhängigkeit der ΔT_{dp} zeigten deutlich folgendes Schema, wie in Abb. 17 für *Morocco*-Staub zu sehen ist. Ausgehend von einer gleichen initialen Belegungsrate aller Proben war der Belegungsgrad für Proben über einer ΔT_{dp} von 2 K während der Betauung geringer als bei Partikel mit einer ΔT_{dp} von weniger als 2 K während der Betauung, da die Partikel schlecht im Trockenen an der Glasoberfläche haften können und es noch zu keinem deutlichen Phänomen wie *Cementation* unter Tau kommt. Unter einer ΔT_{dp} von 2 K während der Betauung war ein deutlicher Anstieg der Anzahl von anhaftenden Partikeln erkennbar. Die Belegungsrate war dabei von einer ΔT_{dp} von 1,6 K bis 0,48 K vergleichbar hoch, sodass zwischen einer ΔT_{dp} von 3 K und 1,6 K der kritische Punkt für *Morocco*-Staub zu erwarten ist.

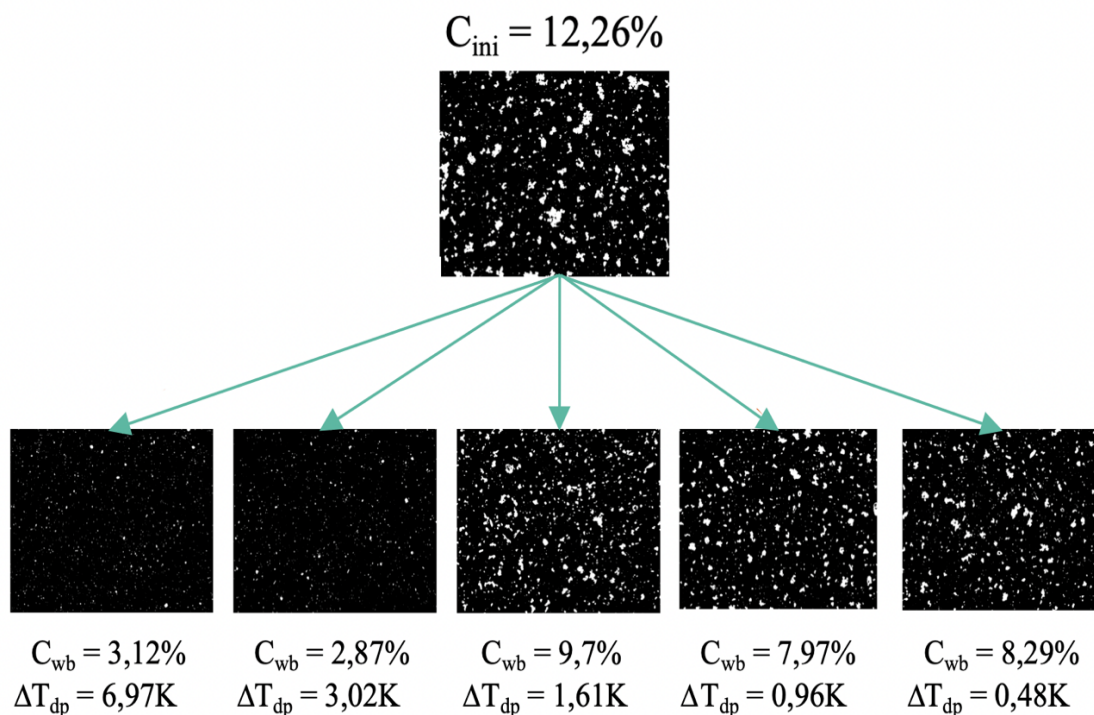


Abbildung 17.: Ausgehend der gleichen initialen Belegungsrate aller Proben für Morocco-Staub sind nach der Betauung zu unterschiedlichen Taupunktunterschieden zur Umgebungstemperatur verschiedene Belegungsrate nach Windstoß zu beobachten

Gleiche Korrelationen zwischen ΔT_{dp} während der Betauung zum Belegungsgrad wie für den *Morocco*-Staub (Abb. 17) scheinen auch für alle anderen Stäube zu gelten. So konnte ebenfalls bei *Middle-East*-Staub das gleiche Schema beobachtet werden (Abb. 18). Die initiale Belegungsrate war vergleichbar hoch bei *Morocco*- und *Middle-East*-Staub wie auch die Belegungsrate nach Windstoß im Verhältnis zur ΔT_{dp} . Die graphischen Ergebnisse sind vergleichbar mit den Daten der Strommessungen aus Kap. 5.5 und geben ebenfalls einen kritischen Punkt von einer ΔT_{dp} von ca. 2 K an, ab dem sich *Soiling* manifestiert.

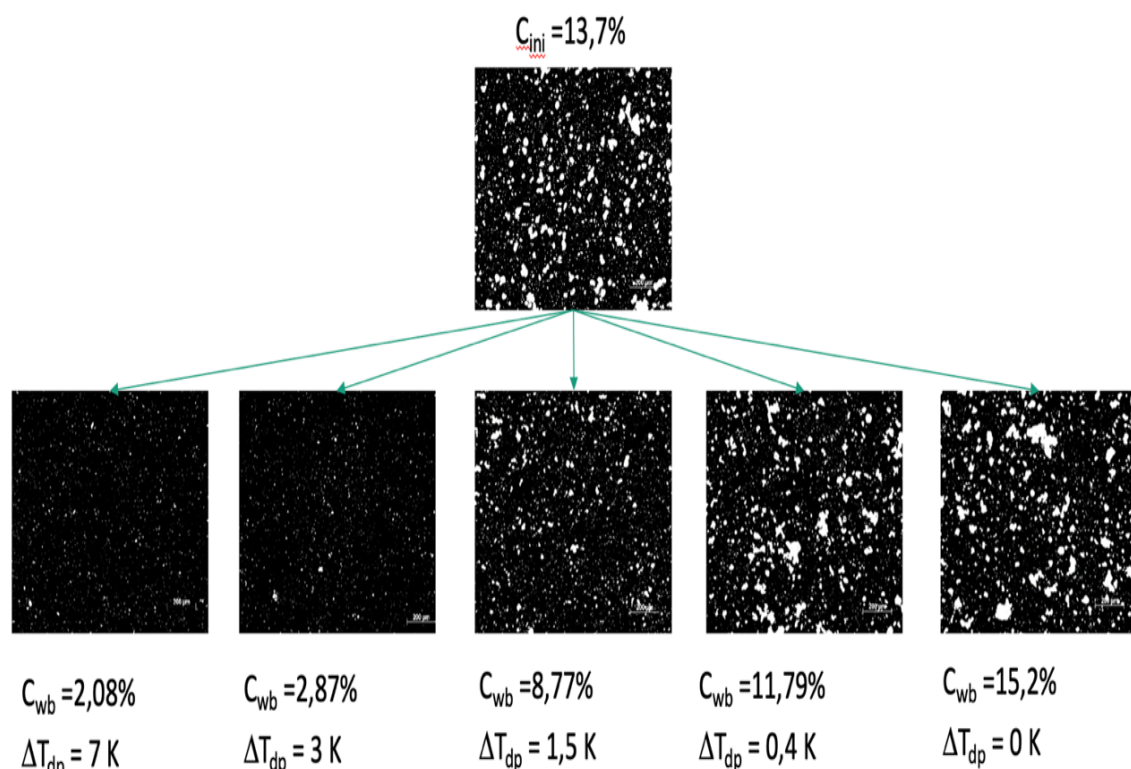


Abbildung 18.: Ausgehend der gleichen initialen Belegungsrate aller Proben für *Middle-East*-Staub sind nach der Betauung zu unterschiedlichen Taupunktunterschieden zur Umgebungstemperatur verschiedene Belegungsraten nach Windstoß zu beobachten^[33]

Bei einigen Bildern wurde bei vielfacher Vergrößerung auch *Caking* (Abb. 19a) und Nadelstrukturbildung bei *Cementation* (Abb. 19b) entdeckt. *Caking* war bei *Qatar*-Staub bei ΔT_{dp} von 0 K zu sehen. Um ein Agglomerat ($>0,01 \text{ mm}^2$) aus vielen Einzelpartikel bildeten sich zudem vorhofartig viele kleinere Partikel von nur einigen μm Größe. Dies ist nur um größere Agglomerate zu sehen, da die Zwischenräume nahezu staubfrei sind. Anders so bei der *Cementation*. Zwar häufen sich die Nadelstrukturen zu größeren Inseln zusammen, scheinen aber weniger Ordnung zu besitzen als beim *Caking*. Wesentlich besser sind die Strukturen und Prozesse in den REM-Bildern im folgenden Kap. 5.3.2 zu sehen.

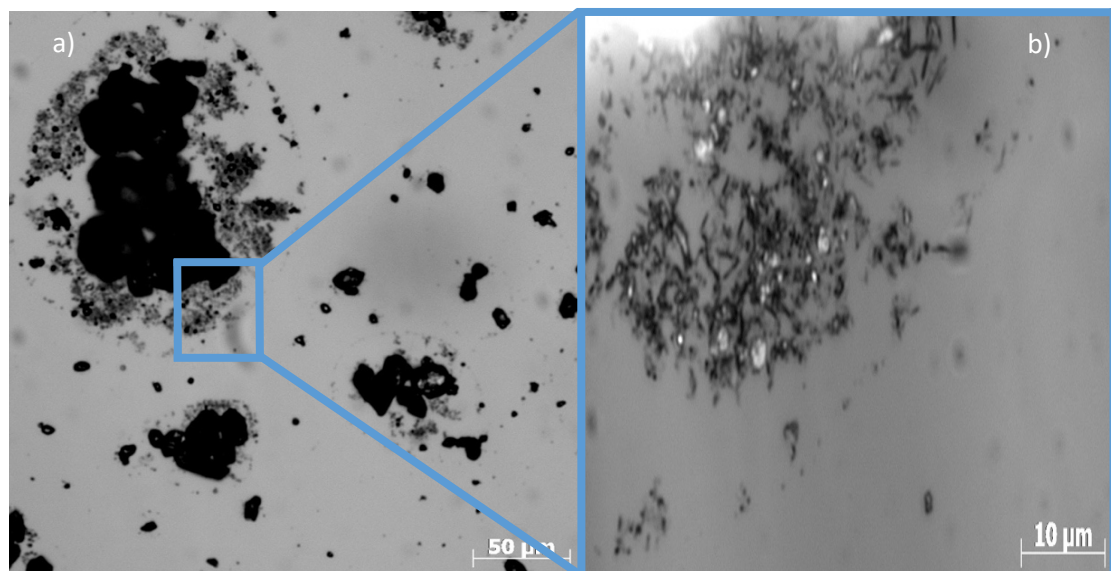


Abbildung 19.: a) *Caking*-Formation um agglomerierte Partikelverbund. Bild von *Qatar*-Staub bei einer ΔT_{dp} von 0 K nach Betauung und Windstoß mit einem 20x Objektiv. b) Nadelstrukturbildung vor Partikel beim *Cementation*. Aufnahme mit einem 100x Objektiv

5.3.2 Rasterelektronenmikroskop

Mit Hilfe des hochauflösenden Rasterelektronenmikroskop (REM) konnte eine Aufnahme von aneinanderhaftenden ca. $500 \mu\text{m}^2$ großen Partikeln, an deren Oberflächen weitere Partikel mit einem Durchmesser von wenigen μm hafteten, erstellt werden (Abb. 20a). In der Übersicht Abb. 20b sind die Gruppierungen zu Inseln gut erkennbar.

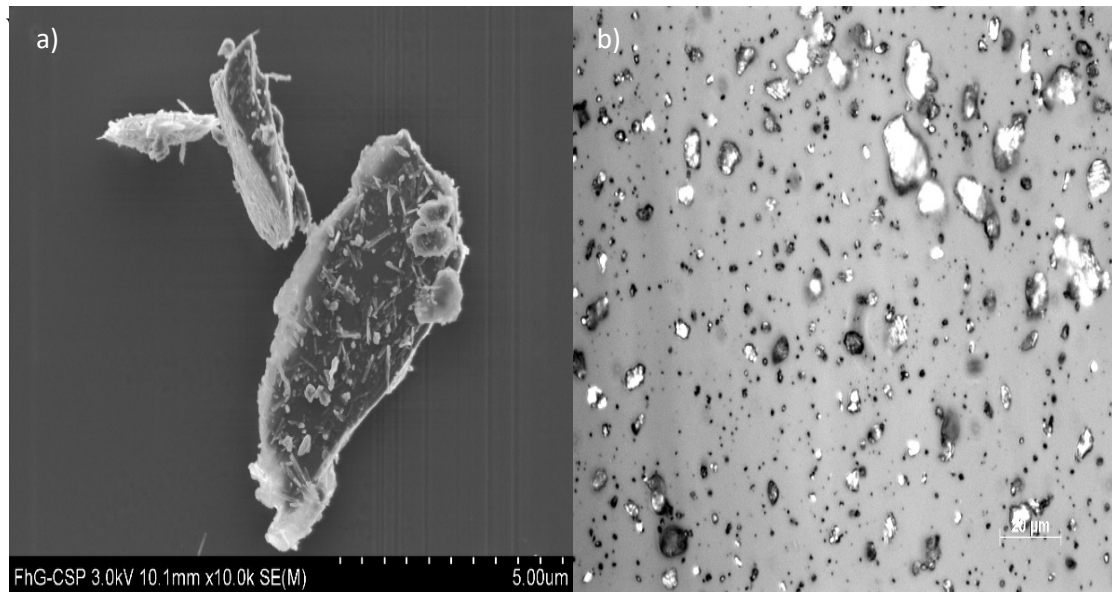


Abbildung 20.: REM-Bild bei einer ΔT_{dp} von 2 K von Middle-East-Staub. a) Agglomeration von Partikel. b) Übersicht der Probe^[33]

Regelrechte Ketten von zusammengebundenen Partikeln sind in der Abb. 21a zu sehen. Hierbei wird auch die Struktur entlang der Kette deutlich, wobei kleine Partikel an den Verbindungsstellen der Größeren anhaften und somit für mehr Oberflächenbindungsstellen sorgen. In Abb. 22 sind besonders gut die ausgebildeten Nadelstrukturen um die Partikel herum zu sehen. Die Nadeln sind wenige μm breit, aber tendenziell lang. Viele Nadeln bilden sich kreisförmig ausgehend aus einem Zentrum.

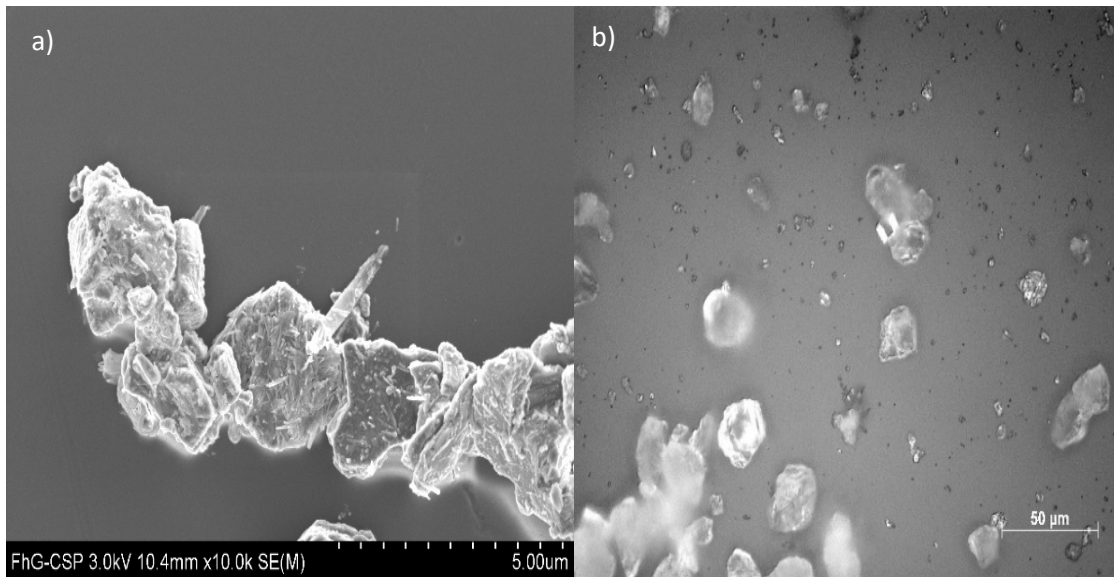


Abbildung 21.: REM-Bild bei einer ΔT_{dp} von 1,5 K von Middle-East-Staub. a) Agglomeration von Partikel.
b) Übersicht der Probe^[33]

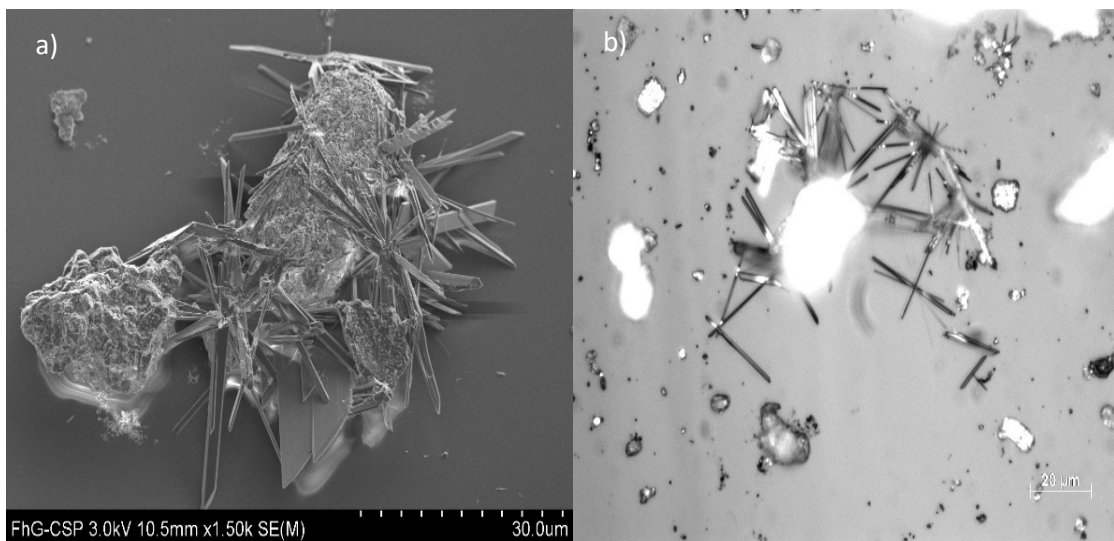


Abbildung 22.: REM-Bild bei einer ΔT_{dp} von 0 K von Middle-East-Staub. a) Agglomeration von Partikel.
b) Übersicht der Probe^[33]

Zudem erfolgte die REM-Analyse für *Qatar*-Staub zu unterschiedlichen ΔT_{dp} . In Abb. 23 sind noch keine Nadelstrukturen zu sehen, sowie keine Vorhöfe oder Agglomerate. Dies änderte sich ab einer ΔT_{dp} von 1,5 K wie in Abb. 24 zu sehen ist. Besonders hervorzuheben ist hier die Strukturbildung ohne größere Partikel.

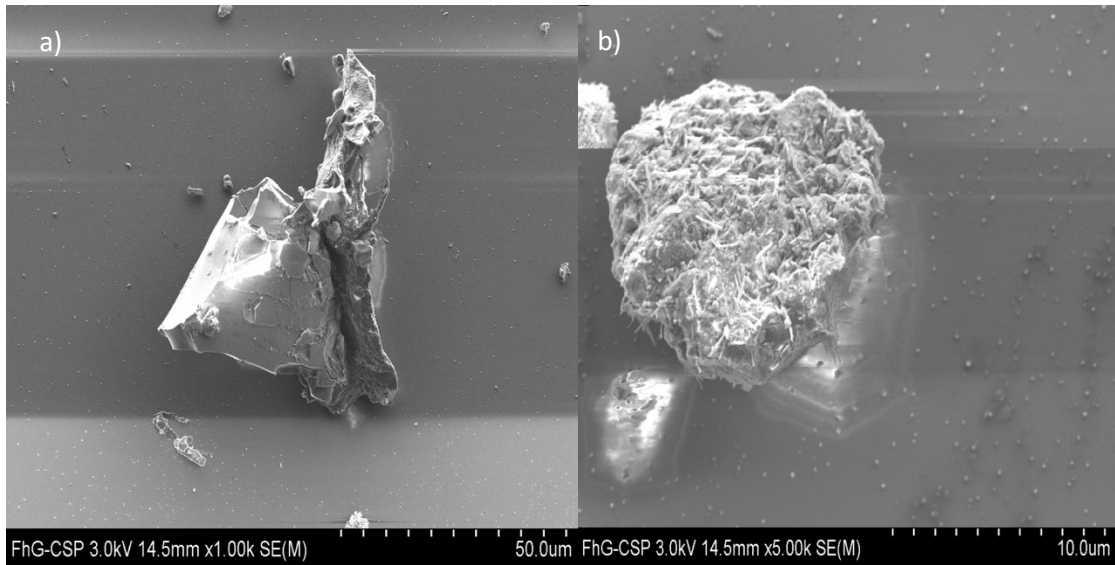


Abbildung 23.: REM-Bild von Qatar-Staub bei einer ΔT_{dp} von 7 K. Im Bild a) ohne Nadelstrukturen und Vorhöfen. Im Bild b) feine Nadelstrukturen an der Oberfläche des Partikels

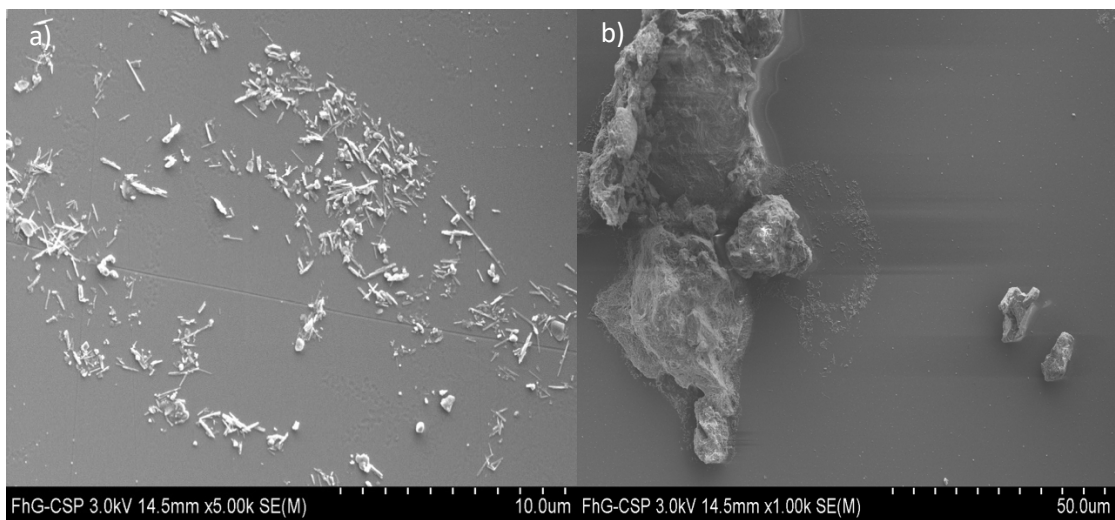


Abbildung 24.: REM-Bild von Qatar-Staub bei einer ΔT_{dp} von 1,5 K. Bild a) Nadelstrukturbildung an Glasoberfläche ohne Partikel im Zentrum. Bild b) mit Partikel als Ausgangspunkt für Nadelstrukturbildung

Nicht besetzte Flächen im Zentrum der kreisrunden Nadelstrukturen deuten darauf hin, dass hier ein Partikel war. Agglomeration ist mit und ohne Vorhöfe bereits ab ΔT_{dp} von 0,5 K gut zu sehen (Abb. 25 und 26).

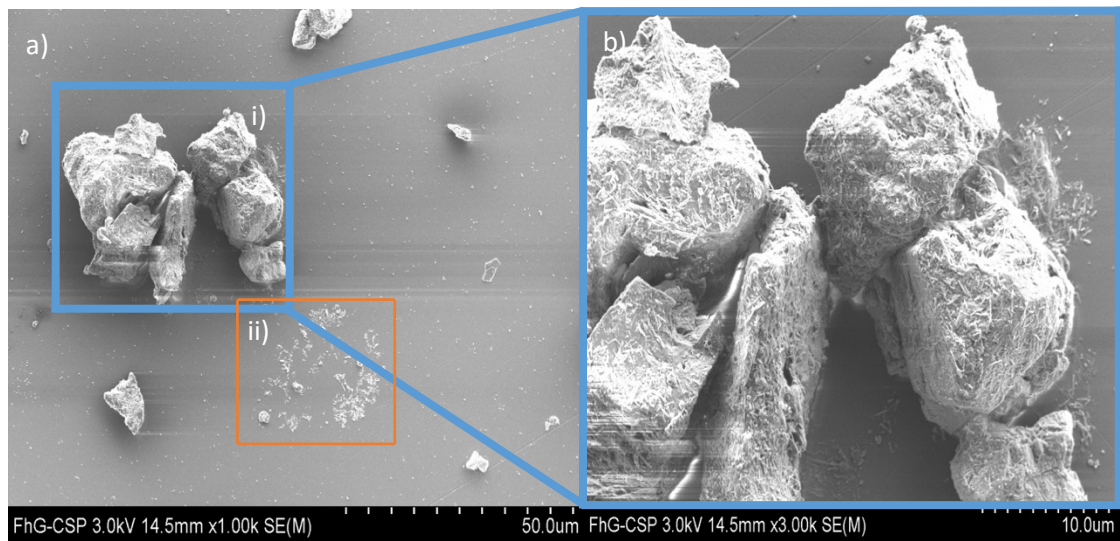


Abbildung 25.: REM-Bild für Qatar-Staub bei einer ΔT_{dp} von 0,5 K. Bild a) i) Agglomeration und ii) kreisrunde Nadelstrukturbildung ohne Partikel im Zentrum. Bild b) die Nahaufnahme der agglomerierten Partikel vom ii)

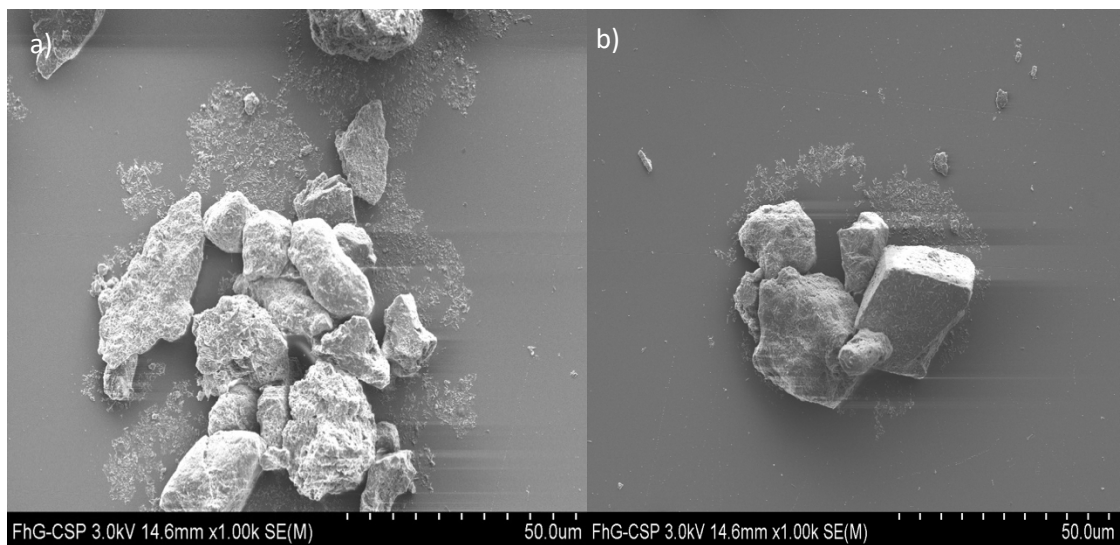


Abbildung 26.: REM-Bild für Qatar-Staub bei einer ΔT_{dp} von 0 K. Im Bild a) größerer und im Bild b) kleinerer agglomerierter Partikelverbund mit mehreren Vorhöfen

5.4 Statistische Auswertung

Mit Hilfe der Bilder des Lichtmikroskops und des optischen Auswertungsprogramms ImageJ konnten weitere statistische Auswertungen unternommen werden. Für *Qatar*-Staub befand sich die Betauung in Abb. 27 bei einer ΔT_{dp} von 5 K. Deutlich zu sehen war, dass die am häufigsten vorkommenden Partikeldurchmesser 5 μm bis 14 μm groß waren und das unabhängig ob vor oder nach der Betauung mit Windstoß. Nur die Anzahl der Partikel in diesem Bereich war vor der Betauung ohne folgendem Windstoß größer als nach der Betauung mit anschließendem Windstoß. Auffallend war die hohe Anzahl der Partikel mit einem Durchmesser ab 17 μm nach Betauung und Windstoß. Vor der Betauung waren diese Partikel kaum vorzufinden.

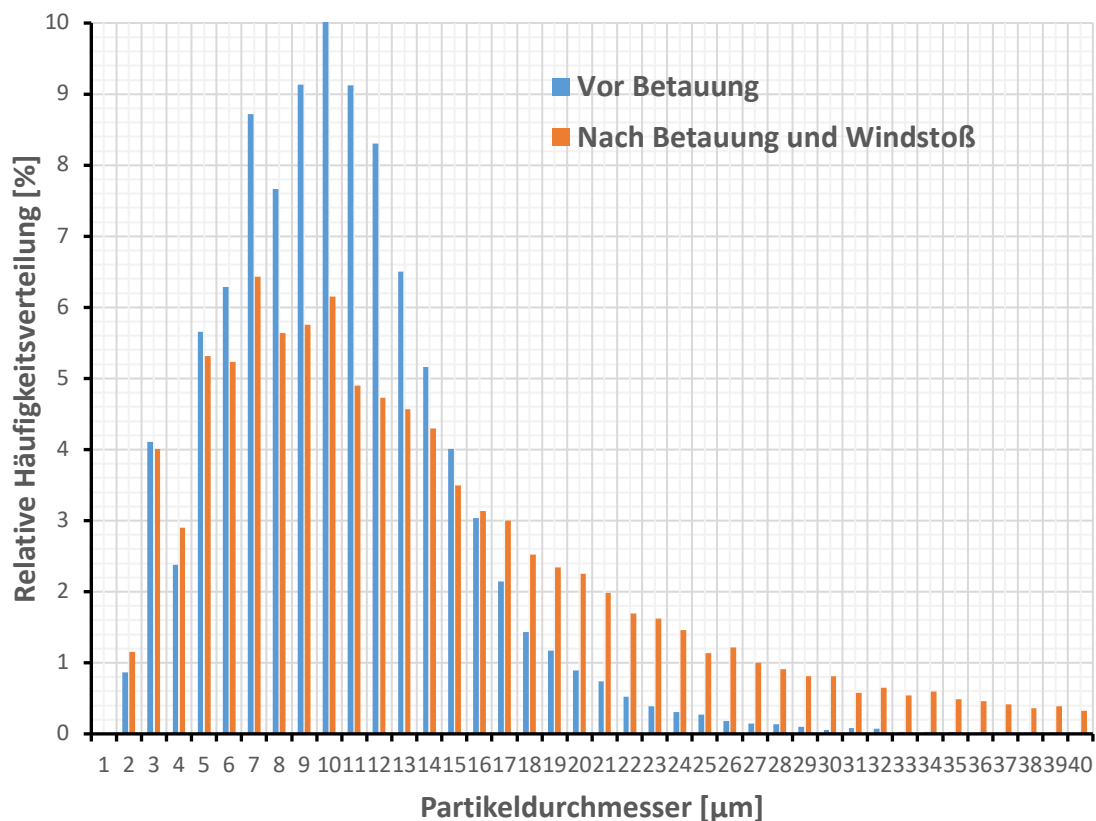


Abbildung 27.: Größenverteilung anhand der relativen Häufigkeitsverteilung in % von *Qatar*-Staub vor der Betauung und nach der Betauung und Windstoß bei einer ΔT_{dp} von 5 K

Da dieselbe Oberfläche vor und nach der Betauung mit Windstoß untersucht wurde, kann es zu keiner Steigerung der Anzahl an Partikel in einer Durchmesserzahl gekommen sein, sofern Agglomeration durch Partikelbewegung oder *Soiling* stattfand.

In Abb. 28 ist deutlich zu sehen, dass der Belegungsgrad vor der Betauung mit $C_{ini} = 7,37$ deutlich höher war als der nach Betauung und Windstoß mit $C_{wb} = 2,03$. Somit war die Oberfläche vor Betauung stärker durch Staub verschattet als nach Betauung bei einer ΔT_{dp} von 5 K und Windstoß.

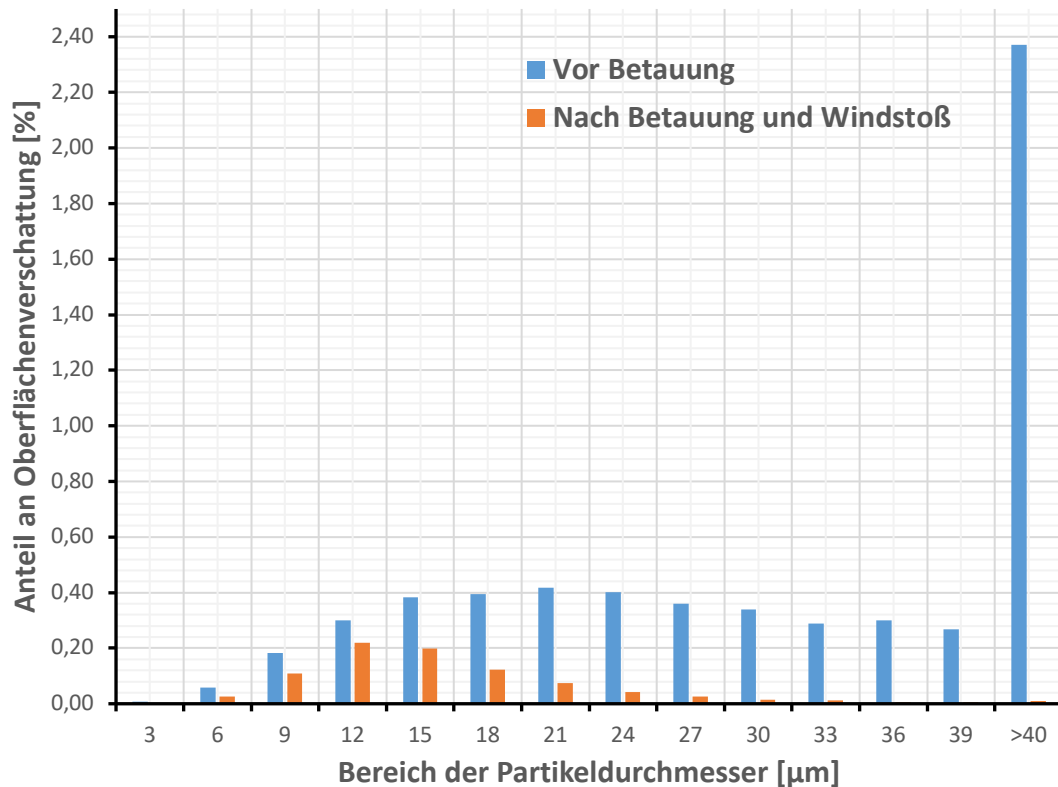


Abbildung 28.: Ermittlung der Anteile an Oberflächenverschattung in % durch Partikeldurchmesser sortiert in Gruppen vor und nach Betauung und Windstoß. Betauung erfolgte bei einer ΔT_{dp} von 5 K

Insbesondere die Partikel mit einem Durchmesser über 40 μm verdeckten die Oberfläche und waren nach der Betauung und Windstoß nahezu nicht vorzufinden. Daher wurde die Statistik bei weiteren Proben mit einer geringeren ΔT_{dp} unter 2 K untersucht. Die gleiche Auswertung wurde für *Qatar*-Staub bei einer ΔT_{dp} von 1 K und ΔT_{dp} 0 K wiederholt.

Es ist zu sehen, dass bei der Betauung bei einer ΔT_{dp} von 5 K (Abb. 27) die relative Häufigkeit der Partikelgrößen, insbesondere für Partikeldurchmesser über 10 μm , vor und nach Betauung und Windstoß deutlich geringer war als bei derer mit einer ΔT_{dp} von 2 K (Abb. 29) und einer ΔT_{dp} von 0 K (Abb. 31). Der C_{ini} betrug 4,32 und C_{wb} 6,29, sodass die Belegungsrate hier mit 1,45 größer war als zuvor bei 0,27.

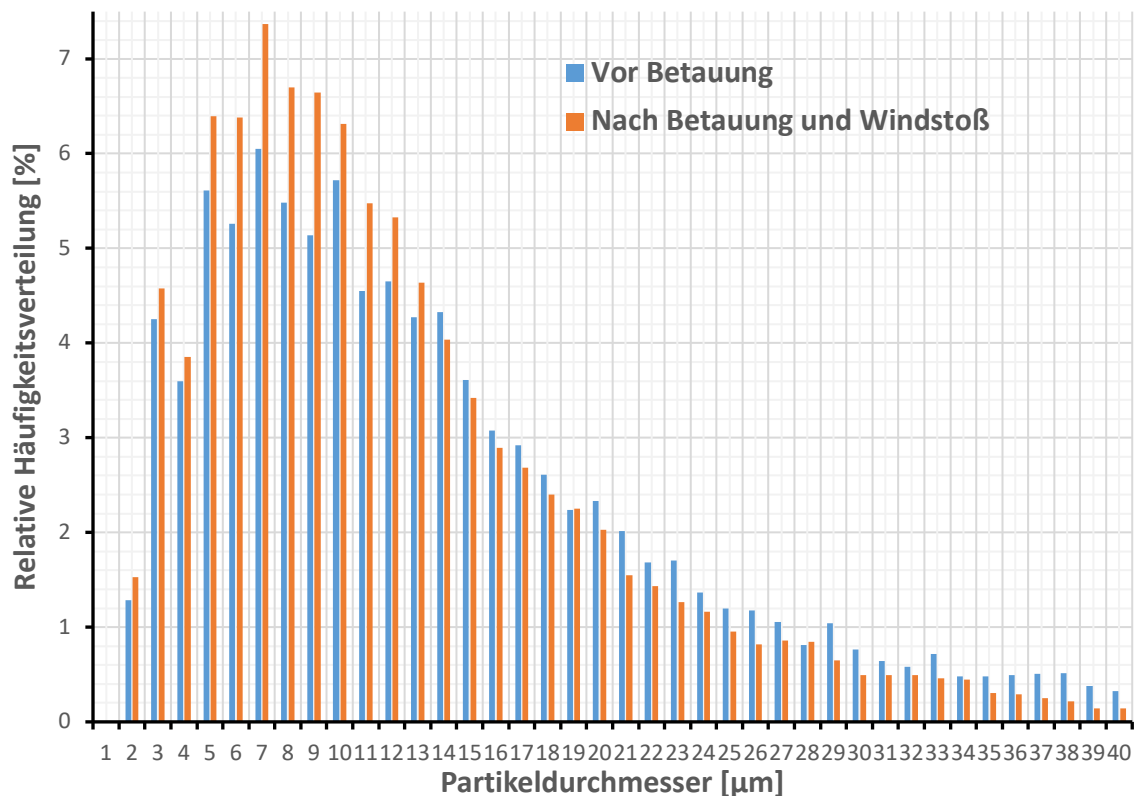


Abbildung 29.: Größenverteilung anhand Häufigkeitsverteilung vom Qatar-Staub bei einer ΔT_{dp} von 1 K – vor der Betauung und nach der Betauung und Windstoß

Besonders fällt dies bei einer ΔT_{dp} von 1 K ab einer Partikelgröße über 20 μm auf, da hier nach der Betauung deutlich häufiger die Partikelgrößen vertreten waren als vor der Betauung und Windstoß. Ähnlich bei der Auswertung der Anteile an Oberflächenverschattung zu Partikeldurchmesser (Abb. 30). Bei einer ΔT_{dp} von 1 K waren wesentlich mehr Partikel mit ähnlichem Durchmesser prozentual an der Verschattung der Oberfläche beteiligt sowohl vor als nach der Betauung und Windstoß, als im Vergleich zu Abb. 28 bei einer ΔT_{dp} von 5 K. Zudem war ein Peak über 1 % für Partikeldurchmesser ≥ 40 μm nach Betauung und Windstoß zu sehen.

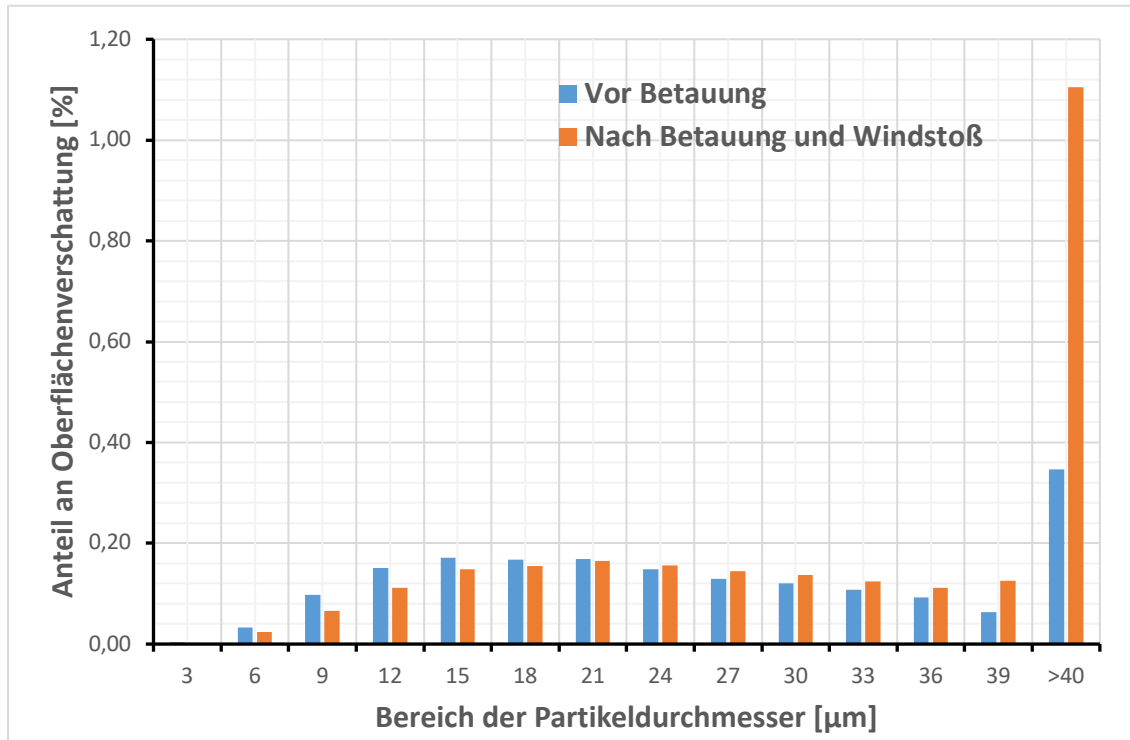


Abbildung 30.: Ermittlung der Anteile an Oberflächenverschattung in % durch Partikeldurchmesser sortiert in Gruppen vor und nach Betauung und Windstoß. Die Betauung erfolgte bei einer ΔT_{dp} von 1 K

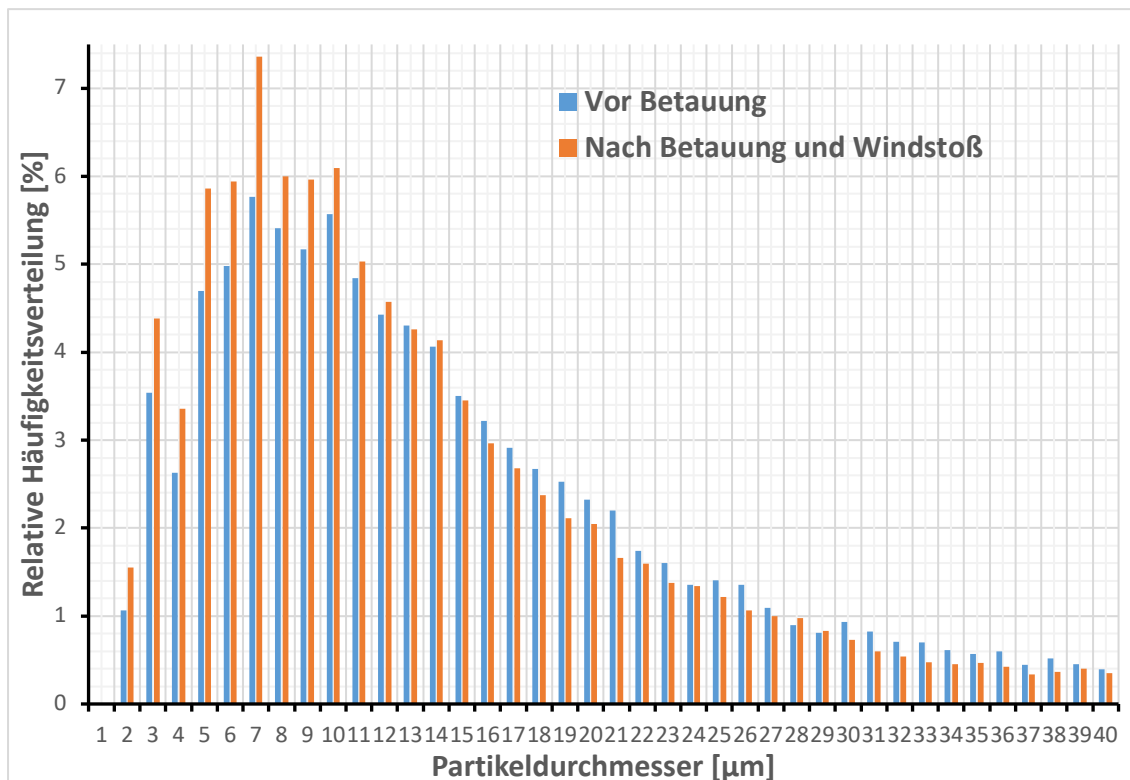


Abbildung 31.: Größenverteilung anhand Häufigkeitsverteilung vom Qatar-Staub bei ΔT_{dp} 0 K – vor der Betauung nach der Betauung und Windstoß

Dagegen war der Verlauf bei einer ΔT_{dp} von 0 K zu 1 K fast identisch. Die Partikeldurchmesser bis 14 μm waren nach der Betauung häufiger vorzufinden als vor der Betauung. Über 15 μm lag die Häufigkeit der Partikeldurchmesser vor der Betauung stets knapp über derer nach Betauung und Windstoß. Die Belegungsrate war mit 1,1 fast ausgewogen und ähnlich wie die vorhergehende. Auch die Ermittlung zur Oberflächenverdeckung vor und nach Betauung bei einer ΔT_{dp} von 0 K und Windstoß war ähnlich zu der in Abb. 29 bei einer ΔT_{dp} von 1 K.

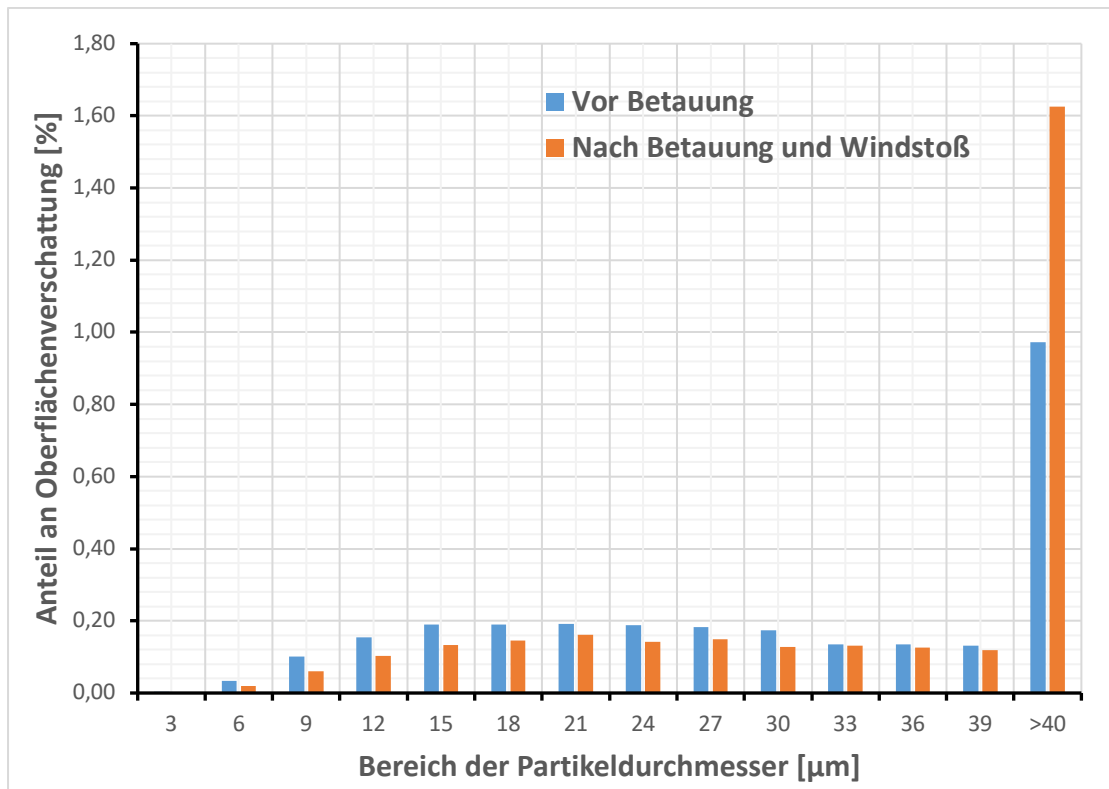


Abbildung 32.: Ermittlung der Anteile an Oberflächenverschattung in % durch Partikeldurchmesser sortiert in Gruppen vor und nach Betauung und Windstoß. Betauung erfolgte bei einer ΔT_{dp} von 0 K

5.5 Sensorstrommessung

5.5.1 Korrelation von Sensorstrom und Belegungsrate zur Luftfeuchtigkeit bei Staub aus Qatar

Der Stromwert für *Qatar*-Staub nach einer Staubdeposition im Autoklaven bei einer RH von 75,47 % während der Einstellung des Gleichgewichts betrug nach ca. 1000s Inkubation konstant 0,067 nA, bei einer RH von 85,11 % 0,39 nA und bei einer RH von 97,59 % 3,7 nA.

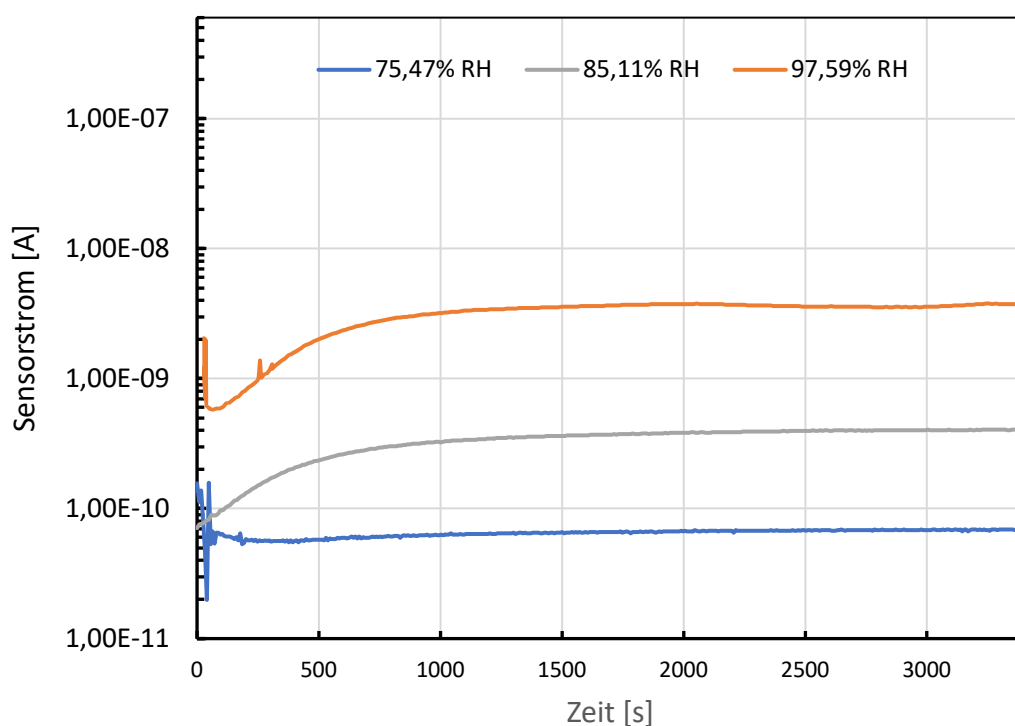


Abbildung 33.: Leitstrommessungen im Autoklaven unter verschiedener Luftfeuchtigkeiten nach einer Staubdeposition ohne Zwischenreinigungen *Qatar*-Staub mit RH 75,47 %, RH 85,11 % und mit RH 97,59 %

Darauf aufbauend wurden die Proben gemäß dem Ablauf im TOPAS-Soilingstand betaut und Windstößen ausgesetzt. Es zeigten sich Verläufe des Sensorstromes, Temperatur und Raum-Luftfeuchtigkeit wie in Abb. 34 mit ersichtlichen Plateaus unabhängig der Anzahl an Staubdepositionen auf einer Probe. Nach der Konditionierung der Probe in der Probenkammer erfolgte die Überführung der Probe in die Testkammer bei einer RH von 65,7 % und einer Temperatur von 22,6 °C. Von Sekunde 100 bis 700 erfolgte die Akklimatisierung, gefolgt von der Betauungsphase mit einem durchschnittlichen Stromwert während der Betauung von 47,1 nA.

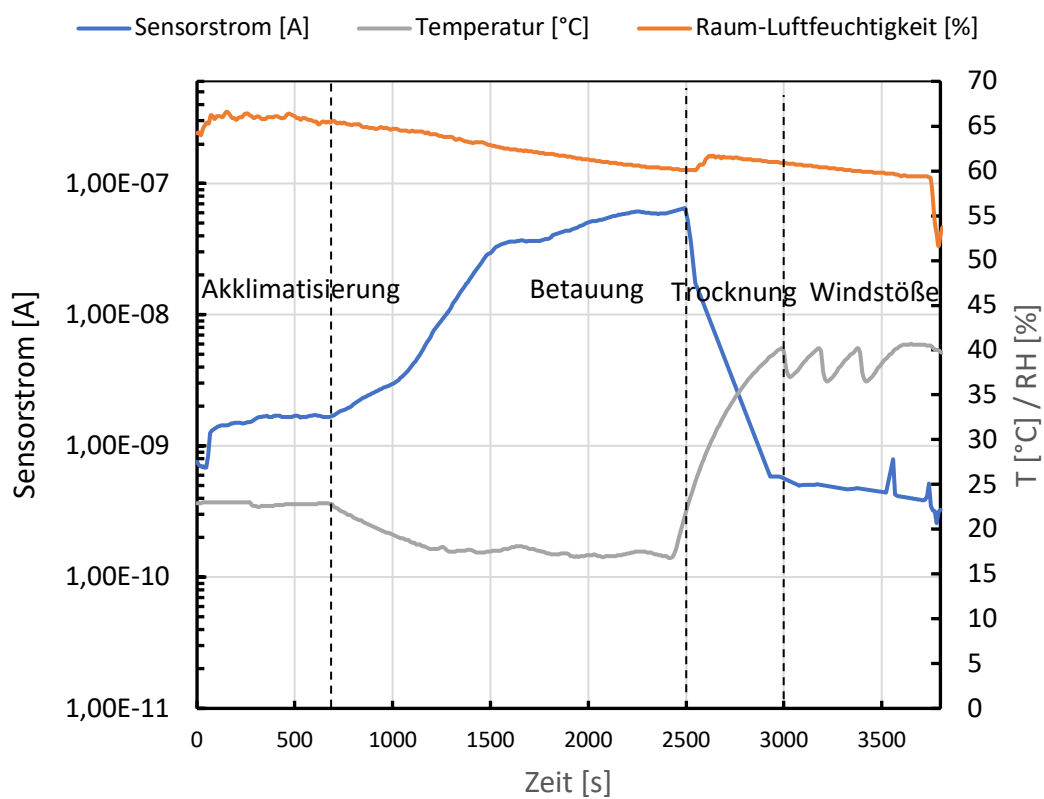


Abbildung 34.: Korrelationsmessung von Sensorstrom unter 85,11 % Luftfeuchtigkeit mittels KCl zur Staubbelastungsgrad von 34,31 % nach vier Staubdepositionen mit Qatar-Staub mit Betauung

Für alle drei Versuchsreihen wurden fünf Messungen durchgeführt. Grafisch dargestellt war eine gewisse Linearität zu erkennen, bzw. keine Unabhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit zum Belegungsgrad für *Qatar*-Staub (Abb. 35).

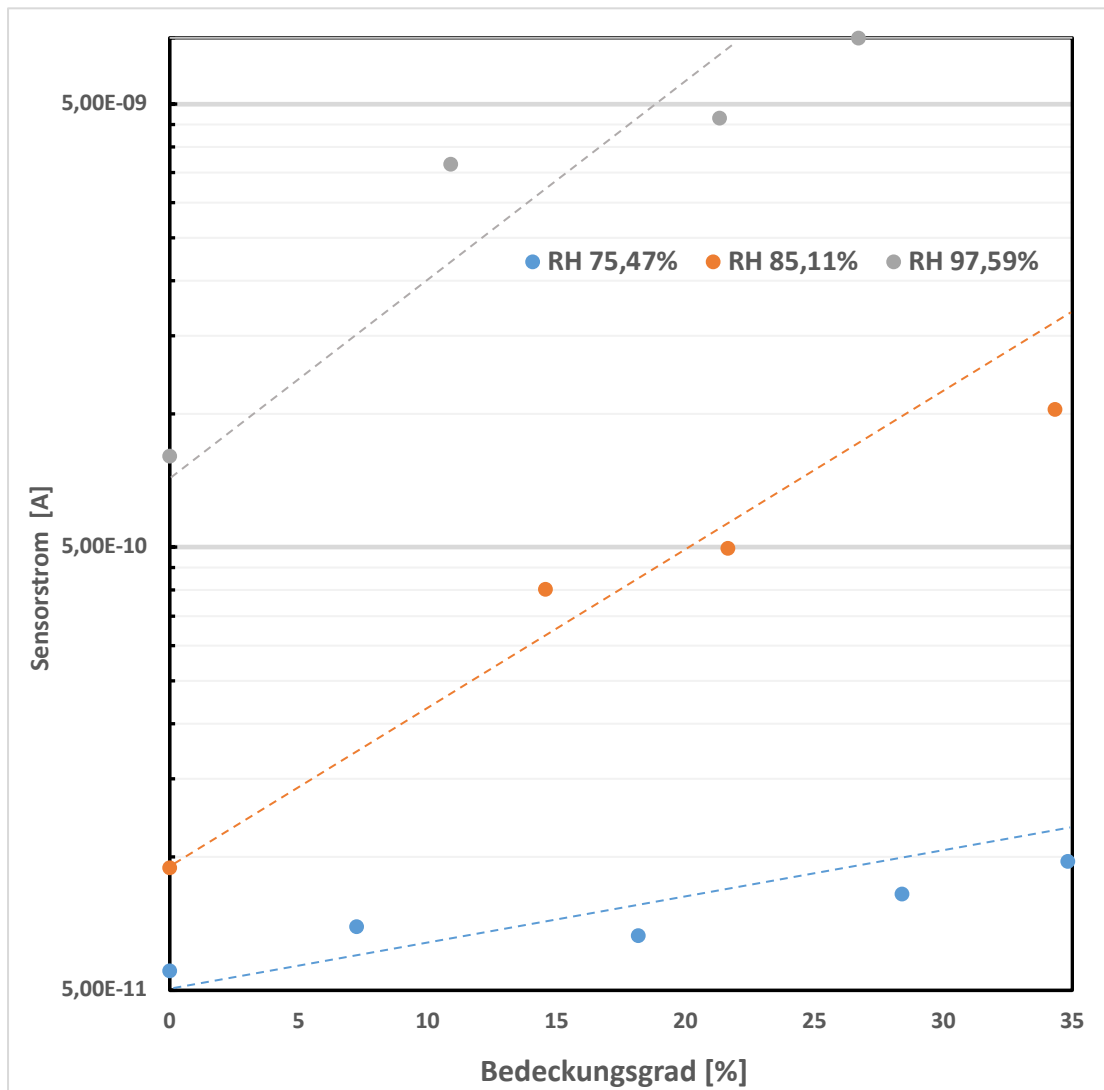


Abbildung 35.: Messung von Leckstrom zu Belegungsgrad von *Qatar*-Staub in Abhängigkeit von unterschiedlichen Luftfeuchtigkeiten.

Wie erwartet fiel die Höhe des Sensorstromes in Abhängigkeit der Luftfeuchtigkeit aus. Zunächst lagen die gefitteten Geraden gestaffelt übereinander geordnet der Höhe ihrer zugeordneten Luftfeuchtigkeit. Die Werte für den Leckstrom unter einer RH von 75,47 % lagen unter den mit einer RH von 85,11 % und 97,59 % ganz oben, unabhängig dem Belegungsgrad.

5.5.2 Korrelation von Sensorstrom und Belegungsrate zur Luftfeuchtigkeit bei Staub aus Morocco

Wie für *Qatar*-Staub wurde das Experiment für *Morocco*-Staub durchgeführt. Die Stromwerte bei einer RH von 85 % und 97 % verhielten wie bei *Qatar*-Staub. Mit steigende Sensorstromwerte stieg auch der initialen Belegungsgrad bei *Morocco*-Staub. Bei einer RH von 75,47 % war keine Linearität zu erkennen, wie dagegen bei einer RH von 85,11 % und 97,59 % (Abb. 36. Für eine Luftfeuchtigkeiten über 85 % waren Linearitäten mit geringer Steigung zu erkennen.

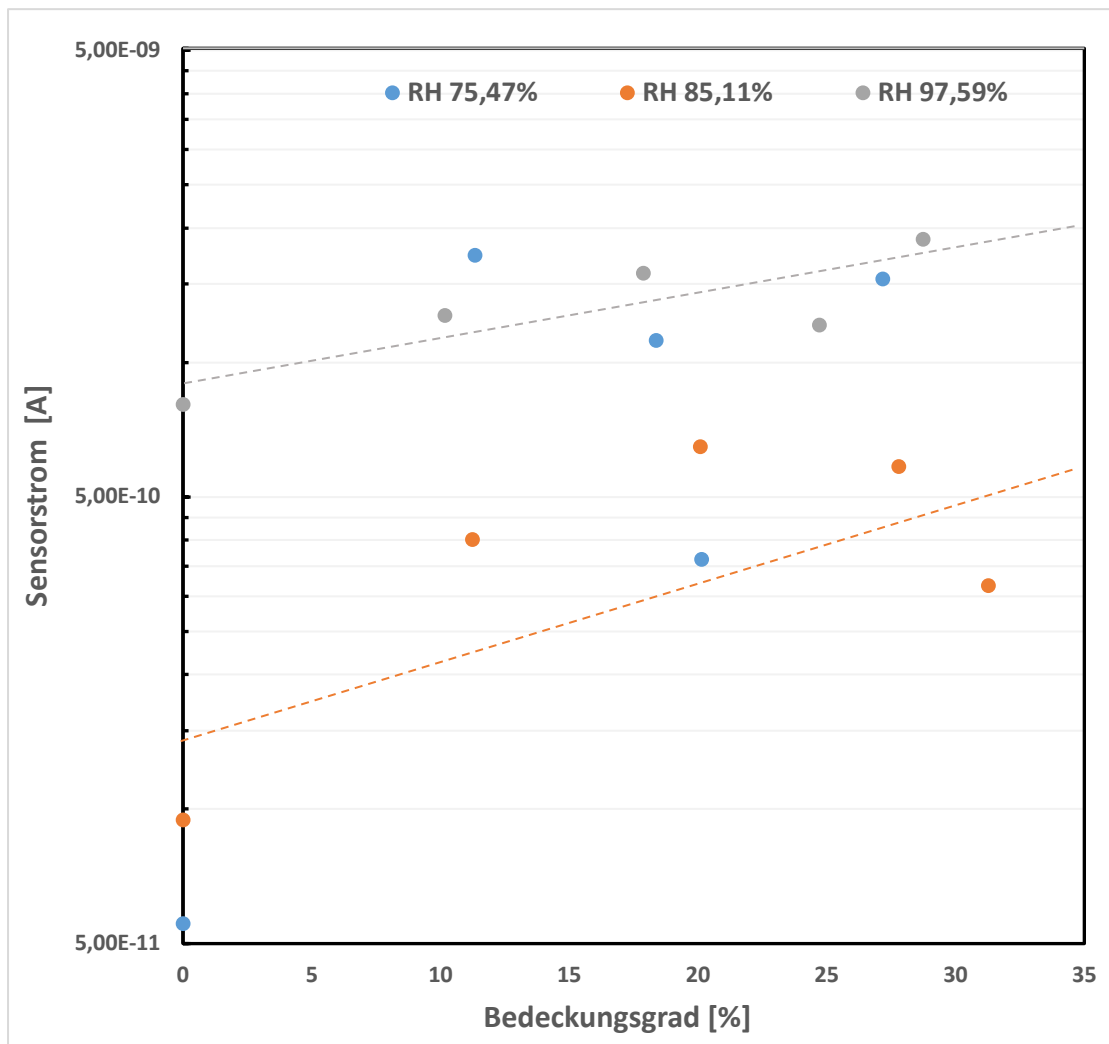


Abbildung 36.: Messung von Leckstrom zu Bedeckungsgrad von Morocco-Staub in Abhängigkeit von unterschiedlichen Luftfeuchtigkeiten

5.5.3 Korrelation von Sensorstrom und Belegungsrate bei Staub aus

Qatar

Für die Strommessung von *Qatar*-Staub wurde zunächst während dem Zyklus der Staubdeposition die Raumluchtfeuchtigkeit konstant bei ca. 60 % gehalten, sowie die Raumtemperatur bei ca. 22 °C. Bei allen Versuchen war ein ähnlicher Verlauf wie für *Qatar*-Staub bei einer ΔT_{dp} von 0,3 K vor der Betaung (Abb. 37).

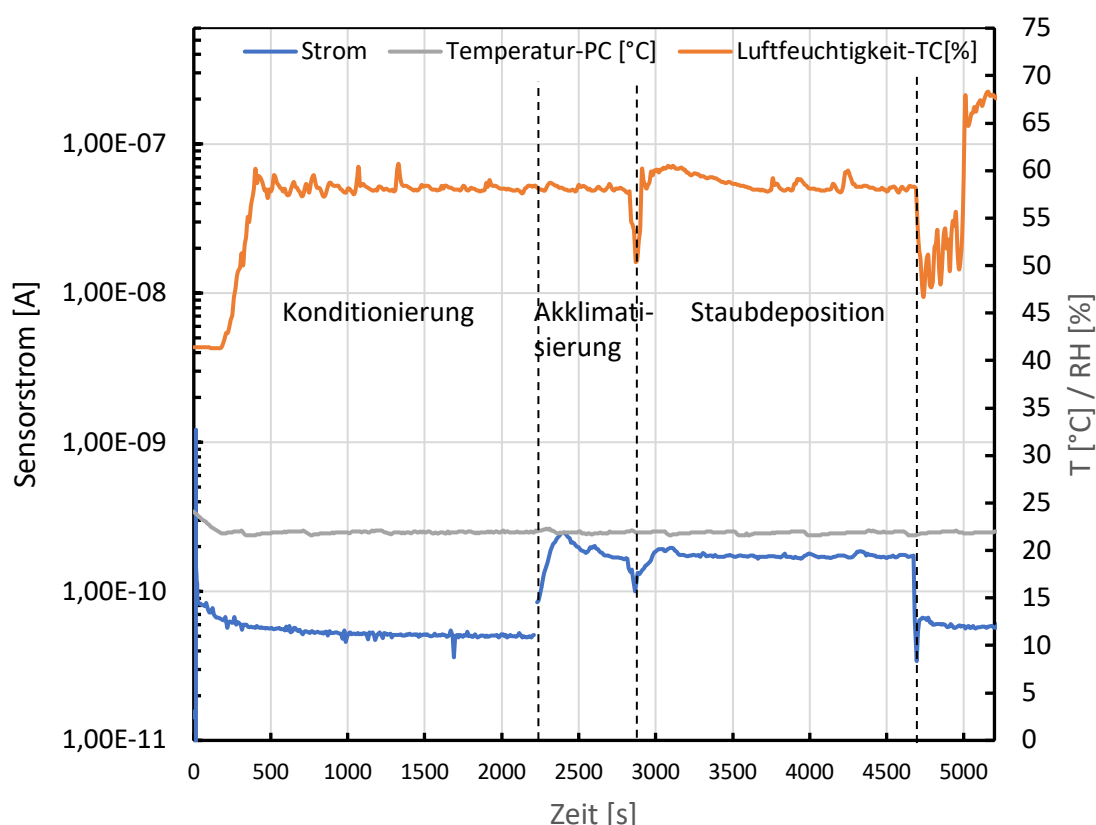


Abbildung 37.: Messungen von Strom, Temperatur der Probenkammer (PC) und Luftfeuchtigkeit (TC) bei Staubdeposition für *Qatar*-Staub mit einer ΔT_{dp} von 0,3 K bei Staubdeposition

Zu sehen waren unterschiedliche Niveaus der Stromwerte bei der Konditionierung (bis 2200 s) mit ca. 0,05 nA und ab Einführung der Probe mit Sensor von Probenkammer in die Testkammer mit erhöhter Luftfeuchtigkeit (2200 s - 2900 s) und Staubdeposition (2900 s - 4600 s) von 0,18 nA, sowie der Rückfall auf Ausgangswert des Stromes und der Raumluchtfeuchtigkeit (ab 4600 s) außerhalb der Testkammer. Die Luftfeuchtigkeit sowie die Temperatur waren im gesamten Verlauf des Versuches konstant, bis auf während der Staubdeposition (2900 s – 4600 s) sodass der erhöhte Stromwert auf die

Staubdeposition zurückzuführen ist. Da eine direkte Abhängigkeit vom Stromwert zu der Bedeckungsdichte von Oberflächen und zur Luftfeuchtigkeit zu erwarten war, erfolgten mehrere Versuche zur Verifizierung dieser Hypothese. Während des Betauungszyklus wurde nun ebenfalls der Sensorstrom gemessen. Dabei waren die Veränderungen in den Phasen Konditionierung, Akklimatisierung, Betauung mit folgender Trocknung deutlich zu erkennen (Abb. 38).

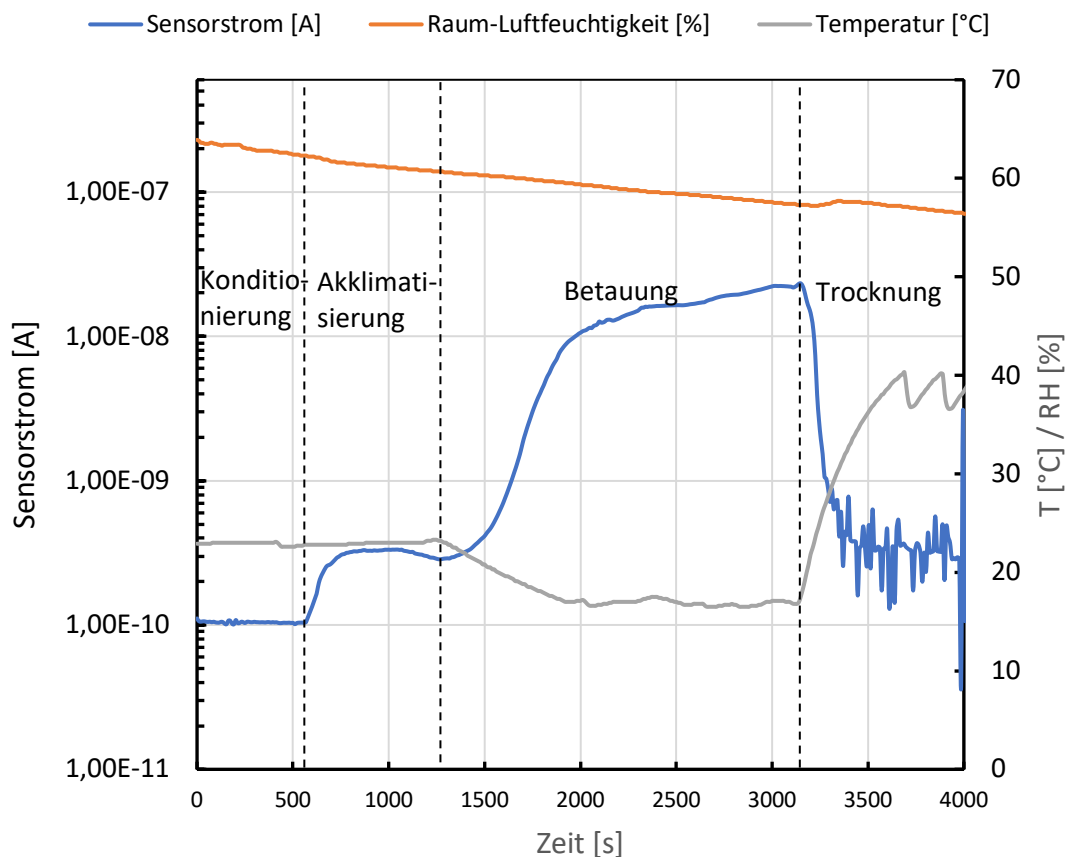


Abbildung 38.: Betauung von Qatar-Staub bei 1,5 K Unterschied zum Taupunkttemperatur in der Probenkammer von Betauung

In Abhängigkeit von der Phase veränderte sich die Strommessung, sodass eine Einordnung gut möglich war. Jeder Einzelversuch wurde zu einem spezifischen Temperaturunterschied der Tautemperatur zur Probenpräparation angesteuert, um die verschiedene Haftung der Stäube zu untersuchen. Der Stromverlauf stieg von ca. 0,11 nA während einer konstanten Temperatur von 22 °C und konstanter RH von 60 % in der Akklimatisierungsphase (570 s – 1250 s). Im nächsten Schritt wurde die Betauung eingeleitet (1300 s – 3200 s). Hier erreichte der Strom sein Maximum von fast 20,4 nA und sank

während der Trocknung (ab 3200 s) in seinen Ursprung zurück. Der gemittelte Stromwert während der Betaung lag bei ca. 16 nA. Insgesamt wurden diese Versuche wie eben beschrieben bei 12 verschiedenen ΔT_{dp} durchgeführt und dem Bedeckungsrate zum Stromwert in Verhältnis dargestellt. Die Bedeckungsrate war erhöht ($>0,5$) bei einer ΔT_{dp} von 0 K bis 2 K. Darüber waren die Bedeckungsraten gering ($< 0,5$). Markant hierbei war der Punkt zwischen einer ΔT_{dp} von 1,5 K und 2 K bei dem die Staubbelegungsrate deutlich auseinander lagen. An diesem Punkt lagen bei anderen Stäuben auch die Stromwerte deutlich auseinander.

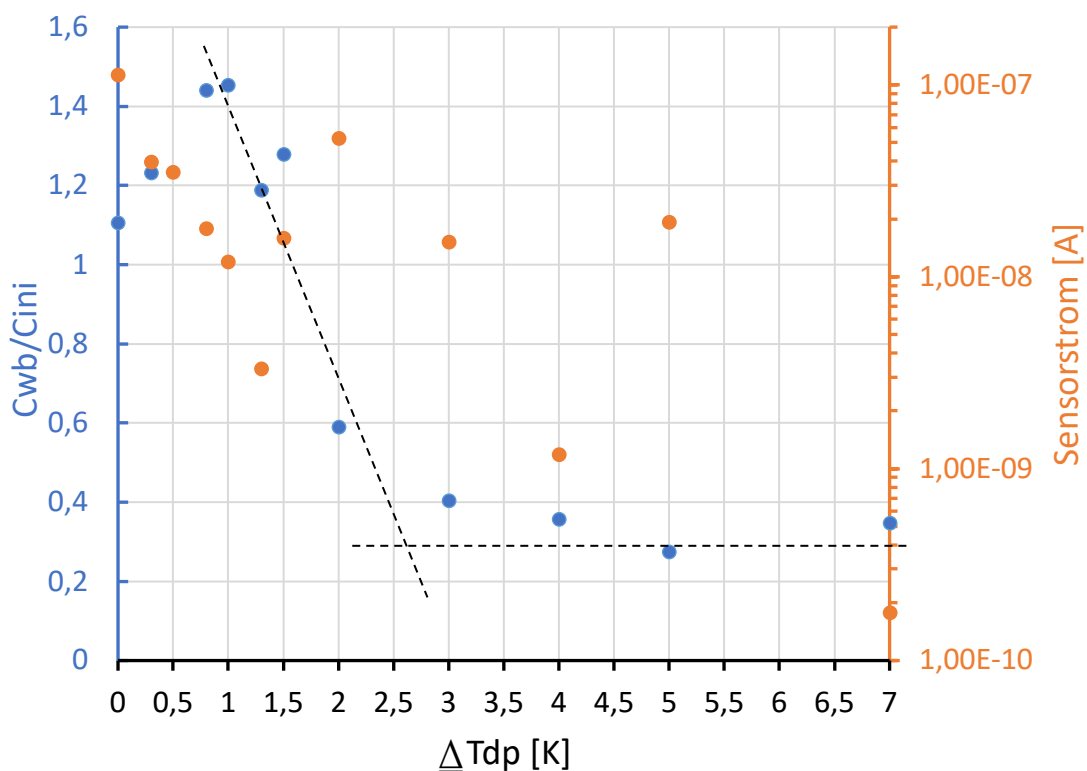


Abbildung 39.: Verhältnis von Bedeckungsrate und Leitstrommessung zur ΔT_{dp} bei konstanter Umweltbedingung mit Qatar-Staub. Gemessen mit einem Oberflächensensor aus zwei Ag-Epoxid-Streifen

Insgesamt war der Verlauf für die Bedeckungsraten wie erwartet, bereits erhöht und steigend von einer ΔT_{dp} von $\leq 2,7$ K und konstant niedrig ab einer ΔT_{dp} von $\geq 2,7$ K. Anders als bei restlichen Stäuben, korrelieren die Stromwerte nur gering mit der Belegungsrate. Der kritische Punkt lag bei einer ΔT_{dp} von ca. 2,75 K für Qatar-Staub.

5.5.4 Korrelation von Sensorstrom und Belegungsrate bei Staub aus Marocco

Wie *Qatar*-Staub wurde ebenso Staub aus *Morocco* untersucht. Der Verlauf während der Staubdeposition und dem Betauungszyklus war vergleichbar. Aufgrund der diversen Staubeigenschaften änderten sich lediglich die gemittelten Sensorstromwerte. So lag der gemittelte Stromwert für *Morocco*-Staub bei einer ΔT_{dp} von 0,5 K nach Betauung und Windstoß bei 40 nA während er bei *Qatar*-Staub bei ca. 35 nA ermittelt wurde.

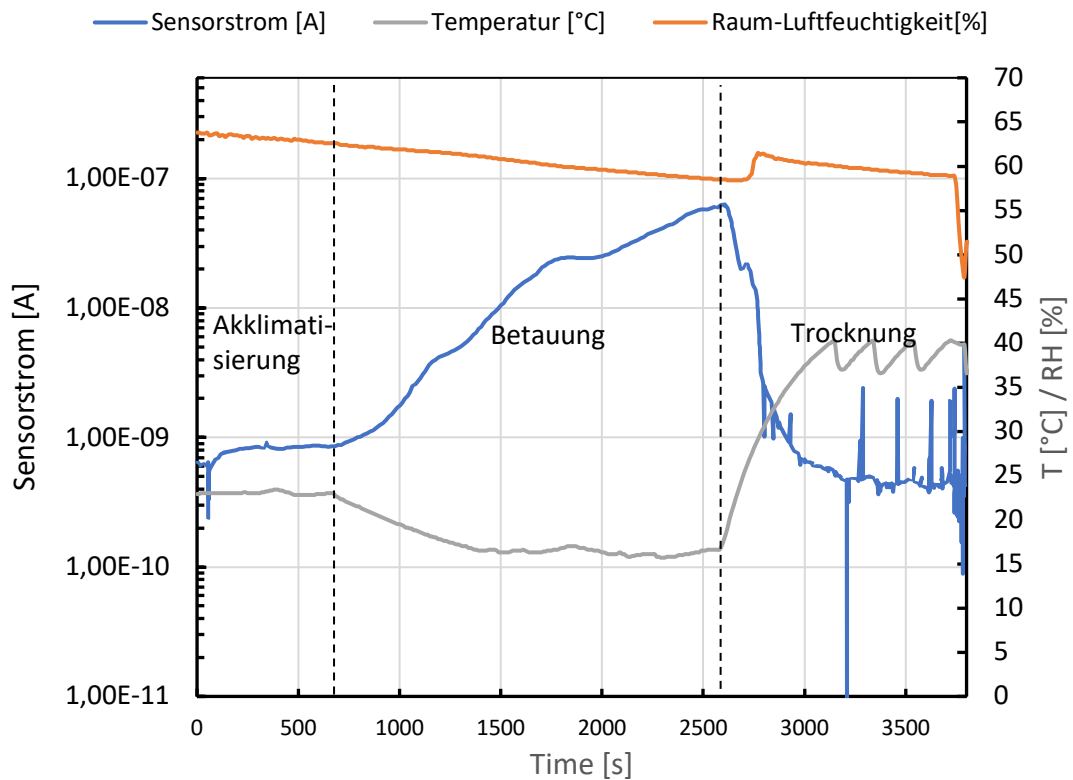


Abbildung 40.: Betauung von Morocco-Staub bei einer ΔT_{dp} von 0,5 K in der Probenkammer nach Betauung und Windstoß

Ebenso wie für *Qatar-Staub* wurde der Versuch für *Morocco* insgesamt 12-mal durchgeführt zu unterschiedlichen ΔT_{dp} und deren Stromwerte erfasst (Abb. 41). Generell lagen die Stromwerte für *Morocco*-Staub etwas höher für die Werte von einer ΔT_{dp} von 2 K bis 7 K, befanden sich aber mit den Bedeckungsraten innerhalb der gleichen Bereiche. Die Bedeckungsrate lagen meist nah an dem Stromwert zur gleichen Messung und zeigten insgesamt auch eine gewisse Linearität.

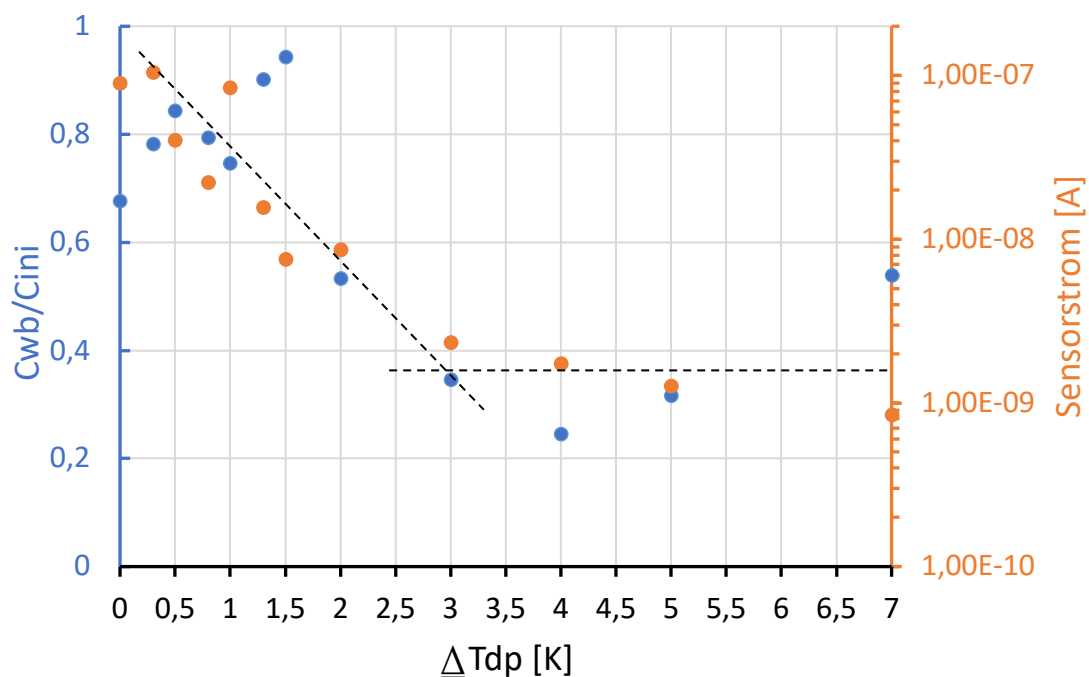


Abbildung 41.: Verhältnis von Bedeckungsrate und Leitstrommessung zur ΔT_{dp} bei konstanter Umweltbedingung mit *Morocco*-Staub

Die Bedeckungsrate bei einer ΔT_{dp} von 7 K war unerwartet. Insgesamt korrelierten Bedeckungsrate und Sensorstrom, jedoch nicht die Werte von einer ΔT_{dp} von 1,3 K und 1,5 K. Dennoch bestand eine Linearität ab einer ΔT_{dp} von 0 K bis 4 K und ab einer ΔT_{dp} von 3 K als kritischer Punkt für *Morocco*-Staub. Auffällig war, dass die Belegungsrate nicht >1 war, wie in Abb. 39 bei *Qatar*-Staub.

5.5.5 Korrelation von Sensorstrom und Belegungsrate bei Staub aus Middle-East

Abschließend wurde die Untersuchung ebenfalls für *Middle-East*-Staub durchgeführt. Der Verlauf für *Middle-East*-Staub bei einer ΔT_{dp} von 0,5 K nach Betauung und Windstoß war stabiler als in den vorherigen Beispielen. Der gemittelte Stromwert während der Betauung (520 s – 2900 s) lag hier bei ca. 48 nA.

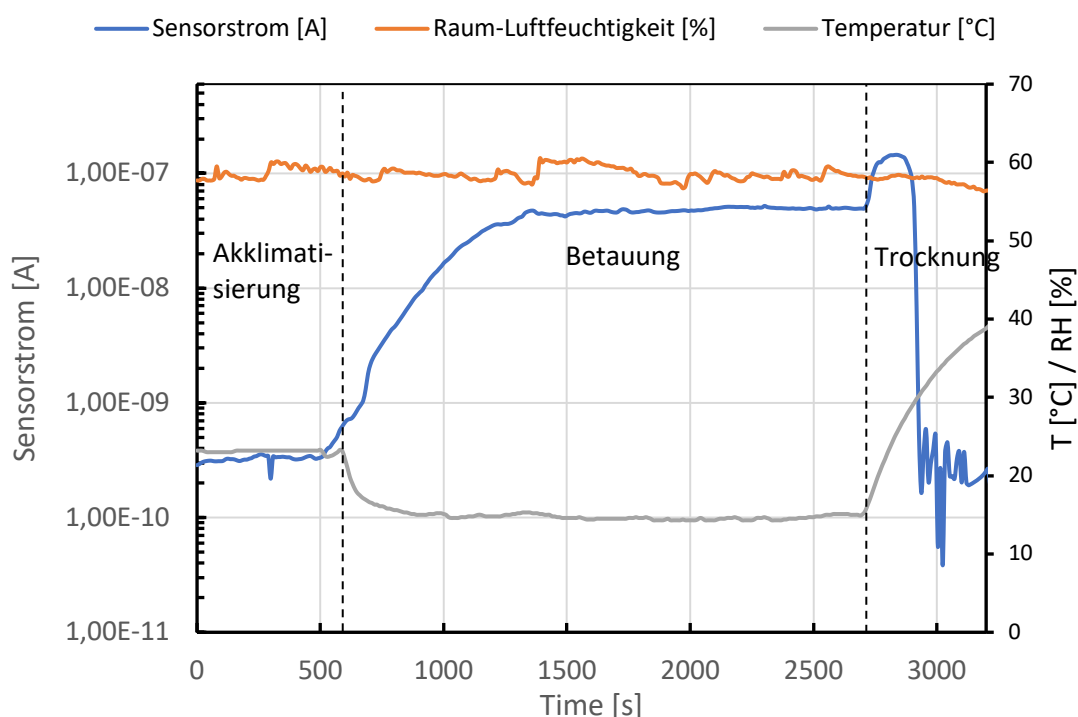


Abbildung 42.: Betauung von Middle-East-Staub bei einer ΔT_{dp} von 0,5 K

Im Endergebnis für *Middle-East*-Staub war der Verlauf insgesamt wie erwartet. Die Belegungsraten und Strom nahmen zu je kleiner der Temperaturunterschied von Umgebungstemperatur zur Tautemperatur wurde. Jedoch war die Belegungsrate bei 0,3 K auffallend gering, sowie der gemessene Strom zu einer ΔT_{dp} von 4 K und 5 K auffallend groß (>10 nA). Die Daten für *Middle-East*-Staub mit einer ΔT_{dp} von 4 K bis 7 K (Abb. 43) waren nicht vollständig sodass die Stromauswertung und teilweise Lichtmikroskop-Bilder zur Auswertung der Belegungsraten fehlen.

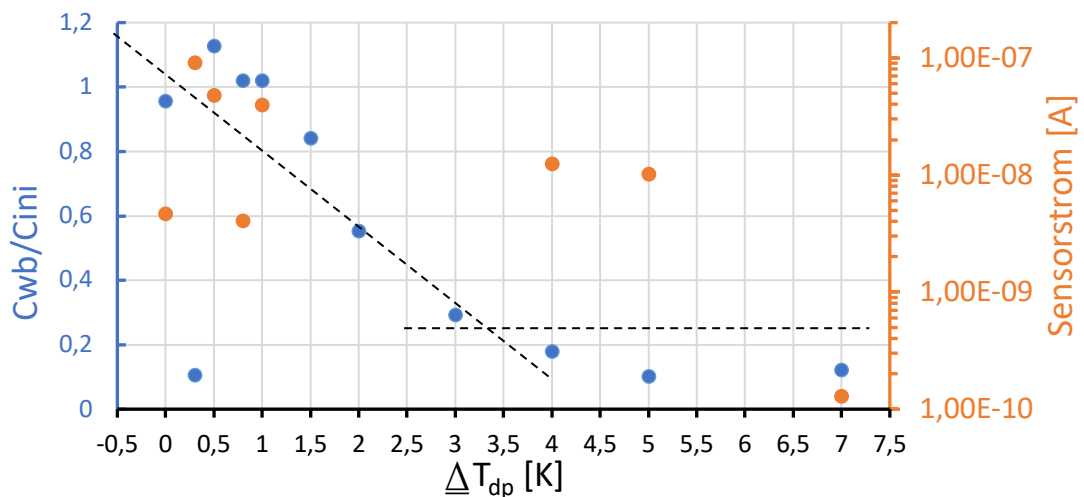


Abbildung 43.: Verhältnis von Belegungsrate und Leitstrommessung zur ΔT_{dp} mit Middle-East-Staub. Gemessen mit einem Oberflächensensor aus zwei Ag-Epoxid-Streifen

Daher wurden zum Vergleich Ergebnisse von Vorversuchen herangenommen (Abb. 44). Vergleichend zum Vorversuch waren Parallelen vorhanden, wie eine gewisse Linearität der Stromwerte und Belegungsgrade im Verhältnis zur ΔT_{dp} . Qualitativ waren beide Ergebnisse vergleichbar. Jedoch war in dem Experiment ein deutlicher Unterschied der Werte für den Sensorstromwerte ab einer ΔT_{dp} von $\leq 1,5$ K zu sehen, im Vergleich zu den Werten ab einer $\Delta T_{dp} \geq 2$ K, welches auf ein bestimmtes Phänomen in dem Bereich schließen lässt.

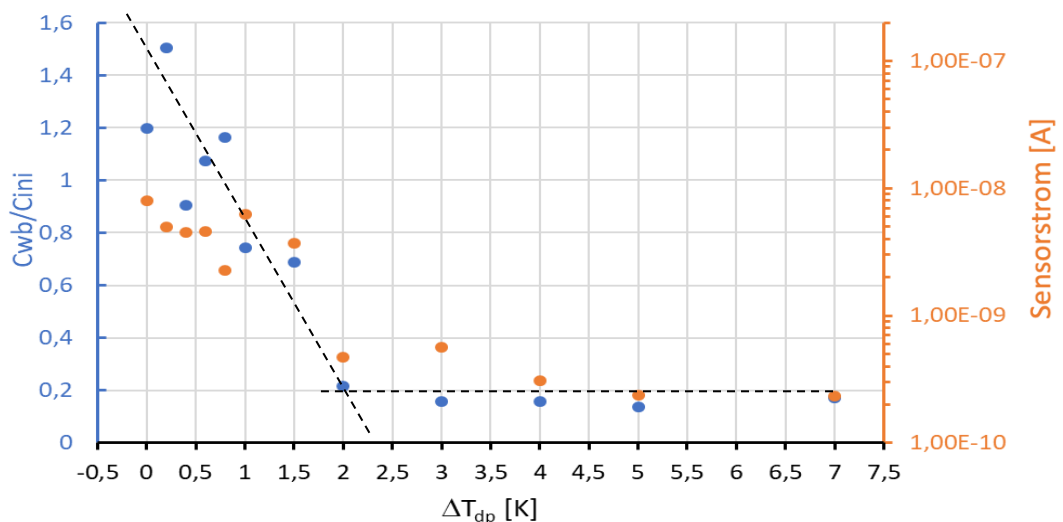


Abbildung 44.: Verhältnis von Belegungsrate und Leitstrommessung zur ΔT_{dp} mit Middle-East-Staub. Middle East Messungen mit deutlichem Unterschied ab 2 K Differenz zum Taupunkt. Gemessen wurde mit einem Al-Oberflächenfeuchtesensor^[33]

6 Diskussion

6.1 Hygroskopie

Bestimmte Klimabedingungen wie Luftfeuchtigkeit, Umgebungstemperatur und Taupunkttemperatur befördern das Entstehen von *Soiling*-Prozessen wie *Caking*, *Cementation* und *Capillary Aging*. Das Vermögen Feuchtigkeit aufzunehmen und zu speichern kann ein starkes Indiz für die jeweilige Ausprägung der Beteiligung einzelner Stäube oder Materialbestandteile an der Haftung an Oberflächen sein. Diese fällt je nach Staub unterschiedlich stark aus und ist auf seine Zusammensetzung von verschiedenen Mineralien zurückzuführen. Zunächst könnte eine mögliche Ursache für ein geringes Aufnahmevermögen von *Arizona quarzfrei* darauf zurückzuführen sein, dass die verwendete Variante ein künstlicher Staub ist, der quarzfrei ist im Gegensatz zum natürlich vorkommenden Staub mit über 50% Quarz-Anteil. Ebenfalls ist der *Middle-East*-Staub ein künstlicher Staub, dessen Zusammensetzung bekannt ist. *Arizona quarzfrei* kann im Gegensatz zu den Stäuben aus den Versuchen der Hygroskopie (Abb. 13) nicht mehr als 0,5 % Feuchtigkeit aufnehmen, unabhängig von der Temperatur und Höhe der Luftfeuchtigkeit während der Aufnahme. Dagegen werden einige Stäube hygroskopisch und können weit mehr als 5 % Feuchtigkeit aufnehmen. Zunächst erfolgte die Feuchtigkeitsaufnahme unter Raumtemperatur (21 °C) und kein Staub war hygroskopisch. Jedoch bewirkte eine Raumtemperatur von mindestens 40 °C und einer RH von 75,47 % bei *Cerro Paranal* bereits eine erhöhte Feuchtigkeitsaufnahme von über 5 %. Bei den Stäuben *Qatar STF*, *Jordan* und *Atacama Desert* benötigte es während der Feuchtigkeitsaufnahme jedoch eine RH von 97,59 % und eine Temperatur von 60 °C um über 5 % Feuchtigkeitsaufnahme zu gelangen. *Cerro Paranal* gelangt unter diesen Bedingungen bereits ein Aufnahmevermögen von über 14 %.

Ein Großteil der verwendeten Stäube bestehen zu über 20 % aus Quarz sowie Hämatit von über 5 % bei einer *Particulate-Matter 10 (PM10)*³ (Tab. 2). Hämatit ist magnetisch und aufgrund seiner lückenlosen Mischkristall-Struktur unfähig Wasser aufzunehmen. Quarz erscheint in nahezu allen Stäuben und ist ebenfalls nicht für seine wasseraufnehmende Fähigkeit bekannt^[34].

Tabelle 2.: Mineralbestandteile der Stäube mit Angabe der Menge in Masse% für PM10^{[24][25]}

Bestandteile	Herkunft(ID)	Atacama	Mo-	Qatar	China	Arizona
	Formel	Desert (S1042)	rocco (S1025)	(S2004)	(S1055)	(S1066)
Quarz	SiO ₂	28,85	25,79	20,73	24,01	50,44
Kaolinit	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	5,87	6,71	4,87	4,71	3,31
Calcit	CaCO ₃	2,76	10,37	26,92	16,88	2,47
Dolomit	CaMg(CO ₃) ₂	0,69	0	3,72	3,59	1,36
Natriumcarbonat	Na ₂ CO ₃	0,02	0	0,04	0	0,90
Kaliumcarbonat	K ₂ CO ₃	0,24	0	0,25	0,22	0,82
Gips	CaSO ₄ *2H ₂ O	10,31	0,01	0	0,96	0
Apatit	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (F)	0,21	0	0	0,06	0,05
Ammoniumsulfat	(NH ₄) ₂ SO ₄	0,31	0,24	0,07	0,09	0,02
Braunstein	MnO ₂	0,08	0,13	0,09	0,09	0,04
Brookit	TiO ₂	0,45	0,66	0,63	0,55	0,30
Hämatit	Fe ₂ O ₃	5,47	6,38	6,35	5,96	1,97

Da in der vorliegenden Arbeit eine Korrelation zwischen steigendem Kaolinit-Anteil (Al₂Si₂O₅(OH)₄) und Wasseraufnahmevermögen der Stäube festgestellt werden konnte, liegt der Verdacht nahe, dass Kaolinit für das Wasseraufnahmevermögen verantwortlich ist. Nach Markl ist Kaolinit aufgrund seiner Zwei-Schicht-Tetraeder- und molekularen Struktur jedoch kein guter Wasserspeicher und besonders schlecht darin Ionen zu speichern^[34]. Demnach ist Kaolinit weder an der Nadelstrukturbildung noch an der Fähigkeit der Wasseraufnahme der Stäube beteiligt. Anders verhält es sich dagegen bei Palygorskit (Mg,Al)₂[Si₄O₁₀(OH)] * 4 H₂O), welches bei der Verwitterung von basischem Gestein oder kalkreichen Böden arider Zonen häufig bei einem pH-Wert von 8

³ Particulate-Matter 10: Bezeichnung für die Konzentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] von Feinstaub mit dem Durchmesser von weniger als 10 μm .

entsteht^[35]. Es besitzt eine Zeolith-ähnliche Struktur aus feinen Röhren, sodass in den vielen kleinen Kanälen Wasser gut aufgenommen werden kann^[36]. Zudem würde die Erkenntnis darüber, dass Palygorskit wesentlich in der Ausbildung von Nadelstrukturen beteiligt ist^{[37][38]}, sowie wesentlich neben CaCO_3 , $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ und $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ an *Cementation*-Prozess beteiligt ist übereinstimmen^{[26][27]}. Nach Engelbrecht et al. sind nur relative Mengenangaben an Palygorskit in Stäuben vorhanden. So lediglich <5 % Palygorskit für *Qatar(S2004)* und *Iraq(S2006 & S2011)* bei Staubfraktionen von <38 μm . Dies stimmt mit den Ergebnissen der optischen Analyse überein. Dagegen ist Apatit aufgrund seiner Größe und flexiblen Struktur in der Lage chemische Elemente, also Ionen zu lagern. So sind in den Hohlkanälen OH^- , F^- , Cl^- , PO_4^{3-} als auch Na^+ , Ba^{2+} , Pb^{2+} und Mn^{2+} vorzufinden und stimmen, bis auf *Morocco(S1025)*, mit dem Phosphat-Gehalt in Tab. 3 der jeweiligen Stäube mit Apatit überein^{[39][40]}.

Tabelle 3.: Anteil an löslichen Ionen der Stäube in Masse% für PM10^{[20][21]}

Herkunft (ID)	Atacama Desert (S1042)	Morocco (S1025)	Qatar (S2004)	China (S1055)	Arizona (S1066)
Ionen					
Cl^-	0,136	0,253	0,021	0,401	0,053
NO_3^-	0,081	0,028	0,011	0,036	0,041
PO_4^{3-}	0,121	0,145	0	0,035	0,030
SO_4^{2-}	7,380	0,141	0,226	0,691	0,159
NH_4^+	0,086	0,029	0,044	0,027	0,021
Ca^{2+}	3,327	5,234	12,403	7,658	0,857
K^+	0,136	0,252	0,142	0,129	0,467
Mg^{2+}	0,092	0,626	0,491	0,474	0,179
Na^+	0,101	0,248	0,021	0,257	0,427

Calcit besitzt viele unterschiedliche Kristallstrukturen mit jeweils wechselnden Ionenradien, die es speichern kann. Die häufigsten Kationen sind Mg^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} und Zn^{2+} ^[34]. Ein größerer Anteil der ionenspeichernden Minerale könnte zumindest die Anzahl der Ionen im Staub erklären. Nicht nur die mineralische Zusammensetzung ist entscheidend, vielmehr ist es die Kombination von unlöslichen mineralischen und löslichen ionischen Bestandteilen. Lösliche und nicht-lösliche Bestandteile potenzieren gemeinsam

ihr Vermögen für feste Bindungen. Insbesondere wenn die löslichen Partikel oder Salze an Stellen zwischen den größeren Partikeln gelangen und trocknen und nun als Klebstoff fungieren, der zu Agglomeraten führt. Demnach üben die mineralischen Bestandteile vermutlich einen Einfluss auf *Cementation* und der lösliche Ionenanteil auf das *Caking*-Verhalten aus.

Die Ionenmenge insbesondere an Kationen steht in Verdacht mit dem pH-Wert und damit eingehend der Ionizität zu korrelieren, da diese relativ einfach in Kontakt mit Wasser zu ihrer korrespondierenden Base reagieren können, welche wie in Tab. 4 entsprechend alkalisch ist. Zudem besteht womöglich eine Korrelation zwischen dem Na^+ -sowie K^+ - Gehalt und dem pH-Wert und somit der Wasseraufnahmefähigkeit der Stäube. Je höher der prozentuale Masseanteil der Kationen, desto höher der pH-Wert und umso kleiner die Aufnahmefähigkeit von Wasser.

Weiterhin ist zu beachten, dass wie in Abb.8 dargestellt wurde, bei Erhöhung der Temperatur nur bei KCl die RH% stark absinkt. Dies führt zu einer Veränderung der RH von 85,11 % bei 21 °C auf 82,32 % bei 40 °C und bei 60 °C auf 80,25 %. Dieses Verhalten ist bei den anderen gelösten Salzen zwar ebenfalls zu sehen, jedoch vernachlässigbar gering. Zudem ist die Löslichkeit der Ionen temperaturabhängig, da sie bei höheren Temperaturen steigt.

6.2 pH-Messungen

Die pH-Messungen zeigen leichte bis stärkere Tendenzen hin zur Alkalität der untersuchten Stäube. Dabei sticht der Teststaub *Arizona quarzfrei* mit einem pH-Wert von über 9 besonders heraus. Vermutlich sind die Stäube alkalischer, die mehr wasserlösliche Kationen und Carbonate besitzen. Die Kationen sind in der Lage in Kontakt mit Wasser unter Abspaltung eines Wasserstoff-Protons Hydroxid-Gruppen zu bilden und basisch zu werden während die Carbonate selbst bereits basisch sind. Das Wasserstoffpotenzial der Stäube an der Glasoberfläche ist von Bedeutung, da es einen Grad für die Wechselwirkungen an der Glasoberfläche angibt. Sie verursachen Korrosion des Glases, sowie chemische Reaktionen unter den Mineralbestandteilen und wasserlöslichen Ionen.

Tabelle 4.: pH-Werte der Basen aus vorhandenen Kationen und vorhandenen Carbonate der Stäube bei Immol/L

Kationen	pH	Carbonate	pH
<i>NaOH</i>	11,00	<i>K₂CO₃</i>	10,52
<i>KOH</i>	11,00	<i>Na₂CO₃</i>	10,52
<i>Mg(OH)₂</i>	10,40	<i>CaCO₃</i>	9,91
<i>NH₄OH</i>	10,00		

Dies könnte durch die verschiedenen löslichen Ionen in den Stäuben zu erklären sein, die das Potenzial zur hydrolytischen Wechselwirkung haben. In Zukunft wären weitere Versuche zur elektrischen Leitfähigkeit und der daraus kalkulierbaren Salinität bedeutsam, da bereits in der Hygroskopie die Bedeutung von löslichen Salzen bei *Soiling*-Prozessen klar wurde. Zudem ist eine Untersuchung mittels Fourier-Transformation-Infrarot-Analysen (FTIR) zu empfehlen, um die hydrolytische Aktivität an der Oberfläche zu untersuchen und mit den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit zu vergleichen.

6.3 Optische Analyse

In der optischen Analyse durch Lichtmikroskop wurden die *Soiling*-Phänomene *Caking* und *Cementation* zwar ersichtlich, aufgrund mangelnder Qualität der Bilder jedoch nicht optimal auswertbar. Daher kam ein REM zum Einsatz, mit dessen Hilfe hochauflösenden Bilder der oben genannten Phänomene erstellt und ausgewertet werden konnten. Die Versuche waren sowohl durch die Korrelation der Stromwerte als auch durch die Optische Auswertung dem jeweiligen Bereich der ΔT_{dp} zuzuordnen. Zur Beobachtung von *Capillary Aging* wären Aufnahmen der Proben von der Seite im Profil nötig gewesen, die in dieser Arbeit nicht möglich waren. Die allesamt zwischen einer ΔT_{dp} von 1,5 K und 3 K gelegenen kritischen Punkte, konnten mittels Lichtmikroskop-Analyse für alle Stäube optisch ausgewertet werden. Dies stimmte mit den Messungen zur Korrelation von Stromwerten und Belegungsraten überein. Ausgehend von Abb. 44 ist davon auszugehen, dass sich der kritische Punkt bei einer ΔT_{dp} von 2 K befindet. Die Bilder des REM konnten verdeutlichen, dass sich die ausgebildeten Nadelstrukturen der verschiedenen Stäube selbst innerhalb der *Cementation* deutlich unterscheiden. So waren an der Partikeloberfläche von *Qatar*-Staub beispielsweise viele feine Nadeln zu sehen (Abb. 25a)ii). In Abb. 22a) dagegen sind plattenförmige Nadelstrukturen zu sehen während für *Middle-East*-Staub in Abb. 22b) nur lange Nadelstrukturen zu sehen sind. Dies führt zu der Annahme, dass sich in verschiedenen Mineralbestandteilen unterschiedliche Strukturen innerhalb des gleichen Phänomens in Abhängigkeit der ΔT_{dp} bilden können. Als Hauptbestandteile von *Cementation* stehen Gipsspat, Calciumcarbonat, Silica, Eisenoxide als auch Palygorskit in Verdacht^{[22][23]}. Größere Partikel sind leichter von Windstößen zu entfernen, sodass durch Agglomeratbildung größere Partikel entstehen als zuvor vorhanden und besser abgetragen werden konnten. Dies stimmt mit der statistischen Auswertung überein. So kommt es vor, dass die Nadelstrukturen und Vorhöfe auf den Bildern noch zu sehen sind, selbst wenn das zentrale Partikel bereits abgetragen wurde. Weitere optische Versuche zur Untersuchung von *Capillary Aging* könnten in zukünftigen Versuchen folgen, um die Phänomene untereinander besser zu differenzieren. Zudem könnten Echtzeitaufnahmen von *Soiling*-Prozessen in der

Auswertung des Entstehungsprozess weitere Aufschlüsse für eine geeignete Vermeidungsstrategien bieten.

6.4 Statistik

Die statistische Auswertung bekräftigt die Erkenntnis der optischen Analysen, nach der sich Agglomerate durch Tau-induzierte *Soiling*-Prozesse aus kleineren Partikeln bilden und veranschaulicht dies durch die Zählung aller Partikel vor und nach der Betauung. Nach der Betauung bei einer ΔT_{dp} von ≤ 2 K ist die Anzahl der gezählten Partikel insgesamt, als auch innerhalb der einzelnen Gruppen mit Partikeldurchmesser von 2 bis 14 μm , trotz Windstoß größer als vor der Betauung. Nicht nur sind mehr gezählte Partikel nach Betauung vorhanden, sie sind auch mit erhöhter Haftfestigkeit präsent. Zudem verdecken die wenigen großen Partikel verhältnismäßig den größten Anteil der Oberfläche. Kleine Partikel sind schwieriger durch Winde zu entfernen als große, wobei selbst nach Betauung unter einer ΔT_{dp} von 2 K Windstöße von $15 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ nicht mehr ausreichen. Doch dies gilt nicht für festhaftende Agglomerate und Partikel nach Betauung. Selbst wenn das zentrale Partikel sich löst wie in Abb. 24a) & 25a)ii) zu sehen ist, hinterlässt es viele Vorhöfe von einzelnen Partikeln und Nadelstrukturen die schwerlöslich sind.

Zudem wertet ImageJ möglicherweise agglomerierte Partikel als Ganzes, auch wenn es noch einzelne Partikel sind. Zudem könnten ganze Vorhöfe von sehr kleinen Nadeln als Partikel gezählt werden, auch wenn es keine sind. Sehr kleine Nadeln werden von ImageJ möglicherweise nicht als einzelne Partikel, sondern als Gruppe erfasst und in der Zählung mit aufgeführt.

6.5 Sensorstromauswertung

6.5.1 Messungen zur Korrelation von Sensorstrom und Belegungsrate zur Luftfeuchtigkeit

Die Messungen sollten zunächst Aufschluss darüber geben, ob eine Abhängigkeit des Sensorstromes von der Luftfeuchtigkeit besteht, um die Anzahl von Einflussfaktoren zu ermitteln und begrenzen. Eine Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit beim Messen des Sensorstrom in Korrelation mit der Belegungsrate ist anzunehmen. Trotz Wiederholungsbedarf der Ergebnisse der Sensorstromwerte bei einer RH von 75,47 % bei *Morocco*-Staub, deuten alle anderen Messpunkte eine lineare Abhängigkeit an, sodass die Anzahl der möglichen Einflussfaktoren steigt. Dies bedeutet für den weiteren Verlauf der Messungen, dass eine stabil eingestellte Raum-Luftfeuchtigkeit unerlässlich ist. Bei *Qatar*-Staub ist in der Abb. 33 gut zu sehen, dass bei einer Belegungsrate von 2,5 % der Sensorstromwert bei einer RH von 75,47 % ca. 0,05 nA, bei 97,59 % jedoch bereits 2,2 nA besitzt. Gleiches bei einer Belegungsrate von 10 %. Bei einer RH von 75,47 % ist der Sensorstromwert nahezu unverändert mit ca. 0,06 nA, jedoch bei einer RH von 97,59 % bereits bei 3,05 nA. Der Anstieg der Sensorstromwerte bei einer RH von 97,59 % ist immens, wogegen er bei 75,47 % nahezu unverändert verweilt. Die Einstellung für einen PI-Regler einer Heizsteuerung würde sich ohne dieses Wissen als schwierig gestalten, da sonst die Grenzwerte zu weit auseinander liegen und zu einem Dauerbetrieb führen würden. Sollte eine Heizsteuerung Tau vermeiden können, müsste dieser spezifisch auf alle Sorten an Staub und die Luftfeuchtigkeit als Einflussvariable eingestellt werden. Die Messung für *Morocco* erfolgte für die Versuchsreihe mit einer RH von 75,47 % fehlerhafte Ergebnisse, vermutlich verursacht durch einen kaputten, verwendeten Oberflächensensor. Da diese Messung lediglich für zwei Stäube durchgeführt wurde und das Verhältnis der Steigungen für die Sensorstromwerte nicht vergleichbar sind, wird empfohlen in weiteren Versuchen die bereits bestehenden Ergebnisse zu verifizieren und um weitere Staubproben zu erweitern.

6.5.2 Messungen zur Korrelation von Sensorstrom und Belegungsrate

Die Messungen zeigen zunächst, dass eine Korrelation von Sensorstrom zur Belegungsrate besteht. Dies gilt für alle gemessenen Stäube, sodass der Einsatz für eine PI-Heizregelung denkbar ist. Es konnte für alle Stäube ein kritischer Punkt zwischen einer ΔT_{dp} von 1,5 K und 3 K gemessen werden. Lediglich bei *Morocco*-Staub veränderte sich der Sensorstrom zwischen einer ΔT_{dp} von 1K und 1,5 K deutlich von 7,5 nA bei 1,5 K auf 84 nA bei 1 K. Der Sensorstrom für *Qatar*-Staub variiert noch stärker, sodass beide Stäube für eine Regelung nicht verwendbar wären. Bei dem *Middle-East*-Staub aus dem Vortrag des Fraunhofer CSPs ICSEWEN21^[33] (Abb. 44) ist der Sensorstrom erst unter einer ΔT_{dp} von 2 K unter 1 nA und ab einer ΔT_{dp} von 1,5 K über 2 nA sehr deutlich. Messschwankungen sind nicht auszuschließen. Wie aus Abb. 46 zu entnehmen ist, nimmt der Oberflächensensor durch mechanische Abnutzung oder womöglich Korrosion Schaden, sodass ein Abfall der Messgenauigkeit anzunehmen ist. Es ist jedoch nicht klar, wie schnell diese Schäden erscheinen oder in welcher Abhängigkeit sie zu welchem Staub stehen. Der Sensor selbst müsste daher optimiert werden da die Ergebnisse der Versuchsreihen nur mit einer geringen Genauigkeit reproduzierbar sind.

Zur Verifizierung wird empfohlen alle Versuche mehrfach zu wiederholen und weitere Stäube zu verwenden, um das Spektrum zu erweitern. Manche Belegungsraten fielen unterschiedlich aus, da der initiale Belegungsgrad bereits Schwankungen unterlag. Dieser sollte jedoch bei allen Versuchen innerhalb der Stäube gleich sein. Als Fehlerquelle hierfür ist eine mögliche Varianz in der TOPAS Staubkammer oder im Fließband der Staubkammer selbst beim Einholen der Staubmengen. Verschieden große Staubkörner können unterschiedlich transportiert werden und somit eine Diskrepanz erzeugen, da verschiedengroße Körner andere Belegungsgrade schaffen.

Zudem unterscheiden sich die Belegungsraten für *Qatar*-Staub zu *Morocco*-Staub deutlich. *Qatar*-Staub gelangt bis zu einer Belegungsrate 1,6 und *Morocco*-Staub nur bis ca. 1. Die Grenzwerte des Sensorstroms sind dagegen im gleichen Rahmen (Abb. 41 und Abb. 43). Neben der Fehlerquelle Sensor, käme als weitere mögliche Ursache die erhöhte Menge an Kationen insbesondere Ca^{2+} in *Qatar*-Staub in Betracht, welche in Kontakt mit Wasser zu Calciumcarbonat reagieren können das selbst nur als Ladungsträger fungieren. Wie in der Tab. 5 zu sehen ist, besitzt *Qatar*-Staub 12 Masse% an Ca^{2+} , *Morocco*-Staub dagegen nur 5 Masse%. Dies könnte einen Einfluss auf die gemessene Stromstärke des Sensors haben, da sich im *Qatar*-Staub mehr potenzielle Ladungsträger befinden. Versuche zur elektrischen Leitfähigkeit und folglich zur Salinität könnten weitere aufschlussreiche Erkenntnisse liefern.

In weiteren Versuchen wäre es hilfreich die Analysen von Engelbrecht et al. direkt von den zu untersuchenden Stäuben zum Soiling durchzuführen. Die Mineralbestandteile von Stäuben können bei wenigen km Entfernung bereits variieren, als auch zu verschiedenen Jahreszeiten, sodass der Vergleich der Stäube auf Mineralbestandteile und löslichen Ionen von Engelbrecht et al. nur relativ ist. Zudem wären die Untersuchungen der Mineralien der Stäube sowohl vor als auch nach Kontakt mit Wasser durchzuführen, um festzustellen, ob und in welchem Maße die Zusammensetzung sich verändert.

7 Zusammenfassung

Das primäre Ziel der vorliegenden Arbeit war die Charakterisierung und Erfassung der Haftfestigkeit verschiedener Stäube, um Rückschlüsse auf deren Verhalten bei Tau-induzierten *Soiling*-Prozessen ziehen zu können und um aus den gewonnenen Erkenntnissen eine PI-Heizregelung als Vermeidungsstrategie für das *Soiling* zu betreiben. Der Fokus lag bei den *Soiling*-Phänomenen *Cementation*, *Caking* und *Capillary Aging*, die insbesondere in den ariden und semi-ariden Gegenden des Dustbelts vorzufinden sind und unter nächtlichem Tau und folgender Trocknung am Tag ausgelöst werden. Diese Mechanismen erhöhen die Haftfestigkeit des *Soiling* an der PV-Oberfläche immens und verschatten diese, sodass es zu energetischen Leistungsverlusten der Anlage kommt. Zur Charakterisierung der Stäube wurden optische Analysen mit Lichtmikroskop und REM durchgeführt, sowie hygroskopische und pH-Messungen der Stäube. Die bildgebenden Verfahren wurden zudem computergestützt analysiert und statistisch ausgewertet. Zudem wurden Korrelationsmessungen von Staubbelegungsraten zu Sensoroberflächenstrom durchgeführt.

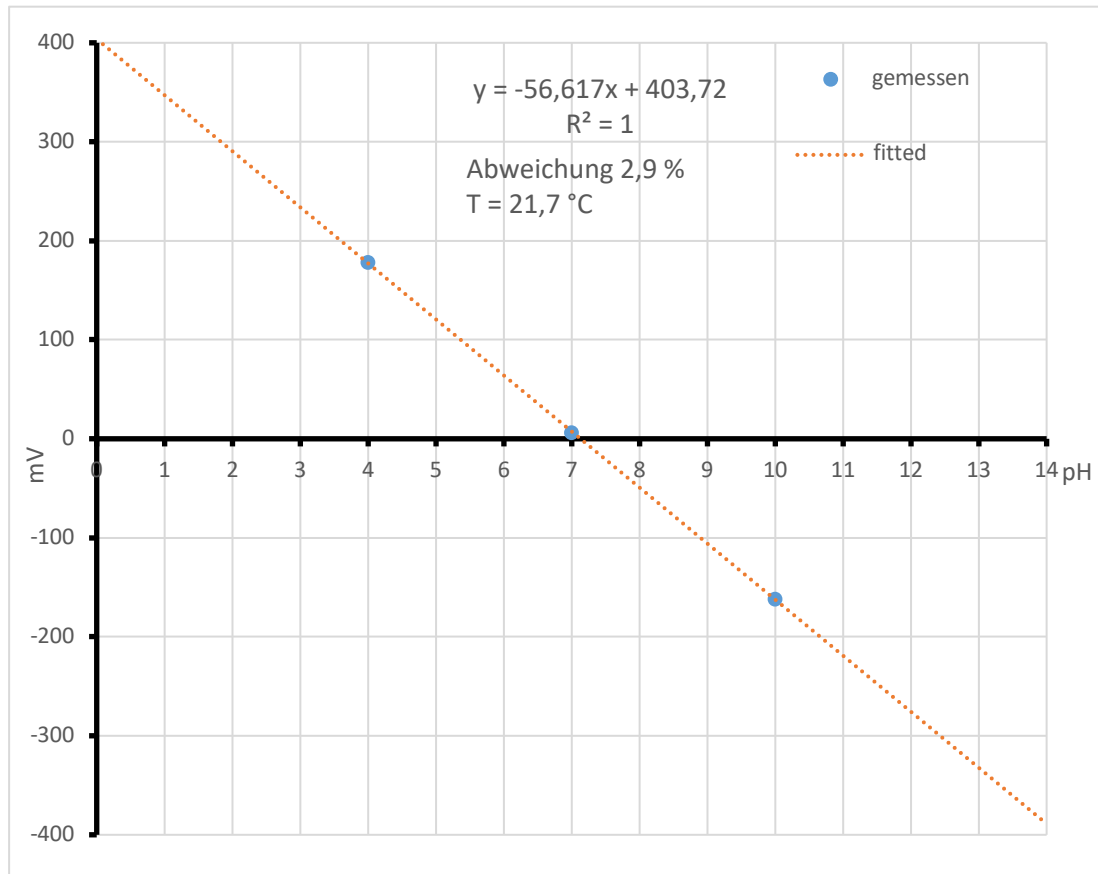
In dieser Arbeit konnte eine multivariable Korrelation von Ionengehalt, Wasseraufnahmefähigkeit und Alkalität festgestellt werden, sowie Abhängigkeiten von Sensorstromwerten zur Luftfeuchtigkeiten und Belegungsgrad von staubbehafteten Oberflächen. Im Detail konnten starke Unterschiede in der Aufnahmefähigkeit von Wasser bei den untersuchten Stäuben beobachtet werden, sowie der Einfluss von Temperatur während der Okulation. Der geringste Gewichtsverlust lag bei 0,25 %, während der höchste Wert über 15 % reichte. Die pH-Werte der Stäube waren im alkalischen Bereich von 7,89 bis 9,38. Dabei zeigte sich eine reziproke Folge der Stäube, in der die mit höherem pH-Wert tendenziell eine geringere Wasseraufnahme besitzen. In der statistischen Auswertung konnte zudem beobachtet werden, wie die Haftfestigkeit gesteigert wurde nach Reduzierung der ΔT_{dp} , da die Anzahl der Partikel selbst nach Windstoß erhöht war. Optisch konnte die erhöhte Haftfestigkeit in der REM-Untersuchung durch Ausbildung von feinen und großen Nadelstrukturen beobachtet werden, sowie durch Agglomeration

und Vorhofbildung von kleineren Partikeln zu größeren Partikelverbunden. Dies sind Charakteristiken der *Soiling*-Phänomene *Cementation* und *Caking*, welche einen kritischen Punkt zwischen einer ΔT_{dp} von 1,5 K bis 2 K bestätigen. Diese Grenze geht ebenfalls aus der statistischen und der lichtmikroskopischen Untersuchung, als auch aus den Ergebnissen der Korrelationsmessungen des Sensorstromes und Belegungsrad hervor. Zudem wurden Grenzwerte von 2 nA bei einer ΔT_{dp} von 1,5 K für *Middle-East*-Staub und 6 nA bei einer ΔT_{dp} von 1,5 K für *Morocco*-Staub gemessen. Darüber hinaus konnte eine Abhängigkeit des Grenzwertes von der Luftfeuchtigkeit ermittelt werden, was wiederum für die Auslegung einer PI-Heizregelung zur Steuerung der ΔT_{dp} über 2 K relevant ist.

Mit den neuen Erkenntnissen dieser Arbeit ergeben sich weitere Anhaltspunkte zur Ausführung von Versuchen zur Charakterisierung der Stäube und zum Design einer PI-Heizregelung, sind aber selbst noch nicht ausreichend. In zukünftigen Arbeiten wären weitere Versuche mit noch nicht untersuchten Stäuben zur Korrelationsmessung nötig, da noch keine Systematik im Bezug zum Sensorstromgrenzwert verifizierbar dargestellt werden konnte, lediglich Hinweise darauf aus den durchgeführten Experimenten und der Literaturrecherche auf Zusammenhänge mit den untersuchten Staubeigenschaften beim *Soiling*. Zudem wären weitere Versuche nötig, um die bisherigen Ergebnisse zu quantifizieren, um infolgedessen konkrete Experimente mit einer PI-Heizregelung zur Evaluation der gewonnenen Grenzwerte durchzuführen.

8 Anhang

Anhang I - Kalibrierungsgerade des pH-Messgerätes



9 Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] Lawrence CR, Neff JC. The contemporary physical and chemical flux of aeolian dust: a synthesis of direct measurements of dust deposition. *Chem Geol* 2009;267(1–2):46–63. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.02.005>.
- [2] Kok JF, Parteli EJR, Michaels TI, Karam DB. The physics of wind-blown sand and dust. *Rep Prog Phys* 2012;75(10):106901. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/75/10/106901>.
- [3] <https://www.boell.de/de/2021/01/20/gruener-wasserstoff-aus-marokko-keine-zauberformel-fuer-europas-klimaneutralitaet> [zuletzt abgerufen am 12.09.2022]
- [4] Sayyah, Arash; Horenstein, Mark N.; Mazumder, Malay K. (2014): Energy yield loss caused by dust deposition on photovoltaic panels. In: *Solar Energy* 107, S. 576–604. DOI: 10.1016/j.solener.2014.05.030.i
- [5] Seapan, Manit; Hishikawa, Yoshihiro; Yoshita, Masahiro; Okajima, Keiichi (2020): Temperature and irradiance dependences of the current and voltage at maximum power of crystalline silicon PV devices. In: *Solar Energy* 204, S. 459–465. DOI: 10.1016/j.solener.2020.05.019.
- [6] Fraunhofer ISE-Report - Baechle, Sophia: Fraunhofer ISE entwickelt effizienteste Solarzelle der Welt mit 47,6 Prozent Wirkungsgrad. https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/presseinformationen/2022/1322_PI_ISE_Weltrekord_47,6Prozent-Solarzelle.pdf
- [7] Zekry, Abdelhalim; Shaker, Ahmed; Salem, Marwa (2018): Solar Cells and Arrays. In: *Advances in Renewable Energies and Power Technologies*: Elsevier, S. 3–56. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812959-3.00001-0>
- [8] Shockley, William; Queisser, Hans J. (1961): Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells. In: *Journal of Applied Physics* 32 (3), S. 510–519. DOI: 10.1063/1.1736034.
- [9] Watter, Holger (2022): *Regenerative Energiesysteme*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- [10] Pariser Klimaabkommen 2015 https://treaties.un.org/doc/Treaties/2016/02/20160215%2006-03%20PM/Ch_XXVII-7-d.pdf

- [11] https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Bilder/Grafiken_erneuerbare_Energien/Diagramm-03.png;jsessionid=A9994E67EB83176B0D64313A50589ECA?__blob=poster&v=24 [zuletzt abgerufen am 05.09.2022]
- [12] <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2022/04/20220406-habeck-das-osterpaket-ist-der-beschleuniger-fur-die-erneuerbaren-energien.html> [zuletzt abgerufen am 20.05.2022]
- [13] Ilse, Klemens; Micheli, Leonardo; Figgis, Benjamin W.; Lange, Katja; Daßler, David; Hanifi, Hamed et al. (2019): Techno-Economic Assessment of Soiling Losses and Mitigation Strategies for Solar Power Generation. In: *Joule* 3 (10), S. 2303–2321. DOI: 10.1016/j.joule.2019.08.019.
- [14] Schmela, M., Beauvais, A., Chevillard, N., Paredes, M.G., Heisz, M., and Rossi, R. Global Market Outlook.
- [15] <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/erneuerbare-energien.html> [zuletzt abgerufen am 20.05.2022]
- [16] https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Bilder/Grafiken_erneuerbare_Energien/Diagramm-07.png;jsessionid=A9994E67EB83176B0D64313A50589ECA?__blob=poster&v=28 [zuletzt abgerufen am 25.06.2022]
- [17] Figgis, Benjamin; Nouviaire, Armelle; Wubulikasimu, Yiming; Javed, Wasim; Guo, Bing; Ait-Mokhtar, Abdelkarim et al. (2018): Investigation of factors affecting condensation on soiled PV modules. In: *Solar Energy* 159, S. 488–500. DOI: 10.1016/j.solener.2017.10.089.
- [18] García M, Marroyo L, Lorenzo E, Pérez M. (2011): Soiling and other optical losses in solar-tracking PV plants in navarra. *Prog Photo: Res Appl* 2011;19(2):211 - <https://doi.org/10.1002/pip.1004>.
- [19] Ilse, Klemens K.; Figgis, Benjamin W.; Naumann, Volker; Hagendorf, Christian; Bagdahn, Jörg (2018): Fundamentals of soiling processes on photovoltaic modules. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 98, S. 239–254. DOI: 10.1016/j.rser.2018.09.015.
- [20] Rabinovich Adler, Ata, Singh Moudgil (2000): Adhesion between nanoscale rough surfaces. - *J Colloid Interface Sci* 2000;232(1):17–24. <https://doi.org/10.1006/jcis.2000.7168>.

- [21] Çolak, Arzu; Wormeester, Herbert; Zandvliet, Harold J.W.; Poelsema, Bene (2012): Surface adhesion and its dependence on surface roughness and humidity measured with a flat tip. In: *Applied Surface Science* 258 (18), S. 6938–6942. DOI: 10.1016/j.apsusc.2012.03.138.
- [22] Picotti, G.; Borghesani, P.; Cholette, M. E.; Manzolini, G. (2018): Soiling of solar collectors – Modelling approaches for airborne dust and its interactions with surfaces. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81, S. 2343–2357. DOI: 10.1016/j.rser.2017.06.043.
- [23] Moutinho, H. R.; Jiang, C.-S.; To, B.; Perkins, C.; Muller, M.; Al-Jassim, M. M.; Simpson, L. (2017): Adhesion mechanisms on solar glass: Effects of relative humidity, surface roughness, and particle shape and size. In: *Solar Energy Materials and Solar Cells* 172, S. 145–153. DOI: 10.1016/j.solmat.2017.07.026.
- [24] Engelbrecht JP, Moosmüller H, Pincock S, Jayanty RKM, Lersch T, Casuccio G. (2016): Technical note: mineralogical, chemical, morphological, and optical interrelationships of mineral dust re-suspensions. *Atmos Chem Phys*;16(17):10809–30. <https://doi.org/10.5194/acp-16-10809-2016>.
- [25] Engelbrecht JP. (2016): Supplement of Technical note: mineralogical, chemical, morphological, and optical interrelationships of mineral dust re-suspensions. *Atmos Chem Phys*;16:10809–30. <https://doi.org/10.5194/acp-16-10809-2016-supplement>.
- [26] Stokes, M.; Charman, J.; Epps, R. J.; Griffiths, J. S. (2012): Chapter 5 Soil and rock description and characteristics. In: *EGSP* 25 (1), S. 143–157. DOI: 10.1144/EGSP25.05.
- [27] Calcretes Rodas M. (1994): Palycrates and silcretes in the paleogene detrital sediments of the Duero and Tajo Basins, Central Spain. *Clay Miner*; 29(2):273–85. <https://doi.org/10.1180/claymin.1994.029.2.13>.
- [28] Ilse, Klemens; Khan, Muhammad Zahid; Voicu, Nicoleta; Naumann, Volker; Hagendorf, Christian; Bagdahn, Jörg (2019): Advanced performance testing of anti-soiling coatings – Part I: Sequential laboratory test methodology covering the physics of natural soiling processes. In: *Solar Energy Materials and Solar Cells* 202, S. 110048. DOI: 10.1016/j.solmat.2019.110048.
- [29] Ullah, Asad; Amin, Amir; Haider, Turab; Saleem, Murtaza; Butt, Nauman Zafar (2020): Investigation of soiling effects, dust chemistry and optimum cleaning schedule for PV modules in Lahore, Pakistan. In: *Renewable Energy* 150, S. 456–468. DOI: 10.1016/j.renene.2019.12.090.

- [30] Chandel, S. S.; Agarwal, Tanya (2017): Review of cooling techniques using phase change materials for enhancing efficiency of photovoltaic power systems. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 73, S. 1342–1351. DOI: 10.1016/j.rser.2017.02.001.
- [31] Greenspan, L. (1977): Humidity Fixed Points of Binary Saturated Aqueous Solutions. *Journal of Research of the National Bureau of Standards – A. Physics and Chemistry*, Vol. 81A, No. 1
- [32] Black, Charles Allen (1973): *Methods of Soil Analysis*; American Society of Agronomy: Madison, WI.
- [33] Fraunhofer CSP Vortrag ICSEWEN21 [Ausgabe vom 31.09.2022]
- [34] Okrusch, Martin; Frimmel, Hartwig E. (2022): *Mineralogie*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [35] Markl, Gregor (2015): *Minerale und Gesteine*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [36] Hans Jürgen Rösler (1979): *Lehrbuch der Mineralogie*. 4. durchgesehene und erweiterte Auflage. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie (VEB), Leipzig, ISBN 3-342-00288-3, S. 579.
- [37] Ilse, Klemens; Werner, Martina; Naumann, Volker; Figgis, Benjamin W.; Hagendorf, Christian; Bagdahn, Jörg (2016): Microstructural analysis of the cementation process during soiling on glass surfaces in arid and semi-arid climates. In: *Phys. Status Solidi RRL* 10 (7), S. 525–529. DOI: 10.1002/pssr.201600152.
- [38] Ilse, Klemens K.; Figgis, Benjamin W.; Werner, Martina; Naumann, Volker; Hagendorf, Christian; Pöllmann, Herbert; Bagdahn, Jörg (2018): Comprehensive analysis of soiling and cementation processes on PV modules in Qatar. In: *Solar Energy Materials and Solar Cells* 186, S. 309–323. DOI: 10.1016/j.solmat.2018.06.051.
- [39] Pasero M, Kampf AR, Ferraris C, Pekov IV, Rakovan J, White TJ (2010): Nomenclature of the apatite supergroup minerals. *Eur J Mineral* 22:163–179
- [40] Chang LLY, Howie RA, Zussman J (1996): *Rock-forming minerals*, Bd 5B, 2. Aufl, Non-silicates: sulphates, carbonates, phosphates, halides. Longmans, Harlow

10 Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Masterarbeit mit dem Titel „*Charakterisierung von Staubeigenschaften zur Reduktion von Soiling-Prozessen an Glasoberflächen*“ selbständig verfasst habe, dass ich sie zuvor an keiner anderen Hochschule und in keinem anderen Studiengang als Prüfungsleistung eingereicht habe und dass ich keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Alle Stellen der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen oder aus anderweitigen fremden Äußerungen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Patrick A. Farago

Halle (Saale), 12.03.2023