

**Konzeptionierung eines Prüfstandes zur Untersuchung der
negativen Einflüsse von Meersalzaerosolen auf die Gebrauchsduauer
von Solaranlagen**

Diplomarbeit

im Studiengang Umweltingenieurwesen

an der

Fachhochschule Lübeck
Mönkhofer Weg 239, 23562 Lübeck

erstellt am

Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE
Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg

vorgelegt von

Jakob Grimm

Erster Gutachter:	Prof. Dr. rer. nat. Dipl.-Phys. Siegfried Kreußler
Zweiter Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Michael Bischoff
Betreuer:	Dipl.-Phys. oec. Karl-Anders Weiß, Fraunhofer ISE
Bearbeitungszeitraum:	05.06. 2008 – 17.10.2008

Freiburg, Oktober 2008

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation für das Thema	1
1.2	Zielstellung und Aufbau der Arbeit.....	3
2	Struktur- und Funktionsanalyse von Solaranlagen	5
2.1	Aufbau von Solaranlagen	5
2.1.1	Thermische Solaranlagen	5
2.1.2	Photovoltaikmodule.....	8
2.2	Funktionsweise von Solaranlagen	11
2.2.1	Thermische Solaranlagen	11
2.2.2	Photovoltaikmodule.....	14
2.3	Degradation von thermischen Solaranlagen	16
2.3.1	Betriebsbedingte Degradation	17
2.3.2	Degradation in salzhaltiger Atmosphäre	17
2.4	Degradation von PV-Modulen.....	19
2.4.1	Betriebsbedingte Degradation	19
2.4.2	Degradation in salzhaltiger Atmosphäre	20
2.5	Identifizierung korrosionsempfindlicher Komponenten.....	22
3	Korrosionsverhalten von Werkstoffen	24
3.1	Korrosion von metallischen Werkstoffen	24
3.1.1	Mechanismus der atmosphärischen Korrosion.....	24
3.1.2	Korrosionsformen und –arten.....	26
3.2	Korrosion von nichtmetallischen Werkstoffen.....	27
3.2.1	Glaskorrosion	27
3.2.2	Kunststoffkorrosion.....	28
3.3	Korrosion in maritimer Atmosphäre.....	29
3.3.1	Entstehung von Meersalzaerosolen	29
3.3.2	Einflussfaktoren auf den Salzgehalt der Luft	31
3.3.3	Einfluss maritimer Atmosphären auf die Korrosion von Metallen	32
4	Bestehende Normen und Verfahren für Korrosionsprüfungen	34
4.1	Korrosivität von Atmosphären	34
4.1.1	Klassifizierung durch die Exposition von metallischen Gebrauchsnormalen ..	35
4.1.2	Klassifizierung durch Messung der Umweltparameter	36
4.1.3	Relevanz der betrachteten Normen	39
4.2	Beschleunigte Korrosionsprüfverfahren.....	40
4.2.1	Salzsprühnebelprüfungen nach [ISO9227].....	40
4.2.2	Zyklische Salznebelprüfungen nach [IEC68252].....	42
4.2.3	Wechseltauchprüfungen in Salzlösung nach [ISO11130]	43
4.2.4	Vor- und Nachteile der betrachteten Verfahren	44
5	Auswahl des Prüfverfahrens und Konzeptionierung des Prüfstandes	45
5.1	Auswahl des Prüfverfahrens	45
5.2	Aufbau und Komponenten des Prüfstandes.....	46

5.2.1	Der Ultraschallvernebler.....	46
5.2.2	Die Prüfkammer.....	47
5.2.3	Der Probenhalter.....	50
5.2.4	Temperatur-Monitoring mit Pt100-Sensoren.....	50
6	Kalibrierung des Prüfstandes	52
6.1	Einstellung der Betriebsbedingungen	53
6.1.1	Durchschnittliche Auffangmenge der Salzlösung	53
6.1.2	Chloriddeposition und örtliche Verteilung des Salznebels	57
6.1.3	Ermittlung des Konzentrationsgradienten F_{Cl}	61
6.1.4	Monitoring der Prüfkammer- und Probentemperatur	63
6.2	Korrosionsprüfungen mit Gebrauchsnormalen aus Stahl	65
6.2.1	Entfernung der Korrosionsprodukte und Ermittlung des Massenverlustes	66
6.2.2	Bewertung der Korrosivität der Prüfkammer nach [ISO9227].....	68
6.2.3	Massenverlust in Abhängigkeit der Prüftemperatur	69
6.2.4	Massenverlust in Abhängigkeit der Chloridbelastung.....	70
6.2.5	Vergleich der Korrosionsreaktionen in der Prüfkammer und unter Freibewitterung.....	72
6.3	Betriebsbedingungen des kalibrierten Prüfstandes	74
7	Korrosionsprüfungen an ausgewählten Komponenten von Solaranlagen	76
7.1	Komponenten von thermischen Solaranlagen	76
7.1.1	Beschreibung der Komponenten.....	76
7.1.2	Korrosionsverhalten der geprüften Komponenten.....	80
7.2	Komponenten von Photovoltaikmodulen	86
7.2.1	Beschreibung der Komponenten.....	86
7.2.2	Korrosionsverhalten der geprüften Komponenten.....	86
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	90
8.1	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	90
8.1.1	Eignung des Prüfstandes.....	90
8.1.2	Ergebnisse der Korrosionsprüfungen.....	91
8.2	Ausblick	92
8.2.1	Erweiterung des Prüfstandes.....	92
8.2.2	Langzeittests unter Freibewitterung.....	94
A nhang	A-1	
A Tabellen und Messdiagramme.....	A-1	
A.1	Durchschnittliche Auffangmenge der Salzlösung	A-1
A.2	Chloriddeposition und örtliche Verteilung des Salznebels	A-4
A.3	Monitoring der Prüfkammer- und Probentemperatur	A-15
A.4	Massenverlust der Gebrauchsnormale in Abhängigkeit von $t_{\text{prüf}}$	A-18
A.5	Massenverlust der Gebrauchsnormale in Abhängigkeit von $c_{\text{Lösung}}$	A-21
A.6	Berechnung der Korrosionsrate von Stahl unter Freibewitterung	A-23
B Fotos des Prüfstandes	A-24	

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Verteilung des langjährigen Mittels der Globalstrahlung in Europa [Met08].....	1
Abbildung 1-2:	Schematische Darstellung der methodischen Vorgehensweise der Diplomarbeit	4
Abbildung 2-1:	Aufbauschema eines Flachkollektors [Ini08].....	6
Abbildung 2-2:	Aufbauschema eines Vakuum – Röhrenkollektors [Vie08].....	8
Abbildung 2-3:	Aufbauschema eines herkömmlichen Photovoltaikmoduls [Sch03]	8
Abbildung 2-4:	Aufbauschema eines Glas-Glas-Dünnschicht-PV-Moduls	11
Abbildung 2-5:	Absorptions- und Emissionsspektren schwarzer Körper und schematische Absorptionsgrade von Absorbern [Qua03].....	13
Abbildung 2-6:	I-U Kennlinie einer Silicium-Solarzelle in Abhängigkeit der Bestrahlungsstärke [Qua03]	15
Abbildung 2-7:	Temperaturabhängigkeit der Zellspannung einer Solarzelle aus Silicium [Qua03].....	15
Abbildung 2-8:	I-U und P-U Kennlinie einer Silicium-Solarzelle [Qua03].....	16
Abbildung 2-9:	Korrosion an Rahmen und Trägerstruktur von Solarkollektoren [ITC08].....	18
Abbildung 2-10:	Korrosion am Speichertank eines Solarkollektors [ITC08]	19
Abbildung 2-11:	Delamination und Browning des Einkapselungspolymers von PV-Modulen.....	20
Abbildung 2-12:	Korrosion an verschiedenen Komponenten von PV-Modulen nach 3,5 Jahren [ITC08]	21
Abbildung 2-13:	Korrosion an der Trägerstruktur von PV-Modulen nach zehn Jahren [ITC08]	21
Abbildung 3-1:	Entstehungsmechanismen von Meersalzaerosolen [Man08]	30
Abbildung 3-2:	Atmosphärische Korrosion von Stahl in Abhängigkeit der Entfernung zur Küste [Cal03]	33
Abbildung 5-1:	Schematische Darstellung des Prüfstandes	46
Abbildung 5-2:	Ultraschallvernebler U-3002-E	47
Abbildung 5-3:	Prüfkammer ohne Anschlüsse und Verschlussystem	48
Abbildung 5-4:	Komponenten des Verschlussystems	49
Abbildung 5-5:	Prüfkammer mit allen Anchlüssen und dem Verschlussystem..	49
Abbildung 5-6:	Probenhalter mit zwei Proben 50*50mm ² und einer Probe 100*70mm ²	50
Abbildung 6-1:	Schematische Darstellung der drei Versuchsreihen.....	52
Abbildung 6-2:	Anordnung der Uhrglasschalen zur Ermittlung der durchschnittlichen Auffangmenge der verwendeten Salzlösung ..	55

Abbildung 6-3:	Aufgefangenes Volumen der Salzlösung pro Uhrglasschale nach $t_{\text{prüf}} = 1\text{h}$	56
Abbildung 6-4:	Masse des niedergeschlagenen Salzes pro Uhrglasschale nach $t_{\text{prüf}} = 1\text{h}$	58
Abbildung 6-5:	Masse des niedergeschlagenen Salzes pro Uhrglasschale nach $t_{\text{prüf}} = 8\text{h}$	58
Abbildung 6-6:	Masse des niedergeschlagenen Salzes Δm_{kammer} in Abhängigkeit der Prüfdauer $t_{\text{prüf}}$	60
Abbildung 6-7:	Chloridbelastung in der Prüfkammer S_{kammer} in Abhängigkeit der Prüfdauer $t_{\text{prüf}}$	61
Abbildung 6-8:	Konzentrationsgradient F_{Cl} in Abhängigkeit der Prüfdauer $t_{\text{prüf}}$ für $S_{\text{max}} = 1500 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{d}$	62
Abbildung 6-9:	Temperaturverlauf in der Klimakammer, der Prüfkammer und der Probe bei $T_{\text{prüf}} = 35^\circ\text{C}$	64
Abbildung 6-10:	Eingabemaske zur Ermittlung des Massenverlustes eines Gebrauchsnormals	67
Abbildung 6-11:	Diagramm zur Ermittlung des korrosionsbedingten Massenverlustes bei $T_{\text{prüf}} = 35^\circ\text{C}$	69
Abbildung 6-12:	Massenverlust der Gebrauchsnormale in Abhängigkeit der Prüftemperatur	70
Abbildung 6-13:	Massenverlust der Gebrauchsnormale in Abhängigkeit der Konzentration der Salzlösung	71
Abbildung 6-14:	Berechnete Korrosionsrate von Stahl in Abhängigkeit der Chloridbelastung S	73
Abbildung 6-15:	Berechnete Korrosionsrate von Stahl in Abhängigkeit der Temperatur T	74
Abbildung 7-1:	Gemessene Reflexionsspektren der Proben im ungealterten Zustand	78
Abbildung 7-2:	Absorptionsgrad von Probe 1 und 2 in Abhängigkeit der Wellenlänge	79
Abbildung 7-3:	Korrosionsfortschritt von Probe 1 in Abhängigkeit der Prüfdauer und –temperatur	81
Abbildung 7-4:	Veränderung des Reflexionsspektrums von Probe 1 in Abhängigkeit der Prüfdauer und der Prüftemperatur	82
Abbildung 7-5:	Veränderung des Reflexionsspektrums von Probe 2 in Abhängigkeit der Prüfdauer und der Prüftemperatur	82
Abbildung 7-6:	Veränderung des Reflexionsspektrums von Probe 3 in Abhängigkeit der Prüfdauer und der Prüftemperatur	83
Abbildung 7-7:	Veränderung des Reflexionsspektrums von Probe 4 in Abhängigkeit der Prüfdauer und der Prüftemperatur	83
Abbildung 7-8:	Veränderung des Reflexionsspektrums von Probe 5 in Abhängigkeit der Prüfdauer und der Prüftemperatur	84

Abbildung 7-9:	Veränderung der optischen Eigenschaften von Probe 1 in Abhängigkeit der Prüfdauer und der Prüftemperatur.....	85
Abbildung 7-10:	Silicium-Solarzelle mit Kontaktbändern und Anschlussdose mit Frontabdeckung.....	86
Abbildung 7-11:	Solarzelle im gealterten (links) und ungealterten (rechts) Zustand.....	87
Abbildung 7-12:	Oberfläche der geprüften Solarzelle bei 20facher Vergrößerung im ungealterten Zustand und nach 48h Prüfdauer bei 35°C.....	87
Abbildung 7-13:	Kontaktbänder im gealterten (oben) und ungealterten (unten) Zustand.....	88
Abbildung 7-14:	Oberfläche der geprüften Kontaktbänder bei 20- und 50facher Vergrößerung in ungealtertem Zustand und nach 48h Prüfdauer bei 35°C.....	88
Abbildung 8-1:	Weitere Vorgehensweise zur Entwicklung eines zertifizierten Prüfverfahrens	96
Abbildung A-2:	Aufgefangenes Volumen der Salzlösung pro Uhrglasschale nach $t_{\text{prüf}} = 2\text{h}$	A-2
Abbildung A-3:	Aufgefangenes Volumen der Salzlösung pro Uhrglasschale nach $t_{\text{prüf}} = 3\text{h}$	A-3
Abbildung A-4:	Örtliche Verteilung des Salznebels bei $t_{\text{prüf}} = 1\text{h}$ und $c_{\text{Lösung}} = 3,5\%$	A-4
Abbildung A-5:	Örtliche Verteilung des Salznebels bei $t_{\text{prüf}} = 2\text{h}$ und $c_{\text{Lösung}} = 3,5\%$	A-5
Abbildung A-6:	Örtliche Verteilung des Salznebels bei $t_{\text{prüf}} = 4\text{h}$ und $c_{\text{Lösung}} = 3,5\%$	A-6
Abbildung A-7:	Örtliche Verteilung des Salznebels bei $t_{\text{prüf}} = 8\text{h}$ und $c_{\text{Lösung}} = 3,5\%$	A-7
Abbildung A-8:	Örtliche Verteilung des Salznebels bei $t_{\text{prüf}} = 2\text{h}$ und $c_{\text{Lösung}} = 5\%$	A-9
Abbildung A-9:	Örtliche Verteilung des Salznebels bei $t_{\text{prüf}} = 4\text{h}$ und $c_{\text{Lösung}} = 5\%$	A-10
Abbildung A-10:	Örtliche Verteilung des Salznebels bei $t_{\text{prüf}} = 1\text{h}$ und $c_{\text{Lösung}} = 7\%$	A-11
Abbildung A-11:	Örtliche Verteilung des Salznebels bei $t_{\text{prüf}} = 2\text{h}$ und $c_{\text{Lösung}} = 7\%$	A-12
Abbildung A-12:	Örtliche Verteilung des Salznebels bei $t_{\text{prüf}} = 4\text{h}$ und $c_{\text{Lösung}} = 7\%$	A-13
Abbildung A-13:	Örtliche Verteilung des Salznebels bei $t_{\text{prüf}} = 8\text{h}$ und $c_{\text{Lösung}} = 7\%$	A-14
Abbildung A-14:	Temperaturverlauf in der Klimakammer, der Prüfkammer und der Probe bei einer gewünschten Prüftemperatur von 20°C	A-16
Abbildung A-15:	Temperaturverlauf in der Klimakammer, der Prüfkammer und der Probe bei einer gewünschten Prüftemperatur von 50°C	A-17

- Abbildung A-16: Diagramm zur Ermittlung des korrosionsbedingten
Massenverlustes bei $t_{\text{prüf}} = 35^\circ\text{C}$ und $c_{\text{Lösung}} = 5\%$ A-19
- Abbildung A-17: Diagramm zur Ermittlung des korrosionsbedingten
Massenverlustes bei $t_{\text{prüf}} = 50^\circ\text{C}$ und $c_{\text{Lösung}} = 5\%$ A-20
- Abbildung A-18: Diagramm zur Ermittlung des korrosionsbedingten
Massenverlustes bei $t_{\text{prüf}} = 35^\circ\text{C}$ und $c_{\text{Lösung}} = 7\%$ A-21
- Abbildung A-19: Diagramm zur Ermittlung des korrosionsbedingten
Massenverlustes bei $t_{\text{prüf}} = 35^\circ\text{C}$ und $c_{\text{Lösung}} = 3,5\%$ A-22
- Abbildung A-20: Klimakammer zur Einstellung der Prüftemperatur A-24
- Abbildung A-21: Prüfkammer mit Verschlussystem und Probehalter in
Klimakammer A-25

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Material und Funktion der Hauptkomponenten von Flachkollektoren.....	7
Tabelle 2-2:	Material und Funktion der Hauptkomponenten von PV-Modulen.....	10
Tabelle 2-3:	Aktive, passive und tragende Komponenten von Solaranlagen....	23
Tabelle 4-1:	Korrosivitäts-Kategorien nach [ISO9223]	35
Tabelle 4-2:	Korrosionsrate r_{corr} für die verschiedenen Korrosivitäts-Kategorien nach [ISO9223]	36
Tabelle 4-3:	Klassifizierung der Dauer der Feuchtigkeit nach [ISO9223].....	37
Tabelle 4-4:	Klassifizierung der Chlorid – Belastung nach [ISO9223]	38
Tabelle 4-5:	Klassifizierung der SO_2 – Belastung nach [ISO9223]	38
Tabelle 4-6:	Korrosivitäts-Kategorien in Abhängigkeit der wesentlichen Umweltparameter nach [ISO9223]	39
Tabelle 4-7:	Unterschiedliche Belastungsstufen aus [IEC68252].....	43
Tabelle 4-8:	Vor- und Nachteile der betrachteten Korrosionsprüfverfahren	44
Tabelle 6-1:	Ermittlung der Dichte ρ der 5%igen Salzlösung	54
Tabelle 6-2:	Durchschnittliche Auffangmenge der verwendeten Salzlösung für Prüfung 1 - 3	56
Tabelle 6-3:	Mittelwerte der Massendifferenz und Chloridbelastung in Abhängigkeit der Konzentration der verwendeten Salzlösung und der Prüfdauer	60
Tabelle 6-4:	Mittelwerte der gemessenen Temperaturen der Pt100-Sensoren und der Klimakammer	63
Tabelle 6-5:	Massenverlust der Gebrauchsnormale in Abhängigkeit der Prüftemperatur.....	69
Tabelle 6-6:	Massenverlust der Gebrauchsnormale in Abhängigkeit der Konzentration der Salzlösung	71
Tabelle 6-7:	Betriebsbedingungen des kalibrierten Prüfstandes und Anforderungen aus [ISO9227]	75
Tabelle 7-1:	Untersuchte Proben aus thermischen Solaranlagen	76
Tabelle 7-2:	Gemessene optische Werte der Proben und optische Werte laut Herstellerangaben.....	78
Tabelle 7-3:	Absorptions- und Emissionsgrad von Probe 1 im ungealterten Zustand und nach den jeweiligen Prüfungen	85
Tabelle A-1:	Messwerte der Prüfung zur Ermittlung der durchschnittlichen Auffangmenge der Salzlösung bei $t_{prüf} = 1h$	A-1
Tabelle A-2:	Messwerte der Prüfung zur Ermittlung der durchschnittlichen Auffangmenge der Salzlösung bei $t_{prüf} = 2h$	A-2

Tabelle A-3:	Messwerte der Prüfung zur Ermittlung der durchschnittlichen Auffangmenge der Salzlösung bei $t_{\text{prüf}} = 3\text{h}$	A-3
Tabelle A-4:	Messwerte und Ergebnisse der Chloriddeposition bei $t_{\text{prüf}} = 1\text{h}$ und $c_{\text{Lösung}} = 3,5\%$	A-4
Tabelle A-5:	Messwerte und Ergebnisse der Chloriddeposition bei $t_{\text{prüf}} = 2\text{h}$ und $c_{\text{Lösung}} = 3,5\%$	A-5
Tabelle A-6:	Messwerte und Ergebnisse der Chloriddeposition bei $t_{\text{prüf}} = 4\text{h}$ und $c_{\text{Lösung}} = 3,5\%$	A-6
Tabelle A-7:	Messwerte und Ergebnisse der Chloriddeposition bei $t_{\text{prüf}} = 8\text{h}$ und $c_{\text{Lösung}} = 3,5\%$	A-7
Tabelle A-8:	Messwerte und Ergebnisse der Chloriddeposition bei $t_{\text{prüf}} = 1\text{h}$ und $c_{\text{Lösung}} = 5\%$	A-8
Tabelle A-9:	Messwerte und Ergebnisse der Chloriddeposition bei $t_{\text{prüf}} = 2\text{h}$ und $c_{\text{Lösung}} = 5\%$	A-8
Tabelle A-10:	Messwerte und Ergebnisse der Chloriddeposition bei $t_{\text{prüf}} = 4\text{h}$ und $c_{\text{Lösung}} = 5\%$	A-9
Tabelle A-11:	Messwerte und Ergebnisse der Chloriddeposition bei $t_{\text{prüf}} = 8\text{h}$ und $c_{\text{Lösung}} = 5\%$	A-10
Tabelle A-12:	Messwerte und Ergebnisse der Chloriddeposition bei $t_{\text{prüf}} = 1\text{h}$ und $c_{\text{Lösung}} = 7\%$	A-11
Tabelle A-13:	Messwerte und Ergebnisse der Chloriddeposition bei $t_{\text{prüf}} = 2\text{h}$ und $c_{\text{Lösung}} = 7\%$	A-12
Tabelle A-14:	Messwerte und Ergebnisse der Chloriddeposition bei $t_{\text{prüf}} = 4\text{h}$ und $c_{\text{Lösung}} = 7\%$	A-13
Tabelle A-15:	Messwerte und Ergebnisse der Chloriddeposition bei $t_{\text{prüf}} = 8\text{h}$ und $c_{\text{Lösung}} = 7\%$	A-14
Tabelle A-16:	Messwerte der Klimakammer und Temperatursensoren bei einer gewünschten Prüftemperatur von 35°C	A-15
Tabelle A-17:	Messwerte der Klimakammer und Temperatursensoren bei einer gewünschten Prüftemperatur von 20°C	A-15
Tabelle A-18:	Messwerte der Klimakammer und Temperatursensoren bei einer gewünschten Prüftemperatur von 50°C	A-16
Tabelle A-19:	Messwerte und Ergebnisse des Massenverlustes bei $t_{\text{prüf}} = 35^\circ\text{C}$ und $c_{\text{Lösung}} = 5\%$	A-18
Tabelle A-20:	Messwerte und Ergebnisse des Massenverlustes bei $t_{\text{prüf}} = 20^\circ\text{C}$ und $c_{\text{Lösung}} = 5\%$	A-19
Tabelle A-21:	Messwerte und Ergebnisse des Massenverlustes bei $t_{\text{prüf}} = 50^\circ\text{C}$ und $c_{\text{Lösung}} = 5\%$	A-20
Tabelle A-22:	Messwerte und Ergebnisse des Massenverlustes bei $t_{\text{prüf}} = 35^\circ\text{C}$ und $c_{\text{Lösung}} = 7\%$	A-21
Tabelle A-23:	Messwerte und Ergebnisse des Massenverlustes bei $t_{\text{prüf}} = 35^\circ\text{C}$ und $c_{\text{Lösung}} = 3,5\%$	A-22

Tabelle A-24:	Werte zur Berechnung der Korrosionsrate von Stahl in Abhangigkeit von T in $^{\circ}\text{C}$	A-23
Tabelle A-25:	Werte zur Berechnung der Korrosionsrate von Stahl in Abhangigkeit von S in $\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$	A-23

Nomenklatur

Verwendete Formelzeichen

Symbol	Bedeutung	Einheit
$(\tau\alpha)_{eff}$	Transmissions-Absorptionsprodukt	-
A	Fläche	m^2
$c_{\text{Lösung}}$	Konzentration der verwendeten Salzsung	g/l oder %
E	Bestrahlungsstärke	W/m^2
F_{Cl}	Konzentrationsgradient von Chlorid	-
I	Stromstärke	A
m	Masse	kg
M	Molmasse	g/mol
P	Schwefeldioxiddeposition	$mgSO_2/m^2d$
P	Leistung	W
Q	Leistung	W
R	Elektrischer Widerstand	Ω
r_{corr}	Korrosionsrate	g/m^2a oder $\mu m/a$
RH	Relative Luftfeuchtigkeit	%
S	Chloriddeposition	$mgCl^-/m^2d$
s	Standartabweichung	-
t	Zeit	h
T	Temperatur	$^{\circ}C$
U	Spannung	V
V	Volumen	m^3
y	Massenanteil	%
α_{str}	Absorptionsgrad	%
ε_{str}	Emissionsgrad	%

λ	Wellenlänge	µm
ρ	Dichte	kg/m³
ρ_{str}	Reflexionsgrad	%
τ	Dauer der Feuchte	h/a oder %
τ_{str}	Transmissionsgrad	%

Indizes

Symbol	Bedeutung
Cl	Chlorid
E	Exposition
eff	effektiv
GB	Gebrauchsnormal
K	Kurzschluss
kammer	Prüfkammer
krit	kritisch
L	Leerlauf
nutz	nutzbar
prüf	Prüfung
S	Sensor
U	Uhrglasschale
V	Verlust

Verwendete Abkürzungen

Abkürzung Bedeutung

AM	Air mass
CPC	Compound Parabolic Concentrator
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
ESG	Einscheibensicherheitsglas
EVA	Etyhlenvinylacetat
Fe	Eisen
IEC	International Electrical Comission
ISE	Institut für Solare Energiesysteme
ISO	International Organistaion for Standardisation
ITC	Instituto Tecnológico de Canarias
MPP	Maximum Power Point
NaCl	Natriumchlorid
PET	Polyester
Pt	Platin
PUR	Polyurethanschaum
PV	Photovoltaik
PVB	Polyvinyl-Butyral
PVF	Polyvinylflourid
Si	Silicium
STC	Standart Test Conditions
TPU	Thermoplastisches Polyurethan
UV	Ultraviolett

1 Einleitung

1.1 Motivation für das Thema

Immer mehr Länder erkennen, welche enormen Potenziale die Nutzung von solarer Energie für den Klimaschutz, die heimische Energieversorgung und die Regionalentwicklung bietet. Solarenergie ist deshalb in den letzten Jahren zu einem festen Bestandteil der deutschen und auch europäischen Energiewirtschaft und -politik geworden.

Maritime Regionen sind dabei auf Grund ihrer hohen Bevölkerungsdichte und dem damit einhergehenden hohen Energiebedarf sowie der hier vergleichsweise hohen Sonneneinstrahlung als Standorte für die Nutzung von Solarenergie prädestiniert. Die Europäische Kommission schätzt, dass heute etwa 50% der europäischen Bevölkerung in mittelbarer oder unmittelbarer Küstennähe lebt [EuK06].

In den Küstenregionen des Mittelmeers und der spanischen Atlantikküste beträgt die jährliche Globalstrahlung bis zu 2.000 kWh/m²a und ist damit um bis zu 50% höher als beispielsweise in Süddeutschland, wo durchschnittlich 1.100 kWh/m²a gemessen werden [Met08]. Abbildung 1-1 zeigt die Verteilung des langjährigen Mittels der Globalstrahlung in Europa für den Zeitraum 1981-2000.

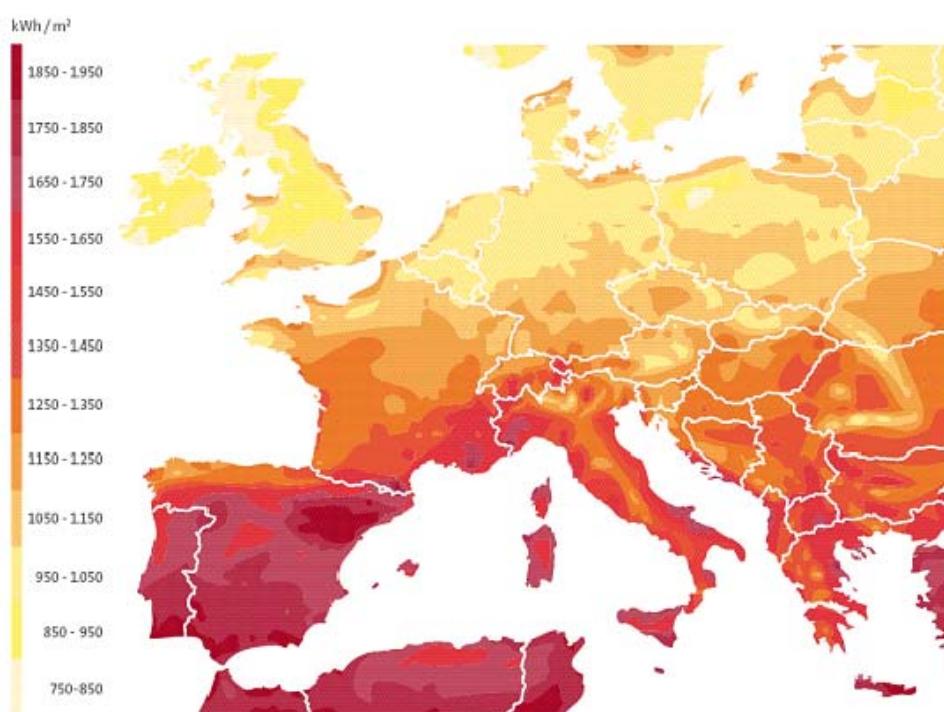


Abbildung 1-1: Verteilung des langjährigen Mittels der Globalstrahlung in Europa [Met08]

Deutschland, ein Land mit hohem Energiebedarf und vergleichsweise weniger günstigen klimatischen Verhältnissen ist nach wie vor der weltweit größte Absatzmarkt für Photovoltaikanlagen. Ermöglicht wird der rasante Zubau in Deutschland durch die mengenmäßig unbegrenzte und gleichzeitig hohe Förderung von neuen Photovoltaik-Anlagen nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG). Der Zubau der neuinstallierten Solarstromleistung betrug im Jahr 2007 rund 1,1 GWp [BSW08]. Insgesamt sind zurzeit etwa 430.000 Solarstromanlagen in Deutschland installiert. Der Zubau an Solarwärmesystemen zur Brauchwassererwärmung und Heizungsunterstützung betrug im Jahr 2007 1.000.000 m² Kollektorfläche [BSW08].

Die Zahlen geben den Aufschwung der Solarenergie in Deutschland eindrucksvoll wieder. Die Märkte für Solarenergie sind in anderen europäischen Ländern zwar wesentlich kleiner aber es besteht kaum ein Zweifel daran, dass die Nutzung in den nächsten Jahren auch in diesen stark zunehmen wird, zumal auch hier schon Gesetze zur Förderung von neuen Solaranlagen und somit die Rahmenbedingung für einen verstärkten Zubau geschaffen wurden.

Die Installation von Solaranlagen, sowohl im privaten als auch im gewerblichen Bereich, ist auf Grund der nach wie vor teuren Technik immer noch mit relativ hohen Investitionskosten verbunden. Die Amortisationszeiten von Solaranlagen liegen je nach Typ, Standort und Höhe der staatlichen Förderungen zwischen 10 und 20 Jahren. Damit sich eine Investition lohnt, müssen lange Lebensdauern bei möglichst wartungsfreiem Betrieb erreicht werden. Eine verstärkte Nachfrage stellt die Hersteller von Solaranlagen also auch vor besondere Herausforderungen. Deshalb nehmen Materialprüfung, Zertifizierung und Qualitätssicherung in der Solarindustrie einen immer wichtigeren Stellenwert ein.

Weil Solaranlagen dauerhafter Bewitterung ausgesetzt sind, müssen sie resistent gegen jegliche Umwelteinflüsse sein. Je nach Standort müssen solche Umwelteinflüsse bei der Herstellung von Anlagenkomponenten berücksichtigt werden. Gelten viele Küstenregionen zwar als besonders günstige Standorte für Solaranlagen, sind gerade die maritimen Atmosphären auch für ihre hochkorrosiven Eigenschaften aufgrund des hohen Gehalts von Meersalzpartikeln in der Luft bekannt. Erste Erfahrungen haben gezeigt, dass Solaranlagen hiervon in ihrer Funktionstüchtigkeit negativ beeinflusst werden. Da die Solartechnik noch relativ jung ist, sind Langzeitfolgen der Freibewitterung bislang nur wenig bekannt und es lässt sich teilweise sehr

schwer abschätzen, wie sich bestimmte Umwelteinflüsse auf die Funktionstüchtigkeit und Gebrauchsduer der Anlagen auswirken.

Um schnellere Aussagen treffen zu können, ist man auf die Simulation von Umwelteinflüssen angewiesen. In Klimakammern kann man dazu beschleunigte Alterungs- tests an Komponenten von Solaranlagen oder auch an ganzen Modulen oder Kollektoren durchführen. Am *Fraunhofer ISE* werden solche Bewitterungsprüfungen im Rahmen von Prüf- und Zertifizierungsverfahren schon seit mehreren Jahren durchgeführt. Aktuelle Tests beziehen sich vor allem auf die Beständigkeit der Anlagen gegen Temperaturwechsel, Feucht-Trocken-Zyklen und UV-Einstrahlung. Ein geeignetes Prüfverfahren zum Testen der Beständigkeit von Solaranlagen gegen salzhaltige Luft gibt es bislang nicht. In Hinblick auf die Zertifizierung und Qualitätssicherung ist es notwendig ein solches Verfahren zu entwickeln, um auch die Gebrauchsduertauglichkeit von Solaranlagen, die an maritimen Standorten betrieben werden sollen, garantieren zu können.

1.2 Zielstellung und Aufbau der Arbeit

Die Arbeit wird als ein Beitrag zur Entwicklung eines zertifizierten Prüfverfahrens zum Testen der Korrosionsbeständigkeit von Solaranlagen an maritimen Standorten verstanden. Ziel ist die Entwicklung eines Prüfstandes zur Durchführung von beschleunigten Korrosionsprüfungen mit Salznebel, um die negativen Einflüsse von Meersalzpartikeln auf die Funktionstüchtigkeit und Gebrauchsduer von Solaranlagen zu untersuchen. Dazu werden zunächst die wesentlichen Strukturen und die Funktionsweise solartechnischer Anlagen beschrieben und deren korrosionsempfindliche Materialien identifiziert. Anschließend werden verschiedene Komponenten ausgewählt, die später in dem Prüfstand auf ihre Beständigkeit gegen salzhaltige Luft getestet werden. Bei der Darstellung der physikalisch-chemischen Prozesse der Korrosion wird der atmosphärischen Korrosion durch Einfluss von Meersalzaerosolen und den Faktoren, die deren Landeinwärtstransport beeinflussen, besondere Berücksichtigung geschenkt. Weiterhin werden Verfahren betrachtet und bewertet, die es ermöglichen, einen Standort unter Berücksichtigung der auftretenden Wittringsbedingungen hinsichtlich seiner Korrosivität zu klassifizieren.

Die Konzeptionierung und der Bau des Prüfstandes erfolgen auf Grundlage bestehender Normen und Korrosionsprüfverfahren. Vor der Durchführung der eigentlichen Korrosionsprüfungen werden die Betriebsbedingungen des Prüfstandes ermittelt

und dokumentiert. Anschließend wird geprüft, in welchen Fällen die Anwendung bestehender Normen und Verfahren sinnvoll ist, bzw. in welchen Fällen von ihnen abgewichen werden sollte. Die Ergebnisse der Korrosionsprüfungen werden dokumentiert und hinsichtlich ihrer Aussagefähigkeit über die Einflüsse von Meersalzaerosolen auf die Funktionstüchtigkeit und Gebrauchsdauer von Solaranlagen ausgewertet. Im letzten Kapitel werden nach der Zusammenfassung Vorschläge gemacht, wie man bei der weiteren Vorgehensweise zur Entwicklung eines zertifizierten Prüfverfahrens an die Ergebnisse dieser Arbeit anknüpfen kann.

In Abbildung 1-2 sind die einzelnen Schritte der Arbeit schematisch dargestellt.

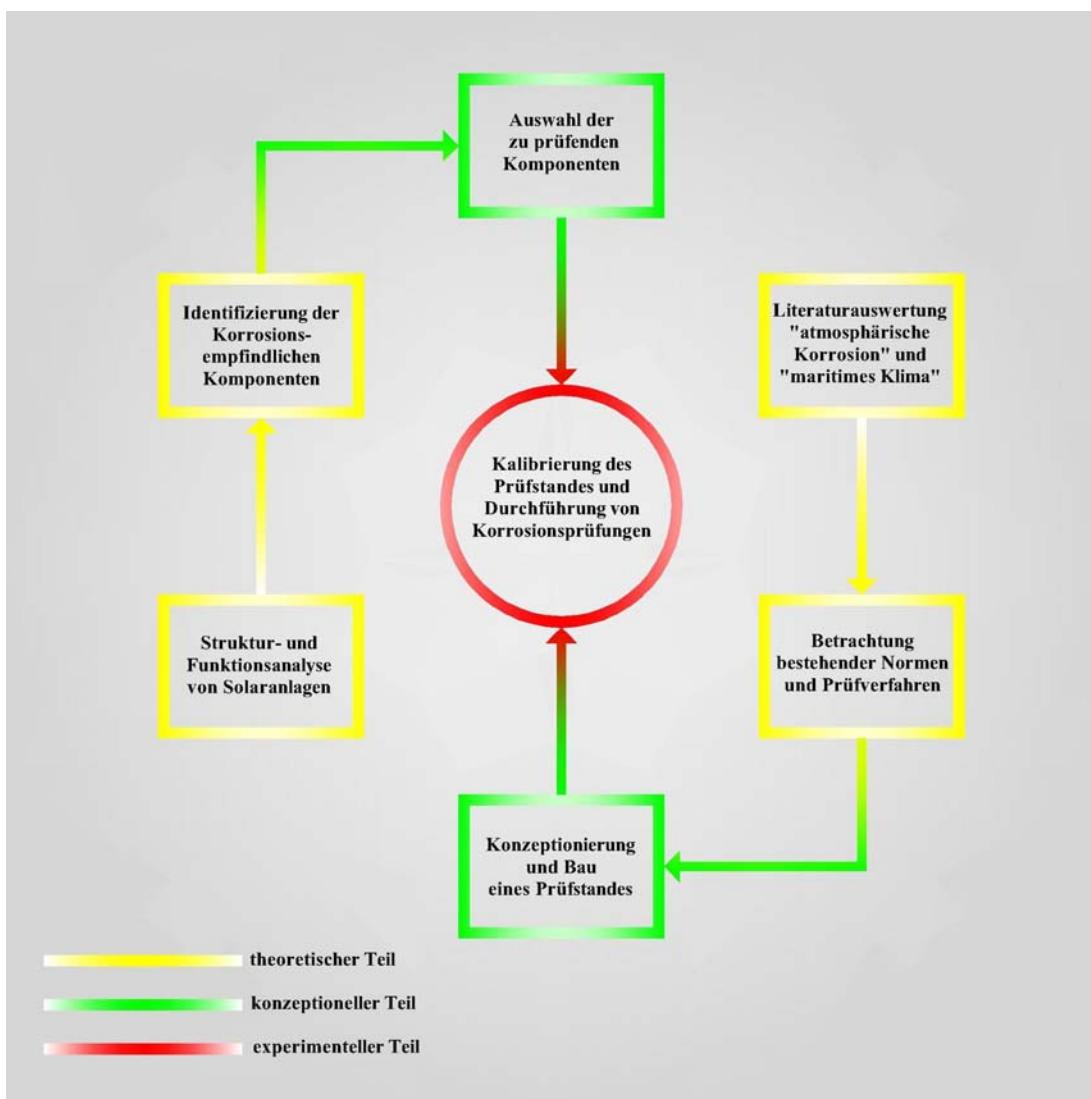


Abbildung 1-2: Schematische Darstellung der methodischen Vorgehensweise der Diplomarbeit

2 Struktur- und Funktionsanalyse von Solaranlagen

Um mögliche Einflüsse einer korrosiven Atmosphäre auf die Funktionstüchtigkeit und Gebrauchsdauer von Solaranlagen bestimmen zu können, werden im folgenden Kapitel der Aufbau von Solaranlagen sowie die Komponenten und Materialien aus denen sie produziert werden, näher betrachtet. Weiterhin wird die Funktionsweise der Anlagen kurz beschrieben. Schließlich werden Degradationserscheinungen von Solaranlagen insbesondere in salzhaltiger Atmosphäre betrachtet und diejenigen Komponenten, die anfällig für derartige Witterungseinflüsse sind, identifiziert. Gegenstand der Betrachtung sind die zwei Grundtypen von Solaranlagen:

- *Thermische Solaranlagen*, die in kleinerem Maßstab Wärmeenergie liefern und als Flachkollektoren oder Vakuum-Röhrenkollektoren gebaut werden.
- *Photovoltaikanlagen*, die zur Erzeugung elektrischer Energie dienen und als herkömmliche Photovoltaikmodule (PV-Module) mit einer Solarzelle aus mono- und multikristallinen Silicium oder als so genannte Dünnschicht-PV-Module Verwendung finden.

2.1 Aufbau von Solaranlagen

2.1.1 Thermische Solaranlagen

Flachkollektoren

Flachkollektoren sind die derzeit am häufigsten zum Einsatz kommenden thermischen Solaranlagen zur Brauchwassererwärmung. Die wesentlichen Komponenten eines Flachkollektors sind die transparente Abdeckung, der Rahmen, Dichtungen, Material zur Wärmedämmung sowie der Solarabsorber. Zusammen bilden die einzelnen Komponenten ein System, in welchem jede eine oder mehrere Funktionen hat.

Die Abdeckung besteht meist aus Glas und dient dem Schutz des Kollektorinneren vor mechanischen und witterungsbedingten Einflüssen. Außerdem minimiert sie die Wärmeverluste, die aufgrund der Temperaturdifferenz zwischen dem Absorber und der Umgebung auftreten (siehe hierzu Kapitel 2.2.1). Kernstück des Flachkollektors ist der Solarabsorber, welcher aus einem Absorberblech und einer Verrohrung besteht, durch die ein wärmetragendes Fluid fließt. Die durch Absorption der energiereichen Solarstrahlung gewonnene Wärme wird von dem wärmetragenden Fluid

abtransportiert, in einem Speichertank zwischengespeichert und dann zur Erwärmung von Trinkwasser oder zur Heizungsunterstützung weiterverwendet [Qua03].

Die Wärmedämmung verhindert rückseitige Wärmeverluste an die Umgebung. Der Rahmen gibt dem System Stabilität und dient als Montagevorrichtung. Um das Eindringen von Schmutz und Feuchtigkeit zu verhindern, befindet sich zwischen Rahmen und Abdeckung ein Dichtungsmaterial.

Abbildung 2-1 zeigt das Aufbauschema eines typischen Flachkollektors.

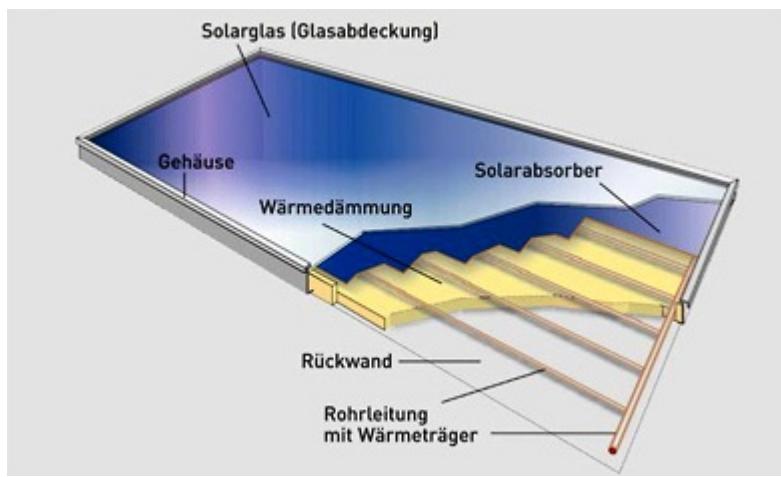


Abbildung 2-1: Aufbauschema eines Flachkollektors [Ini08]

Die verschiedenen Komponenten sind unterschiedlichen Klimabereichen ausgesetzt. Diese lassen sich in zwei Bereiche teilen: das Innenklima (Mikroklima), welches die Verhältnisse im Inneren des Kollektors widerspiegelt und das Außenklima (Makroklima).

Das Außenklima wird von dem Standort des Kollektors und den hier vorherrschenden jahreszeitlichen Witterungsbedingungen bestimmt. Das Innenklima wird vor allem von der Betriebstemperatur des Absorbers bestimmt. Je nach Luftwechselrate eines Kollektors wird es jedoch auch durch die Eigenschaften des Außenklimas (z.B. hohe Luftfeuchtigkeit, Luftschaadstoffe) beeinflusst.

In Tabelle 2-1 sind die Hauptkomponenten und die Materialien, aus denen Flachkollektoren gefertigt werden, dargestellt. Dabei sind die aktuell am häufigsten zum Einsatz kommenden Materialien (fett gedruckt) hervorgehoben. Die Funktionen und Eigenschaften der jeweiligen Komponente werden kurz beschrieben.

Tabelle 2-1: Material und Funktion der Hauptkomponenten von Flachkollektoren

Komponente	Material	Funktion / Eigenschaft
Rahmen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aluminium ▪ Edelstahl ▪ verzinkter Stahl ▪ Kunststoffe 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mechanische Stabilität des Kollektors ▪ Schutz vor Umwelteinflüssen ▪ Vorrichtung zur Montage
Abdeckung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Einscheibensicherheitsglas (ESG) ▪ Borosilikatglas ▪ Kunststoffe 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Schutz vor Umwelteinflüssen ▪ Minimierung von konvektiven Wärmeverlusten ▪ Hoher Transmissionsgrad ▪ Geringer Reflexionsgrad
Dichtung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kunststoffe 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Abdichtung des Kollektors ▪ Schutz vor Umwelteinflüssen
Wärmedämmung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mineralwolle, Steinwolle, Glaswolle ▪ Polyurethanschaum (PUR) ▪ Vakuum 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Minimierung der Wärmeverluste an die Umgebung
Absorber und selektive Schicht	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kupfer ▪ Aluminium ▪ Edelstahl ▪ galvanische Schichten ▪ Vakuumverfahren (TiNOX) ▪ Sputterverfahren (Bluetec) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Absorbierung der Globalstrahlung bzw. Umwandlung in Wärme ▪ Transport der Wärme an das Wärmeträgerfluid ▪ Hoher Absorptionsgrad ▪ Niedriger Emissionsgrad

Vakuum-Röhrenkollektoren

Die Funktionsweise von Vakuum-Röhrenkollektoren ist mit der von Flachkollektoren identisch. Der Solarabsorber befindet sich jedoch in einer Glaskugel, in welcher ein Vakuum herrscht. Dieses Vakuum sorgt für eine sehr gute Wärmedämmung, wodurch die Wärmeverluste an die Umgebung deutlich reduziert werden. Vor allem in kälteren Jahreszeiten lässt sich hierdurch ein höherer Energieertrag erzielen als mit herkömmlichen Flachkollektoren. Gleichzeitig ist der Absorber im Inneren der Vakuumröhre vor Witterungseinflüssen geschützt [Qua03].

Bei einigen Kollektoren befindet sich hinter den Röhren ein Reflektor aus Aluminium (Compound Parabolic Concentrator, CPC-Spiegel), der an den Röhren vorbeigehende Sonnenstrahlung reflektiert und auf den Absorber zurückwirft. Abbildung 2-2 zeigt den schematischen Aufbau eines typischen Vakuum-Röhrenkollektors.

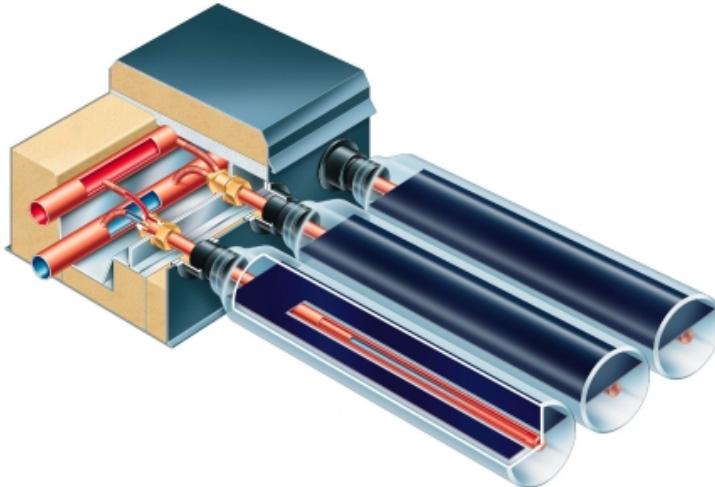


Abbildung 2-2: Aufbauschema eines Vakuum – Röhrenkollektors [Vie08]

2.1.2 Photovoltaikmodule

PV-Module mit mono- und multikristallinem Siliciumzellen

Ein herkömmliches PV-Modul besteht neben den mono- oder polykristallinen Siliciumzellen (Solarzellen) im Wesentlichen aus einer transparenten Frontabdeckung, einem Einkapselungspolymer, sowie einer Rückabdeckung. In Abbildung 2-3 ist die Anordnung dieser Komponenten schematisch dargestellt.

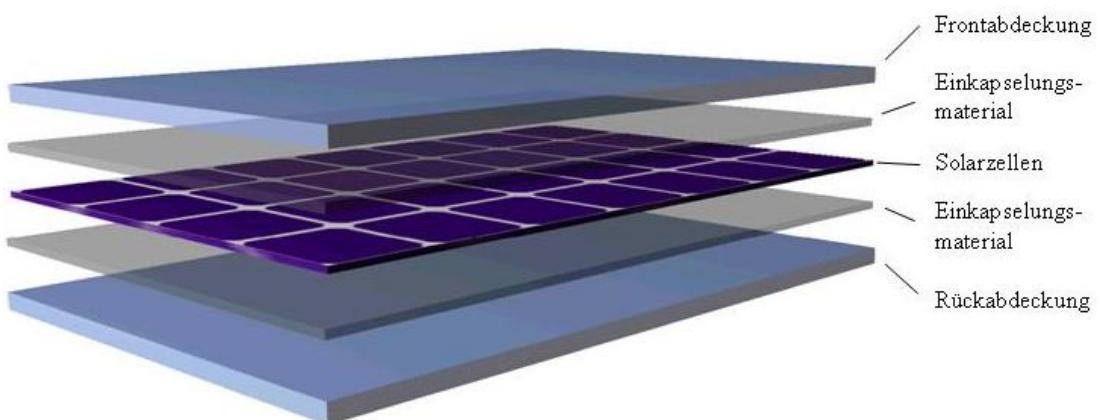


Abbildung 2-3: Aufbauschema eines herkömmlichen Photovoltaikmoduls [Sch03]

Die Frontabdeckung besteht meist aus Glas. Verwendung findet vor allem gehärtetes, eisenarmes Glas mit einer hohen Lichtdurchlässigkeit (Solarglas). Es dient vor allem

dem Schutz der Solarzellen vor Umwelteinflüssen wie Feuchtigkeit, Luftverunreinigungen und Hagelschlag und gibt dem Modul die nötige Stabilität. Außerdem filtert die Frontabdeckung kurzwellige Strahlung und schützt so das Einkapselungspolymer vor Degradation.

Die Solarzellen sind in einem Einkapselungspolymer eingebettet, um sie vor Witterungseinflüssen zu schützen. Das am häufigsten verwendete Einkapselungsmaterial ist Ethylenvinylacetat (EVA). Andere verwendete Materialien sind z.B. Polyvinyl-Butyral (PVB), thermoplastisches Polyurethan (TPU) oder Silikone. Optimaler Schutz der Solarzellen ist dann gewährleistet, wenn das Einkapselungsmaterial eine fehlerfreie Verbindung zwischen Frontabdeckung, Zelle und Rückabdeckung herstellt [Sch03].

Für die Rückabdeckung von PV-Modulen kommt meistens ein mehrschichtiges Laminat (Rückseitenfolie) zum Einsatz, in einigen Fällen auch Glas. Üblicherweise besteht das Laminat aus einer Dreischicht-Verbundfolie, bei dem eine Schicht Polyester-Folie (PET-Folie) zwischen zwei Schichten Polyvinylflourid-Folie (PVF / „Tedlar“) eingebettet ist (TPT-Rückseitenfolie). Letzteres zeichnet sich durch hohe Festigkeit und sehr gute UV-Beständigkeit aus. In einigen Fällen kommt an Stelle der PET-Folie auch eine Aluminiumfolie zum Einsatz [Sch03].

Die Rückseitenfolie verhindert den Feuchtetransport ins Innere des Moduls und schützt die Zellen vor Witterungseinflüssen. Außerdem dient sie als elektrischer Isolator der Zellen gegenüber der Umgebung

Zusammengehalten werden die einzelnen Komponenten von einem Rahmen aus Aluminium, welcher auch zur Montage des PV-Moduls dient. Auf der Rückseite des Moduls befindet sich eine Anschlussdose mit den elektrischen Kontakten.

Tabelle 2-2 gibt einen Überblick über die Hauptkomponenten und Materialien von PV-Modulen. Dabei sind die aktuell am häufigsten zum Einsatz kommenden Materialien (fett gedruckt) hervorgehoben. Die Funktionen und Eigenschaften der jeweiligen Komponente werden kurz beschrieben.

Tabelle 2-2: Material und Funktion der Hauptkomponenten von PV-Modulen

Komponente	Material	Funktion / Eigenschaft
Rahmen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aluminium ▪ Edelstahl ▪ verzinkter Stahl ▪ Kunststoffe 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mechanische Stabilität des Moduls ▪ Schutz vor Umwelteinflüssen ▪ Vorrichtung zur Montage
Abdeckung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Einscheibensicherheitsglas (ESG) ▪ Borosilikatglas ▪ Kunststoffe 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Schutz vor mechanischen Einwirkungen ▪ Stabilität / Versteifung des Moduls ▪ Hoher Transmissionsgrad ▪ Geringer Reflexionsgrad
Einkapselungspolymer	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ethylenvinylacetat (EVA) ▪ Polyvinyl-Butyral (PVB) ▪ Thermoplastisches Polyurethan (TPU) ▪ Silikone 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Schutz der Solarzellen vor Umwelteinflüssen ▪ Hoher Transmissionsgrad ▪ Geringer Reflexionsgrad
Rückseitenfolie	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Polyvinylflourid (PVF, „Tedlar“) ▪ Polyester (PET) ▪ Aluminium 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Schutz vor Umwelteinflüssen ▪ Elektrische Isolierung ▪ Verhinderung des Feuchtenttransports ins Innere des Moduls (Wasserdampfsperre)
Solarzellen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Silicium ▪ Cadmium-Tellurid (CdTe) ▪ Gallium-Arsenid (GaAs) ▪ Kupfer-Indium-Gallium-Schwefel-Selen (CIGS) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Umwandlung der Solarstrahlung in Elektrizität

Dünnschicht-PV-Module

Bei der Herstellung von Dünnschicht-PV-Modulen wird ein Halbleitermaterial ganzflächig auf ein Trägermaterial (Substrat) aufgetragen. Als Substrat dient meistens Glas, in einigen Fällen auch Metall. Es gibt verschiedene Halbleitermaterialien, die bei der Herstellung von Dünnschicht-PV-Modulen zum Einsatz kommen. Die zurzeit wichtigsten sind:

- amorphes Silicium (a-Si:H)
- mikrokristallines Silicium (μ c-Si:H)
- Gallium-Arsenid (GaAs)
- Cadmium-Tellurid (CdTe)
- Kupfer-Indium-Schwefel-Gallium-Selen (CIGS)

Da Dünnschicht-PV-Module Stabilitätsprobleme in heißer und feuchter Umgebung haben, muss auf eine sehr gute Feuchteversiegelung geachtet werden [Sol08]. Meistens werden sie deshalb als so genannte Glas-Glas-Module hergestellt. Die Rückseite des Moduls ist nicht mit einer Folie versiegelt, sondern besteht, wie die Abdeckung, aus Glas und dient gleichzeitig als Substrat für das Halbleitermaterial. Die Halbleiterschicht ist, wie in herkömmlichen Modulen, in einem Einkapselungspolymer eingebettet. Als Material kommt auch hier meistens EVA zum Einsatz.

Abbildung 2-4 zeigt den schematischen Aufbau eines typischen Glas-Glas-Dünnschicht-PV-Moduls.

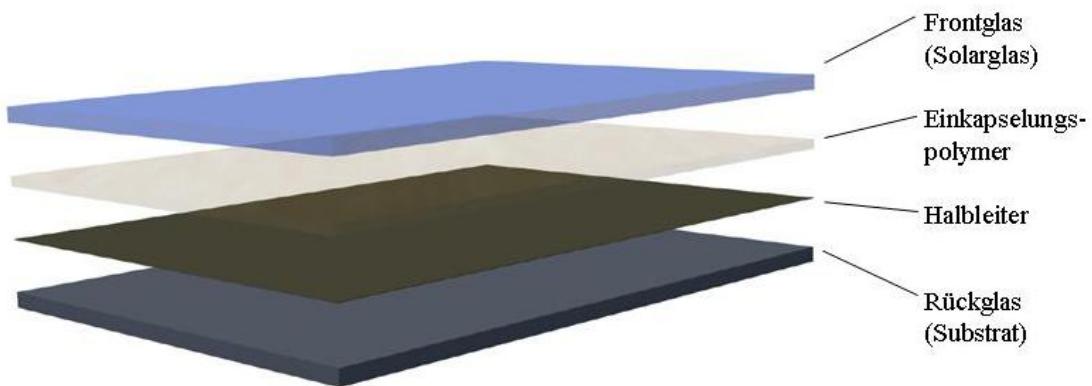


Abbildung 2-4: Aufbauschema eines Glas-Glas-Dünnschicht-PV-Moduls

2.2 Funktionsweise von Solaranlagen

2.2.1 Thermische Solaranlagen

Der Wirkungsgrad eines Solarkollektors hängt im Wesentlichen davon ab, wie viel Solarstrahlung der Absorber in Wärme umwandeln und an das wärmetragende Fluid weitergeben kann. Vor allem die Materialeigenschaften der transparenten Abdeckung und des Absorbers sind hierbei entscheidend.

Die transparente Abdeckung

Ein Teil der Solarstrahlung wird beim Auftreffen auf die transparente Abdeckung reflektiert, ein weiterer Teil wird von der Abdeckung absorbiert. Es dringt also nur ein bestimmter Anteil der Strahlung bis zum Absorber vor. Wie groß dieser Anteil ist, hängt von den Materialeigenschaften der Abdeckung ab. Beschreiben lassen sich diese Eigenschaften durch den Reflexionsgrad ρ_{str} , den Absorptionsgrad α_{str} und den Transmissionsgrad τ_{str} eines Materials. Die Summe der drei Anteile muss immer 1 ergeben, um der Energieerhaltung gerecht zu werden [Qua03].

$$\rho_{str} + \alpha_{str} + \tau_{str} = 1 \quad (1)$$

Für die Bewertung von Glas als Kollektorabdeckung ist der solare Transmissionsgrad entscheidend. Er bezieht sich auf den Wellenlängenbereich von 0,3 bis 2,5 μm . Normales Fensterglas hat bei einer Dicke von 4 mm einen effektiven solaren Transmissionsgrad von ca. 83%. Der Absorptionsgrad und damit der Transmissionsgrad von Glas sind hauptsächlich vom Eisengehalt bestimmt. Für den Einsatz in Solarkollektoren wird deshalb eisenarmes Glas verwendet, welches einen effektiven Transmissionsgrad von bis zu 90% besitzt. Durch das Aufbringen einer so genannten Antireflex-Beschichtung verringert sich zusätzlich der Reflexionsgrad und es können Transmissionsgrade von bis zu 95% erreicht werden.

Funktion des Solarabsorbers

Ein Solarabsorber besteht aus dem Absorberblech, auf das die durch die transparente Abdeckung transmittierte Solarstrahlung trifft und aus einer Verrohrung, durch die das wärmetragende Fluid fließt, um die gewonnene Wärme abzutransportieren.

Der Absorber muss einen möglichst großen Teil der auf ihn auftreffenden Solarstrahlung absorbieren. Da schwarze Materialien Sonnenlicht besonders gut absorbieren, werden Solarabsorber oft schwarz beschichtet. Erwärmt sich eine schwarze Oberfläche, gibt sie jedoch einen Teil der Wärmeenergie in Form von Infrarotstrahlung wieder ab. Nach dem Kirchhoffschen Strahlengesetz ist der Absorptionsgrad α_{str} eines schwarzen Körpers bei einer bestimmten Temperatur gleich dem Emissionsgrad ε_{str} bei dieser Temperatur [Duf06].

$$\alpha_{str}(\lambda) = \varepsilon_{str}(\lambda) \quad (2)$$

Eine hohe Wärmeausbeute kann also nur über wellenlängenabhängige Unterschiede der Absorption erreicht werden. Für Solarabsorber werden deshalb so genannte selektive Beschichtungen verwendet (Materialien für selektive Schichten siehe Tabelle 2-1). Sie besitzen einen hohen Absorptionsgrad im Wellenlängenbereich bis 2 μm , da die Intensität der Solarstrahlung in diesem Bereich am höchsten ist. Im Bereich über 2 μm (Infrarotbereich) besitzen sie dagegen einen geringen Absorptionsgrad. Aufgrund der unterschiedlichen Spektralverteilung der zu absorbierenden Solarstrahlung und der vom Absorber emittierten Wärmestrahlung sind die Wärme-

verluste von selektiven Absorbern sehr gering. In Abbildung 2-5 sind die Absorptionsgrade eines (idealen) selektiven und eines nichtselektiven Absorbers in Abhängigkeit der Wellenlänge dargestellt.

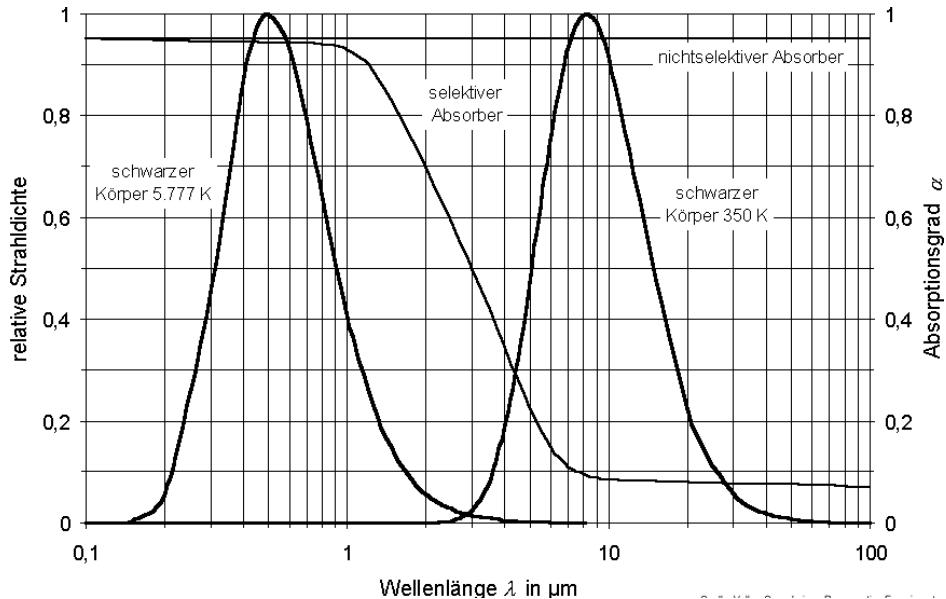


Abbildung 2-5: Absorptions- und Emissionsspektren schwarzer Körper und schematische Absorptionsgrade von Absorbern [Qua03]

Derzeit auf dem Markt befindliche Produkte, z.B. TiNOX von *TiNOX* oder eta plus von *BluTec*, erreichen einen effektiven Absorptionsgrad von ca. 90 bis 95% bei einem effektiven Emissionsgrad von nur ca. 5 bis 15%.

Kollektornutzleistung

Die Kollektornutzleistung \dot{Q}_{nutz} ergibt sich mit der auf die Kollektorfläche A_K auftreffenden Bestrahlungsstärke E zu

$$\dot{Q}_{nutz} = (\tau\alpha)_{eff} * E * A_K - \dot{Q}_V \quad (3)$$

Das effektive Transmissions-Absorptionsprodukt $(\tau\alpha)_{eff}$ beschreibt hierbei die Auswirkungen des Transmissionsgrades der Abdeckung und des Absorptionsgrades des Absorbers. Darüber hinaus berücksichtigt es zusätzlich Wechselwirkungen im Inneren des Kollektors, wie z.B. die Mehrfachreflexion zwischen Abdeckung und Absorber [Duf06]. $(\tau\alpha)_{eff}$ wird auch als der optische Wirkungsgrad bezeichnet und spiegelt den Wirkungsgrad des Kollektors wieder, wenn keine thermischen Verluste auftreten [Qua03]. Er kann sich in Folge von Glasbruch, Glaskorrosion oder Feuchte-

beschlag an der Innenseite der Abdeckung, oder durch Beschädigung des Solarabsorbers verschlechtern.

\dot{Q}_v beschreibt die thermischen Verluste, die auf Grund der Temperaturdifferenz zwischen dem Absorber und der Umgebung auftreten. Die thermischen Verluste steigen mit zunehmender Temperaturdifferenz. Folglich sinkt der Wirkungsgrad eines Solarkollektors mit zunehmender Absorbertemperatur. Auch hohe Windschwindigkeiten führen zu erhöhten thermischen Verlusten auf Grund von erzwungener Konvektion. Eine dauerhafte Zunahme der thermischen Verluste tritt in Folge von Beschädigung der selektiven Absorberschicht oder der rückseitigen Wärmedämmung auf [Duf06].

2.2.2 Photovoltaikmodule

Auf eine detaillierte, elektrische Beschreibung von PV-Modulen wird an dieser Stelle verzichtet. Hierfür wird auf weiterführende Literatur verwiesen (z.B. [Qua03]). Dargestellt werden nur die wesentlichen Kenndaten, welche die Funktionsweise bzw. die Leistungsausbeute von PV-Modulen bestimmen.

Die Leistung, die ein PV-Modul erzeugt, ergibt sich aus dem Produkt von Zellstrom und Zellspannung. Der Zellstrom steigt mit zunehmender Bestrahlungsstärke E , während die Spannung relativ konstant bleibt. Daraus folgt, dass sich die Leistung eines Solarmoduls proportional zur Bestrahlungsstärke verhält. Auch hier gilt, dass nur ein bestimmter Anteil der Solarstrahlung die Solarzellen des PV-Moduls erreicht und ein geringer Anteil von der transparenten Abdeckung absorbiert bzw. reflektiert wird (siehe Kapitel 2.1.1, Formel (1)).

Abbildung 2-6 zeigt einen typischen Verlauf der Strom-Spannungs-Kennlinie (I-U Kennlinie) einer Solarzelle, in Abhängigkeit der Bestrahlungsstärke, bei einer konstanten Zelltemperatur von 25°C.

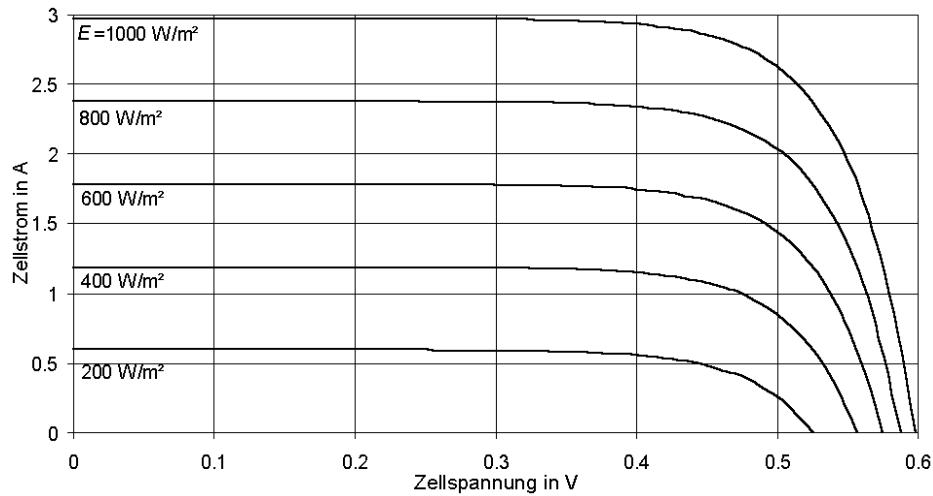


Abbildung 2-6: I-U Kennlinie einer Silicium-Solarzelle in Abhängigkeit der Bestrahlungsstärke
[Qua03]

Bei herkömmlichen Solarzellen aus Silicium sinkt die Zellspannung mit zunehmender Zelltemperatur, während der Zellstrom leicht ansteigt. Jedoch sinkt die Spannung stärker als der Strom steigt, woraus folgt, dass die Leistung eines PV-Moduls mit zunehmender Zelltemperatur abnimmt (siehe Abbildung 2-7). Viele Hersteller geben deshalb in ihren Datenblättern Temperaturkoeffizienten für Strom und Spannung an, mit denen die Leistungsänderung in Abhängigkeit der Zelltemperatur berechnet werden kann.

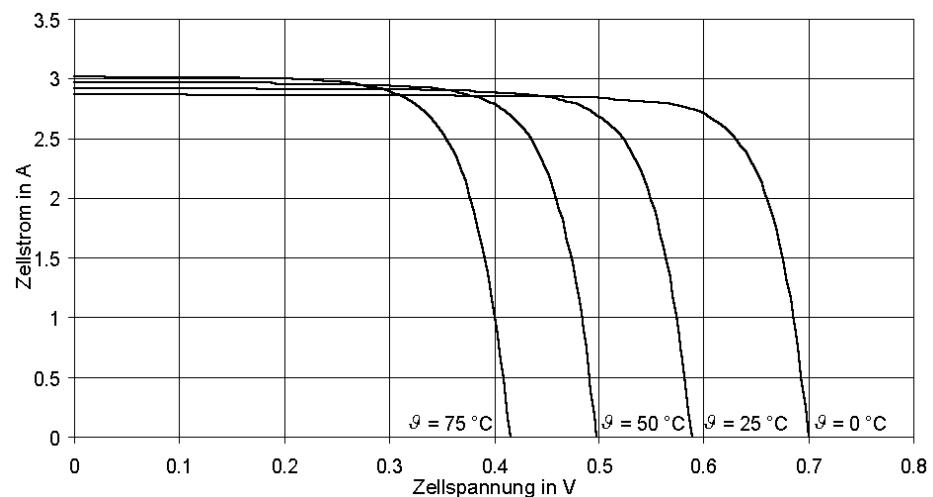


Abbildung 2-7: Temperaturabhängigkeit der Zellspannung einer Solarzelle aus Silicium [Qua03]

Zelltemperatur und Bestrahlungsstärke sind also die Parameter, welche die Leistung eines PV-Moduls maßgeblich beeinflussen. Um verschiedene PV-Module miteinander zu vergleichen, werden Prüfungen unter Standardtestbedingungen (STC) durch-

geführt ($E = 1000 \text{ W/m}^2$, $T = 25^\circ\text{C}$, AM = 1,5). Gemessen wird der Kurzschlussstrom I_K und die Leerlaufspannung U_L . Das Modul wird also ohne Last betrieben. Aus der entstehenden I-U Kennlinie kann die Leistungs-Spannungs-Kennlinie (P-U Kennlinie) ermittelt werden (siehe Abbildung 2-7). Der Maximalwert dieser Kennlinie wird als Punkt maximaler Leistung (MPP) bezeichnet und gibt die Nennleistung (W_p) eines Moduls unter Standarttestbedingungen wieder. Die Spannung U_{MPP} und der Strom I_{MPP} im MPP sind stets kleiner als die Leerlaufspannung U_L und der Kurzschlussstrom I_K .

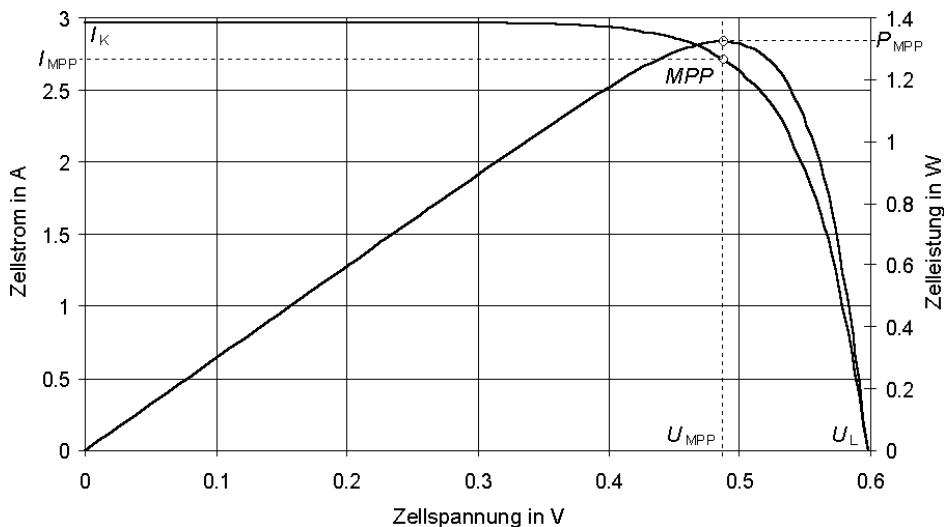


Abbildung 2-8: I-U und P-U Kennlinie einer Silicium-Solarzelle [Qua03]

PV-Module werden durch Messung der oben beschriebenen Parameter unter Standardtestbedingungen charakterisiert. Die so ermittelten elektrischen Daten werden in den Datenblättern der Modulhersteller angegeben. Sie gelten für den ungebrauchten Zustand des Moduls. Durch Wiederholung dieser Messungen nach einer bestimmten Gebrauchsdauer oder nach der Durchführung von beschleunigten Alterungstests, kann der Leistungsabfall ermittelt und gegebenenfalls auf bestimmte Ursachen zurückgeführt werden.

2.3 Degradation von thermischen Solaranlagen

In der Solartechnik versteht man unter dem Begriff der Degradation das Alterungsverhalten von Systemkomponenten, die durch eine Veränderung bestimmter Eigenschaften hervorgerufen wird und zu einer Leistungsverringerung oder zum Ausfall der Anlage führt.

- *Betriebsbedingte Degradation* tritt durch Belastungen auf, die bei normalem Betrieb vor allem durch UV-Strahlung und Wärme im Laufe der Gebrauchs- dauer entstehen.
- *Umgebungsspezifische Degradation* wird durch die besonderen und zusätzli- chen Belastungen am jeweiligen Standort hervorgerufen, z.B. durch hohe Luftfeuchtigkeit und Niederschlagsmengen in tropischen Gebieten, durch Luftsabstoffe in Städten oder durch salzhaltige Luft in Küstennähe.

2.3.1 Betriebsbedingte Degradation

Betriebsbedingte Degradationen von Solarkollektoren werden primär durch das vorherrschende Temperaturniveau im Kollektor bestimmt. Die Stillstandstemperatur in einem Flachkollektor kann bis zu 200°C betragen. Als Stillstandstemperatur wird die Temperatur des Absorbers bei Stillstand des Solarkreislaufes (Kreislauf des Wärmetragenden Fluids) und maximaler Sonneneinstrahlung bezeichnet. Im Hoch- sommer kann dieser Zustand bei ungünstiger Systemkonfiguration auf Grund der hohen Sonneneinstrahlung und der begrenzten Wärmekapazität des Speichertanks fast täglich auftreten [Qua03]. Die Materialen eines Kollektors müssen also so be- schaffen sein, dass sie diesen Temperaturen standhalten. Gleichwohl tritt bei jedem Metall in Folge sehr hoher Temperaturen eine beschleunigte Oxidation auf, wodurch die optischen Eigenschaften der Absorberbeschichtung beeinträchtigt werden und sich die Wärmeleitfähigkeit des Materials verschlechtert [Str07].

Neben der Beständigkeit gegen hohe Temperaturen müssen die verwendeten Materi- alien auch beständig gegen UV-Strahlung sein. Vor allem die Abdeckung des Kol- lektors ist hiervon betroffen, da auf sie das gesamte Sonnenspektrum auftrifft. Als häufigstes Material für die Abdeckung kommt Glas zum Einsatz, welches allgemein eine sehr hohe Beständigkeit gegen UV-Strahlung aufweist. In Hinblick auf Kosten- senkungen bei der Herstellung von Solarkollektoren rücken jedoch immer mehr Kunststoffe ins Blickfeld der Hersteller. Die Herstellung UV-beständiger Kunststoffe findet in der Industrie großes Interesse und ist Gegenstand aktueller Forschung [Str07].

2.3.2 Degradation in salzhaltiger Atmosphäre

Ein zentrales Problem von Solarkollektoren gegenüber salzhaltigen Atmosphären ergibt sich daraus, dass der Absorber, als zentrales Bauteil, aus Metall besteht. Die

Korrosion von Metallen wird durch die Anwesenheit von Salzen stark beschleunigt (siehe Kapitel 3.3.3). Herkömmliche Flachkollektoren besitzen eine Luftwechselrate, sie also sind nicht luftdicht verschlossen, damit sich im Inneren des Kollektors keine Feuchtigkeit ansammelt. Dies hat jedoch zur Folge, dass Luftschadstoffe und Salzpartikel in den Kollektor eindringen können und die Korrosion des Absorbermaterials beschleunigen. Neben dem Absorber sind vor allem der Aluminiumrahmen sowie die eventuell metallische Trägerstruktur von Solarkollektoren empfindlich gegenüber atmosphärischen Salzen. In Vakuum-Röhrenkollektoren ist der Absorber gegenüber den Umgebungseinflüssen geschützt, da er sich im Inneren der Vakuum-Röhren befindet. Hier sind vor allem die CPC-Spiegel gefährdet, da sie Umwelteinflüssen direkt ausgesetzt sind und meistens aus Metall bestehen.

Die folgenden Beispiele für Degradation verschiedener Anlagenkomponenten von thermischen Solaranlagen durch salzhaltige Luft wurden von Mitarbeitern des *Insti-
tuto Tecnológico De Canarias* (ITC) in Spanien, Gran Canaria dokumentiert [ITC08]. Das Institutsgelände befindet sich im Südwesten der Insel und liegt in unmittelbarer Küstennähe.

Die sichtbaren Schäden treten vor allem an Trägerstrukturen und am Speichertank auf, weil diese aus Metall bestehen und der Umgebung direkt ausgesetzt sind. In dem vorliegenden Bericht [ITC08] finden sich keine Angaben über Schäden am Absorber oder sonstigen Komponenten im Inneren des Kollektors.

Abbildung 2-9 zeigt die Rückseite des Kollektors sowie eine Nahaufnahme der Trägerstruktur nach vier Jahren Exposition. Im linken Bild sind die Folgen von Kontaktkorrosion (siehe Kapitel 3.1.2) an der Verbindungsstelle zwischen Aluminiumrahmen und Schraube deutlich zu erkennen.



Abbildung 2-9: Korrosion an Rahmen und Trägerstruktur von Solarkollektoren [ITC08]

Abbildung 2-10 zeigt die Korrosion am Speichertank des Kollektors sowie an der Verbindungsstelle zur Abnahme des erwärmten Wassers nach einer Expositionszeit von sechs Jahren. Aufgrund des fortgeschrittenen Stadiums der Korrosion musste der Speichertank demontiert werden.

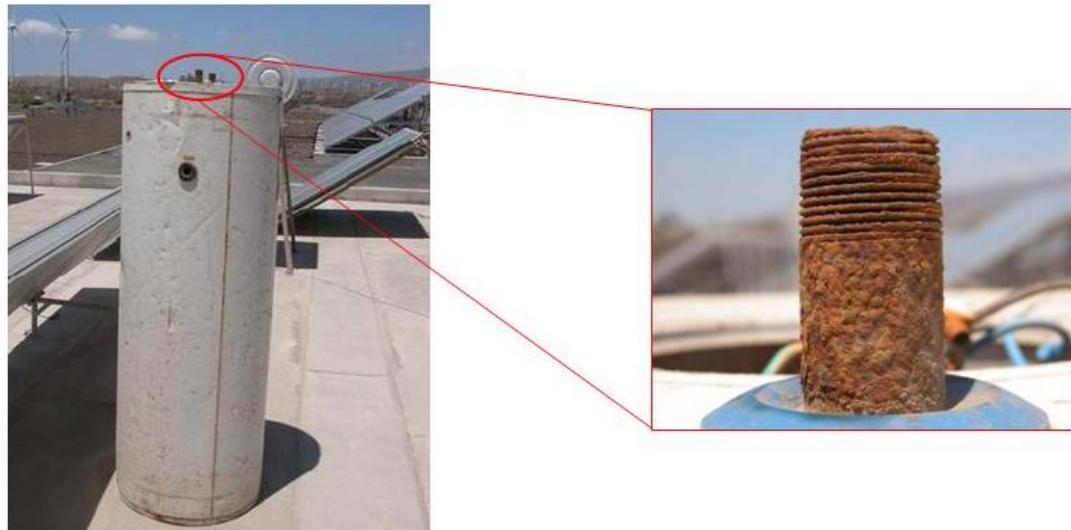


Abbildung 2-10: Korrosion am Speichertank eines Solarkollektors [ITC08]

2.4 Degradation von PV-Modulen

Auch PV-Module unterliegen betriebs- und umgebungsspezifischer Degradation.

2.4.1 Betriebsbedingte Degradation

Die bekannteste Form der Degradation bei PV-Modulen ist das so genannte „Browning“. Es bezeichnet die Verfärbung des Einkapselungsmaterials, wodurch sich die Transparenz verringert und es aufgrund der verschlechterten optischen Eigenschaften zu erheblichen Leistungseinbußen kommen kann. Ausgelöst wird dieser Mechanismus durch chemische Abbauprozesse im Polymer in Folge der Einwirkung von UV-Strahlung und Wärme [Qua99]. Die Abbauprozesse können auch zu einer Delamination zwischen dem Einkapselungsmaterial und den Solarzellen oder der Frontabdeckung führen. Bei starkem Browning kommt es aufgrund der verringerten Bestrahlungsstärke der Solarzellen zu einer Verringerung des Kurzschlussstromes [Qua99].

Abbildung 2-11 zeigt Beispiele für Browning und Delamination von Einkapselungspolymeren aus EVA.



Abbildung 2-11: Delamination und Browning des Einkapselungspolymers von PV-Modulen

Häufig hat die Beschädigung einer Komponente die Degradation einer anderen Komponente zur Folge. So kann z.B. durch eine Beschädigung der Frontabdeckung (Glasbruch) vermehrt Feuchtigkeit in das Innere des Moduls eindringen. Die Kombination aus Feuchtigkeit und UV-Bestrahlung beschleunigt die chemischen Abbauprozesse im Einkapselungspolymer, wodurch es dann zu den oben genannten Degradationsmechanismen kommt. In Folge von Delamination sind die Solarzellen nicht mehr vor Umwelteinflüssen geschützt, und es kann zu Zellkorrosion oder Zellausbleichung kommen. Zellkorrosion kann Kurzschlüsse in einzelnen Solarzellen verursachen, wodurch es zu einer Verringerung der Leerlaufspannung kommt [Qua99].

2.4.2 Degradation in salzhaltiger Atmosphäre

Die folgenden Beispiele für Beschädigungen von Anlagenkomponenten durch salzhaltige Luft wurden wie in Kapitel 2.3.2 von Mitarbeitern des ITC dokumentiert.

Auf dem Gelände des ITC wurde Anfang 1998 im Rahmen des Pionierprojektes *FOTORED* das erste Photovoltaik-Kraftwerk der Kanarischen Inseln mit direktem Netzverbund in Betrieb genommen. Schon nach wenigen Jahren zeigten sich teils starke Korrosionsschäden an unterschiedlichen Komponenten der Module sowie der Trägerstruktur.

Abbildung 2-12 zeigt den Aluminiumrahmen (links) und die Anschlussdose (rechts) eines PV-Moduls nach einer Betriebsdauer von dreieinhalb Jahren. Das linke Bild zeigt die Folgen von Kontaktkorrosion (siehe Kapitel 3.1.2), ausgelöst durch den Kontakt zwischen dem Aluminiumrahmen und einer Stahlschraube. Das rechte Bild zeigt die Platine im Inneren einer Anschlussdose. Der positive Kontakt der Platine hat sich fast komplett aufgelöst, während der negative Kontakt weitgehend unbe-

schädigt ist. Im oberen Bildrand ist zu sehen, dass auch hier der Aluminiumrahmen durch Kontaktkorrosion beschädigt wurde.

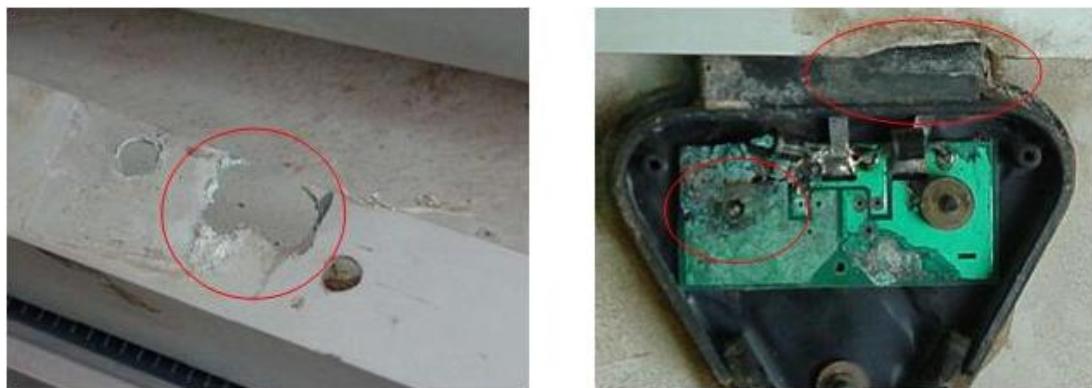


Abbildung 2-12: Korrosion an verschiedenen Komponenten von PV-Modulen nach 3,5 Jahren
[ITC08]

Neben den verschiedenen Modulkomponenten weist vor allem die Trägerstruktur starke Korrosionsspuren auf, obwohl sie aus verzinktem Stahl besteht und vor der Installation mit einer antikorrosiven Lackschicht versehen wurde.

Abbildung 2-13 zeigt Aufnahmen der Trägerstruktur zehn Jahre nach der Installation. Die Lackschicht ist fast komplett verschwunden und der darunter liegende Stahl ist stark korrodiert. Angesichts der weit fortgeschrittenen Korrosion der Trägerstruktur ist es unwahrscheinlich, dass sie den Witterungsbedingungen noch weitere zehn Jahre standhält. Setzt man für die Lebensdauer der Anlage eine Zeitspanne von mindestens zwanzig Jahren voraus, wird sie den Belastungen innerhalb dieser Zeit nicht dauerhaft standhalten.



Abbildung 2-13: Korrosion an der Trägerstruktur von PV-Modulen nach zehn Jahren [ITC08]

2.5 Identifizierung korrosionsempfindlicher Komponenten

Im Folgenden wird zwischen aktiven, passiven sowie tragenden Komponenten solar-technischer Anlagen unterschieden.

- *Aktive Komponenten* sind Teile, die direkt an der Umwandlung von Solarstrahlung in Wärmeenergie oder Elektrizität beteiligt sind. Bei einem PV-Modul sind dies die Solarzellen und alle elektrischen Komponenten wie Stecker, Anschlussdosen und Kontaktbänder. Bei Solarkollektoren sind die aktiven Komponenten der Solarabsorber und das Dämmmaterial.
- *Passive Komponenten* sind Teile, die die aktiven Komponenten vor Witterungseinflüssen schützen sollen, z.B. das Deckglas, die Rückseitenfolie und die transparente Kunststoffschicht, in der die Solarzellen eingebettet sind. Das Deckglas und die transparente Kunststoffschicht können sowohl als aktive als auch als passive Komponenten angesehen werden. Zum einen dienen sie als Schutz der Solarzellen oder der Absorberbleche (passiv), zum anderen hängt der Energieertrag direkt von dem Transmissionsgrad dieser Komponenten ab (aktiv).
- *Tragende Komponenten* sind der Rahmen und alle Montagevorrichtungen (Trägerstruktur, Schrauben etc.) zur Befestigung der Module.

Zusammen bilden die verschiedenen Komponenten ein System, welches Witterungseinflüssen ausgesetzt ist und ihnen über seine festgelegte Lebensdauer standhalten muss, ohne einen Korrosionsschaden zu erleiden. Ein Korrosionsschaden tritt auf, wenn

- eine aktive Komponente des Systems beschädigt wird;
- eine passive Komponente des Systems so stark beschädigt wird, dass sie eine aktive Komponente des Systems nicht mehr wirksam vor Witterungseinflüssen schützen kann;
- eine tragende Komponente des Systems so stark beschädigt wird, dass sie ihrer Funktion als Bauteil nicht mehr gerecht wird.

Solange keine ästhetischen Anforderungen an das System gestellt sind, ist ein Korrosionsbefall, der keine der oben genannten Beschädigungen zur Folge hat, noch nicht als Korrosionsschaden zu betrachten.

Um zu bestimmen, unter welchen Bedingungen es zu einem Korrosionsschaden kommt, müssen die verschiedenen Komponenten sowohl einzeln als auch zusammen, als System, geprüft werden. Die Ergebnisse der Einzelprüfungen geben Aufschluss über das Korrosionsverhalten der verschiedenen Materialien. So kann z.B. geprüft werden, ob bei dem Deckglas oder dem Aluminiumrahmen überhaupt mit Korrosionsschäden gerechnet werden muss. Einzelprüfungen können an ausgewählten Teststücken durchgeführt werden, ohne dass ein großes Prüfkammervolumen erforderlich ist. Hierbei sind vor allem die aktiven Komponenten von PV-Modulen und Solarkollektoren zu prüfen, da sie entscheidend für die Funktionstüchtigkeit der Anlagen sind. Außerdem müssen solche Komponenten geprüft werden, die in direktem Kontakt mit der Umgebung stehen.

In Tabelle 2-3 sind alle aktiven, passiven und tragenden Komponenten von PV-Modulen und Solarkollektoren aufgelistet. Die Komponenten, die in dieser Arbeit auf ihre Beständigkeit gegen salzhaltige Luft geprüft werden, sind (fett gedruckt) hervorgehoben.

Tabelle 2-3: Aktive, passive und tragende Komponenten von Solaranlagen

		PV-Module		Solarkollektoren	
		direkter Kontakt mit Umgebung	kein direkter Kontakt mit Umgebung	direkter Kontakt mit Umgebung	kein direkter Kontakt mit Umgebung
aktiv		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Anschlussdosen ▪ Stecker 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Solarzellen ▪ Kontaktbänder 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Absorber ▪ Dämmmaterialien ▪ CPC Spiegel 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Absorber (bei Vakuum-Röhrenkollektoren)
passiv / tragend		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Abdeckung ▪ Rahmen ▪ Montagevorrichtungen ▪ Rückseitenfolie 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Einkapselungsmaterial 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Abdeckung ▪ Rahmen ▪ Montagevorrichtung 	

3 Korrosionsverhalten von Werkstoffen

Korrosion als Oberbegriff bezeichnet die von der Oberfläche eines Werkstoffs ausgehende, messbare Veränderung eines Materials durch Reaktion mit einem oder mehreren Stoffen in der jeweiligen Umgebung [Kae03]. Erreicht diese Veränderung den Grad von Beschädigung bzw. Zerstörung, kommt es zu einer Beeinträchtigung der Funktion des davon betroffenen Werkstoffs oder auch eines gesamten Systems.

Für die Problemstellung dieser Arbeit ist allein die sogenannte atmosphärische Korrosion von Bedeutung. Hier ist die umgebende Atmosphäre das korrosive Medium, die im Allgemeinen einen gewissen Anteil an Feuchtigkeit und Verunreinigungen enthält.

3.1 Korrosion von metallischen Werkstoffen

Im allgemeinen Sprachgebrauch versteht man unter Korrosion das Rosten von Metallen. Allerdings können auch andere Materialien, wie Glas oder Kunststoffe von Korrosion betroffen sein (siehe Kapitel 3.2.1 und 3.2.2).

Korrosion und ihre Folgeschäden, in Form von Produktions- und Leistungsausfall, verursachen in Deutschland jährlich Schäden in Milliardenhöhe. Bezogen auf das Bruttonzialprodukt liegt der gesamtwirtschaftliche Schaden bei etwa 3 bis 4% [GfK08]. Es kann angenommen werden, dass diese Werte in ähnlicher Größenordnung auch für andere Industrieländer gelten.

3.1.1 Mechanismus der atmosphärischen Korrosion

Bei der atmosphärischen Korrosion kommt es zur Reaktion des Luftsauerstoffs mit einem metallischen Werkstoff, weshalb auch der Begriff Sauerstoffkorrosion verwendet wird [Kae03]. Der Sauerstoff muss jedoch in gelöster Form vorliegen, damit die Reaktion stattfinden kann. Durch Regen oder in Folge von hoher Luftfeuchtigkeit bildet sich auf der Oberfläche des Werkstoffes eine wässrige Elektrolytschicht, in welcher sich der Luftsauerstoff lösen kann und zur Metalloberfläche diffundiert.

In einer nicht verunreinigten Atmosphäre liegt die kritische relative Luftfeuchtigkeit RH_{krit} bei etwa 60%. Daher bilden sich unterhalb von 60% relativer Luftfeuchtigkeit keine Elektrolytschichten, und Korrosion findet zunächst nicht statt. Luftverunreinigungen sowie Verunreinigungen auf der Werkstoffoberfläche können die kritische relative Luftfeuchtigkeit jedoch herabsetzen. Daher kann es in der Praxis auch schon

bei relativen Luftfeuchtigkeiten unter 60% zur Bildung von Elektrolytschichten und folglich zu atmosphärischer Korrosion kommen [Wra85]. Luftfeuchtigkeit und Luftverunreinigung sind also die entscheidenden Faktoren der atmosphärischen Korrosion von Metallen. Luftverunreinigungen beeinflussen den Korrosionsprozess auch direkt, indem sie an chemischen Reaktionen teilnehmen oder als Katalysatoren wirken [Win00].

Die Korrosionsreaktion findet an der Phasengrenze zwischen der Metalloberfläche und dem Elektrolyt statt und ist elektrochemischer Natur. Aufgrund von örtlich unterschiedlichen Sauerstoffkonzentrationen in dem Elektrolyten bildet sich ein Korrosionselement. Zwischen den Stellen mit niedrigem und hohem Sauerstoffgehalt entsteht ein elektrochemisches Potential und es kommt zu einem Ionenfluss. Ein Korrosionselement entsteht auch durch den Kontakt zweier Metalle mit unterschiedlichen elektrischen Potentialen unter Anwesenheit eines Elektrolyten (siehe Kapitel 3.1.2).

Die ablaufende Korrosionsreaktion ist eine Redoxreaktion. In der anodischen Teilreaktion (4) werden Metallatome oxidiert und gehen als positiv geladene Metall-Ionen in den Elektrolyt über. Negativ geladene Elektronen bleiben im Metall zurück. Die andoische Teilreaktion führt zum Metallabtrag und stellt den eigentlichen Korrosionsprozess dar. In der kathodischen Reaktion (5) kommt es zur Reduktion des Sauerstoffs durch die im Metall zurückgebliebenen, freien Elektronen [Win00]. Die Gesamtreaktion (6) beschreibt die Bildung der Korrosionsprodukte.

Anodische Teilreaktion:

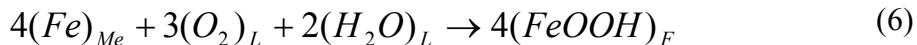


Kathodische Teilreaktion:



Je unedler ein Metall ist, desto stärker strebt es danach, sich in einem Elektrolyten aufzulösen, und desto schneller korrodiert es. Ob ein Metall durch Korrosion komplett zerstört wird, hängt aber vor allem von den Eigenschaften der sich bildenden Korrosionsprodukte ab. Die in der anodischen Teilreaktion entstehenden Metall-

Ionen reagieren mit den in der kathodischen Teilreaktion entstehenden Hydroxid-Ionen zu unlöslichem Metalloxid (Rost), welches sich auf der Oberfläche ablagert. Eisen bildet eine porige, durchlässige Rostschicht, welche den laufenden Fortschritt der Korrosion kaum beeinflusst [Kae03].



Andere Metalle, z.B. Aluminium und Chrom, bilden so genannte Passivschichten (meist Oxidschichten). Sie sind oft nur wenige Mikrometer dick und für das menschliche Auge teilweise unsichtbar. Trotzdem sind sie sehr beständig und trennen das Metall von der Atmosphäre. Da die Korrosionsreaktion von der Diffusion des gelösten Sauerstoffs hin zur Metalloberfläche abhängig ist, wird ein Fortschreiten der Korrosion durch die Passivschicht weitgehend verhindert. Obwohl also Aluminium und Chrom unedler sind als Eisen, sind sie sehr viel korrosionsbeständiger [Kae03].

3.1.2 Korrosionsformen und –arten

Abhängig von den Eigenschaften des metallischen Werkstoffes sowie von der umgebenden Atmosphäre können unterschiedliche Korrosionsformen auftreten.

Gleichmäßige Flächenkorrosion

Bei der Flächenkorrosion kommt es zu einem nahezu gleichmäßigen Korrosionsangriff auf der gesamten Werkstoffoberfläche. Beispiele sind die Ausbildung einer Passivschicht und der sich fortsetzende Flächenabtrag bei Metallen, die keine Passivschicht bilden. Bei diesen Metallen kann diese Korrosionsform bis zum Durchbruch (Durchrost) bzw. bis zum mechanischen Versagen des Werkstoffes führen [Kae03].

Loch- und Spaltkorrosion

Bei Lochkorrosion findet der Metallabtrag nur an einer bestimmten Stelle des Werkstoffes, also stark lokalisiert, statt. Es bilden sich sehr kleine, zum Teil nur schwer sichtbare Löcher und Vertiefungen, die sich durch den gesamten Werkstoffquerschnitt ziehen können. Aus diesem Grund ist diese Korrosionsform gefährlicher und führt schneller zum Materialversagen als gleichmäßige Flächenkorrosion.

Lochkorrosion tritt vor allem bei Metallen mit einer passiven Schicht unter Anwesenheit eines Elektrolyten mit hoher Ionenkonzentration (z.B. Chlorid) auf. In Folge von örtlicher Aufkonzentration der Ionen in der Elektrolytschicht auf der Werkstoff-

oberfläche kommt es zu einem Durchbruch der Passivschicht. Es entsteht ein isoliertes Loch, in welchem die Korrosionsreaktion, im Gegensatz zum Rest der Werkstoffoberfläche, mit hoher Geschwindigkeit abläuft. Der Durchbruch der Passivschicht kann auch durch äußere (z.B. mechanische) Einwirkungen hervorgerufen werden [Kae03].

Kontaktkorrosion

Diese Korrosionsform wird durch den Kontakt zweier Materialien mit unterschiedlichen elektrischen Potentialen hervorgerufen. Das unedlere Metall (niedrigeres elektrisches Potential) bildet die Anode, das edlere Metall bildet die Kathode. Unter Anwesenheit eines leitenden Mediums, in diesem Fall der Elektrolyt, fließt zwischen ihnen ein schwacher Strom. Die Korrosion des unedleren Metalls wird gefördert. Ein Beispiel für Kontaktkorrosion ist die Korrosion von Aluminium durch den Kontakt mit einer Stahlschraube oder von verzinktem Eisen durch den Kontakt mit Edelstahl [Kae03].

3.2 Korrosion von nichtmetallischen Werkstoffen

Die Anwendung des Korrosionsbegriffs auf nichtmetallische Werkstoffe ist bis heute umstritten [Sch04]. Außer Frage steht jedoch, dass nichtmetallische Werkstoffe, wie Glas oder Kunststoffe, chemischen Abbauprozessen unterliegen, die durch äußere Einflüsse verursacht werden. Verwendet wird hier eher der Begriff Degradation, der im eigentlichen Sinne aber den gleichen Vorgang wie die Korrosion von Metallen beschreibt, nämlich die Veränderung der Materialeigenschaften durch Reaktion mit einem oder mehreren Stoffen oder Einflüssen der Umgebung.

3.2.1 Glaskorrosion

Wie bei Metallen, ist auch bei Glas die Anwesenheit von Elektrolytschichten die zentrale Voraussetzung für den Korrosionsprozess. Allerdings ist Glas gegen Wasser sehr beständig, d.h. es kommt praktisch nur bei der zusätzlichen Anwesenheit von Luftverunreinigungen zu Korrosion. Es wurde beobachtet, dass historische Glasfenster, z.B. von Kirchen, in jüngster Zeit einem beschleunigten Verfall unterliegen. Dies hängt zum Einen mit der in den letzten Jahrzehnten stark gestiegenen Schadstoffbelastung zusammen, zum Anderen mit der chemischen Zusammensetzung historischer Gläser. Im Vergleich zu neuartigen Gläsern besitzen sie einen geringeren Silicium-Anteil und hohe Anteile von Kalium- und Calciumoxid [Lei03].

Reines Quarzglas besteht aus einem dreidimensionalen Netzwerk aus reinem Siliciumdioxid. Die Siliciumatome bilden mit den Sauerstoffatomen Sauerstoffbrückenbindungen, welche eine sehr hohe Bindungsenergie besitzen. Dies erklärt die hohe chemische Beständigkeit von Quarzglas. Binden sich jedoch weitere Stoffe in das Netzwerk ein, gehen diese mit den Sauerstoffatomen des Siliciumoxids Ionenbindungen ein, welche eine wesentlich geringere Bindungsenergie aufweisen. In Anwesenheit eines Elektrolyten auf der Glasoberfläche kann es dann zu einem Ionenaustausch kommen [Lei03]. Je geringer der Siliciumanteil in einem Glas ist, desto geringer ist also seine chemische Beständigkeit.

In Folge des Ionenaustausches bildet sich als Korrosionsprodukt eine Gelschicht auf dem Glas, die in Form einer Trübung in Erscheinung tritt und einen Transparenzverlust zur Folge hat. Durch Abwaschung dieser Gelschicht, z.B. durch Regen, kann es auch zu einem schrittweisen Materialverlust kommen [Lei03].

Angesichts der weit fortgeschrittenen Technik in der Glasproduktion ist es heute möglich Gläser, wie z.B. Quarzglas, herzustellen, die innerhalb ihrer vorgesehenen Lebensdauer in ihrer Funktion nicht wesentlich beeinträchtigt werden und somit als korrosionsbeständig anzusehen sind.

3.2.2 Kunststoffkorrosion

Auch Kunststoffe unterliegen in der Praxis vielen Schadensfällen, die unter den Begriff der Korrosion einzuordnen sind. Während bei Metallen der Korrosionsprozess meist elektrochemischer Natur ist, sind es bei Kunststoffen hauptsächlich physikalische Vorgänge, die zur Korrosion führen, da der Aufbau und Zusammenhalt von Kunststoffen auf grundsätzlich verschiedenen Bindungsarten beruht. Je nach Art des Kunststoffes können es sehr unterschiedliche physikalische Vorgänge sein, die zur Schädigung führen [Sch04].

Durch Einwirkung von energiereicher Strahlung können Molekülketten abgebaut, bzw. gespalten werden, so dass es zu einer Versprödung des Kunststoffes kommt. Hierunter versteht man die Reduzierung der Verformbarkeit, was zu einem schnelleren Bruch des Werkstoffes führt. Außerdem kann die Spaltung von Molekülketten eine Verfärbung des Kunststoffes hervorrufen. Weitere physikalische Mechanismen der Kunststoffkorrosion sind thermische oder mechanische Belastungen.

Unter chemischen Mechanismen versteht man den Angriff von Säuren, Laugen, Wasser und Sauerstoff. Kunststoffe können auch mikrobiell angegriffen werden. Sie

dienen verschiedenen Mikroorganismen in ihrem Stoffwechsel als Kohlenstoff- oder Stickstoffquelle [Sch04].

Durch den gezielten Zusatz von Additiven werden Kunststoffe, je nach Anwendung, gegen spezielle Einflüsse geschützt, um eine Beständigkeit gegenüber diesen Einflüssen zu erzielen.

3.3 Korrosion in maritimer Atmosphäre

Atmosphärische Korrosion tritt verstärkt in Küstennähe auf. Der im Vergleich zum Binnenland höhere Salzgehalt der Luft beschleunigt an Küstenstandorten die Korrosion von Metallen und die Degradation von Solaranlagen. Im Folgenden werden die Prozesse und Faktoren, die Einfluss auf den Grad und die Geschwindigkeit der auftretenden Korrosivität einer örtlichen Atmosphäre haben, analysiert.

3.3.1 Entstehung von Meersalzaerosolen

Meersalz besteht zu über 85% aus Natriumchlorid (NaCl). Weitere Bestandteile sind Sulfate, Magnesium, Calcium und Kalium [Kal96]. In der Luft liegt Meersalz in Form von Aerosolen vor. Meersalzaerosole sind primäre Aerosole, die direkt in die Atmosphäre in Form von kleinen Tröpfchen eingetragen (bulk-to-particle conversion) werden und im Mittel nicht länger als einen halben Tag schweben. Durch Abtrocknen der Tröpfchen in der Luft bilden sich abhängig von der relativen Luftfeuchtigkeit hochkonzentrierte Lösungströpfchen oder feste Salzpartikel. Seesalz ist hygroskopisch, d.h. es kann, abhängig von der relativen Luftfeuchtigkeit, Wasser aufnehmen oder abgeben. Oberhalb von ca. 75% Luftfeuchtigkeit wird Wasser verstärkt aufgenommen, sodass die Partikel anwachsen [DWD90]. Die Größenverteilung von Meersalzaerosolen liegt zwischen 0,05 und 10 μm . Das Maximum der Massenverteilung liegt bei einem Partikelradius von ca. 2 μm , womit den größeren Partikeln auch die Hauptbedeutung zukommt. Die Ozeane sind mit einem jährlichen Eintrag von ca. 3,3 Gt die größte Quelle für natürliche Aerosole [War00].

Meersalzaerosole entstehen durch drei Mechanismen, wodurch sich in der Größenverteilung zwei wesentliche Partikelgrößen bilden. Durch im Meerwasser gelöste, aufsteigende Luftblasen, welche an der Oberfläche zerplatzen, gelangt das Meersalz in Form von kleinen Tröpfchen in die Luft. Beim Zerplatzen der Blasenhaut gelangen eine Vielzahl von sehr kleinen Tropfen ($< 1 \mu\text{m}$), sogenannten „Film Drops“ in

die Luft. Sie werden einige Zentimeter hoch in die Luft geschleudert und durch Turbulenzen über dem Wasser in der Atmosphäre weiter nach oben getragen.

Beim Kollabieren der Blasenhöhlung entstehen außerdem einige wenige aber größere „Jet Drops“ (bis 10 μm), welche die Hauptmasse des Meersalzes in der Luft erzeugen. Aufgrund ihrer größeren Masse besitzen sie eine höhere Sedimentationsgeschwindigkeit und haben deshalb eine deutlich geringere Lebenszeit als die kleineren „Film Drops“ [Roe00]. Abbildung 3-1 verdeutlicht die beiden beschriebenen Entstehungsprozesse.

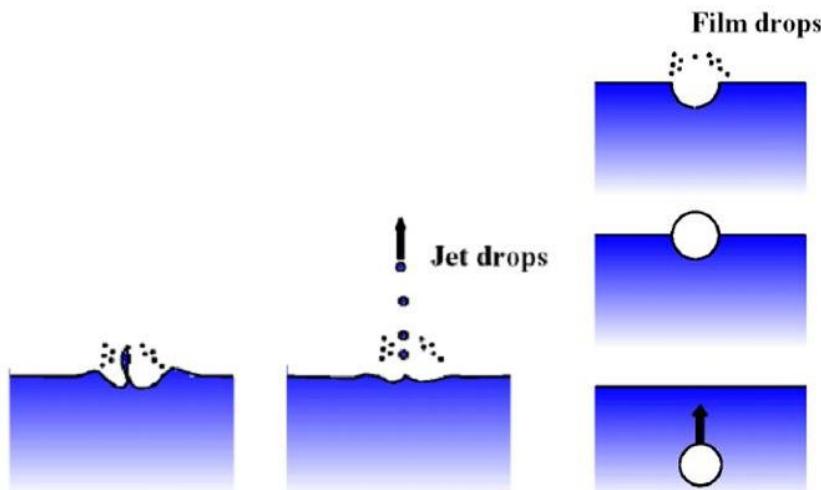


Abbildung 3-1: Entstehungsmechanismen von Meersalzaerosolen [Man08]

Der dritte Mechanismus setzt auf offener See bei Windstärken von ca. 9 m/s ein. Wassertröpfchen werden dann direkt vom Wellenkamm in die Luft gerissen. Die hierbei entstehenden Salzpartikeln haben in etwa dieselbe Größe wie diejenigen, die nach dem zweiten Mechanismus, beim Kollabieren der Blasenhöhlung entstehen [Lee99].

Wesentlicher Faktor für den Eintrag von Meersalzaerosolen in die Atmosphäre und somit der Massenkonzentration von Meersalz in der Luft ist der Wind. Mit zunehmender Windgeschwindigkeit steigt die Wellenbewegung und somit der Lufteintrag in das Wasser. Folglich entstehen mehr aufsteigende Luftblasen, welche für die Aerosolproduktion nach Mechanismus eins und zwei verantwortlich sind. Ab einer bestimmten Windgeschwindigkeit setzt dann auch der direkte Eintrag nach Mechanismus drei ein.

3.3.2 Einflussfaktoren auf den Salzgehalt der Luft

Der Salzgehalt der Luft ist von atmosphärischen und geographischen Faktoren abhängig und kann für verschiedene Messpunkte sehr stark variieren. So erreicht die Massenkonzentration von Meersalz sehr hohe Werte in unmittelbarer Küstenähe sowie wenige Meter oberhalb der Wasseroberfläche. Ab ca. 12 m Höhe ist praktisch kein Konzentrationsgradient mehr zu verzeichnen, und erst ab etwa 500 m Höhe geht die Konzentration zurück [DWD90]. Dazwischen ist sie weitestgehend konstant.

Ähnliches lässt sich beim Landeinwärtstransport der Salzpartikel beobachten. Während die Salzkonzentration in direkter Küstennähe stark schwankt und sehr hohe Werte erreichen kann ($6 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$ - $40 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$), ist sie bereits in etwa 100 m Entfernung zur Küste relativ konstant und um ein Vielfaches geringer ($1,5 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$ - $4 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$) [Cho01]. Ursache hierfür ist die hohe Sedimentationsgeschwindigkeit der Partikel mit einem Radius $\geq 2 \text{ } \mu\text{m}$, welche die Hauptmasse des Salzes in der Luft ausmachen. Gerade in der Brandung entstehen viele solcher großen Partikeln, wodurch die hohen Konzentrationen in Küstennähe entstehen. Die kleineren Salzpartikeln können aufgrund ihrer geringeren Masse größere Distanzen zurücklegen und werden vom Wind mehrere Kilometer weit ins Landesinnere getragen. Die Salzbelastung in direkter Küstennähe geht also vor allem auf die Aerosolproduktion in der Brandung zurück, die Belastung im Landesinneren vor allem auf die Aerosolproduktion auf offener See [Cho01].

Messungen haben ergeben, dass die Salzkonzentration der Luft über der offenen See ab einer Windstärke von ca. 3 m/s deutlich zunimmt und mit steigender Windstärke exponentiell ansteigt [Mor00]. Dies wiederum gilt auch für den Salzgehalt in direkter Küstennähe, da die Stärke der Brandung von der Windstärke abhängig ist. Bei Orkanstärke können hier Konzentrationen von bis zu $1 \text{ } \text{mg}/\text{m}^3$ erreicht werden [DWD90].

Der einfache exponentielle Zusammenhang zwischen Windgeschwindigkeit und Salzgehalt der Luft verliert im Landesinneren seine Gültigkeit. Zwar steigt er auch hier prinzipiell mit zunehmenden Windgeschwindigkeiten, entscheidend ist jedoch die Richtung, aus welcher der Wind wirkt. Abhängig von der Windrichtung, z.B. bei ablandigem Wind, kann der Salzgehalt der Luft mit steigender Windstärke deshalb auch abnehmen.

Je nach Lage des Küstenabschnitts existiert eine bestimmte Windrichtung, welche den Eintrag von Meersalzaerosolen am stärksten fördert. Der Salzgehalt der Luft hängt also davon ab, wie viele Stunden der Wind durchschnittlich in diese Richtung wirkt [Mor00]. Durch Stürme können sich große Mengen von Meersalz in relativ kurzer Zeit ablagern. Hierbei kann es vorkommen, dass sich innerhalb von einem Tag mehr Salz ablagert als sonst in einem gesamten Monat [Mor00]. Ein weiterer maßgeblicher Faktor für den Landeinwärtstransport von Meersalzaerosolen ist die geographische Beschaffenheit der Küste. Flache Landschaften begünstigen den Landeinwärtstransport, bergige hingegen erschweren ihn.

Bis heute gibt es kein gültiges Modell bzw. keinen klar definierten Zusammenhang zwischen dem Salzgehalt der Luft und der Entfernung zur Küste. Ergebnisse von durchgeföhrten Messungen haben nur Gültigkeit für die jeweilige Region und lassen sich nicht direkt auf andere Gebiete übertragen. Als einheitliches Ergebnis aller betrachteten Untersuchungen lässt sich jedoch festhalten, dass der Wind als wesentlicher Faktor den Salzgehalt der Luft bestimmt und dass dieser schon nach wenigen hundert Metern Entfernung zur Küste stark abnimmt.

3.3.3 Einfluss maritimer Atmosphären auf die Korrosion von Metallen

Die Korrosion von Metallen in maritimen Atmosphären ist direkt von dem Salzgehalt der Luft und damit auch von der Entfernung zur Küste abhängig. Untersuchungen am *Kennedy Space Center* in Florida, USA haben gezeigt, dass die Korrosionsgeschwindigkeit in direkter Küstennähe sehr hoch ist, dann aber mit zunehmender Entfernung schnell abnimmt und schon nach etwa einem Kilometer konstante Werte annimmt [Cal03].

Metallische Gebrauchsnormale mit einem bekannten Gewicht wurden in unterschiedlicher Entfernung zur Küste der Bewitterung ausgesetzt. Nach etwa einem Jahr wurde der durch Korrosion verursachte Massenverlust gemessen und somit die Korrosionsgeschwindigkeit bestimmt. Gleichzeitig wurde die Depositionsrate von Chlorid, also die Menge Salz, die sich innerhalb eines bestimmten Zeitraums auf einer Fläche von einem Quadratmeter niederschlägt, an den unterschiedlichen Standorten der Gebrauchsnormale gemessen. Diese Methode zur Bewertung der Korrosivität von Atmosphären ist in einer Norm der *International Organization for Standardization* (ISO) beschrieben und wird in Kapitel 4.1 näher betrachtet.

Die Ergebnisse zeigen, dass atmosphärische Korrosion ab einer bestimmten Entfernung zur Küste ihren maritimen Charakter verliert. In Abbildung 3-1 ist zu erkennen, dass ab einer bestimmten Depositionsrate von Chlorid kein nennenswerter Anstieg der Korrosionsgeschwindigkeit mehr zu verzeichnen ist [Cal03].

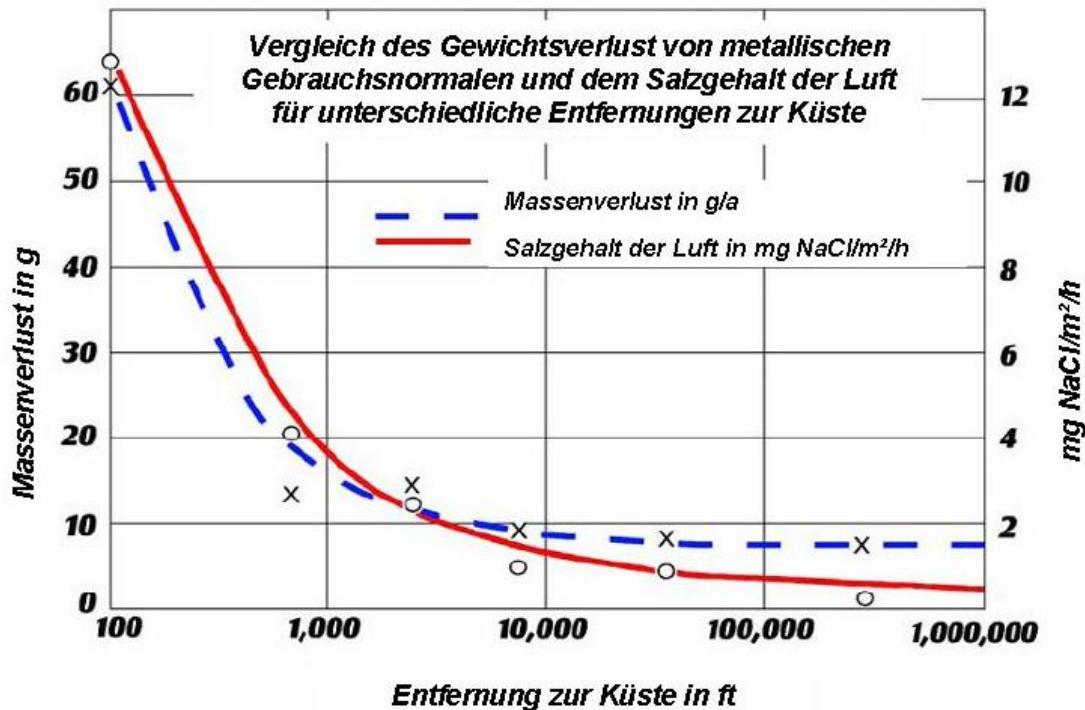


Abbildung 3-2: Atmosphärische Korrosion von Stahl in Abhängigkeit der Entfernung zur Küste
[Cal03]

4 Bestehende Normen und Verfahren für Korrosionsprüfungen

In diesem Kapitel wird ein Überblick über bestehende internationale Normen zur Bewertung der Korrosivität von Atmosphären (Kapitel 4.1) und zur Durchführung von beschleunigten Korrosionsprüfverfahren (Kapitel 4.2) gegeben. Anschließenden wird diskutiert, in wie weit die Inhalte und Vorgaben dieser Normen bei der Konzeptionierung des Prüfstandes und der Durchführung der Korrosionsprüfungen Anwendung finden.

4.1 Korrosivität von Atmosphären

Die Einteilung von Atmosphären hinsichtlich ihrer Korrosivität hat zum Ziel, geeignete Korrosionsschutzsysteme für deren Anwendungen an unterschiedlichen Standorten zu identifizieren. Es wird somit z.B. möglich, im Voraus zu berechnen, welche Dicke ein Zinküberzug haben muss, um einen Stahlträger für eine bestimmte Zeit vor Korrosion zu schützen.

Die Art einer Atmosphäre lässt sich grob einteilen in ländlich, städtisch, industriell und maritim. Die Reihenfolge der Aufzählung entspricht in etwa auch dem zunehmenden Grad der Aggressivität der jeweiligen Umgebung [Win00]. Diese Einteilung ist jedoch für technische Anwendungen zu ungenau, da sie lediglich qualitative Aussagen (z.B. hohe oder niedrige Luftfeuchtigkeit, hohe oder niedrige Schadstoffbelastung) zulässt.

Um eine genaue Aussage treffen zu können, muss eine Evaluierung bzw. Messung der lokalen Wetterdaten stattfinden, in der die korrosionsfördernden Faktoren der Atmosphäre quantitativ bestimmt werden. Durch einen Vergleich der Ergebnisse mit einer vorhandenen Datenbasis, welche die Korrosionsgeschwindigkeiten verschiedener Materialien in Abhängigkeit der auf sie wirkenden Umwelteinflüsse enthält, können genaue Aussagen über die Korrosivität der Atmosphäre gemacht werden.

Eine entsprechende Datenbasis, sowie eine Anleitung zur Durchführung der Messungen sind in den internationalen Normen [ISO9223] - [ISO9226] beschrieben. Die Korrosivität einer Atmosphäre wird in [ISO9223] in fünf Kategorien eingeteilt.

Tabelle 4-1: Korrosivitäts-Kategorien nach [ISO9223]

Kategorie	Korrosivität
C 1	sehr gering
C 2	gering
C 3	mäßig
C 4	hoch
C 5	sehr hoch

Die Einteilung einer Atmosphäre in die Korrosivitäts-Kategorien erfolgt entweder über die Exposition von metallischen Gebrauchsnormalen mit anschließender Bestimmung des Massenverlustes (Korrosionsrate) oder über die Messung der wesentlichen Umweltparameter (siehe Kapitel 4.1.2). Angaben zur Messung dieser Parameter sowie zu den Gebrauchsnormalen finden sich in [ISO9225] und [ISO9226]. Im Folgenden werden die beiden Methoden zur Kategorisierung kurz beschrieben.

4.1.1 Klassifizierung durch die Exposition von metallischen Gebrauchsnormalen

Bei den Gebrauchsnormalen handelt es sich um flache Metallbleche oder spiralförmige Metalldrähte aus Stahl, Kupfer, Zink oder Aluminium mit bekannter Oberfläche und Masse.

Um die Korrosivität einer Atmosphäre zu bestimmen, werden die Gebrauchsnormale der zu klassifizierenden Atmosphäre über einen bestimmten Zeitraum ausgesetzt. Anschließend wird die Korrosionsrate r_{corr} bestimmt. Sie beschreibt den durch Korrosion verursachten Massenverlust nach einer Expositionszeit von einem Jahr und kann mit Formel (7) berechnet werden.

$$r_{corr} [g / m^2 * a] = \frac{\Delta m_{GB}}{A_{GB} * t_E} \quad (7)$$

Δm_{GB} : Massenverlust des Gebrauchsnormals in g

A_{GB} : Exponierte Oberfläche des Gebrauchsnormals in m^2

t_E : Expositionszeit in a

Die Korrosionsrate kann auch in $\mu\text{m/a}$ angegeben werden. Diese Einheit ist vor allem dann nützlich, wenn berechnet werden soll, welche Dicke ein metallisches Bauteil haben muss, um einem Korrosionsangriff über eine bestimmte Zeit standzuhalten. Zur Berechnung wird Formel (7) um die Dichte ρ des entsprechenden Metalls erweitert.

$$r_{corr} [\mu\text{m/a}] = \frac{\Delta m_{GB}}{A_{GB} * \rho * t_E} \quad (8)$$

In Tabelle 4-2 sind die empirisch ermittelten Korrosionsraten von unlegiertem Stahl, Zink, Kupfer und Aluminium für die fünf Korrosivitäts-Kategorien aus Tabelle 4-1 angegeben.

Tabelle 4-2: Korrosionsrate r_{corr} für die verschiedenen Korrosivitäts-Kategorien nach [ISO9223]

Kategorie	Korrosionsrate r_{corr} in $\text{g/m}^2\text{a}$ und $\mu\text{m/a}$			
	Stahl	Zink	Kupfer	Aluminium
C1	≤ 10 $\leq 1,3$	$\leq 0,7$ $\leq 0,1$	$\leq 0,9$ $\leq 0,1$	-
C2	$10 < r_{corr} \leq 200$ $1,3 < r_{corr} \leq 25$	$0,7 < r_{corr} \leq 5$ $0,1 < r_{corr} \leq 0,7$	$0,9 < r_{corr} \leq 5$ $0,1 < r_{corr} \leq 0,6$	$r_{corr} \leq 0,6$ -
C3	$200 < r_{corr} \leq 400$ $25 < r_{corr} \leq 50$	$5 < r_{corr} \leq 15$ $0,7 < r_{corr} \leq 2,1$	$5 < r_{corr} \leq 12$ $0,6 < r_{corr} \leq 1,3$	$0,6 < r_{corr} \leq 2$ -
C4	$400 < r_{corr} \leq 650$ $50 < r_{corr} \leq 80$	$15 < r_{corr} \leq 30$ $2,1 < r_{corr} \leq 4,2$	$12 < r_{corr} \leq 25$ $1,3 < r_{corr} \leq 2,8$	$2 < r_{corr} \leq 5$ -
C5	$650 < r_{corr} \leq 1500$ $80 < r_{corr} \leq 200$	$30 < r_{corr} \leq 60$ $4,2 < r_{corr} \leq 8,4$	$25 < r_{corr} \leq 50$ $2,8 < r_{corr} \leq 5,6$	$5 < r_{corr} \leq 10$ -

Je nach Art des Metalls wird der Korrosionsverlauf durch die sich bildenden Korrosionsprodukte beeinflusst (siehe Kapitel 3.1). Deshalb gelten die Werte nur für das erste Jahr der Expositionsdauer. Es ist nicht möglich durch Extrapolation der Werte genaue Aussagen über das Langzeitverhalten der Werkstoffe zu treffen.

4.1.2 Klassifizierung durch Messung der Umweltparameter

Dieser Methode liegt die Annahme zu Grunde, dass die atmosphärische Korrosion von Metallen im Wesentlichen von den drei Umweltparametern - Dauer der Feuchtigkeit τ , Depositionsrate von Chlorid S und Depositionsrate von Schwefeldioxid

(SO₂) P - abhängig ist. Um eine Atmosphäre einer Korrosivitäts-Kategorie zuzuordnen, muss der Belastungsgrad mit diesen Parametern gemessen oder durch Evaluierung bekannter Wetterdaten ermittelt werden. Im Folgenden werden die drei Parameter und ihre Kategorisierung kurz beschrieben:

Dauer der Feuchtigkeit

Die Dauer der Feuchtigkeit τ , bezeichnet die Anzahl von Stunden pro Jahr in denen es zu einer Bildung von elektrolytischen Schichten auf einer metallischen Oberfläche kommt. Nach [ISO9223] wird τ ermittelt, indem die Stunden gezählt werden, in denen die relative Luftfeuchtigkeit RH bei $T > 0^\circ\text{C}$ größer als 80% ist. Tabelle 4-3 zeigt die Kategorisierung von τ nach [ISO9223]:

Tabelle 4-3: Klassifizierung der Dauer der Feuchtigkeit nach [ISO9223]

Dauer der Feuchtigkeit τ		Kategorie
in h/a	in %	
$\tau \leq 10$	$\tau \leq 0,1$	τ_1
$10 < \tau \leq 250$	$0,1 < \tau \leq 3$	τ_2
$250 < \tau \leq 2500$	$3 < \tau \leq 30$	τ_3
$2500 < \tau \leq 5000$	$30 < \tau \leq 60$	τ_4
$5500 < \tau$	$60 < \tau$	τ_5

Werte unterhalb 30% (τ_1 - τ_3) werden nur in klimatisierten Innenräumen oder in kalten, trockenen Atmosphären erzielt und gelten als wenig korrosionsfördernd. Werte zwischen 30 und 60% (τ_4) gelten für alle weder besonders kalten, noch besonders feuchten Freiluft-Atmosphären (gemäßigt Klima). Werte über 60% (τ_5) werden nur in sehr feuchten Gebieten, z.B. in tropischen oder maritimen Klimazonen erreicht.

Chlorid-Belastung

Starke Chlorid-Belastungen finden sich vor allem in maritimen Regionen. Meersalz besteht hauptsächlich aus Natriumchlorid (NaCl). NaCl ist ein starker Elektrolyt, wenn es in wässriger Lösung vorliegt. Es verstärkt die elektrolytischen Eigenschaften wässriger Schichten auf Metalloberflächen und fördert den Ionenaustausch. Die Geschwindigkeit der ablaufenden Korrosionsreaktion wird erhöht. Der Belastungsgrad einer Atmosphäre mit Chlorid wird über die Depositionsrate angegeben. Sie beschreibt die Masse Cl⁻, die sich innerhalb eines Tages auf einer Fläche von einem

Quadratmeter niederschlägt. Je nachdem, wie hoch dieser Wert ist, kann die Chlorid-Belastung einer vierstufigen Skala zugewiesen werden.

Tabelle 4-4 zeigt die Kategorisierung der Chlorid-Belastung S einer Atmosphäre nach [ISO9223].

Tabelle 4-4: Klassifizierung der Chlorid – Belastung nach [ISO9223]

Depositionsrate Chlorid S in $\text{mg}/\text{m}^2\text{d}$	Kategorie
$S \leq 3$	S_0
$3 < S \leq 60$	S_1
$60 < S \leq 300$	S_2
$300 < S \leq 1500$	S_3

Schwefeldioxid-Belastung

Schwefeldioxid ist ein Folgeprodukt der Verbrennung von fossilen Brennstoffen und somit vor allem in städtischen und industriellen Atmosphären vorhanden. Löst es sich in wässrigen Elektrolytschichten, kann es zur Bildung von Schwefelsäure kommen, welche die Korrosion von Metallen stark beschleunigt. Der Belastungsgrad einer Atmosphäre mit SO_2 kann über die Depositionsrate oder die Konzentration angegeben werden. Letztere beschreibt die Masse an SO_2 in einem Kubikmeter Luft.

Tabelle 4-5 zeigt die Kategorisierung der SO_2 -Belastung P einer Atmosphäre nach [ISO9223].

Tabelle 4-5: Klassifizierung der SO_2 – Belastung nach [ISO9223]

Depositionsrate $\text{SO}_2 P$ in $\text{mg}/\text{m}^2\text{*d}$	Konzentration SO_2 in $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Kategorie
$P \leq 10$	$P \leq 12$	P_0
$10 < P \leq 35$	$12 < P \leq 40$	P_1
$35 < P \leq 80$	$40 < P \leq 90$	P_2
$80 < P \leq 200$	$90 < P \leq 250$	P_3

Bestimmung der Korrosivitäts-Kategorie

Wenn die Belastungsgrade der drei beschriebenen Umweltparameter bekannt sind, kann die Korrosivitäts-Kategorie einer Atmosphäre ermittelt werden. Tabelle 4-6 zeigt die Zuordnung der Kategorie in Abhängigkeit von P , S und τ für unlegierten

Stahl. Die Zahlen entsprechen jeweils den Kategorien nach Tabelle 4-1 (1 = C1, 2 = C2 usw.):

Tabelle 4-6: Korrosivitäts-Kategorien in Abhängigkeit der wesentlichen Umweltparameter nach [ISO9223]

	τ_1			τ_2			τ_3			τ_4			τ_5		
	S_0-S_1	S_2	S_3												
P_0-P_1	1	1	1-2	1	2	3-4	2-3	3-4	4	3	4	5	3-4	5	5
P_2	1	1	1-2	1-2	2-3	3-4	3-4	3-4	4-5	4	4	5	4-5	5	5
P_3	1-2	1-2	2	2	3	4	4	4-5	5	5	5	5	5	5	5

4.1.3 Relevanz der betrachteten Normen

In der beschriebenen Norm werden nur zwei Formen der Luftverunreinigung berücksichtigt, welche die atmosphärische Korrosion von Metallen beschleunigen. In der Praxis gibt es allerdings noch diverse andere Faktoren, die einen Einfluss auf die Korrosivität einer Atmosphäre haben können; z.B.:

- anthropogene Luftschadstoffe wie Ozon (O_3) und Stickoxide (NO_x)
- Temperatur
- UV-Strahlung

Eine differenzierte Bewertung der Korrosivität einer Atmosphäre ist anhand der in [ISO9223] beschriebenen Methodik also nur eingeschränkt möglich. Da sich die Untersuchungen in dieser Arbeit jedoch nur auf die Auswirkung atmosphärischer Salze beziehen und dem Einfluss von Salz auf die Korrosivität einer Atmosphäre in [ISO9223] große Bedeutung zukommt, werden Teile der Norm bei der Kalibrierung des Prüfstandes und bei der Bewertung der Betriebsbedingungen Anwendung finden.

Dazu gehören:

- Die Bewertung der Salzbelastung der Prüfatmosphäre über die Depositionsraten von Chlorid.
- Der Vergleich der Depositionsraten von Chlorid in der Prüfkammer mit den in der Norm beschriebenen Depositionsraten (siehe Tabelle 4-4).
- Die Bewertung der Korrosivität der Prüfatmosphäre über die Bestimmung des Massenverlustes von metallischen Gebrauchsnormalen.

- Der Vergleich der erzielten Massenverluste der Gebrauchsnormale in der Prüfkammer mit den in der Norm beschriebenen Massenverluste (siehe Tabelle 4-2).

4.2 Beschleunigte Korrosionsprüfverfahren

Durch beschleunigte Prüfverfahren soll es ermöglicht werden, in relativ kurzer Zeit eine Aussage über das Langzeitverhalten des geprüften Werkstoffes zu treffen. Die Beschleunigung wird erzielt, indem die Umwelteinflüsse denen der Werkstoff während seiner Gebrauchszeit ausgesetzt ist, quantitativ verstärkt werden. Im Falle von Korrosionsprüfungen ist dies meist der Salzgehalt der Luft. Es können jedoch auch andere Parameter, die einen Einfluss auf die Korrosionsgeschwindigkeit haben, verstärkt werden. Allgemein gilt, dass Ergebnisse von beschleunigten Prüfungen mit zunehmendem Beschleunigungsgrad ungenauer werden [Wra85]. Es ist hierbei kaum möglich, die tatsächliche Lebensdauer eines Werkstoffes unter weniger aggressiven Bedingungen zu bestimmen.

Um repräsentative Ergebnisse zu erhalten, ist es vor allem wichtig, dass das korrosive Medium in seiner qualitativen chemischen Zusammensetzung nicht geändert wird und die Beschleunigung nur durch graduelle Veränderungen, also durch Aufkonzentration eines bestimmten Parameters wie Salzgehalt, Luftfeuchtigkeit, Temperatur etc., erzielt wird. Auch die Korrosionsart muss in einem beschleunigten Test dieselbe sein wie in der Praxis. Bei Teststücken sollte z.B. darauf geachtet werden, dass der Korrosionsangriff nicht über ungeschützte Kanten oder Rückseiten erfolgt, wenn dies nicht dem eigentlichen Korrosionsvorgang in der Praxis entspricht.

Meistens werden beschleunigte Korrosionsprüfungen durchgeführt, um verschiedene Werkstoffe oder Korrosionsschutzsysteme hinsichtlich ihrer generellen Beständigkeit gegenüber den simulierten Bedingungen zu klassifizieren. Außerdem können neuartige Werkstoffe, über deren Korrosionsverhalten es in der Praxis nur wenige Erkenntnisse gibt, einer ersten Prüfung unterzogen werden und mit bekannten Materialien bzw. Systemen verglichen werden.

4.2.1 Salzsprühnebelprüfungen nach [ISO9227]

Die in der internationalen Norm [ISO9227] beschriebene Salzsprühnebelprüfung ist die in der Praxis am weitesten verbreitete Art beschleunigte Korrosionsprüfungen durchzuführen und wird in der Industrie vielfach angewendet, um die Einflüsse

maritimer Atmosphären und Meerwasser auf metallische Werkstoffe zu untersuchen. Die Gültigkeit der Norm beschränkt sich auf Metalle und deren Legierungen, organische Beschichtungen und Oxidschichten.

In einer abgeschlossenen Kammer werden Teststücke platziert und anschließend mit einer Salzlösung besprüht. Es werden drei verschiedene Prüfverfahren beschrieben, bei denen unterschiedliche Prüflösungen zum Einsatz kommen:

- Bei der *neutralen Salzsprühnebelprüfung (NSS)* wird eine pH-neutrale NaCl-Lösung verwendet.
- Bei der *Essigsäure-Salzsprühnebelprüfung (AASS)* wird der NaCl-Lösung zusätzliche Essigsäure zugegeben.
- Bei der *Kupferbeschleunigte Essigsäure-Salzsprühnebelprüfung (CASS)* wird der NaCl-Lösung zusätzlich Essigsäure und Kupfer(II)-chlorid-Dihydrat zugegeben.

Für die Problemstellung dieser Arbeit ist lediglich die neutrale Salzsprühnebelprüfung interessant, da nur die Auswirkungen von salzhaltiger Luft untersucht werden. Deshalb wird an dieser Stelle nicht näher auf die anderen beiden Prüfverfahren eingegangen.

In der Norm werden bestimmte Anforderungen an die Prüfeinrichtung und an die Betriebsbedingungen während der Prüfung gestellt. Im Folgenden werden die wichtigsten Anforderungen genannt.

- Die Prüfkammer muss aus einem Material bestehen, dass gegen die versprühte Lösung korrosionsbeständig ist.
- Das Prüfkammervolumen muss mindestens $0,4 \text{ m}^3$ betragen.
- Die zu prüfenden Teile dürfen von der verwendeten Lösung nicht direkt besprüht werden.
- Die durchschnittliche Auffangmenge der Prüflösung muss bei einer horizontalen Auffangfläche von ca. 80 cm^2 an jedem Ort der Prüfkammer ($1,5 \pm 0,5 \text{ ml/h}$) betragen.
- Das Versprühen der Prüflösung darf während der gesamten Prüfdauer nicht unterbrochen werden.

- Die Prüftemperatur muss während der gesamten Prüfdauer $(35 \pm 2)^\circ\text{C}$ betragen.
- Die Konzentration der verwendeten NaCl-Lösung muss $(50 \pm 5) \text{ g/l}$ betragen.

Alle Betriebsbedingungen müssen während der gesamten Prüfzeit konstant gehalten werden. Die zu prüfenden Teile müssen aufgehängt oder in einem Gestell so montiert werden, dass es zu keinem Kontakt zwischen ihnen kommen kann. Wenn die Teile übereinander angeordnet sind, darf es zu keinem Übertrag von Kondensat der oberen auf die unteren Teile kommen. Bleche und andere Teile, wie z.B. Schrauben müssen in einem Winkel von 20° in die Vertikale zeigen, damit sich bildendes Kondensat möglichst gut ablaufen kann.

Um zu überprüfen, ob die Prüfeinrichtung zufriedenstellend arbeitet, wird in der Norm ein Verfahren zur Bewertung der Korrosivität der Prüfkammer beschrieben. Hierzu werden metallische Gebrauchsnormale verwendet, deren korrosionsbedingter Massenverlust nach einer bestimmten Prüfdauer ermittelt wird. Die Durchführung und Auswertung des Verfahrens werden in Kapitel 6.2 näher beschrieben.

4.2.2 Zyklische Salznebelprüfungen nach [IEC68252]

Das in dieser Norm beschriebene Prüfverfahren ist dem in [ISO9227] beschriebenen Verfahren sehr ähnlich. Zur Erzeugung einer korrosiven Prüfatmosphäre wird ebenfalls eine NaCl-Lösung versprüht. An die Betriebsbedingungen und die Beschaffenheit der Prüfkammer werden weitestgehend dieselben Anforderungen gestellt. Jedoch teilt sich die Prüfung in mehrere Prüfzyklen auf, in denen die Proben unterschiedlichen Bedingungen ausgesetzt werden. Außerdem können die in der Norm beschriebenen Prüfungen auch zur Untersuchung von Abbauprozessen nichtmetallischer Werkstoffe durch die Einwirkung einer salzhaltigen Atmosphäre verwendet werden.

Ein Prüfzyklus besteht jeweils aus einer Sprühperiode, in der die Proben mit der NaCl-Lösung besprüht werden und einer Lagerperiode, in der die Proben für eine bestimmte Zeit feuchten oder trockenen Bedingungen ausgesetzt werden. Die Sprühperiode erfolgt hierbei immer über eine Dauer von zwei Stunden. Die Dauer und die Bedingungen der anschließenden Lagerperiode können variiert werden um unterschiedliche Belastungsstufen zu erzeugen. Es werden insgesamt sechs verschiedene Belastungsstufen beschrieben, mit denen jeweils unterschiedliche klimatische Verhältnisse simuliert werden können.

Tabelle 4-7 zeigt, welche klimatischen Verhältnisse mit den unterschiedlichen Belastungsstufen simuliert werden und wie sie sich in der Abfolge der Prüfzyklen bzw. der Bedingungen der Lagerungsperiode voneinander unterscheiden.

Tabelle 4-7: Unterschiedliche Belastungsstufen aus [IEC68252]

Belastungsstufe	Simulierte Klimaverhältnisse	Abfolge der Prüfzyklen
1	Zur Prüfung von Bauteilen, welche während ihrer Gebrauchsduer dauerhaft einer maritimen Atmosphäre ausgesetzt sind, z.B. Schiffsradar	4 Sprühperioden bei 15-35 °C zu je 2 h, jeweils gefolgt von einer 7-tägigen Lagerung bei $RH = (93 \pm 2)\%$ und 40 ± 2 °C
2	Zur Prüfung von Bauteilen, welche während ihrer Gebrauchsduer zeitweise einer maritimen Atmosphäre ausgesetzt sind, z.B. Navigationsinstrumente	3 Sprühperioden bei 15-35 °C zu je 2 h, jeweils gefolgt von einer Lagerung von 22 h die $RH = (93 \pm 2)\%$ und 40 ± 2 °C
3	Zur Prüfung von Bauteilen, welche während ihrer Gebrauchsduer abwechselnd salzbelasteten und gemäßigten (trockenen) Atmosphären ausgesetzt sind, z.B. Autos	4 Sprühperioden bei 15-35 °C zu je 2 h, jeweils gefolgt von einer Lagerung von 22 h bei $RH = (93 \pm 2)\%$ und 40 ± 2 °C; anschließend 3 Tage Lagerung bei 23 ± 2 °C und $RH = 45-55\%$
4	wie Beanspruchungsstufe 3	zwei Zyklen wie für Beanspruchungsstufe 3 beschrieben
5	wie Beanspruchungsstufe 3	drei Zyklen wie für Beanspruchungsstufe 3 beschrieben
6	wie Beanspruchungsstufe 3	vier Zyklen wie für Beanspruchungsstufe 3 beschrieben

4.2.3 Wechseltauchprüfungen in Salzlösung nach [ISO11130]

Bei diesem Prüfverfahren werden die Proben für eine bestimmte Zeit direkt in eine NaCl-Lösung eingetaucht und anschließend mit einem Gebläse schonend getrocknet. Die Eintauchphase beträgt ca. zehn, die anschließende Trocknungsphase ca. fünfzig Minuten, sodass sich die Dauer eines Prüfzyklus zu einer Stunde ergibt. Um unterschiedliche Belastungsstufen zu erzielen, können die Zyklen mehrmals wiederholt werden.

Der Wechsel zwischen feuchten und trockenen Bedingungen stellt für viele Materialien eine stärkere Belastung dar als einfaches, kontinuierliches Eintauchen. Im Vergleich zu Salzsprühnebelprüfungen zeigt sich eine deutlich beschleunigte Korrosion

der Materialien. Um die Korrosionswirkung von Meerwasser zu simulieren, wird in der Norm die Herstellung von künstlichem Meerwasser beschrieben.

Wie [ISO9227] bleibt die Gültigkeit dieser Norm auf metallische Werkstoffe und deren Legierungen, organische Beschichtungen und Oxidschichten beschränkt.

4.2.4 Vor- und Nachteile der betrachteten Verfahren

Mit dem Prüfstand, der im Rahmen dieser Arbeit konzipiert und gebaut wird, soll der Einfluss von salzhaltiger Luft auf verschiedene Komponenten von Solaranlagen untersucht werden. Die Untersuchung des Einflusses weiterer Luftschadstoffe ist nicht Gegenstand dieser Arbeit. Bei der Auswahl des Prüfverfahrens werden also nur solche berücksichtigt, bei denen als korrosives Medium neutrale Salzlösungen verwendet werden. Da Salz in der Luft als Aerosol vorliegt (siehe Kapitel 3.3.1), sind Prüfverfahren mit Salznebel vorzuziehen, da sie die Belastung von Solaranlagen unter realen Bedingungen am besten wiedergeben. Weil im Rahmen dieser Arbeit erste Prüfungen an ausgewählten Komponenten durchgeführt werden sollen, muss der Prüfstand möglichst schnell fertig gestellt werden. Er muss also auf einem Verfahren mit einer relativ einfachen Prüfeinrichtung basieren.

In Tabelle 4-8 sind die wesentlichen Vor- und Nachteile der betrachteten Verfahren dargestellt. Basierend auf dieser Betrachtung erfolgen im nächsten Kapitel die Auswahl des Prüfverfahrens und die Konzeptionierung des Prüfstandes.

Tabelle 4-8: Vor- und Nachteile der betrachteten Korrosionsprüfverfahren

Prüfverfahren	Vorteile	Nachteile
ISO 9227	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verwendung von Salznebel ▪ relativ einfache Prüfeinrichtung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ keine unterschiedlichen Belastungsstufen ▪ auf Prüfung von metallischen Bauteilen beschränkt
IEC 68-2-52	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verwendung von Salznebel ▪ Simulation von Feucht-Trocken-Zyklen möglich ▪ Simulation von unterschiedlichen Belastungsstufen möglich 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ relativ aufwendige Prüfeinrichtung
ISO 11130	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Simulation von Feucht-Trocken-Zyklen möglich ▪ Simulation von unterschiedlichen Belastungsstufen möglich 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ keine Verwendung von Salznebel ▪ sehr aufwendige Prüfeinrichtung ▪ auf Prüfung von metallischen Bauteilen beschränkt

5 Auswahl des Prüfverfahrens und Konzeptionierung des Prüfstandes

Der Auswahl des Prüfverfahrens und der Konzeptionierung des Prüfstandes liegen die Grundlagen der atmosphärischen Korrosion und die Entstehung von Meersalzaerosolen (Kapitel 3) sowie die Betrachtung bestehender Normen zur Durchführung von beschleunigten Korrosionsprüfverfahren (Kapitel 4) zu Grunde. Darüber hinaus wird der Prüfstand so konzeptioniert, dass seine Fertigstellung und Inbetriebnahme im Zeitrahmen dieser Arbeit realisiert werden kann.

5.1 Auswahl des Prüfverfahrens

Das im Rahmen dieser Arbeit zur Anwendung kommende Prüfverfahren bezieht sich auf Materialprüfungen an ausgewählten Komponenten von PV-Modulen und Solarkollektoren. Sowohl PV-Module als auch Solarkollektoren bestehen grundsätzlich aus hochwertigen Materialien mit guter Korrosionsbeständigkeit (siehe Tabelle 2-2 und Tabelle 2-1). Trotzdem kann es unter dem Einfluss von salzhaltiger Luft zur Korrosion einzelner Komponenten oder sogar zur Beschädigung des gesamten Systems kommen (siehe Kapitel 2.3 und 2.4). Um dieser Gefahr vorzubeugen, soll das Prüfverfahren genaue Kenntnisse darüber liefern, wie einzelne Komponenten auf salzhaltige Luft reagieren. Hierbei geht es vor allem um die Prüfung der aktiven Anlagenkomponenten sowie der Komponenten, die beim Betrieb der Anlagen der Atmosphäre und somit der salzhaltigen Luft direkt ausgesetzt sind (siehe Kapitel 2.5, Tabelle 2-3). Des Weiteren soll das Prüfverfahren die Möglichkeit bieten, neue Materialien auf ihre Korrosionsbeständigkeit zu prüfen und mit bereits auf dem Markt befindlichen Produkten zu vergleichen.

Der Prüfstand wird in Anlehnung an [ISO9227] konzeptioniert und ausgelegt. Die Belastung der Proben in Salznebelprüfungen kommt den realen Bedingungen an maritimen Standorten näher, als die in Kapitel 4.2.3 beschriebene Belastung durch Eintauchen in eine Salzlösung. Außerdem ist der Versuchsaufbau nach [ISO9227], im Gegensatz zu den anderen in Kapitel 4 beschriebenen Verfahren, relativ einfach und somit innerhalb kurzer Zeit umsetzbar. Darüber hinaus wird in [ISO9227] ein Verfahren zur Bewertung der Korrosivität der Prüfkammer beschrieben, wodurch es möglich ist genau zu überprüfen, ob die geforderten Betriebsbedingungen während der Durchführung der Versuche eingehalten werden.

Eine Erweiterung des Versuchsaufbaus zur Durchführung von zyklischen Salznebelprüfungen nach [IEC68252] ist im Anschluss an diese Arbeit möglich, da sich die beiden Verfahren von den erforderlichen Gerätschaften nicht wesentlich unterscheiden. Es bedarf lediglich einer erweiterten Regelungstechnik zur automatischen Steuerung der verschiedenen Prüfzyklen.

5.2 Aufbau und Komponenten des Prüfstandes

In Abbildung 5-1 sind der Prüfstand und die einzelnen Komponenten aus denen er besteht schematisch dargestellt. In den darauf folgenden Unterkapiteln werden die Auswahl und die Konstruktion sowie die Aufgaben und Funktionsweisen der einzelnen Komponenten genauer beschrieben.

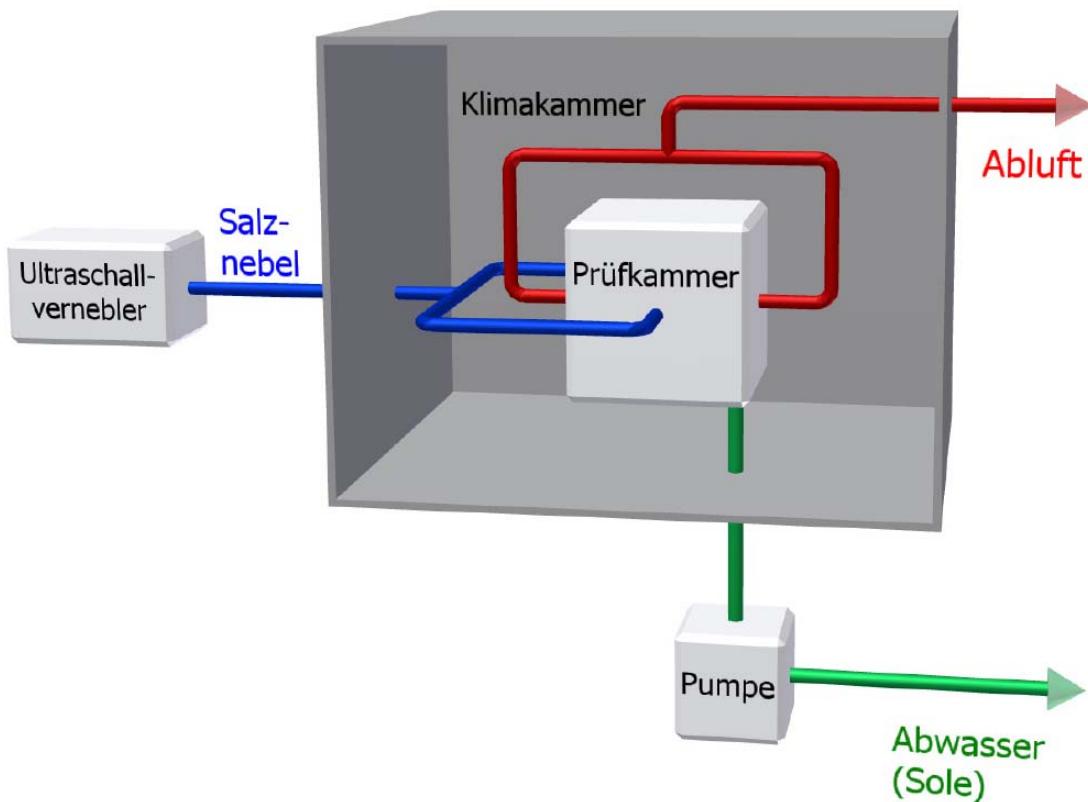


Abbildung 5-1: Schematische Darstellung des Prüfstandes

5.2.1 Der Ultraschallvernebler

Zur Erzeugung des Salznebels wird ein Ultraschallvernebler des Typs *U-3002-E* der Firma *Schulte-Elektronik* verwendet (siehe Abbildung 5-2). Die Ultraschallschwingungen werden über eine Kontaktflüssigkeit auf die Prüflösung in der Nebelkammer übertragen. Weil dadurch ein direkter Kontakt zwischen der zu vernebelnden Flüssigkeit und dem Schallkopf vermieden wird, lassen sich auch korrosive Flüssigkeiten.

ten, wie Salzlösungen, vernebeln. Auf die Nebelkammer wird ein Vorratsbehälter (1000 ml) mit einem Adapter aufgesetzt, sodass kontinuierlich Flüssigkeit in die Nebelkammer nachfließt. Über einen stufenlosen Regler wird die Frequenz der Ultraschallschwingungen verändert, sodass je nach Einstellung mehr oder weniger Nebel erzeugt wird. Mit einem zweiten Regler kann der Luftvolumenstrom und somit die der Prüfkammer zugeführte Nebelmenge verändert werden.

Die erzeugte Partikelgröße des Nebels liegt laut Herstellerangaben zwischen 0,5 und 5 μm [Sch08]. Der Nebel wird über Schläuche von zwei Seiten in die Kammer geleitet.

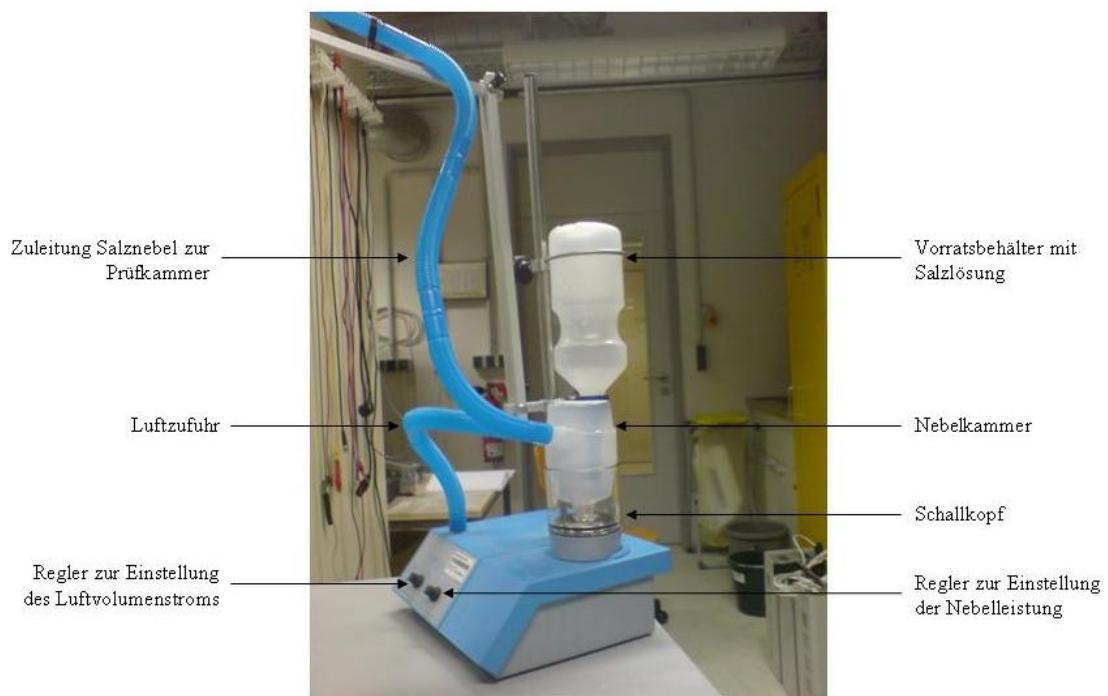


Abbildung 5-2: Ultraschallvernebler U-3002-E

5.2.2 Die Prüfkammer

Da zur Durchführung von Materialprüfungen kein großes Kammervolumen erforderlich ist, wird als Prüfkammer ein bereits vorhandener, kubischer Glaskasten verwendet (siehe Abbildung 5-3). Hierdurch können Zeitaufwand und Investitionskosten, die bei der Konstruktion und Fertigung einer neuen Prüfkammer entstehen würden, minimiert werden. Der Glaskasten bildet als Prüfkammer das Kernstück des Versuchsaufbaus und besitzt ein Volumen von $0,064 \text{ m}^3$ ($40*40*40 \text{ cm}^3$). Er verfügt über insgesamt zwölf Bohrungen für Anschlüsse verschiedener Art. Der Boden ist

abgeschrägt und besitzt eine Öffnung. An diese Öffnung wird eine Pumpe angeschlossen, um die Flüssigkeit die sich während der Prüfung ansammelt abzupumpen.

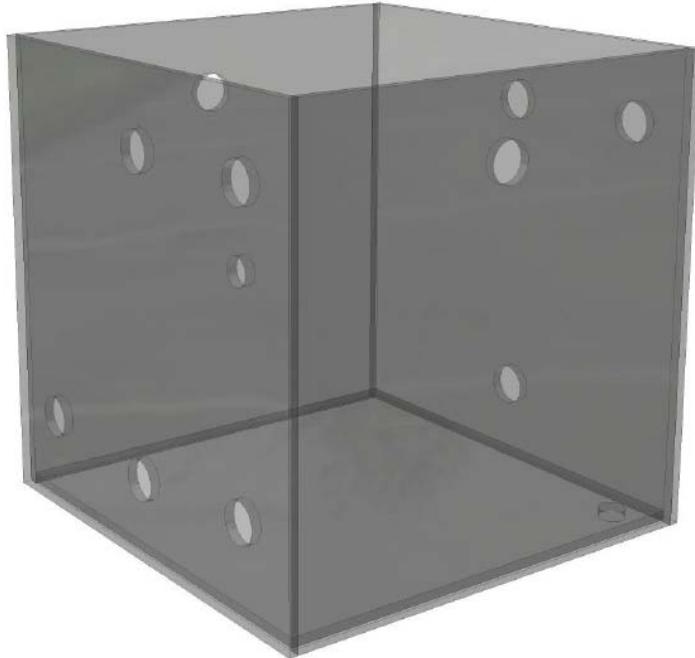


Abbildung 5-3: Prüfkammer ohne Anschlüsse und Verschlussystem

Die Prüfkammer wird in eine Klimakammer der Firma *Voetsch* eingebaut, in welcher Temperaturen zwischen -5°C und 95°C eingestellt werden können. Damit die Klimakammer nicht durch den Salznebel beschädigt wird, wurde für den Glaskasten ein Verschlussystem entwickelt, welches ein Austreten von Salznebel verhindert.

Hierzu wurde mit Silikon auf den oberen Rand des Glaskastens ein 2cm breiter Rahmen befestigt. Der Rahmen wurde aus Makrolon gefertigt, welches eine hohe Beständigkeit gegen NaCl besitzt [Bay04]. Auf den Rahmen wurde eine Gummidichtung angebracht. Durch Auflegen einer ebenen Makrolonplatte (42*42 cm²) wird der Kasten verschlossen. Damit der Verschluss luftdicht ist, muss diese Platte noch zusätzlich beschwert werden. Hierzu wird ein Metaldeckel (42*42 cm²) mit Griffen und einem zusätzlichen Gewicht verwendet. In Abbildung 5.3 sind die beschriebenen Komponenten des Verschlusssystems dargestellt. Alle Teile wurden mit Hilfe des CAD-Programms *Autodesk Inventor 2008* entworfen und anschließend von der Institutseigenen Betriebstechnik gefertigt.

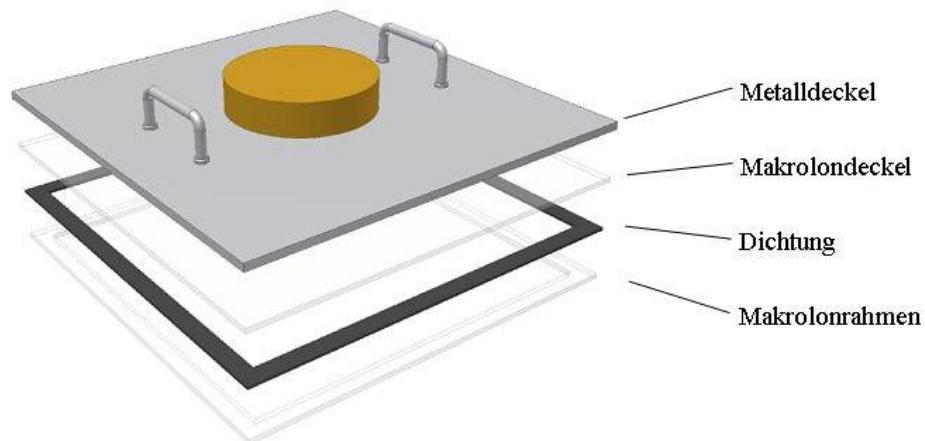


Abbildung 5-4: Komponenten des Verschlussystems

Der Salznebel wird über zwei gegenüberliegende Anschlüsse im oberen Bereich der Kammer zugeführt. An den jeweils benachbarten Seiten befinden sich auf gleicher Höhe und Position die Anschlüsse für die Abluftschläuche. Der Anschluss der Schläuche erfolgt über Schlauchtüllen aus korrosionsbeständigem Polyvinylchlorid (PVC), die mit Kontermuttern (ebenfalls aus PVC) befestigt werden [Mas08]. Die nicht verwendeten Öffnungen werden mit einem PVC-Stopfen und einer Kontermutter verschlossen. Abbildung 5-5 zeigt die Prüfkammer mit allen Anschlüssen und dem Verschlussystem.

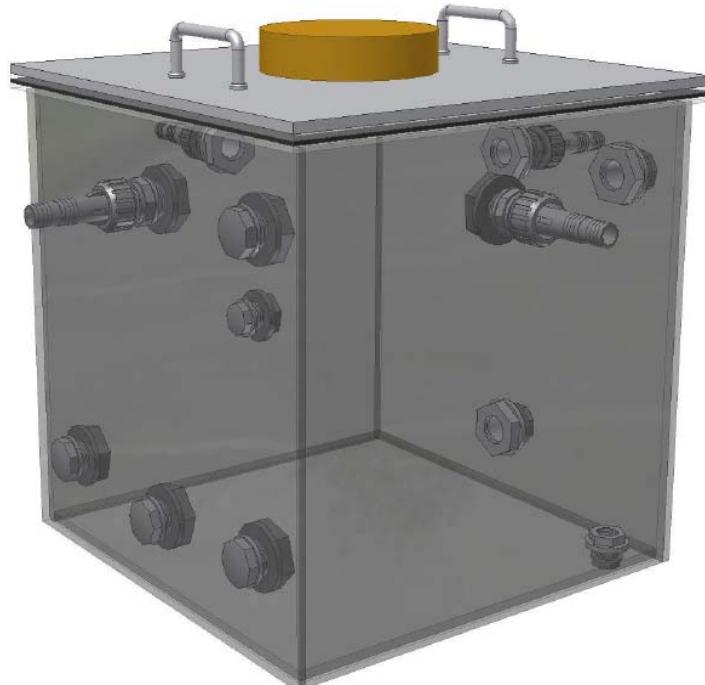


Abbildung 5-5: Prüfkammer mit allen Anschlüssen und dem Verschlussystem

5.2.3 Der Probenhalter

Zur Platzierung der Proben in der Prüfkammer wurde ein Probenhalter konstruiert und gebaut. Auch er besteht, wie die Anschlüsse der Prüfkammer, aus korrosionsbeständigem PVC [Mas08]. Er ist so konstruiert, dass die Proben in einem Winkel zwischen 20° und 30° zur Senkrechten stehen und kann von zwei Seiten mit Proben unterschiedlicher Größe bestückt werden. Abbildung 5-6 zeigt den Probenhalter beispielhaft bestückt mit zwei Proben der Größe 50*50 mm² und einer Probe mit der Größe 100*70 mm².



Abbildung 5-6: Probenhalter mit zwei Proben 50*50mm² und einer Probe 100*70mm²

5.2.4 Temperatur-Monitoring mit Pt100-Sensoren

Ein Pt100-Sensor ist ein Widerstandsthermometer, dessen elektrischer Widerstand mit steigender Temperatur zunimmt. Er besteht aus einem Platindraht oder einer dünnen Platinschicht (Pt = Platin) und besitzt bei 0°C einen Nennwiderstand von genau 100 Ohm ($R_0 = 100 \Omega$). Die Messung der Temperatur basiert auf dem Prinzip des Spannungsabfalls. Der Sensor wird mit einem konstanten Messstrom gespeist. Die Spannungsänderung dU verhält sich proportional (linear) zur temperaturabhängigen Widerstandsänderung des Platinsensors [DIN60751].

Die Sensoren werden mit Vierleitertechnik an einen Datenlogger angeschlossen. Durch die Verwendung von Vierleitertechnik bleibt das Messergebnis durch die Leitungswiderstände unbeeinflusst.

Der Messbereich von Pt100-Sensoren liegt zwischen -200°C und 850°C. Sie werden in die Genauigkeitsklassen A und B eingeteilt. Diese beschreiben die Abhängigkeit des zulässigen Temperaturfehlers dT von der realen Temperatur T [DIN60751].

- Klasse A : $dT = \pm (0,15 \text{ } ^\circ\text{C} + 0,002 * T)$
- Klasse B : $dT = \pm (0,30 \text{ } ^\circ\text{C} + 0,005 * T)$
- 1/3 Klasse B : $dT = \pm (1/3 * (0,30 \text{ } ^\circ\text{C} + 0,005 * T))$

Es werden insgesamt drei Sensoren der Genauigkeitsklasse B in die Prüfkammer eingebaut um die Temperatur an unterschiedlichen Stellen messen zu können. Ein Sensor befindet sich ca. 5 cm oberhalb des Kammerbodens, ein weiterer auf der gegenüberliegenden Seite ca. 5 cm unterhalb des Deckels. Beide haben einen Abstand von mindestens 2 cm zu den Wänden der Prüfkammer. Der dritte Sensor kann mit Hilfe eines speziellen Klebebandes und Wärmeleitpaste während der Prüfung direkt auf der Rückseite einer Probe angebracht werden, um die Probentemperatur zu überwachen.

6 Kalibrierung des Prüfstandes

Der Durchführung von Korrosionsprüfung geht die Kalibrierung des Prüfstandes voraus. Zur Kalibrierung des Prüfstandes werden die ersten zwei von insgesamt drei Versuchsreihen durchgeführt. Die einzelnen Versuchsreihen bauen jeweils aufeinander auf. Die Ergebnisse aus der ersten Versuchsreihe liegen der zweiten Versuchsreihe zu Grunde, die Ergebnisse der zweiten wiederum der dritten Versuchsreihe.

Abbildung 6-1 zeigt die drei Versuchsreihen, die zugehörigen Variablen sowie die zu erwartenden Ergebnisse. Die Vorbereitung, Durchführung und Ergebnisse der Versuchsreihen werden in den entsprechenden Kapiteln detailliert beschrieben.

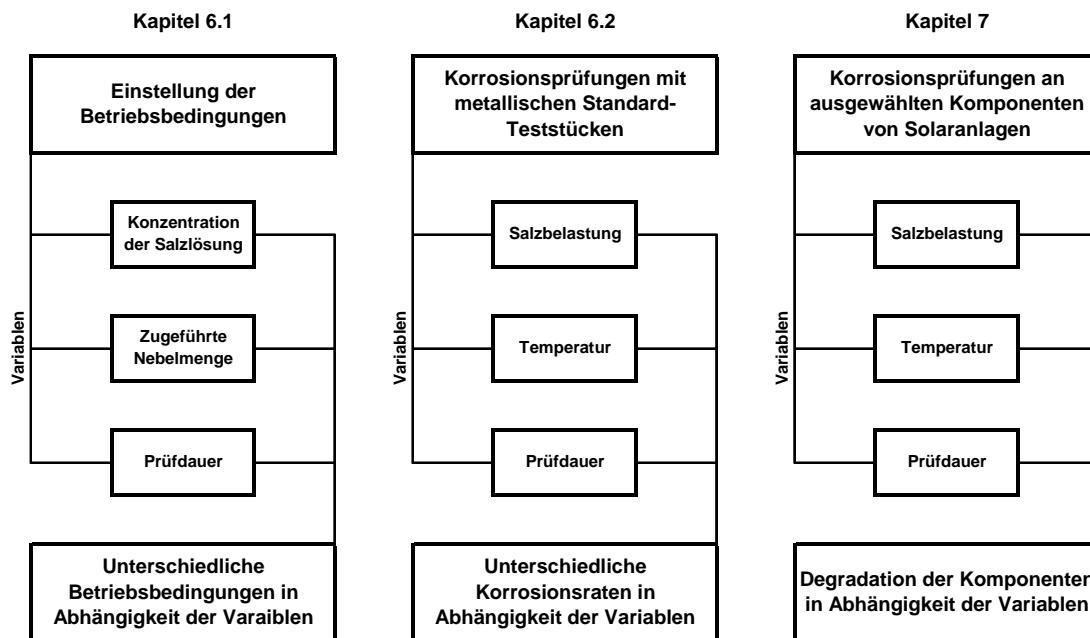


Abbildung 6-1: Schematische Darstellung der drei Versuchsreihen

Wie in Kapitel 4.2.1 beschrieben, werden in [ISO9227] grundlegende Anforderungen an die Betriebsbedingungen in der Prüfkammer gestellt, die während der Durchführung von Prüfungen eingehalten werden müssen. Im Wesentlichen sind dies:

- Eine *durchschnittliche Auffangmenge* der Salzlösung von $(1,5 \pm 0,5)$ ml/h, bei einer horizontalen Auffangfläche von ca. 80 cm^2 .
- Eine *gleichmäßige Verteilung* des Salznebels in der Prüfkammer.
- Eine während der gesamten Prüfdauer konstante *Prüftemperatur* $T_{\text{prüf}}$ von $(35 \pm 2)^\circ\text{C}$.

Werden diese Bedingungen erfüllt, kann die Korrosivität der Prüfkammer durch Korrosionsprüfungen an Gebrauchsnormalen aus Stahl und anschließender Bestimmung des Massenverlustes bewertet werden (siehe Kapitel 6.2).

Vorrangiges Ziel ist es, die Prüfkammer so zu kalibrieren, dass die genannten Betriebsbedingungen eingehalten werden können. Darüber hinaus wird ermittelt, wie hoch die Chloridbelastung in der Prüfkammer ist, um einen Vergleich mit der Chloridbelastung an maritimen Standorten herzustellen. Die Ermittlung der Chloridbelastung erfolgt über die Depositionsrate von Chlorid.

Ein wichtiges Kriterium ist außerdem die Reproduzierbarkeit der Versuche. Es muss zum Einen möglich sein, einen Versuch unter identischen Bedingungen mehrmals durchzuführen, zum Anderen muss es möglich sein, die Versuchsbedingungen schrittweise zu verändern um zu sehen, wie sich diese Veränderungen auf das Ergebnis auswirken. Die Prüfungen an den Gebrauchsnormalen aus Stahl werden deshalb bei unterschiedlichen Prüftemperaturen und Chloridbelastungen durchgeführt.

6.1 Einstellung der Betriebsbedingungen

6.1.1 Durchschnittliche Auffangmenge der Salzlösung

In [ISO9227] und [IEC68252] wird gefordert, dass die durchschnittliche Auffangmenge der Salzlösung V_{80} bei einer horizontalen Auffangfläche von 80 cm^2 an jedem Punkt der Prüfkammer zwischen 1,0 und 2,0 ml/h liegt. Die Konzentration der verwendeten Salzlösung $c_{\text{Lösung}}$ muss hierbei $(50 \pm 5) \text{ g/l}$ betragen.

Da eine volumetrische Bestimmung bei einem so kleinen Volumen sehr schwierig ist, erfolgt die Bestimmung gravimetrisch. Hierzu wird zuerst die Dichte ρ der verwendeten Salzlösung ermittelt. Zur Herstellung der Salzlösung werden ca. 50g Natriumchlorid (NaCl) zur Analyse mit einem Reinheitsgrad von 99,5% in einem Liter deionisiertem Wasser gelöst. Anschließend wird mit einer Pipette fünfmal eine Menge von ca. 25 ml von der Salzlösung abgemessen und mit einer Präzisionswaage (Messfehler $\pm 0,1 \text{ mg}$) gewogen. Danach werden die Mittelwerte gebildet und die Standardabweichung s berechnet.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (9)$$

Tabelle 5.1 zeigt die jeweiligen Werte für Volumen und Masse der Salzlösung sowie die berechneten Mittelwerte und die Standartabweichung:

Tabelle 6-1: Ermittlung der Dichte ρ der 5%igen Salzlösung

Messung	V in ml	m in g
1	24,6	25,4262
2	24,9	25,6744
3	24,8	25,5921
4	24,7	25,5352
5	24,9	25,6211
Mittelwert	24,78	25,5698
Standartabweichung	0,12	0,08

Aus dem Quotienten der Mittelwerte von Masse und Volumen ergibt sich die Dichte $\rho_{5\%}$ der Salzlösung.

$$\rho_{5\%} = \frac{\tilde{m}}{\tilde{V}} \quad (10)$$

Mit Formel (10) und den Werten aus Tabelle 6-1 wurde die Dichte der Salzlösung $\rho_{5\%}$ zu 1,032 g/ml berechnet.

Die Nebelleistung des Ultraschallverneblers und der zugeführte Luftvolumenstrom (siehe Kapitel 5.2.1) werden bei der ersten Prüfung auf höchster Stufe betrieben. Um die durchschnittliche Auffangmenge der Salzlösung zu ermitteln, werden Uhrglasschalen mit einem Durchmesser von 100 mm (horizontale Auffangfläche $A_U = 78,5$ cm²) in der Prüfkammer verteilt (siehe Abbildung 6-2). Ihre Masse m_{Ui} wird mit derselben Präzisionswaage gemessen, mit der zuvor die Masse Salzlösung bestimmt wurde.

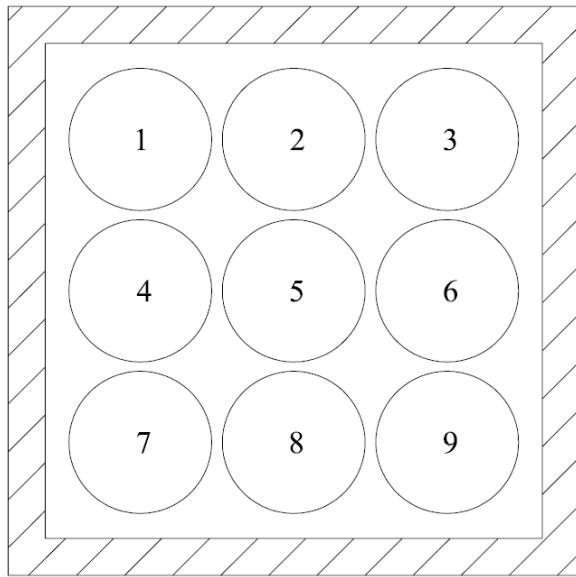


Abbildung 6-2: Anordnung der Uhrglasschalen zur Ermittlung der durchschnittlichen Auffangmenge der verwendeten Salzlösung

Nach einer Stunde Prüfzeit werden die Uhrglasschalen aus der Kammer herausgenommen, erneut gewogen und für jede einzelne die Massendifferenz Δm_{Ui} bestimmt. Anschließend wird der Mittelwert \tilde{m}_U berechnet.

$$\tilde{m}_U = \frac{\sum \Delta m_{Ui}}{i} \quad (11)$$

Dividiert mit der zuvor bestimmten Dichte der Salzlösung ergibt sich so die aufgefangene Menge der Salzlösung.

$$V_{80} = \frac{\tilde{m}_U}{\rho_{5\%}} \quad (12)$$

Bei einer Prüfzeit von einer Stunde betrug die durchschnittliche Auffangmenge der Salzlösung $V_{80} = 1,05 \text{ ml}$ bei einer Standartabweichung von $0,0026 \text{ ml}$.

Die örtliche Verteilung der Salzlösung in der Prüfkammer ist sehr gleichmäßig, was in Abbildung 6-3 auch gut zu erkennen ist. Jede Säule in dem Diagramm entspricht einer Uhrglasschale. Die Werte der einzelnen Säulen geben das berechnete Volumen der aufgefangenen Salzlösung an. Die durchschnittliche Auffangmenge der Salzlösung

sung liegt an jedem Ort der Prüfkammer in dem nach [ISO9227] geforderten Bereich von 1,0 – 2,0 ml/h.

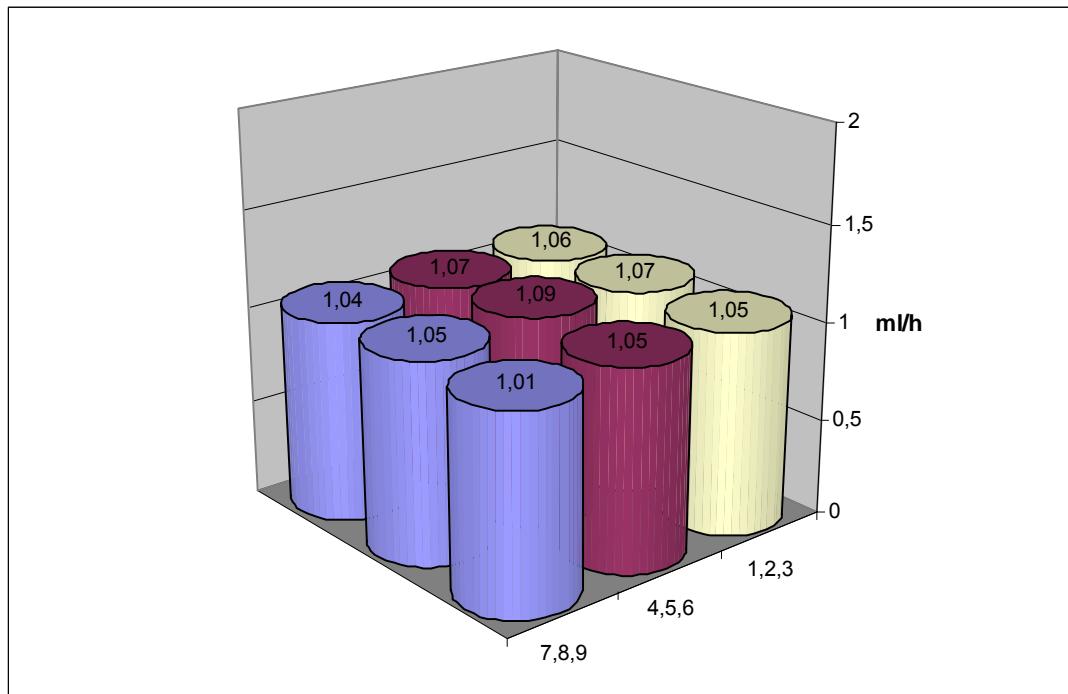


Abbildung 6-3: Aufgefangenes Volumen der Salzlösung pro Uhrglasschale nach $t_{\text{prüf}} = 1\text{h}$

Um zu prüfen, ob V_{80} auch zeitlich konstant ist, werden zwei weitere Prüfungen mit einer Prüfdauern von zwei und drei Stunden durchgeführt. In Tabelle 6-2 sind die Ergebnisse der drei Prüfungen mit den jeweiligen Standardabweichungen dargestellt:

Tabelle 6-2: Durchschnittliche Auffangmenge der verwendeten Salzlösung für Prüfung 1 - 3

Prüfung	$t_{\text{prüf}} [\text{h}]$	$\Delta m_U [\text{g}]$	$s [\text{g}]$	$V_{80} [\text{ml/h}]$	$s [\text{ml/h}]$
1	1	1,0672	0,0209	1,05	0,0206
2	2	2,1506	0,0331	1,06	0,0163
3	3	3,2662	0,0392	1,08	0,0129

Es ist zu erkennen, dass V_{80} zeitlich sehr konstant ist und für alle Prüfungen knapp in dem nach [ISO9227] geforderten Bereich von 1,0 – 2,0 ml/h liegt.

Eine ausführliche Auflistung aller Messdaten der einzelnen Prüfungen sowie die dazugehörigen Säulendiagramme befinden sich im Anhang (siehe Tabellen und Abbildungen auf Seite A-1 - A-3).

6.1.2 Chloriddeposition und örtliche Verteilung des Salznebels

Sowohl in [ISO9227] als auch in [IEC68252] wird gefordert, dass sich der Salznebel innerhalb der Prüfkammer gleichmäßig verteilt. Die Chloridbelastung soll an allen Orten in der Kammer gleich sein. In [ISO9227] wird ein Prüfkammervolumen von mindestens $0,4 \text{ m}^3$ vorgeschrieben, weil bei kleineren Volumina eine gleichmäßige Verteilung des Salznebels kaum erreichbar wäre. In [IEC68252] wird dagegen auf die Vorgabe eines Mindestvolumens verzichtet.

Die Ergebnisse aus Kapitel 6.1.1 zeigen bereits, dass die Verteilung des Salznebels in der Prüfkammer trotz des deutlich kleineren Volumens ($0,0064 \text{ m}^3$) sehr gleichmäßig ist. Es wird nun untersucht, wie hoch die Chloridbelastung in der Prüfkammer S_{kammer} ist und wie sie sich abhängig von der Prüfdauer und der Konzentration der Verwendeten Salzlösung verändert.

Örtliche Verteilung des Salznebels

Die Chloridbelastung in der Prüfkammer S_{kammer} wird in Anlehnung an [ISO9223] über die Depositionsraten von Chlorid S bestimmt (siehe hierzu Kapitel 4.1.2). So kann sie anschließend mit einer bekannten Chloridbelastung an einem beliebigen Standort verglichen werden.

Es werden, wie bei der Ermittlung der durchschnittlichen Auffangmenge der Salzlösung, Uhrglasschalen verwendet, auf denen sich der Salznebel niederschlägt. Nach einer bestimmten Prüfdauer $t_{\text{prüf}}$ werden sie aus der Prüfkammer herausgenommen und in einem Ofen bei ca. 105°C solange getrocknet, bis nur noch das in der Lösung enthaltene NaCl zurückbleibt. Um zu verhindern, dass es hierbei zu einem Abtrag des Salzes von den Oberflächen der Schalen kommt, wird der Ofen während der Trockenzeit nicht durchlüftet. Nach dem Trocknen wird durch erneutes Wiegen die Massendifferenz Δm_{Ui} für jede einzelne Uhrglasschale bestimmt.

Abbildung 6-4 und Abbildung 6-5 zeigen die Masse des auf den einzelnen Uhrglasschalen niedergeschlagenen Salzes nach einer Stunde und nach acht Stunden Prüfdauer. Die Konzentration der verwendeten Salzlösung betrug jeweils 5%. Man erkennt, dass die örtliche Verteilung des Salznebels in der Prüfkammer sehr gleichmäßig ist und die Masse des niedergeschlagenen Salzes mit zunehmender Prüfdauer stark ansteigt.

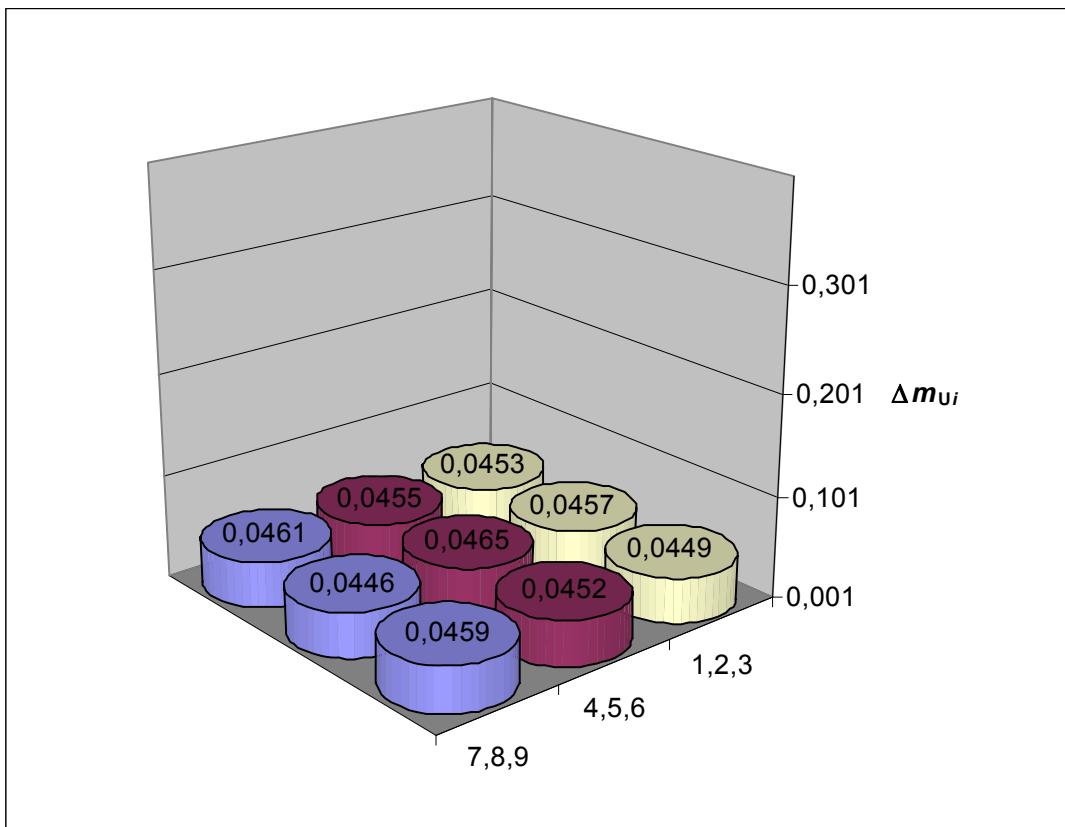


Abbildung 6-4: Masse des niedergeschlagenen Salzes pro Uhrglasschale nach $t_{\text{prüf}} = 1\text{h}$

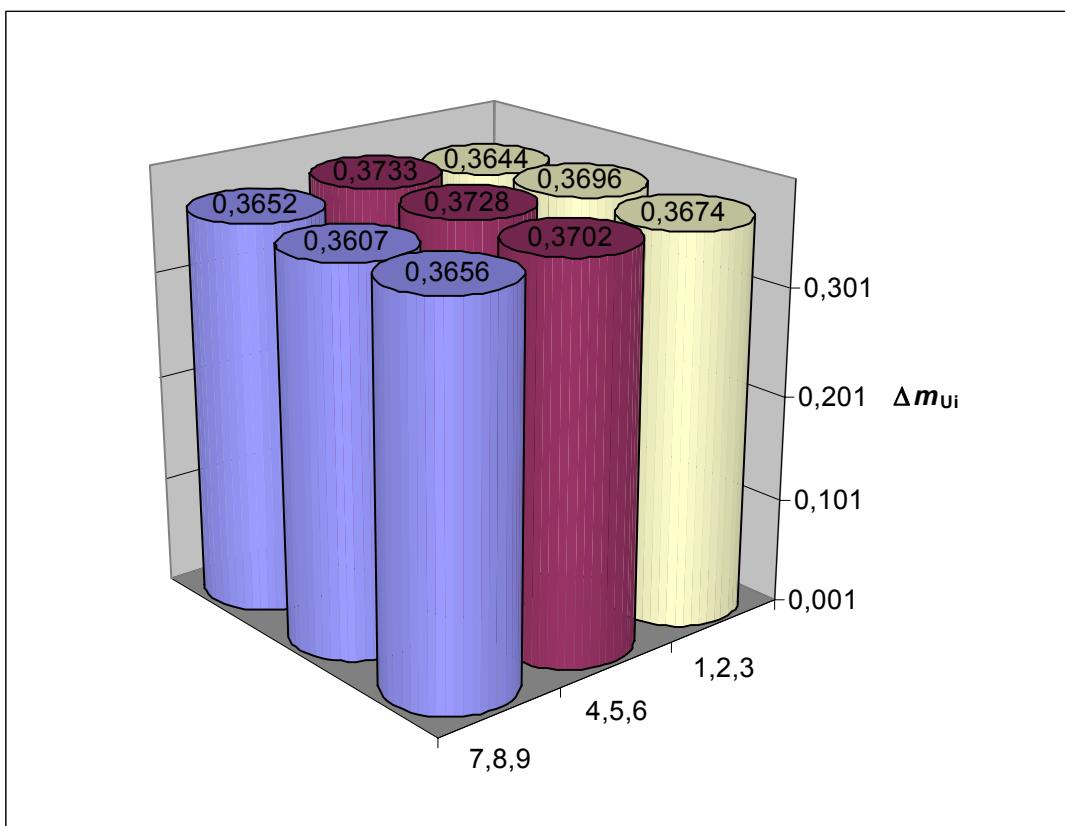


Abbildung 6-5: Masse des niedergeschlagenen Salzes pro Uhrglasschale nach $t_{\text{prüf}} = 8\text{h}$

Berechnung von S_{kammer}

Aufgrund der gleichmäßigen Verteilung des Salznebels erhält man durch die Berechnung des Mittelwertes von Δm_{U_i} nach Formel (11) ein repräsentatives Ergebnis für die Masse des niedergeschlagenen Salzes in der gesamten Prüfkammer Δm_{kammer} .

Mit dem bekannten Massenanteil von Chlorid y_{Cl} des in Lösung gebrachten Salzes, kann die Depositionsrate von Chlorid S berechnet.

$$S = \Delta m_{\text{kammer}} * y_{\text{Cl}} \quad (13)$$

Für die Versuche wurde reines Natriumchlorid zur Analyse verwendet. Bei reinem NaCl lässt sich der Massenanteil von Chlorid über das Verhältnis der Molmassen M berechnen [Kun02].

$$y_{\text{Cl}} = \frac{M(\text{Cl}) * 100g}{M(\text{NaCl})} \quad (14)$$

Mit den Werten für $M(\text{Cl})=35,453 \text{ g/mol}$ und $M(\text{NaCl})=58,443 \text{ g/mol}$ [Kun02] ergibt sich ein Massenanteil y_{Cl} von 60,66 %.

Um die Chloridbelastung in der Prüfkammer anschließend in $\text{mgCl}^-/\text{m}^2\text{d}$ anzugeben, wird S mit Formel (15) umgerechnet:

$$S_{\text{kammer}} [\text{mgCl}^- / \text{m}^2\text{d}] = S * \frac{1\text{m}^2}{A_U} * \frac{24\text{h}}{t_{\text{prüf}}} \quad (15)$$

$$A_U = 0,00785 \text{ m}^2$$

Um zu prüfen, wie sich S_{kammer} mit der Konzentration der Salzlösung und der Prüfdauer verändert, wurden die Versuche mit drei unterschiedlich hoch konzentrierten Salzlösungen bei Prüfdauern von einer, zwei, vier und acht Stunden durchgeführt.

In Tabelle 6-3 sind die ermittelten Werte von Δm_{kammer} und die mit den Formeln (13)-(15) berechneten Werte von S_{kammer} für die verschiedenen Salzlösungen und Prüfdauern dargestellt.

Tabelle 6-3: Mittelwerte der Massendifferenz und Chloridbelastung in Abhängigkeit der Konzentration der verwendeten Salzlösung und der Prüfdauer

$t_{\text{prüf}}$ in h	Δm_{U} in mg			S_{kammer} in mgCl/m ² *d		
	35 g/l	50 g/l	70 g/l	35 g/l	50 g/l	70 g/l
1	24,8	45,5	64,2	45908	84381	119044
2	60,4	91,6	137	55980	84876	127005
4	128,1	195,5	258,1	59353	90576	119611
8	267,6	367,7	526,1	61993	85195	121907

Die ausführliche Auflistung aller Messwerte sowie die Säulendiagramme der einzelnen Prüfungen befinden sich im Anhang (siehe Anhang, Seite A-4 - A-14).

Veränderung von S_{kammer} mit $t_{\text{prüf}}$ und $c_{\text{Lösung}}$

Abbildung 6-6 zeigt den Anstieg von Δm_{kammer} in Abhängigkeit der Prüfdauer. Die Werte wurden aus Tabelle 6-3 entnommen. Man erkennt, dass ein linearer Zusammenhang besteht. Die pro Zeiteinheit vernebelte Menge an Salzlösung kann als konstant betrachtet werden.

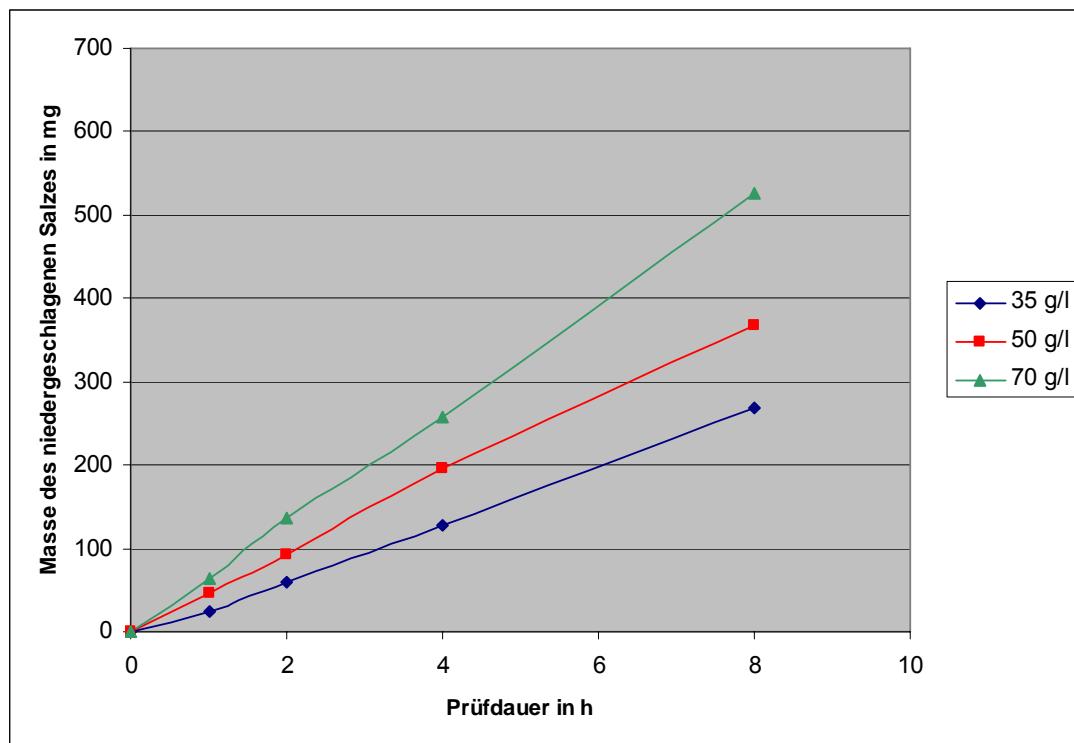


Abbildung 6-6: Masse des niedergeschlagenen Salzes Δm_{kammer} in Abhängigkeit der Prüfdauer $t_{\text{prüf}}$

Da in die Berechnung der Chloridbelastung S_{kammer} die Prüfdauer $t_{\text{prüf}}$ eingeht (siehe Formel (15)) und die erzeugte Nebelmenge zeitlich konstant ist, ist die Chloridbelastung in der Prüfkammer nur von der Konzentration der verwendeten Salzlösung abhängig. Abbildung 6-7 verdeutlicht diesen Zusammenhang.

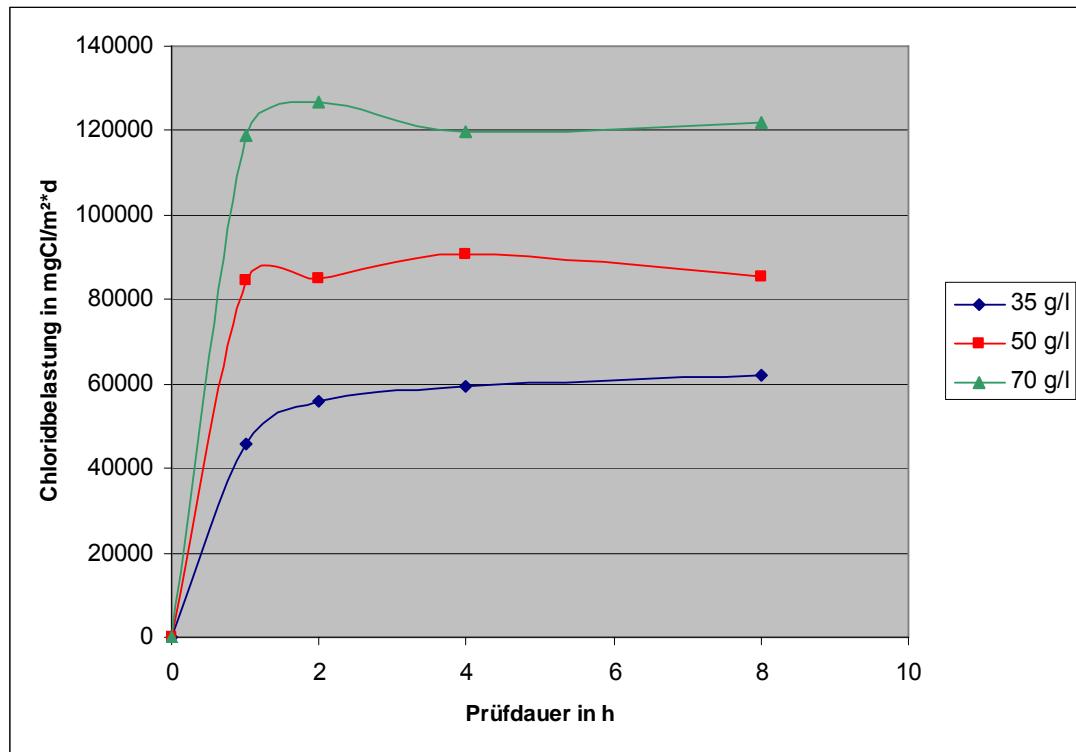


Abbildung 6-7: Chloridbelastung in der Prüfkammer S_{kammer} in Abhängigkeit der Prüfdauer $t_{\text{prüf}}$

6.1.3 Ermittlung des Konzentrationsgradienten F_{Cl}

Ist die Chloridbelastung in der Prüfkammer bekannt, kann sie ins Verhältnis zu einer bekannten Chloridbelastung S_{real} an einem beliebigen Standort gesetzt werden. Man erhält die Dimensionslose Kennzahl F_{Cl} , welche den Konzentrationsgradienten von Chlorid zwischen der Prüfatmosphäre in der Prüfkammer und der Atmosphäre an dem betrachteten Standort beschreibt.

$$F_{\text{Cl}} = \frac{S_{\text{kammer}}}{S_{\text{real}}} \quad (16)$$

Die sehr hohe Chloridbelastung ist in der Prüfung der primäre Beschleunigungsfaktor. Durch die Vernebelung der Salzlösung entsteht gleichzeitig eine sehr hohe relative Luftfeuchtigkeit, welche während der gesamten Prüfdauer über 90% liegt. Es ist

also davon auszugehen, dass die Korrosivität der Prüfkammer jenseits der in [ISO9223] beschriebenen Korrosivitäts-Kategorien (siehe Tabelle 4-1) liegt.

In Abbildung 6-8 wurden die in Kapitel 6.1.2 ermittelten Werte von S_{kammer} mit der höchsten in ISO 9223 beschriebenen Chloridbelastung $S_{\text{max}} = 1500 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{d}$ dividiert. Man erkennt, dass der Verlauf der Kurven der Selbe ist wie in Abbildung 6-7, d.h., abhängig von der Konzentration der verwendeten Salzlösung und der ins Verhältnis gesetzten Chloridbelastung des betrachteten Standortes erhält man einen bestimmten Wert für den Konzentrationsgradienten F_{Cl} .

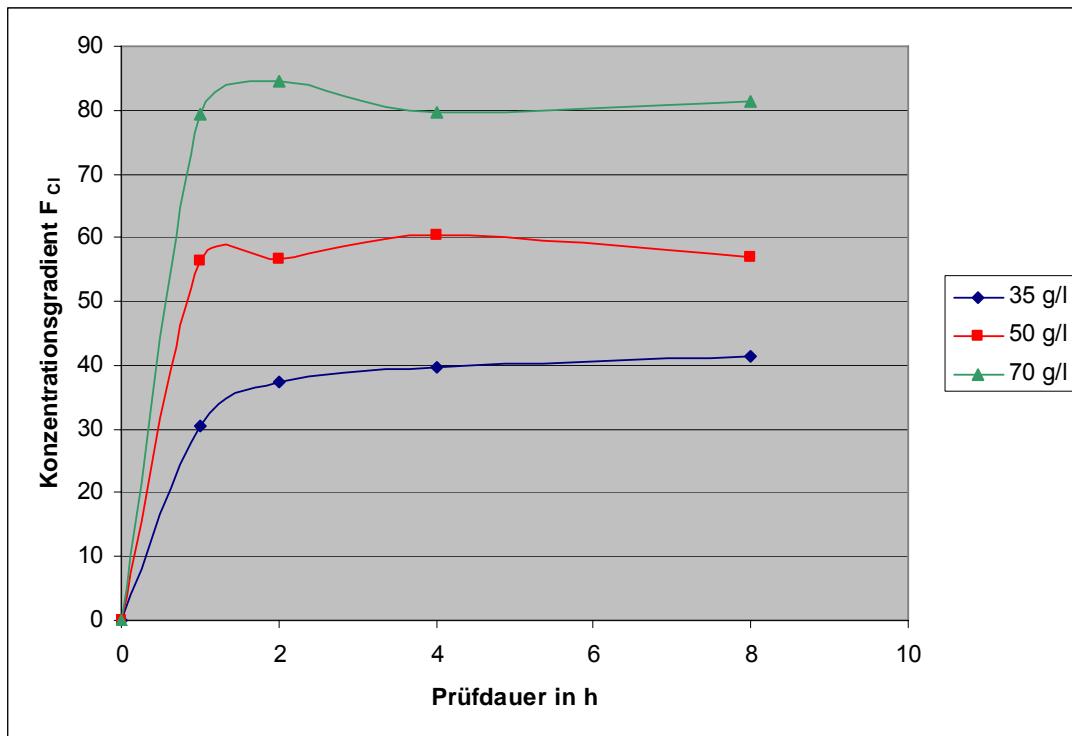


Abbildung 6-8: Konzentrationsgradient F_{Cl} in Abhängigkeit der Prüfdauer $t_{\text{prüf}}$ für $S_{\text{max}} = 1500 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{d}$

Der Konzentrationsgradient F_{Cl} liegt, abhängig von der verwendeten Salzlösung, zwischen 40 und 80. D.h., die Chloridbelastung in der Prüfkammer S_{kammer} ist 40 bis 80 mal so hoch wie die höchste in [ISO9223] beschriebene Chloridbelastung S_{max} . Geht man davon aus, dass S_{max} in einer natürlichen Umgebung nur in seltenen Fällen erreicht wird und bereits deutlich geringere Chloridbelastungen zu einer erhöhten Korrosivität der Atmosphäre führen (siehe hierzu Tabelle 4-4), wird die Aggressivität der Prüfatmosphäre in der Prüfkammer besonders deutlich.

6.1.4 Monitoring der Prüfkammer- und Probentemperatur

Die Einstellung der Prüftemperatur erfolgt über die Klimakammer, in welche die Prüfkammer eingebaut wird (siehe Abbildung 6-1). Die Prüfkammer- und Proben-temperatur wird mit den in Kapitel 5.2.4 beschriebenen Pt100-Sensoren gemessen. Es werden folgende Fragestellungen untersucht:

- Wie lange dauert es, bis sich die gewünschte Prüftemperatur in der Prüfkammer einstellt?
- Weicht die in der Prüfkammer gemessene Temperatur von der in der Klimakammer gemessenen Temperatur ab?
- Wird die Temperatur in der Prüfkammer durch die Zufuhr des Salznebels beeinflusst?

Zuerst wird überprüft, ob die Messwerte der Pt100-Sensoren von der Temperaturanzeige der Klimakammer abweichen. Hierzu werden die Sensoren nicht in der Prüfkammer, sondern direkt in der Klimakammer befestigt. Um die Verfälschung der Messwerte durch örtliche Temperaturschwankungen in der Klimakammer auszuschließen, erfolgt die Befestigung aller Sensoren in der Mitte der Kammer ca. einen halben Meter über dem Kammerboden. Die Aufnahme der Messwerte erfolgt über eine Dauer von einer Stunde bei drei unterschiedlichen Temperaturen.

Die Mittelwerte der gemessenen Temperatur von den Sensoren und der Temperaturanzeige der Prüfkammer sind in Tabelle 6-4 dargestellt. Die mittlere Temperaturabweichung der Sensoren zu der Klimakammer beträgt ca. $\pm 0,3$ °C und liegt somit im Bereich des zulässigen Temperaturfehlers von Pt100-Sensoren der Genauigkeitsklasse B (siehe hierzu Kapitel 5.2.4).

Tabelle 6-4: Mittelwerte der gemessenen Temperaturen der Pt100-Sensoren und der Klimakammer

T_{Kammer} in °C	T_{S1} in °C	T_{S2} in °C	T_{S3} in °C
19,9	19,9	20,1	20,1
35,6	35,5	35,6	35,7
50,2	49,9	50,1	50,1

Anschließend werden die Sensoren in die Prüfkammer eingebaut. Die Prüfkammer-temperatur wird an zwei verschiedenen Stellen der Prüfkammer gemessen. Zur Messung der Probentemperatur wird ein Sensor an der Rückseite einer Blindprobe (Metallblech) angebracht. Die gewünschte Prüftemperatur wird über die Steuerungselektronik der Klimakammer eingestellt. In einem Abstand von dreißig Minuten werden die Messewerte der Sensoren und der Klimakammer notiert und die Werte in ein Diagramm eingetragen. Die Aufnahme der Messwerte erfolgt über einen Zeitraum von insgesamt fünf Stunden. Nachdem die Prüfkammer- und die Probentemperatur die gewünschte Prüftemperatur erreicht haben, wird der Ultraschallvernebler eingeschaltet.

Abbildung 6-9 zeigt den Temperaturverlauf der Klimakammer, der Prüfkammer und der Probe bei einer gewünschten Prüftemperatur von 35°C.

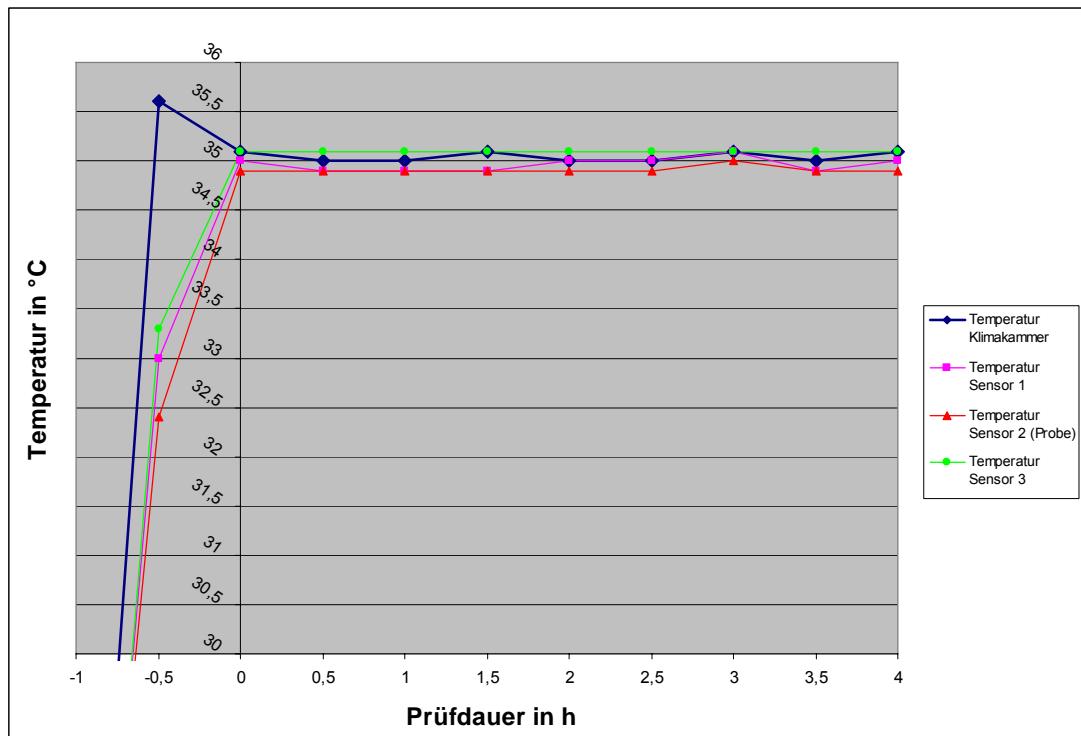


Abbildung 6-9: Temperaturverlauf in der Klimakammer, der Prüfkammer und der Probe bei

$$T_{\text{prüf}} = 35^{\circ}\text{C}$$

Der negative Bereich der Zeitachse stellt die Zeit vor dem Einschalten des Ultraschallverneblers dar. Nach ca. einer Stunde stellt sich die gewünschte Prüftemperatur in der Prüfkammer ein. Es ist zu erkennen, dass sich weder die Prüfkammer- noch die Probentemperatur nach dem Einschalten stark verändern. Die Zufuhr des Salznebels hat auf sie also keinen nennenswerten Einfluss.

Innerhalb der Prüfdauer beträgt die größte Abweichung zwischen der angezeigten Temperatur der Klimakammer und den gemessenen Temperaturen von Prüfkammer und Blindprobe $+0,2^{\circ}\text{C}$. Bei der Durchführung von Korrosionsprüfungen kann also davon ausgegangen werden, dass etwa eine Stunde nach dem Einschalten der Klimakammer die gewünschte Prüftemperatur erreicht ist und über die Dauer der Prüfung konstant bleibt.

Dieselben Messungen wurden für Prüftemperaturen von 20°C und 50°C durchgeführt. Die Diagramme des Temperaturverlaufs und die Tabellen mit den dazugehörigen Messwerten dieser Prüfungen befinden sich im Anhang (siehe Anhang, Seite A-15 - A-17)

6.2 Korrosionsprüfungen mit Gebrauchsnormalen aus Stahl

Mit den Korrosionsprüfungen an Gebrauchsnormalen aus Stahl werden folgende Fragestellungen untersucht:

- Liegt die Korrosivität der Prüfatmosphäre in der Prüfkammer in dem in [ISO9227] geforderten Bereich?
- Wie verändert sich die Korrosivität der Prüfatmosphäre in der Prüfkammer mit der Prüftemperatur?
- Wie verändert sich die Korrosivität der Prüfatmosphäre in der Prüfkammer mit der Konzentration der verwendeten Salzlösung?
- Verläuft die Korrosionsreaktion in der Prüfkammer ähnlich oder genauso wie unter Freibewitterung?

Bei den Gebrauchsnormalen handelt es sich um rechteckige Platten aus reinem, unlegiertem Stahl. Sie besitzen eine Fläche von ca. 70 cm^2 ($100*70\text{mm}^2$) und eine Dicke von ca. 1 mm. Die Oberfläche muss frei von Kratzern, Poren, Verfärbungen und sonstigen Verschmutzungen sein.

Vor der Prüfung wird die Oberfläche der Gebrauchsnormale mit reinem Ethanol gereinigt. Anschließend wird die Masse m_0 mit einer Präzisionswaage bestimmt (Messfehler der Waage: $\pm 0,1 \text{ mg}$). Die Rückseite und die Kanten werden mit wasserfestem Klebeband abgeklebt, damit der Korrosionsangriff nur von einer Seite erfolgen kann. Somit ist es bei der anschließenden Auswertung der Ergebnisse möglich, den Massenverlust auf eine klar definierte Fläche zu beziehen.

In einem ersten Versuch wird überprüft, ob die Korrosivität des Prüfstandes den Anforderungen aus [ISO9227] entspricht. Laut [ISO9227] arbeitet ein Prüfgerät zur Durchführung von Korrosionsprüfungen mit Salznebel dann zufriedenstellend, wenn ein Gebrauchsnormale aus reinem unlegiertem Stahl bei einer Prüfzeit von 48 Stunden und einer Prüftemperatur von 35°C einen Massenverlust (Korrosionsrate) von (70 ± 20) mg/m² erleidet. Die NaCl-Konzentration der verwendeten Salzlösung $c_{\text{Lösung}}$ muss hierbei ca. 5% (entspricht 50 ± 5 g/l) betragen.

Danach werden weitere Prüfungen bei veränderten Prüftemperaturen und Chloridbelastungen durchgeführt, um die Veränderung der Korrosionsrate in Abhängigkeit dieser Parameter nachzuweisen. Abschließend werden die erzielten Veränderungen der Korrosionsrate mit den Ergebnissen, die sich unter Verwendung von Formeln zur Vorausberechnung von atmosphärischer Korrosion ergaben verglichen (siehe Kapitel 6.2.5). Der Vergleich zeigt, ob die ablaufende Korrosionsreaktion in der Prüfkammer einer Korrosionsreaktion unter Freibewitterung entspricht.

6.2.1 Entfernung der Korrosionsprodukte und Ermittlung des Massenverlustes

Um den Massenverlust der Gebrauchsnormale und damit die Korrosionsrate nach der Durchführung der Prüfung zu ermitteln, müssen die gebildeten Korrosionsprodukte von der Oberfläche des Gebrauchsnormals entfernt werden. Das angewandte Verfahren wurde aus der internationalen Norm [ISO8407] entnommen.

Es wird eine Lösung aus Salzsäure und deionisiertem Wasser mit einem Mischverhältnis von 1:1 verwendet. Als Hemmstoff werden einige Gramm Urotropin (Hexamethylentetramin) zugegeben.

Das Gebrauchsnormale wird für etwa fünf Minuten in ein Ultraschallbad mit der Salzsäure-Lösung gegeben und anschließend für etwa zehn Sekunden in deionisiertes Wasser getaucht. Danach wird es mit heißem Wasser gespült und anschließend noch einmal in reines Ethanol getaucht. Hiernach wird es mit einem Heißluftfön getrocknet und dann gewogen. Mit der bekannten Masse des Gebrauchsnormals vor der Prüfung ergibt sich der durch Korrosion verursachte Massenverlust.

Im Idealfall werden durch diese Reinigungsprozedur nur die entstandenen Korrosionsprodukte entfernt. Jedoch wird auch das nichtkorrodierte Metall leicht angegriffen, d.h. der gemessene Gewichtsverlust ist fehlerbehaftet. Um diesen Fehler zu ermitteln, wird die Reinigungsprozedur mehrmals wiederholt, nachdem die Korrosi-

onsprodukte bereits entfernt wurden. So lässt sich der hierdurch entstehende Massenverlust des nicht korrodierten Metalls bestimmen.

Zur Ermittlung und Auswertung der Ergebnisse wurde ein Excel-Tool erstellt. Es kann sowohl zur Auswertung von Prüfungen unter Freibewitterung zur Klassifizierung der Korrosivität einer Atmosphäre nach [ISO9223] als auch zur Bewertung der Korrosivität eines Prüfgerätes nach [ISO9227] angewendet werden. Abbildung 6-10 zeigt die Eingabemaske des Tools. Die Eingabefelder der Eingabemaske sind grau gekennzeichnet.

Messwerte			
Eingabeparameter	Reinigungen	m_i [g]	Δm_i [mg]
m_0 [g] = <input type="text"/>	1	<input type="text"/>	
$t_{\text{prüf}}$ [h] = <input type="text"/>	2	<input type="text"/>	
A_{GB} [m^2] = <input type="text"/>	3	<input type="text"/>	
	4	<input type="text"/>	
	5	<input type="text"/>	
	6	<input type="text"/>	
	7	<input type="text"/>	
	8	<input type="text"/>	
	9	<input type="text"/>	
	10	<input type="text"/>	

Ergebnisse
Δm_{gesamt} [mg] = <input type="text"/>
r_{corr} [g/m^2] = <input type="text"/>
r_{corr} [$\mu\text{m}/\text{a}$] = <input type="text"/>

Abbildung 6-10: Eingabemaske zur Ermittlung des Massenverlustes eines Gebrauchsnormals

Zuerst werden die Eingabeparameter Masse des Gebrauchsnormals vor Beginn der Prüfung m_0 , exponierte Fläche des Gebrauchsnormals A_G sowie die Prüfdauer $t_{\text{prüf}}$ in die dafür vorgesehenen Felder (Eingabeparameter) in der Eingabemaske eingetragen. Anschließend werden die nach jeder Reinigungsprozedur gemessenen Werte der Masse des Gebrauchsnormals m_i in eine Tabelle (Messwerte) eingetragen. Aus diesen Werten wird der jeweilige Massenverlust berechnet. In einem zweiten Tabellenblatt

wird aus allen Werten für Δm_i ein Diagramm zur Ermittlung des korrosionsbedingten Massenverlustes generiert (siehe Abbildung 6-11). In diesem Diagramm wird eine Gerade vom Nullpunkt durch den ersten Wert (Δm_1) gezogen. Durch die restlichen Werte ($\Delta m_2 - \Delta m_n$) wird eine Ausgleichsgerade gezogen. Der Schnittpunkt der beiden Geraden gibt den tatsächlichen, durch Korrosion verursachten Massenverlust (Δm_{gesamt}) des Gebrauchsnormals unter Berücksichtigung des Abtrags des unkorrodierten Metalls durch die Reinigungsprozedur an. Er kann durch Gleichsetzung der beiden Geradengleichungen berechnet werden.

Durch Eingabe des Ergebnisses von Δm_{gesamt} in das entsprechende Feld in der Eingabemaske (Ergebnisse) wird die Korrosionsrate r_{corr} in g/m^2 und $\mu\text{m}/\text{a}$ unter Berücksichtigung der Eingabeparameter berechnet.

In einem dritten Tabellenblatt wird der errechneten Korrosionsrate automatisch die zugehörige Korrosivitätskategorie nach [ISO9223] (siehe Kapitel 4.1) zugeordnet und die untersuchte Atmosphäre somit klassifiziert. Bei der Bewertung der Korrosivität einer Prüfkammer nach [ISO9227] ist dies jedoch weniger wichtig, da die zu erzielende Korrosionsrate jenseits der in [ISO9223] beschrieben Grenzen liegt.

6.2.2 Bewertung der Korrosivität der Prüfkammer nach [ISO9227]

Für die erste Korrosionsprüfung mit Gebrauchsnormalen aus Stahl werden die Betriebsbedingungen - Prüfdauer, Prüftemperatur und Konzentration der Salzlösung - entsprechend den Anforderungen aus [ISO9227] gewählt. Die Entfernung der Korrosionsprodukte von der Oberfläche des verwendeten Gebrauchsnormals erfolgt im Anschluss an die Prüfung, wie in Kapitel 6.2.1 beschrieben.

Abbildung 6-11 zeigt das mit Hilfe des oben beschriebenen Excel-Tools erzeugte Diagramm zur Ermittlung des korrosionsbedingten Massenverlustes.

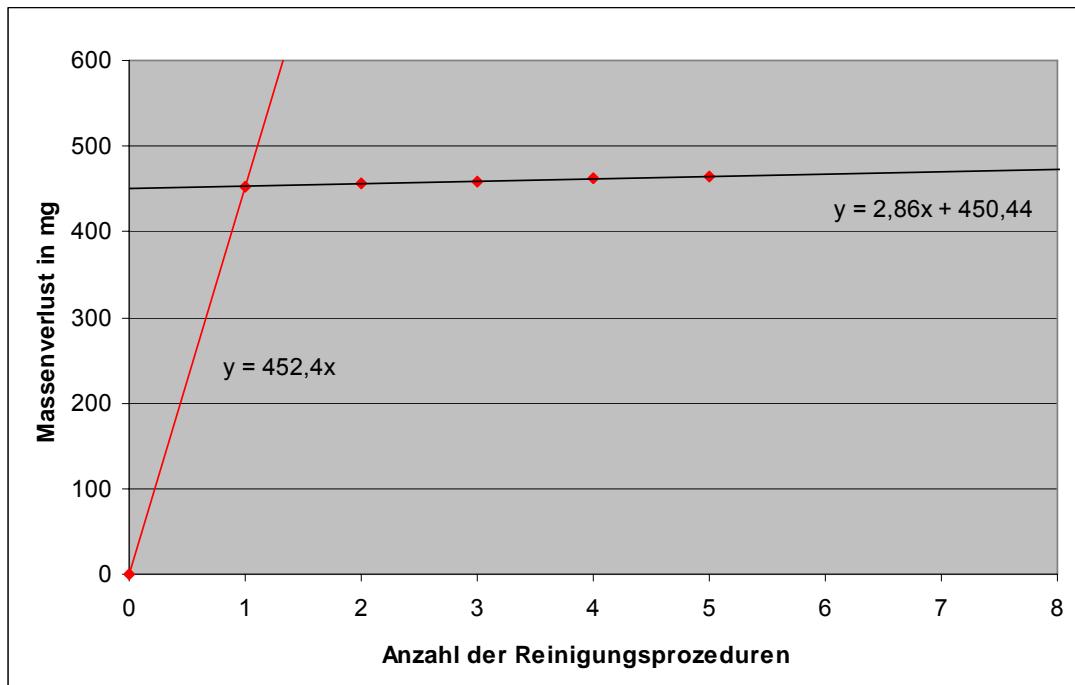


Abbildung 6-11: Diagramm zur Ermittlung des korrosionsbedingten Massenverlustes bei $T_{\text{prüf}} = 35^\circ\text{C}$

Der Massenverlust (Δm_{gesamt}) des Gebrauchsnormals beträgt $64,76 \text{ g/m}^2$. Er liegt somit in dem in [ISO9227] geforderten Bereich von $(70 \pm 20) \text{ g/m}^2$.

6.2.3 Massenverlust in Abhängigkeit der Prüftemperatur

Um den Einfluss der Prüftemperatur auf den Korrosionsverlauf zu ermitteln wurde der Versuch anschließend bei Temperaturen von 20°C und 50°C durchgeführt. Die Ergebnisse der einzelnen Prüfungen sind in Tabelle 6-5 zusammengefasst. Die entsprechenden Diagramme zur Ermittlung des korrosionsbedingten Massenverlustes befinden sich im Anhang (siehe Anhang, Seite A-18 - A-22).

Tabelle 6-5: Massenverlust der Gebrauchsnormale in Abhängigkeit der Prüftemperatur

$T_{\text{prüf}}$ in $^\circ\text{C}$	$c_{\text{Lösung}}$ in %	Massenverlust in g/m^2
20	5	48,42
35	5	64,76
50	5	71,27

Man erkennt, dass die Korrosionsrate mit zunehmender Temperatur exponentiell steigt. In Abbildung 6-12 ist die Zunahme der Korrosionsrate in Abhängigkeit der Prüftemperatur dargestellt. Es wurde angenommen, dass bei einer Temperatur von

0°C keine Korrosion stattfindet. Der Kurvenverlauf ist asymptotisch und nähert sich einem Maximalwert von ca. 80 g/m². Die mit steigender Prüftemperatur schwindende Zunahme der Korrosionsrate kann dadurch bedingt sein, dass das vom Ultraschallvernebler erzeugte Aerosol bei steigender Prüftemperatur schneller trocknet. Wird die Luftfeuchtigkeit in der Prüfkammer verringert, verlangsamt sich die Korrosionsreaktion.

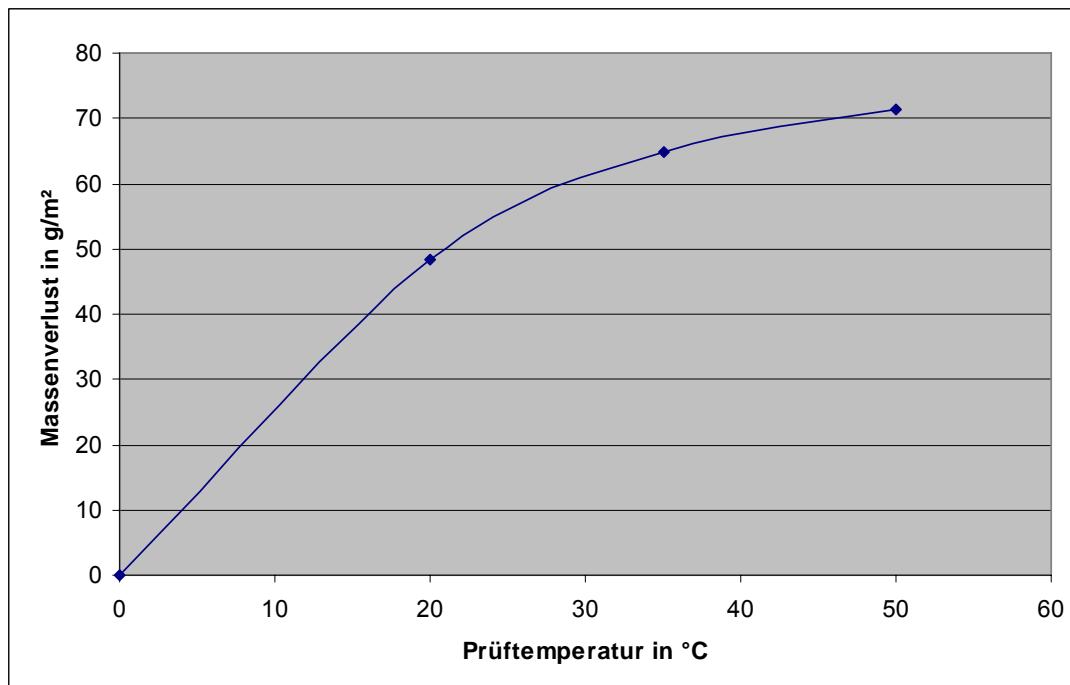


Abbildung 6-12: Massenverlust der Gebrauchsnormale in Abhängigkeit der Prüftemperatur

6.2.4 Massenverlust in Abhängigkeit der Chloridbelastung

Nach Überprüfung des Einflusses der Prüftemperatur auf die Korrosionsrate von Stahl, wird der Einfluss der Chloridbelastung untersucht. Die Prüfzeit beträgt bei allen drei Prüfungen achtundvierzig Stunden, die Prüftemperatur 35°C. Die Ermittlung des korrosionsbedingten Massenverlustes erfolgt wie in Kapitel 6.2.1 beschrieben.

Für die Prüfungen werden drei Salzlösungen mit unterschiedlicher NaCl-Konzentration verwendet. Da der Salzgehalt von Meerwasser bei ca. 3,5 % liegt, wird für die erste Prüfung eine Salzlösung mit entsprechender Konzentration (35 g/l) verwendet. Der Massenverlust bei Verwendung einer 5%igen Salzlösung (50 g/l) wurde bereits im vorangegangenen Kapitel ermittelt, weshalb der Versuch nicht noch einmal wiederholt wird. Eine weitere Prüfung wird mit einer 7%igen Salzlösung (ca. 70 g/l) durchgeführt.

In Tabelle 6-6 sind die ermittelten Werte für den Massenverlust der Gebrauchsnormale in Abhängigkeit der Konzentration der verwendeten Salzlösungen dargestellt:

Tabelle 6-6: Massenverlust der Gebrauchsnormale in Abhängigkeit der Konzentration der Salzlösung

$T_{\text{prüf}}$ in °C	$c_{\text{Lösung}}$ in %	Massenverlust in g/m ²
35	3,5%	64,32
35	5,0%	64,76
35	7,0%	68,23

Es ist kein nennenswerter Anstieg des Massenverlustes in Abhängigkeit der verwendeten Salzlösungen zu erkennen. Dies liegt daran, dass die Chloridbelastung bereits bei der Verwendung einer 3,5%igen Salzlösung sehr hoch ist (sie hierzu Kapitel 6.1.2, Abbildung 6-7). Eine weitere Steigerung der Chloridbelastung kann den Korrosionsverlauf nicht mehr nennenswert beschleunigen. In Abbildung 6-13 sind die Ergebnisse der Prüfungen graphisch dargestellt.

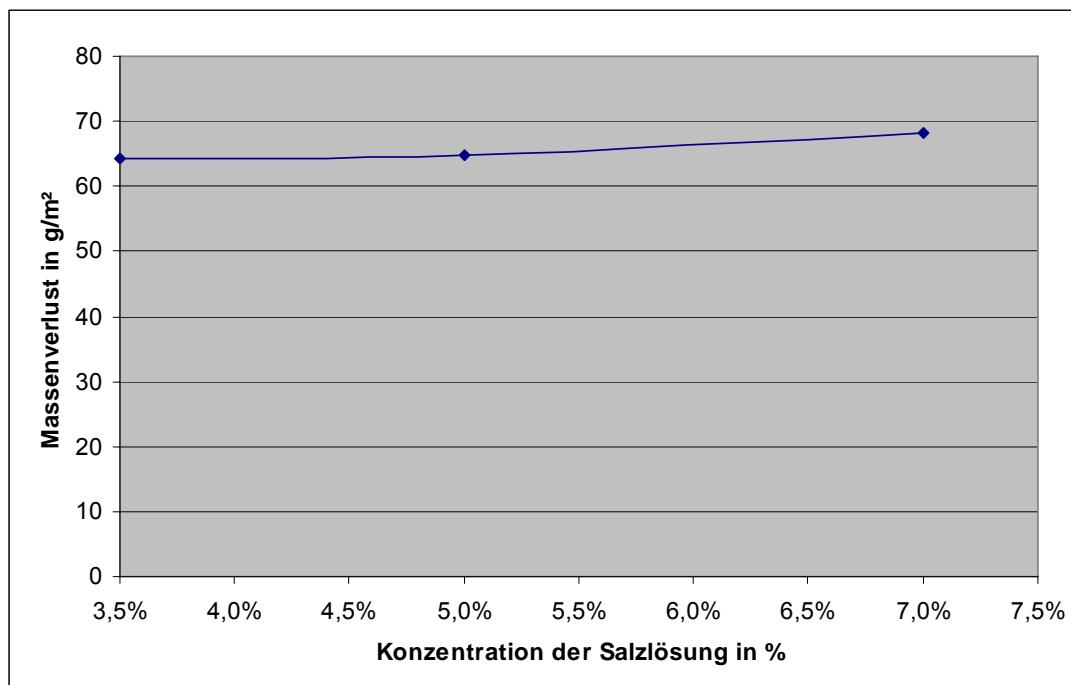


Abbildung 6-13: Massenverlust der Gebrauchsnormale in Abhängigkeit der Konzentration der Salzlösung

6.2.5 Vergleich der Korrosionsreaktionen in der Prüfkammer und unter Freibewitterung

Anhand der Richtlinien aus [ISO9223] wurden Gleichungen entwickelt, mit denen sich die Korrosionsraten von Stahl, Zink, Kupfer und Aluminium in Abhängigkeit von vier berücksichtigten Parametern Temperatur T , Dauer der Feuchtigkeit τ und der Belastung durch $\text{SO}_2 P$ bzw. Chlorid S voraus berechnen lassen [Tid02].

Das Ergebnis gibt die Korrosionsrate r_{corr} in $\mu\text{m/a}$ an (siehe hierzu Kapitel 4.1.1). Eine genaue Vorhersage der Korrosionsrate ist anhand der Formeln nicht möglich, da der Vorgang der atmosphärischen Korrosion auch von anderen Parametern (z.B. Wind, UV-Strahlung) beeinflusst wird, welche in der Berechnung nicht berücksichtigt werden. In Labortests kann der Einfluss dieser Parameter zwar ausgeschlossen werden, jedoch liegt die Chloridbelastung bei beschleunigten Korrosionsprüfungen außerhalb des Geltungsbereiches der Gleichungen [Tid02].

Mit Formel (17) kann die Korrosionsrate von Stahl unter Einfluss der genannten Parameter berechnet werden. Um den Einfluss der Temperatur T und der Chloridbelastung S zu berechnen und mit den Ergebnissen aus Kapitel 6.2.3 und 6.2.4 zu vergleichen, werden verschiedene Werte für T und S in die Formel eingesetzt. Die Dauer der Feuchtigkeit τ wird konstant zu 90% angenommen. Da der Einfluss von SO_2 in dieser Arbeit nicht betrachtet wird, wird P bei den Berechnungen gleich Null gesetzt. Im Anhang befinden sich die Tabellen mit den Werten, die zur Berechnung in Formel (17) eingesetzt wurden (siehe Anhang, Seite A-23).

$$r_{\text{corr}}(\text{Stahl}) = 0,085 * P^{0,56} * \tau^{0,53} * e^{f_{\text{stahl}}} + 0,24 * S^{0,47} * \tau^{0,25} * e^{0,049 * T}$$

$$f_{\text{stahl}} = 0,098 * (T - 10) \quad \text{wenn } T \leq 10^\circ\text{C} \quad \text{sonst} \quad = -0,087 * (T - 10) \quad (17)$$

In Abbildung 6-14 ist die berechnete Korrosionsrate in Abhängigkeit der Chloridbelastung S bei einer Temperatur von 35°C dargestellt. Man erkennt, dass die Kurve mit steigenden Werten für S flacher wird. Es ist also anzunehmen, dass ab einer bestimmten Chloridbelastung kein nennenswerter Zuwachs der Korrosionsrate mehr zu verzeichnen wird. Diese Annahme wird durch die Ergebnisse der Prüfungen zur Ermittlung des Massenverlustes von Gebrauchsnormalen aus Stahl in Abhängigkeit der Chloridbelastung (siehe Kapitel 6.2.4) bekräftigt.

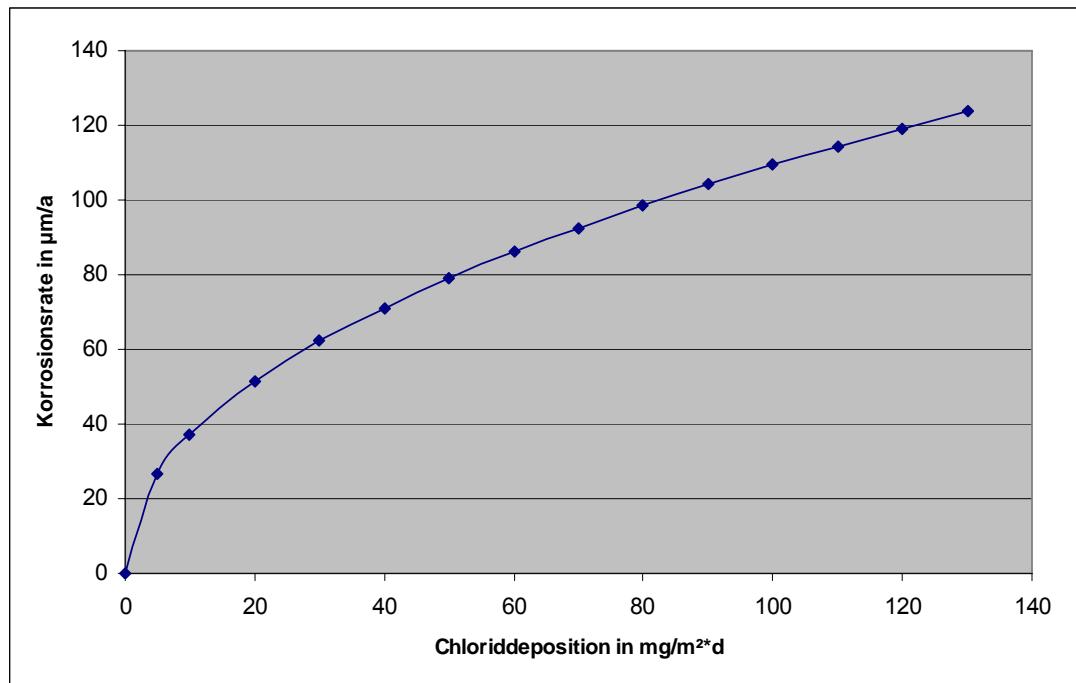


Abbildung 6-14: Berechnete Korrosionsrate von Stahl in Abhängigkeit der Chloridbelastung S

In Abbildung 6-15 ist die Korrosionsrate von Stahl in Abhängigkeit der Temperatur bei einer Chloridbelastung von $1 \text{ mg/m}^2\text{d}$ dargestellt. Man erkennt, dass die Kurve exponentiell ansteigt und mit zunehmender Temperatur steiler wird. Die Ergebnisse der Prüfungen zur Ermittlung des Massenverlustes von Gebrauchsnormalen aus Stahl in Abhängigkeit der Prüftemperatur (siehe Kapitel 6.2.3) zeigen dagegen einen abflachenden Kurvenverlauf. Allerdings wurde bei der Berechnung nicht angenommen, dass sich die Dauer der Feuchtigkeit mit steigender Temperatur verringert.

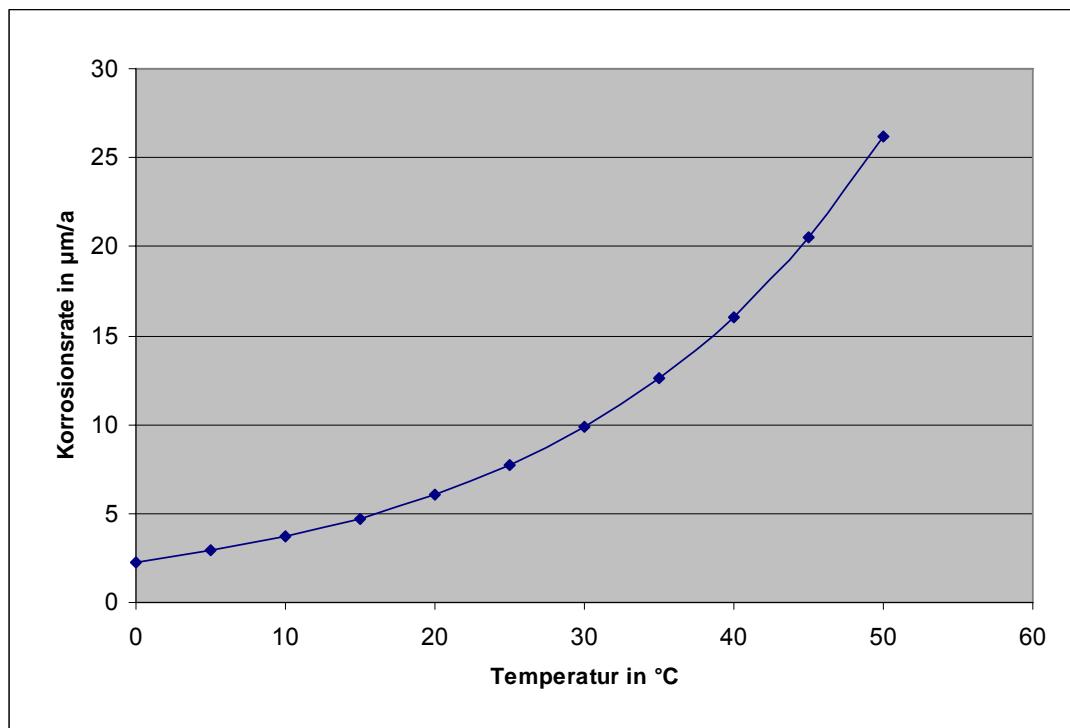


Abbildung 6-15: Berechnete Korrosionsrate von Stahl in Abhängigkeit der Temperatur T

Die berechneten Zunahmen der Korrosionsrate in Abhängigkeit der Temperatur und der Chloridbelastung unterscheiden sich von den experimentell ermittelten Werten. Jedoch wird bei der Betrachtung deutlich, dass die Korrosivität der Prüfkammer nicht durch die Verwendung einer höher konzentrierten Salzlösung erzielt werden kann, sondern eher durch eine Steigerung der Prüftemperatur. Vergleicht man die Kurvenverläufe aus Abbildung 6-14 und Abbildung 6-15 wird diese Annahme bestätigt.

6.3 Betriebsbedingungen des kalibrierten Prüfstandes

Die wesentlichen Anforderungen aus [ISO9227] werden von dem Prüfstand erfüllt. Die geforderte durchschnittliche Auffangmenge der Salzlösung und die Korrosivität der Prüfkammer liegen innerhalb der geforderten Bereiche. Die Prüftemperatur kann über die Klimakammer eingestellt werden und verändert sich nicht durch die Zufuhr des Salznebels. Obwohl das Kamervolumen deutlich geringer als $0,4 \text{ m}^3$ ist, sind die Verteilung des Salznebels und die örtliche Chloridbelastung in der Prüfkammer sehr gleichmäßig. Außerdem können die Proben so platziert werden, dass sie nicht direkt vom Salznebel besprührt werden.

In Tabelle 6-7 sind die wichtigsten Anforderungen aus [ISO9227] den Betriebsbedingungen des kalibrierten Prüfstandes gegenübergestellt:

Tabelle 6-7: Betriebsbedingungen des kalibrierten Prüfstandes und Anforderungen aus [ISO9227]

Anforderung	ISO 9227	Prüfstand	Erfüllt
Durchschnittliche Auffangmenge bei einer horizontalen Auffangfläche von 80 cm ²	(1,5 ± 0,5) ml/h	~ 1,07 ml/h	✓
Prüftemperatur	(35 ± 2) °C	(35 ± 0,3) °C	✓
Zufuhr des Salznebels	kein direktes Besprühen der Proben	Proben werden nicht direkt besprüht	✓
Örtliche Verteilung des Salznebels in der Prüfkammer	gleichmäßig	gleichmäßig	✓
Massenverlust eines Gebrauchsnormals aus Stahl nach 48h bei 35°C	(70 ± 20) g/m ²	64,76 g/m ²	✓
Material der Prüfkammer	chemisch beständig	Glas	✓
Prüfkammervolumen	≥ 0,4 m ³	~ 0,064 m ³	✗

7 Korrosionsprüfungen an ausgewählten Komponenten von Solaranlagen

Nachdem die Betriebsbedingungen in den vorangegangenen Prüfungen ermittelt bzw. eingestellt wurden, werden abschließend Korrosionsprüfungen an ausgewählten Komponenten von PV-Modulen und Solarkollektoren durchgeführt. Folgende Materialien werden untersucht:

- *Thermische Solaranlagen*: Selektive Absorber, CPC-Spiegel und farbige Solarabsorber zur dekorativen Gestaltung von Gebäudefassaden und Dächern
- *Photovoltaikanlagen*: Silicium-Solarzellen, Kontaktbänder zur elektrischen Verschaltung der einzelnen Solarzellen und eine Anschlussdose

7.1 Komponenten von thermischen Solaranlagen

7.1.1 Beschreibung der Komponenten

Es werden insgesamt fünf verschiedene Materialien getestet. Bei den Proben handelt es sich um zwei selektiv beschichtete Solarabsorber, zwei farbige Absorberschichten zur dekorativen Gestaltung von Gebäudefassaden und Dächern und einen Reflektor (CPC-Spiegel) zur Verbesserung der Effizienz von Röhrenkollektoren. In Tabelle 7-1 sind Hersteller, Bezeichnung sowie Material und Funktion der Proben angegeben:

Tabelle 7-1: Untersuchte Proben aus thermischen Solaranlagen

Probe	Funktion	Material
1	selektiver Solarabsorber	Kupfer (Basis-Material)
2	selektiver Solarabsorber	Aluminium (Basis-Material)
3	Reflektor (CPC-Spiegel)	Aluminium
4	Farbiger Solarabsorber zur dekorativen Gestaltung von Gebäudefassaden	Stahl/Magnesium/ Alkyd-Melanin-Harz
5	Farbiger Solarabsorber zur dekorativen Gestaltung von Gebäudefassaden	Stahl/Aluminium/ Polyurethan

Mit Ausnahme von Probe 1 handelt es sich bei allen Proben um Materialien, die laut Herstellerangaben über eine hohe Korrosionsbeständigkeit verfügen und für den Einsatz in korrosiven Atmosphären geeignet sind.

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt über die Bestimmung des solaren Absorptionsgrad α_{str} und des thermischen Emissionsgrad ϵ_{str} . Sie werden indirekt über Messungen des spektralen hemisphärischen Reflexionsgrades ρ_{str} für nahezu senkrechte Einstrahlung (8° zur Probennormalen) im Wellenlängenbereich $0,33 \mu\text{m}$ bis $17 \mu\text{m}$ bestimmt. Hierzu wird ein *Fourier-Spektrometer IFS 66* der Firma *Bruker* verwendet. Die Vermessung erfolgt zuerst im ungealterten Zustand und anschließend nach jeder Prüfung. So lässt sich später erkennen, wie sich die Degradation durch den Salznebel auf die optischen Eigenschaften der Materialien auswirkt.

In Abbildung 7-1 sind die gemessenen Spektren aller Proben im ungealterten Zustand dargestellt. Man erkennt deutlich die selektiven Eigenschaften von Probe 1 und Probe 2. Sie besitzen im Wellenlängenbereich bis $2 \mu\text{m}$ einen sehr niedrigen Reflexionsgrad ρ (also einen hohen Absorptionsgrad α), welcher hin zu größeren Wellenlängen stark zunimmt. Probe 1 besitzt bereits bei Wellenlängen über $5 \mu\text{m}$ einen Reflexionsgrad über 90%, wirkt in diesem Bereich also fast wie ein Reflektor. Deutlich wird dies, wenn man den Kurvenverlauf mit dem von Probe 3 (CPC-Spiegel) vergleicht.

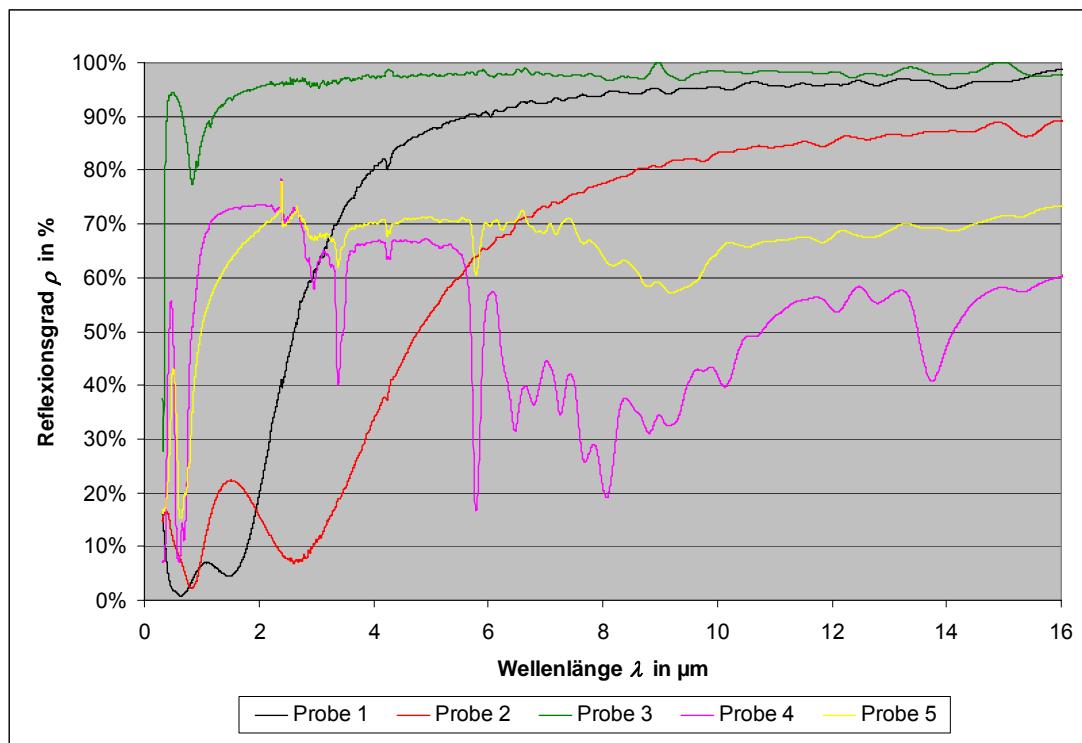


Abbildung 7-1: Gemessene Reflexionsspektren der Proben im ungealterten Zustand

In Tabelle 7-2 sind die optischen Eigenschaften der Proben laut Datenblatt der Hersteller (soweit vorhanden) und den Ergebnissen der durchgeführten Spektralvermessungen dargestellt. Die gemessenen Werte stimmen mit den Werten aus den Datenblättern weitestgehend überein.

Tabelle 7-2: Gemessene optische Werte der Proben und optische Werte laut Herstellerangaben

	Gemessen		Datenblatt	
	α	ε	α	ε
Probe 1	95,40%	5,30%	$(95 \pm 2)\%$	$(5 \pm 2)\%$
Probe 2	89,70%	20,60%	$(90 \pm 2)\%$	$(20 \pm 5)\%$
Probe 3	11,50%	2,00%	$< 11\%$	-
Probe 4	57,50%	52,60%	-	-
Probe 5	63,00%	32,70%	-	-

Interessant ist vor allem der Vergleich der Proben 1 und 2, da es sich bei beiden um Solarabsorber mit selektiver Beschichtung zum Einsatz in Flach- und Röhrenkollektoren handelt.

toren handelt. Probe 2 wurde speziell für den Einsatz in maritimen Gebieten entwickelt und besitzt laut Herstellerangaben eine hohe Beständigkeit gegen Salzwasser. Die optischen Werte sind dafür etwas schlechter als die von herkömmlichen selektiven Solarabsorbern, wie Probe 1. Vor allem der Emissionsgrad liegt bei Probe 2 mit ca. 20% deutlich höher als bei Probe 1. Grundsätzlich ist die Effizienz dieses Absorbers also geringer. Die Ergebnisse der Salznebelprüfungen werden zeigen, ob die optischen Werte der beiden Proben stabil bleiben oder ob sie sich stark verändern.

In Abbildung 7-2 ist noch einmal eine andere Darstellung der optischen Eigenschaften von Probe 1 und 2 gewählt. Sie gleicht Abbildung 2-5 aus Kapitel 2.2.1. Aufgetragen ist der Absorptionsgrad α_{str} der Proben über der Wellenlänge λ . Berechnet wird α_{str} aus den gemessenen Werten für den Reflexionsgrad ρ_{str} mit Formel (18), unter der Annahme, dass der Transmissionsgrad τ für die Materialien = 0 ist.

$$1 - \rho_{str}(\lambda) = \alpha_{str}(\lambda) \quad (18)$$

Auch in dieser Darstellung ist deutlich zu erkennen, dass sowohl der Absorptions- als auch der Emissionsgrad von Probe 1 im ungealterten Zustand besser ist als von Probe 2.

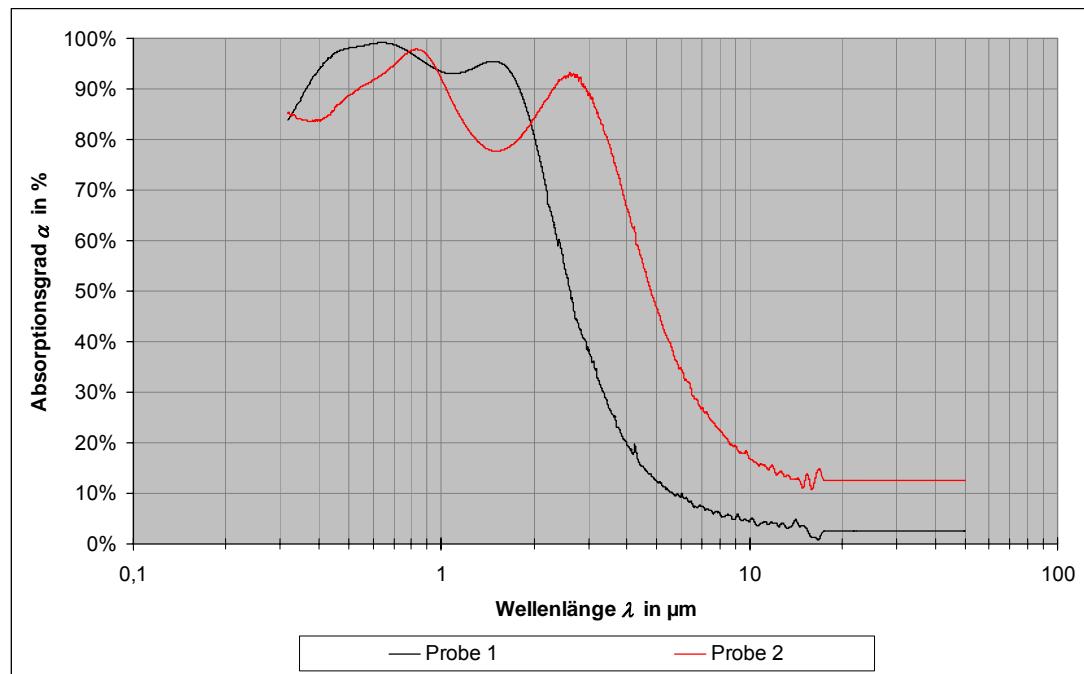


Abbildung 7-2: Absorptionsgrad von Probe 1 und 2 in Abhängigkeit der Wellenlänge

Bei genauer Betrachtung der Abbildung erkennt man, dass der Verlauf des Absorptionsgrades von Probe 1 dem in Abbildung 2-5 dargestellten Verlauf eines idealen Solarabsorbers bereits sehr nahe kommt (siehe Kapitel 2.2.1).

Die Prüfungen an den verschiedenen Proben werden jeweils bei 20°C, 35°C und 50°C durchgeführt. Die Prüfzeit wird schrittweise erhöht. So lässt sich bei der Auswertung der Einfluss der Temperatur mit dem Einfluss der Prüfzeit vergleichen.

Die Auswertung der Ergebnisse der Korrosionsprüfungen mit den Gebrauchsnormalen aus Stahl hat gezeigt, dass sich eine Veränderung der NaCl-Konzentration der verwendeten Salzlösung nicht wesentlich auf die Korrosivität der Prüfatmosphäre auswirkt. Deshalb wird gemäß den Anforderungen aus [ISO9227] für alle Prüfungen eine 5%ige Salzlösung verwendet.

7.1.2 Korrosionsverhalten der geprüften Komponenten

Die Bewertung des durch die Salznebelprüfungen verursachten Korrosionsschadens an den verschiedenen Proben erfolgt zuerst visuell. Schon nach einer Prüfdauer von vier Stunden ist zu erkennen, dass die selektive Schicht von Probe 1 leichte Degradationserscheinungen aufweist. Bei den anderen Proben ist mit dem bloßen Auge keine Veränderung der Oberfläche zu erkennen.

Nach einer Prüfdauer von zwölf Stunden sind starke Korrosionsschäden an Probe 1 zu erkennen. An einigen Stellen der Oberfläche ist die selektive Schicht komplett wegkorrodiert und das Basismaterial (Kupfer) ist zu erkennen.

Nach einer Prüfdauer von vierundzwanzig und achtundvierzig Stunden ist an einigen dieser Stellen bereits das typische Grün einer Kupferpatina zu sehen, welche sich in Folge von Kupferkorrosion bildet. Der Korrosionsangriff hat sich also auf das Basismaterial ausgeweitet.

Abbildung 7-3 zeigt Fotos von Probe 1 nach den Prüfungen. Betrachtet man die einzelnen Bilder von links nach rechts, erkennt man den zunehmenden Korrosionsfortschritt mit steigender Prüfdauer. Betrachtet man die einzelnen Bilder von oben nach unten erkennt man den Einfluss der Prüftemperatur auf den Korrosionsfortschritt der Proben.

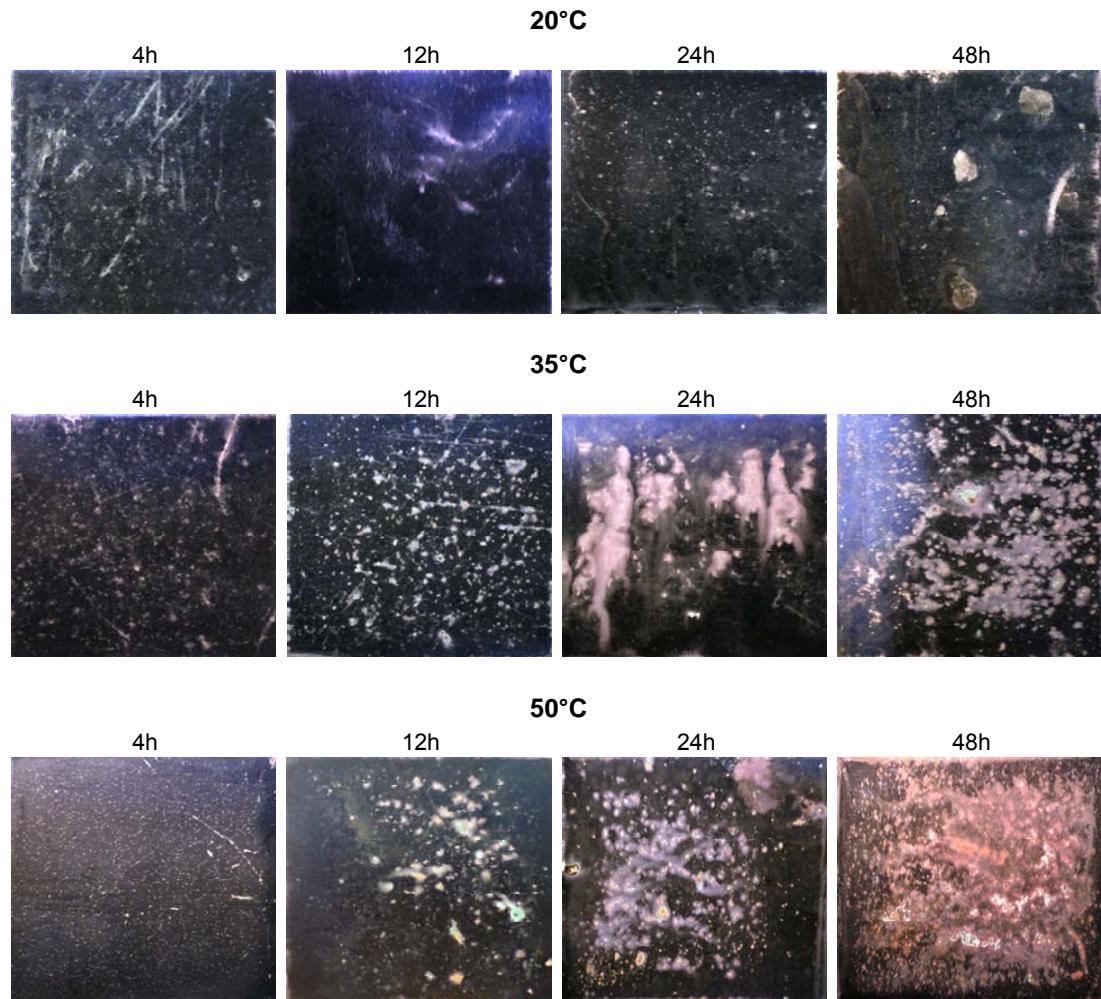


Abbildung 7-3: Korrosionsfortschritt von Probe 1 in Abhängigkeit der Prüfdauer und –temperatur

Es wird deutlich, dass die Temperatur einen erheblichen Einfluss auf die Korrosion von Probe 1 hat. Nach einer Prüfdauer von achtundvierzig Stunden bei einer Temperatur von 50°C ist die selektive Beschichtung fast komplett verschwunden.

Eine Veränderung bzw. Beschädigung der Oberfläche ist bei den anderen Proben auch nach Prüfzeiten von achtundvierzig Stunden mit bloßem Auge nicht zu erkennen. Deshalb wurde an dieser Stelle auf eine Abbildung der Proben verzichtet.

Nach der visuellen Begutachtung der Proben erfolgt die erneute Vermessung des Reflexionsspektrums um zu sehen, wie sich die Prüfungen auf die optischen Eigenschaften der Materialien auswirken. Abbildung 7-4 bis Abbildung 7-8 zeigen die gemessenen Reflexionsspektren der untersuchten Proben.

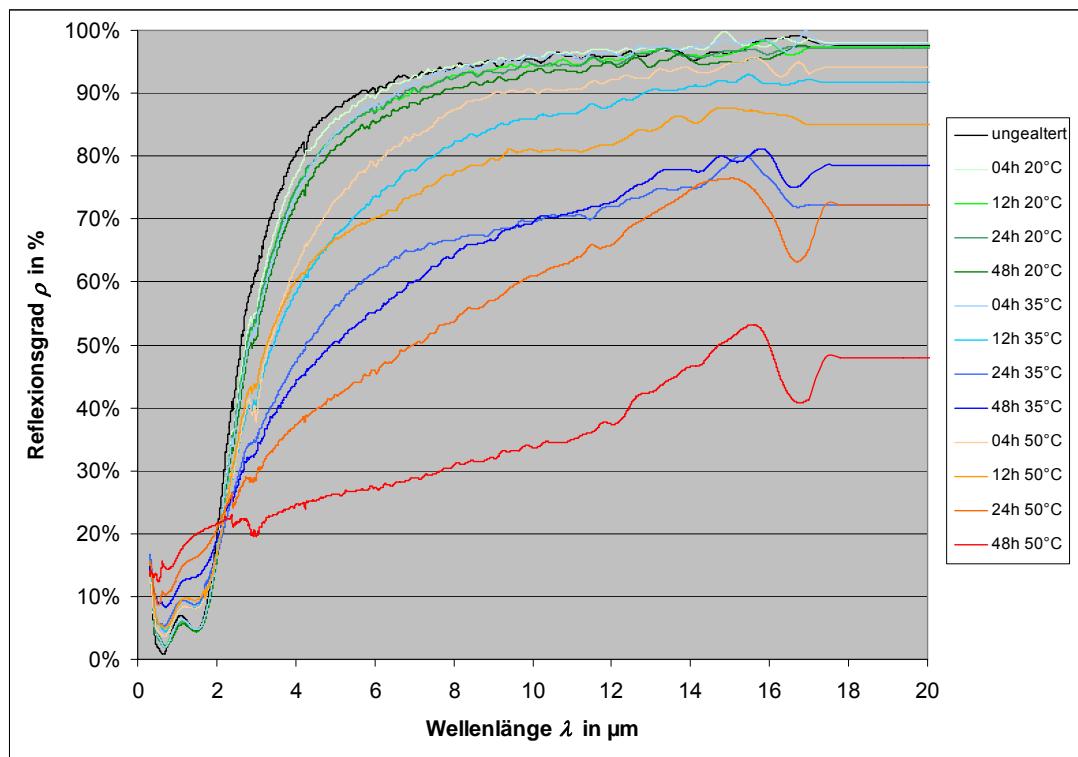


Abbildung 7-4: Veränderung des Reflexionsspektrums von Probe 1 in Abhängigkeit der Prüfdauer und der Prüftemperatur

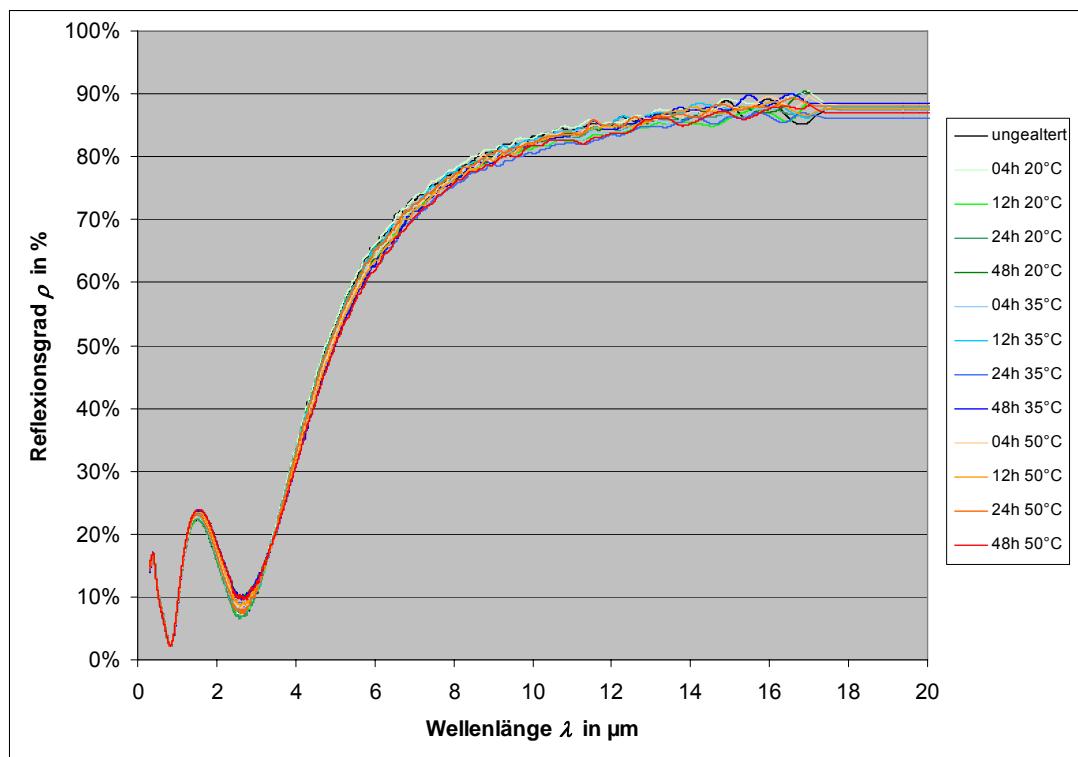


Abbildung 7-5: Veränderung des Reflexionsspektrums von Probe 2 in Abhängigkeit der Prüfdauer und der Prüftemperatur

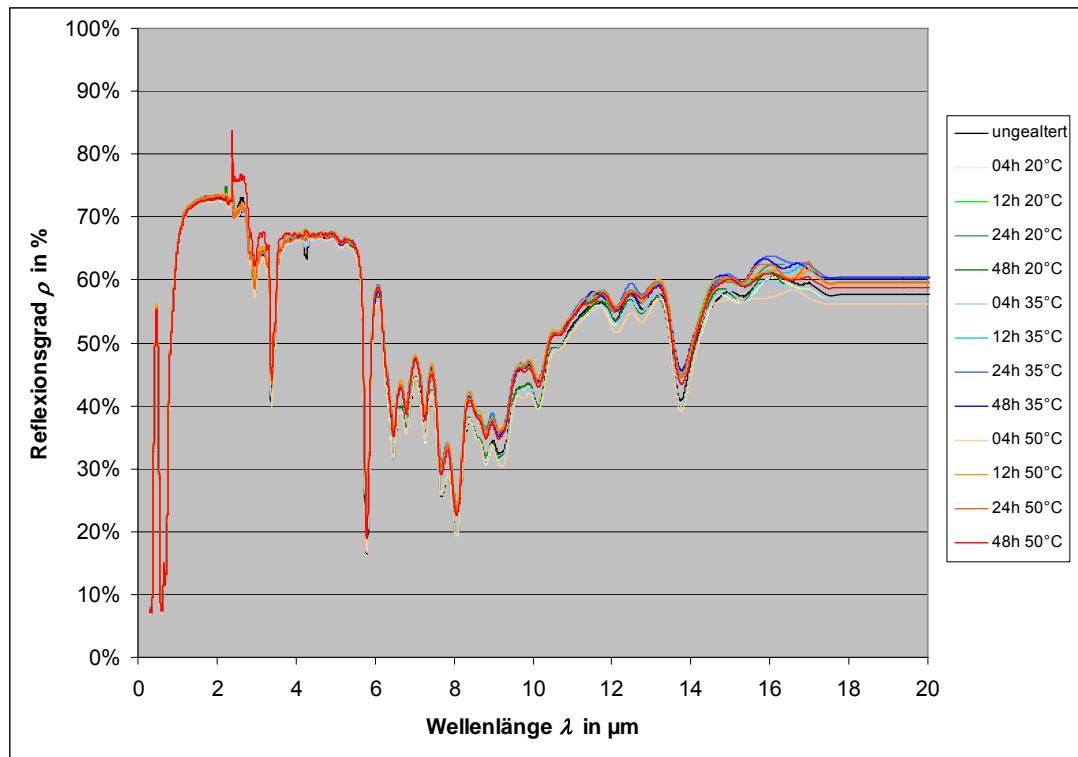


Abbildung 7-6: Veränderung des Reflexionsspektrums von Probe 3 in Abhängigkeit der Prüfdauer und der Prüftemperatur

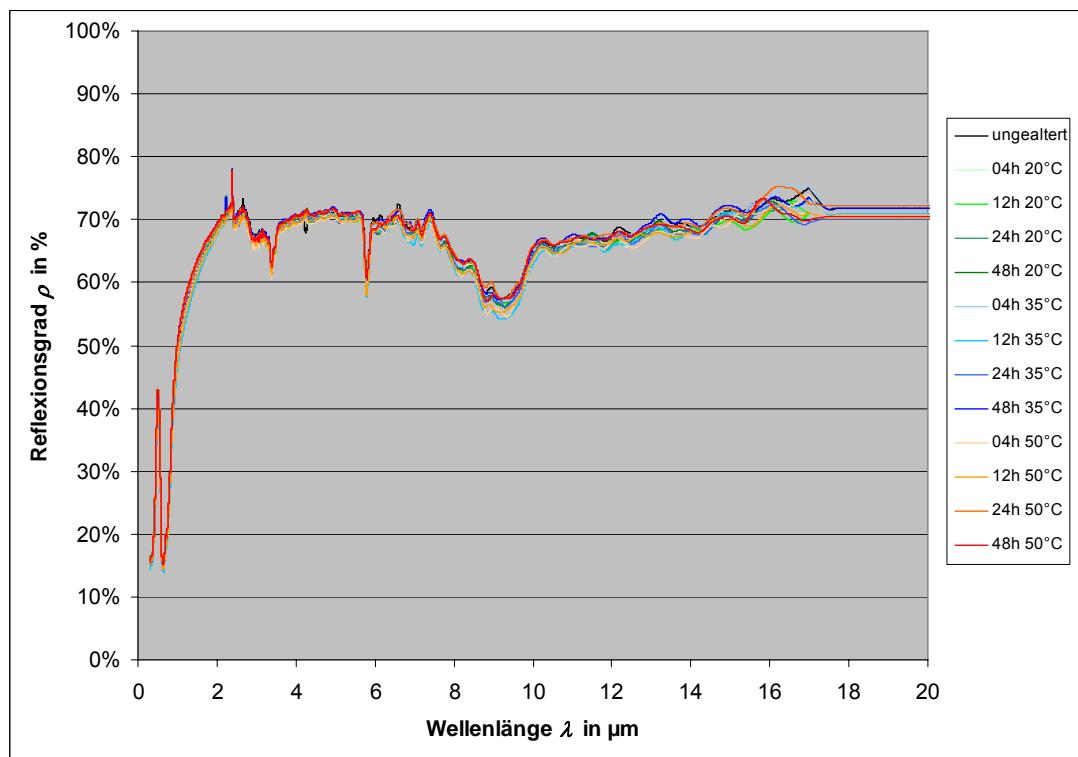


Abbildung 7-7: Veränderung des Reflexionsspektrums von Probe 4 in Abhängigkeit der Prüfdauer und der Prüftemperatur

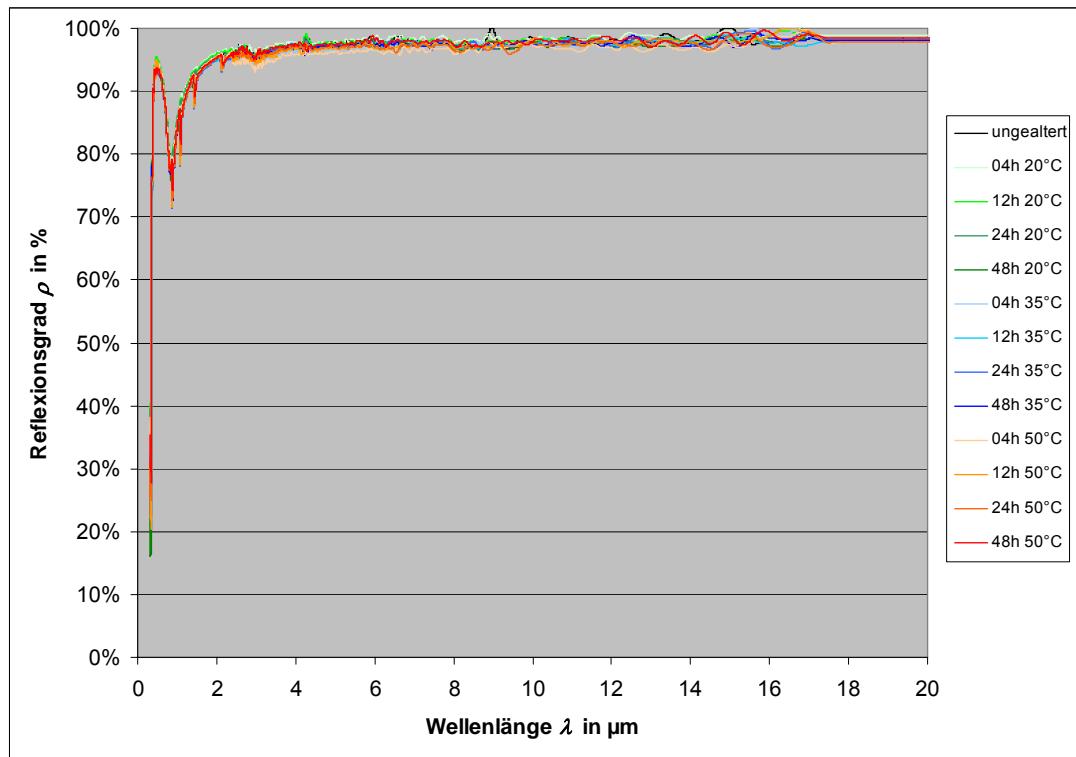


Abbildung 7-8: Veränderung des Reflexionsspektrums von Probe 5 in Abhängigkeit der Prüfdauer und der Prüftemperatur

Es ist zu erkennen, dass sich nur die optischen Eigenschaften von Probe 1 stark verändert haben. Vor allem der thermische Emissionsgrad ε_{str} nimmt in Folge der Belastung durch die Prüfungen stark zu. Der Absorptionsgrad α hingegen sinkt nur leicht und bleibt auch nach der höchsten Belastungsstufe ($t_{\text{prüf}} = 48\text{h}$, $T_{\text{prüf}} = 50^\circ\text{C}$) weit über 80%. Die Korrosion durch Salznebel hat also vor allem negative Auswirkungen auf die selektiven Eigenschaften des Absorbers und weniger auf sein generelles Absorptionsvermögen.

Interessant ist, dass die Beschädigung des Absorbers bei Prüftemperaturen über 20°C stark zunimmt. Die Prüfungen bei 20°C führten unabhängig von der gewählten Prüfdauer zu keiner nennenswerten Veränderung von α_{str} und nur zu einer geringfügigen Veränderung von ε_{str} . Die Prüftemperatur hat also einen erheblichen Einfluss auf die Degradation von Probe 1.

In Tabelle 7-3 finden sich die ermittelten Werte des Absorptionsgrades und des Emissionsgrades von Probe 1 in ungealtertem Zustand und nach den jeweiligen Prüfungen.

Tabelle 7-3: Absorptions- und Emissionsgrad von Probe 1 im ungealterten Zustand und nach den jeweiligen Prüfungen

$t_{\text{prüf}}$ in h	$T_{\text{prüf}} = 20^\circ\text{C}$		$T_{\text{prüf}} = 35^\circ\text{C}$		$T_{\text{prüf}} = 50^\circ\text{C}$	
	α_{str}	ε_{str}	α_{str}	ε_{str}	α_{str}	ε_{str}
0	95,40%	5,30%	95,40%	5,30%	95,40%	5,30%
4	95,00%	5,20%	94,80%	5,80%	93,60%	11,40%
12	95,00%	7,80%	92,90%	15,30%	92,30%	21,80%
24	95,10%	7,90%	92,30%	32,10%	88,00%	38,50%
48	95,00%	9,30%	89,40%	30,80%	84,70%	62,40%

Die Veränderung von α_{str} und ε_{str} ist in Abbildung 7-9 abhängig von der Prüftemperatur und der Prüfdauer dargestellt. In dieser Darstellung ist besonders gut zu erkennen, dass sich die optischen Eigenschaften der Probe durch die Prüfungen bei 20°C kaum, durch die Prüfungen bei 35°C und 50°C jedoch stark verändern.

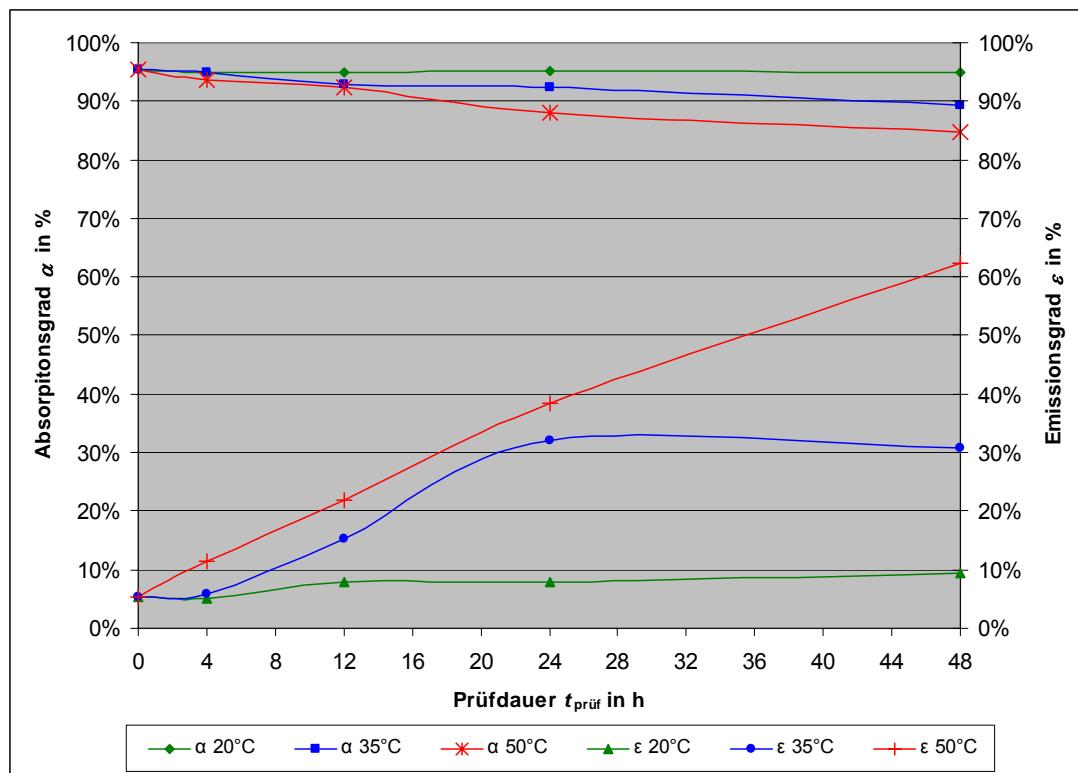


Abbildung 7-9: Veränderung der optischen Eigenschaften von Probe 1 in Abhängigkeit der Prüfdauer und der Prüftemperatur

7.2 Komponenten von Photovoltaikmodulen

7.2.1 Beschreibung der Komponenten

Zuerst werden Prüfungen an Silicium-Solarzellen und Kontaktbändern durchgeführt. Sie werden der Prüfatmosphäre ungeschützt ausgesetzt um zu sehen wie sie sich generell gegenüber einer salzhaltigen Atmosphäre verhalten. Bei den Solarzellen handelt es sich um quadratische Probezellen mit einer Fläche von ca. 64 cm². Die Kontaktbänder bestehen aus Kupfer und sind mit einer Legierung aus Zinn, Silber und Blei überzogen.

Die Prüfungen werden bei einer Prüftemperatur von 35°C und einer Prüfdauer von achtundvierzig Stunden durchgeführt. Die Konzentration der verwendeten Salzlösung beträgt 5%. Die Bewertung der Ergebnisse erfolgt visuell, durch Betrachtung der Proben unter einem Lichtmikroskop.

Anschließend erfolgt eine Prüfung an einer Anschlussdose um zu sehen, ob Salz ins Innere der Dose eindringen kann. Die Anschlussdose besitzt nach Herstellerangaben eine hohe Beständigkeit gegen Witterungseinflüsse und UV-Strahlung sowie einen guten Schutz gegen das Eindringen von Fremdstoffen aus der Atmosphäre.

Die Prüfung erfolgt bei einer Prüftemperatur von 35°C, ebenfalls für achtundvierzig Stunden. Die Rückseite der Anschlussdose wird mit einer handelsüblichen TPT-Rückseitenfolie (siehe hierzu Kapitel 2.1.2) beklebt.

Abbildung 7-10 zeigt die Anschlussdose und die Solarzelle mit den Kontaktbändern im ungealterten Zustand.

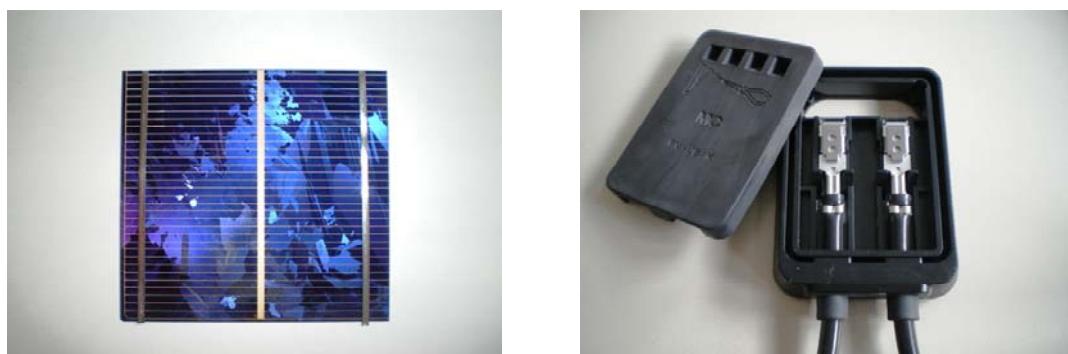


Abbildung 7-10: Silicium-Solarzelle mit Kontaktbändern und Anschlussdose mit Frontabdeckung

7.2.2 Korrosionsverhalten der geprüften Komponenten

An den Solarzellen zeigen sich nach den Prüfungen Spuren an der Oberfläche, die auf die Belastung mit salzhaltiger Luft zurückzuführen sind. Vor allem am Rand der

Zellen haben sich „Schlieren“ und Verfärbungen gebildet. Abbildung 7-11 zeigt eine Aufnahme der betroffenen Stellen (links). Zum Vergleich wurde ein ungealterte Zelle daneben gelegt (rechts).

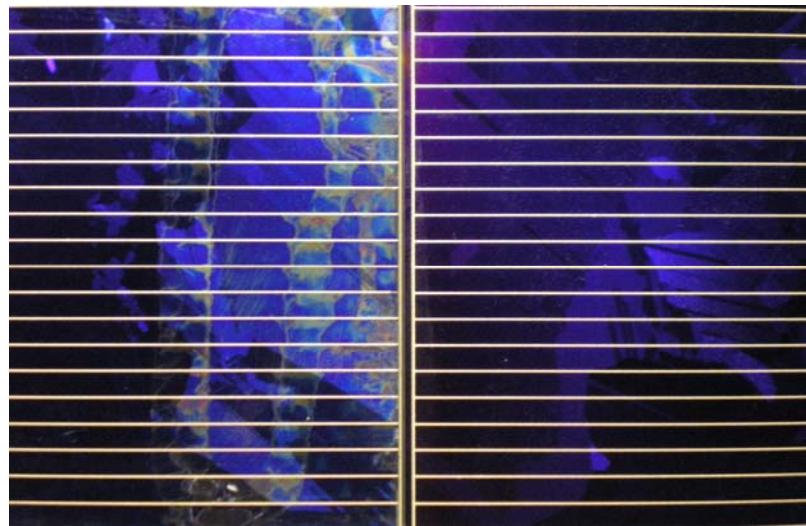


Abbildung 7-11: Solarzelle im gealterten (links) und ungealterten (rechts) Zustand

Bei der Betrachtung der betroffenen Stellen unter dem Lichtmikroskop zeigt sich eine erhöhte Lichtreflexion (siehe Abbildung 7-12). Das Lichtabsorptionsvermögen ist an diesen Stellen also verringert, was sich negativ auf den Wirkungsgrad der Zelle auswirken kann.

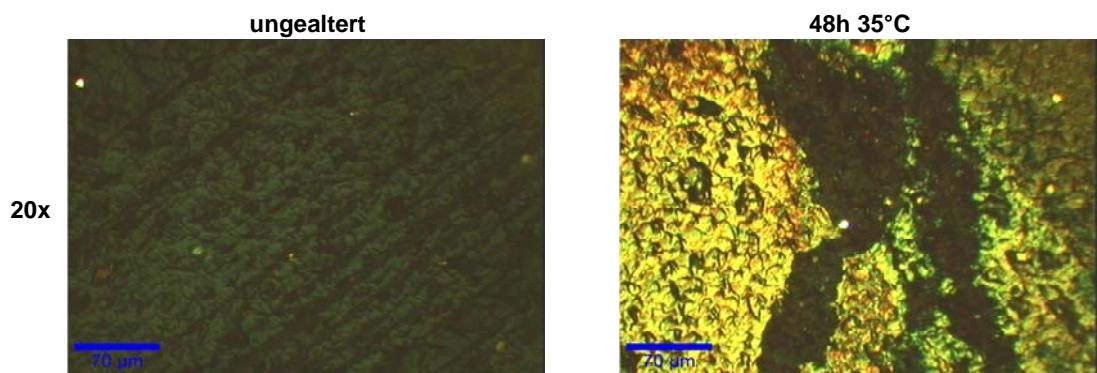


Abbildung 7-12: Oberfläche der geprüften Solarzelle bei 20facher Vergrößerung im ungealterten Zustand und nach 48h Prüfdauer bei 35°C

Auch an den Kontaktbändern zeigen sich nach den Prüfungen deutliche Korrosionsspuren. Die im ungealterten Zustand silbrig glänzende Oberfläche ist mit einer grau-schwarzen Schicht überzogen. Abbildung 7-13 zeigt ein Kontaktband im gealterten (oben) und ungealterten Zustand (unten).



Abbildung 7-13: Kontaktbänder im gealterten (oben) und ungealterten (unten) Zustand

Auch bei der Betrachtung unter dem Lichtmikroskop sind die Veränderungen der Oberfläche gut sichtbar (siehe Abbildung 7-14). Im ungealterten Zustand erkennt man bei zwanzig- und fünfzigfacher Vergrößerung feine Linien auf der Oberfläche. Außerdem ist die Farbe der Oberfläche hell und sehr gleichmäßig. Auf den Aufnahmen der gealterten Kontaktbänder ist zu erkennen, dass sich die Oberflächenstruktur stark verändert hat. Die feinen Linien sind von den Korrosionsprodukten (dunkle Stellen) bedeckt.

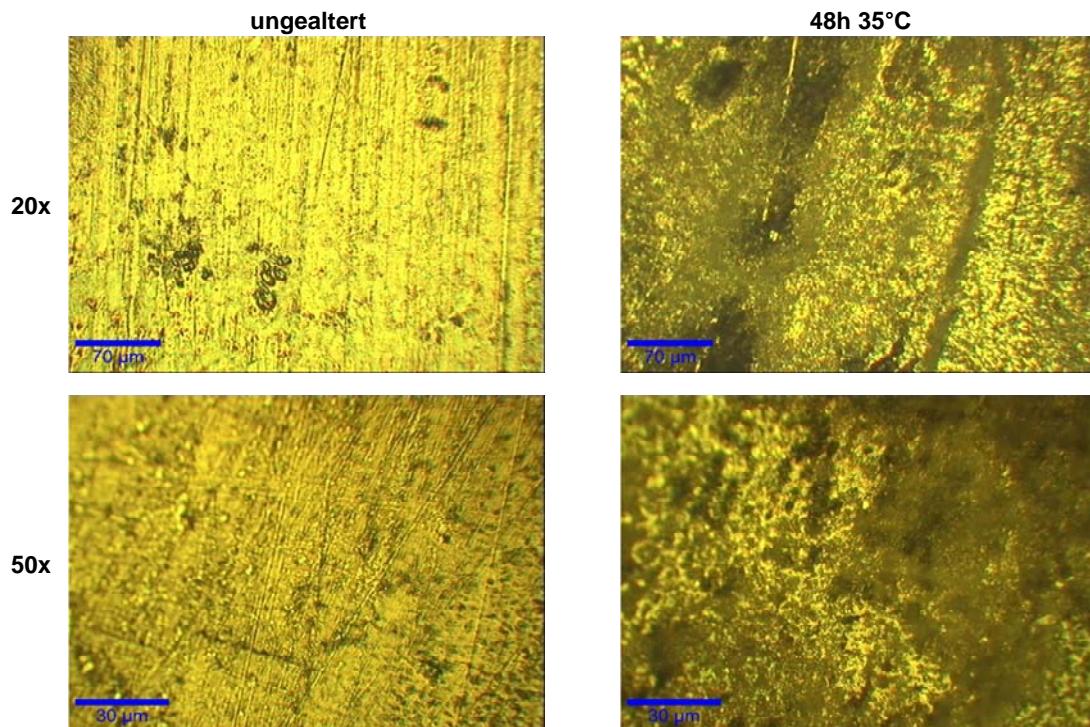


Abbildung 7-14: Oberfläche der geprüften Kontaktbänder bei 20- und 50facher Vergrößerung in ungealtertem Zustand und nach 48h Prüfdauer bei 35°C

Ein Eindringen von Salz in das Innere der geprüften Anschlussdose konnte nicht festgestellt werden, weshalb an dieser Stelle auf eine erneute Abbildung verzichtet wird.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Ausgehend von den Ergebnissen der Kalibrierung und der beschleunigten Korrosionsprüfungen wird nachfolgend die Eignung des im Rahmen dieser Arbeit konzipierten Prüfstandes beurteilt. Darüber hinaus werden vorläufige Aussagen hinsichtlich des Korrosionsverhaltens der geprüften Komponenten von Solaranlagen und Vorschläge zur weiteren Vorgehensweise bei der Entwicklung eines zertifizierten Prüfverfahrens gemacht.

8.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

8.1.1 Eignung des Prüfstandes

Mit dem gebauten Prüfstand können Korrosionsprüfungen mit Salznebel durchgeführt und der Einfluss von salzhaltiger Luft auf verschiedene Komponenten von thermischen Solaranlagen und Photovoltaikmodulen untersucht werden.

Der Prüfstand eignet sich vor allem für die Prüfung von Komponenten deren optische Eigenschaften ausschlaggebend für ihre Funktionalität sind, z.B. Solarabsorber oder Reflektoren. Da die optischen Eigenschaften solcher Komponenten auf der gesamten Oberfläche gleich sein müssen, können repräsentative Prüfungen bereits an relativ kleinen Proben (ca. 50*50 mm²) durchgeführt werden. Es ist kein großes Prüfkammervolumen erforderlich. Der Einfluss der Prüfungen auf die optischen Eigenschaften der Proben kann durch die Vermessung des Reflexionsspektrums sehr genau nachgewiesen werden.

Die Ergebnisse solcher Untersuchungen ermöglichen eine bessere Auswahl von Materialien und Komponenten für Solaranlagen, die an maritimen Standorten betrieben werden sollen. Außerdem können neu entwickelte Materialien auf Beständigkeit gegenüber salzhaltiger Luft getestet werden.

Durch Veränderung der Prüftemperatur und der Prüfdauer können unterschiedliche Belastungsstufen erzielt werden. Es wurden Betriebsbedingungen festgelegt und dokumentiert, unter welchen sich Prüfungen reproduzierbar durchführen lassen (siehe Kapitel 6.1).

Die Betriebsbedingungen lassen sich weiterhin so einstellen, dass Prüfungen gemäß den Anforderungen aus der internationalen Norm [ISO9227] durchgeführt werden können (siehe Tabelle 6-7). Sie dienen der Bewertung von Metallen und Legierungen

hinsichtlich ihrer generellen Korrosionsbeständigkeit. Dies ermöglicht z.B. die Prüfung und Auswahl von metallischen Trägerstrukturen für Solaranlagen.

Um regelmäßig zu überprüfen, ob die Korrosivität der Prüfkammer in dem in [ISO9227] geforderten Bereich liegt, wurde eine Arbeitsanweisung zur Durchführung von Korrosionsprüfungen mit Gebrauchsnormalen aus Stahl erstellt (siehe Kapitel 6.2). Die chemische Nachbehandlung zur Entfernung der Korrosionsprodukte von der Oberfläche der Gebrauchsnormale und die Bestimmung des Massenverlustes wurden in einer Versuchsbeschreibung zusammengefasst. Zur anschließenden Bestimmung der Korrosivitätskategorie, nach den Vorgaben aus der internationalen Norm [ISO9223], wurde ein Excel-Tool erstellt, welches die Ergebnisse auswertet und graphisch darstellt.

8.1.2 Ergebnisse der Korrosionsprüfungen

Es konnte gezeigt werden, dass die Prüfatmosphäre in der Prüfkammer die Korrosion von bestimmten Komponenten von Solarkollektoren und Photovoltaikmodulen erheblich fördert. Hierbei hat die Prüftemperatur einen signifikanten Einfluss auf die Korrosivität der Prüfatmosphäre und auf die Degradation der Proben. Vor allem metallische Komponenten unterliegen einer stark beschleunigten Korrosion.

Komponenten von thermischen Solaranlagen

Ein Solarabsorber (Probe 1) hat sich gegenüber der Prüfatmosphäre als besonders empfindlich herausgestellt. Schon nach kurzer Prüfdauer waren Schäden an der Oberfläche zu erkennen. Die selektive Beschichtung wurde durch die Prüfungen zerstört, was eine deutliche Verschlechterung der optischen Eigenschaften zur Folge hatte.

Ein anderer Solarabsorber mit selektiver Beschichtung (Probe 2) hat sich gegenüber der Prüfatmosphäre als resistent erwiesen. Auch nach einer Prüfdauer von achtundvierzig Stunden und einer Prüftemperatur von 50°C waren keine Schäden an der Oberfläche zu erkennen. Die gemessenen optischen Eigenschaften des Absorbers blieben durch die Prüfungen unverändert.

Auch die geprüften Materialien zur Gestaltung von Gebäudefassaden (Probe 4 und 5) sowie der Reflektor (Probe 3) haben sich als beständig gegenüber der Prüfatmosphäre erwiesen. Eine Veränderung der optischen Eigenschaften trat nicht auf.

Die Ergebnisse der Prüfungen zeigen, dass beim Betrieb von Solarkollektoren an maritimen Standorten auf die Auswahl des Absorbers, bzw. des Anlagentyps geachtet werden muss. Bei einem durchlüfteten Flachkollektor mit einem Absorbertyp wie Probe 1, ist damit zu rechnen, dass die selektive Beschichtung des Absorbers durch den Einfluss salzhaltiger Luft beschädigt wird. Dies hat starke Leistungseinbußen zur Folge und verringert die Gebrauchsduer der Anlage.

Die Ergebnisse zeigen jedoch auch, dass es bereits Komponenten für thermische Solaranlagen gibt, die beständig gegenüber salzhaltiger Luft sind und sich für den Einsatz an maritimen Standorten eignen. Ob der Einsatz dieser Materialien eine Gebrauchsduer der Anlagen von über 20 Jahren gewährleisten kann, muss in weiteren Korrosionsprüfungen und Freibewitterungstests untersucht werden (siehe Kapitel 8.2)

Generell empfiehlt sich an maritimen Standorten mit einem hohen Salzgehalt der Luft eher der Einsatz von Vakuum-Röhrenkollektoren, da der Absorber bei diesem Kollektortyp vor Umwelteinflüssen geschützt ist.

Komponenten von Photovoltaikanlagen

Die geprüften Kontaktbänder, welche zur elektrischen Verschaltung von Solarzellen dienen, wiesen nach Prüfdauern von achtundvierzig Stunden deutliche Korrosionsspuren auf. Auch bei den geprüften Solarzellen waren nach achtundvierzig Stunden Veränderungen an der Oberfläche zu erkennen. Ein Eindringen von Salz in die geprüfte Anschlussdose konnte nicht festgestellt werden.

Die Bewertung der Ergebnisse erfolgte bei den Komponenten von PV-Anlagen vorerst nur visuell, weshalb die entstandenen Schäden noch nicht genau quantifiziert werden können. Trotzdem ist davon auszugehen, dass die Funktionstüchtigkeit der Komponenten durch die Belastung mit salzhaltiger Luft beeinträchtigt wird. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass Solarzellen und Kontaktbänder beim normalen Betrieb in einem PV-Modul durch das Einkapselungspolymer geschützt sind.

8.2 Ausblick

8.2.1 Erweiterung des Prüfstandes

Im Hinblick auf die Entwicklung eines zertifizierten Prüfverfahrens zum Testen der Korrosionseigenschaften von Solaranlagen ist eine Erweiterung des Prüfstandes nötig.

Die Korrosion einzelner Materialproben kann sich von der Korrosion dieser Materialien in einem Systemverbund erheblich unterscheiden. Um detaillierte Erkenntnisse zu erlangen, wie sich eine salzhaltige Atmosphäre, neben der Degradation einzelner Komponenten, auf die Leistung von PV-Modulen und Solarkollektoren auswirkt, müssen Prüfungen an verkaufsfertigen Anlagen durchgeführt werden. Für die Durchführung solcher Prüfungen ist ein größeres Prüfkammervolumen erforderlich.

Die Nebelleistung des Ultraschallverneblers wurde bei der Durchführung aller Prüfungen auf höchster Stufe betrieben. Die ermittelte, durchschnittliche Auffangmenge der Salzlösung liegt nur knapp in dem in [ISO9227] geforderten Bereich (siehe Tabelle 6-7). Zur Durchführung von Prüfungen mit einem größeren Prüfkammervolumen ist also auch ein leistungsstärkeres Gerät zur Erzeugung des Salznebels nötig.

Darüber hinaus sollte die Möglichkeit bestehen, weitere Umwelteinflüsse, denen Solaranlagen unter Betriebsbedingungen ausgesetzt sind, zu simulieren. Hierzu zählen:

- UV-Bestrahlung
- Feucht-Trocken-Zyklen
- Temperatur-Zyklen
- Unterschiedliche Chloridbelastungen

Idealerweise sollte der erweiterte Prüfstand als integriertes System ausgeführt werden, in dem alle genannten Umwelteinflüsse zentral erzeugt, geregelt und überwacht werden können. Benötigt wird weiterhin ein fester Standort mit den nötigen Peripheriensystemen, wie z.B. Abluft- und Abwasserentsorgung.

Es hat sich gezeigt, dass eine Veränderung der NaCl-Konzentration der Prüflösung keinen nennenswerten Einfluss auf die Korrosivität der Prüfkammer hat. Unterschiedliche Chloridbelastungen könnten durch variierende Prüfzyklen erzielt werden. Die Proben werden nur für eine bestimmte Zeit mit Salznebel besprüht und anschließend unter feuchten oder trockenen Bedingungen gelagert.

Zur Auswertung der Prüfergebnisse müssen einheitliche Verfahren bestimmt werden. Für die Bewertung der Prüfergebnisse von Solarabsorbern stellt die Vermessung des Reflexionsspektrums ein solches Verfahren dar, da es am *Fraunhofer ISE* durchge-

führt werden kann und bereits zur Bewertung von Prüfungen der Feuchte- und Temperaturbeständigkeit eingesetzt wird.

Eine repräsentative Bewertung der Ergebnisse von Korrosionsprüfungen an Komponenten von PV-Modulen muss über die Messung von elektrischen Parametern, wie z.B. Zellspannung, Zellstrom oder Leitungswiderstände, erfolgen. Üblicherweise werden solche Messungen an fertigen PV-Modulen und nicht an einzelnen Komponenten durchgeführt. Es muss also überlegt werden, wie man die Ergebnisse der Prüfungen an einzelnen Komponenten von PV-Modulen sinnvoll auswerten kann.

8.2.2 Langzeittests unter Freibewitterung

Die Aussagefähigkeit von beschleunigten Korrosionsprüfungen ist beschränkt, da unter realen Betriebsbedingungen viele unterschiedliche Umwelteinflüsse wirken, welche in einer Prüfkammer nicht simuliert werden können. Außerdem sind bestimmte Komponenten wie Solarabsorber, Kontaktbänder oder Solarzellen unter realen Betriebsbedingungen nicht direkt der Umgebung ausgesetzt. Es muss untersucht werden, wie und in welcher Menge salzhaltige Luft unter Betriebsbedingungen an diese Komponenten gelangt.

Neben einer erweiterten Prüfeinrichtung zur Durchführung beschleunigter Korrosionsprüfungen bedarf es bei der Entwicklung eines zertifizierten Prüfverfahrens Langzeittests unter Betriebsbedingungen, d.h. mit Hilfe von Versuchsanlagen, die unter Freibewitterung an verschiedenen maritimen Standorten dauerhaft betrieben werden.

Damit Solaranlagen eine ausreichende Gebrauchsduer (> 20 Jahre) erreichen, müssen bei der Planung der Anlage und der Auswahl der Anlagenkomponenten die zu erwartenden Belastungen am Betriebsstandort abgeschätzt werden. Deshalb sind Messreihen, die den Salzgehalt der Luft in Abhängigkeit von wesentlichen atmosphärischen Parametern näher definieren, an den Standorten der Versuchsanlagen durchzuführen. Wird der Zusammenhang zwischen den atmosphärischen Parametern und der Chloriddeposition deutlich, kann ein Standort anhand von Daten von lokalen Klimamessstationen hinsichtlich der zu erwartenden Salzbelastung vorläufig bewertet werden. Eine zeitaufwendige, direkte Messung des Salzgehaltes der Luft wäre somit nicht mehr nötig.

Im Rahmen des Projektes zur Untersuchung der Auswirkungen von Meersalzpartikeln auf die Gebrauchsdauer von Solaranlagen ist eine Kooperation zwischen dem *Instituto Tecnológico De Canarias* (ITC) und dem *Fraunhofer ISE* geplant.

Durch seine Nähe zur Küste bietet das Institutsgelände des ITC gute Voraussetzungen zur Durchführung von Freibewitterungstests in einer salzhaltigen Atmosphäre [ITC08]. Außerdem verfügt das ITC über Einrichtungen zur Messung atmosphärischer Parameter wie Windrichtung, Luftfeuchtigkeit und Globalstrahlung sowie über eine umfangreiche Datenbasis dieser Parameter aus den letzten zehn Jahren [ITC08].

Neben der Installation von Testständen für PV-Module und Solarkollektoren sind unter anderem die Exposition von metallischen Gebrauchsnormalen und die Messung der Chlorid- und SO₂-Depositionen zur Bestimmung der Korrosivität der Atmosphäre nach [ISO9223] (siehe Kapitel 4.1) geplant.

In Abbildung 8-1 ist, aufbauend auf den Ergebnissen dieser Arbeit, ein Vorschlag für die weitere Vorgehensweise zur Entwicklung eines zertifizierten Prüfverfahrens zum testen der Korrosionseigenschaften von Solaranlagen schematisch dargestellt.

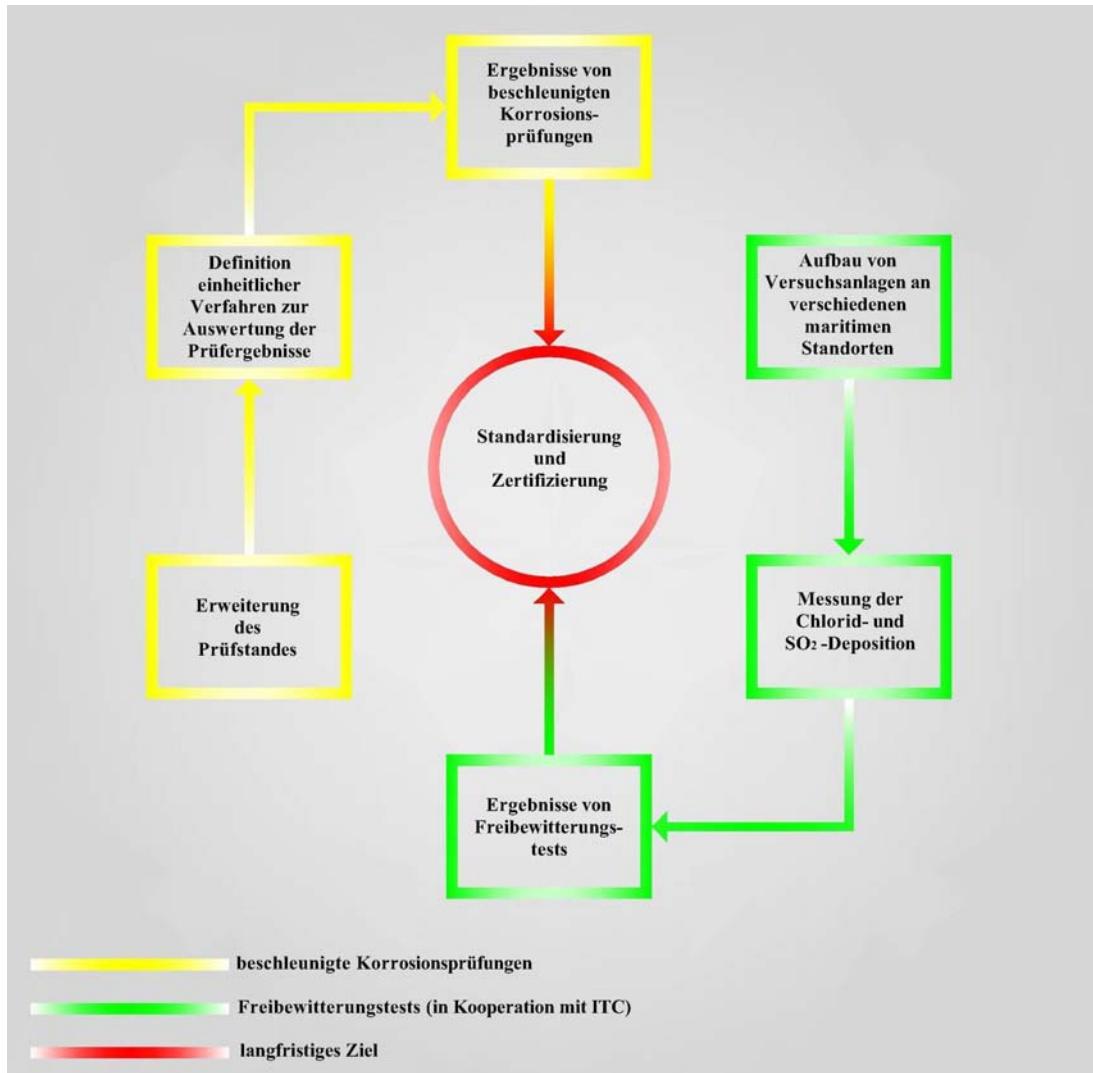


Abbildung 8-1: Weitere Vorgehensweise zur Entwicklung eines zertifizierten Prüfverfahrens

Anhang

A Tabellen und Messdiagramme

A.1 Durchschnittliche Auffangmenge der Salzlösung

Tabelle A-1: Messwerte der Prüfung zur Ermittlung der durchschnittlichen Auffangmenge der Salzlösung bei $t_{\text{prüf}} = 1\text{h}$

	$m_{u,0}$ in g	m_{ui} in g	Δm_u in g	V_{80} in ml/h
1	37,2181	38,2940	1,0759	1,06
2	38,1119	39,2002	1,0883	1,07
3	37,1214	38,1815	1,0601	1,05
4	37,0693	38,1490	1,0797	1,07
5	36,9702	38,0768	1,1066	1,09
6	37,0625	38,1206	1,0581	1,05
7	37,0689	38,1194	1,0505	1,04
8	37,0669	38,1261	1,0592	1,05
9	37,3870	38,4136	1,0266	1,01
Mittelwert	37,2307	38,2979	1,0672	1,05
Standardabweichung	0,3144	0,3170	0,0209	0,0206

Tabelle A-2: Messwerte der Prüfung zur Ermittlung der durchschnittlichen Auffangmenge der Salzlösung bei $t_{\text{prüf}} = 2\text{h}$

	$m_{U,0}$ in g	m_{Ui} in g	Δm_U in g	V_{80} in ml/h
1	37,2181	39,3275	2,1094	1,04
2	38,1119	40,2641	2,1522	1,06
3	37,1214	39,2335	2,1121	1,04
4	37,0693	39,2758	2,2065	1,09
5	36,9702	39,1507	2,1805	1,08
6	37,0625	39,1969	2,1344	1,05
7	37,0689	39,2149	2,1460	1,06
8	37,0669	39,2654	2,1985	1,09
9	37,3870	39,5032	2,1162	1,05
Mittelwert	37,2307	39,3813	2,1506	1,06
Standardabweichung	0,3144	0,3096	0,0331	0,0163

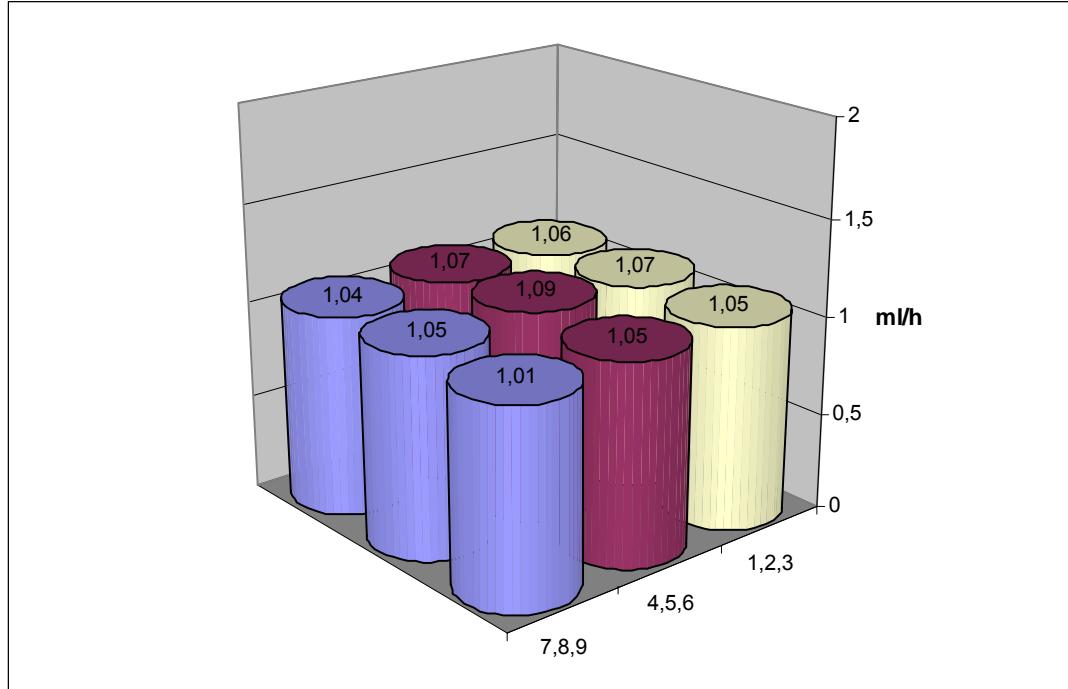


Abbildung A-2: Aufgefangenes Volumen der Salzlösung pro Uhrglasschale nach $t_{\text{prüf}} = 2\text{h}$

Tabelle A-3: Messwerte der Prüfung zur Ermittlung der durchschnittlichen Auffangmenge der Salzlösung bei $t_{\text{prüf}} = 3\text{h}$

	$m_{u,0}$ in g	m_{ui} in g	Δm_u in g	V_{80} in ml/h
1	37,2181	40,5240	3,3059	1,09
2	38,1119	41,4595	3,3476	1,10
3	37,1214	40,3958	3,2744	1,08
4	37,0693	40,3524	3,2831	1,08
5	36,9702	40,2287	3,2585	1,07
6	37,0625	40,3286	3,2661	1,08
7	37,0689	40,2825	3,2136	1,06
8	37,0669	40,3028	3,2359	1,07
9	37,3870	40,5979	3,2109	1,06
Mittelwert	37,2307	40,4969	3,2662	1,08
Standardabweichung	0,3144	0,3395	0,0392	0,0129

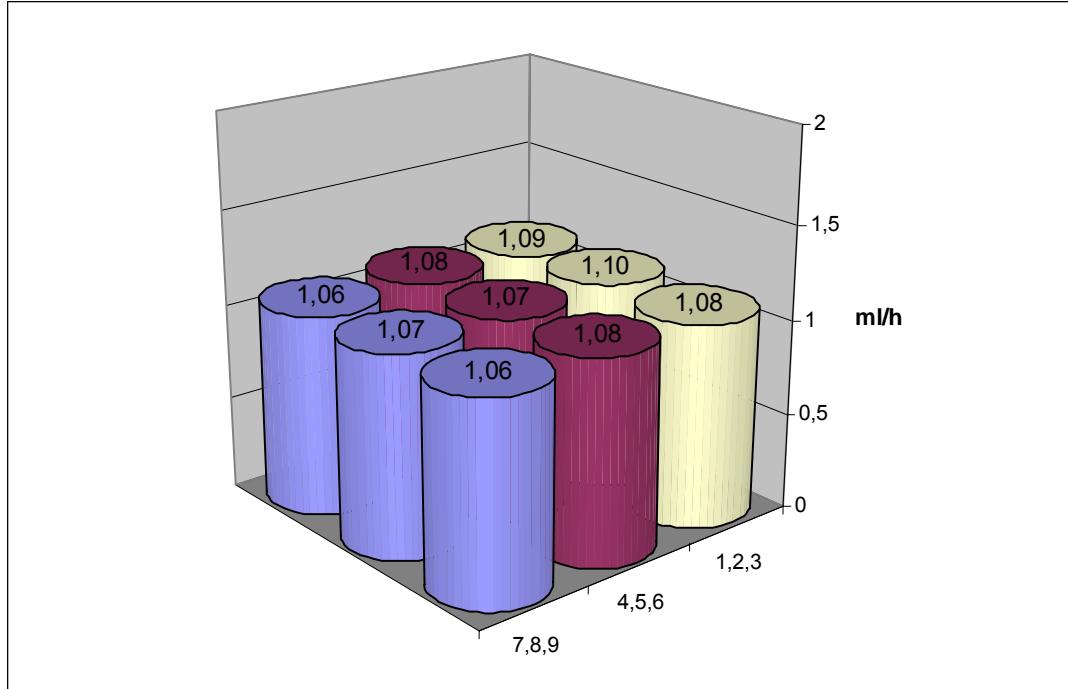


Abbildung A-3: Aufgefangenes Volumen der Salzlösung pro Uhrglasschale nach $t_{\text{prüf}} = 3\text{h}$

A.2 Chloriddeposition und örtliche Verteilung des Salznebels

Tabelle A-4: Messwerte und Ergebnisse der Chloriddeposition bei $t_{\text{prüf}} = 1\text{h}$ und $c_{\text{Lösung}} = 3,5\%$

	$m_{Ui,0}$ in g	m_{Ui} in g	Δm_{Ui} in g	s_{Ui} in g	s_{kammer} in mgCl/m ² *d	F_{Cl}
1	37,7750	37,7996	0,0246	0,0149	45599	30
2	39,1455	39,1706	0,0251	0,0152	46526	31
3	37,6922	37,7171	0,0249	0,0151	46155	31
4	37,8768	37,9013	0,0245	0,0149	45414	30
5	37,1288	37,1543	0,0255	0,0155	47268	32
6	37,4310	37,4559	0,0249	0,0151	46155	31
7	37,9417	37,9671	0,0254	0,0154	47082	31
8	37,8586	37,8829	0,0243	0,0147	45043	30
9	37,2205	37,2442	0,0237	0,0144	43931	29
Mittelwert	37,7856	37,8103	0,0248	0,0150	45908	31
Standardab- weichung	0,5266	0,5267	0,0005	0,0003	934	0,6

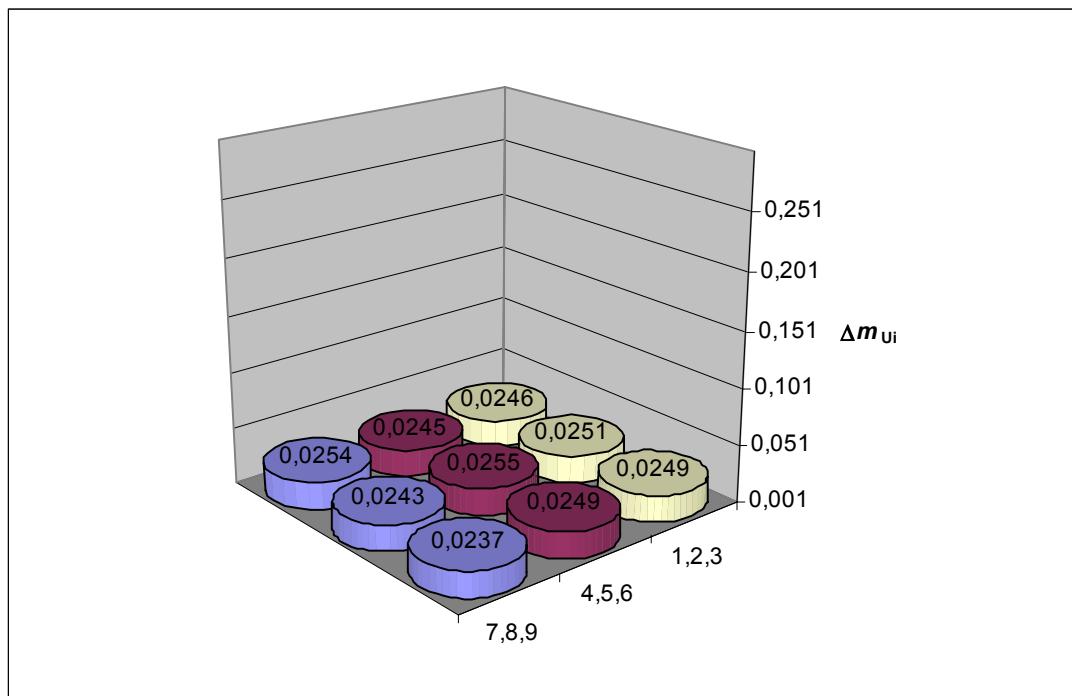


Abbildung A-4: Örtliche Verteilung des Salznebels bei $t_{\text{prüf}} = 1\text{h}$ und $c_{\text{Lösung}} = 3,5\%$

Tabelle A-5: Messwerte und Ergebnisse der Chloriddeposition bei $t_{\text{prüf}} = 2\text{h}$ und $c_{\text{Lösung}} = 3,5\%$

	$m_{U,i,0}$ in g	m_{Ui} in g	Δm_{Ui} in g	s_{Ur} in g	s_{kammer} in mgCl/m ² d	F_{Cl}
1	37,2188	37,2793	0,0605	0,0367	56072	37
2	38,1124	38,1737	0,0613	0,0372	56814	38
3	37,1219	37,1818	0,0599	0,0363	55516	37
4	37,0699	37,1313	0,0614	0,0372	56907	38
5	36,9707	37,0323	0,0616	0,0374	57092	38
6	37,0627	37,1231	0,0604	0,0366	55980	37
7	37,0698	37,1298	0,0600	0,0364	55609	37
8	37,0670	37,1271	0,0601	0,0365	55702	37
9	37,3875	37,4459	0,0584	0,0354	54126	36
Mittelwert	37,2312	37,2916	0,0604	0,0366	55980	37
Standardabweichung	0,3144	0,3144	0,0009	0,0005	816	0,5

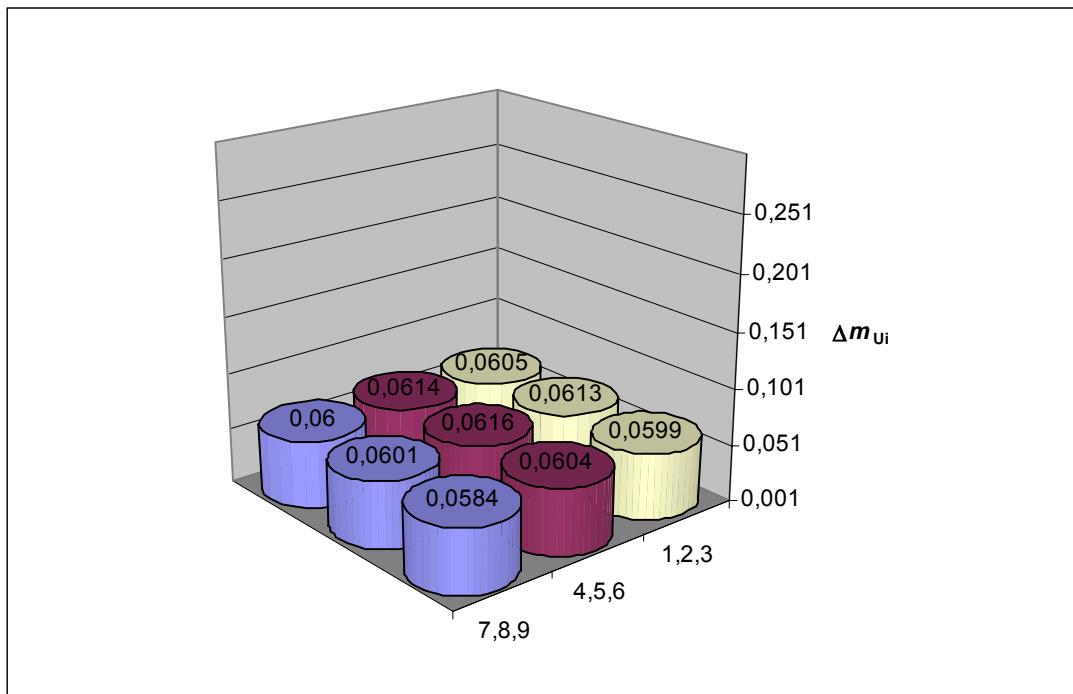
Abbildung A-5: Örtliche Verteilung des Salznebels bei $t_{\text{prüf}} = 2\text{h}$ und $c_{\text{Lösung}} = 3,5\%$

Tabelle A-6: Messwerte und Ergebnisse der Chloriddeposition bei $t_{\text{prüf}} = 4\text{h}$ und $c_{\text{Lösung}} = 3,5\%$

	$m_{U_i,0}$ in g	m_{U_i} in g	Δm_{U_i} in g	s_{U_i} in g	s_{kammer} in mgCl/m ² *d	F_{Cl}
1	37,2188	37,3473	0,1285	0,0779	59548	40
2	38,1124	38,2402	0,1278	0,0775	59228	39
3	37,1219	37,2501	0,1282	0,0778	59409	40
4	37,0699	37,1973	0,1274	0,0773	59038	39
5	36,9707	37,0978	0,1271	0,0771	58899	39
6	37,0627	37,1911	0,1284	0,0779	59502	40
7	37,0698	37,1976	0,1278	0,0775	59224	39
8	37,0670	37,1961	0,1291	0,0783	59826	40
9	37,3875	37,5159	0,1284	0,0779	59502	40
Mittelwert	37,2312	37,3593	0,1281	0,0777	59353	40
Standardabweichung	0,3144	0,3144	0,0005	0,0003	254	0,2

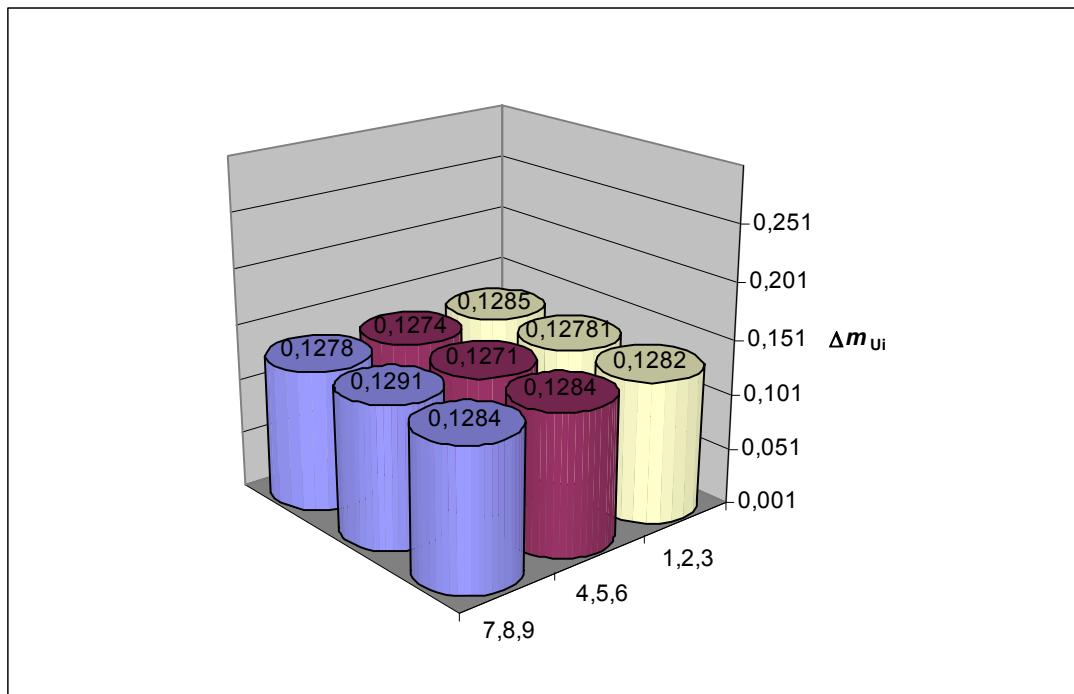
Abbildung A-6: Örtliche Verteilung des Salznebels bei $t_{\text{prüf}} = 4\text{h}$ und $c_{\text{Lösung}} = 3,5\%$

Tabelle A-7: Messwerte und Ergebnisse der Chloriddeposition bei $t_{\text{prüf}} = 8\text{h}$ und $c_{\text{Lösung}} = 3,5\%$

	$m_{U_i,0}$ in g	m_{Ui} in g	Δm_{Ui} in g	s_{Ur} in g	s_{kammer} in mgCl/m ² d	F_{Cl}
1	37,2188	37,4873	0,2685	0,1629	62213	41
2	38,1124	38,3796	0,2672	0,1621	61911	41
3	37,1219	37,3867	0,2648	0,1606	61355	41
4	37,0699	37,3363	0,2664	0,1616	61726	41
5	36,9707	37,2398	0,2691	0,1632	62352	42
6	37,0627	37,3261	0,2634	0,1598	61031	41
7	37,0698	37,3416	0,2718	0,1649	62977	42
8	37,0670	37,3391	0,2721	0,1651	63047	42
9	37,3875	37,6522	0,2647	0,1606	61330	41
Mittelwert	37,2312	37,4987	0,2676	0,1623	61993	41
Standardabweichung	0,3144	0,3139	0,0028	0,0017	641	0,4

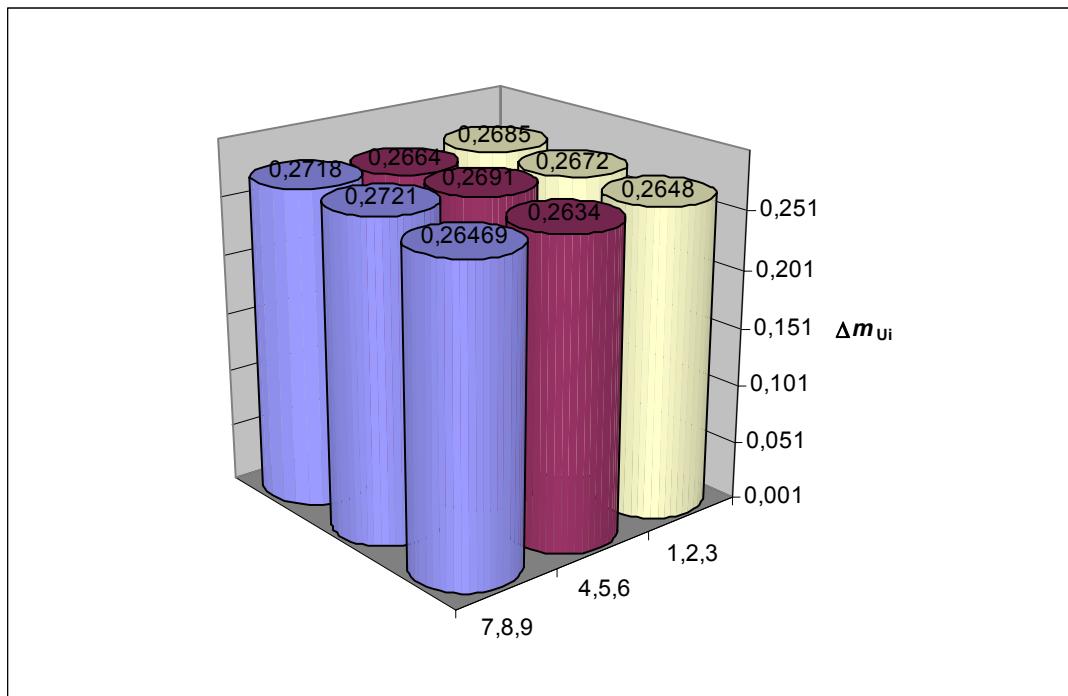
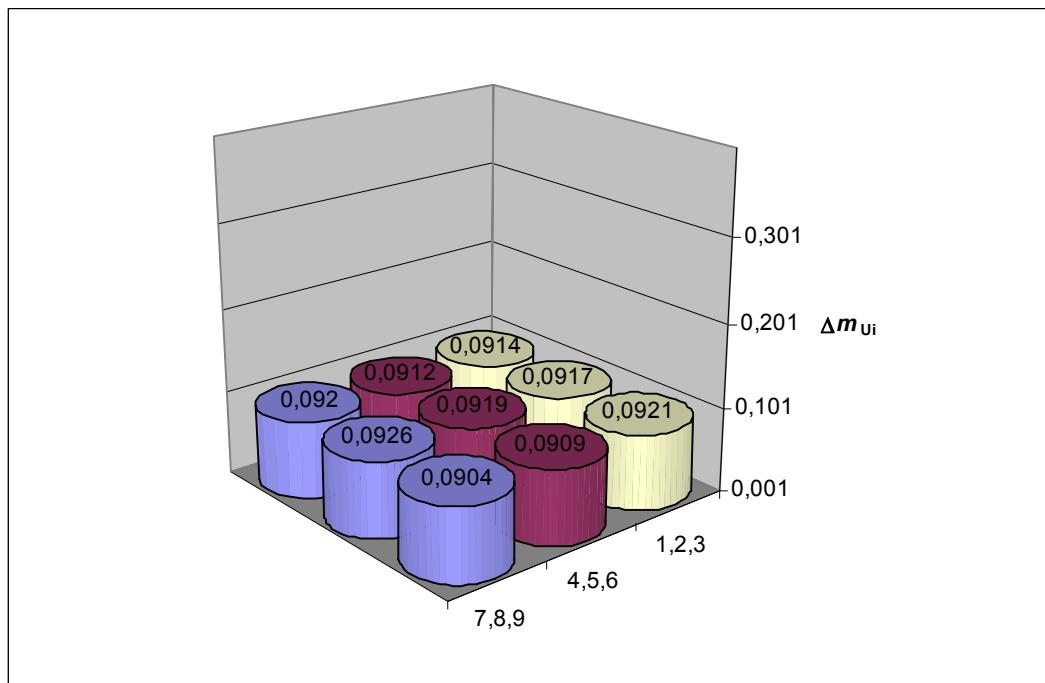
Abbildung A-7: Örtliche Verteilung des Salznebels bei $t_{\text{prüf}} = 8\text{h}$ und $c_{\text{Lösung}} = 3,5\%$

Tabelle A-8: Messwerte und Ergebnisse der Chloriddeposition bei $t_{\text{prüf}} = 1\text{h}$ und $c_{\text{Lösung}} = 5\%$

	$m_{U,0}$ in g	m_{U} in g	Δm_{U} in g	S_{U} in g	S_{kammer} in mgCl/m ² *d	F_{Cl}
1	37,7750	37,8203	0,0453	0,0275	83970	56
2	39,1455	39,1912	0,0457	0,0277	84711	56
3	37,6922	37,7371	0,0449	0,0272	83228	55
4	37,8768	37,9223	0,0455	0,0276	84340	56
5	37,1288	37,1753	0,0465	0,0282	86194	57
6	37,4310	37,4762	0,0452	0,0274	83784	56
7	37,9417	37,9878	0,0461	0,0280	85452	57
8	37,8586	37,9032	0,0446	0,0271	82672	55
9	37,2205	37,2664	0,0459	0,0278	85082	57
Mittelwert	37,7856	37,8311	0,0455	0,0276	84381	56
Standardabweichung	0,5266	0,5265	0,0005	0,0003	991	0,7

Tabelle A-9: Messwerte und Ergebnisse der Chloriddeposition bei $t_{\text{prüf}} = 2\text{h}$ und $c_{\text{Lösung}} = 5\%$

	$m_{U,0}$ in g	m_{U} in g	Δm_{U} in g	S_{U} in g	S_{kammer} in mgCl/m ² *d	F_{Cl}
1	37,7750	37,8664	0,0914	0,0554	84711	56
2	39,1455	39,2372	0,0917	0,0556	84989	57
3	37,6922	37,7843	0,0921	0,0559	85360	57
4	37,8768	37,9680	0,0912	0,0553	84526	56
5	37,1288	37,2207	0,0919	0,0557	85174	57
6	37,4310	37,5219	0,0909	0,0551	84248	56
7	37,9417	38,0337	0,0920	0,0558	85267	57
8	37,8586	37,9512	0,0926	0,0562	85823	57
9	37,2205	37,3109	0,0904	0,0548	83784	56
Mittelwert	37,7856	37,8771	0,0916	0,0556	84876	57
Standardabweichung	0,5266	0,5267	0,0006	0,0004	559	0,4

Abbildung A-8: Örtliche Verteilung des Salznebels bei $t_{\text{prüf}} = 2\text{h}$ und $c_{\text{Lösung}} = 5\%$ Tabelle A-10: Messwerte und Ergebnisse der Chloridd deposition bei $t_{\text{prüf}} = 4\text{h}$ und $c_{\text{Lösung}} = 5\%$

	$m_{Ui,0}$ in g	m_{Ui} in g	Δm_{Ui} in g	S_{Ui} in g	S_{kammer} in mgCl/m ² *d	F_{Cl}
1	37,7750	37,9713	0,1963	0,1191	90967	61
2	39,1455	39,3409	0,1954	0,1185	90550	60
3	37,6922	37,8881	0,1959	0,1188	90782	61
4	37,8768	38,0719	0,1951	0,1183	90411	60
5	37,1288	37,3246	0,1958	0,1188	90735	60
6	37,4310	37,6267	0,1957	0,1187	90689	60
7	37,9417	38,1359	0,1942	0,1178	89994	60
8	37,8586	38,0541	0,1955	0,1186	90596	60
9	37,2205	37,4157	0,1952	0,1184	90457	60
Mittelwert	37,7856	37,9810	0,1955	0,1186	90576	60
Standardabweichung	0,5266	0,5265	0,0005	0,0003	248	0,2

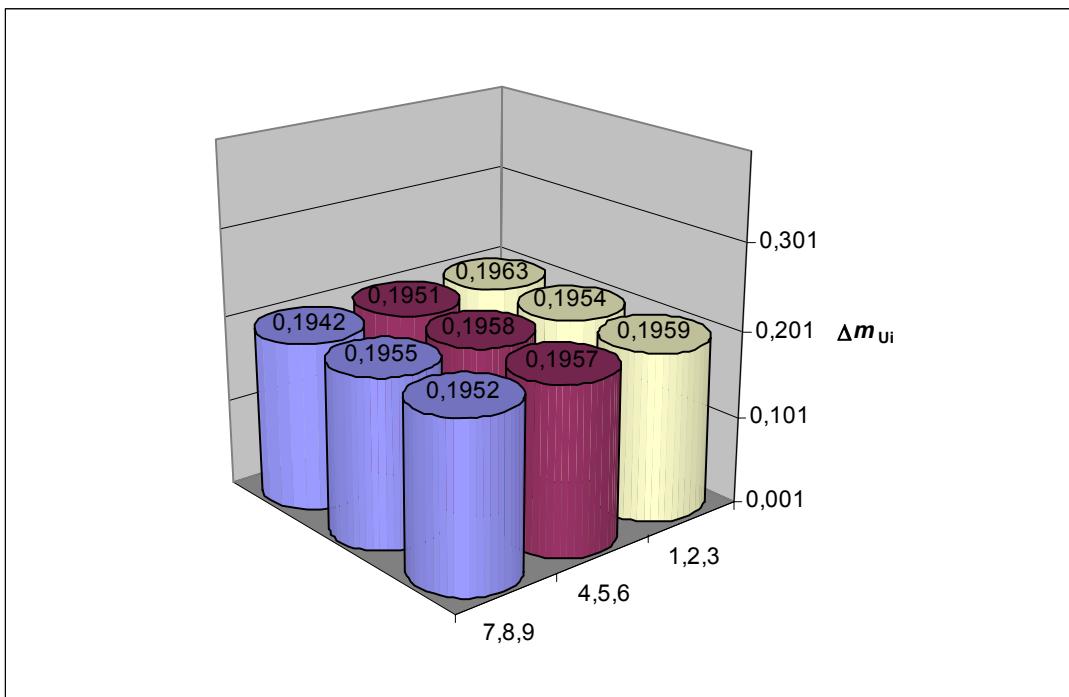


Abbildung A-9: Örtliche Verteilung des Salznebels bei $t_{\text{prüf}} = 4\text{h}$ und $c_{\text{Lösung}} = 5\%$

Tabelle A-11: Messwerte und Ergebnisse der Chloriddeposition bei $t_{\text{prüf}} = 8\text{h}$ und $c_{\text{Lösung}} = 5\%$

	$m_{Ui,0}$ in g	m_{Ui} in g	Δm_{Ui} in g	S_{Ui} in g	S_{kammer} in mgCl/m ² *d	F_{Cl}
1	37,7750	38,1394	0,3644	0,2210	84433	56
2	39,1455	39,5151	0,3696	0,2242	85638	57
3	37,6922	38,0596	0,3674	0,2229	85128	57
4	37,8768	38,2501	0,3733	0,2264	86495	58
5	37,1288	37,5016	0,3728	0,2261	86379	58
6	37,4310	37,8012	0,3702	0,2246	85777	57
7	37,9417	38,3069	0,3652	0,2215	84618	56
8	37,8586	38,2193	0,3607	0,2188	83576	56
9	37,2205	37,5861	0,3656	0,2218	84711	56
Mittelwert	37,7856	38,1533	0,3677	0,2230	85195	57
Standardabweichung	0,5266	0,5264	0,0037	0,0023	860	0,6

Tabelle A-12: Messwerte und Ergebnisse der Chloriddeposition bei $t_{\text{prüf}} = 1\text{h}$ und $c_{\text{Lösung}} = 7\%$

	$m_{U,i,0}$ in g	m_{Ui} in g	Δm_{Ui} in g	s_{Ur} in g	s_{kammer} in mgCl/m ² d	F_{Cl}
1	37,7750	37,8388	0,0638	0,0387	118262	79
2	39,1455	39,2101	0,0646	0,0392	119745	80
3	37,6922	37,7561	0,0639	0,0388	118447	79
4	37,8768	37,9418	0,0650	0,0394	120486	80
5	37,1288	37,1931	0,0643	0,0390	119189	79
6	37,4310	37,4951	0,0641	0,0389	118818	79
7	37,9417	38,0069	0,0652	0,0396	120857	81
8	37,8586	37,9220	0,0634	0,0385	117520	78
9	37,2205	37,2842	0,0637	0,0386	118076	79
Mittelwert	37,7856	37,8498	0,0642	0,0390	119044	79
Standardabweichung	0,5266	0,5267	0,0005	0,0003	1008	0,7

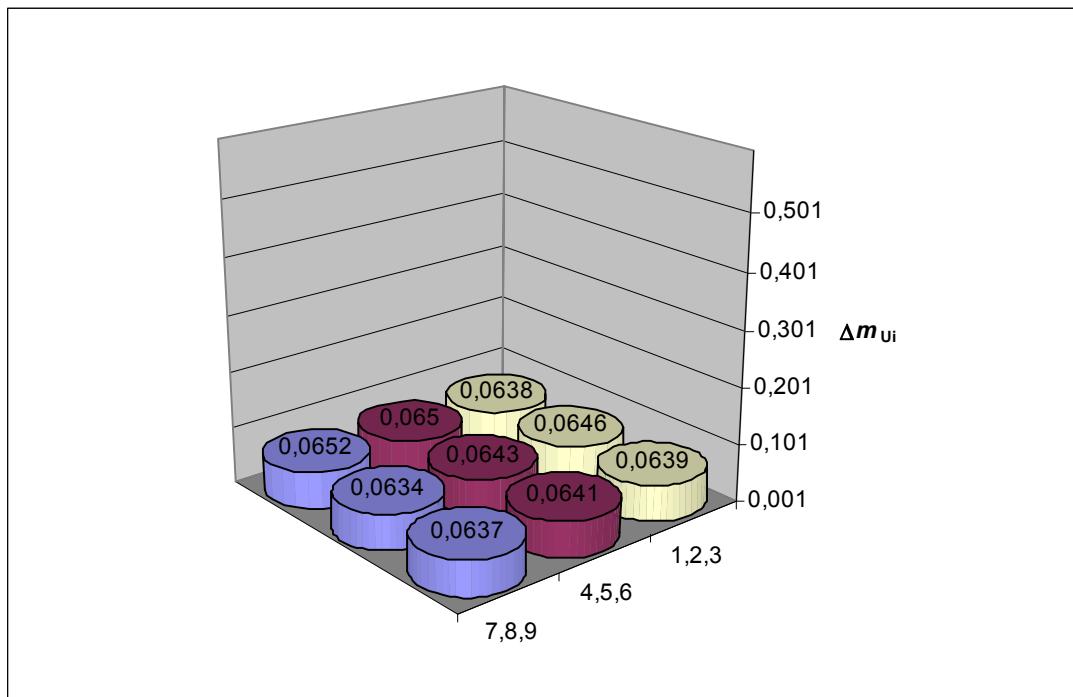
Abbildung A-10: Örtliche Verteilung des Salznebels bei $t_{\text{prüf}} = 1\text{h}$ und $c_{\text{Lösung}} = 7\%$

Tabelle A-13: Messwerte und Ergebnisse der Chloriddeposition bei $t_{\text{prüf}} = 2\text{h}$ und $c_{\text{Lösung}} = 7\%$

	$m_{Ui,0}$ in g	m_{Ui} in g	Δm_{Ui} in g	S_{Ui} in g	S_{kammer} in mgCl/m ² *d	F_{Cl}
1	37,7750	37,9123	0,1373	0,0833	127252	85
2	39,1455	39,2821	0,1366	0,0829	126603	84
3	37,6922	37,8268	0,1346	0,0816	124749	83
4	37,8768	38,0138	0,1370	0,0831	126974	85
5	37,1288	37,2663	0,1375	0,0834	127437	85
6	37,4310	37,5691	0,1381	0,0838	127993	85
7	37,9417	38,0802	0,1385	0,0840	128364	86
8	37,8586	37,9947	0,1361	0,0826	126140	84
9	37,2205	37,3581	0,1376	0,0835	127530	85
Mittelwert	37,7856	37,9226	0,1370	0,0831	127005	85
Standardabweichung	0,5266	0,5263	0,0010	0,0006	967	0,6

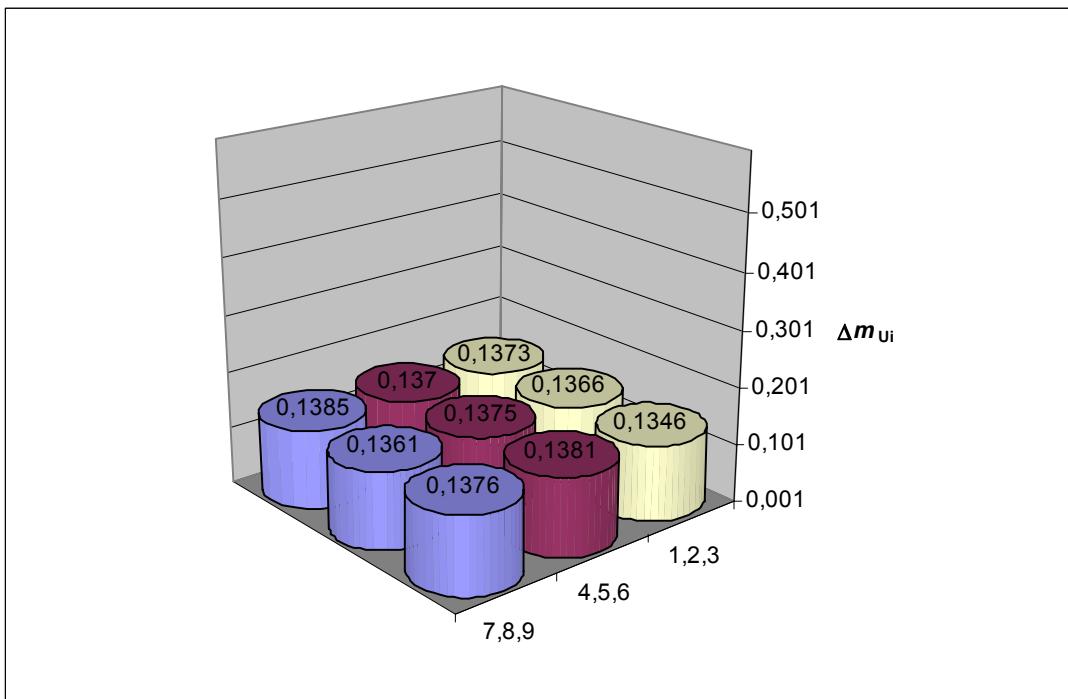


Abbildung A-11: Örtliche Verteilung des Salznebels bei $t_{\text{prüf}} = 2\text{h}$ und $c_{\text{Lösung}} = 7\%$

Tabelle A-14: Messwerte und Ergebnisse der Chloriddeposition bei $t_{\text{prüf}} = 4\text{h}$ und $c_{\text{Lösung}} = 7\%$

	$m_{U_i,0}$ in g	m_{U_i} in g	Δm_{U_i} in g	S_{U_i} in g	S_{kammer} in mgCl/m ² *d	F_{Cl}
1	37,7750	38,0315	0,2565	0,1556	118864	79
2	39,1455	39,3998	0,2543	0,1543	117845	79
3	37,6922	37,9528	0,2606	0,1581	120764	81
4	37,8768	38,1371	0,2603	0,1579	120625	80
5	37,1288	37,3872	0,2584	0,1567	119745	80
6	37,4310	37,6901	0,2591	0,1572	120069	80
7	37,9417	38,1987	0,2570	0,1559	119096	79
8	37,8586	38,1187	0,2601	0,1578	120532	80
9	37,2205	37,4772	0,2567	0,1557	118957	79
Mittelwert	37,7856	38,0437	0,2581	0,1566	119611	80
Standardabweichung	0,5266	0,5256	0,0019	0,0012	884	0,6

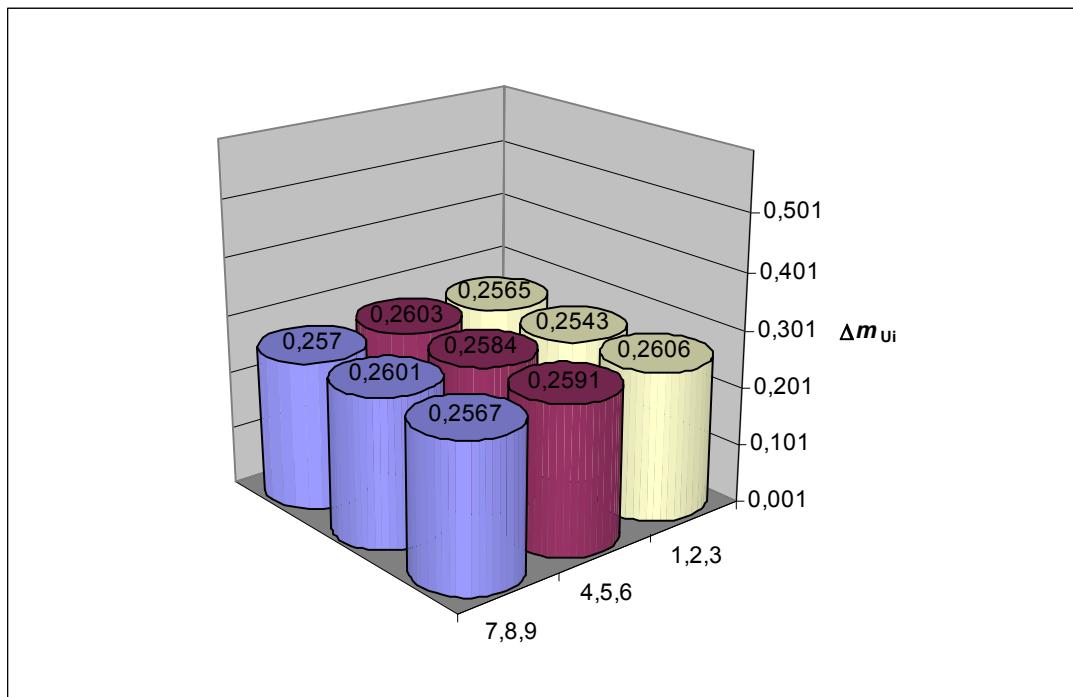
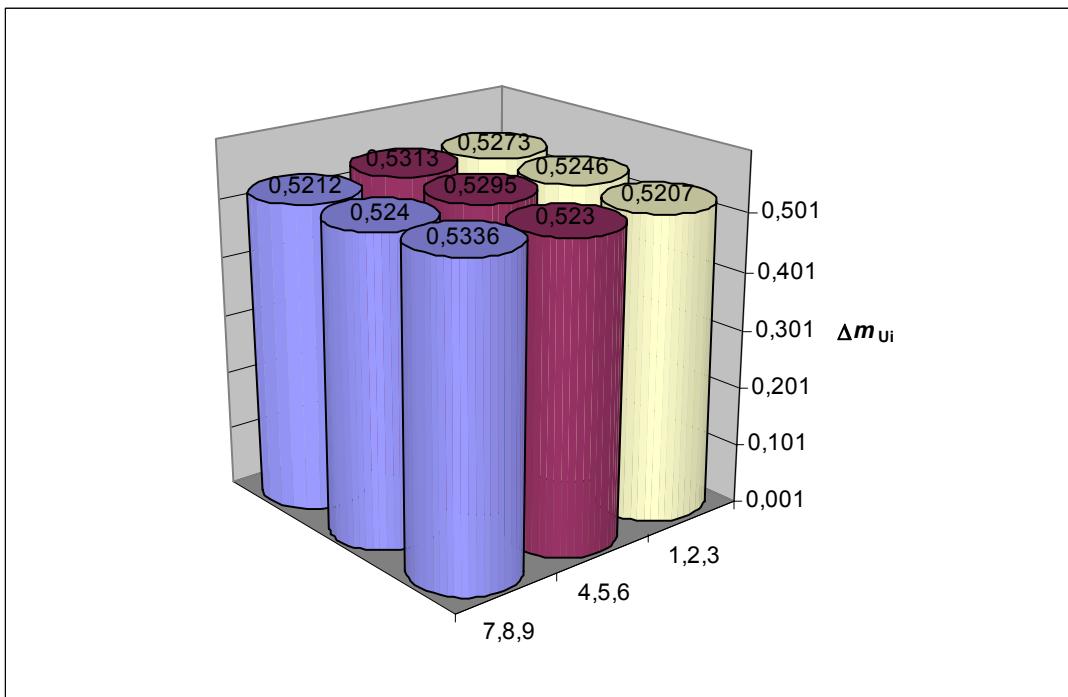
Abbildung A-12: Örtliche Verteilung des Salznebels bei $t_{\text{prüf}} = 4\text{h}$ und $c_{\text{Lösung}} = 7\%$

Tabelle A-15: Messwerte und Ergebnisse der Chloriddeposition bei $t_{\text{prüf}} = 8\text{h}$ und $c_{\text{Lösung}} = 7\%$

	$m_{U_i,0}$ in g	m_{U_i} in g	Δm_{U_i} in g	s_{U_i} in g	s_{kammer} in mgCl/m ² *d	F_{Cl}
1	37,7750	38,3023	0,5273	0,3199	122178	81
2	39,1455	39,6701	0,5246	0,3182	121552	81
3	37,6922	38,2129	0,5207	0,3159	120648	80
4	37,8768	38,4081	0,5313	0,3223	123104	82
5	37,1288	37,6583	0,5295	0,3212	122687	82
6	37,4310	37,9540	0,5230	0,3173	121181	81
7	37,9417	38,4629	0,5212	0,3162	120764	81
8	37,8586	38,3826	0,5240	0,3179	121413	81
9	37,2205	37,7541	0,5336	0,3237	123637	82
Mittelwert	37,7856	38,3117	0,5261	0,3192	121907	81
Standardabweichung	0,5266	0,5252	0,0041	0,0025	943	0,6

Abbildung A-13: Örtliche Verteilung des Salznebels bei $t_{\text{prüf}} = 8\text{h}$ und $c_{\text{Lösung}} = 7\%$

A.3 Monitoring der Prüfkammer- und Probentemperatur

Tabelle A-16: Messwerte der Klimakammer und Temperatursensoren bei einer gewünschten Prüftemperatur von 35°C

$t_{\text{prüf}}$ in h	T_{Kammer} in °C	T_{S1} in °C	T_{S2} (Probe) in °C	T_{S3} in °C
-1	23,9	23,4	23,8	23,1
-0,5	35,6	33	32,4	33,3
0	35,1	35	34,9	35,1
0,5	35	34,9	34,9	35,1
1	35	34,9	34,9	35,1
1,5	35,1	34,9	34,9	35,1
2	35	35	34,9	35,1
2,5	35	35	34,9	35,1
3	35,1	35,1	35	35,1
3,5	35	34,9	34,9	35,1
4	35,1	35	34,9	35,1

Tabelle A-17: Messwerte der Klimakammer und Temperatursensoren bei einer gewünschten Prüftemperatur von 20°C

$t_{\text{prüf}}$ in h	T_{Kammer} in °C	T_{S1} in °C	T_{S2} (Probe) in °C	T_{S3} in °C
-1	24,6	23,9	24,4	24,3
0	20	20	20,3	20,1
0,5	19,9	20	20,1	20,1
1	20	20	20,2	20,2
1,5	20	20,1	20,2	20,1
2	19,9	20,1	20,2	20,1
2,5	20	20	20,1	20,1
3	20	20,1	20,1	20,1
3,5	19,9	20,1	20,1	20,1
4	20	20,1	20,2	20,1

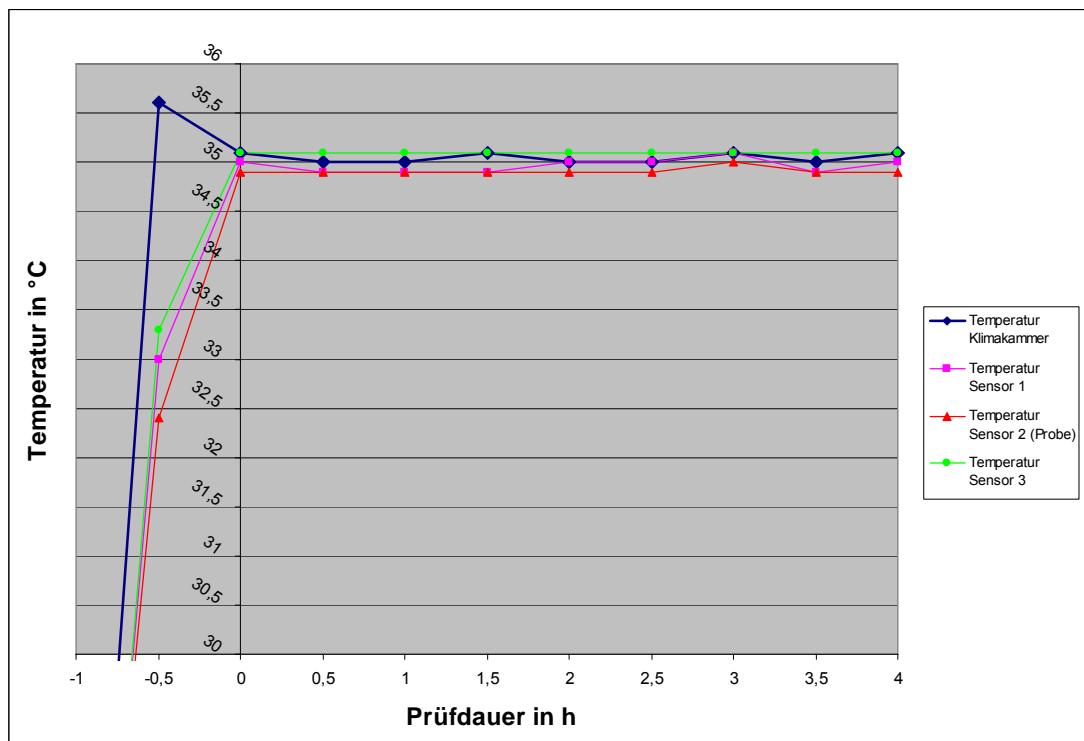


Abbildung A-14: Temperaturverlauf in der Klimakammer, der Prüfkammer und der Probe bei einer gewünschten Prüftemperatur von 20°C

Tabelle A-18: Messwerte der Klimakammer und Temperatursensoren bei einer gewünschten Prüftemperatur von 50°C

$t_{\text{prüf}}$ in h	T_{Kammer} in °C	T_{S1} in °C	$T_{S2 \text{ (Probe)}}$ in °C	T_{S3} in °C
-1	24,5	23,6	25,3	23,9
-0,5	50,8	43,5	42,1	44,2
0	50,2	49,3	49,3	49,7
0,5	50	49,6	49,9	50
1	50	49,6	49,9	50
1,5	50	49,4	49,8	49,9
2	50	49,5	49,8	49,9
2,5	50	49,6	49,9	50
3	50	49,6	49,9	50
3,5	50	49,6	49,8	50
4	50	49,5	49,7	49,9

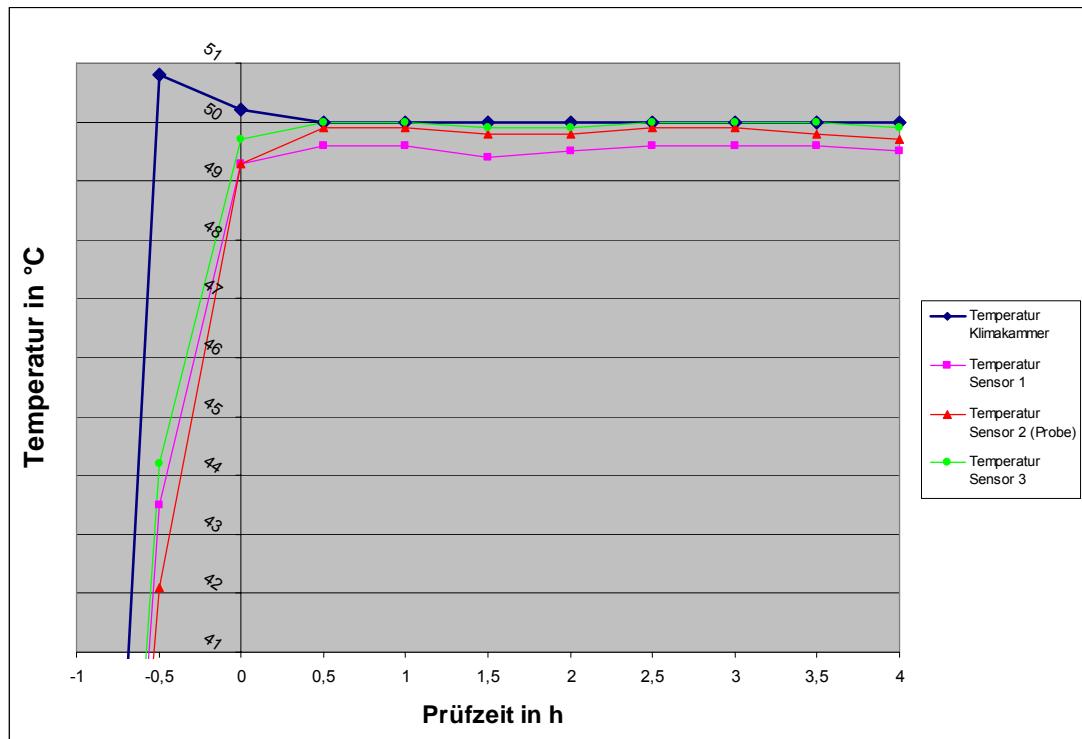


Abbildung A-15: Temperaturverlauf in der Klimakammer, der Prüfkammer und der Probe bei einer gewünschten Prüftemperatur von 50°C

A.4 Massenverlust der Gebrauchsnormale in Abhangigkeit von $t_{\text{pr}\ddot{\text{u}}\text{f}}$

Tabelle A-19: Messwerte und Ergebnisse des Massenverlustes bei $t_{\text{pr}\ddot{\text{u}}\text{f}} = 35^\circ\text{C}$ und $c_{\text{L}\ddot{\text{o}}\text{sung}} = 5\%$

Messwerte			
Eingabeparameter	Reinigungen	$m_{\text{nach}} [\text{g}]$	$\Delta m [\text{mg}]$
$m_{\text{vor}} [\text{g}] = \underline{\underline{53,655}}$	1	53,2026	452,4
$t_{\text{pr}\ddot{\text{u}}\text{f}} [\text{h}] = \underline{\underline{48}}$	2	53,1987	456,3
$A [\text{m}^2] = \underline{\underline{0,007}}$	3	53,1961	458,9
	4	53,1933	461,7
	5	53,1901	464,9
Ergebnisse	6		
$\Delta m_{\text{gesamt}} [\text{mg}] = \underline{\underline{453,3}}$	7		
$r_{\text{corr}} [\text{g/m}^2] = \underline{\underline{64,76}}$	8		
$r_{\text{corr}} [\mu\text{m/a}] = \underline{\underline{8,24}}$	9		
	10		

Tabelle A-20: Messwerte und Ergebnisse des Massenverlustes bei $t_{\text{prüf}} = 20^\circ\text{C}$ und $c_{\text{Lösung}} = 5\%$

Messwerte			
Eingabeparameter	Reinigungen	$m_{\text{nach}} [\text{g}]$	$\Delta m [\text{mg}]$
$m_{\text{vor}} [\text{g}] = 53,6058$	1	53,268	337,8
$t_{\text{prüf}} [\text{h}] = 48$	2	53,2635	342,3
$A [\text{m}^2] = 0,007$	3	53,2592	346,6
	4	53,2542	351,6
	5	53,2524	353,4
Ergebnisse	6		
$\Delta m_{\text{gesamt}} [\text{mg}] = 338,91$	7		
$r_{\text{corr}} [\text{g/m}^2] = 48,42$	8		
$r_{\text{corr}} [\mu\text{m/a}] = 6,16$	9		
	10		

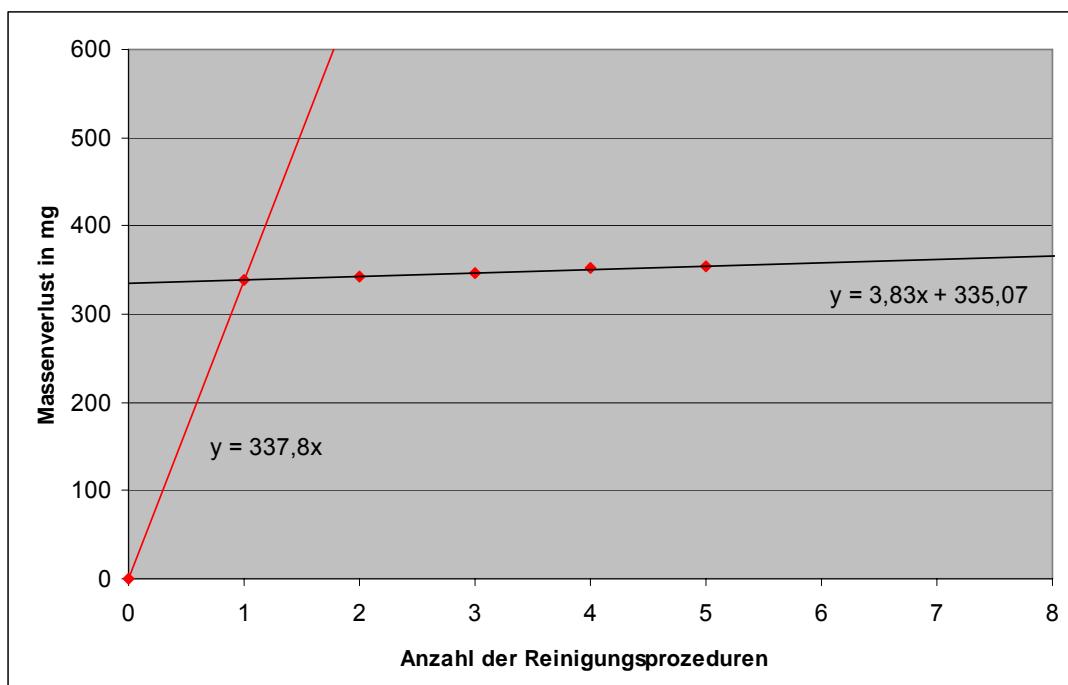
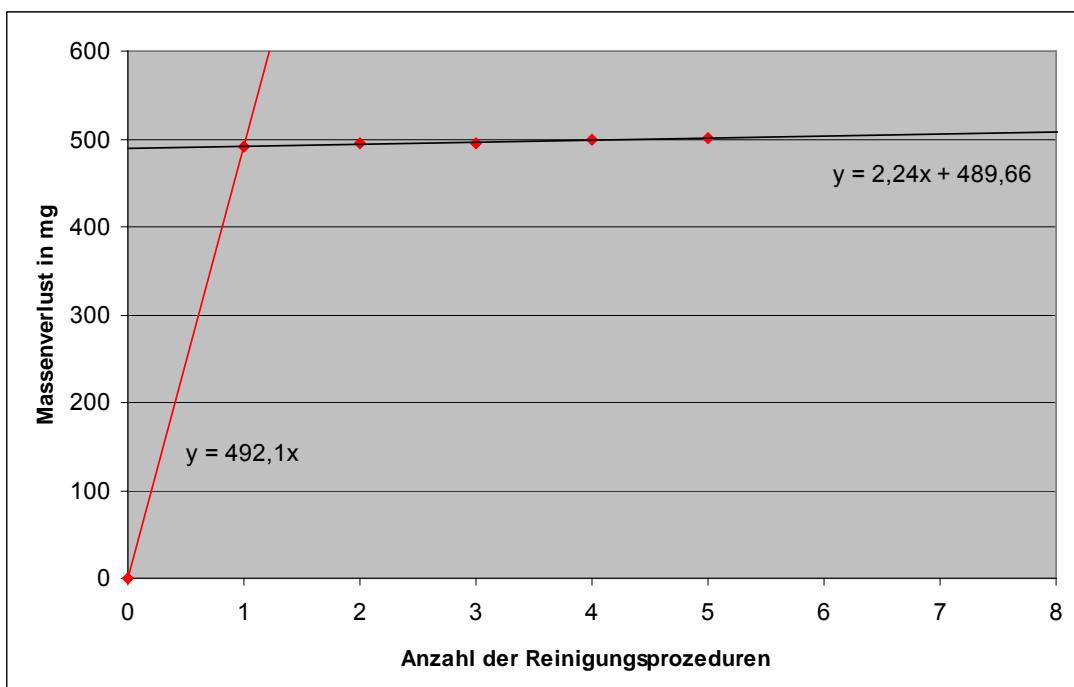
Abbildung A-16: Diagramm zur Ermittlung des korrosionsbedingten Massenverlustes bei $t_{\text{prüf}} = 35^\circ\text{C}$ und $c_{\text{Lösung}} = 5\%$

Tabelle A-21: Messwerte und Ergebnisse des Massenverlustes bei $t_{\text{prüf}} = 50^\circ\text{C}$ und $c_{\text{Lösung}} = 5\%$

Messwerte			
Eingabeparameter	Reinigungen	$m_{\text{nach}} [\text{g}]$	$\Delta m [\text{mg}]$
$m_{\text{vor}} [\text{g}] = \underline{\underline{53,7033}}$	1	53,2112	492,1
$t_{\text{prüf}} [\text{h}] = \underline{\underline{48}}$	2	53,2091	494,2
$A [\text{m}^2] = \underline{\underline{0,007}}$	3	53,2072	496,1
	4	53,2043	499
	5	53,2026	500,7
Ergebnisse	6		
$\Delta m_{\text{gesamt}} [\text{mg}] = \underline{\underline{498,9}}$	7		
$r_{\text{corr}} [\text{g/m}^2] = \underline{\underline{71,27}}$	8		
$r_{\text{corr}} [\mu\text{m/a}] = \underline{\underline{9,07}}$	9		
	10		

Abbildung A-17: Diagramm zur Ermittlung des korrosionsbedingten Massenverlustes bei $t_{\text{prüf}} = 50^\circ\text{C}$ und $c_{\text{Lösung}} = 5\%$

A.5 Massenverlust der Gebrauchsnormale in Abhängigkeit von Lösung

Tabelle A-22: Messwerte und Ergebnisse des Massenverlustes bei $t_{\text{prüf}} = 35^\circ\text{C}$ und $c_{\text{Lösung}} = 7\%$

Messwerte			
Eingabeparameter	Reinigungen	$m_i [\text{g}]$	$\Delta m_i [\text{mg}]$
$m_0 [\text{g}] = 53,6841$	1	53,2065	477,6
$t_{\text{prüf}} [\text{h}] = 48$	2	53,203	481,1
$A [\text{m}^2] = 0,007$	3	53,1992	484,9
	4	53,1958	488,3
	5	53,1922	491,9
Ergebnisse	6		
$\Delta m_{\text{gesamt}} [\text{mg}] = 477,6$	7		
$r_{\text{corr}} [\text{g/m}^2] = 68,23$	8		
$r_{\text{corr}} [\mu\text{m/a}] = 8,68$	9		
	10		

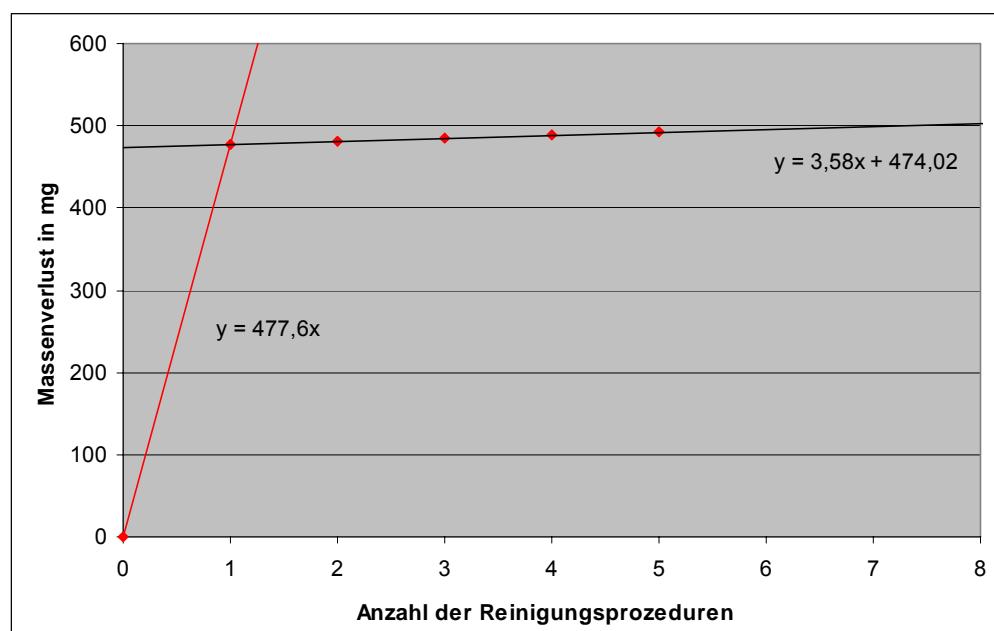
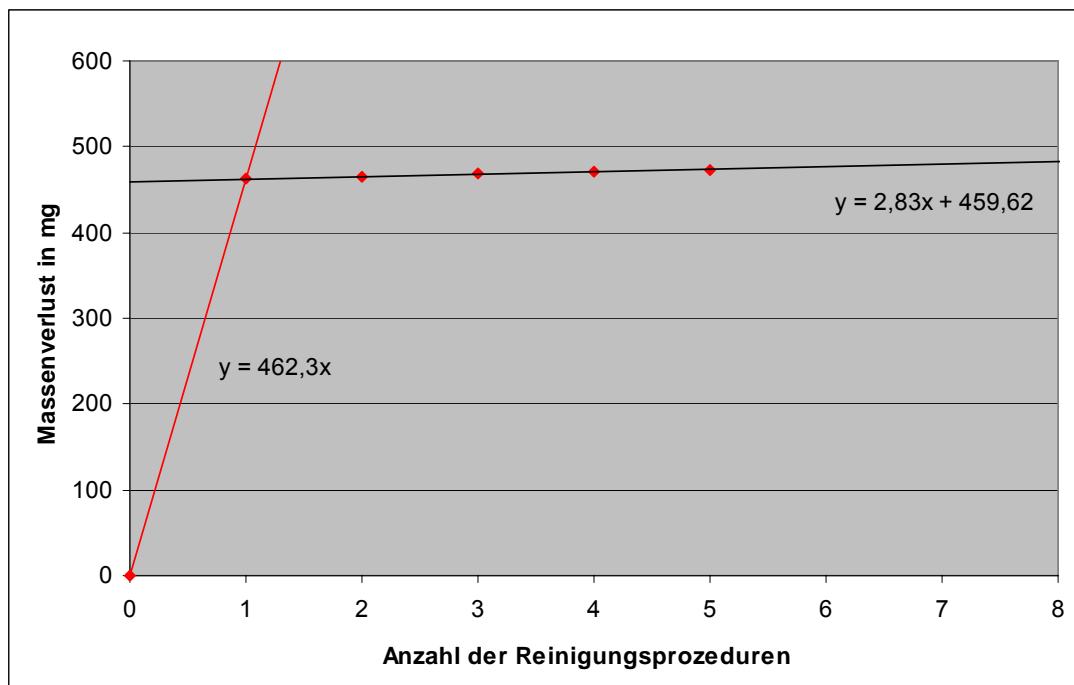
Abbildung A-18: Diagramm zur Ermittlung des korrosionsbedingten Massenverlustes bei $t_{\text{prüf}} = 35^\circ\text{C}$ und $c_{\text{Lösung}} = 7\%$

Tabelle A-23: Messwerte und Ergebnisse des Massenverlustes bei $t_{\text{prüf}} = 35^\circ\text{C}$ und $c_{\text{Lösung}} = 3,5\%$

Messwerte			
Eingabeparameter	Reinigungen	$m_i [\text{g}]$	$\Delta m_i [\text{mg}]$
$m_0 [\text{g}] = \underline{\underline{53,6705}}$	1	53,2082	462,3
$t_{\text{prüf}} [\text{h}] = \underline{\underline{48}}$	2	53,2053	465,2
$A [\text{m}^2] = \underline{\underline{0,007}}$	3	53,2023	468,2
	4	53,1995	471
	5	53,1968	473,7
Ergebnisse	6		
$\Delta m_{\text{gesamt}} [\text{mg}] = \underline{\underline{450,25}}$	7		
$r_{\text{corr}} [\text{g/m}^2] = \underline{\underline{64,32}}$	8		
$r_{\text{corr}} [\mu\text{m/a}] = \underline{\underline{8,18}}$	9		
	10		

Abbildung A-19: Diagramm zur Ermittlung des korrosionsbedingten Massenverlustes bei $t_{\text{prüf}} = 35^\circ\text{C}$ und $c_{\text{Lösung}} = 3,5\%$

A.6 Berechnung der Korrosionsrate von Stahl unter Freibewitterung

Tabelle A-24: Werte zur Berechnung der Korrosionsrate von Stahl in Abhängigkeit von T in °C

T in °C	τ in h/a	S in mg/m²d	P in mg/m²d	r_{corr} in µm/a	Kategorie nach ISO 9223
0	7884	1	0	2,26	C1
5	7884	1	0	2,89	C1
10	7884	1	0	3,69	C1
15	7884	1	0	4,72	C1
20	7884	1	0	6,03	C1
25	7884	1	0	7,70	C1
30	7884	1	0	9,84	C1
35	7884	1	0	12,57	C2
40	7884	1	0	16,06	C2
45	7884	1	0	20,51	C2
50	7884	1	0	26,21	C3
55	7884	1	0	33,48	C3
60	7884	1	0	42,78	C3
65	7884	1	0	54,65	C4
70	7884	1	0	69,83	C4

Tabelle A-25: Werte zur Berechnung der Korrosionsrate von Stahl in Abhängigkeit von S in mg/m²*d

T in °C	τ in h/a	S in mg/m²d	P in mg/m²d	r_{corr} in µm/a	Kategorie nach ISO 9223
35	7884	0	0	0,00	C1
35	7884	5	0	26,77	C3
35	7884	10	0	37,09	C3
35	7884	20	0	51,37	C4
35	7884	30	0	62,15	C4
35	7884	40	0	71,15	C4
35	7884	50	0	79,02	C4
35	7884	60	0	86,09	C5
35	7884	70	0	92,56	C5
35	7884	80	0	98,55	C5
35	7884	90	0	104,16	C5
35	7884	100	0	109,45	C5
35	7884	110	0	114,46	C5
35	7884	120	0	119,24	C5
35	7884	130	0	123,81	C5

B Fotos des Prüfstandes

Abbildung A-20: Klimakammer zur Einstellung der Prüftemperatur



Abbildung A-21: Prüfkammer mit Verschlussystem und Probehalter in Klimakammer

Literaturverzeichnis

- [Cal03] L.M. Calle, L.G. MacDowell: 35 Years Of Corrosion Protection At The Kennedy Space Center, p. 3-4, 2003
- [Cho01] M. Chomka, T. Petelski: *Sea salt concentration in the surf zone*, Abstracts of the European Aerosol Conference, 2001
- [Duf06] Duffie, John; Beckman, William: *Solar Engineering of Thermal Processes*, 3. Auflage, Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, 2006
- [DWD90] Deutscher Wetterdienst: *Gutachten über den Salzgehalt der Luft in Meeresnähe*, Meteorologisches Observatorium Hamburg, 1990
- [Has08] A.W. Hassel, S. Bonk, S. Tsuri, M. Stratmann: A universal alternating immersion simulator for accelerated cyclic corrosion tests, Materials and Corrosion, 02/2008
- [IEC68252] International Electrotechnical Commission: IEC 68-2-52 Environmental Testing – Part 2: Tests – Test Kb: Salt mist, cyclic (sodium chloride solution), 1996
- [ISO11130] Internationale Organisation für Normung: DIN EN ISO 11130 Corrosion of metals and alloys – Alternate immersion test in salt solution, Entwurf 2007
- [ISO8407] Internationale Organisation für Normung: ISO 8407 Corrosion of metals and alloys – Removal of corrosion products from corrosion test specimens, 1991
- [ISO9223] Internationale Organisation für Normung: ISO 9223 Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of atmospheres – Classification, 1992
- [ISO9224] Internationale Organisation für Normung: ISO 9224 Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of atmospheres – Guiding values for the corrosivity categories, 1992
- [ISO9225] Internationale Organisation für Normung: ISO 9225 Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of atmospheres – Mesurement of pollution, 1992
- [ISO9226] Internationale Organisation für Normung: ISO 9226 Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of atmospheres – Determination of corrosion rate of standard specimens for the evaluation of corrosivity, 1992

- [ISO9227] Internationale Organisation für Normung: DIN EN ISO 9227 Corrosion tests in artificial atmospheres – Salt spray tests, 2006
- [Kae03] Kaesche, Helmut: Corrosion of Metals – Physicochemical Principles and Current Problems, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2003
- [Kun02] Kunze, Udo R., Schwedt, Georg: *Grundlagen der qualitativen und quantitativen Analyse*, 5., überarbeitete Auflage, WILEY-VCH Verlag, 2002
- [Lee99] G. de Leeuw: Sea spray aerosol production from waves breaking in the surf zone, *J. Aeorsol Sci.* Vol. 30, p. 63-64, 1999
- [Lei03] J. Leissner, *The Effects of Air Pollution on Glass*, Air Pollution Reviews – Vol.2, p.249-263, 2003
- [Mor00] M. Morcillo, B. Chico, L. Marcia, E. Otero: Salinity in marine atmospheric corrosion: its dependence on the wind regime existing in the tide, *Corrosion Science* 42, 2000
- [Qua03] Quaschning, Volker: *Regenerative Energiesysteme, Technologie – Berechnung – Simulation*, 3.Auflage, Carl Hanser Verlag München Wien, 2003
- [Qua99] V. Quaschning, A. Grochowski, R. Hanitsch: Alterungerscheinungen bei Photovoltaikmodulen – Langzeiterfahrung einer PV-Testanlage an der TU-Berlin, 14. Symposium Photovoltaische Solarenergie, 1999
- [Roe00] Roedel, Walter: *Physik unserer Umwelt: Die Atmosphäre*, 3. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, p. 395-440, 2000
- [Sch03] Schmidhuber, Helge: Modultechnologie, Literatur- und Marktrecherche zur Einkapselung von kristallinen Silizium-Solarzellen, Interne Studie ISE, 2003
- [Sch04] G. Schmitt: Der Korrosionsbegriff bei nichtmetallischen Werkstoffen, *Materials and Corrosion* 55, No.5, 2004
- [Str07] Streicher, Elke; Drück, Harald: *Abschlussbericht zum Vorhaben Quantifizierung des Alterungsverhalten solarthermischer Kollektoren*, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik, Universität Stuttgart, 2007
- [Tid03] J. Tidblad, V. Kucera: *Air Pollution Damage To Metals*, Air Pollution Reviews – Vol.2, p.227-244, 2003

- [War00] Warneck, Peter: *Chemistry of the Natural Atmosphere*, 2. Auflage, Academic Press, p. 346-405, 2000
- [Win00] Winston, Revie Richard: *Uhlig's Corrosion Handbook*, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., p. 305-321, 2000
- [Wra85] Wranglèn, Gösta: Korrosion und Korrosionsschutz: Grundlagen, Vorgänge, Schutzmaßnahmen, Prüfungen, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York Tokyo, 1985

Quellenverzeichnis

- [Bay04] Bayer Material Science AG: *Makrolon, Chemische Beständigkeit*, Business Development – Polycarbonate, 2004
- [BSW08] Bundesverband Solarwirtschaft e.V.: Statistische Zahlen der deutschen Photovoltaikbranche / Statistische Zahlen der deutschen Solarthermiebranche, BSW-Solar/www.solarwirtschaft.de, 2008
- [DIN60751] DIN EN 60751: Industrielle Platin-Widerstandsthermometer und Platin-Meßwiderstände, Deutsche Fassung EN 60751, 1995
- [GfK08] GfKORR - Gesellschaft für Korrosionsschutz e.V.: *Unsere Aufgaben und Ziele*, <http://www.gfkorr.de/>
- [Ini08] Initiative Solarwärme Plus (Hrsg.): *Flachkollektoren*. <http://www.solarwaerme-plus.info/Flachkollektoren.34.1.html>
- [ITC08] Instituto Tecnológico De Canarias, Manifestaciones de la Corrosión en Pozo Izquierdo (Instalaciones de ITC, S.A. en Gran Canaria), 2008
- [Kal96] Kalusche, Dietmar: *Ökologie in Zahlen*, Gustav Fischer Verlag Stuttgart, 1996
- [Man08] Manier, Gerhard: *Phasenübergänge des Wassers (an Oberflächen)*, Beitrag zur GUS Arbeitskreissitzung, Balingen, 2008
- [Mas08] Masterflex AG: *Chemische Beständigkeit, PVC* http://www.masterflex.de/de/produktkatalog/Katalog/Register_27/Bestandigkeitsliste/n.htm
- [Met08] Meteotest Bern: http://www.meteonorm.com/media/maps_online/gh_map_europe.pdf
- [Sch08] Schulte Elektronik GmbH: *Produktinformationen zum U-3002-E, Technische Daten*, <http://www.schulte-elektronik.de/www.ultraschallvernebler.de/index.htm>
- [Sol08] Solarintegration.de, Informationsdienst für solares Gestalten und Bauen: *Dünnenschicht-Solarzellen*, <http://www.solarintegration.de/index.php?id=285>

- [Tid02] J. Tidblad, V. Kucera, A.A. Mikhailov, D. Knotkova: *Improvement on the ISO classification system based on dose-response functions describing the corrosivity of outdoor atmospheres*, Outdoor Atmospheric Corrosion ASTM STP 1421, H. E. Townsend Ed., American Society for Testing and Materials International, West Conshocken, PA, 2002
- [Vie08] Viessmann Werke GmbH (Hrsg.): *Solarsysteme*.
<http://www.viessmann.de/de/products/solar-systeme.html>
- [EuK06] Europäische Kommission: *Grünbuch, Die künftige Meerespolitik der EU: Eine europäische Vision für Ozeane und Meere*, Juni 2006,

Erklärung zur Diplomarbeit

Hiermit versichere ich, dass ich diese Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst habe.

Bei der Abfassung der Arbeit sind nur die angegebenen Quellen benutzt worden. Wörtlich oder dem Sinne nach entnommene Stellen sind als solche gekennzeichnet.

Freiburg, den 16.10.2008

Jakob Grimm

Ich bin damit einverstanden, dass meine Arbeit veröffentlicht wird, insbesondere dass die Arbeit Dritten zur Einsichtnahme vorgelegt wird. Eine Anfertigung von Kopien zur Weitergabe an Dritte, darf erst nach vorhergehender Absprache erfolgen.

Freiburg, den 16.10.2008

Jakob Grimm