

Entwicklung eines Vorhersagemodells für die potential-induzierte Degradation in Abhängigkeit von lokalen Umweltbedingungen

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

Der

Naturwissenschaftlichen Fakultät II - Chemie,
Physik und Mathematik

der Martin-Luther-Universität
Halle-Wittenberg

vorgelegt von

Herrn Simon Koch

geb. am 18.07.1982 in Linz (Rhein)

Betreuer: Herr Prof. Dr. R. Wehrspohn

Gutachter: Herr Prof. Dr. R. Scheer
Herr Prof. Dr. G. Hahn

Tag der Verteidigung: 28.03.2019

Kurzzusammenfassung

Ziel dieser Arbeit sind fundierte Abschätzungen über die Ausfallzeitpunkte von PID-anfälligen Solarmodulen in Abhängigkeit von unterschiedlichen Standorten und den dort vorherrschenden klimatischen Bedingungen. Zu diesem Zweck wurde ein iteratives Vorhersagemodell entwickelt, mit dessen Hilfe anhand von Wetterdaten der Ausfallzeitpunkt eines definierten Solarmodulaufbaus berechnen kann.

Das Vorhersagemodell basiert auf den Ergebnissen der Untersuchung des PID-Effekts in Abhängigkeit von variierenden Umgebungsbedingungen im Labor. Zu diesem Zweck wurden Proben bekannter Zusammensetzung hergestellt, die anschließend unterschiedlichen klimatischen Bedingungen ausgesetzt wurden. Dabei wurde grundlegend zwischen Degradations- und Regenerationsmechanismen unterschieden, bei denen jeweils verschiedene beschleunigende und verzögernde Abhängigkeiten auf die PID bestimmt und quantifiziert wurden. Aufgrund der strikten separaten Betrachtung der jeweiligen Vorgänge konnte die Wirkung der Einstrahlung auf die Degradation sowie weiterer Abhängigkeiten diverser Einflussfaktoren auf die Regeneration beschrieben werden.

Daneben wurde mittels eines eigens für diesen Zweck entwickelten Messsystems das Verhalten von Proben unter realen Bedingungen an zwei unterschiedlichen Standorten in Europa (Berlin, Nikosia) betrachtet. Anhand dieser Untersuchungen konnte der größte Teil der im Labor erbrachten Ergebnisse bestätigt und wichtige Erkenntnisse für das Verständnis der PID-Entwicklung unter realen Bedingungen gewonnen werden. Die während der gesamten Tageszeit andauernden Messungen erlaubten es, die Entwicklungen des Shunt-Widerstands – dem in dieser Arbeit vorzugsweise verwendeten PID-Indikator – von Proben kontinuierlich aufzuzeichnen. Somit konnte beispielsweise der große Einfluss der Oberflächenleitfähigkeit im Verlauf eines Tages verdeutlicht werden. Darüber hinaus war es möglich, die Existenz von Regenerationsphasen unter Systemspannungsbelastung nachzuweisen.

Ausgehend von den Ergebnissen wurde iterativ in drei Stufen ein PID-Vorhersagemodell entwickelt. Das Vorhersagemodell erlaubte es, die Ausfallzeit der Proben an verschiedenartigen geographischen Standorten miteinander zu vergleichen. Da die Untersuchungen in dieser Arbeit zum großen Teil auf Ein-Zellen-Minimodulen basieren, wurde abschließend die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf handelsüblichen 60-Zellen-Module überprüft.

Abstract

The aim of this work is to provide information about the failure times of PID-susceptible solar modules depending on different locations and the prevailing climatic conditions. For this purpose, an iterative predictive model was developed, which can calculate the failure time of a defined solar module array on the basis of weather data.

The predictive model is based on the study of the PID effect as a function of varying ambient conditions in the laboratory. Samples of known composition were manufactured, which were then exposed to different climatic conditions. A fundamental distinction was made between degradation and regeneration mechanisms, in which different accelerating and decelerating factors on PID were determined and quantified. Due to the strict and separate processes, the effect of the irradiation on the degradation could be determined - as well as various other factors influencing the regeneration.

In addition, the behavior of samples under real conditions at two different locations in Europe (Berlin, Nicosia) was investigated using a measuring system specifically developed for this purpose. Based on these studies, most of the results obtained in the laboratory were confirmed and important insights about the development of PID under real conditions was obtained. Taking steady measurements throughout the day enabled the continuous monitoring of the development of the shunt resistance - the preferred PID indicator used in this work. This demonstrates, for example, the great influence of surface conductivity during the course of a day. In addition, it was possible to detect the existence of the regeneration phases under system voltage stress.

From these results, a PID prediction model was developed iteratively in three stages. The predictive model allows a comparison of the downtimes of the samples at various climatic locations. Since the investigations in this work are largely based on one-cell minimum modules, the transferability of the results to commercial 60-cell modules was finally verified.

Inhaltsverzeichnis

Kurzzusammenfassung	i
Abstract	ii
Abbildungsverzeichnis	vii
Tabellenverzeichnis	xiii
Abkürzungsverzeichnis	xvi
Symbolverzeichnis	xvii
1. Einleitung	1
1.1. Motivation	2
1.2. Einführung in das Themenfeld potential-induzierte Degradation	3
1.3. Zielstellung und Methodik	8
1.4. Aufbau der Arbeit	11
2. Grundlagen	12
2.1. Die einzelnen Komponenten eines Solarkraftwerks	12
2.1.1. Herstellung und Funktionsweise einer Solarzelle	12
2.1.2. Herstellung und Aufbau eines Solarmoduls	16
2.1.3. Aufbau von Solarkraftwerken	16
2.1.4. Charakteristische Kenngrößen	18
2.2. Grundlagen des Stofftransports in Halbleitern und Nichtleitern	19
2.2.1. Drift	19
2.2.2. Diffusion	20
2.3. Materialien	23
2.3.1. Glas	23
2.3.2. Einbettungsmaterial	24
2.4. Wachstumsfunktionen	25
3. Charakterisierung des PID-Effekts	29
3.1. Leistungsmessung	29
3.2. Partielle Dunkelkennlinienmessung zur Bestimmung des Shunt-Widerstands	32
3.3. Elektrolumineszenzmessung	33

4. Experimenteller Teil	36
4.1. Geräteentwicklung	36
4.1.1. Allgemeiner Versuchsaufbau	36
4.1.2. Indoor-Messbox zur Messung des Shunt-Widerstands	37
4.1.3. Universal-Lichtdichte-Forschungs-Installation	38
4.2. Prüfkörperherstellung	40
4.3. Versuchsaufbau zur Untersuchung der Degradation unter wechselnden Umweltbedingungen	43
4.4. Versuchsaufbau zur Untersuchung der Regeneration unter wechselnden Umweltbedingungen	43
4.5. Versuchsaufbau zur Beobachtung des Langzeitverhaltens der PID unter realitätsnahen Bedingungen	44
4.6. Versuchsaufbau zur Beobachtung des Kurzzeitverhaltens der PID	46
4.7. Analyse der im Labor und unter realen Bedingungen erfassten Daten . . .	47
4.7.1. Analyse von Degradationsverläufen	48
4.7.2. Analyse von Regenerationsverläufen	49
4.7.3. Analyse der Messungen unter realen Bedingungen	51
4.7.4. Statistische Analyse der Verteilung PID-betroffener Zellen in re- alen Solarmodulen	51
4.8. Fehlerbetrachtung	53
4.8.1. Der Leckstrom als PID-Indikator	53
4.8.2. Klimaschrank	54
4.8.3. Probenvarianz	55
4.8.4. Eindiodenmodell	57
4.8.5. Messgenauigkeit des Blitzlichtsonnensimulators	58
4.8.6. Messgenauigkeit der partiellen Dunkelkennlinienmessung	60
4.8.7. Regeneration durch Lagerung	62
4.8.8. Auswertung und Erstellung von EL-Aufnahmen	63
4.8.9. Konstante Spannung während der PID-Untersuchungen unter re- alen Bedingungen	64
4.8.10. Ausprägung des elektrischen Felds bei Ein-Zellen- und 60-Zellen- Modulen	65
5. Ergebnisse	67
5.1. Degradationsuntersuchungen	67
5.1.1. Einfluss der Kontaktierungsart	67
5.1.2. Einfluss der Temperatur	69
5.1.3. Einfluss der Spannung	71
5.1.4. Einfluss der Einstrahlung	73
5.1.5. Zusammenfassung	76
5.2. Die Sonderstellung der Luftfeuchtigkeit	77
5.3. Regenerationsuntersuchungen	79
5.3.1. Einfluss der Degradationsart	80

Inhaltsverzeichnis

5.3.2.	Einfluss der Zyklenanzahl	81
5.3.3.	Einfluss der Temperatur	84
5.3.4.	Einfluss der Einstrahlung	85
5.3.5.	Zusammenfassung	86
5.4.	Untersuchung des Langzeitverhaltens der PID	87
5.4.1.	Der Einfluss saisonaler Unterschiede	89
5.4.2.	Degradation und Regeneration im Tageswechsel	90
5.4.3.	Einfluss von Regentagen	91
5.4.4.	Elektrolumineszenzanalyse	92
5.4.5.	Zusammenfassung	93
5.5.	Untersuchung des Kurzzeitverhaltens der PID	94
5.5.1.	Messkampagne Berlin	95
5.5.2.	Messkampagne Nikosia	97
5.5.3.	Zusammenfassung	99
5.6.	Untersuchungen auf der Basis von 60-Zellen-Modulen	100
5.6.1.	Allgemeine Häufigkeitsverteilung PID-betroffener Zellen innerhalb von Modulen auf Basis von Elektrolumineszenzaufnahmen	100
5.6.2.	Einfluss der Oberflächenkontamination auf die Häufigkeitsverteilung PID-betroffener Zellen	101
5.6.3.	Einfluss der Klimazone auf die Häufigkeitsverteilung PID-betroffener Zellen	103
5.6.4.	Zusammenfassung	104
6.	Interpretation und Diskussion der Versuchsergebnisse	105
6.1.	Schlussfolgerungen der PID-Untersuchungen	105
6.1.1.	Die Oberflächenleitfähigkeit und das dadurch variierende elektrische Feld	105
6.1.2.	Der Einfluss der Einstrahlung auf die Degradation	108
6.1.3.	Die Wirkungsweise der Regeneration	109
6.1.4.	Schlussfolgerungen aus der Beobachtung des Langzeitverhaltens der PID	112
6.1.5.	Einfluss von realen Umweltbedingungen auf die Oberflächenleitfähigkeit, den Spannungsabfall und somit auf den Verlauf der PID	113
6.2.	Schlussfolgerungen anhand der statistischen Auswertung realer PV-Module auf Basis von Elektrolumineszenzaufnahmen	117
6.3.	Bestimmung der Aktivierungsenergien von Degradation und Regeneration	119
7.	Vorhersagemodell für die PID	125
7.1.	Iteratives Modellkonzept	125
7.2.	Das Degradationsmodell	127
7.3.	Das Regenerationsmodell	131
7.4.	Das Kurzzeitmodell	134

Inhaltsverzeichnis

7.5. Validierung der Simulationsergebnisse	135
7.5.1. Ein-Zellen-Minimodule	136
7.5.2. 60-Zellen-Module	138
7.5.3. Zusammenfassung und Bewertung der Simulationsmodelle	143
8. Resümee und Ausblick	145
A.	148
A.1. PID-Untersuchung an unterschiedlichen Einbettungsmaterialien	148
A.2. Aufbereitung der Eingangsgrößen für das Vorhersagemodell	149
A.2.1. Ermittlung der Einstrahlung auf eine geneigte Fläche	149
A.2.2. Ermittlung der Zelltemperatur	150
A.2.3. Ermittlung der Stresszeit	152
A.3. Schaltpläne	153
Literaturverzeichnis	157
Publikationsliste	169
Lebenslauf	172
Eidesstattliche Versicherung	173
Danksagung	174

Abbildungsverzeichnis

1.1. Übersicht der von der Photovoltaik Institut Berlin AG untersuchten PV-Kraftwerke mit PID-Problematik bis 2013 (grüne Sterne) und bis 2016 (gelbe, orange und rote Sterne)	3
1.2. Zusammenhang zwischen Shunt-Widerstand (R_{SH}) und Leistung (P_{MPP}) während eines idealisierten PID-Verlaufs	6
1.3. Schematische Zeichnung der grundsätzlichen Randbedingungen der in dieser Arbeit durchgeführten Experimente	9
2.1. Schematischer Aufbau einer kristallinen p-dotierten Siliziumsolarzelle . . .	13
2.2. Strom-Spannungs-Kennlinie einer Solarzelle (Bild aus [Wag99] / modifiziert)	14
2.3. In dem Ersatzschaltbild des Eindiodenmodells wird der durch den absorbierten Photostrom erzeugte Strom I_{PH} durch den Diodenstrom I_{01} und den über dem Parallelwiderstand fließende Strom I_{SH} vermindert und resultiert in den nach außen dringenden Strom I	15
2.4. Materialaufbau eines Solarmoduls [Kae16]	16
2.5. Schaltbild eines typischen Photovoltaik-Kraftwerks. Die PV-Modulstränge werden über den Generatoranschlusskasten an den Wechselrichter geführt, der an das Stromnetz angeschlossen ist. Mittels DC-Hauptschalter können die Modulstränge vom Wechselrichter getrennt werden. Die Überspannungsableiter sind über die Potentialausgleichsschiene mit der Erde verbunden. Ein Wechselrichter mit Transformator kann ebenso mit der Erde verbunden werden.	17
2.6. Darstellung der Konzentration c eines eindiffundierenden Stoffes über der Materialtiefe zu verschiedenen Zeitpunkten t_1 und t_2 in Abhängigkeit von der Stoffquelle (Bild aus [Mue07] / modifiziert)	22
2.7. Mikrostruktur Natron-Kalk-Glas [Wer16]	23
2.8. Verlauf einer S-Funktion, am Beispiel eines normierten R_{SH} -Degradationsverlaufs, in Abhängigkeit der Parameter s_1 und p_1 mit dem Startwert $A_1 = 1$ und der unteren Schranke $A_2 = 0$	27
3.1. Hellkennlinie einer PID-belasteten (schwarz) und unbelasteten Probe (orange). Der Ausschnitt zeigt den Bereich der Kennlinie, an dem der Shunt-Widerstand durch die jeweilige Steigung bestimmt wird.	31
3.2. Schematischer Aufbau der Shunt-Widerstandsbestimmung während PID-Versuchen nach Taubitz [Tau13] und Markierung des Bereiches der Dunkelkennlinie (roter Kasten), der durch die Messung erfasst wird	32

3.3. Temperaturabhängigkeit des R_{SH} der Referenzprobe für die Temperaturkorrektur	33
3.4. Die linke Abbildung zeigt den Standardbetriebsfall einer Solarzelle. Die Zelle wird von einer Lichtquelle bestrahlt und generiert Elektronen-Loch-Paare. Im rechten Bild ist die Situation während einer EL-Messung dargestellt. Eine externe Stromquelle erzeugt einen Ladungsträgerüberschuss im Halbleitermaterial, welcher zu Rekombinationen führt. Der Teil der strahlenden Rekombination kann von einer speziellen Kamera aufgenommen und zu einer EL-Aufnahme verarbeitet werden [Kra09].	34
3.5. EL-Aufnahmen mit relativen Shunt-Widerstandshöhe einer kristallinen Zelle in Prozent während eines typischen PID-Verlaufs	35
4.1. Positionierung der Proben mit Masse- und Spannungsanschluss in dem Klimaschrank (links), zugehöriges Ersatzschaltbild (rechts)	36
4.2. Prinzipschaltbild der Indoor-Messboxschaltung	37
4.3. Software-Oberfläche der Indoor-Messbox und Prinzipschaltung der verwendeten Relaisschaltung	38
4.4. Prinzipschaltbild der ULFI	39
4.5. Übersicht der ULFI-Komponenten und Darstellung der zwei Hauptbetriebszustände: Spannungsbelastung (links) und Shunt-Widerstandsmessung (rechts)	40
4.6. Aufbau und Abmessungen der Ein-Zellen-Minimodule	42
4.7. Halterung der Probenaufnahme auf dem Dachlabor des PI Berlin	45
4.8. Messaufbau der Outdoor-Versuche an der University of Cyprus	47
4.9. Ein typischer Degradationsverlauf kann in die drei Phasen Induktions-, Degradations- und Stabilisierungsphase unterteilt werden, welche durch zwei Punkte eindeutig definiert werden.	48
4.10. Repräsentativer Regenerationsverlauf unterteilt in drei Phasen: Transitions-, Regenerations- und Stabilisierungsphase	50
4.11. Auswertungsbeispiel einer EL-Aufnahme, in der die von PID betroffenen Zellen mit „1“ (PID) oder „0“ (kein PID) gekennzeichnet sind.	52
4.12. Stichprobenhafte Brechungsindexmessung der verwendeten Solarzellen	55
4.13. Einfluss der Änderungen des Brechungsindex (engl.: refractive index) auf die PID-Anfälligkeit bei verschiedenen ARC-Abscheideprozeduren. Der orange Bereich markiert den Brechungsindexbereich, in welchem die verwendeten Zellen variieren (Bild aus [Pin10] / modifiziert).	56
4.14. EL-Aufnahme eines PV-Moduls im Anschluss einer PID-Belastung mit dem charakteristischen „Patchwork“-Muster, welches durch unterschiedliche PID-Empfindlichkeitsausprägungen der Zellen verursacht wurde	56
4.15. Streuung der Werte bei einer initialen Shunt-Widerstandsmessung links (20-fache Wiederholung) mittels Hellkennlinienmessung und bei fortgeschrittener Degradation rechts (6-fache Messwiederholung)	59

Abbildungsverzeichnis

4.16. Streuung der Werte bei einer initialen Parallelwiderstandsmessung (20-fache Wiederholung) mittels Vierleitertechnik und bei fortgeschrittener Degradation (6-fache Messwiederholung)	60
4.17. Kalibrierkurve einer stark degradierten Probe	61
4.18. Kennlinien eines Solarmoduls mit 36 Zellen bei verschiedener Globalstrahlung und den Zellentemperaturen 25 °C (grün) und 55 °C (rot) [Fho14]	64
4.19. Schematischer Aufbau eines Elektrovoltmeters [Rap17]	66
4.20. Verlauf des elektrischen Feldes, gemessen mittels Rotationsvoltmeter eines Minimoduls und eines 60-Zellen-Moduls	66
5.1. Vergleich zwischen flächiger (rot) und randkontaktierter (schwarz) Proben während eines PID-Testlaufs	68
5.2. Normierter gemittelter Shunt-Widerstandsverlauf unter PID-Belastung bei unterschiedlichen Temperaturen	70
5.3. Die Änderungen der Funktionsparameter $s_{T,1}$ und $p_{T,1}$ in Abhängigkeit von der Temperatur	70
5.4. EL-Aufnahme eines Modulstrings. In der Aufnahme sind die unterschiedlichen Ausprägungen der PID aufgrund der steigenden negativen Spannung von rechts nach links zu erkennen (Bild aus [Fra10] / modifiziert).	71
5.5. Vergleich des Shunt-Widerstandsverlaufes während eines PID-Stresstests in Abhängigkeit von der Spannung	72
5.6. Die Änderungen der Funktionsparameter $s_{S,1}$ und $p_{S,1}$ in Abhängigkeit von der Spannung U	73
5.7. Schematischer Aufbau zur Untersuchung des Strahlungseinflusses auf das PID-Verhalten	74
5.8. Degradationsverläufe bei identischen Versuchsumgebungen mit (rot) und ohne (schwarz) Bestrahlung	75
5.9. Schematischer Testaufbau zur Bestimmung der Oberflächenleitfähigkeit nach ISO 93	78
5.10. Gegenüberstellung der spezifischen Oberflächenleitfähigkeit (oben) mit dem korrespondierenden mittleren Leckstrom (unten), welche durch Änderung des relativen Feuchtigkeitslevel ein nahezu identisches Verhalten erkennen lassen.	79
5.11. Die unterschiedlichen Regenerationsverläufe bei vorangegangener Degradation Rand (rot) und flächig (schwarz)	81
5.12. Regenerationsverläufe zu Beginn mehrmaliger Degradation auf rund 30 % des Anfangswertes (links) und zugehörige Steigung der unterschiedlichen Regenerationsverläufe in Abhängigkeit von zehn aufeinander folgenden PID-Zyklen	82
5.13. Steigung der unterschiedlichen Degradationsverläufe	83
5.14. Parametervergleich im Falle von mehrzyklischer Belastung für $s_{Z,2}$, $p_{Z,2}$ und $A_{Z,2,2}$	83

Abbildungsverzeichnis

5.15. Aus den Steigungen berechneter $s_{T,2}$ -Wert bei variierender Temperatur während der Regeneration	85
5.16. Die unterschiedlichen Regenerationsverläufe während Testprozeduren mit (rot) und ohne (schwarz) Einstrahlung	86
5.17. Shunt-Widerstandsverlauf der Outdoor-Messergebnisse in Berlin. Die Säulen stehen für die durchschnittlichen Probertemperaturen pro Tag bzw. Nacht (rot: kein Regen, hellblau: Regen, dunkelblau: Schnee). Die Streuung der Messpunkte um den gemittelten Shunt-Widerstand ist durch die schwarzen Balken gekennzeichnet.	88
5.18. Outdoor-Degradationsverlauf von R_{SH} (schwarz) während des Berliner Sommers 2013 und der durch S-Funktion angepasste Verlauf (grün). Tages- und Nachttemperaturen (Säulen); Regen (hellblau) und regenfreie Tage (rot) sind ebenfalls aufgetragen.	89
5.19. Outdoor-Degradationsverlauf von R_{SH} (schwarz) während der Berliner Herbst-, Winter- und Frühjahrsmonate (lila Kasten). Tages- und Nachttemperaturen (Säulen); Regen (hellblau), Schnee (dunkelblau) und regenfreie Tage (rot) sind ebenfalls aufgetragen.	90
5.20. Shunt-Widerstandsentwicklung innerhalb von drei Tagen Anfang Juli 2013 (schwarzer Verlauf). Zusätzlich ist die durchschnittliche Tages- und Nachttemperatur aufgetragen (rote Balken). Der gestrichelte schwarze Verlauf zeigt den Gesamtalterungsverlauf der am Morgen gemessenen Shunt-Widerstände.	91
5.21. Shunt-Widerstandsentwicklung (schwarzer Verlauf) innerhalb von drei Tagen in Berlin Anfang Juli 2013, in denen Niederschlag aufgezeichnet wurde. Die durchschnittlichen Tages- und Nachttemperaturen, sind anhand der Höhe der Balken abzulesen. Die Farbe der Balken zeigt, ob im Betrachtungszeitraum Niederschlag (blau) oder kein Niederschlag (rot) beobachtet wurde. Der gestrichelte schwarze Verlauf zeigt den Gesamtalterungsverlauf der morgendlich gemessenen Shunt-Widerstände.	92
5.22. Vergleich der EL-Aufnahmen vor und nach der Freifeldbelastung 2013 in Berlin. Die drei Proben a), b) und c) zeigen zu Beginn der Messung an allen Rändern klare Kanten (links). Nach 7200 Stunden Belastung zeigen zwei von drei Proben eindeutig kurzgeschlossene Bereiche in unmittelbarer Nähe der Kontaktierung (oranger Kasten).	93
5.23. ΔR_{SH} -Verlauf zweier Proben R1 und R2 an einem sonnigen Sommertag in Berlin. Die Einstrahlung E_{ges} (gelb) und der Oberflächenstrom I_{Ob} (grün) kennzeichnen die Degradationszeiten.	95
5.24. ΔR_{SH} -Verlauf zweier Proben R1 und R2 an einem regnerischen Sommertag in Berlin. Die Einstrahlung (gelb) und der Oberflächenstrom (grün) kennzeichnen die Degradation.	96

Abbildungsverzeichnis

5.25. ΔR_{SH} -Verlauf einer Probe (blau) im Vergleich zu einer Referenzprobe (schwarz) an einem sonnigen Tag, charakterisiert durch die durchgehend hohe Einstrahlung (gelb). Die grauen Bereiche markieren die Zeiten ohne Spannungsbelastung.	98
5.26. ΔR_{SH} -Verlauf einer Probe (blau) im Vergleich zu einer Referenzprobe (schwarz) an einem regnerischen Tag, charakterisiert durch den unstetigen Einstrahlungsverlauf (gelb). Die grauen Bereiche markieren die Zeiten ohne Spannungsbelastung.	99
5.27. Aufnahme eines Modulstrangs, welcher mit einer Staubschicht bedeckt ist. Zur Veranschaulichung wurde die Oberfläche des zweiten Moduls der unteren Modulreihe von links beginnend gereinigt.	102
6.1. Ausprägung des Spannungsabfalls über der Probe bei 40°C in Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit. Die blaue Fläche markiert den Zellbereich und der Abszissenwert „0“ markiert den Beginn des Rahmens.	106
6.2. Vergleich zwischen dem mittleren Regenerationsverlauf am Tag (schwarz) und in der Nacht (grün)	111
6.3. Übersicht der einzelnen Phasen der Kurzzeitdegradation und -regeneration während eines idealisierten Tagesverlaufes	115
6.4. Der Einstrahlungsverlauf E_{ges} (gelb) beeinflusst die Degradationsphase (blau) am Morgen entscheidend	117
6.5. Gemessene und normierte R_{SH} -Verläufe unterschiedlicher Umgebungstemperaturen (oben), Anwendung der Zeit-Temperatur-Superposition (große Grafik unten) und zugehörige Amplituden-Temperatur-Verschiebung (kleine Grafik unten) für die Degradation (links) und Regeneration (rechts) . .	120
6.6. Die Verschiebungsfaktoren a_T der Degradation (rot) und Regeneration (schwarz) logarithmisch gegen $1/T$ aufgetragen	121
6.7. Drift- und Diffusionspfade der Degradation und Regeneration sowie die korrespondierenden Potentiallandschaften mit eingezeichneten Energieniveaus	123
7.1. Struktur des Gesamtmodells mit seinen einzelnen Teilmodellen: Degradationsmodell, Regenerationsmodell und Kurzzeitmodell	126
7.2. Grundlegendes Berechnungsschema für das PID-Simulationsmodell	127
7.3. Vergleich der Degradationsverläufe des Shunt-Widerstands unterschiedlicher Standorte anhand des Degradationsmodells	128
7.4. Vergleich der Degradationsverläufe unterschiedlicher Standorte anhand des Degradationsmodells in logarithmischer Darstellung	129
7.5. Entwicklung der Performance Ratio PID-betroffenen Kraftwerke in unterschiedlichen Klimaregionen (gemäßigt kontinental, gemäßigt maritim und subtropisch maritim)	130
7.6. Vergleich der unterschiedlichen Verläufe von Degradationsmodell und Regenerationsmodell in zeitlich hoch aufgelöster Darstellung	132

Abbildungsverzeichnis

7.7. Vergleich der Alterungsverläufe unterschiedlicher Standorte anhand des Regenerationsmodells	133
7.8. Vergleich der Alterungsverläufe unterschiedlicher Standorte anhand des Kurzzeitmodells	135
7.9. Simulierter Degradationsverlauf mittels Degradationsmodell (rot), Regenerationsmodell (orange) und Kurzzeitmodell (schwarz) im Vergleich zu realen Messergebnissen. Zeitperioden, in denen die relative Luftfeuchtigkeit über 65 % betrug (grün), sind ebenfalls aufgetragen.	136
7.10. Darstellung der gemessenen Modulleistung (rot) in Florida während eines Zeitraums von rund 10000 Stunden unter Spannungsbelastung	139
7.11. Unterteilung des Moduls in 15 unterschiedliche Zellpositionen und zusätzliche Unterteilung in Randzellen (rot) und Zellen im Zentrum (blau) . . .	140
7.12. Vergleich zwischen realer Modulalterung (orange) in Florida mit simulierten Alterungsverläufen (schwarz, grün und orange)	141
7.13. Angepasste Simulationsverläufe der Modulleistung auf Grundlage individuell variierenden PID-Ausprägungen der Randzellen (rot) und zusätzlicher Reduktion der PID-empfindlichen Randzellen von 28 auf 20	143
A.1. Gemittelte R_{SH} -Verläufe verschiedener Proben mit variierenden Einbettungsfolien während einer 85 °C/85 %-PID-Belastung.	148
A.2. NOCT-Zielwerte und korrespondierende Toleranzbereiche	151
A.3. Blockschaltbild Motorsteuerung	153
A.4. Blockschaltbild ULFI	154
A.5. Schaltplan Steuerkarte	155
A.6. Schaltplan Relaiskarte	156

Tabellenverzeichnis

2.1. Rohstoffe von Glas und deren molare Bildungsenthalpien [Wer16]	24
3.1. Jahresdurchschnitt der verwendeten Temperaturkoeffizienten für mono- und multikristalline Zelltechnologien	30
4.1. Zellspezifikationen	41
4.2. Laminationsrezept zur Lamination der Proben	41
4.3. Verwendete Materialien für die Herstellung von Proben und Modulen . . .	42
4.4. Soll- und Istwert der Temperatur im Klimaschrank	54
4.5. Durchschnittswerte der Parameter des Eindiodenmodells der verwendeten Ein-Zellen-Minimodule	58
4.6. n_{01} in Abhängigkeit der Shunt-Widerstandshöhe	58
4.7. Vergleich mittels Fehlerrechnung zwischen BLS- und Vierleitermessung anhand zweier Proben, die zu Beginn und nach einer PID-Belastung ge- messen wurden	61
4.8. Regeneration von Proben nach 10 Tage Lagerung unter Laborbedingungen	62
4.9. Regeneration der Proben nach Lagerung bei -9°C	63
5.1. Berechnungsterme oder Konstanten für die Faktoren der S-Funktion in Abhängigkeit von der Temperatur	71
5.2. Berechnungsterme oder Konstanten für die Faktoren der S-Funktion in Abhängigkeit der Spannung U	73
5.3. Übersicht der Funktionsparameter des bestrahlten und unbestrahlten De- gradationsverlaufes im Vergleich	75
5.4. Übersicht der einzelnen Degradationseinflussfaktoren der PID	76
5.5. Parameter der Regeneration bei Versuchsläufen mit und ohne Einstrahlung	86
5.6. Übersicht der einzelnen Einflussfaktoren der Regeneration	87
5.7. Mittels Regressionsanalyse berechnete Funktionsparameter der S-Funktion	89
5.8. Häufigkeitsverteilung der PID-betroffenen Zellen in realen Kraftwerken . .	101
5.9. Häufigkeitsverteilung eines ausgewählten Kraftwerks sortiert nach Ein- baureihe und Aufständereungsareal	102
5.10. Übersicht der Häufigkeitsverteilung, separiert nach Einbauregion und In- stallationsausrichtung	103
6.1. Parameter des Vergleiches zwischen Regenerationsverlauf am Tag und in der Nacht	111

Tabellenverzeichnis

6.2. Aus Abbildung 6.6. ermittelte Aktivierungsenergie und Frequenzfaktor für Degradation und Regeneration	122
7.1. Vergleich der Ausfallzeitpunkte in Stunden und Tagen unterschiedlicher Standorte anhand des Degradationsmodells	129
7.2. Vergleich der Ausfallzeitpunkte in Stunden und Tagen unterschiedlicher Standorte anhand des Regenerationsmodells	133
7.3. Vergleich der Ausfallzeitpunkte in Stunden und Tagen unterschiedlicher Standorte anhand des Kurzzeitmodells	135

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AM	Air Mass
ARC	Anti-Reflective Coating
BLS	Blitzlichtsonnensimulator
BSF	Back-Surface-Field
CCD	Charge-Coupled Device
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
EDX	Energy Dispersive X-Ray Analysis
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EL	Elektrolumineszenz
EVA	Ethylenvinylacetat
FF	Füllfaktor
CSP	Center für Silizium-Photovoltaik
IEC	International Electrotechnical Commission
IR	Infrarot
JPL	Jet Propulsion Laboratory
MPP	Maximum Power Point
NIR	Naher Infrarotbereich
NOCT	Normal Operating Cell Temperature
NREL	National Renewable Energy Laboratory
PECVD	Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition
PI Berlin	PI Photovoltaik-Institut Berlin AG

Abkürzungsverzeichnis

PID	Potential-induzierte Degradation (engl.: Potential Induced Degradation)
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
PV	Photovoltaik
PVB	Polyvinylbutyral
RLZ	Raumladungszone
SIMS	Secondary Ion Mass Spectroscopy
SiN _x	Siliziumnitrid
SiO _x	Siliziumoxid
STC	Standard Test Conditions
TCO	Transparent Conductive Oxide
TEM	Transmission Electron Microscopy
ULFI	Universal Lichtdichte Forschungsinstallation
UV	Ultraviolett
w. E.	willkürliche Einheit

Symbolverzeichnis

Symbol	Bedeutung	Einheit
γ_E	Anstellwinkel der Probe	°
γ_S	Sonnenhöhenwinkel	°
∇	Nabla-Operator	-
Φ	Lichtfluss	lm
σ	Spezifische Leitfähigkeit	$\frac{1}{\Omega \cdot m}$
τ_M	Mittlere Ausfallzeit	a
θ_{gen}	Einfallswinkel geneigte Fläche	°
$A_{1,2}$	Obere Grenze der Degradation	-
a_T	Verschiebungsfaktor (Supperposition)	-
$A_{2,1}$	Untere Grenze der Regeneration	-
$A_{2,2}$	Obere Grenze der Regeneration	-
A_U	Albedo bei der Bodenreflexion	-
A	Präexponentialfaktor(Arrheniusgleichung)	-
c	Konzentration	$\frac{mol}{m^3}$
D	Diffusionskoeffizienten	$\frac{m^2}{s}$
E	Elektrische Feldstärke	$\frac{V}{m}$
E_A	Aktivierungsenergie	eV
E_{AC}	Wechselstromenergie	kWh
E_B	Bandlückenenergie	eV
$E_{diff,gen}$	Diffusstrahlung auf geneigte Fläche	$\frac{W}{m^2}$

Symbolverzeichnis

$E_{\text{diff,hor}}$	Diffusstrahlung auf horizontale Fläche	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$
$E_{\text{dir,gen}}$	Direktstrahlung auf geneigte Fläche	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$
$E_{\text{dir,hor}}$	Direktstrahlung auf horizontale Fläche	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$
$E_{\text{g,gen}}$	Globalstrahlung auf geneigte Fläche	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$
$E_{\text{g,hor}}$	Globalstrahlung auf horizontale Fläche	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$
E_{ges}	Einstrahlung gesamt	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$
E_G	Energie einfallender Lichtquanten	eV
E_{NOCT}	Bestrahlungsstärke bei NOCT	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$
$E_{\text{refl,gen}}$	Reflektion auf geneigte Fläche	$\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$
E_{STC}	Bestrahlungsstärke bei STC	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$
E_t	Globalstrahlung im Zeitraum t	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$
i	Laufvariable	-
I_{01}	Diodenstrom (Eindiodenmodell)	A
I_{MPP}	Strom im MPP	A
I_{Ob}	Oberflächenstrom	A
I_{PH}	Photostrom	A
I_{SC}	Kurzschlussstrom	A
I_{SH}	Strom durch Parallelwiderstand (Eindiodenmodell)	A
\vec{j}	Stromdichte	$\frac{\text{A}}{\text{m}^2}$
k_B	Boltzmann-Konstante	$\frac{\text{eV}}{\text{K}}$
K_{ges}	Häufigkeitsverteilung	-
M_i	PID-Modulmatrix in Reihe geschalteter Zellen	-
n	Teilchendichte	$\frac{1}{\text{m}^3}$
P_{MPP}	Leistung im Maximal-Power-Point	W
P_{STC}	Nennleistung	W
p_1	Faktor der S-Funktion	-

Symbolverzeichnis

q	Ladung	$A \cdot s$
Q_T	Ladungsmenge bis zum Zellausfall	$A \cdot s$
Q_Y	Jährlich geflossene Ladungsmenge	$A \cdot s$
r	Reaktionsgeschwindigkeitskonstante	$\frac{W}{m^2 \cdot h}$
R	Allgemeine Gaskonstante	$\frac{kg \cdot m^2}{s^2 \cdot mol \cdot K}$
R^2	Bestimmtheitsmaß	%
R_S	Serienwiderstand	Ω
R_{SH}	Parallel-/Shunt-Widerstand	Ω
$R_{SH,M}$	Parallel-/Shunt-Widerstand unkorrigiert	Ω
$R_{SH,T}$	Parallel-/Shunt-Widerstand bei der Temperatur T	Ω
RH	Relative Luftfeuchtigkeit	%
s_1	Faktor der S-Funktion	-
s	Standardabweichung (Widerstandsmessung)	Ω
S	Wachstumsgrenze	-
T_a	Umgebungstemperatur	K
T_{add}	Übertemperatur	K
T_{ambN}	Korrekturtemperatur	K
$T_{coeffISC}$	Temperaturkoeffizient Strom	$\frac{\%}{K}$
$T_{coeffPMPP}$	Temperaturkoeffizient Leistung	$\frac{\%}{K}$
$T_{coeffUOC}$	Temperaturkoeffizient Spannung	$\frac{\%}{K}$
U	Klemmspannung	V
U_{Diff}	Diffusionsspannung	V
U_{MPP}	Spannung im MPP	V
U_{OC}	Leerlaufspannung	V
v	Driftgeschwindigkeit	$\frac{m}{s}$
v_0	Frequenzfaktor (Attempt-to-escape frequency)	$\frac{1}{s}$

Symbolverzeichnis

$Y_{f,AC}$	AC-Systemausbeute	Wh
$z_{n,m}$	Matrixelement	-

1. Einleitung

„Photovoltaik – die Umwandlung von Sonnenlicht zu Strom – ist die wichtigste Zukunftstechnologie der Menschheit.“

Hermann Scheer (29. April 1944 in Wehrheim; † 14. Oktober 2010 in Berlin), Träger des alternativen Nobelpreises, erhalten für seine unermüdliche Arbeit zur Förderung der Solarenergie weltweit*

Viele im Zuge des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) erbauten Energiesysteme waren Photovoltaik-(PV-)Kraftwerke mit Nennleistungen von bis zu mehreren MWp [Ene14]. Hinsichtlich der Anzahl sind es 1,2 % mit > 500 kW und 34,6 % mit > 50 kW Leistung. Aktuell werden in großen Kraftwerken durchschnittlich 18-25 Module zu sogenannten Modulstrings verschaltet und erreichen damit Systemspannungen von rund 700 V, wobei die maximal zulässige Systemspannung für Niederspannungsnetze 1000 V beträgt. Derzeit gibt es darüber hinaus Überlegungen [IEC11], die zulässige Systemspannung aufgrund von möglichst hohen Wechselrichtereffizienzen auf 1500 V zu erhöhen. Oft wird bei diesen Überlegungen allerdings durch die Industrie ignoriert, dass sich Systemspannungen generell negativ auf die Langlebigkeit der Solarmodule auswirken können. Schon 1985 berichtete das Jet Propulsion Laboratory (JPL) ausführlich über elektrochemische Korrosionserscheinungen bei kristallinen Siliziumzellen aufgrund von Potentialdifferenzen innerhalb des Solarmodulverbundes [Nef86].

Ein Solarmodul wird aus unterschiedlichen Materialien (Halbleiter, Glas, Metalle und Polymere) gefertigt. Viele der Komponenten haben sich in den letzten Jahren durch innovative Weiterentwicklungen stark verändert. Untersuchungen des Langzeitverhaltens, welche eine Beobachtung der Materialien und ihrer unterschiedlichen Kombinationen über zehn Jahre erfordern, sind zum jetzigen Zeitpunkt in den meisten Fällen nicht existent. Erschwerend kommt hinzu, dass die Systeme ganzjährig den klimatischen und elektrischen Bedingungen vor Ort ausgesetzt sind. Die klimatischen Gegebenheiten können, weltweit betrachtet, extrem unterschiedlich sein und von trocken-heißem bis zu feuchtkaltem Klima reichen. Das wesentliche Versprechen der Photovoltaik als Zukunftstechnologie wird mit dem Umstand begründet, dass Photovoltaikkraftwerke unabhängig vom Standort über ihre gesamte Betriebsdauer nahezu wartungsfrei prognostizierbare Erträge liefern. In den vergangenen Jahren zeigte sich jedoch, dass Module in PV-Kraftwerken ihre erwartete Lebensdauer nicht selbstverständlich erreichen. Speziell durch die Belastung mit hohen Spannungen verloren Module stark an Leistung. Aus diesem Grund wurde dieser Effekt später als potential-induzierte Degradation (engl.: potential induced degradation), kurz PID, bezeichnet [Ber10].

1.1. Motivation

Vor etwa neun Jahren traten bei neu errichteten PV-Kraftwerken innerhalb kürzester Zeit starke Degradationserscheinungen auf, obwohl die dort verbauten PV-Zellen aus p-dotiertem Silizium gefertigt waren, einem Basismaterial, welches schon seit mehreren Jahren als Ausgangsmaterial für Solarzellen verwendet wurde. Die betroffenen Zellen besaßen keinen besonderen Aufbau, sondern stellten mit einem flächig aufgebracht Aluminium-Rückkontakt und einer Antireflectionsschicht (engl.: anti-reflective coating) aus Siliziumnitrid (SiN_x) den Standardaufbau dieser Jahre dar. Diese Zelltechnologie war schon seit einiger Zeit im Einsatz und galt in Bezug auf ihre Langlebigkeit als die am weitestgehend erforschte. Die Degradationsprobleme bei dieser Bauweise wiegen umso schwerer, da, damals wie heute, die Module mit den dort verbauten p-dotierten Siliziumzellen rund 85 % des gesamten kommerziellen PV-Marktes abdecken [Sol14]. Ungewöhnlich waren die hohen Leistungsverluste auf Modulebene von über 30 %, die innerhalb eines Jahres beobachtet wurden. Überdies konnten keinerlei optische Veränderungen an den Modulen festgestellt werden. Die Auswirkungen waren rein elektrischer Natur. Die Firma SOLON war die erste Firma, die dieses Phänomen umfangreich untersuchte und erste weitreichende Ergebnisse zur PID veröffentlichte [Ber10]. In den darauffolgenden Monaten und Jahren zeigte sich, dass es sich bei der PID um ein Problem handelt, welches eine immense Relevanz für die gesamte PV-Branche besitzt.

Daraufhin begann sich die PI Photovoltaik-Institut Berlin AG (PI Berlin) intensiver mit der PID-Problematik zu beschäftigen [Ber12, Ber13a, Ber13b, Ber14, Hin15, Koc11, Koc12a, Koc12b, Koc13, Koc14a, Koc14b, Koc15, Pin14]. Die ersten von der PID betroffenen PV-Kraftwerke, die durch das PI Berlin untersucht wurden, befanden sich hauptsächlich in warmen, meist küstennahen Gebieten Europas (vgl. Abb. 1.1.). Später wurde auch bei Kraftwerken in gemäßigten, weiter nördlich gelegenen Gebieten eine PID festgestellt. Ob sich dieser Sachverhalt nur durch Zufall ergeben hatte oder ob dies mit den Wirkungsweisen der PID einherging, war eine von vielen Fragen, die sich Forschungsgruppen in den folgenden Jahren stellten.

Das gesteigerte Interesse des PI Berlins an der PID begründete sich in der Tatsache, dass ein Degradationsmechanismus vorliegt, der die Fähigkeit besitzt, die befallenen Zellen erheblich zu schädigen. Erschwerend kam hinzu, dass die europaweit geforderte Zertifizierung nach IEC 61215 und 61730 und die darin geforderten Testverfahren, PID-anfällige Module nicht erkennen und somit PID-empfindliche Module ungehindert auf den Markt gelangen konnten [IEC05, IEC11]. Dies führte zu einer großen Unsicherheit der Projektentwickler und Investoren in der PV-Branche. Vor diesem Hintergrund waren die ersten Untersuchungen dadurch motiviert, möglichst alle Einflussfaktoren der PID zu ermitteln sowie deren Relevanz im Rahmen von Laboruntersuchungen bestimmen zu können, um den Kunden des PI Berlins eine sichere PID-Nachweismethode anbieten zu können. Überdies halfen Erkenntnisse dieser Arbeit bei der Entwicklung eines Testverfahrens, welches durch die International Electrotechnical Commission (IEC) im Jahr 2015 veröffentlicht wurde [Ber13b, IEC15].

Zusätzlich arbeitete das PI Berlin im Zuge des Forschungsprojekts FUTURE FAB (För-

1. Einleitung

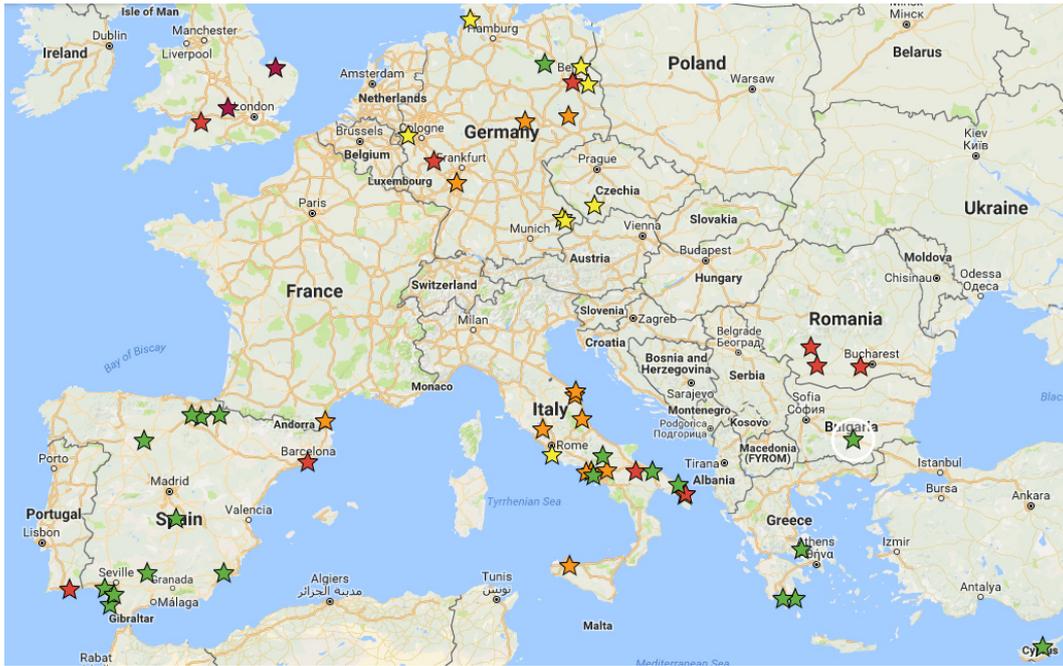


Abbildung 1.1.: Übersicht der von der Photovoltaik Institut Berlin AG untersuchten PV-Kraftwerke mit PID-Problematik bis 2013 (grüne Sterne) und bis 2016 (gelbe, orange und rote Sterne)

derkennzeichen 13N10445) in Kooperation mit unterschiedlichen Forschergruppen und Industriepartnern an der physikalischen Beschreibung sowie an Lösungsansätze zur Vermeidung der PID. Ein Partner in diesem Kooperationsverbund war das Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik (Fraunhofer CSP), welches sich intensiv mit der Thematik der physikalischen Ursache der PID beschäftigt und mit ihren Veröffentlichungen einen wichtigen Beitrag zum Verständnis der PID auf Zellebene leisteten [Lau14, Nau14]. Es war jedoch klar, dass diese Lösungsansätze nicht unmittelbar durch die gesamte PV-Industrie umgesetzt werden können und daher unzählige PID-empfindliche Solarmodule weltweit verbaut werden würden. Das PI Berlin hingegen setzte den Schwerpunkt ihrer Untersuchungen in der Betrachtung des Modulverhaltens unter realen Bedingungen am jeweiligen Standort des Kraftwerkes. Wie Abbildung 1.1. illustriert, ist diese stark von dem jeweiligen Standort abhängig, an dem eine Anlage errichtet wurde. Ziel dieser Arbeit ist es daher, mit Hilfe eines Simulationsmodells, mögliche Leistungsminderungen von PID-empfindlichen Solarmodulen unter dem Einfluss unterschiedlicher klimatischer Umgebungsbedingungen genauer zu analysieren.

1.2. Einführung in das Themenfeld potential-induzierte Degradation

Der folgende Abschnitt soll die Bezeichnung PID in ihren unterschiedlichen Facetten erörtern und somit den Einstieg in das Problemfeld unterstützen. Es ist insbesondere Vorsicht geboten, da die Begrifflichkeit PID in der Literatur für unterschiedliche Degradationsphänomene verwendet wird. Um ein erstes Verständnis des in dieser Arbeit

1. Einleitung

untersuchten Effekts zu vermitteln, erfolgt eine chronologisch gegliederte Darstellung der verschiedenen Degradationserscheinungen, welche durch Spannung hervorgerufen werden können.

Zeitliche Einordnung der PID-Forschung Eine durch Spannung induzierte elektrochemische Korrosion von Solarmodulen wurde erstmals 1978 beobachtet und ausführlich durch JPL [Hof78] untersucht. Die Forschungsarbeiten nach 1978 beschränkten sich zum größten Teil auf die Untersuchung der Auswirkung von Spannung auf Dünnschicht-Technologien, vor allem die Auswirkungen auf die transparenten leitfähigen Oxide (TCO-Schichten). Da dieses Thema für diese Arbeit keine entscheidende Rolle spielt wird auf weiterführende Literatur verwiesen (z. B. [Sam09, Car03, Jan01, Mon85a, Mon85b]).

Die ersten Degradationserscheinungen kristalliner Siliziumzellen der neueren Generation wurden hingegen erst im Jahr 2005 durch die SunPower Corporation öffentlich gemacht und zeigten einen sogenannten Oberflächen-Polarisationseffekt, der bei positiver Vorspannung vor allem bei ihren speziellen n-Typ Rückkontaktzellen auftrat [Swa05]. Über drei Jahre später erschien ein Artikel in der Zeitschrift „Photon“, welcher über einen vergleichbaren Degradationseffekt an Modulen mit Evergreen-Zellen berichtete [Rut08]. Auch diese Zellen besaßen ein besonderes Basismaterial (band-gezogenes String-Ribbon-Material) und einen speziellen Metallisierungsschritt bei der Zellfertigung.

Im Jahr 2010 zeigte schließlich das National Renewable Energy Laboratory (NREL) erste Ergebnisse eines beschleunigten Lebensdauertests bei angelegter Spannung mit positiver und negativer Polarität an standardmäßig gefertigten kristallinen Siliziumzellen. In der Veröffentlichung wurden elektrolytische Korrosionsmechanismen des Anti-Reflective-Coatings (ARC), der Grid-Finger und der Zellverbinder für Standard Siliziumzellen mit p-Basismaterial vorgestellt [Hac10]. Parallel dazu veröffentlichte die SOLON erste umfassende Untersuchungsergebnisse für Zellen mit p-Dotierung, die ausschließlich unter negativer Vorspannung belastet wurden [Ber10].

Die chronologische Einführung zeigt, dass die aktuelle Marktsituation ein breites Spektrum unterschiedlichster PV-Technologien bietet. Jede dieser Technologien birgt die Gefahr, bei positivem oder negativem Spannungsstress Alterungserscheinungen zu zeigen – zum Beispiel durch die ARC- (Polarisation, PID) oder die TCO-Schicht (TCO-Korrosion). Die intensive und umfassende Auseinandersetzung mit allen Technologien kann diese Arbeit nicht leisten und daher beschränkt sich die Betrachtung ausschließlich auf Zellen mit p-Dotierung und ARC-Schicht aus SiNx.

Eigenheiten von Zellen mit p-Dotierung und SiNx-Schicht hinsichtlich der PID Eine Besonderheit von Siliziumzellen mit p-Dotierung, besteht darin, dass auftretende PID mithilfe von Temperatur oder positiver Spannung teilweise wieder „ausgeheilt“ werden kann [Pin12, Hac12a]. Dadurch entstand ein PID-Präventionsansatz, der durch geeignete Erdung von PV-Kraftwerken negative Spannungen verhinderte und somit die Entstehung von PID ausschließen konnte [Ber13a]. Eigene Untersuchungen ergaben darüber hinaus, dass PID nicht auftritt sobald man p-dotierte Zellen ohne SiNx-Schicht herstellt. Damit konnte gezeigt werden, dass die SiNx-Schicht eine notwendige Voraussetzung für die

1. Einleitung

PID darstellt [Koc11]. Da aus Gründen einer hohen Zelleffizienz nicht ohne Weiteres auf die ARC-Schicht aus SiNx verzichtet werden kann, wurden, unter anderem durch eigene Untersuchungen, unterschiedliche Optimierungsverfahren entwickelt. Die einfachste Möglichkeit Zellen gegen PID zu schützen, stellt die Erhöhung des Brechungsindex dar [Ber10].

Eine weitere Alternative ist die Aufbringung von sogenannten Double- oder Triple-Layer-Schichten [Koc12b], wobei sich jedoch die Änderung der Prozessgase und die Aufbringung einer Oxidschicht in der Zellproduktion als effizienteste Variante herausgestellt hat [Meh12].

Physikalische Ursachen der PID bei Zellen mit p-dotiertem Basismaterial Die ersten Untersuchungen, welche den physikalischen Ursachenzusammenhang zu ergründen suchten, zeigten anhand von Secondary-Ion-Mass-Spectroscopy-(SIMS-)Messungen, dass sich die Natrium- und Kupferkonzentrationen auf der Zelloberfläche deutlich durch Anlegen negativer Spannung erhöhten [Hac10]. RAYKOV vermutete zudem, dass Lithiumionen bei gängigen Betriebstemperaturen (10-70 °C) durch die ARC-Schicht hindurch in den Siliziumemitter diffundieren und dort die Dotierung neutralisieren könnten [Ray12]. Es wurden allerdings bisher keine Ergebnisse veröffentlicht, welche diese Theorie belegen. Durch das Fraunhofer CSP konnte im Jahr 2013 die Ansammlung von Natriumionen an der Grenzfläche zwischen Silizium und der SiNx-Schicht mithilfe von Transmission Electron Microscopy (TEM) und Energy Dispersive X-Ray Analysis (EDX) mit einer hohen lokalen Auflösung nachgewiesen werden [Nau12]. Laut dieser Theorie diffundieren die Natriumionen, getrieben durch die abfallende Spannung, durch die SiNx-Schicht hindurch. Hierbei ist die Höhe des elektrischen Feldes direkt abhängig von dem Spannungsabfall über der ARC-Schicht, der wiederum vom elektrischen Widerstand der SiNx-Schicht abhängig ist. Nach dem Erreichen der Grenzfläche zwischen Silizium und SiNx akkumulieren die Natriumionen entlang von Stapelfehlern und durchdringen diese bis in das Silizium. Dort bilden sie quasimetallische Schichten und überbrücken somit den pn-Übergang.

Eine alternative Hypothese wird von RAYKOV [Ray12], BAUER [Bau12] und KINDYNI [Kin13] vertreten. Sie favorisieren ein „Inversionsschichten-Modell“. Hierbei ist es ausreichend, dass sich die positiven Natriumionen unter der ARC-Schicht anreichern, um dort ein negatives Gegenfeld hervorzurufen. Dies führt zu einer Abflachung des pn-Übergangs, d.h. es wird ein höherer Rekombinationsstrom hervorgerufen.

Speziell RAYKOV bezieht sich in seinen Untersuchungen auf Forschungsarbeiten aus dem Bereich der nichtflüchtigen Datenspeicher, sogenannten SONOS¹-pnp-Strukturen, bei denen Ladungen in der nicht leitenden SiNx-Schicht festgehalten werden [Ray12]. Dieser Aufbau hat viele Gemeinsamkeiten mit dem Schichtaufbau einer Solarzelle und scheint daher für eine Betrachtung der Prozesse während der PID gut geeignet zu sein. Ein verwandtes Erklärungsmodell liefert KINDYNI. Sie überträgt die Erfahrungen auf dem Gebiet der Transistoren und deren Zuverlässigkeit bei Spannungsbelastungen auf die

¹ Semiconductor-Oxide-Nitride-Oxide-Semiconductor

1. Einleitung

Solarzelle [Kin13]. Transistoren weisen ebenfalls einen pnp-Aufbau auf. In ihrer Arbeit werden drei Hauptmechanismen voneinander unterschieden: feste Ladungen im SiNx, eingelagerte Ladungen im Siliziumoxid und eingelagerte Ladungen an der Grenzfläche zwischen Siliziumoxid und Silizium.

Die bisherigen Forschungsarbeiten erklären einzelne Teilaspekte der PID, schaffen es jedoch nicht umfassende physikalische Modelle für den Prozess anzuführen, der auf Halbleiterebene während der PID-Belastung abläuft. Insbesondere die Umkehrung des PID-Effekts, also die sogenannte Ausheilung der Kurzschlüsse, kann durch keines der Erklärungsmodelle in Gänze erläutert werden. In mehreren Arbeiten konnte gezeigt werden, dass der PID-Effekt zu großen Teilen reversibel ist [Koc12b, Lau14]. Wovon jedoch dieser Anteil abhängt und wie sich die einzelnen Mechanismen bei mehrzyklischen Belastungen (wie sie in realen Kraftwerken auftreten) verhalten, ist aber noch nicht physikalisch beschrieben.

Der Einfluss des Modulaufbaus auf die PID Nicht nur für die in dieser Arbeit verwendeten Proben, sondern insbesondere für die PV-Modulhersteller, stellt der Modulaufbau ein probates Mittel dar, um das PID-Verhalten zu beeinflussen. Mehrere Forschergruppen belegten in der Vergangenheit, dass unterschiedliche Einbettungsmaterialien zu abweichenden PID-Ausprägungen führten [Ber10, Hac10, Nag11]. Darüber hinaus ergeben sich zusätzlich signifikante Abweichung zwischen Materialien verschiedener Hersteller [Koc12a]. Dadurch war es für viele Modulhersteller, die weder Zellen noch Einbettungsmaterial selbst herstellen, schwierig, eine schnelle kostengünstige Lösung zu entwickeln, die den PID-Effekt verhindert, was wiederum eine Ursache für die weite Verbreitung der PID-empfindlichen Module darstellt.

Eine weitere Möglichkeit auf Modulebene das PID-Verhalten zu beeinflussen, ist das Rahmendesign. HACKE konnte beispielsweise in einer seiner Untersuchungen zeigen, dass das bewusste Aussparen von Rahmenteilern die PID verlangsamt [Hac12b].

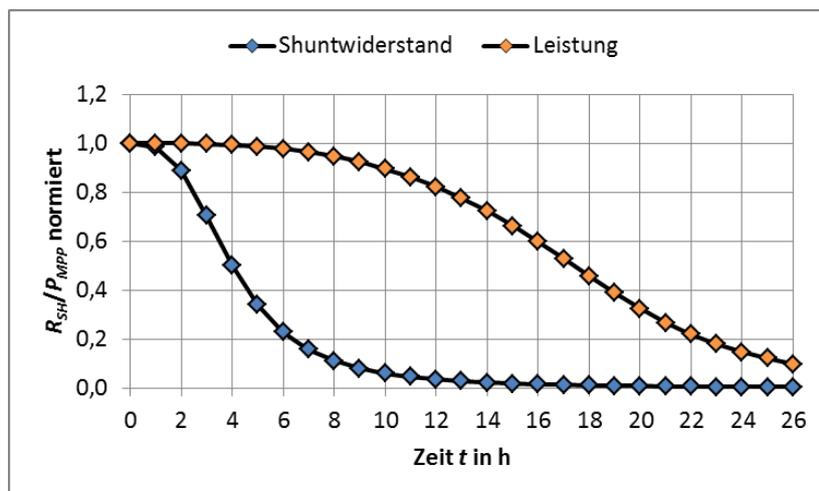


Abbildung 1.2.: Zusammenhang zwischen Shunt-Widerstand (R_{SH}) und Leistung (P_{MPP}) während eines idealisierten PID-Verlaufs

1. Einleitung

Charakteristiken einer PID Zwei charakteristische Parameter sind bei der Mehrzahl der Untersuchungen von entscheidender Bedeutung: Es handelt sich zum einen um die Modulleistung (P_{MPP}) und zum anderen um den Shunt-Widerstand (R_{SH}). Während einer PID-Belastung, ist der Shunt-Widerstand in seinem Verlauf eng mit dem Verlauf der Leistung verknüpft. Die von NAUMANN postulierte Theorie besagt, dass die durch das Natrium verursachten Kurzschlüsse, während fortschreitender Alterung, den Shunt-Widerstand der Zelle reduzieren. Nachdem ein zellspezifisches Level erreicht ist, reduziert sich ebenfalls nach und nach die Leistung. Aus Messungen im Zuge dieser Arbeit wurde ein typischer Shunt-Widerstands- und Leistungsverlauf extrahiert, welcher diese entscheidende Wechselbeziehung verdeutlicht und schematisch in Abbildung 1.2. visualisiert. Der Zusammenhang zwischen Shunt-Widerstand und Leistung kann mithilfe eines Eindiodenmodells wie nachfolgend in Abschnitt 2.1.1. im Detail erläutert, berechnet werden.

PID-Vorhersagemodelle Die vorliegende Arbeit hat das Ziel ein PID-Vorhersagemodell zu entwickeln. In der Vergangenheit gab es schon einige Ansätze für ein solches Modell, welche jedoch stets entscheidende Einflussfaktoren außer Acht gelassen haben. Ein erster Ansatz zur Modellierung der elektrochemischen Degradation für kristalline Photovoltaik-Module wurde bereits 1984 von MON vorgestellt [Mon84]. In seinen Arbeiten untersuchte MON den Zusammenhang zwischen der geflossenen Ladung Q und der Ausfallerscheinung von PV-Zellen aufgrund von elektrochemischer Degradation. Er definierte die Lebensdauer eines Moduls mit

$$\tau_M = \frac{Q_T}{\frac{Q_Y}{a}} \quad (1)$$

Dabei ist τ_M die Mittlere Ausfallzeit in Jahren, Q_T die experimentell ermittelte Ladungsmenge bis zum Zellausfall und Q_Y die Ladungsmenge, die innerhalb eines Jahres a aufgezeichnet wurde.

Der Fokus seiner Arbeit lag auf dem Vergleich der beiden Einbettungsmaterialien Ethylenvinylacetat (EVA) und Polyvinylbutyral (PVB) und deren Leitfähigkeitsänderung unter dem Einfluss von Temperatur und Luftfeuchtigkeit. Zwar zeigte MON sehr deutlich den Unterschied verschiedener klimatischer Regionen, jedoch basierten seine Versuche auf einer limitierten Anzahl von speziellen Proben. Eine Übertragung auf gebräuchliche PV-Module ist daher nur sehr begrenzt zulässig, da einige der Proben auf Frontglas oder Rückseitenfolie verzichteten. Diese sind jedoch grundlegende Bestandteile in nahezu allen auf dem Markt befindlichen Modulen.

Auch aktuelle Modelle für kristalline Module basieren auf dem selben Prinzip der Ladungsintegration. Dabei wird die Ladung mittels des sogenannten Leckstroms I_{Leak} bestimmt (den Ausgleichsstrom der zwischen Solarmodul und Erde fließt) [Kin13, Ray12, Lec13]. Mittlerweile zeigten eigene Untersuchungen [Koc12a] und die anderer Forschungsgruppen [Ray12, Lec12], dass eine reine Integration über die geflossene Ladung nicht immer zielführend für die Aussage über die Lebensdauer von PV-Modulen ist, da sie beispielsweise die Regeneration nicht berücksichtigen. Die Berechnung der Lebensdauer über Ladungsintegration übergeht die Eigenschaft, dass die PID unter realen Bedingun-

1. Einleitung

gen immer wieder durch Regenerationsphasen unterbrochen wird. Im einfachsten Fall entsteht diese Phase durch das Ausschalten der Belastungsspannung. Dies geschieht in einem realen Kraftwerk mindestens jeden Tag mit Sonnenuntergang und hält über Nacht an. Ab diesem Zeitpunkt fließt kein Leckstrom mehr, sodass keine differenzierte Aussage über das Verhalten der Module möglich ist. Damit kommt für diese Arbeit der Leckstrom als PID-Kennwert nicht in Frage. Dieser Sachverhalt wird in der Fehlerbetrachtung noch einmal aufgegriffen und erläutert (vgl. Kapitel 4.8.1.).

Aktuell existieren zwei Modellierungsvorschläge, die nicht auf Leckstrom als Simulationsgrundlage basieren. Eine der Untersuchungen stammt von TAUBITZ [Tau13], die andere von HATTENDORF [Hat13]. TAUBITZ' Untersuchungen beschränken sich auf die Beobachtung des Shunt-Widerstands. Sein vorgestelltes Modell wird nicht direkt mit Werten belegt, sondern stützt sich hauptsächlich auf die Feststellung, dass es sich bei der PID um einen Arrhenius-artigen Prozess handelt. Des Weiteren zeigen seine Untersuchungen, dass Zellen neben einer Degradations- und Regenerationsphase ab einem gewissen Degradationsgrad in eine sogenannte „transition phase“ eintreten, ab der sich das weitere Degradationsverhalten des R_{SH} ändert. Eine Hauptannahme, die diesem Model zugrunde liegt, ist, dass Module bei warmen und trockenen Umweltbedingungen regenerieren (relative Luftfeuchtigkeit $< 85\%$).

Die Untersuchungen von HATTENDORF sind weitaus detaillierter als die von TAUBITZ und rechnerisch quantifiziert. Sein Modell beschreibt die PID anhand der Modulleistung. Das phänomenologische Modell beruht auf den Eingangsgrößen Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Spannung. Zusätzlich dazu betrachtet er die Regeneration der Module. Ähnlich wie TAUBITZ nimmt HATTENDORF an, dass die Luftfeuchtigkeit den entscheidenden Kennwert für die Degradation darstellt und Module nur bei einer Luftfeuchtigkeit von über 95% degradieren.

Damit liegt beiden Vorhersagemodellen ein Luftfeuchtigkeitsschwellenwert zugrunde. In beiden Fällen degradieren Solarmodule nur oberhalb dieser Grenze. Im Gegensatz dazu zeigt das später in dieser Arbeit vorgestellte Modell, dass Solarmodule tagsüber kontinuierlich altern und zwar unabhängig von der Luftfeuchtigkeit. Zusätzlich wird in dem hier vorgestellten Modell erstmals berücksichtigt, dass es auch im Tagesverlauf zu Ausheilungen kommen kann und, viel grundlegender, dass sich das Degradations- und Regenerationsverhalten durch den Einfluss der Einstrahlung ändert, was die Arbeiten von TAUBITZ und HATTENDORF unberücksichtigt lassen.

1.3. Zielstellung und Methodik

Ziel dieser Arbeit ist das PID-Verhalten unter realen Bedingungen detailliert zu bestimmen und die einzelnen Einflüsse der PID qualitativ und quantitativ zu beschreiben. Mithilfe der gewonnenen Ergebnisse, daraus folgenden Ableitungen und des darauf basierenden neuentstandenen Verständnisses, soll eine realitätsnahe, standortabhängige PID-Risikoabschätzung entwickelt werden, die anhand von Klimadaten den Shunt-Widerstand eines definierten Solarmoduls berechnen kann. Zu Beginn ist es für die Entwicklung eines PID-Vorhersagemodells erforderlich, begrenzte Rahmenbedingungen

1. Einleitung

zu schaffen und angepasste Vorgehensweisen festzulegen. Wie bereits bekannt, ist eine Schwierigkeit bei der Untersuchung der PID, dass Spannungsbelastungen verschiedene Auswirkungen auf unterschiedliche Zellkonzepte haben. Eine weitere Schwierigkeit ist darin zu sehen, dass zusätzlich die Charakteristik der Degradation von dem Vorzeichen des angelegten Potentials abhängig ist [Rut08, Pin12].

Aus den genannten Gründen beschränken sich die in dieser Arbeit gezeigten Experimente und PID-Verlaufsberechnungen auf ausgewählte PV-Technologien unter Einhaltung nachstehender festgelegter Randbedingungen, welche schematisch in Abbildung 1.3. dargestellt sind:

1. Das angelegte Potential während der Belastungen ist negativ gegen Erde.
2. Ausschließlich Zellen mit p-dotiertem Basismaterial werden betrachtet.
3. Ausnahmslos Zellen mit einer Antireflexionsschicht aus SiN_x auf der Vorderseite und einem flächigen Aluminium-Kontakt auf der Rückseite sind Bestandteil der Untersuchungen.

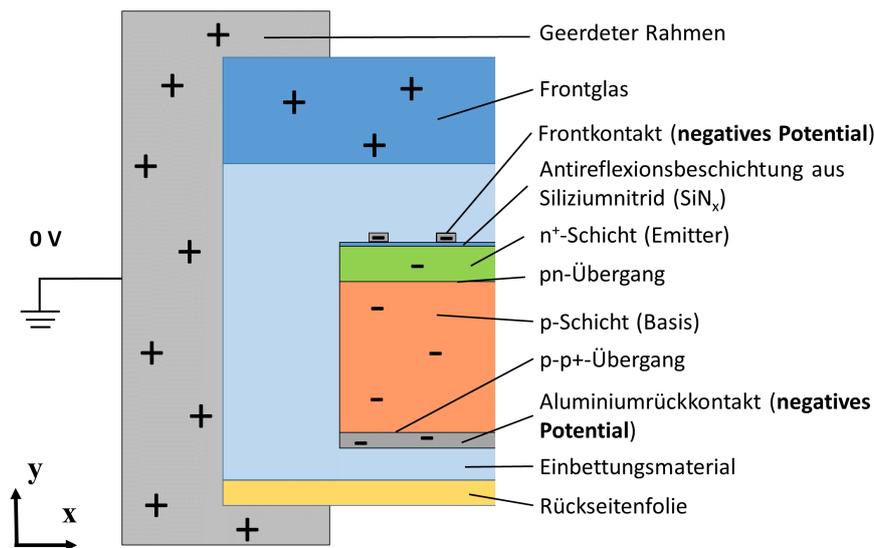


Abbildung 1.3.: Schematische Zeichnung der grundsätzlichen Randbedingungen der in dieser Arbeit durchgeführten Experimente

Der Grund für die Fokussierung auf Zellen mit p-dotiertem Basismaterial und SiN_x -ARC-Schicht liegt in der starken Marktverbreitung (85 % Marktanteil [Sol14]) und der noch nicht abgeschlossenen Erforschung der PID für diese Technologie.

Die Untersuchungen wurden hauptsächlich mittels Ein-Zellen-Minimodulen durchgeführt, da Testläufe mit handelsüblichen, d.h. aus 60 einzelnen Solarzellen bestehenden Modulen, aufgrund ihrer Maße und ihres Gewichts, weitaus schwerer zu handhaben sind. Neben der einfacheren Handhabung ist die Kosteneinsparung ein weiterer Vorteil dieser Herangehensweise.

1. Einleitung

Die probenabhängige Alterungsdauer, die je nach Ausgangsmaterial zwischen Monaten und Jahren liegen kann, stellt eine weitere Hürde auf dem Weg zu einem phänomenologischen Modell dar. Um den Alterungsverlauf der Proben möglichst kurz zu gestalten, wurde auf das Wissen vorangegangener Untersuchungen zurückgegriffen, in denen unterschiedliche Einbettungsmaterialien und Antireflectionsschichten auf ihren Einfluss hinsichtlich PID untersucht worden sind [Koc11, Koc12b]. Auf Basis dieser Erkenntnisse wurden mit entsprechenden Vorgaben industriell gefertigte Solarzellen mit einem ausgewähltem Einbettungsmaterial zu hoch-PID-sensitiven Ein-Zellen-Minimodulen laminiert.

Bei den Analysen der Alterungsverläufe in dieser Arbeit wurde – im Gegensatz zu der Mehrzahl der Untersuchungen der PID-Forschung – nicht der Leckstrom, sondern hauptsächlich der Shunt-Widerstand betrachtet. Zum einen ist der Shunt-Widerstand, wie von diversen Forschergruppen gezeigt, ein zeitlich vorgelagerter Indikator für einen typischen PID-Degradationsverlauf [Hac10, Nau12, Pin10] und zum anderen ist eine partielle In-situ-Dunkelkennlinienmessung, welche grundlegend für viele Erkenntnisse dieser Arbeit ist, nur bei der Shunt-Widerstandsmessung technisch mit ausreichender Messgenauigkeit zu realisieren. Anhand einer angepassten partiellen Dunkelkennlinienmessung kann der Shunt-Widerstand, obwohl sich beispielsweise Proben in einem Klimaschrank befinden, kontinuierlich überwacht werden. Durch regelmäßige Widerstandskontrolle ist es beispielsweise möglich, eine PID-Belastung in dem Moment zu stoppen, an dem ein gewünschtes Shunt-Widerstandslevel einer Probe erreicht wird. Das definierte Einstellen von vorgegebenen Shunt-Widerstandswerten ist eine Voraussetzung dafür, dass erstmals neben der Degradation auch die Regeneration der PID umfassend und systematisch untersucht werden kann. Die wesentlichen Fragestellungen für Degradation und Regeneration auf dem Weg zur Entwicklung eines Vorhersagemodells lauten entsprechend wie folgt:

- Was ist charakteristisch für einen realen PID-Verlauf und wie kann er mathematisch beschrieben werden?
- Was sind die beschleunigenden und was sind die verzögernden Abhängigkeiten des PID-Effekts und wie können sie quantifiziert werden?
- Wovon hängen Degradations- und Regenerationszeiten ab und in welchen Zeiträumen treten sie in realer Umgebung auf?
- Wie hoch ist die Lebensdauer von definierten Proben an unterschiedlichen klimatischen Standorten?
- Können die Erkenntnisse auf Ein-Zellen-Minimodulbasis auf große Module, mit 60 in Reihe geschalteten Zellen, übertragen werden?

Methodisch wird in dieser Arbeit ein Großteil der Ergebnisse durch Experimente erarbeitet und im Anschluss mittels phänomenologisch entwickelter Funktion ausgewertet, welche den PID-Verlauf idealtypisch abbildet. Die Funktion ermöglicht die vergleichende Darstellung unterschiedlicher Verläufe und die Quantifizierung der PID-Abhängigkeiten

anhand der veränderlichen Größen der Funktion. Die abschließende Entwicklung des PID-Vorhersagemodells erfolgt iterativ und alle gewonnenen Erkenntnisse werden sukzessive zu einem realitätsnahen Vorhersagemodell zusammengefügt.

1.4. Aufbau der Arbeit

Die Arbeit gliedert sich in acht Kapitel. Im folgenden Kapitel 2 *Grundlagen* werden alle für das Verständnis dieser Arbeit notwendigen Grundlagen der Photovoltaik sowie der Aufbau und die Funktion von Solarzellen, -modulen und -kraftwerken erörtert. Dabei wird speziell auf Eigenschaften eingegangen, die die PID beeinflussen. Hierbei werden die beiden physikalischen Prozesse der Ionenleitung und Diffusion, die der PID zugrunde liegen, ebenso präsentiert wie die im Modulbau PID-entscheidenden Materialien. Um den PID-Verlauf beschreiben und studieren zu können, wird das Instrument der Wachstumsfunktion vorgestellt und konkretisiert.

Zur Untersuchung der PID an Solarmodulen und -zellen werden im Kapitel 3 *Charakterisierung des PID-Effekts* unterschiedliche Mess- und Analysemethoden vorgestellt und deren Anwendbarkeit anhand von Beispielen dargelegt und erläutert. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wird ein experimenteller Ansatz zur Analyse von PID entwickelt, der im Kapitel 4 *Experimenteller Teil* spezifiziert wird. Dazu zählt die Entwicklung von speziell modifizierten Versuchsaufbauten und Messsystemen durch den Verfasser sowie ausschließlich für die Untersuchungen entwickelte Prüfkörper in Form von PID-empfindlichen Ein-Zellen-Minimodulen. Zur systematischen Bewertung werden die Degradation und die Regeneration mittels Laboruntersuchungen gesondert voneinander evaluiert.

Daneben wird das Zusammenspiel beider PID-Phasen anhand von Freifeldmessungen erforscht. Hierbei liegt der Fokus der Studien zum einen auf der Langzeitdegradationsentwicklung, die sich hauptsächlich mit der jahreszeitlichen Änderung der PID beschäftigt. Als Ergänzung wird zum anderen die Kurzzeitdegradationsentwicklung, d.h. die Degradationsentwicklung innerhalb eines Tages, umfassend betrachtet. Zur Übertragung der Ergebnisse auf Modulgrößen werden spezielle Untersuchungen auf Modulebene vorgestellt. Das Kapitel schließt mit einer Fehlerbetrachtung der vorgestellten Experimente. Das Kapitel 5 *Ergebnisse* stellt die Resultate der experimentellen Untersuchungen dar. Es werden die entscheidenden Einflüsse von Degradation und Regeneration gezeigt sowie das Änderungsverhalten der Einflüsse mittels Parameter einer S-Funktion für die Minimodule quantifiziert. Darüber hinaus werden Beobachtungen präsentiert, welche das grundlegende PID-Verhalten sowohl der Minimodule als auch das von Modulgrößen unter realen Umwelteinflüssen im Detail beschreiben.

Die Interpretation der Resultate folgt im Kapitel 6 und dient damit als Basis für das im Kapitel 7 *Vorhersagemodell für die PID* vorgestellte und diskutierte Berechnungsmodell von PID-Verläufen anhand von Klimadaten. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung der präsentierten Ergebnisse sowie mit dem Ausblick auf mögliche weiterführende Untersuchungen der PID.

2. Grundlagen

2.1. Die einzelnen Komponenten eines Solarkraftwerks

Ein Solarkraftwerk ist der Zusammenschluss von vielen einzelnen elektrotechnischen Komponenten. Für das Verständnis der PID ist eine genaue Betrachtung der Komponente Solarmodul, das wiederum aus einzeln miteinander verschalteten Solarzellen besteht, entscheidend. Bei der Herstellung von Solarmodulen und -zellen werden unterschiedliche Verfahren eingesetzt.

2.1.1. Herstellung und Funktionsweise einer Solarzelle

Bei den in dieser Arbeit verwendeten kristallinen p-Typ-Silizium-Solarzellen handelt es sich um großflächige Dioden, deren Basissubstrat üblicherweise aus ca. 200 μm starken bordotierten Siliziumwafern besteht (p-Schicht). Als Basismaterial wird, je nach Kristallisationsverfahren ein Einkristall (monokristallines Silizium) oder ein Festkörper mit Bereichen verschiedener Kristallorientierung (polykristallines Silizium) verwendet. Mittels eines Sägeverfahrens werden aus den Ingots, die aus dem Basismaterial bestehen, dünne Wafer hergestellt, die im Anschluss durch ein Ätzverfahren von den Sägeschäden gereinigt werden. Danach werden die Wafer auf der lichtzugewandten Seite bei hoher Temperatur mit Phosphor dotiert. Durch die Dotierung bildet sich eine n-Schicht und damit ein pn-Übergang innerhalb des Siliziummaterials. Im Anschluss wird ebenfalls auf der Vorderseite eine Antireflectionsschicht mithilfe der plasmagestützten chemischen Abscheidung aus der Gasphase (PECVD) aufgebracht. Diese besteht in den meisten Fällen aus SiN_x . Um Kurzschlüsse an den Zellkanten zu vermeiden, werden die Ränder durch einen Lasergraben oder mittels eines Ätzverfahrens isoliert. Der letzte Schritt besteht in der Herstellung von Vorder- und Rückkontakten. Auf der lichtzugewandten Seite wird ein Silberkontakt aus dünnen Fingern aufgebracht mit dem Ziel, eine geringe Verschattung bei gleichzeitigem geringen Serienwiderstand herbeizuführen. Auf der Rückseite wird ein flächiger Kontakt aus Aluminium aufgebracht. Durch hohe Temperatur (800 $^\circ\text{C}$) werden die Kontakte eingebrannt. Dabei bildet sich eine aluminiumdotierte p-Schicht, das Back-Surface-Field (BSF). Mit diesem Schritt ist die Herstellung einer Solarzelle abgeschlossen [Lue05].

Die eigentliche Funktionsweise der Solarzelle liegt in den Halbleitereigenschaften des Siliziummaterials begründet, das eine fast ideale Bandlückenenergie E_B von 1,12 eV aufweist [Wue00]. Abbildung 2.1. zeigt den prinzipiellen Aufbau dieser klassischen Solarzellenart.

2. Grundlagen

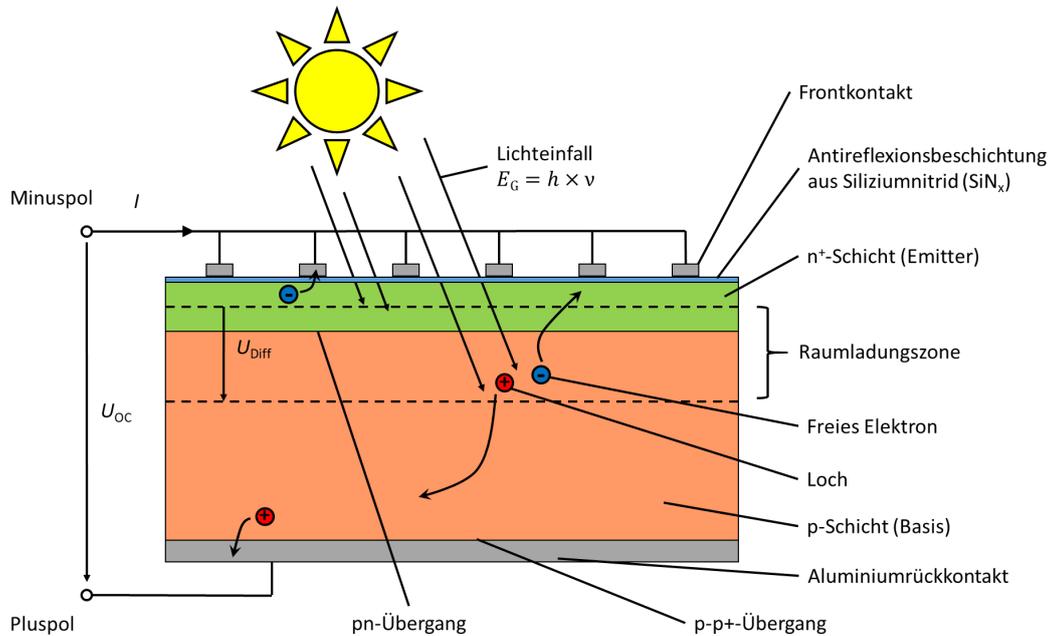


Abbildung 2.1.: Schematischer Aufbau einer kristallinen p-dotierten Siliziumsolarzelle

Die lichtzugewandte Seite besteht aus der hoch phosphordotierten Schicht (n-Schicht), welche nur etwa 500 nm dünn ist. Zwischen p- und n-Schicht (pn-Übergang) diffundieren Elektronen und Löcher in das jeweils anders dotierte Gebiet in dem Bestreben, das Konzentrationsgefälle auszugleichen. Es bildet sich eine Raumladungszone (RLZ) aus, welche ein elektrisches Feld im Bereich der Grenzschicht zur Folge hat, ferner die Diffusion weiterer Ladungen erschwert und schließlich ganz zum Erliegen bringt (thermisches Gleichgewicht).

Über der Diffusionszone entsteht die Diffusionsspannung, die dem Diffusionsstrom entgegenwirkt. Außerhalb der Raumladungszone herrscht Ladungsneutralität. Einfallende Lichtquanten mit $E_Q = h \cdot \nu$ erzeugen aufgrund des inneren Photoeffektes Elektron-/Lochpaare, wobei das elektrische Feld innerhalb der Sperrschicht die Elektronen in Richtung n-Kontakt und die Löcher in Richtung des p-Materials beschleunigt und trennt, bevor sie rekombinieren können. Aufgrund des Elektronenüberschusses im n-dotierten Gebiet wird die Raumladung und damit die elektrische Feldstärke in der Sperrschicht so weit reduziert, bis sie für die Trennung weiterer Elektron-/Lochpaare nicht mehr ausreicht und sich die Leerlaufspannung U_{OC} einstellt. Damit kann im Grenzfall starker Belichtung die Leerlaufspannung näherungsweise mit der Diffusionsspannung gleichgesetzt werden und es gilt $U_{OC} = U_{Diff}$ [Gug62].

Durch Kurzschließen der Front- und Rückseitenkontakte können die erzeugten Ladungsträger sofort aus den entsprechenden Zonen abfließen, sodass keine Reduktion der Raumladung und des elektrischen Feldes stattfindet. Über der Sperrschicht liegt weiterhin die Diffusionsspannung U_{Diff} und es fließt der von der Bestrahlungsstärke abhängige I_{SC} . An der Materialgrenze zwischen p- und n-Schicht befindet sich der pn-Übergang, in dem ein elektrisches Feld entgegen der eigentlichen Dotierung herrscht. Auf der Zellrückseite entsteht durch Hochdotierung mit Aluminium ein p-p+-Übergang (BSF), welcher ein

2. Grundlagen

elektrisches Feld erzeugt, das in gleicher Weise wie das des pn-Überganges gerichtet ist. Es wirkt wie ein „elektrischer Spiegel“ und dient hauptsächlich dazu, Rekombination in der Nähe der rückseitigen Oberfläche zu verhindern [Goe97].

Eine SiNx-Schicht auf der Vorderseite verbessert durch optimierte Lichtbrechung die optischen Eigenschaften der Zelle. Durch Absättigung ungesättigter Bindungen an den Oberflächen mit atomarem Wasserstoff werden Rekombinationen von Ladungsträgern an der Oberfläche reduziert und der Zellwirkungsgrad verbessert. Über aufgedruckte Kontaktfinger und Busbars an Front- und Rückseite können der Solarzelle Ladungsträger, die aufgrund des inneren Photoeffekts erzeugt werden, abgeführt werden. Somit wird es möglich der Solarzelle Leistung zu entnehmen.

Die Strom-Spannungs-Kennlinie der unbeleuchteten idealen Solarzelle entspricht der einer idealen Diode.

$$I_D = I_0 \cdot (e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1) \quad (2)$$

Eine beleuchtete Solarzelle generiert einen Strom, der durch einen Verbraucher geleitet werden kann, mit:

$$I = I_{Ph} - I_D = I_{Ph} - I_0 \cdot (e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1) \quad (3)$$

Der Photostrom I_{Ph} ist dabei abhängig vom Lichtfluss Φ .

$$I_{Ph} = I_{Ph}(\Phi) \quad (4)$$

Der prinzipielle Verlauf der Strom-Spannungs-Kennlinie einer Solarzelle (dunkel und beleuchtet) ist in Abbildung 2.2. dargestellt. Für eine genaue Beschreibung des Verhaltens wird in der Praxis das sogenannte Eindiodenmodell verwendet [Wag99].

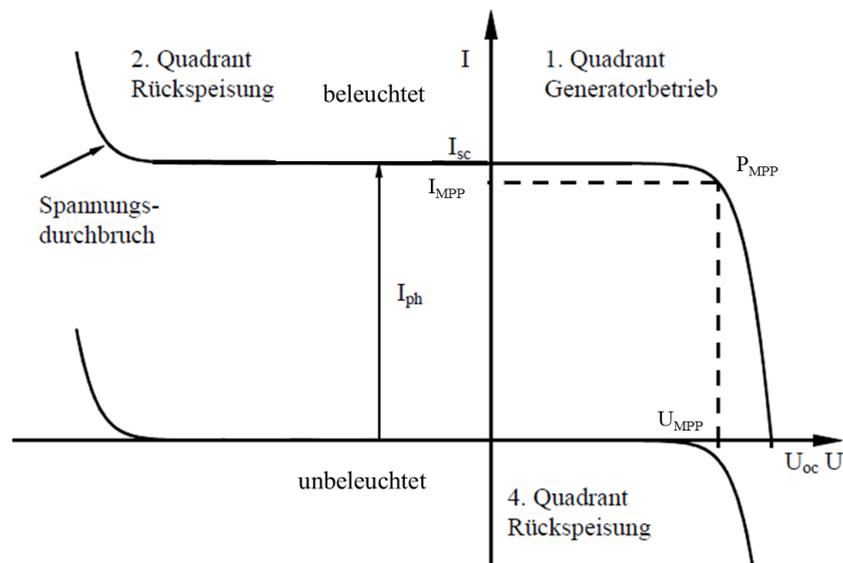


Abbildung 2.2.: Strom-Spannungs-Kennlinie einer Solarzelle (Bild aus [Wag99] / modifiziert)

Gemäß des Eindiodenmodells stellt eine beleuchtete reale Solarzelle – im Unterschied zu der realen Solarzelle – eine Parallelschaltung von einer Stromquelle mit einer Dioden

2. Grundlagen

dar, wobei an der Diode die Diodenspannung U_D abfällt (vgl. Ersatzschaltbild in Abb. 2.3.). Die Diode wird ebenso als ideal angesehen und besitzt daher einen Diodenfaktor $n_{01} = 1$. Des Weiteren kommt es jedoch in der realen Solarzelle bei der Wanderung der Ladungsträger entlang des Strompfades zu Spannungsabfällen, welche durch den Serienwiderstand R_S zusammengefasst werden.

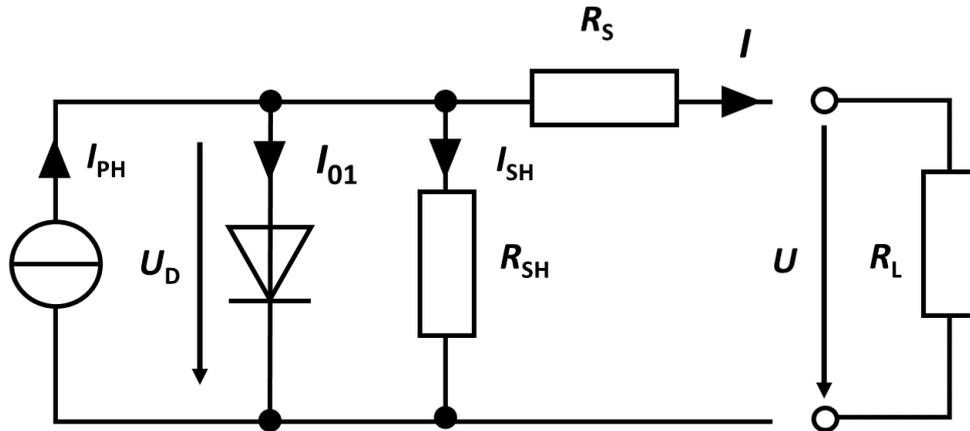


Abbildung 2.3.: In dem Ersatzschaltbild des Eindiode Modells wird der durch den absorbierten Photostrom erzeugte Strom I_{PH} durch den Diodenstrom I_{01} und den über dem Parallelwiderstand fließende Strom I_{SH} vermindert und resultiert in den nach außen dringenden Strom I .

Hierzu zählen hauptsächlich spezifische Materialwiderstände, Übergangswiderstände zwischen Emitter und Kontaktfingern und Linienwiderstände der Fingerkontakte und Sammelschiene (engl.: Busbars). Ein zu hoher Serienwiderstand führt im belasteten Fall zu einem deutlichen Abfall der Klemmspannung und somit zu einer Reduktion der maximal entnehmbaren Leistung. Der Parallelwiderstand oder Shunt-Widerstand, verdeutlicht Verluste an Nebenschlüssen (Shunts), die unter anderem aufgrund von Passivierungs-, Kristallfehler oder Kurzschlüssen, durch PID verursacht, zustande kommen. Dabei wird der pn-Übergang überbrückt und eine Reduzierung des Parallelwiderstands ist die Folge. Ein zu geringer Parallelwiderstand führt zudem zu einem Absinken der Leerlaufspannung U_{OC} .

Der resultierende nach außen dringende Strom des Eindiode Modells I im geschlossenen Stromkreis ist gegeben mit [Fah83]:

$$I = I_{Ph} - I_D - I_{SH} \quad (5)$$

$$I = I_{Ph} - I_{01} \cdot \left(e^{\frac{U + I \cdot R_S}{n_{01} \cdot U_T}} - 1 \right) - \frac{U + R_S \cdot I}{R_{SH}} \quad (6)$$

Anhand dieser Formel 6 wird der deutliche Einfluss des Shunt-Widerstands sichtbar. Der über dem Parallelwiderstand fließende Strom I_{SH} wird umso größer, je kleiner R_{SH} wird. Mit dieser Gleichung und den gemessenen Kennlinien von Solarzellen ist es möglich, die Leistung in Abhängigkeit eines sich verändernden Shunt-Widerstands abzuschätzen.

2.1.2. Herstellung und Aufbau eines Solarmoduls

In einem Solarmodul werden einzelne Solarzellen mittels verzinnter Kupferverbinder miteinander verschaltet. Dafür wird jeweils die Vorderseite (Minuspole bei p-dotiertem Basismaterial) einer Zelle mit der Rückseite (Pluspol bei p-dotierten Basismaterial) der nächsten Zelle verknüpft. Die Kupferverbinder werden dabei durch einen Lötprozess mit den Zellen verbunden. Um die dadurch entstandenen Zellstränge vor mechanischer Belastung und Witterungseinflüssen zu schützen und zusätzlich elektrisch zu isolieren, werden diese standardmäßig unter Verwendung eines Vakuum-Laminierungsverfahrens zwischen zwei transparenten elastischen EVA-Folien eingebettet (vgl. Abb. 2.4.).

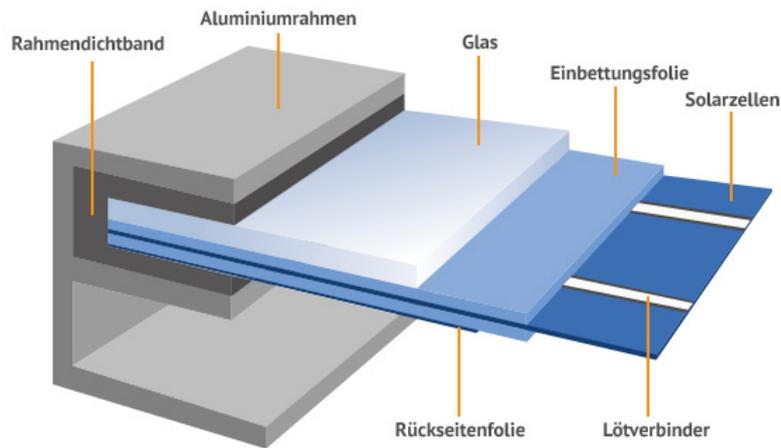


Abbildung 2.4.: Materialaufbau eines Solarmoduls [Kae16]

Eine transparente Glasscheibe aus Floatglas schützt die Zellen zusätzlich auf der Vorderseite vor Witterung und gibt dem gesamten Verbund mechanische Stabilität. Teilweise besitzen die Glasscheiben ebenfalls eine Antirefleksionsschicht, um die Transmissionseigenschaften der Vorderseite zu verbessern. Auf der Rückseite befindet sich meist ein weißer, mehrlagiger Folienverbund aus Polyvinylflourid (PVF) und Polyethylenterephthalat (PET), der elektrisch isoliert und das Modul vor eindringender Feuchtigkeit schützt. Durch geeignete Auswahl von Temperatur, Druck und Laminierungszeit werden die drei Komponenten fest miteinander verbunden. Im Folgenden wird die Anschlussdose mit integrierten Anschlusskabeln und Bypass-Dioden an der Rückseite angeschlossen und verklebt. In den meisten Fällen erhöht ein Rahmen aus Aluminiumprofilen an den Kanten des Laminats die Steifigkeit und gibt Möglichkeiten für die Befestigung an einer Unterkonstruktion und den Anschluss an eine Erdungsleitung.

2.1.3. Aufbau von Solarkraftwerken

In dieser Arbeit werden vorrangig sogenannte Freifeldanlagen betrachtet. In einer Freifeldanlage werden auf einer geeigneten Unterkonstruktion Solarmodule installiert und in Reihe elektrisch miteinander verschaltet. Der Aufstellungswinkel der Photovoltaik-Module ist abhängig vom Breitengrad, auf dem die Anlage errichtet wird, und beträgt in Deutschland ungefähr 30° . Damit wird die Leistung der Sonne – durch nahezu senk-

2. Grundlagen

rechte Einstrahlung über die meiste Zeit des Jahres – maximal genutzt, das Abrutschen von Schnee erleichtert sowie die Nutzung der Kraftwerksfläche optimal verwertet. Mehrere in Reihe verschaltete Module ergeben dabei einen Modulstrang. Durch die Anzahl der zusammengeschalteten Module wird die Systemspannung zwischen Minus- und Pluspol bestimmt. Aktuell ist eine maximale Systemspannung von 1000 V in Deutschland zulässig [Pin10]. Aus wirtschaftlichen Gründen zeigt sich jedoch ein Trend zur Anhebung der maximalen Grenzwerte [Fra10, Hac10, Kad13]. Höhere Systemspannungen ermöglichen zum einen Materialeinsparungen durch längere Modulstrings, was zur Kostenreduktion auf der Systemseite führt, und zum anderen eine höhere Effizienz durch die Reduktion der Kabelverluste [JaS16].

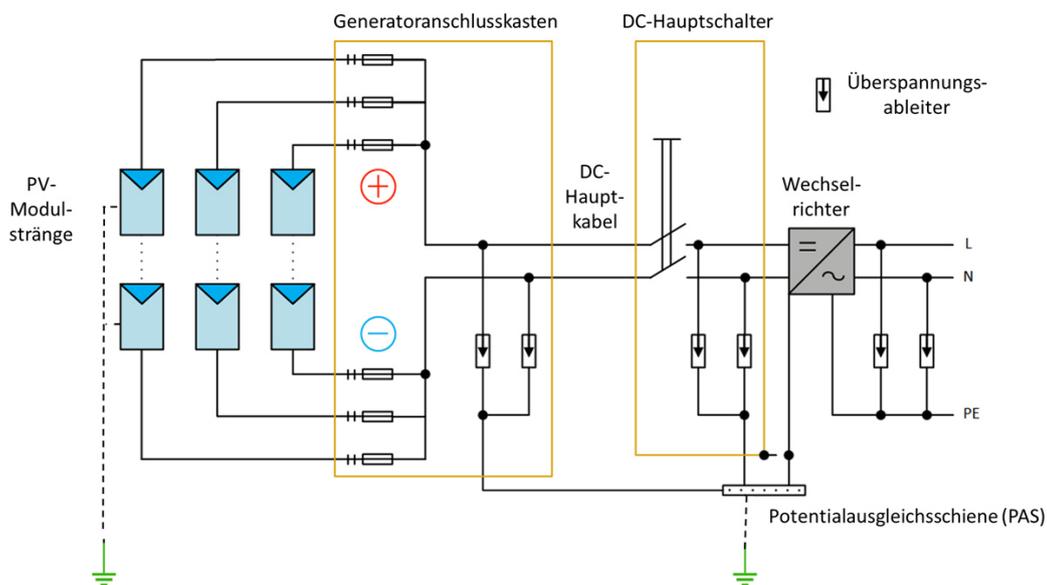


Abbildung 2.5.: Schaltbild eines typischen Photovoltaik-Kraftwerks. Die PV-Modulstränge werden über den Generatoranschlusskasten an den Wechselrichter geführt, der an das Stromnetz angeschlossen ist. Mittels DC-Hauptschalter können die Modulstränge vom Wechselrichter getrennt werden. Die Überspannungsableiter sind über die Potentialausgleichsschiene mit der Erde verbunden. Ein Wechselrichter mit Transformator kann ebenso mit der Erde verbunden werden.

Die Stränge sind überdies in einem Geräteanschlusskasten verschaltet und mittels Direct-Current-(DC-)Hauptkabel an einem Wechselrichter mit integriertem Maximum-Power-Point-(MPP-)Tracker verbunden. Der prinzipielle Aufbau mit den wichtigsten Komponenten ist in Abbildung 2.5. schematisch dargestellt. Die Überspannungsableiter dienen zum Schutz vor gefährlichen Überspannungen, wie sie beispielsweise bei einem Blitzschlag entstehen. Bei den Wechselrichtern unterscheidet man hauptsächlich Wechselrichter mit und ohne Transformator. Transformatorgeräte ermöglichen durch ihre galvanische Trennung eine Erdung mittels Potentialausgleichsschiene (PAS) des PV-Generators. So werden durch eine Erdung des Minuspols alle Module der PV-Anlage auf positives, bei Erdung des Pluspols auf negatives Potenzial verschoben. Die Erdung des Pluspols ist hierbei diejenige Erdung, welche die PID begünstigt und deshalb in dieser Arbeit

2. Grundlagen

zur Anwendung kommt. Bei den in Deutschland vorrangig verwendeten Wechselrichtern ohne Transformator ist dies meist aus technischen Gründen nicht möglich. Hier ist das Potential des Generators durch die Elektronik vorgegeben, meistens in Form einer in etwa symmetrischen Aufteilung zwischen positiven und negativen Potentialen.

2.1.4. Charakteristische Kenngrößen

Grundlegend für die Beschreibung von Solarzellen und Solarmodulen ist der Wirkungsgrad η . Der Wirkungsgrad gibt an, wie viel Ausgangsleistung P_{MPP} ein Solargenerator aus der angebotenen Lichtleistung P_{Ph} erzeugen kann. Die Ausgangsleistung berechnet sich aus dem Produkt des Stroms und der Spannung im MPP, demjenigen Arbeitspunkt, an dem die maximale Leistung entnommen werden kann (vgl. Abb. 2.2.).

$$\eta = \frac{P_{\text{MPP}}}{P_{\text{Ph}}} = \frac{I_{\text{MPP}} \cdot U_{\text{MPP}}}{P_{\text{Ph}}} \quad (7)$$

Für die Charakterisierung der Solarzelle wird oft der Füllfaktor (FF) verwendet. Der FF ist definiert als das Verhältnis zwischen P_{MPP} und dem Produkt aus Kurzschlussstrom I_{SC} und Leerlaufspannung U_{OC} . Aus der beleuchteten Kennlinie in Abbildung 2.2. können I_{SC} bei Spannung $U = 0$ und U_{OC} bei Strom $I = 0$ direkt abgelesen werden. Beide Werte sind abhängig von der Einstrahlung [Lew95].

$$FF = \frac{I_{\text{MPP}} \cdot U_{\text{MPP}}}{I_{\text{SC}} \cdot U_{\text{OC}}} \cdot 100 \% \quad (8)$$

Der Wirkungsgrad kann ebenfalls mithilfe der beiden Werte und des Füllfaktors berechnet werden [Goe97]:

$$\eta = \frac{FF \cdot I_{\text{SC}} \cdot U_{\text{OC}}}{P_{\text{Ph}}} \quad (9)$$

Eine zweite wichtige Kenngröße, speziell für Solarkraftwerke, ist die Performance Ratio (PR). Die Performance Ratio gibt Aufschluss über den Zustand der Anlage, die Höhe der Verluste und somit über die Qualität der verwendeten Komponenten. Aus diesem Grund wird die Performance Ratio oft auch als Qualitätsfaktor bezeichnet und ist definiert als [IEC98]:

$$PR = \frac{Y_{\text{f,AC}}}{Y_{\text{T}}} \quad (10)$$

Die AC-Systemausbeute $Y_{\text{f,AC}}$ ist dabei die gemessene Wechselstromenergie E_{AC} , die von der PV-Anlage pro Zeiteinheit (Kilowattstunden pro Zeit) geteilt durch die Nennleistung P_{STC} der PV-Anlage erzeugt wird. Y_{T} ist die Globalstrahlung auf die geneigte Modulebene E_{t} in der betrachteten Zeiteinheit t geteilt durch die Referenzeinstrahlung E_{STC} nach STC (1000 W/m²). Damit ergibt sich für die PR folgende Schreibweise:

$$PR = \frac{E_{\text{AC}} \cdot E_{\text{STC}}}{P_{\text{STC}} \cdot E_{\text{t}}} \quad (11)$$

2.2. Grundlagen des Stofftransports in Halbleitern und Nichtleitern

Dem Mechanismus der PID liegt die Wanderung von positiven Natriumionen aus dem Glas in Richtung der Solarzellen zugrunde. Auf ihrem Weg in die oberen Zellbereiche passieren die Natriumionen Nichtleiter- und Halbleiterschichten. Die entscheidenden Prozesse sind hierbei der Drift und die Diffusion. Neben der PID spielen beide Prozesse auch bei der Solarzellenherstellung, speziell bei der Dotierung, eine entscheidende Rolle.

2.2.1. Drift

Unter der Wirkung eines elektrischen Feldes beenden die Ladungsträger ihre zufällige Bewegung in einem Material und beginnen, in Richtung des angelegten elektrischen Felds oder je nach Ladung sich von diesem weg zu bewegen. Diese Bewegung wird Drift der Ladungsträger genannt und erzeugt einen Driftstrom.

Grundlegend ist hierbei das Ohmsche Gesetz in der Vektorschreibweise.

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (12)$$

Dabei ist \vec{j} die Stromdichte und \vec{E} die elektrische Feldstärke.

Wird die Stromdichte als Teilchenstromdichte aufgefasst, ist die Stromdichte definiert über die Teilchendichte n mit der Ladung q , die mit der mittleren Geschwindigkeit oder auch Driftgeschwindigkeit \vec{v} fließt.

$$\vec{j} = n \cdot q \cdot \vec{v} \quad (13)$$

Setzt man diese Formel mit dem Ohmschen Gesetz gleich, erhält man für die Leitfähigkeit σ die Lösung

$$\sigma = \frac{n \cdot q \cdot \vec{v}}{\vec{E}} \quad (14)$$

Wenn n und q als konstant angesehen werden, muss auch der Quotient $\frac{\vec{v}}{\vec{E}}$ konstant sein. Dieser Quotient wird auch als die Beweglichkeit μ der Teilchen bezeichnet. Damit erhält man die allgemeine Form der Leitfähigkeit:

$$\sigma = n \cdot q \cdot \mu \quad (15)$$

bzw. der Stromdichte:

$$\vec{j} = n \cdot q \cdot \mu \cdot \vec{E} \quad (16)$$

Die Richtung des Stroms ist dabei abhängig von der Ladung q des Teilchen. Ein elektrischer Strom ergibt sich immer aus der Summe der beiden entgegengesetzt fließenden positiven und negativen Ladungsträger. Dies bedeutet, dass für die Teilchendichte n negativer und p positiver einfach geladener Teilchen der Gesamtstrom oder Driftstrom geschrieben werden kann wie folgt:

$$\vec{j} = \vec{j}_p + \vec{j}_n = (p \cdot q_p \cdot \mu_p + n \cdot q_n \cdot \mu_n) \cdot \vec{E} \quad (17)$$

$$= (p \cdot \mu_p + n \cdot \mu_n) \cdot e \cdot \vec{E} \quad (18)$$

In dieser Arbeit ist der Drift der bestimmende physikalische Mechanismus bei der Be-

2. Grundlagen

trachtung der Degradation. Dabei besteht der Driftstrom aus mehreren Komponenten, wie Elektronen, Löcher, Anionen sowie Kationen, wobei Kationen in Form von positiven Natriumionen die entscheidenden Elemente darstellen. Der Driftstrom durchläuft zudem unterschiedliche Materialschichten mit spezifischen Eigenschaften. Daraus folgt, dass die Beweglichkeit μ in Formel 18 jeweils den Mittelwert mehrerer Teilchen innerhalb unterschiedlicher Schichten repräsentiert [Kol16].

Diese ist temperaturabhängig und kann durch eine Arrhenius-Gleichung ausgedrückt werden:

$$\mu = \mu_0 \cdot e^{-\frac{E_A}{k_B \cdot T}} \quad (19)$$

Die Größe μ_0 ist ein präexponentieller Proportionalitätsfaktor, der materialspezifische Eigenschaften wie Eigenschwingfrequenz, Ladung des Ions, Driftgeschwindigkeit bei definierter Feldstärke und Ionenradius aufweist. Die Beweglichkeit μ ist darüberhinaus durch die Nernst-Einstein-Beziehung mit dem Diffusionskoeffizienten D verknüpft.

$$\mu = \frac{D}{k_B \cdot T} \quad (20)$$

Dabei ist k_B die Boltzmann-Konstante und T die Temperatur [Str12].

2.2.2. Diffusion

Diffusion ist ein physikalischer Prozess, welcher auf der thermischen Eigenbewegung von Teilchen (Atome, Moleküle, Ladungsträger) beruht und zu einer gleichmäßigen Verteilung von Teilchen im Raum und somit zur vollständigen Durchmischung mehrerer Stoffe führt. Dieser Zustand weist die maximale Entropie auf, ist also am wahrscheinlichsten. Der Transport von Teilchen innerhalb derselben Substanz ohne Einfluss eines makroskopischen Gradienten wird als Selbstdiffusion bezeichnet. Hierbei herrscht eine statistische Gleichverteilung im Raum, es findet kein Nettoteilchenfluss statt. Mit zunehmender ungleichmäßiger Verteilung steigt die Wahrscheinlichkeit für eine gerichtete Bewegung von Teilchen aus Bereichen höherer in Bereiche geringerer Konzentration, wodurch es so lange zu einem Netto-Stofftransport kommt, bis sich ein thermodynamisches Gleichgewicht einstellt. Der Zustand des thermodynamischen Gleichgewichts ist zumeist die Gleichverteilung, bei der die Konzentration aller Teilchen an jedem Punkt im Raum gleich hoch ist [Mue07, Sha05].

Die formelle mathematische Behandlung des Diffusionsflusses beginnt mit dem ersten Fick'schen Gesetz [Nie04], nach welchem die Teilchenstromdichte \vec{j} proportional zur Konzentration c entgegen der Diffusionsrichtung x definiert ist:

$$\vec{j}_x = -D \cdot \frac{\partial c}{\partial x} \quad (21)$$

Mit dem Nabla-Operator ∇^2 ergibt sich für die Diffusion im dreidimensionalen Raum das Fick'schen Gesetz entsprechend:

$$\vec{j} = -D \cdot \nabla \cdot c \quad (22)$$

²In kartesischen Koordinaten ist der Nabla-Operator der Vektor, der aus den drei räumlichen Ableitungen zusammengesetzt wird: $\nabla = \begin{pmatrix} \partial/\partial x \\ \partial/\partial y \\ \partial/\partial z \end{pmatrix}$

2. Grundlagen

Der Proportionalitätsfaktor D ist ein werkstoffspezifischer Diffusionskoeffizient. Bei der Selbstdiffusion, die dem entsprechenden Vorgang in Gasen oder Flüssigkeiten analog ist, wandern eigene Kristallbausteine im Festkörper, bei der Gegendiffusion sind es Atome eines fremden Stoffes; daher nennt man die Gegendiffusion in der Kristallbautheorie Fremddiffusion [Spe98].

Die verschiedenen Platzwechselvorgänge, die zur Diffusion führen, erfordern eine Mindestenergie E_A (Aktivierungsenergie) zur Überwindung der Potentialbarrieren im Festkörper. Diese kann thermisch geliefert werden, weshalb der Diffusionskoeffizient meist eine starke Temperaturabhängigkeit aufweist. Mit dem Boltzmannfaktor k_B und der absoluten Temperatur T ergibt sich folgende Arrhenius-Beziehung:

$$D = D_0 \cdot e^{-\frac{E_A}{k_B T}} \quad (23)$$

D_0 ist ein Faktor, der unter anderem von dem Atomabstand der vorliegenden Kristallstruktur abhängt und Sprungfrequenz.

Im Siliziumkristall finden wir ein festes Gitter von Atomen vor, durch das sich das Teilchen bewegen muss. Das kann auf drei Arten geschehen:

- Leerstellendiffusion: Die Fremdatome besetzen leere Stellen im Kristallgitter, die immer auftreten können. Ähnlich einer Löcherleitung entsteht ein Wechselspiel von besetzten Gitterplätzen und Lücken.
- Zwischengitterdiffusion: Die Fremdatome bewegen sich zwischen den Siliziumatomen im Kristallgitter hindurch.
- Platzwechseldiffusion: Fremdatome die sich im Kristallgitter befinden, tauschen mit Siliziumatomen den Gitterplatz [Jos60].

In realen Festkörpern gibt es oft Diffusionswege mit gegenüber dem sonstigen Kristallvolumen stark erhöhtem Diffusionskoeffizienten:

- Korngrenzendiffusion entlang der Korngrenzen. Die Vergrößerung des Diffusionskoeffizienten ist durch die Störung des regelmäßigen Kristallaufbaus zu erklären und äußert sich meist in einer Verminderung der Aktivierungsenergie der Diffusion im Festkörper. Die Korngrenzendiffusion spielt deshalb besonders bei niedrigen Temperaturen eine Rolle.
- Pipe-Diffusion entlang der Versetzungen. Die Erhöhung des Diffusionskoeffizienten entsteht durch die aufgelockerte Gitterstruktur im Zentrum der Versetzung, dem Versetzungskern. Bei Kleinwinkelkorngrenzen ist die Korngrenzendiffusion mit der Pipe-Diffusion identisch.
- Oberflächendiffusion, also die Bewegung von Oberflächenatomen oder -leerstellen auf einer Festkörperoberfläche [Mue07, Spe98].

Aufgrund des Diffusionsstroms ändert sich der Konzentrationsgradient an einem bestimmten Punkt entlang des Diffusionspfades mit der Zeit. Diese Bedingung wird durch

2. Grundlagen

eine Differentialgleichung zweiter Ordnung dargestellt, dem zweiten Fick'schen Gesetz:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \nabla (D \nabla c) \quad (24)$$

Da D bei vielen praktischen Problemen als konstant anzunehmen ist, gilt allgemein folgende Beziehung:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = (D \nabla^2 c) \quad (25)$$

Je nach Art der Quelle ergeben sich unterschiedliche Lösungen. Abbildung 2.6. zeigt schematisch den Verlauf einer unerschöpflichen gegenüber einer erschöpflichen Quelle [Moo97, Mue07, Sha05].

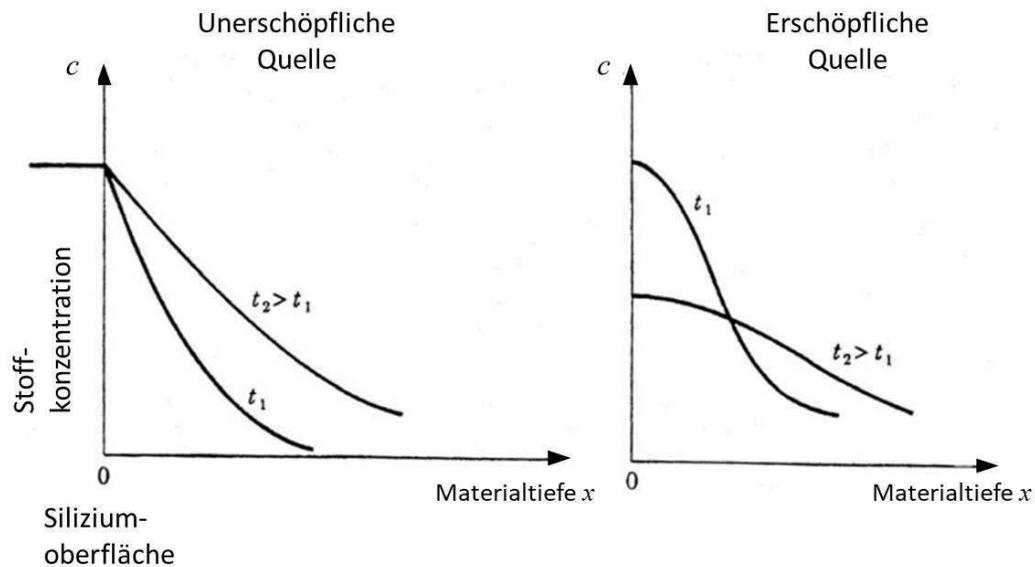


Abbildung 2.6.: Darstellung der Konzentration c eines eindiffundierenden Stoffes über der Materialtiefe zu verschiedenen Zeitpunkten t_1 und t_2 in Abhängigkeit von der Stoffquelle (Bild aus [Mue07] / modifiziert)

Diffusion mit einer erschöpflichen Stoffquelle bedeutet, dass der Dotierstoff nur begrenzt zur Verfügung steht. Je länger der Diffusionsprozess andauert, desto geringer wird die Konzentration c an der Oberfläche; dafür steigt die Eindringtiefe x in das Substrat. Der Diffusionskoeffizient eines Stoffes gibt dabei an, wie schnell er sich im Kristall bewegt. Im Falle der PID kann die Diffusion als grundlegender Mechanismus für die Regeneration betrachtet werden. Aufgrund der durch den Drift verursachten Akkumulation der Natriumionen innerhalb und in der Nähe von Stapelfehlern existiert ein deutlicher Konzentrationsgradient. Nach dem Abschalten der Spannung entsteht ein Diffusionsstrom, der das Konzentrationsgefälle ausgleicht.

2.3. Materialien

Für die Entstehung und Vermeidung von PID sind zwei Materialkomponenten des Moduls entscheidend. Das vorderseitige Glas gilt als Quelle für die Natriumionen. Die Einbettungsschicht zwischen Glas und Zelloberfläche kann als Barriere bezeichnet werden. Damit sind beide Materialien maßgebend für die Entstehung sowie die Vermeidung von PID auf Modulebene.

2.3.1. Glas

Glas ist eine amorphe, nicht kristalline Substanz. Die aufgrund ihrer häufigen Verwendung bedeutendste Glassorte ist das Natron-Kalk-Glas, welches hauptsächlich aus SiO_2 besteht. Die im Glas enthaltenen Stoffe erfüllen unterschiedliche Zwecke. So dient z. B. Natriumcarbonat (Na_2CO_3) während der Produktion als Netzwerkwandler und setzt den Schmelzpunkt des SiO_2 herab, während Calciumoxid (CaO) oder Kalk und Aluminiumoxid (Al_2O_3) die Festigkeit der Gläser verbessern und die Härte erhöhen. Alle in der Tabelle 2.1. aufgeführten Stoffe sind über einfache oder mehrfache Ionenbindungen an negativ geladene Silikatenden gebunden (siehe Abb. 2.7.). Formal erscheinen diese mit einer gekürzten Summenformel, z. B. Na_2O [Gla16].

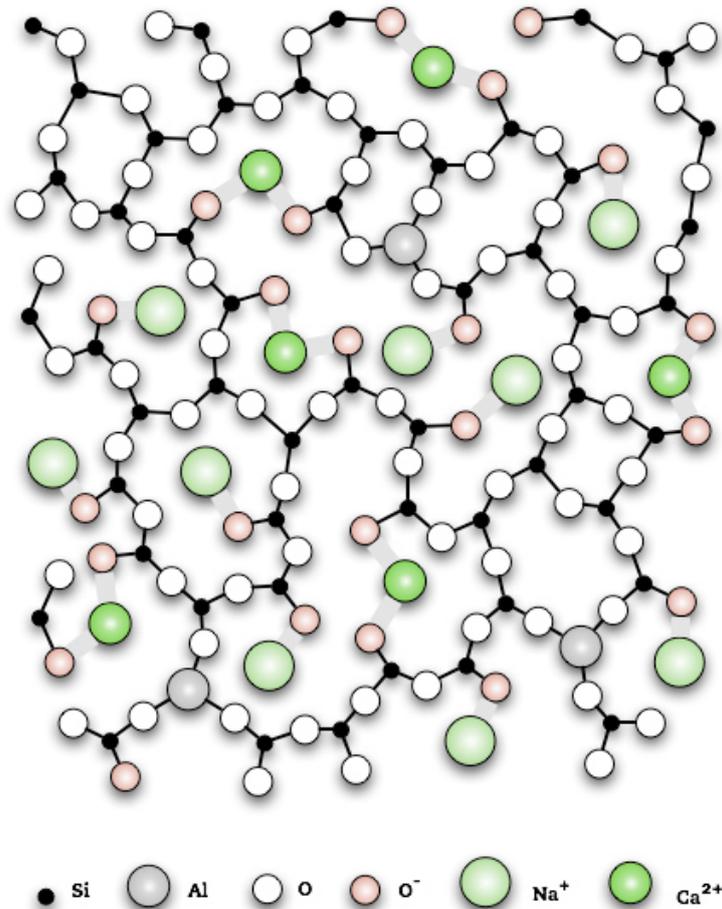


Abbildung 2.7.: Mikrostruktur Natron-Kalk-Glas [Wer16]

2. Grundlagen

Tabelle 2.1.: Rohstoffe von Glas und deren molare Bildungsenthalpien [Wer16]

Rohstoffe	SiO_2	K_2O	Na_2O	MgO	CaO	Al_2O_3
Gewichtsprozent	72,5	0,5	13,4	3,2	8,9	1,1
$\Delta_B H \frac{\ominus}{m}$ in kJ/mol	-911	-361	-418	-601	-635	-1.676

Die Wahrscheinlichkeit dafür, dass sich die Ionenbindungen unter Krafteinwirkung (elektrische Feld) lösen und somit Ionen das Glas verlassen können, ist für Metalle der ersten Hauptgruppe, den Alkalimetallen, am höchsten, da diese einwertig sind und somit nur über einfache Bindung gehalten werden. Dies spiegelt sich ebenso in deren Bindungsenthalpien wieder. Im Glas betrifft das insbesondere Natrium- und Kaliumionen [Gla16, Wer16].

2.3.2. Einbettungsmaterial

Einbettungsmaterialien erfüllen zahlreiche wichtige Funktionen zum Schutz der Zellen in PV-Modulen:

- mechanischer Schutz der Zelle (Schockabsorption),
- chemischer Schutz (Witterungsschutz, Korrosion),
- elektrische Isolation,
- adaptierte Haftung zu anderen Modulkomponenten (Glas, Zelle, Rückseitenfolie, Kontakte etc.).

Im Photovoltaikmodulbau wird eine Fülle von Materialien zum Schutz der Zellen eingesetzt. Dazu gehören unter anderem Ionomere, Silicone, thermoplastisches Polyurethan, modifiziertes Polyolefin, PVB und EVA. EVA wird am häufigsten für den Bau von Solarmodulen verwendet und wurde fast ausschließlich für die in dieser Arbeit untersuchten Proben eingesetzt. EVA bezeichnet eine Gruppe von Copolymeren auf Basis von Polyolefin mit 28-33 % Vinylacetatanteil, die als Granulat, wässrige Dispersion, Pulver oder als Folienmaterial erhältlich sind. Aus ihnen werden unter anderem Verpackungen, Folien, Dichtungen und Schuhsohlen hergestellt. EVA zeichnet sich durch hohe Zähigkeit, hohe Flexibilität, gute Adhäsion und gute Witterungsbeständigkeit aus. Im Solarmodulbau wird ein Laminationsverfahren eingesetzt. Hierbei wird das zu Folien verarbeitete EVA für 7-30 Minuten bei Temperaturen um 150 °C aufgeschmolzen, dabei wird die Folie glasklar und vernetzt dreidimensional. Nach dem Abkühlen liegt so ein dauerhafter Verbund vor, der die Zellen vor Umwelteinflüssen schützt. Aufgrund der Massenanzahl ist das EVA kostengünstig, weist jedoch auch Nachteile auf: eine vergleichsweise schlechte Lagerstabilität der Ausgangskomponenten, lange Zykluszeiten in der Produktion aufgrund der notwendigen Vernetzung und eine nicht optimale Ultraviolett-(UV-)Beständigkeit [Bit12].

2.4. Wachstumsfunktionen

Die Auswahl einer geeigneten Funktion für die Beschreibung und Analyse von potential-induzierten Degradations- sowie Regenerationsverläufen stellt eine vielschichtige Problematik dar. Betrachtet man die unterschiedlichen Veröffentlichungen zu diesem Thema wird deutlich, dass eine Vielzahl Funktionen zur Beschreibung der PID verwendet werden. Zudem werden in den bekannten Fällen – je nachdem ob der Degradations- oder Regenerationsprozess betrachtet wurde – diverse Funktionen eingesetzt [Hat13, Lec16]. Zusätzlich verwenden Forschergruppen unterschiedliche Kennwerte für die Quantifizierung der PID. Es werden hauptsächlich drei Kennwerte herangezogen. Es sind

- die geflossene Ladung,
- die Leistung
- oder wie in dieser Arbeit geschehen der Shunt-Widerstand.

In Abhängigkeit des verwendeten Kennwerts kann die PID mathematisch als Schrumpfung (Shunt-Widerstand und Leistung) bzw. Wachstum (Ladung) beschrieben werden. Jedes Wachstum kann auch als Zerfall beschrieben werden und umgekehrt. In dieser Arbeit wird die Entstehung bzw. der Abbau von Kurzschlüssen indirekt durch den Kennwert des Shunt-Widerstands quantifiziert. Es wird angenommen, dass die Anzahl der Kurzschlüsse umgekehrt proportional zu der Höhe des Shunt-Widerstands ist. Bei Verwendung des Shunt-Widerstands beschreiben Degradationsverläufe einen Zerfallsprozess und Regenerationsverläufe somit einen Wachstumsprozess. Ein Wachstum liegt vor, wenn die Messgröße über die Zeit kontinuierlich ansteigt. Dies kann beispielsweise linear, exponentiell oder potentiell geschehen.

Betrachten wir zu Beginn einen reinen Wachstumsprozess wird deutlich, dass dieser in der Realität, also damit auch im vorliegenden Fall der PID, natürlichen Grenzen unterliegt und nicht einem idealen Wachstum entspricht. Dieses Verhalten wird in der Mathematik als begrenzter Wachstum bezeichnet. Mathematisch wurde ein begrenzter Wachstumsprozess erstmals von Pierre VERHULST (1804-1849) bei seinen Untersuchungen über den Verlauf des Pariser Bevölkerungswachstums vorgestellt [Ver66].

Ein Wachstum heißt beschränkt mit der Grenze S , wenn die Änderung $f'(t)$ (rekursive Schreibweise: $f(t+1) - f(t)$) nicht konstant, sondern proportional zum Restbestand $S - f(t)$ ist. Die Untersuchungen im Zuge dieser Arbeit haben gezeigt, dass dieses Modell in vielen Fällen eine gute Anpassung zeigt. Doch wird die Anpassung umso schlechter je langsamer die Regeneration abläuft. Bei trägen Regenerationsprozessen, wie es beispielsweise bei niedrigen Temperaturen der Fall ist, ist die Anpassung, aufgrund des geringen Anstiegs zu Beginn, mittels beschränkten Wachstums nicht ausreichend.

Eigene Analysen haben gezeigt, dass in diesen Fällen die Verwendung einer logistischen Funktion weitaus bessere Anpassungen erzielt. Ein Wachstum heißt logistisch mit der Schranke S , wenn die Änderungsrate $f(t+1) - f(t)$ nicht konstant, sondern proportional zum Produkt aus Bestand und Sättigungsmanko $f(t) \cdot (S - f(t))$ ist. Auf die PID bezogen bedeutet dies im einfachsten Fall, dass die Bildung von Kurzschlüssen zu

2. Grundlagen

Beginn einer PID-Belastung oder die Ausheilung von Kurzschlüssen zu Beginn einer PID-Regeneration deutlich steigt, jedoch nach dem Erreichen eines Wendepunkts im weiteren Verlauf begrenzt wird.

Die Differentialgleichung, die sich daraus ergibt, lautet:

$$f'(t) = k \cdot f(t) \cdot (S - f(t)) \quad (26)$$

Eine Lösung dieser Differentialgleichung ist folgende Funktion:

$$f(t) = S \cdot \frac{1}{1 + e^{-kSt} \left(\frac{S}{f(0)} - 1 \right)} \quad (27)$$

Laut HAARMANN setzt sich das logistische Wachstum prinzipiell aus exponentiellem und beschränktem Wachstum zusammen. Charakteristisch für diese Wachstumsart ist die Trendwende (Wendepunkt der Wachstumsfunktion), die den Übergang vom exponentiellen zum beschränkten Wachstum markiert [Haa12].

Die Wachstumsfunktion, die in dieser Arbeit Verwendung findet, weicht an einem Punkt von dieser Definition ab. Die verwendete Funktion setzt sich nicht aus einem exponentiellen, sondern aus einem potentiellen, aber ebenso einem beschränktem Wachstum zusammen. Der Wendepunkt ist ebenso charakteristisch für diese Funktion.

Die Entscheidung für die Verwendung dieser neuen, in der Literatur kaum bekannten Funktion wurde aus mehreren Gründen getroffen. Mit der gewählten Funktion ist es, im Gegensatz zu der logistischen Funktion, möglich, ein Wachstum und gleichzeitig einen Zerfall mit einer sehr guten Anpassung zu beschreiben. Schaut man sich zum Beispiel einen typischen Degradationsverlauf an, so konvergiert dieser für große t gegen 0. Dieses Verhalten ist mit der Funktion 27 nicht zu realisieren, da für die Grenze $S = 0$ die Funktionsgleichung für alle t die Lösung $f(t) = 0$ besitzt. In diesem Fall muss für den Zerfall eine abweichende Funktion verwendet werden. Dies wurde unter anderem durch LECHNER realisiert, der zur Beschreibung der Regeneration, abweichend zur Degradation, eine gestreckte Exponentialfunktion (engl.: stretched exponential function) verwendet [Lec16].

Die nun folgende Funktion erfüllt hingehend alle Voraussetzung, die Degradation sowie deren Umkehrung geeignet darzustellen. Vor diesem Hintergrund wurde das Simulationsmodell auf Basis folgender S-Funktion entwickelt:

$$R_{SH}(t) = \frac{A_1 - A_2}{1 + \left(\frac{t}{s_1}\right)^{p_1}} + A_2 \quad (28)$$

wobei s_1 die sogenannte Zeit des Wendepunkts der Funktion und p_1 die Potenz darstellt. Darin ist

- t die Zeit $t = \mathbb{R}^{\geq 0}$,
- A_1 der Startwert,
- A_2 die untere Schranke im Fall der Degradation und die obere Schranke im Fall der Regeneration,

2. Grundlagen

- s_1 die Zeit des Wendepunkts bzw. die Verschiebung bezüglich der Abszisse um den Faktor $|s_1|$,
- p_1 die Potenz darstellt.
- Mit der ersten Ableitung $R'_{SH}(t) = \frac{-(A_1 - A_2) \cdot p_1 \cdot (\frac{t}{s_1})^{p_1}}{t \cdot ((\frac{t}{s_1})^{p_1} + 1)^2}$ kann die Wachstumsgeschwindigkeit in jedem beliebigen Punkt des Graphen berechnet werden [Eng10], für die Steigung im Wendepunkt s_1 ergibt sich: $R'_{SH}(t = s_1) = \frac{-(A_1 - A_2) \cdot p_1}{s_1 \cdot 4}$.

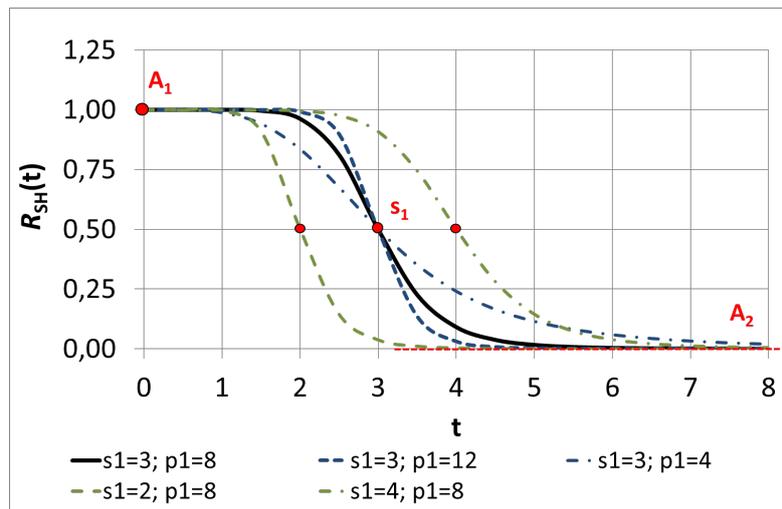


Abbildung 2.8.: Verlauf einer S-Funktion, am Beispiel eines normierten R_{SH} -Degradationsverlaufs, in Abhängigkeit der Parameter s_1 und p_1 mit dem Startwert $A_1 = 1$ und der unteren Schranke $A_2 = 0$

Abbildung 2.8. verdeutlicht den Verlauf der S-Funktion in Abhängigkeit ihrer Parameter am Beispiel der Degradation.

Somit ist ein Alleinstellungsmerkmal dieser Arbeit, dass beide Prozesse im Gegensatz zu anderen Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet mit Hilfe einer einzigen Funktion abgebildet wird. Im Fall der Degradation gilt, dass der Parameter $A_1 > A_2$ und im Fall der Regeneration dass $A_1 < A_2$ ist. Des Weiteren können die Zusammenhänge des Zerfalls, also der Degradation in den meisten Fällen mit lediglich zwei Parametern s und p analysiert werden. Da A_1 in einer normierten Darstellung den Wert 1 annimmt und die Verläufe in einem Großteil der Fälle gegen 0 konvergiert und somit A_2 den Wert 0 annimmt. Dies vereinfacht die Analyse der unterschiedlichen Verläufe erheblich und veranschaulicht physikalische Zusammenhänge der Beschleunigung sowie der Verzögerung, wie sie am Beispiel der Temperatur (Kap. 5.1.2 und 5.3.3) und der Spannung (Kap. 5.1.3) durchgeführt wurden, sehr prägnant.

Ein letzter Vorteil, der mit der vorgestellten Funktion einhergeht, manifestiert sich in der Simulation des Shunt-Widerstands anhand von Klimadaten in Kapitel 7. Der Funktionswert A_1 ermöglicht es, den Beginn des Regenerationsverlaufs (und Degradationsverlaufs) zum Zeitpunkt $t = 0$ direkt mittels Funktionsparameters festzulegen. Für $t = 0$ gilt $R_{SH}(t) = A_1$. Bei den später in dieser Arbeit vorgestellten Berechnungen des Shunt-Widerstands anhand von Klimadaten findet ein ständiger Wechsel zwischen

2. Grundlagen

Degradations- bzw. Regenerationsphasen statt. Bei jedem Wechsel kann der zuletzt berechnete Shunt-Widerstandswert mit dem A_1 -Wert der folgenden Berechnungsformel gleichgesetzt werden und ermöglicht somit eine einfache und stabile Berechnung.

Der Fokus dieser Arbeit stellt die Analyse der Einflussfaktoren und ihre Quantifizierung dar. Nichtsdestotrotz sind die physikalischen Mechanismen der PID von großem Interesse. Für die Berechnung der Aktivierungsenergie, für Degradation bzw. Regeneration, wird daher im Kapitel 6.5. dazu übergegangen, einen Zeit-Temperatur-Superpositions-Ansatz in Kombination mit der Arrhenius-Gleichung anzuwenden, um den Unterschied beider PID-Phasen detaillierter zu analysieren. Hier zeigt sich, der Vorteil der S-Funktion erneut. Der Verschiebungsfaktor der Zeit-Temperatur-Superposition a_T kann allein durch die Normierung des s -Parameters bestimmt werden und eine komfortable Berechnung der Aktivierungsenergie ist möglich.

3. Charakterisierung des PID-Effekts

Zur Bestimmung und Bewertung der PID-Einflussgrößen wurden die unterschiedlichen Kennwerte, wie Leistung und Shunt-Widerstand, mithilfe von verschiedenen Verfahren ermittelt. Die einzelnen Verfahren werden in diesem Kapitel vorgestellt. Es handelt sich dabei um:

- die Hellkennlinienmessung,
- die partielle Dunkelkennlinienmessung,
- die Elektrolumineszenz-Messung.

Alle Messverfahren stehen im Labor der PI Berlin AG zur Verfügung. Das Labor und die dortigen Messverfahren sind – bis auf die Dunkelkennlinienmessung – nach IEC 17025³ akkreditiert.

3.1. Leistungsmessung

Das Messen der Modulleistung unter STC-Bedingungen nach IEC 60904-1 ist international anerkannt und wird zur Klassifizierung und Untersuchung von Photovoltaikmodulen von den Modulherstellern sowie Prüfinstituten angewendet. Die wichtigsten festgelegten Testbedingungen sind:

- Modultemperatur: 25 °C,
- Air Mass (AM): 1,5,
- Bestrahlungsstärke: 1000 W/m².

Die Leistungsmessung am PI Berlin wird unter Verwendung eines Blitzlichtsonnensimulators (BLS) der Klasse A Flashlight Sun Simulator III von der Firma PASAN SA, inklusive Flash Generator BV 85-41 No P1663 mit Temperatursensoren vorgenommen. Die Inhomogenität wird regelmäßig mit einer Referenzzelle der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) und das Spektrum mit einem Spektrometer der Firma Tec5 AG überprüft. Seine Lichteinheit erzeugt eine kurzzeitige Einstrahlung von 1000 W/m². Über eine von der Messeinheit gesteuerte elektronische Last wird innerhalb von 10 ms eine Strom-Spannungs-Kennlinie aufgenommen. Um etwaige Fehlerquellen zu identifizieren und die Lampenalterung aufzuzeichnen, werden täglich Referenzmessungen durchgeführt. Aufgrund leichter Temperaturschwankungen im Labor in Höhe weniger Kelvin

³ Norm für generelle Anforderungen an die Kompetenz von Test- und Kalibrierlaboren

3. Charakterisierung des PID-Effekts

wird während jeder STC-Messung die Modultemperatur erfasst. Diese Schwankungen, mit einer maximalen Toleranz von 2 K werden bei der Auswertung mittels entsprechender Temperaturkoeffizienten korrigiert. Messungen außerhalb der Toleranz werden nicht durchgeführt. Die durchschnittlichen Werte aller Temperaturkoeffizienten, die in den Jahren 2009-2012 am PI Berlin bestimmt wurden, werden als Standardwert materialspezifisch verwendet. In Tabelle 3.1. sind die einzelnen Koeffizienten für kristalline Technologien aufgelistet.

Tabelle 3.1.: Jahresdurchschnitt der verwendeten Temperaturkoeffizienten für mono- und multikristalline Zelltechnologien

Temperaturkoeffizient	monokristallin	multikristallin
T_{coeffUOC}	-0,33 %/K	-0,32 %/K
T_{coeffISC}	0,05 %/K	0,06 %/K
$T_{\text{coeffPMPP}}$	-0,45 %/K	-0,43 %/K

Während der eigentlichen Messung wird das zu prüfende Modul senkrecht zur Lichtquelle in einer Probenbefestigungseinrichtung platziert und mit Schraubklemmen befestigt. Die Probenbefestigung wird mittels Anschlag bei jeder Messung an derselben Stelle in der Flashermessebene positioniert, um etwaige Einflüsse durch Einstrahlungsinhomogenität auf ein Minimum zu reduzieren. Der Anschluss erfolgt über vergoldete Stecker der Firma Multi Contact GmbH. Zur Verifizierung der Modultemperatur wird zusätzlich ein PT 100⁴ an der Modulrückseite befestigt. Abschließend wird der Messaufbau mit einem schwarzen Vorhang verdeckt, um jeglichen äußeren Lichteinfluss zu unterbinden.

Der Lichtblitz zur Leistungsmessung wird von vier Xenonlampen erzeugt. Mit der elektronischen Last wird die Modulkennlinie vom Kurzschlussstrom bis zur Leerlaufspannung abgefahren. Neben der graphischen Darstellung der Kennlinie werden folgende Werte ausgegeben [Pre10]:

- maximal erreichte Leistung (P_{MPP}),
- Leerlaufspannung (U_{OC}),
- Kurzschlussstrom (I_{SC}),
- Spannung im MPP (U_{MPP}),
- Strom im MPP (I_{MPP}),
- Füllfaktor (FF),
- Serienwiderstand (R_{S}),
- Parallelwiderstand bzw. Shunt-Widerstand (R_{SH}).

⁴ Widerstandstemperaturfühler

3. Charakterisierung des PID-Effekts

Der Parallelwiderstand wird zwar standardmäßig, durch das integrierte Programm SLAB des Sonnensimulators bestimmt, doch werden keine Messabweichungen vom Hersteller angegeben. Das Programm berechnet den R_{SH} mithilfe der reziproken Steigung (Formel 29) der Strom-Spannungskennlinie von $-0,1$ V bis $1/3 U_{MPP}$ [Pre10].

Es gilt:

$$R_{SH} = \frac{1}{\frac{\Delta I}{\Delta U}} \quad (29)$$

Zur Veranschaulichung der Shunt-Widerstandsbestimmung wird in Abbildung 3.1. der Hellkennlinienbereich einer unbelasteten und einer PID-belasteten Probe gezeigt, welche bei der Ermittlung des Shunt-Widerstands einbezogen wird.

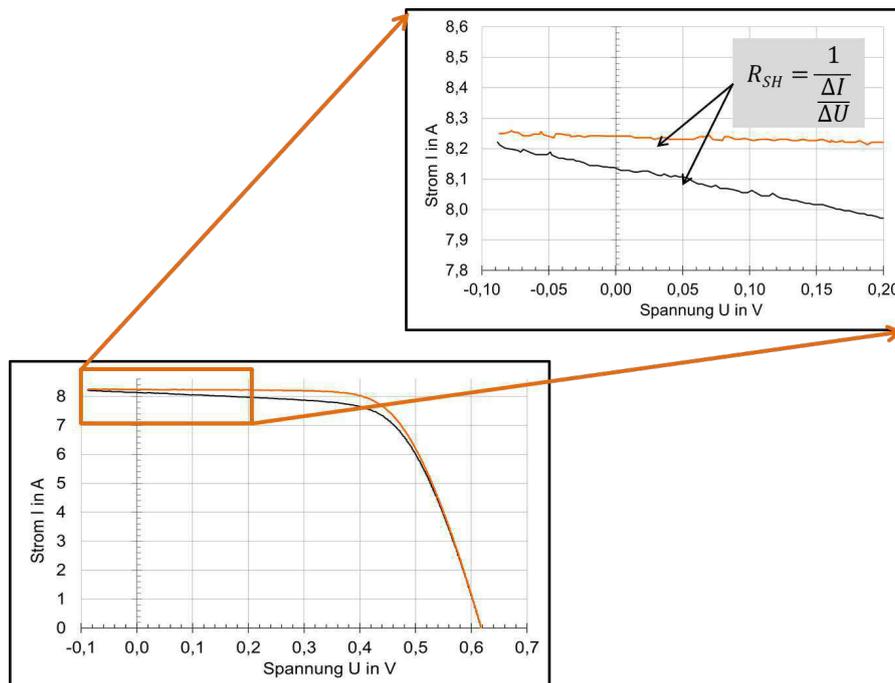


Abbildung 3.1.: Hellkennlinie einer PID-belasteten (schwarz) und unbelasteten Probe (orange). Der Ausschnitt zeigt den Bereich der Kennlinie, an dem der Shunt-Widerstand durch die jeweilige Steigung bestimmt wird.

Zu Beginn einer negativen Spannungsbelastung sinkt der Shunt-Widerstand. Ein signifikanter Effekt auf die Leistung ist jedoch erst zu erwarten, wenn der Shunt-Widerstand unter einen charakteristischen Grenzwert sinkt. Es ist die Grenze, an der die Zelleffizienz bzw. -leistung, gemessen bei 1000 W/m^2 , erstmals eine deutliche Änderung aufzeigt. Die Grenze wird im späteren Verlauf als Ausfallkriterium bezeichnet. Der Grenzwert wurde für die in dieser Arbeit verwendeten Proben mit 6Ω bestimmt. Dies entspricht einem Shunt-Widerstand von rund 15 % des im Durchschnitt initial ermittelten Wertes aller für diese Arbeit verwendeten Proben. Dies deckt sich mit Untersuchungen von GRUNOW, die den Einfluss des Shunt-Widerstands auf die Leistung behandeln, dort wurde eine vergleichbare Grenze von 10Ω ermittelt und ein annähernd identischer Verlauf geschildert [Gru04].

3.2. Partielle Dunkelkennlinienmessung zur Bestimmung des Shunt-Widerstands

Die partielle Dunkelkennlinienwiderstandsmessung ist, wie der Name schon suggeriert, eine selektive Messung der Dunkelkennlinie. Ihr größter Vorteil besteht im Vergleich zum Blitzlichtsonnensimulator im reduzierten, konstruktiven Aufwand und in der kürzeren Messzeit. Die Messung wird in einer dunklen Umgebung durchgeführt, weshalb keine anspruchsvolle Lichtquelle benötigt wird. Ein Nachteil der Messung besteht darin, dass keine weiteren Informationen, wie z. B. Leistung oder Füllfaktor, erzeugt werden können. Bei der Messung wird ein definierter Arbeitspunkt auf der Dunkelkennlinie der Solarzelle ausgewählt. Für die hiesigen Untersuchungen wurde dieser Wert bei $-0,3\text{ V}$ festgelegt. Bei geringeren Spannungen sind die Anforderungen an die Messung aufgrund des ebenfalls geringeren Stromes erhöht. Es ist jedoch zu beachten, dass bei höheren Spannungen der hohe Rückwärtsstrom einen erheblichen Einfluss auf das Regenerationsverhalten der Proben haben kann, sodass der Wert $-0,3\text{ V}$ einen berechtigt festgelegter Mittelwert darstellt.

Erstmals wurde die Shunt-Widerstandsmessung anhand der Dunkelkennlinie für die PID-Beobachtung von Q-Cells [Tau13] vorgestellt. In den Untersuchungen von TAUBITZ konnte auch die Anwendbarkeit bei PID-Degradationsversuchen gezeigt werden. Abbildung 3.2. verdeutlicht die vereinfachte Prinzipschaltung nach TAUBITZ. Da sich die Berechnung auf die Gegebenheit stützt, dass $I(0\text{ V}) = 0\text{ A}$ ist, ist die Messung ausschließlich anhand der Dunkelkennlinie möglich. Betrachtet man einen typischen Dunkelkennlinienverlauf einer Solarzelle und verbindet den gewählten Arbeitspunkt mit dem Nulldurchgang der Abszisse, so entsteht eine Gerade, deren Steigung dem Anstieg der STC-Kennlinie in diesem Bereich entspricht. Mittels dieser Steigung kann ebenso wie bei der Hellkennlinie der Shunt-Widerstand bestimmt werden.

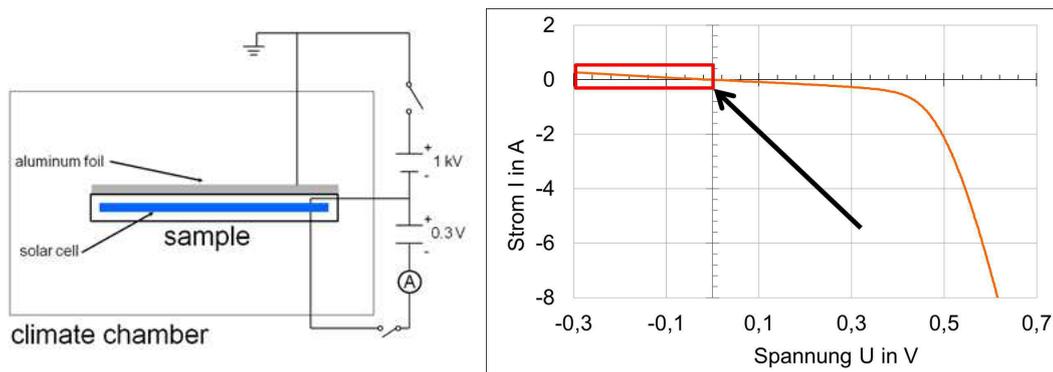


Abbildung 3.2.: Schematischer Aufbau der Shunt-Widerstandsbestimmung während PID-Versuchen nach Taubitz [Tau13] und Markierung des Bereiches der Dunkelkennlinie (roter Kasten), der durch die Messung erfasst wird

Um die Genauigkeit der von TAUBITZ vorgestellten Messschaltung zu erhöhen, wurde die Widerstandsmessung mit Vierleitertechnik realisiert, wodurch im Gegensatz zu

3. Charakterisierung des PID-Effekts

TAUBITZ' Methode auf eine Leitungswiderstandskorrektur verzichtet werden kann. Anders als bei der Blitzlichtsimulatormessung, die standardmäßig bei einer Proben­temperatur von 298 K durchgeführt wird, wird die Dunkelstrommessung bei unterschiedlichen Temperaturen angewendet. Dadurch ist eine Temperaturkorrektur notwendig. Für die Korrektur wird darauf zurückgegriffen, dass ein linearer Zusammenhang zwischen Temperatur und gemessenem Shunt-Widerstand besteht. Durch eine vorgelagerte Kalibrierungsmessung, welche den Shunt-Widerstand bei unterschiedlichen Temperaturen bestimmt, kann das Temperaturverhalten ermittelt und der Messwert auf 298 K korrigiert werden. Es gilt:

$$R_{\text{SH}}(\vartheta) = m \cdot \vartheta + R_{\text{SH}}(273) \quad (30)$$

$$R_{\text{SH}}(298) = m \cdot 298 + R_{\text{SH}}(273) \quad (31)$$

Eine repräsentative Kalibrierkurve einer Referenzprobe ist in Abbildung 3.3. dargestellt. Bei unbelasteten bis mittelstark belasteten Proben zeigt der Shunt-Widerstand ein lineares Temperaturverhalten.

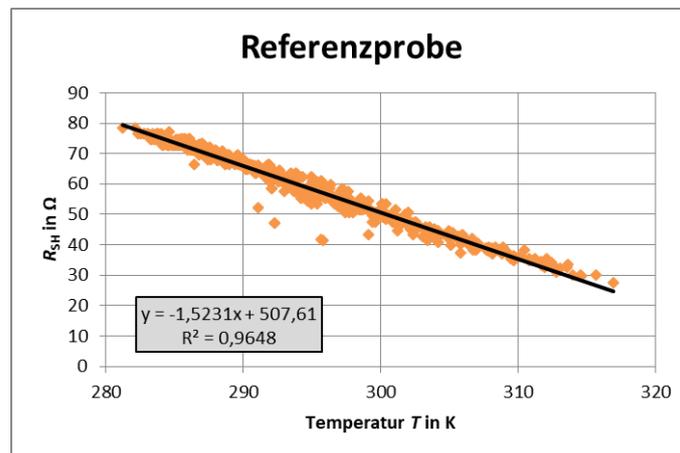


Abbildung 3.3.: Temperaturabhängigkeit des R_{SH} der Referenzprobe für die Temperaturkorrektur

Bei der Temperaturkorrektur kann es bei stark degradierten Proben unter Umständen zu deutlichen Fehlern kommen. Im Zuge der Messungen zeigte sich, dass sich das Temperaturverhalten der Proben mit hohem Degradationslevel deutlich verändert. Genauer zu diesem Phänomen folgt in der Fehlerbetrachtung (siehe Abschnitt 4.8.).

3.3. Elektrolumineszenzmessung

Mit dem Ziel, die Diffusionslängen von Minoritätsladungsträgern in polykristallinen Silizium-Solarzellen mithilfe einer CCD- oder CMOS-Kamera zu untersuchen, etablierte Fuyuki [Fuy05] die Elektrolumineszenz-(EL-)Messung in der PV-Industrie.

Die Fehlerdiagnose mittels Elektrolumineszenz dient der Detektion und qualitativen Bewertung von Mängeln bei PV-Modulen und -Zellen. Mit der EL-Messung lassen sich vielfältige Defekte, wie z. B. Zellrisse und -brüche, Kurzschlüsse, Korrosion und, für diese

3. Charakterisierung des PID-Effekts

Arbeit entscheidend, PID zeigen. Lumineszenz beschreibt im Allgemeinen die Emission von Licht durch Energieeintrag in ein Material.

Es gibt verschiedene Arten von Lumineszenz; bei der Elektrolumineszenz erfolgt der Energieeintrag in Form von elektrischer Energie. Hierbei werden Überschussladungsträger in das Halbleitermaterial der Solarzelle injiziert, welche rekombinieren und dabei ihre Energie in Form von Photonen freisetzen. Dieser Vorgang wird durch Bestromung der Module oder einzelner Zellen in Durchlassrichtung mittels einer Stromquelle veranlasst (vgl. Abb. 3.4.).

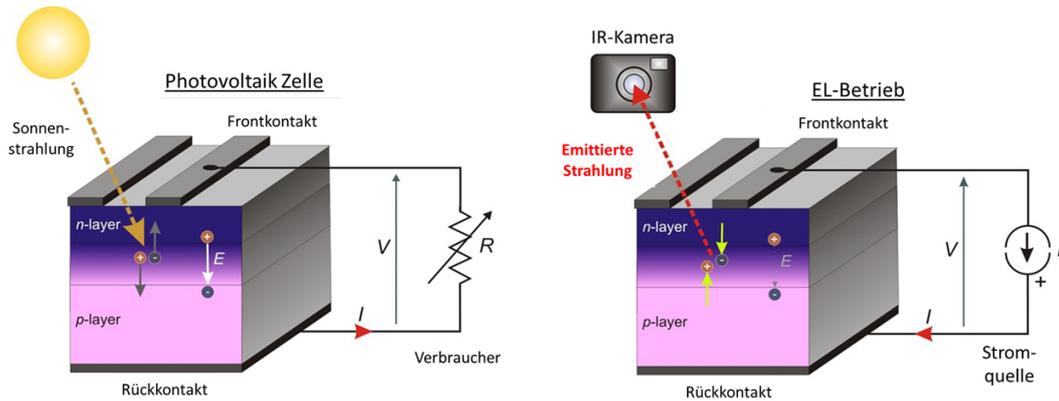


Abbildung 3.4.: Die linke Abbildung zeigt den Standardbetriebsfall einer Solarzelle. Die Zelle wird von einer Lichtquelle bestrahlt und generiert Elektronen-Loch-Paare. Im rechten Bild ist die Situation während einer EL-Messung dargestellt. Eine externe Stromquelle erzeugt einen Ladungsträgerüberschuss im Halbleitermaterial, welcher zu Rekombinationen führt. Der Teil der strahlenden Rekombination kann von einer speziellen Kamera aufgenommen und zu einer EL-Aufnahme verarbeitet werden [Kra09].

Das Lumineszenzspektrum von Silizium-Solarzellen liegt aufgrund der Bandlücke bei Raumtemperatur im Bereich von 950 nm bis 1700 nm und hat sein Maximum bei etwa 1150 nm. Das Spektrum liegt im nahen Infrarotbereich (NIR) und ist daher für das menschliche Auge unsichtbar. Zudem ist die Intensität sehr schwach.

Die Aufnahme für ein hochqualitatives Bild wird daher in einem lichtdichten Testraum durchgeführt. Am PI Berlin werden die Bilder mit einer CMOS-Spiegelreflexkamera (NIKON D800) mit ausgebautem Infrarotfilter aufgenommen und das Labornetzteil GEN-300-11-1P230 von TDK-Lambda wird als Stromquelle verwendet [Fri14].

Wie in Kapitel 5.6.1. vorgestellt, sind jedoch auch bei Freifeldanlagen Aufnahmen in der Nacht ohne lichtdichten Testraum möglich. Das Signal kann durch dieselbe Spiegelreflexkamera mit ausgebautem Infrarot-(IR-)Filter detektiert werden, aber es können auch speziell gekühlte Kameras zum Einsatz kommen.

Im Fall der PID hat sich die Elektrolumineszenz als hilfreiches bildgebendes Messverfahren für die Defektanalyse bewährt. Zum einen kann die Elektrolumineszenzmessung die Änderung im Shunt-Widerstand durch eine geänderte Helligkeitsverteilung sichtbar machen, zum anderen eröffnet eine EL-Aufnahme die Möglichkeit einer Analyse der PID-Ausprägung auf Modul- aber auch auf Zellebene. Sind Zellen durch die eine PID betroffen, verlieren diese durch lokale Kurzschlüsse des pn-Übergangs die Fähigkeit, La-

3. Charakterisierung des PID-Effekts

dungsträger strahlend zu rekombinieren. Betroffene Bereiche besitzen nur noch widerstandsähnliche Eigenschaften und geben ihre Energie lediglich in Form von langwelliger Wärmestrahlung ab. Diese kann jedoch nicht von EL-Kameras detektiert werden. Auf den EL-Bildern erscheinen die kurzgeschlossenen Zellen zunächst dunkler und im stark fortgeschrittenen Stadium schwarz. Dabei gilt: Je geringer das Strominjektionslevel, desto deutlicher werden die Kurzschlüsse einer EL-Aufnahme [Mat12].

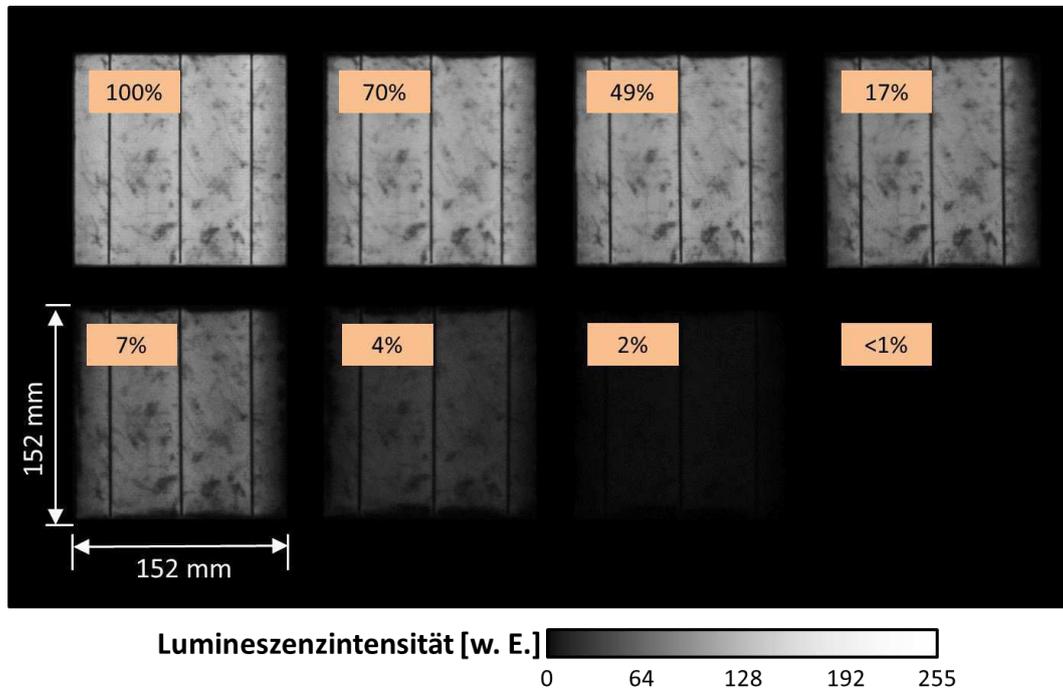


Abbildung 3.5.: EL-Aufnahmen mit relativen Shunt-Widerstandshöhe einer kristallinen Zelle in Prozent während eines typischen PID-Verlaufs

Zur Verdeutlichung sind unterschiedliche PID-Stadien einer Zelle in Abbildung 3.5. visualisiert. Die Aufnahmen wurden bei einem Strom in Höhe von 2 A und einer Belichtungszeit von 30 s aufgenommen. Für jede Aufnahme ist der Prozentsatz des zu Beginn gemessenen Shunt-Widerstands abgebildet. Es wird deutlich, wie mit zunehmender Reduktion des Widerstands mehr und mehr dunkle Bereiche am Zellrand erscheinen und zusätzlich die Gesamthelligkeit der EL-Aufnahmen abnimmt. Am Ende der Messreihe sind die Kurzschlüsse soweit fortgeschritten, dass die gesamte Zelle in der Aufnahme schwarz erscheint.

4. Experimenteller Teil

4.1. Geräteentwicklung

Im Verlauf der Promotionsarbeit wurde dazu übergegangen, den Shunt-Widerstand anhand von Vierleitertechnik und Dunkelkennlinie zu ermitteln. Zu diesem Zweck wurden neue Messmethoden entwickelt und speziell angepasste Teststände konzipiert und konstruiert.

Zu Beginn dieses Kapitels wird der grundlegende Labormessaufbau erläutert, im Anschluss folgt die Vorstellung der Wirkungsweisen zweier speziell für diese Arbeit entwickelter Messsysteme. Zum Anfang wurde für die Messungen im Labor als Prototyp die „Indoor-Messbox“ entwickelt. Um den Messungen unter realen Bedingungen gerecht zu werden, wurde diese Messbox um mehrere Eigenschaften erweitert und als eigenständige Testeinheit für die Messungen unter realen Bedingungen weiterentwickelt. Die Schaltpläne der jeweiligen Aufbauten sind diese Arbeit angehängt (siehe A.3.).

4.1.1. Allgemeiner Versuchsaufbau

Die Proben wurden im Zuge der PID-Untersuchungen unterschiedlichen Umgebungsbedingungen ausgesetzt. Die gewünschten Umgebungstemperaturen und Luftfeuchten wurden in einem Klimaschrank (Hersteller: TABAI ESPEC CORP., Typ: PR1SP) erzeugt, in dem die Proben in einer Halterung stehend platziert wurden. Anschließend wurden das Erdungskabel der Probenkontaktierung und die kurzgeschlossenen Anschluss-Stecker aus dem Klimaschrank zum Netzteil (Hersteller: iseg Spezialelektronik GmbH, Baureihe: ECH 224) geführt und dort angeschlossen.

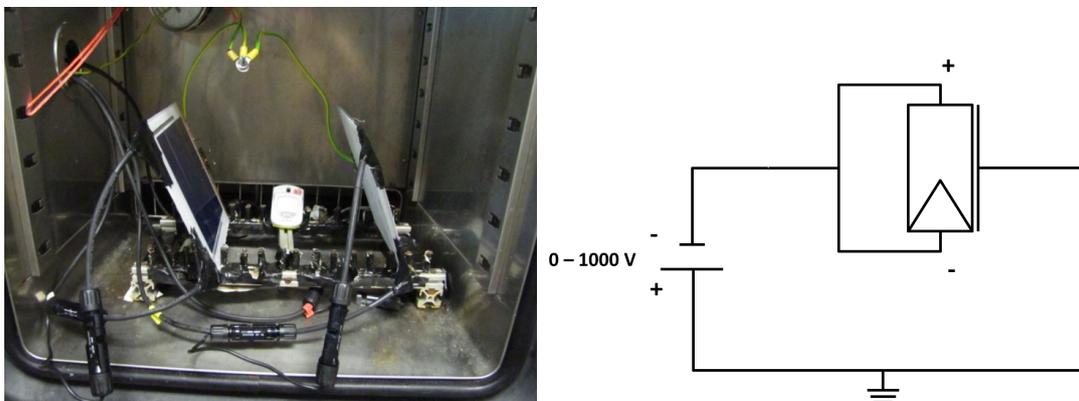


Abbildung 4.1.: Positionierung der Proben mit Masse- und Spannungsanschluss in dem Klimaschrank (links), zugehöriges Ersatzschaltbild (rechts)

Die gewünschte negative Spannung wurde eingestellt und die korrespondierenden Ströme zur Funktionskontrolle wurden während des Versuches aufgezeichnet. Zusätzlich wurden Lufttemperatur und -feuchtigkeit mit einem kalibrierten Datenlogger zwischen den Proben protokolliert. Abbildung 4.1. zeigt die Lagerung der Proben im Klimaschrank und das zugehörige Ersatzschaltbild.

Um Unterschiede in den Oberflächenleitfähigkeiten auszuschließen bzw. Temperaturunterschiede auszugleichen, wurde für einige Versuchsreihen zusätzlich ein Wasserbad in den Klimaschrank integriert, in das die Proben gänzlich eingetaucht wurden. Ebenso konnte eine Halogenlichtquelle in den Klimaschrank eingebaut werden.

4.1.2. Indoor-Messbox zur Messung des Shunt-Widerstands

Um den Shunt-Widerstand einer Probe während einer PID-Belastung in einem Klimaschrank mittels BLS zu bestimmen, ist eine regelmäßige Entnahme der Proben aus dem Klimaschrank notwendig. Dies ist jedoch zum einen sehr aufwendig und zum zweiten bergen wiederholte Probenentnahmen ein gewisses Fehlerpotential. Aus diesem Grund wurde eine partielle Dunkelkennlinienmessung mittels Vierleitertechnik entwickelt, um den Shunt-Widerstand innerhalb des Klimaschranks aufzuzeichnen. Eine entscheidende Notwendigkeit für die Messung ist, dass sie in Dunkelheit durchgeführt wird, da nur so gewährleistet ist, dass die aufgezeichnete Kennlinie durch den Nullpunkt verläuft. Zu den wichtigsten Verbesserungen durch die Dunkelkennlinienmessung zählen u. a. ein quasi unterbrechungsfreier Versuchsablauf einer Messreihe sowie eine Messung des Parallelwiderstands in wesentlich kürzeren Zeitintervallen. Da die Erzeugung eines Messwerts mittels Vierleitermessung nur 2-5 Sekunden dauert, führt dies zu einer besser aufgelösten Darstellung der R_{SH} -Degradation. Im Vergleich benötigt der gesamte Prozess der Shunt-Widerstandsbestimmung mittels eines BLS mindestens 30 Minuten.

Der Messaufbau besteht im Prinzip aus einem Netzteil, einer Messbox, einem Klimaschrank und der Sicherheitstechnik. In Abbildung 4.2. ist der Messaufbau schematisch illustriert. Die Messprozedur erfolgte wie bei dem allgemeinen Messaufbau in mehreren Schritten. Zu Beginn der Testreihe wird die Probe kontaktiert und mittig in der Probenhalterung positioniert. Das Erdungskabel wird angeschlossen und die gewünschten Umweltbedingungen an der Klimakammer eingestellt. Die Spannungshöhe während der

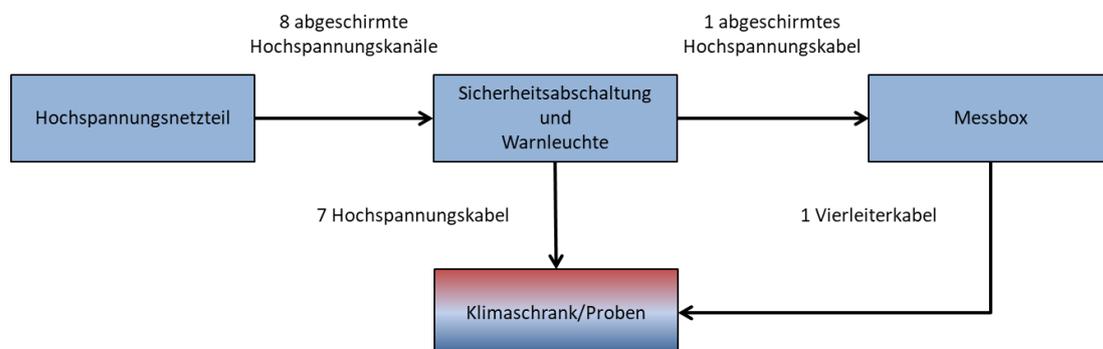


Abbildung 4.2.: Prinzipschaltbild der Indoor-Messboxschaltung

4. Experimenteller Teil

PID-Lastung wird direkt am Hochspannungsnetzteil reguliert. Vor Beginn der eigentlichen Messung werden mittels Software die Messparameter abgestimmt. Die Anzahl der Messpunkte und das Messintervall (Standard 0 und -0,3 V) müssen je nach Belastungsart angepasst werden. Kontrollfelder im Menüfeld der selbst verfassten Software unten rechts (vgl. Abb. 4.3.) zeigen während der Messung den jeweiligen Betriebszustand an. Ein Häkchen repräsentiert hierbei ein geschlossenes Relais bzw. den Status der Messung. Abbildung 4.3. zeigt den zugehörigen prinzipiellen Aufbau der Relaisschaltung des Messsystems.

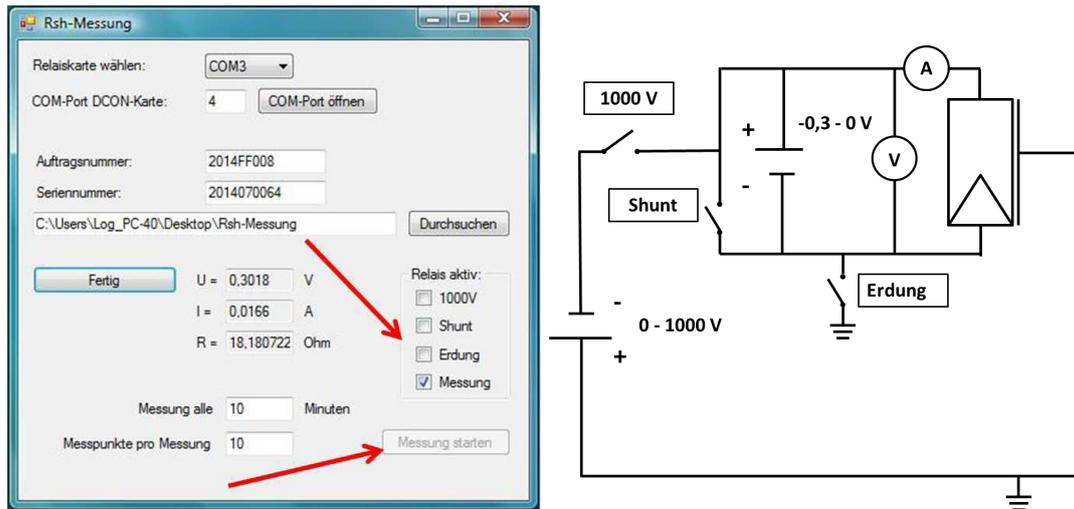


Abbildung 4.3.: Software-Oberfläche der Indoor-Messbox und Prinzipschaltung der verwendeten Relaisschaltung

Im Ausgangszustand ist die Zelle kurzgeschlossen und geerdet. Vor Beginn der eigentlichen Shunt-Widerstandsbestimmung wird die Hochspannung mittels PID-Relais getrennt und die Probe geerdet. Diese Herangehensweise ist notwendig, um die Messelektronik vor möglichen statischen Aufladungen zu schützen. Im Anschluss werden alle Relais geöffnet und die eigentliche Vierleitermessung findet in dem eingestellten Arbeitspunkt sowie der eingestellten Wiederholungsanzahl statt.

Das Ergebnis wird in der Form Datum/Uhrzeit; $U_1;I_1;R_1$ in einer Ascii-Datei am eingestellten Speicherort abgelegt und kann problemlos zur weiteren Auswertung in andere Programme exportiert werden. Zum Schluss wird die Probe kurzgeschlossen und die Hochspannung wieder zugeschaltet.

4.1.3. Universal-Lichtdichte-Forschungs-Installation

Im Gegensatz zu den Laboruntersuchungen befinden sich Proben, die unter realen Bedingungen belastet werden, nicht in einem abgeschlossenen Raum. Die Dunkelkennlinienmessung setzt jedoch voraus, dass die Proben für die Zeit der Widerstandsmessung abgedunkelt werden. Die Notwendigkeit absoluter Dunkelheit unter Freifeldbedingungen stellt damit eine der größten Schwierigkeiten für die Shunt-Widerstandsbestimmung dar. Zusätzlich sollen die Proben während Freifeldbelastungen die Bedingungen in ei-

4. Experimenteller Teil

nem PV-Kraftwerk so realistisch wie möglich erfahren. Das bedeutet, dass die Proben am Tag mit Hochspannung belastet und in der Nacht spannungsfrei belassen werden sollen. Hinzu kommt, dass die Proben ununterbrochen dem Umgebungslicht und den Wetterverhältnissen ausgesetzt sein sollen. Daraus folgt, dass die Proben im Optimalfall während regelmäßiger Widerstandsmessung nur kurzzeitig lichtdicht abgedunkelt werden müssen. Zu diesem Zweck wurde die Universal-Lichtdichte-Forschungs-Installation (ULFI) entwickelt, die eine Erweiterung der Indoor-Messbox darstellt. So ist ULFI um eine Verschattungseinheit ergänzt, welche sich während der PID-Testreihen zyklisch schließt. Die Schaltung besteht im Gesamten aus fünf Komponenten: Hochspannungsnetzteil, Sicherheitsabschaltung, Lux-Sensor, Messbox und motorbetriebenen Verschattungseinheit (vgl. Abb. 4.4.).

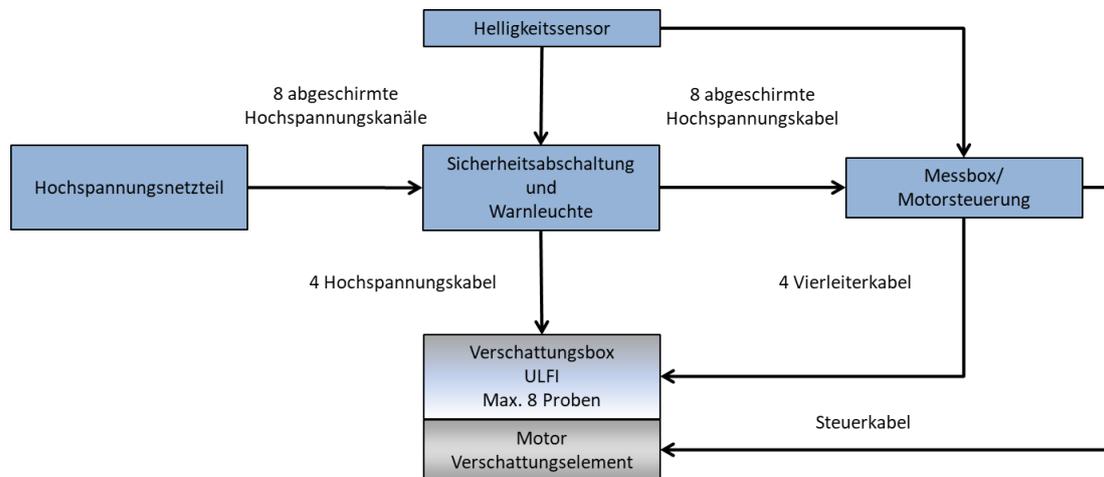


Abbildung 4.4.: Prinzipschaltbild der ULFI

Am Anfang der Messschaltung steht abermals das Hochspannungsnetzteil der Firma iseg Spezialelektronik GmbH. Vom Hochspannungsnetzteil führen die Anschlusskabel bis zu den Proben. Um den Betrieb in einem konventionellen Kraftwerk so realitätsnah wie möglich zu simulieren, wird das Hochspannungsnetzteil im regulären Betrieb mittels Lichtsensor an- und ausgeschaltet. In der ULFI ist Platz für maximal acht Proben. Der Shunt-Widerstand von vier der acht Proben kann kontinuierlich per Vierleitermessung bestimmt werden, wobei zwei Plätze in der Regel mit einer Referenz- und einer Oberflächenleitfähigkeitsmessung belegt sind. Die Referenz besteht aus einem Minimodul, welches keine Spannungsbelastung erfährt. Die Hauptbetriebszustände der ULFI sind in Abbildung 4.5. dargestellt.

Die Messungen folgen dabei einem bestimmten Ablauf. Zu Anfang ist das Verschattungselement geöffnet und die angeschlossenen Proben werden mit Hochspannung belastet. Die Shunt-Messung beginnt damit, dass das Verschattungselement mittels Linearmotor über sowie unter den Proben abgesenkt wird, wodurch ein komplett lichtdichter Kasten entsteht. Nach dem Erreichen der Endposition wird die Messung mittels Messeinheit für jede Probe durchgeführt. Nach Abschluss der Messung fährt das Verschattungselement wieder in die Anfangsposition zurück und die Spannung wird abermals an die

4. Experimenteller Teil

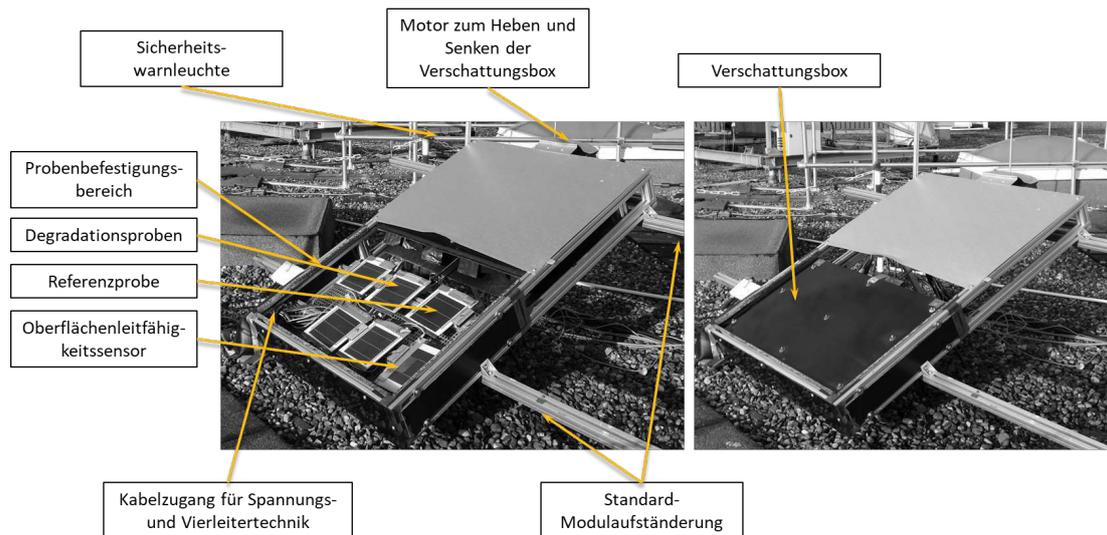


Abbildung 4.5.: Übersicht der ULFI-Komponenten und Darstellung der zwei Hauptbetriebszustände: Spannungsbelastung (links) und Shunt-Widerstandsmessung (rechts)

kurzgeschlossenen Minimodule angelegt. Dies wiederholt sich zyklisch nach variabel einstellbaren Intervallen. Standardmäßig ist das Intervall auf eine Stunde festgelegt, da sich diese Auflösung mit der der später verwendeten Wetterdaten deckt.

4.2. Prüfkörperherstellung

Die PID wird wie bereits erläutert, nicht nur durch die Umweltbedingungen beeinflusst, sondern auch durch die verwendeten Materialien und Herstellungsverfahren der Zellen und Minimodulen. Für eine fundierte PID-Analyse ist es essentiell, dass die Varianz der Proben so gering wie möglich ist. Aus diesem Grund wurden alle Prüfkörper sowohl aus den gleichen Teilkomponenten als auch mittels identischer Verfahren hergestellt. Dabei war die Herstellung der Rohzellen von entscheidender Bedeutung. Die Zellen sollten realitätsnah, also industriell gefertigt und trotzdem für die Versuche relevante vorgegebene Spezifikationen erfüllen. Mit dem Wissen über die Abhängigkeiten der PID hinsichtlich der Einflussfaktoren auf Zellebene, die im Vorfeld der Untersuchungen erarbeitet und veröffentlicht wurden [Koc12b], wurden die in Tabelle 4.1. aufgeführten Spezifikationen einem taiwanesischen Zellhersteller (Taienergy) übermittelt und in Taiwan in einer automatisierten Zellfertigung hergestellt. Nach der Fertigung wurden die Zellen umgehend verpackt und nach Berlin gesendet.

Die unbearbeiteten Zellen durchliefen eine initiale EL-Messung, um Mikrorisse, Zellbrüche oder andere Unregelmäßigkeiten, die die Messung beeinflussen könnten, vorab auszuschließen. Nur Zellen ohne relevante Defekte wurden für die Verarbeitung und die späteren Versuche verwendet. Die Verschaltung der Zellen wurde manuell mittels eines Handlötkolbens durchgeführt.

4. Experimenteller Teil

Tabelle 4.1.: Zellspezifikationen

Zellabmessungen [in]	6
Wafermaterial	Multi-kristallin
Basisdotierung	p
Schichtwiderstand [$\Omega \cdot \text{cm}$]	130
Aufbau der ARC-Schicht	Einzelschicht
Abscheideverfahren ARC-Schicht	PCVD
Abscheidetemperatur ARC-Schicht [$^{\circ}\text{C}$]	450
Brechungsindex	2,06
Kantenisolierung	Nasschemische KOH
Anzahl der Busbars	2
Fingerabstand [mm]	2

Da in heutigen PV-Modulproduktionen fast ausschließlich Floatglas verwendet wird, wurde dies auch bei den Minimodulen verarbeitet. Neben dem Zellaufbau ist die Auswahl eines geeigneten Einbettungsmaterials eine weitere Option auf die PID einzuwirken. Im Vorfeld wurden daher unterschiedliche Einbettungsmaterialien auf ihre PID-Empfindlichkeit hin untersucht. Eine kurze Versuchsbeschreibung und die zugehörigen Ergebnisse sind im Anhang A.1. beigefügt. Anhand der dargestellten Ergebnisse fiel die Entscheidung auf das Einbettungsmaterial EVA5 (STR 15505P/UF). Es ist ein Material, bei dem die PID schnell voranschreitet, aber nicht zu schnell, so dass bei einem hohen Temperaturlevel noch unterschiedliche Phasen der Degradation ausgemacht werden können. Für die Verarbeitung des EVAs wurde das in Tabelle 4.2. definierte Laminationsrezept verwendet.

Tabelle 4.2.: Laminationsrezept zur Lamination der Proben

Laminationsparameter	Wert
Laminationstemperatur [$^{\circ}\text{C}$]	145
Temperaturtoleranz [$\pm \text{K}$]	2
Evakuierungszeit [min]	6
Pins runterfahren [min]	4
Dauer Druckrampe [min]	1,5
Anstieg Druckrampe [bar/min]	0,5
Enddruck [bar]	0,8
Haltezeit [min]	8

Um Proben herzustellen, deren Degradationsverhalten möglichst dem von Modulen gleicht, wurden keine Materialmuster verwendet, sondern ausschließlich Materialien, die auf dem freien Markt erhältlich sind (vgl. Tab. 4.3.).

4. Experimenteller Teil

Tabelle 4.3.: Verwendete Materialien für die Herstellung von Proben und Modulen

Teilkomponente	Beschreibung
Zellen	Hersteller: Taienergy Tech Typ: T1M 17002C
Zellverbinder	Hersteller: Ulbrich of Austria GmbH Typ: Cu-ETP1/2,000x0,150/ Sn62Pb36Ag2
Strangverbinder	Hersteller: Ulbrich of Austria GmbH Typ: Cu-ETP1/5,000x0,300/ Sn62Pb36Ag2
Glas	Floatglas / 3,000 mm
Rückseiten- folie	Hersteller: Krempel Typ: Tedlar/Polyester/Tedlar (TPT) Akasol PV1000V
Einbettungsmaterial	Hersteller: STR (Specialised Technology Resources) Typ: Ethylenvinylacetat (EVA) 15505P/UF
Kabel	Standard 6 mm ² Solarkabel (Lapkabel)
Stecker	Multi-Contact Stecker (MC4)

Im Gegensatz zu handelsüblichen Modulen wurde auf eine Anschlussdose verzichtet, da bei den Minimodulen keine Modulstrings miteinander verschaltet werden müssen. Es fehlt überdies ein Metallrahmen aus Aluminiumprofilen, über den Module in der Regel geerdet werden. Der Rahmen wurde in den Versuchsreihen mittels Kupferfolie simuliert. Die Erdung erfolgte individuell in den späteren Versuchen. Abbildung 4.6. zeigt den Aufbau und die Abmessungen eines Ein-Zellen-Minimoduls. Alle in dieser Arbeit verwendeten Proben haben, wenn nicht explizit erwähnt, diesen spezifizierten Aufbau und wurden in einer zeitlich zusammenhängenden Herstellungsperiode gefertigt.

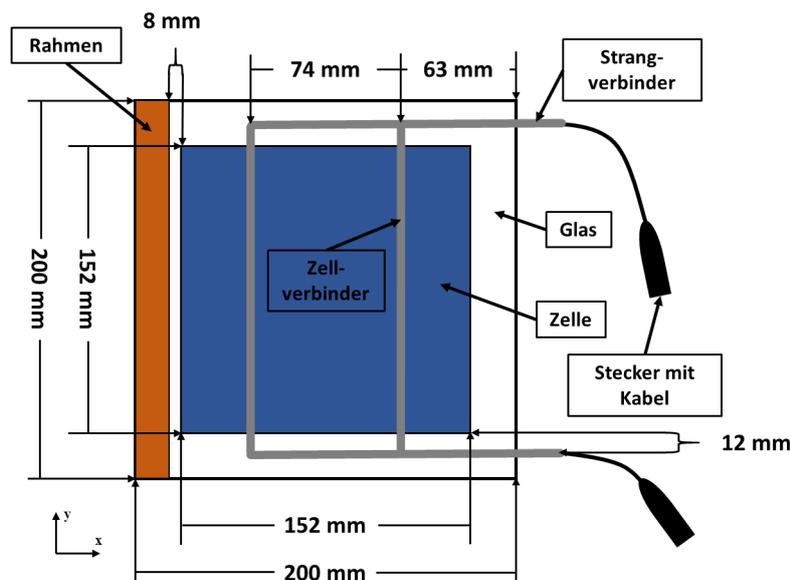


Abbildung 4.6.: Aufbau und Abmessungen der Ein-Zellen-Minimodule

4.3. Versuchsaufbau zur Untersuchung der Degradation unter wechselnden Umweltbedingungen

Auf dem Weg zu einem validen Vorhersagemodell ist es notwendig, die unterschiedlichen Faktoren, die die PID beeinflussen, zu identifizieren und anhand einer mathematischen Beschreibung quantitativ zu bestimmen. Dafür wurde in einem ersten Schritt die reine Degradationphase untersucht. Zu Beginn dieser Arbeit waren lediglich die Abhängigkeiten bezüglich der klimatischen Degradationseinflussfaktoren Temperatur, Spannung und Luftfeuchtigkeit bekannt [Koc11, Pin10].

Für alle diese Faktoren sollten die Änderungen anhand der Parameter der S-Funktion normativ beziffert werden. Im Zuge der Untersuchungen stellte sich darüber hinaus heraus, dass bekannte Einflussfaktoren neu interpretiert bzw. bis dato unbekannte Einflussfaktorenabhängigkeiten zusätzlich untersucht werden mussten. Für die Untersuchungen standen die Örtlichkeiten und das Equipment des PI Berlins zur Verfügung. Alle Versuchsreihen verliefen in ihren Grundzügen nach einem gemeinsamen Ablauf, wurden jedoch für die einzelnen Einflussfaktoren modifiziert.

Die Präparation der Minimodule erfolgte vor dem ersten Belastungszyklus. Die Proben wurden je nach Belastungsart mittels Metallplatte, flächig bedeckt oder mittels Metallband, 8 mm vom Zellrand entfernt, kontaktiert. Anschließend wurden die Metallplatte oder das Kupferband mit dem Erdungskabel verbunden. Danach wurden die Proben, wie in Abbildung 4.1. dargestellt, in dem vorgesehenen Klimaschrank positioniert. Der Klimaschrank wurde auf die gewünschten Umgebungsbedingungen eingestellt, geschlossen und eingeschaltet. In Abhängigkeit der Belastungshöhe wurden die Zeitintervalle der Zwischenmessungen festgelegt. Entsprechend der Klimatisierung können die Intervalle von wenigen Minuten bis zu einigen Stunden reichen.

Bei der Hellkennlinienmessung, die bei allen Untersuchungen bezüglich der Degradation zum Einsatz kamen, werden die Proben für die Zwischenmessung aus der Kammer entnommen und unter Zuhilfenahme eines Wasserbads auf 25°C temperiert. Es folgt die Leistungsmessung mittels Blitzlichtsonnensimulator. Abschließend werden EL-Bilder mit 10 A und einer Belichtungsdauer von 10 s aufgenommen, um etwaige Veränderungen oder Beschädigungen der Minimodule zu detektieren. Die Proben wurden so lange in dem Klimaschrank belastet, bis sich der Shunt-Widerstand auf einem expliziten Level stabilisiert hat. Danach folgte die Versuchsauswertung.

4.4. Versuchsaufbau zur Untersuchung der Regeneration unter wechselnden Umweltbedingungen

Der Prozess der Regeneration ist aufgrund seiner Komplexität in vielerlei Hinsicht noch nicht in seiner Gesamtheit erschlossen. Erste Ergebnisse auf mikroskopischer Ebene wurde durch LAUSCH veröffentlicht und zeigen, dass die Natriumionen bei dem Ausheilungsvorgang die Stapelfehler wieder verlassen [Lau14]. Die in dieser Arbeit präsentierten Da-

ten zeigen die aktuellsten, meist unveröffentlichten Ergebnisse zu diesem PID-Aspekt auf makroskopischer Ebene.

Regenerationsuntersuchungen sind um ein Vielfaches aufwändiger als die der Degradation. Es ist beispielsweise entscheidend, in welcher Art und Weise die Proben im Vorfeld degradiert wurden. Ebenso relevant ist, bei welchen Umgebungsbedingungen dies geschieht und bis zu welchem Degradationslevel die Proben belastet werden. Aus diesem Grund konnten nicht alle Versuche, wie es bei der Degradation der Fall war, mit einer großen Anzahl von Proben durchgeführt werden, sodass diese Ergebnisse zwar grundlegende Verhaltensweisen illustrieren, wegen der geringen Anzahl jedoch keine quantitative Aussage zulassen.

Zu Beginn der Versuchsreihen wurden die Minimodule je nach Versuchsziel am Rand, wie in Abbildung 4.6. gezeigt, oder flächig auf der gesamten Probenvorderseite kontaktiert. Für die Untersuchungen der Regeneration kam erstmals die partielle Dunkelkennlinienmessung zum Einsatz. Die Proben verbleiben ununterbrochen im Klimaschrank und müssen nicht aufwendig entnommen werden. Auf eine kontinuierliche EL-Aufnahme wird in diesem Fall verzichtet. Allen Regenerationsversuchen ist stets eine Degradation vorangestellt. Dies bedeutet, dass bevor Untersuchungen begonnen werden können, die jeweiligen Proben auf einen definierten Degradationslevel eingestellt werden müssen. Zu diesem Zweck werden Proben einer negativen Spannungsbelastung ausgesetzt und der Shunt-Widerstand mittels *In-Situ*-Messung aufgezeichnet. Nach dem Erreichen eines vorher festgelegten Werts wird die negative Spannung abgeschaltet und die Regeneration beginnt. Für die Untersuchung wird die Dunkellinienmessung fortgesetzt, bis eine Stagnation des Parallelwiderstands zu beobachten ist.

4.5. Versuchsaufbau zur Beobachtung des Langzeitverhaltens der PID unter realitätsnahen Bedingungen

Die Laboruntersuchungen ermöglichten eine isolierte Betrachtung der einzelnen Einflussparameter. Unter realen Bedingungen wirken diese jedoch gleichzeitig und ändern sich dazu kontinuierlich. Daher ist es für das PID-Verständnis unabdingbar Degradationsverläufe unter realitätsnahen Bedingungen zu beobachten. Die ersten veröffentlichten Messergebnisse von PID-Verläufen unter Freifeldbedingungen bezogen sich hauptsächlich auf die Analyse von Leckströmen [Lec12, Mon85a, Sch11b] und deren Änderung im Tagesverlauf aufgrund der Umgebungsbedingungen. Sie wurden für die Vorhersage von PID- [Hom12] sowie TCO-Degradation verwendet [Web13]. PID-Degradationsverläufe, die direkt mit der Modulleistung aufgezeichnet wurden, fehlte meist der direkte Bezug zu den Klimadaten [Hac14].

Aus diesem Grund wurden für diese Arbeit Degradationsverläufe in direkten Bezug zu den Umgebungsbedingungen gesetzt. Die erste Messkampagne unter realen Bedingungen in Berlin detektiert dabei hauptsächlich das saisonale PID-Verhalten mittels Shunt-Widerstandsmessung, mit dem Ziel die grundlegenden Mechanismen der Degradation zu beschreiben. Zu Beginn der Messung wurde ein Messintervall gewählt, welches sich an

4. Experimenteller Teil

Sonnenauf- und Sonnenuntergang orientiert, damit neben dem Langzeitverhalten erste Annahmen über den Unterschied zwischen Tag- (Spannungsbelastung) und Nachtverhalten (spannungsfrei) der Proben abgeleitet werden können.

Die Präparation der Proben erfolgte vor der Freifeldbelastung. Die Proben wurden, um einen Modulrahmen nachzuempfinden, einseitig im Abstand von 8 mm zum Zellrand mit Kupferfolie beklebt und diese wurde wiederum mit einem Erdungsanschluss versehen. Die gewählte Anordnung entspricht dem grundsätzlichen Probenaufbau aus den Laborversuchen und ist dem Aufbau von kommerziellen PV-Modulen ähnlich. Die Proben wurden mittels EL-Aufnahmen und STC-Messungen initial charakterisiert.

Mit einer elektrisch-isolierenden Halterung und handelsüblichen Modulklemmen wurden die Minimodule mit einem in unseren Breiten üblichen Anstellwinkel von 30° platziert (vgl. Abb. 4.7.). Zusätzlich wurde auf der Rückseite der Proben ein Temperatursensor mittels Gewebepband und Wärmeleitpaste angebracht. Es folgte, wie bei den vorangegangenen Indoor-Tests, das Anlegen eines elektrischen Potentials mittels externer Spannungsversorgung. Entsprechend den realen Umweltbedingungen konnte die Spannungsversorgung mithilfe eines Lichtsensors (Schwellenwert 50 W/m^2) an- und ausgeschaltet werden. Während des Tagesbogens lagen -1000 V zwischen kurzgeschlossenen Anschlussklemmen und Rahmen an, während der Nacht wurde die Spannungsversorgung abgeschaltet.



Abbildung 4.7.: Halterung der Probenaufnahme auf dem Dachlabor des PI Berlin

Für die Zwischenmessungen wurden die Proben demontiert und vermessen. Aus der entsprechenden Steigung der Hellkennlinien wurde dann der Shunt-Widerstand bestimmt. Abschließend erfolgte die Aufnahme eines EL-Bildes der Proben sowie die Rückinstallation an den Outdoor-Messplatz. Zu Beginn der Messkampagne wurden die Zwischenmessungen täglich durchgeführt, im weiteren Verlauf in größeren zeitlichen Abständen. Für jede einzelne Probe und die gemeinsame Referenz wurde der zeitliche Shunt-Widerstandsverlauf über die gesamte Messzeit bestimmt. Durch Mittelwertbildung der PID-

Proben konnte ein Gesamtdegradationsverlauf für jeden Messpunkt berechnet werden. Für jeden Tagbogen sowie jede Nacht wurde die Durchschnittstemperatur bestimmt. Zusätzlich wurde für jeden Zeitraum der Niederschlag in Form von Regen und Schnee festgehalten. Alle Daten wurden zeitlich in einer gemeinsamen Graphik gegenübergestellt und partiell ausgewertet.

4.6. Versuchsaufbau zur Beobachtung des Kurzzeitverhaltens der PID

Nachdem ein Degradationsverlauf über mehrere Monate aufgezeichnet wurde, bestand das nächste Ziel darin, die Degradation so detailliert zu messen, dass das PID-Verhalten während eines Tagesverlaufs analysiert werden kann. Hierbei sollte das Zusammenspiel von Luftfeuchtigkeit, Regen, Einstrahlung und Temperatur genauer untersucht werden. Damit die Versuche durchgeführt werden konnten, wurde die bereits vorgestellte ULFI entwickelt und in Berlin zum Einsatz gebracht. Für die Messung auf Zypern wurde eine halbautomatische Lösung gewählt. Beide Herangehensweisen sollen nachstehend erläutert werden.

Messablauf Berlin Die Proben wurden in die Messvorrichtung ULFI mittels gängigen Modulklemmen der Firma Schletter montiert. Auf der Rückseite der Proben wurde jeweils ein Temperatursensor Pt1000 mittels Gewebeband fixiert. Bei jeder Dunkelkennlinienmessung wurden zehn Messpunkte erfasst und gemittelt. Alle Proben, die eine PID-Belastung erfahren, wurden auf derselben Höhe und mit derselben Orientierung in der ULFI befestigt (vgl. Abb. 4.5.).

Am ersten Tag der Aufzeichnung wurde ein Messintervall von 15 Minuten eingestellt und der Shunt-Widerstand der Proben ohne angelegte Spannung vermessen. Anhand der daraus ermittelten Messkurve wurde, wie im Kapitel 3.2. beschrieben, eine spätere Temperaturkorrektur vorgenommen. Nach Abschluss der Bestimmung des individuellen Temperaturverhaltens der Proben wurde mit dem Hochspannungsnetzteil tagsüber die gewünschte Spannung von -1000 V angelegt und das Messintervall auf eine Stunde erhöht. Die Messung erfolgte vollautomatisch. Regelmäßige Kontrollen sicherten eine einwandfreie Soft- und Hardwarefunktionalität.

Um die in Berlin erhobenen Daten zu bestätigen und zusätzlich eine weitere Klimaregion zu analysieren, wurden die Kurzzeitdegradationsuntersuchungen von Berlin nach Zypern verlagert und in Kooperation mit der dort ansässigen Universität (University of Cyprus) durch den Verfasser umgesetzt. Da die ULFI aufgrund ihrer Ausmaße und ihres Gewichts nicht nach Zypern verschifft werden konnte, wurde für die Messungen in Nikosia die bis dahin im Klimaschrank (vgl. Kap. 4.1.2.) verwendete Indoor-Messeinrichtung genutzt. Die vollautomatischen Messschritte der ULFI wurden in diesem Fall manuell durchgeführt.

4. Experimenteller Teil

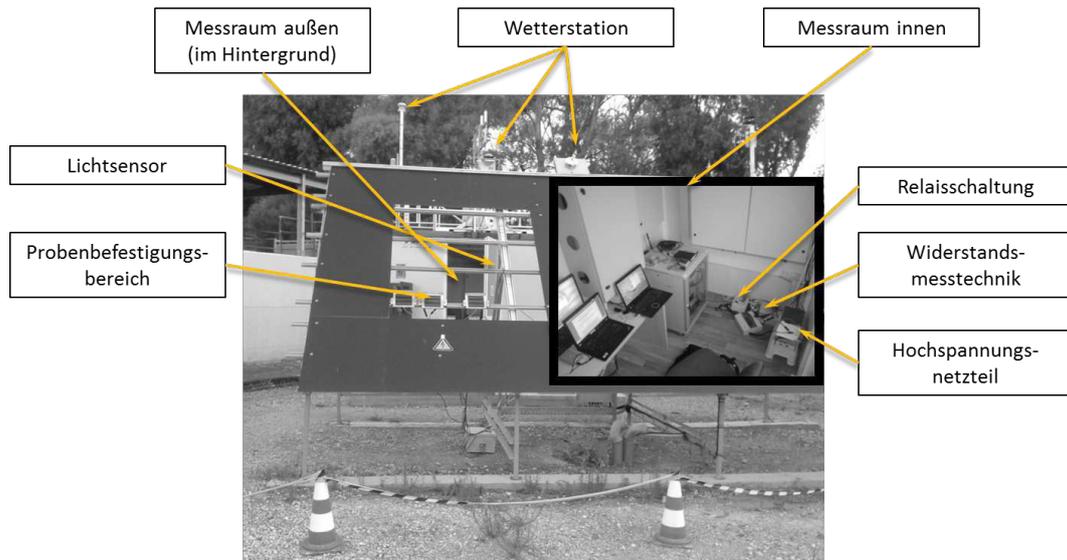


Abbildung 4.8.: Messaufbau der Outdoor-Versuche an der University of Cyprus

Messablauf Nikosia Zu Beginn der Aufzeichnungen wurde – wie bereits in Berlin gesehen – die Temperaturkorrekturkurve jeder Probe aufgenommen. Nach dem Anlegen der Belastungsspannung in Höhe von -1000 V wurde stündlich eine Shunt-Widerstandsmessung durchgeführt. Dafür wurde zu Beginn der Zwischenmessung die Spannung ausgeschaltet und die Proben mit lichtdichtem Stoff abgedunkelt. Anschließend wurde die Dunkelkennlinienmessung einzeln an die Proben angeschlossen und die Messung jeweils Probe für Probe durchgeführt. Später wurden die Minimodule vom Stoff befreit und erneut mit dem Netzteil verbunden. Die PID-Belastung mittels -1000 V wurde abermals gestartet und bis zur nächsten Zwischenmessung konstant gehalten. Die Aufzeichnung der Wetterdaten geschah automatisch durch die bereits vorhandene Wetterstation des Freifeldlabors der University of Cyprus. Der Messaufbau vor Ort wird mit seinem Innen- und Außenbereich im Detail in Abbildung 4.8. gezeigt.

4.7. Analyse der im Labor und unter realen Bedingungen erfassten Daten

Nach der Beschreibung der Testaufbauten wird im folgenden Abschnitt auf die qualitative sowie quantitative Auswertung der unterschiedlichen experimentell erbrachten Daten eingegangen. Die im Labor erfassten Daten wurden dabei für die Degradation und die Regeneration mittels der Anpassung an die S-Funktion analysiert. Das Ziel der Laborbetrachtung war eine numerische Bestimmung der Abhängigkeiten jeweiliger Einflussfaktoren, wie sie in den folgenden Abschnitten 4.7.1. und 4.7.2. dargestellt wird. Die Daten der Langzeitdegradationsuntersuchungen hingegen wurden ausschließlich durch Mittelwertbildung dreier Proben ermittelt und werden aufgrund der Simplizität nicht genauer erläutert.

Daneben liegt der Schwerpunkt der Messwertanalyse der Kurzzeitverläufe hauptsächlich auf die qualitative Auswertung der Messdaten und dient der Identifizierung der grund-

legenden Mechanismen der PID unter realen Bedingungen. Dabei wurde aufgrund einer prägnanteren Darstellung die Shunt-Widerstandsänderung dargestellt (vgl. Abschnitt 4.7.3.).

Die Auswertung von EL-Aufnahmen wiederum, welche in realen PV-Kraftwerken aufgenommen wurden, ist wie in Abschnitt 4.7.4. beschrieben, statistisch durchgeführt worden. In diesem Fall haben die Betrachtungen das Ziel qualitativ das Verhalten von Solarzellen innerhalb eines Moduls zu studieren und somit die Transformation, dem auf Minimodulen basierenden Vorhersagemodell, auf 60-Zellen-Module zu ermöglichen.

4.7.1. Analyse von Degradationsverläufen

Auf der Suche nach einer passenden, mathematischen Beschreibung des Alterungsverlaufs wurden zahlreiche Degradationsverläufe analysiert. Dabei ließ sich erkennen, dass nahezu alle Degradationsentwicklungen denselben Verlauf zeigen. Zu Beginn bleibt der Shunt-Widerstand, bei einer PID-Belastung, auf einem nahezu stabilen Level. Nach einer gewissen Zeit beginnt der Widerstand zu sinken, bis er zum Schluss gegen einen charakteristischen Wert konvergiert. Dieser Wert kann auch Null sein. Zur besseren Beschreibung des Degradationsverhaltens wurden für die Analyse drei Phasen definiert: Induktions-, Degradations- und Stabilisierungsphase (vgl. Abb. 4.9.).

Die einzelnen Phasen werden jeweils durch zwei Punkte beschrieben. Die Induktionsphase startet zum Zeitpunkt $t = 0$ und endet, sobald der normierte Shunt-Widerstand den Wert 0,95 annimmt. Dieser Wert ist angelehnt an den Standard IEC 61215 für die Bauartzertifizierung für PV-Module, bei dem ein Test als nicht bestanden gilt, wenn der Leistungsverlust des PV-Moduls mehr als 5% beträgt.

Die direkt im Anschluss folgende Degradationsphase endet an demjenigen Zeitpunkt t , an dem sich die Gerade durch den Wendepunkt mit $f(t) = t \cdot f'(s_1) + f(s_1)$ und die Gerade $f(t) = A_{1,2}$ schneiden ($A_{1,2}$ das Degradationslevel gegen das die Degradationskurve konvergiert). Daraufhin folgt die Stabilisierungsphase.

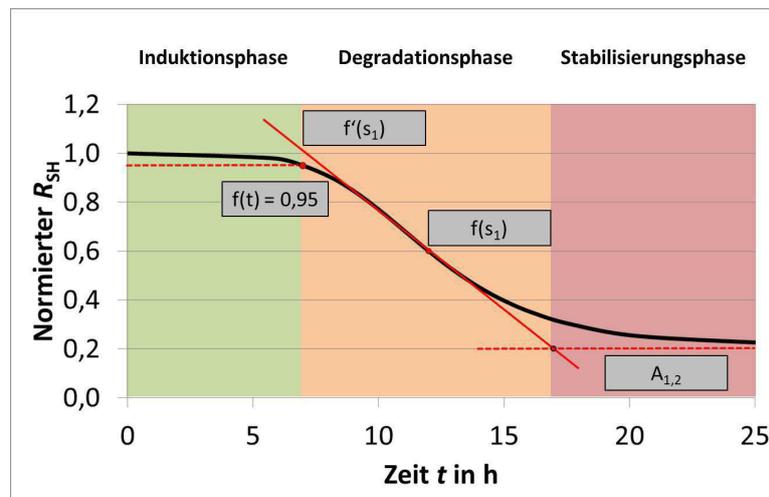


Abbildung 4.9.: Ein typischer Degradationsverlauf kann in die drei Phasen Induktions-, Degradations- und Stabilisierungsphase unterteilt werden, welche durch zwei Punkte eindeutig definiert werden.

4. Experimenteller Teil

Die einzelnen Abschnitte der Degradation sind in Abbildung 4.9. dargestellt. Bei konstanter Belastung (keine Änderung der Einflussfaktoren) ist ein stetiges Absinken des Shunt-Widerstands zu beobachten.

Für die Auswertung einer Probe sind wenigstens vier Messpunkte notwendig. Dabei sollte mindestens ein Messpunkt jeweils in einer der drei vorgestellten Degradationsphasen liegen. Da eine höhere Anzahl von Messpunkten die Genauigkeit steigert, wurde dies wenn möglich umgesetzt. Aufgrund der unterschiedlichen Shunt-Widerstände der Proben zu Beginn der Messungen wurden die Testreihen stets auf die erste Messung, den Initialwert, normiert. Damit beginnt jede Degradationskurve mit dem Wert 1.

Die einzelnen normierten Widerstandswerte werden gegen die Zeit aufgetragen und in ein Datenanalyseprogramm (ORIGIN) importiert um eine Regressionsanalyse durchzuführen. Für die Ausgleichsrechnung wird die bereits vorgestellte Funktion verwendet.

$$R_{SH}(t) = \frac{A_{1,1} - A_{1,2}}{1 + \left(\frac{t}{s_1}\right)^{p_1}} + A_{1,2} \quad (32)$$

Durch die Analyse können die entscheidenden Funktionsparameter $A_{1,1}$, $A_{1,2}$, s_1 und p_1 berechnet und die Abhängigkeit der Einflussfaktoränderungen bestimmt werden.

Für die Parameter eines normierten Verlaufs gelten folgende Definitionsbereiche:

- $A_{1,1} = 1$
- $0 \leq A_{1,2} \leq 1$
- $s_1 \geq 0$
- $p_1 \geq 0$

Sollte eine Messreihe nach der Analyse ein Pseudo-Bestimmtheitsmaß (nach Maximum-Likelihood-Schätzung) von weniger als 95 % aufweisen, entsprachen sie nicht den Anforderungen dieser Arbeit und die Messreihe wurde verworfen bzw. wenn möglich wiederholt.

Aufgrund der in Abschnitt 4.8.3. erläuterten Probenvarianz werden für die Bestimmung eines Einflussfaktoränderungsschritts mehrere Proben untersucht. Um die mittlere Degradations- oder Regenerationskurve zu bestimmen, werden die einzelne Funktionswerte gemittelt und aus dem gemittelten Shunt-Widerstandsverlaufs mehrerer Proben die Funktionsparameter $A_{1,2}$, s_1 und p_1 bestimmt. Diese Prozedur wird sowohl für die Shunt-Widerstandsmessungen mittels BLS als auch mittels Dunkelkennlinienmessung angewendet. Zur besseren Orientierung wird den ermittelten Funktionsparametern je nach Einflussfaktor ein zusätzlicher Index angehängt (Bsp. s_1 wird zu $s_{T,1}$ im Falle der Temperatureinflussuntersuchungen).

4.7.2. Analyse von Regenerationsverläufen

Ähnlich wie bei der Degradation wird der Verlauf der Regeneration in dieser Arbeit in unterschiedliche Phasen eingeteilt. Ausgehend vom stabilisierten **Degradationslevel** $A_{1,2}$ steigt die Regeneration in der Regel exponentiell an und stabilisiert sich wiederum

4. Experimenteller Teil

im Verlauf auf einem spezifischen **Regenerationslevel** $A_{2,2}$. Betrachtet man einen idealisierten Regenerationsverlauf unter konstanter Belastung (vgl. Abb. 4.10.), so ähnelt dieser einem umgekehrten Degradationsverlauf. Aus diesem Grund kann das Regenerationsmodell, ähnlich wie das Degradationsmodell, mittels einer S-Funktion beschrieben und in drei Phasen unterteilt werden. Die Transitionsphase startet zum Zeitpunkt $t = 0$ und endet, sobald die Gerade den Wendepunkt mit $f(t) = t \cdot f'(s_2) + f(s_2)$ und die Gerade $f(t) = A_{2,1}$ ($A_{2,1}$, dem Degradationslevel) schneidet. Die direkt im Anschluss folgende Regenerationsphase endet am Zeitpunkt t , zu dem sich die Gerade am Wendepunkt mit $f(t) = t \cdot f'(s_2) + f(s_2)$ mit der Geraden $f(t) = A_{2,2}$ ($A_{2,2}$, dem Regenerationslevel) schneiden. Im Anschluss folgt die Stabilisierungsphase.

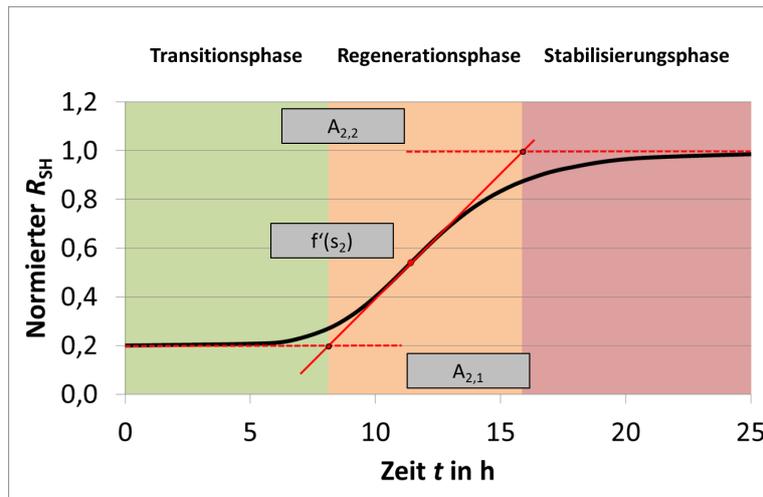


Abbildung 4.10.: Repräsentativer Regenerationsverlauf unterteilt in drei Phasen: Transitions-, Regenerations- und Stabilisierungsphase

Die Funktion der Regeneration wurde entsprechend der Degradation wie folgt festgelegt:

$$R_{SH}(t) = \frac{A_{2,1} - A_{2,2}}{1 + \left(\frac{t}{s_2}\right)^{p_2}} + A_{2,2} \quad (33)$$

In diesem Zusammenhang ist der erste Index mit der Ziffer 2 ein Zeichen für die Regeneration. Dabei gelten für die Parameter der Regeneration abweichend zur Degradation die gelisteten Definitionsbereiche:

- $0 \leq A_{2,1} \leq 1$
- $0 \leq A_{2,2} \leq 1$
- $A_{2,1} \leq A_{2,2}$
- $s_1 \geq 0$
- $p_1 \geq 0$

In den folgenden Kapiteln werden die Parameter, wie bei der Degradation, um einen Index erweitert, der sie den einzelnen Einflüssen zuordnet (Bsp. s_2 zu $s_{T,2}$, um die Abhängigkeit von der Temperatur zu verdeutlichen). Ebenso wie bei der Degradation

werden die einzelnen Messwerte gemittelt und die Parameter mittels ORIGIN bestimmt. Auch hier wurde festgelegt, dass nach Maximal-likelihood-Schätzung mindestens 95 % erreicht werden müssen.

4.7.3. Analyse der Messungen unter realen Bedingungen

Die Analyse der Shunt-Widerstandsmessungen in Berlin so wie auf Zypern wurden abweichend zu den gerade vorgestellten Auswertungen durchgeführt. Gründe dafür sind zum einen die übersichtlichere Darstellung plus das überwiegende Interesse an der Identifizierung der Mechanismen der PID und nicht an ihrer numerischen Ermittlung.

Die mittels VBA-Makro aufgezeichneten und zusammengeführten Messdaten, welche aus Wetter-, Proben temperatur- und – wenn vorhanden – Oberflächenleitfähigkeitsdaten bestehen, wurden im Anschluss des Beobachtungszeitraums zur weiteren Auswertung in Excel übertragen. Die erfassten Daten wurden sodann von vereinzelt Fehlmessungen bereinigt und unter Zuhilfenahme der Proben temperatur ϑ in Kelvin wie auch der Kalibrierkurve (vgl. Kap. 3.2.) folgte eine Berechnung des theoretischen Shunt-Widerstands $R_{SH}(\vartheta)$ für jeden Messzeitpunkt, wie er sich anhand der Temperatur einstellen würde. Die Gleichung lautet:

$$R_{SH}(\vartheta) = m \cdot \vartheta + R_{SH}(273) \quad (34)$$

ϑ stellt die stündlich gemittelte Temperatur der Probe dar.

Im Anschluss wurde der berechnete Widerstand $R_{SH,\vartheta}$ von dem gemessenen, unkorrigierten Widerstand $R_{SH,M}$ abgezogen und zwecks Normierung durch den berechneten Shunt-Widerstand dividiert.

$$\Delta R_{SH} = \frac{(R_{SH,M} - R_{SH,\vartheta})}{R_{SH,\vartheta}} \quad (35)$$

Das Ergebnis entspricht der normierten Shunt-Widerstandsänderung der jeweiligen Probe in dem vorangegangenen Zeitraum von einer Stunde. Für eine unbelastete Probe ist die Widerstandsänderung zu jedem Zeitpunkt gleich Null.

4.7.4. Statistische Analyse der Verteilung PID-betroffener Zellen in realen Solarmodulen

Eine Schwäche der Untersuchungen mittels Ein-Zellen-Minimodulen ist, dass in realen Kraftwerken Solarmodule verbaut sind, die in der Regel aus 60 bis 72 in Reihe verschalteten Einzelzellen zusammengesetzt sind und damit eine Übertragung der Ergebnisse nicht ohne Weiteres möglich ist.

Zu diesem Zweck wurden bestehende Kraftwerke und die dort von PID-belasteten Module genauer untersucht. Es wurden bevorzugt Kraftwerke untersucht, die möglichst stark von PID betroffen waren. Die untersuchten Module befanden sich an unterschiedlichen geographischen Orten in Europa. In jedem der Kraftwerke wurden EL-Aufnahmen der PID-betroffenen Module protokolliert. Für die Untersuchungen standen dadurch hunderte vom PI Berlin aufgenommene EL-Aufnahmen von einzelnen Solarmodulen zur Verfügung. Der Schwerpunkt der Analyse lag auf der Verteilung der PID-betroffenen Zellen innerhalb eines Moduls. Dadurch sollten mögliche PID-Mechanismen, welche im

4. Experimenteller Teil

Unterschied zu Minimodulen bei Modulgrößen eine zusätzliche Rolle spielen, studiert werden.

Bei der Untersuchung der EL-Bilder wurde jede Zelle eines Moduls separat auf PID-Muster hin untersucht. Alle PID-Stadien stärker als 70% aus Abbildung 3.5. wurden in der Analyse als betroffen markiert. Dadurch ergab sich für jedes Modul eine (m, n) -Matrix M_i mit den Abmessungen der sich jeweils in Zeilen (m) bzw. Spalten (n) befindlichen Zellen. Für ein Modul mit 60 Zellen würde sich somit beispielsweise eine 6×10 -Matrix ergeben. Der Index i steht in dem hier betrachteten Fall für die jeweilige laufende Modulnummer. Für die später durchgeführten Kraftwerksanalysen wurden im Schnitt 70 Module ($i = 70$) pro Kraftwerk analysiert. Jedes Matrixelement an der Stelle $z_{m,n}$ erhält den Wert 1, wenn die Zelle des betrachteten Moduls an dieser Stelle PID-Erscheinungen aufweist. Alle Zellen ohne Degradationserscheinungen erhalten den Matrixelementenwert 0. Zur Visualisierung wurde der Sachverhalt in Abbildung 4.11. noch einmal dargestellt. In der Abbildung ist die EL-Aufnahme eines Moduls illustriert. Die PID-betroffenen Zellen sind jeweils mit „1“ (PID) oder „0“ (kein PID) markiert.

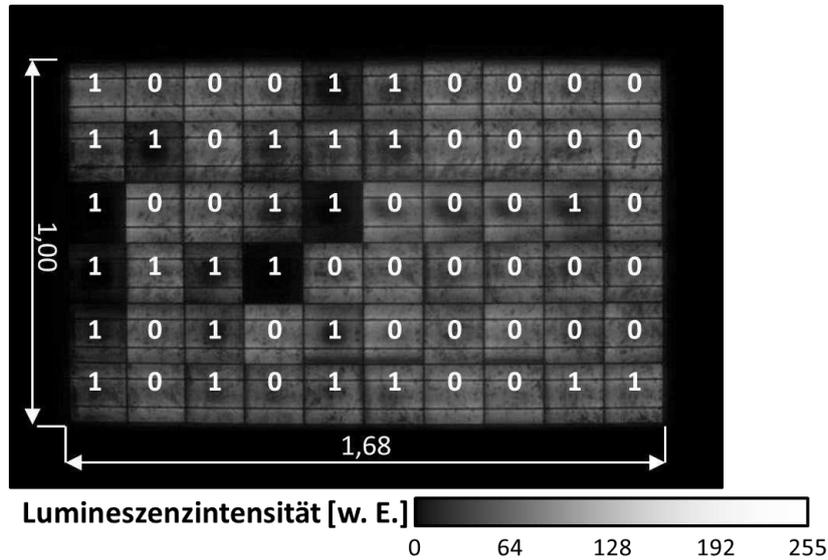


Abbildung 4.11.: Auswertungsbeispiel einer EL-Aufnahme, in der die von PID betroffenen Zellen mit „1“ (PID) oder „0“ (kein PID) gekennzeichnet sind.

Um eine Häufigkeitsverteilung K_{ges} eines Kraftwerks zu ermitteln, werden die einzelnen Modulmatrizen addiert und für jede Zelle durch die Gesamtzahl (i) der betrachteten Module dividiert.

$$\frac{\sum_{i=1}^i M_i}{i} = K_{\text{ges}} \quad (36)$$

Daraus ergibt sich für jedes Matrixelement eine Häufigkeit, angegeben in Prozent, und es können Schlüsse über die PID-Belastung der einzelnen Zellen an den unterschiedlichen Modulpositionen gezogen werden.

4.8. Fehlerbetrachtung

4.8.1. Der Leckstrom als PID-Indikator

Ein Großteil der PID-Untersuchungen in der Literatur basiert wie bereits erwähnt auf Messungen und Beobachtungen des Leckstroms. Dieser wird auch für den überwiegenden Teil der veröffentlichten Vorhersagemodelle für die PID herangezogen. Der Leckstrom, der aufgrund der Systemspannung, zwischen Zelloberfläche und Rahmen fließt, ist jedoch kein reiner Ionenstrom, sondern besteht aus Elektronen, Löchern und nur zu einem Teil aus positiven Ionen, wie beispielsweise Natrium oder auch Kalium [Ray13]. Es ist daher mit erheblichem Aufwand verbunden, auf Grundlage des Leckstroms auf die Anzahl der geflossenen Natriumionen zu schließen und somit unmittelbar auf die PID-Entwicklung. Eine detaillierte Beschreibung der Schwierigkeiten, die bei der Betrachtung des Leckstroms auftreten, wurden durch VOSWINCKEL übersichtlich zusammengefasst [Vos15]. Zusätzlich können viele charakteristische Effekte der PID anhand des Leckstroms nicht quantifiziert werden.

Der Nachteil der Leckstrommessung wird am deutlichsten, wenn das Regenerationsverhalten von PID-belasteten Proben oder Modulen analysiert werden soll. Während der Regenerationsphasen ist keine Systemspannung vorhanden, es fließt somit auch kein Leckstrom und differenzierte Untersuchungen – auf Basis des Leckstroms – sind damit unmöglich. Aber auch bei Studien der Degradation führt der Leckstrom in einigen Fällen zu falschen Ergebnissen. Beispielsweise zeigte HACKE, dass Proben weitaus langsamer degradieren, wenn sie einer Lichtquelle ausgesetzt werden, obwohl die Proben einen höheren Leckstrom zeigen [Hac14]. Darüber hinaus haben Messungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit gezeigt, dass unter realen Bedingungen im Tagesverlauf Phasen existieren, an denen eine Regeneration des Shuntwiderstands stattfindet, dies obwohl eine Systemspannung anliegt und somit auch ein Leckstrom fließt. Zusammenfassend kommt diese Arbeit damit zu dem Schluss, dass eine alleinige Beobachtung des Leckstroms für die Analyse der PID ungeeignet erscheint und unter Umständen zu falschen Schlussfolgerungen führt.

Unabhängig davon ist der Leckstrom, wie in Abschnitt 5.2. gezeigt, hervorragend geeignet um die Änderung in der Oberflächenleitfähigkeit zu ermitteln. Betrachtet man den Verlauf des gemessenen Leckstroms in Abbildung 5.10. aus Abschnitt 5.2. stimmt dieser in seinem prinzipiellen Verlauf sehr gut mit Berechnungen von HOFFMANN [Hom12] überein.

Die von HOFFMANN veröffentlichten Werte zeigen, ebenso wie die Messungen dieser Arbeit, einen sigmoidalen Verlauf. Der Hauptunterschied besteht lediglich darin, dass die Werte im Mittel um rund eine Zehnerpotenz über den absoluten Werten dieser Messungen liegen. Der Grund dafür ist mit hoher Wahrscheinlichkeit der abweichende Modulaufbau. Durch den PID-empfindlichen Aufbau, der in dieser Arbeit verwendeten Proben,

4. Experimenteller Teil

wird indirekt ein hoher Leckstrom gefördert, da PID-empfindliche Einbettungsmaterialien, wie von BERGHOLD präsentiert, meist einen niedrigen Volumenwiderstand und damit einen hohen Leckstrom zeigen [Ber14]. Festzuhalten ist nichtdestotrotz, dass der Leckstrom in Abhängigkeit der Luftfeuchtigkeit bei unterschiedlichen Aufbauten denselben Verlauf beschreibt.

In Kapitel 5.2. konnte parallel dazu gezeigt werden, dass sich die qualitative Änderung der Oberflächenleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit ebenso mittels sigmoidaler Funktion beschreiben lässt und somit den gleichen Verlauf beschreibt. Damit scheint ein direkter Zusammenhang zwischen diesen beiden Größen zu bestehen. Damit folgt, dass ohne aufwändige Messapparatur anhand des Leckstroms, zumindest qualitativ die Oberflächenleitfähigkeit abgeschätzt werden kann. Dieser Sachverhalt wird später in Abschnitt 6.1.1. noch einmal aufgegriffen.

4.8.2. Klimaschrank

Zu Beginn der Fehlerbetrachtung wurde der Klimaschrank für die Mini-Module auf Genauigkeit hinsichtlich der Temperatur und Luftfeuchte sowie deren Verteilung im Raum überprüft. Dies wurde mittels ebro Logger (Thermo- und Hygrometer) sowie zwei Stück PT 100 Messwiderstände, verbunden mit einem Agilent Digitalmultimeter, durchgeführt. Es wurde festgestellt, dass die Genauigkeit von der eingestellten Höhe der Temperatur abhängt. Untersucht wurden die bis dato am häufigsten verwendeten Temperaturen, wie sie in Tabelle 4.4. mit den dazugehörigen Messergebnissen aufgeführt sind:

Tabelle 4.4.: Soll- und Istwert der Temperatur im Klimaschrank

Soll-Wert Temperatur in °C	Maximal abweichender Ist-Wert in K	Differenz in %
85	83,5	1,8
60	60,6	1,0
25	24,7	1,2

Die Temperaturmessungen zeigen eine sehr geringe Abweichung vom Sollwert. Ebenso ist der Temperatur-Gradient innerhalb des verwendeten Klimaschranks niedrig. Eine Homogenitätsmessung bei einer Temperatur von 85 °C ergab eine maximale Temperaturabweichung von 1,5 K. Außerdem lieferte die Betrachtung der Luftfeuchte ein ähnliches Ergebnis. Die größte Abweichung vom Sollwert (85 % RH) bei 85 °C wurde in Höhe von 2 % bestimmt. Diese Messabweichungen gelten jedoch nur, wenn eine Vorlaufzeit von mindestens 30 Minuten eingehalten wird. Die Vorlaufzeit wird benötigt, um die eingestellten Soll-Werte zu erreichen und etwaige Betauung der Proben zu vermeiden. Die Einhaltung der Karenzzeit ist von enormer Relevanz, da ein Anlegen der Spannung während der Betauung zu einer Verfälschung der Messergebnisse führen würde.

Es kann festgehalten werden, dass die Abweichungen von den eingestellten Werten im Klimaschrank vergleichsweise gering sind und deshalb kein merklicher Fehler bei der

Versuchsdurchführung vermutet wird. Durch das Einhalten von Karenzzeiten werden grobe Messfehler verhindert.

4.8.3. Probenvarianz

Die Zellvariation ist vermutlich als eine der größten Fehlerquellen der Messreihen anzusehen. Die multikristallinen Zellen stammen aus einer ohne Unterbrechung gefertigten Herstellungscharge. Diese Zellen sollten daher ein ähnliches Degradationsverhalten unter gleichen Bedingungen aufweisen. Dies war jedoch nicht uneingeschränkt der Fall und die Schwankungen waren signifikant.

Auf der Suche nach der Ursache stellte sich im Verlauf der Untersuchungen heraus, dass mit hoher Wahrscheinlichkeit die Variation des Brechungsindex und die damit verbundenen Änderungen der SiNx-Schicht als Hauptursache für die starke Zellvariation ausgemacht werden kann [Nau12, Pin10]. Die in diesem Versuch verwendeten Solarzellen wurden stichprobenartigen hinsichtlich ihres Brechungsindexes vermessen. Die entsprechenden Ergebnisse sind in Abbildung 4.12. aufgeführt. Der Brechungsindex der Stichprobe von 45 Zellen schwankt deutlich zwischen 2,05 und 2,08.

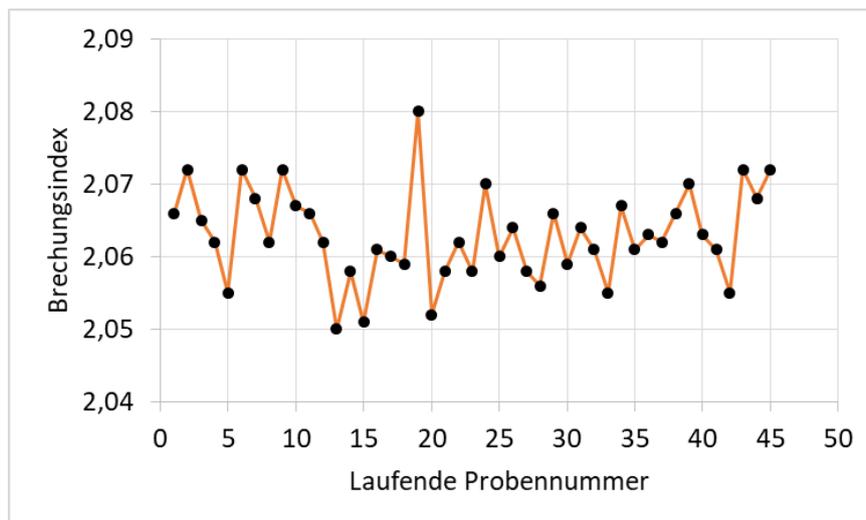


Abbildung 4.12.: Stichprobenhafte Brechungsindexmessung der verwendeten Solarzellen

Da die gemessenen Zellen vom Hersteller nicht markiert wurden, sind genaue Zahlenwerte, inwiefern die Schwankungen der Brechungsindizes die PID-Anfälligkeit der Zellen beeinflusst haben, leider nicht bekannt. Es kann nur eine grobe Schätzung anhand der von SOLON veröffentlichten Ergebnisse in Abbildung 4.13. vorgenommen werden [Pin10]. PINGEL zeigt in seiner Arbeit, dass eine Änderung des Brechungsindex um ungefähr 0,1 eine sehr starke Steigerung in der PID-Empfindlichkeit von nicht empfindlich ($\sim 0\%$) bis empfindlich ($\sim 10\%$) nach sich ziehen kann. Bei den in dieser Arbeit verwendeten Zellen beträgt die maximale gemessene Brechungsindexvariation 0,03 und es ist daher bereits bei diesem Wert mit einem Einfluss auf das PID-Verhalten zu rechnen.

4. Experimenteller Teil

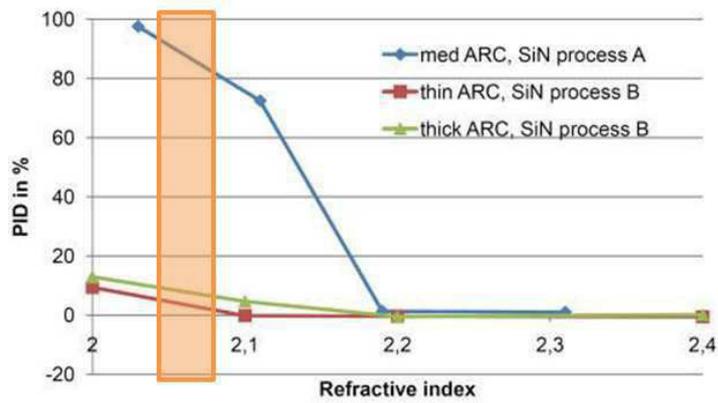


Abbildung 4.13.: Einfluss der Änderungen des Brechungsindex (engl.: refractive index) auf die PID-Anfälligkeit bei verschiedenen ARC-Abscheideprozeduren. Der orange Bereich markiert den Brechungsindexbereich, in welchem die verwendeten Zellen variieren (Bild aus [Pin10] / modifiziert).

Die unterschiedliche Degradationsanfälligkeit von Zellen derselben Produktionscharge ist ein bekanntes Problem und wird bei Solarmodulen mit einer eigenen Bezeichnung betitelt. EL-Bildanalysen verdeutlichen diese Zellunterschiede als sogenanntes „Patchwork“-Muster. In einer EL-Aufnahme eines PID-belasteten Moduls (vgl. Abb. 4.14.) erscheinen Zellen unregelmäßig hell und dunkel obwohl sie aus der selben Fertigungsreihe stammen.

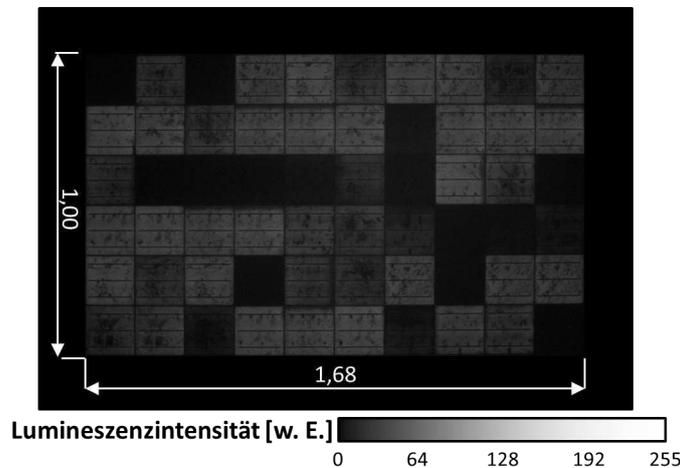


Abbildung 4.14.: EL-Aufnahme eines PV-Moduls im Anschluss einer PID-Belastung mit dem charakteristischen „Patchwork“-Muster, welches durch unterschiedliche PID-Empfindlichkeitsausprägungen der Zellen verursacht wurde

Der Ursprung der Variation konnte bis dato noch nicht im Detail erklärt werden. Es gibt Indizien dafür, dass die Position der Zellen im Quarzröhrenboot während der PECVD-Abscheidung einen Einfluss auf die Schichtdicke und das stöchiometrische Verhältnis von Silizium und Nitrid und somit auch auf die PID-Empfindlichkeit haben könnte. Eine weitere Möglichkeit liegt in unterschiedlich starker Natriumionenkontamination der Zelloberfläche, welche durch unterschiedliche Positionen in den Quarzröhrenbooten oder die

4. Experimenteller Teil

weiteren Verarbeitungsschritte entsteht. Diese Aussagen basieren jedoch nur auf Gesprächen mit Fachleuten, aber es sind keine Veröffentlichungen zu diesem Thema bekannt. Bei den zahlreichen Versuchen im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde diese starke Variation auch bei anderen Produktionschargen beobachtet.

Die Unsicherheit der Zellvarianz stellte für diese Arbeit eine große Herausforderung dar. Diese Fehlerquelle konnte jedoch nicht direkt beeinflusst werden, da die Zellen industriell in Thailand hergestellt wurden. Der Hauptansatz der Fehlerreduzierung lag daher in der Verwendung einer großen Probenanzahl je Messreihe.

Unabhängig vom Brechungsindex schwankt zusätzlich die Höhe der Shunt-Widerstände von Probe zu Probe stark. In diesem Zusammenhang sind die Zelleigenschaften maßgebend. Es werden hierbei lineare und nichtlineare Shunts unterschieden. Eine gute Übersicht über die einzelnen Shunt-Widerstandeinflüsse gibt BREITENSTEIN [Bre14]. Um die Schwankung der in dieser Arbeit verwendeten Proben zu untersuchen, wurden anhand Dunkelkennlinienmessung beispielhaft 23 Proben miteinander verglichen. Es ergab sich ein mittlerer R_{SH} -Wert von 40Ω und eine Standardabweichung von 20Ω . Trotz dieser großen Unterschiede konnte kein eindeutiger Einfluss der Widerstandshöhe auf das PID-Verhalten während verschiedener Belastungstests eindeutig festgestellt werden. Dennoch wurde in den folgenden Testreihen darauf geachtet, möglichst Proben mit ähnlichem R_{SH} -Wert zu verwenden. Eine weitere Folge der starken Schwankungen ist, dass in der gesamten Arbeit eine normierte Darstellung gewählt wurde. Diese Vorgehensweise macht die einzelnen Messreihen deutlich übersichtlicher und somit verständlicher.

4.8.4. Eindiendenmodell

In der Theorie hat die PID ausschließlich einen Einfluss auf den Shunt-Widerstand einer Zelle. Dieser verringert sich mit steigender Belastung und hat in seinem weiteren Verlauf einen Einfluss auf die Zelleistung. Eine genaue Berechnung kann mittels Zweidiendenmodell erfolgen. Dieses gilt, so wie das Eindiendenmodell, umso besser, je homogener eine Solarzelle ist und je kleiner sich der Serienwiderstand im Vergleich zum Shunt-Widerstand verhält. Die PID-degradierten Zellen sind jedoch besonders inhomogen, und die Parallelwiderstände sind an vielen einzelnen Shunts lokalisiert. Dies wird umso signifikanter je inhomogener die Zellen belastet werden. Dies ist aber an vielen Stellen in dieser Arbeit durch eine Randkontaktierungsbelastung geschehen. Damit ist es nur möglich diese mittels „2-dimensionale Device-Simulation“ richtig zu beschreiben, wie sie z.B. mit GRIDDLER erfolgen kann [Won13]. Das wurde zwar zur Beurteilung von Metallisierungen entwickelt, aber in der kostenpflichtigen Variante Griddler PRO kann man auch inhomogene Parameterverteilungen einladen. Dies wurde an anderer Stelle von FRÜHAUF untersucht [Fru17].

Da dieses Vorgehen in der vorliegenden Arbeit nicht ohne Weiteres möglich war und das Zweidiendenmodell im Endeffekt auch nur eine grobe Näherung darstellt, wurde die Leistung der Zellen mittels Eindiendenmodell berechnet. Die verwendeten Parameter sind in Tabelle 4.5. aufgelistet.

4. Experimenteller Teil

Tabelle 4.5.: Durchschnittswerte der Parameter des Eindiodenmodells der verwendeten Ein-Zellen-Minimodule

Parameter	Wert	Einheit
I_{SC}	8,27	A
n_{01}	1	-
I_{01}	$3,87 \cdot 10^{-5}$	A
kT	$2,57 \cdot 10^{-2}$	eV
R_S	$8,56 \cdot 10^{-3}$	Ω
R_{SH}	56,88	Ω

Vergleicht man die Ergebnisse der Ausgleichsrechnung der IU-Kennlinien, welche bei unterschiedlichen Einstrahlungen und Degradationsstadien aufgezeichnet wurden, miteinander, so wird deutlich, dass zusätzlich zu der Shunt-Widerstandsänderung auch eine Änderung des Diodenfaktors n_{01} zu beobachten ist. Dieses Phänomen wurde ebenso durch LAUSCH, anhand von Analysen des Zweidiodenmodells beschrieben. Er macht in seinen Analysen unterschiedliche Rekombinationspfade dafür verantwortlich [Lau14].

Tabelle 4.6.: n_{01} in Abhängigkeit der Shunt-Widerstandshöhe

n_{01}	R_{SH} in Ω
1	>50
2	>0,1
3	<0,01

Um trotz alledem eine Abschätzung der Leistungsentwicklung durchführen zu können wurden in Abhängigkeit der Shunt-Widerstandshöhe gestaffelte Diodenfaktoren n_{01} verwendet (vgl. Tab. 4.6.).

4.8.5. Messgenauigkeit des Blitzlichtsonnensimulators

Zu Beginn dieser Arbeit wurde der Shunt-Widerstand anhand der IU-Kennlinie ermittelt. Die IU-Kennlinie wurde durch einen Blitzlichtsimulator der Familie PASAN bestimmt. Die Messung des Parallelwiderstandes bei Mini-Modulen stellte vor allem bei den initialen Messungen eine Herausforderung dar. Zum einen weil keine Messfehler für die Shunt-Widerstandsmessung vom Hersteller angegeben werden, zum anderen weil das Programm SLAB des Sonnensimulators den R_{SH} mithilfe der reziproken Steigung der Strom-Spannungskennlinie im ersten Drittel des U_{MPP} berechnet (vgl. Abb. 3.1.). Das Programm ermittelt die Steigung durch das Anlegen einer Tangente an die Messpunkte. Dabei verdeutlicht die nachstehende Gleichung (37), dass kleinste Ungenauigkeiten der Strommessung direkte Auswirkungen auf den Parallelwiderstand haben.

$$R_{SH} = \frac{1}{\frac{\Delta I}{\Delta U}} \quad (37)$$

4. Experimenteller Teil

Das Ausmaß der Auswirkungen auf den Shunt-Widerstand wird in Abbildung 4.15. deutlich. Dort ist die Streuung bei 20-facher Wiederholung einer unbelasteten Probe aufgetragen. Es ist eine starke Schwankung festzustellen.

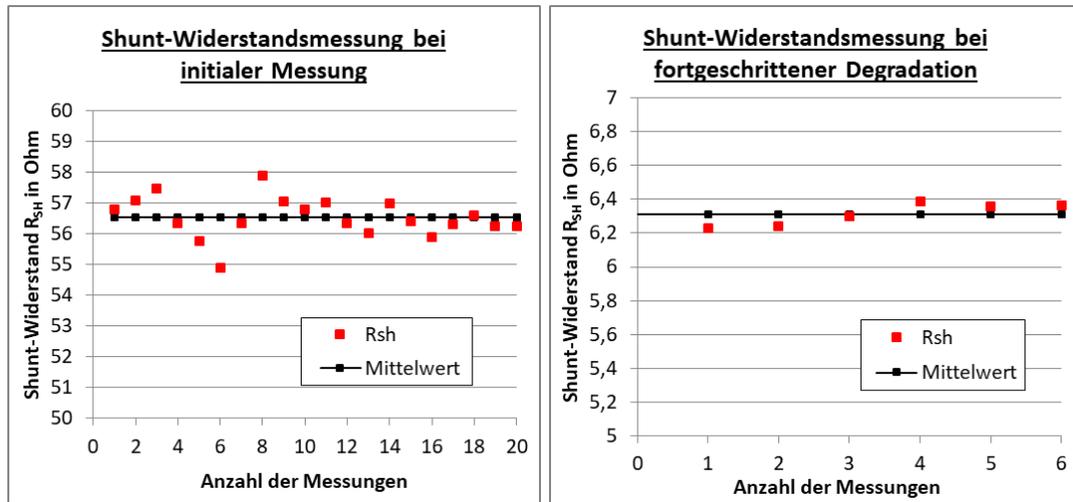


Abbildung 4.15.: Streuung der Werte bei einer initialen Shunt-Widerstandsmessung links (20-fache Wiederholung) mittels Hellkennlinienmessung und bei fortgeschrittener Degradation rechts (6-fache Messwiederholung)

Sobald eine Probe PID-Erscheinungen zeigt, erhöht sich die Präzision der Messung deutlich. Dies hatte für die Untersuchungen die Folge, dass Messwiederholungen mit fortschreitender Degradation verringert werden können. Dieser Sachverhalt ist ebenfalls in Abbildung 4.15. rechts aufgeführt. Die 6-fache Messung streut im Fall von PID-belasteten Proben nur noch sehr gering um den Mittelwert.

Die Fehlerrechnung für die Messung an einer unbelasteten Probe soll hier exemplarisch an dem aufgeführten Beispiel von Abbildung 4.15. durchgeführt werden. Arithmetischer Mittelwert bei 20 Messwiederholungen:

$$\overline{R_{SH}} = \frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} R_{SH_i} = 56,88 \Omega \quad (38)$$

Standardabweichung:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{20} (R_{SH_i} - \overline{R_{SH}})^2}{20}} = 0,65 \Omega \quad (39)$$

Damit ergibt sich ein mittlerer Fehler des Mittelwertes:

4. Experimenteller Teil

$$\Delta \overline{R_{SH}} = \frac{s}{\sqrt{20}} = 0,15 \Omega \quad (40)$$

4.8.6. Messgenauigkeit der partiellen Dunkelkennlinienmessung

Im Vergleich zu der Blitzlichtsimulatormessung ist die Stärke der Streuung bei der Vierleitermessung unabhängig vom Degradationsgrad. Vergleichbar mit der R_{SH} -Bestimmung mittels Blitzlichtsonnensimulator wurden ebenfalls Wiederholungsmessungen mit einer zweiten Probe vor und nach einer PID-Belastung durchgeführt. Die in Abbildung 4.16. dargestellten Ergebnisse zeigen bereits eine klare Verbesserung der Wiederholgenauigkeit.

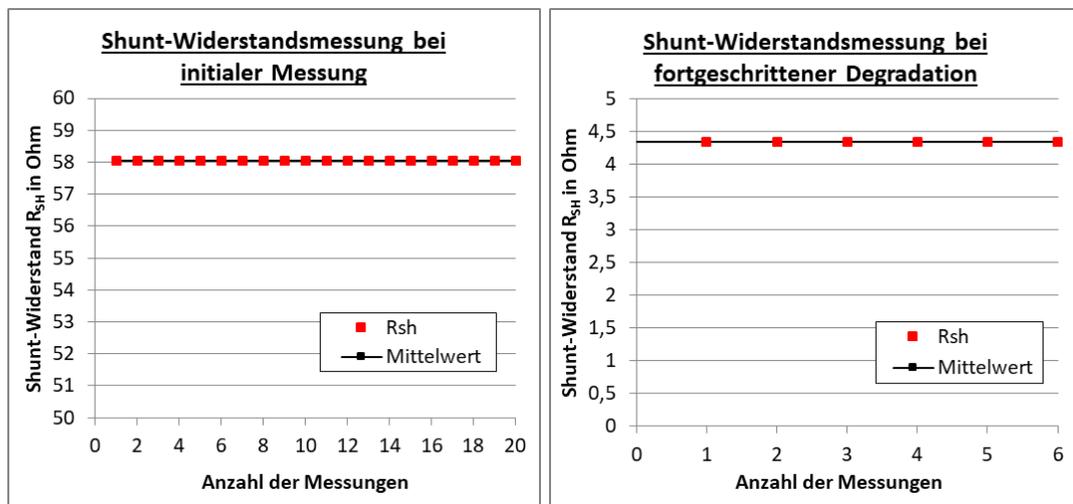


Abbildung 4.16.: Streuung der Werte bei einer initialen Parallelwiderstandsmessung (20-fache Wiederholung) mittels Vierleitertechnik und bei fortgeschrittener Degradation (6-fache Messwiederholung)

Vergleicht man die Wiederholgenauigkeit der Dunkelkennlinienmessung mit der im vorangegangenen Kapitel gezeigten Hellkennlinienmessung, wird der Vorteil der Dunkelkennlinienmessung noch einmal deutlich (siehe Tab. 4.7.). Bei paarweise ähnlichen Degradationstiefen wird durch die Dunkelkennlinienmessung initial sowie nach der Belastung stets eine höhere Genauigkeit erreicht.

Eine zusätzliche Unsicherheit der Dunkelkennlinienmessung entsteht jedoch bei der Temperaturkorrektur der Widerstandsverläufe. Zwar zeigt der R_{SH} eine lineare Abhängigkeit von der Temperatur (Abb. 3.3.), jedoch gilt diese Abhängigkeit nur für unbelastete Proben. Sobald eine Probe erste Alterungserscheinungen durch PID zeigt, beeinflusst dies auch das Temperaturverhalten des Shunt-Widerstands.

Eine Erklärung für diesen Unterschied kann in der sich ändernden Ausprägung der Shunt-Widerstände verortet werden. Die lokalen Kurzschlüsse, wie sie von NAUMANN [Nau12] beschrieben werden, zeigen dabei ein anderes Temperaturverhalten als die Shunt-Widerstände, die durch die produktionsbedingten Einflüsse (beispielsweise schlechte Kanntenisolierung der Zellen) verursacht werden. Es kann im Prinzip zwischen linearen und

4. Experimenteller Teil

Tabelle 4.7.: Vergleich mittels Fehlerrechnung zwischen BLS- und Vierleitermessung anhand zweier Proben, die zu Beginn und nach einer PID-Belastung gemessen wurden

Messsystem	Hellkennlinienmessung	Dunkelkennlinienmessung	Hellkennlinienmessung	Dunkelkennlinienmessung
	Initial		Nach PID-Belastung	
$\overline{R_{SH}}$ in Ω	56,88	57,97	6,32	4,34
s in Ω	4,65	0,31	0,07	$6,85 \cdot 10^{-5}$
s in %	8,175	0,535	1,108	0,002
$\Delta \overline{R_{SH}}$ in Ω	0,15	0,04	0,02	$3,16 \cdot 10^{-5}$

nicht linearen Widerständen unterschieden werden [Bre14]. In Abbildung 4.17. ist dieser Sachverhalt noch einmal graphisch an einer stark degradierten Probe dargestellt. Deutlich zu sehen sind zwei Kalibriergeraden (schwarz), welche in der Mitte zweier Messpunktscharen verlaufen (orange Punkte). Die beiden Punktscharen zeigen, dass sich die Shunt-Widerstandseigenschaften durch eine PID-Belastung verändern kann.

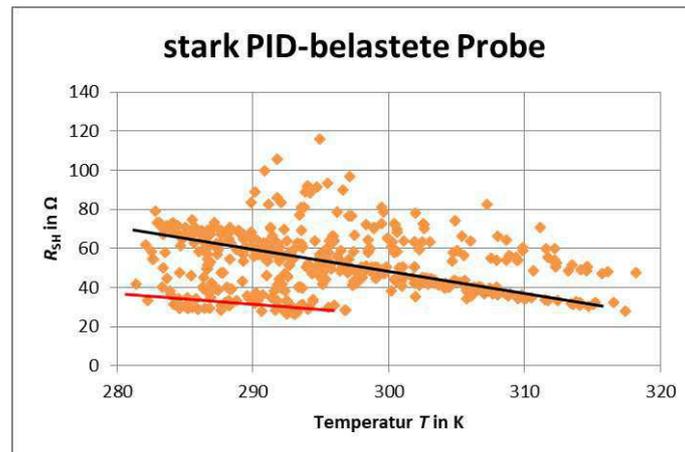


Abbildung 4.17.: Kalibrierkurve einer stark degradierten Probe

Versuche, den genauen Fehler zu bestimmen, sind aufgrund des Regenerationsverhaltens nur schwer möglich, da für die Bestimmung der Kalibrierkurve ein relativ weiter Temperaturbereich durchlaufen werden muss. Dies nimmt einige Zeit in Anspruch und diese ist ausreichend, um eine deutliche Änderung durch Regeneration hervorzurufen. In den später gezeigten Messungen wurde versucht die Temperaturkorrektur zu umgehen. Zu diesem Zweck werden die Regenerations- und Degradationsversuche möglichst bei stabilen Temperaturniveaus durchgeführt bzw. nur diejenigen Messpunkte in Zusammenhang gesetzt, die im selben Temperaturlevel bestimmt wurden. Bei den Freifeldmessungen, bei denen dies nicht möglich war, wurden die Ergebnisse nur qualitativ, nicht jedoch quantitativ verwendet.

Ein letzter, nicht zu vernachlässigender Einfluss auf die Shunt-Widerstandsbestimmung

4. Experimenteller Teil

entsteht, wenn während der Messung Strahlung an die Proben gelangt. In diesem Fall erhöht sich die Steigung der Geraden, die durch den um den Kurzschlussstrom angehobenen Arbeitspunkt und den Nulldurchgang der Abszisse verläuft, erheblich. Damit steigt der Shunt-Widerstand deutlich an, erreicht jedoch in der Regel die Grenze des Messbereiches der verwendeten Messkarte. Es wird fehlerhaft ein Widerstand von unendlich bestimmt. Aus diesem Grund wurde bei allen Labormessungen und insbesondere bei den Messungen unter realen Bedingungen ein erheblicher Aufwand betrieben, um während der Shunt-Widerstandsbestimmung eine lichtdichte Umgebung zu schaffen. Laut Hersteller liegt die Genauigkeit der verwendeten Messkarte bei $\pm 0,1\%$, die des verwendeten Messwiderstands bei $\pm 1\%$.

4.8.7. Regeneration durch Lagerung

Bei der PID handelt es sich um einen Effekt, bei dem sich Degradationsphasen und Regenerationsphasen abwechseln. Die Regeneration tritt hauptsächlich zu den Zeitpunkten auf, an denen die Proben oder Module nicht durch Spannung belastet werden. Wie im Abschnitt 5.3.3. gezeigt wird, spielt die Temperatur eine wichtige Rolle im Regenerationsverhalten von Solarzellen [Ray12, Tau12]. Um den Fehlereinfluss aufgrund der Ausheilung zu untersuchen, wurde folgender Zwischenversuch durchgeführt:

Degradierte Proben einer abgeschlossenen Messreihe wurden 10 Tage lang unter Laborbedingungen (ca. 50 % RH bei ca. 28 °C) gelagert und erneut vermessen. Das Ergebnis wird in der folgenden Tabelle 4.8. dargestellt.

Tabelle 4.8.: Regeneration von Proben nach 10 Tage Lagerung unter Laborbedingungen

Probennummer	R_{SH} in Ω nach PID Belastung	R_{SH} in Ω nach 12 Tagen Lagerung	Regeneration R_{SH} in %
1	21,4	32,8	56
2	3,5	8,4	140
3	2,8	3,2	50
4	2,1	4,2	100

Die beiden rechten Spalten der Tabelle zeigen deutlich, dass der Shunt-Widerstand eine Regeneration während der Lagerung unter Laboratmosphäre erfährt. Dabei fällt das Regenerationsverhalten sehr unterschiedlich aus, scheint jedoch mit der Tiefe des Degradationslevels im Mittel leicht zuzunehmen. Um diese thermische Ausheilung zu unterbinden, wurden folgende Maßnahmen umgesetzt:

1. Zügige Durchführung der Messreihen ohne lange Lagerzeiten,
2. Beginn einer Messreihe am Wochenanfang um bis zum Wochenende die Messreihen abzuschließen.
3. Wenn eine Lagerung (z. B. über Nacht) notwendig wurde, wurde diese im Eisschrank bei -9 °C realisiert.

4. Experimenteller Teil

Da die PID stark temperaturabhängig ist, zeigen Messungen, dass die Regeneration durch die Lagerung in einem Eisschrank stark verzögert werden kann. Die nachstehende Tabelle 4.9. zeigt die Messergebnisse nach einer Lagerung von 10 Tagen.

Tabelle 4.9.: Regeneration der Proben nach Lagerung bei -9°C

Probennummer	R_{SH} in Ω nach PID Belastung	R_{SH} in Ω nach 10 Tagen Eisschrank	Veränderung R_{SH} in %
1	24,4	24,5	1
2	8,2	8,2	<1
3	4,2	4,2	<1
4	0,2	0,2	<1

Mit den durchgeführten Maßnahmen konnte die ungewollte Regeneration wesentlich reduziert werden. Ungewiss bleibt jedoch der Einfluss der Karenzzeit wie sie im Kapitel 4.8.2. beschrieben wurde. Besonders bei hohen Temperaturen bewirkt die Einschwingphase der Klimakammer eine merkliche Regeneration. Diese zusätzliche Unsicherheit der Testreihen wurde durch die Etablierung der In-Situ-Shunt-Widerstandsmessung mittels partieller Dunkelkennlinie deutlich verbessert, da in diesem Fall eine Entnahme der Proben aus der Klimakammer entfällt.

4.8.8. Auswertung und Erstellung von EL-Aufnahmen

Die bildliche Auswertung der EL-Aufnahmen ist ebenso individuellen Schwankungen unterworfen. Die PID zeigt sich als schwarze Flecken, die schwer von der natürlichen Unregelmäßigkeit multikristalliner Zellen in EL-Aufnahmen zu unterscheiden sind. Hinzu kommt, dass die PID die Helligkeit der gesamten betroffenen Zelle herabsetzt (vgl. Abb. 3.5.). Die einzelnen Zellen innerhalb eines Moduls reagieren jedoch unterschiedlich stark auf PID. Dadurch entsteht ein sehr unregelmäßiges „Patch-Work“-Muster (vgl. Abb. 4.14.). Neben der Bildqualität, die durch Stromhöhe während der Messung, Belichtungszeit, Fremdlicht, Objektiv und optische Verzerrung bestimmt wird, zeigte sich, dass bei der Auswertung derselben EL-Aufnahme durch unterschiedliche Personen abweichende Ergebnisse erzeugt wurden. Als Konsequenz wurden sämtlichen EL-Aufnahmen durch den Autor selbst ausgewertet.

Für die Quantifizierung der Unsicherheit der EL-Auswertung in dieser Arbeit wurden dieselben hundert Aufnahmen von 60-Zellen-Modulen an zwei unterschiedlichen Tagen in einem Abstand von sieben Tagen im Vergleich ausgewertet und eine Unsicherheit von 2% bei der Erkennung von PID-Zellen bei Bestromung mit dem Kurzschlussstrom und einer Belichtungszeit von 20 Sekunden ermittelt. Dabei beinhalten die 2% Unsicherheit Zellen, die im zweiten Durchgang zusätzlich identifiziert sowie Zellen, die nicht erkannt wurden.

Unabhängig von den Schwankungen bei der visuellen Auswertung von EL-Aufnahmen wird der Shunt-Widerstand direkt durch die Bestromung der Module während einer EL-

Messung beeinflusst. Für die Bestimmung des PID-Fortschritts wurden während der Zwischenmessungen neben der Kennlinienmessung auch regelmäßig EL-Aufnahmen durchgeführt. Für die Messungen müssen die Proben und Module mit einem Strom belegt werden und daraus folgt eine leichte Erwärmung der Module. Dies führt zu einer Ausheilung des Shunt-Widerstands von 1,8% bei stark belasteten Proben ($\Delta R_{SH} \geq 30\%$). Um den Einfluss auf die Bestimmung des Shunt-Widerstands so gering wie möglich zu halten, wurden die EL-Aufnahmen stets nach der Messung der Kennlinie aufgenommen.

4.8.9. Konstante Spannung während der PID-Untersuchungen unter realen Bedingungen

Für alle Versuche unter realen Bedingungen wurde eine Helligkeitssensorschaltung verwendet, die bei einem Einstrahlungsschwellenwert von 50 W/m^2 eine Spannung in Höhe von -1000 V an die Proben und Module anlegt wurde. Die Höhe der Spannung richtet sich dabei nach der maximal zulässigen Systemspannung nach Schutzklasse II.

In PV-Kraftwerken wird die Systemspannung durch die Anzahl der in Reihe geschalteter Module definiert bzw. genauer der Anzahl ihrer Spannungen in den Punkten maximaler Leistung. Eine Abweichung gegenüber der konstanten Spannung in Höhe von -1000 V ergibt sich dadurch, dass bei der Auslegung von Anlagen in der Regel nicht die maximale Systemspannung ausgereizt wird [SMA17]. Zusätzlich wird Abhängig von der Einstrahlung, die Systemspannung durch die MPP-Regelung des Wechselrichters bestimmt. Hier kommt es je nach Bauform zu einer Erhöhung bzw. zu einer Reduzierung der Systemspannung, wenn beispielsweise eine Teilverschattung der Anlage vorliegt [PVB17]. Darüber hinaus hängt die MPP-Spannung, nach der sich die Systemspannung richtet, von der Temperatur ab und ist daher ebenfalls Schwankungen unterlegen. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 4.18. anhand von Kennlinienmessung desselben Moduls bei unterschiedlichen Einstrahlungen und Modultemperaturen dargestellt.

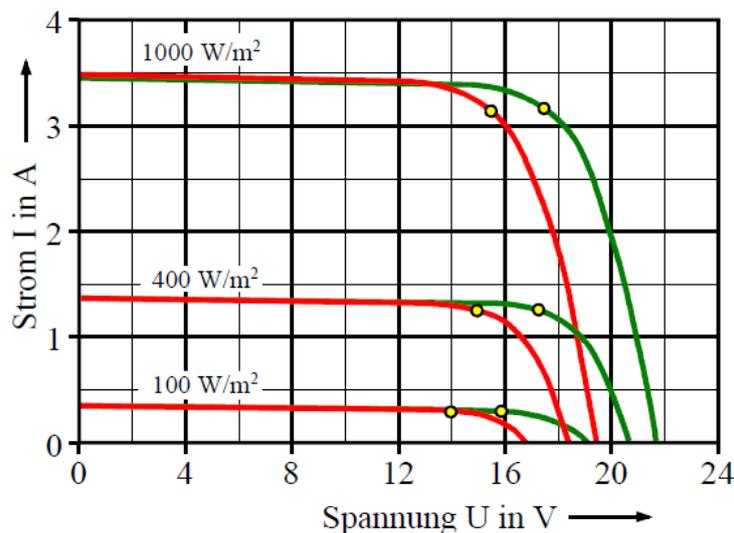


Abbildung 4.18.: Kennlinien eines Solarmoduls mit 36 Zellen bei verschiedener Globalstrahlung und den Zellentemperaturen 25°C (grün) und 55°C (rot) [Fho14]

Für den realen Spannungsverlauf einer Anlage bedeutet dies, dass die Systemspannung in den Morgenstunden relativ hoch ist. Da die Spannung einer logarithmischen Funktion der Einstrahlung folgt, steigt die Spannung zügig an. Sie erreicht jedoch nicht ihren maximalen Wert. Diese wird wiederum durch die geringe Modultemperatur, die die Spannung anhebt, überlagert und die höchsten Systemspannungswerte am Tag stellen sich ein. Tagsüber erwärmen sich die Module und im Vergleich zu den Morgenstunden sinkt die Systemspannung wieder. In den Abendstunden steigt die Systemspannung erneut durch die Abkühlung der Umgebungsluft, erreicht jedoch aufgrund der höheren durchschnittlichen Modultemperaturen nicht dasselbe Level wie am Morgen.

Unabhängig davon ist die Belastung der Module in realen Kraftwerken von ihrer Position im Strang abhängig (vgl. Abb. 5.4.). Je weiter sich ein Modul am Ende eines Modulstrangs befindet umso höher ist ihre Belastung. Die Simulation in dieser Arbeit adressiert daher nur Module am Strangende, welche die maximal mögliche Belastung erfahren. Für alle anderen Module muss die Simulation unabhängig für niedrigere Spannungen durchgeführt werden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die konstante Systemspannung in Höhe von -1000 V nicht das reale Verhalten einer PV-Anlage und ihre Schwankungen im Tagesverlauf bzw. saisonalbedingt berücksichtigt. Auch ist die durchschnittliche Stranglänge in realen Kraftwerken angesichts der Wechselrichtereffizienten so ausgelegt, dass sie nicht kontinuierlich die maximal mögliche Systemspannung erreicht. Gleichwohl stellt die -1000 V Spannung den „Worst-Case-Fall“ dar und ist somit von hohem Interesse. Für die Übertragung der Ergebnisse dieser Arbeit auf reale Kraftwerke ist jedoch eine Überbewertung der Ausfallzeit anzunehmen.

4.8.10. Ausprägung des elektrischen Felds bei Ein-Zellen- und 60-Zellen-Modulen

Kommerzielle Solarmodule bestehen in der Regel aus 60 oder 72 Zellen, die seriell miteinander verschaltet sind. Die Unterschiede zwischen den untersuchten Minimodulen und kommerziellen Solarmodulen bestehen zum einen in der unterschiedlichen Ausführung des Rahmens. Bei Modulgrößen besteht dieser aus eloxierten Aluminiumprofilen. Bei den verwendeten Proben wurde dieser Rahmen mittels Kupferfolie nachgestellt. Der Abstand zu den Zellen wurde, wie bei den meisten Modulen, auf 8 mm festgelegt. Um den Unterschied zwischen Ein-Zellen-Minimodulen und 60-Zellen-Modulen bewerten zu können, wurden mittels Elektrovoltmeter, einem Gerät zur Messung der elektrischen Feldstärke, wie es in Abbildung 4.19. schematisch dargestellt ist, Vergleichsuntersuchungen durchgeführt. Im Prinzip stellt die Elektrovoltmeter oder Feldmühle einen veränderlichen Kondensator dar, der auf eine konstante Spannung, die zu messende Spannung aufgeladen ist. Die veränderte Kapazität bewirkt eine veränderte Ladung, und die Ladungsdifferenz zum vorherigen Zustand veranlasst einen Wechselstrom durch den an die Messkapazität angeschlossenen Messverstärker. Dieser Messstrom ist der Kapazitätsänderung und der Kondensatorspannung proportional, und da die Kapazitätsänderung konstruktiv konstant bleibt, ist der Strom ein Maß für die angelegte Spannung [Rap17].

4. Experimenteller Teil

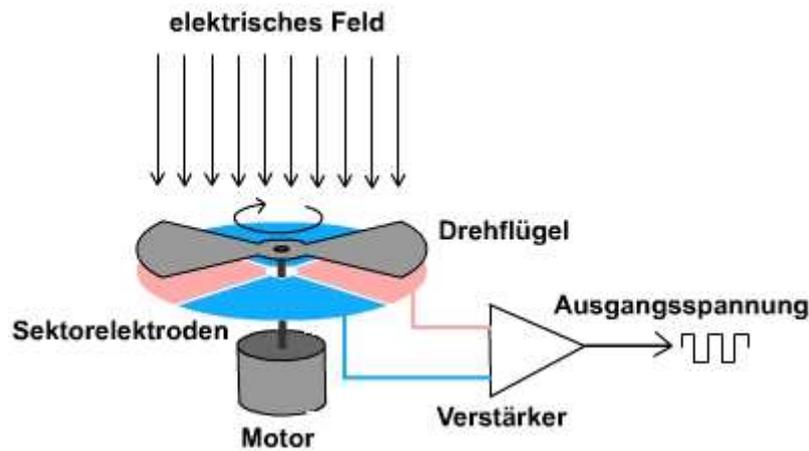


Abbildung 4.19.: Schematischer Aufbau eines Elektrovoltmeters [Rap17]

Für eine vergleichende Messung wurde das Elektrovoltmeter ausgehend vom Rahmen mittig im rechten Winkel entlang der Oberfläche einer Probe sowie eines Moduls bewegt und in regelmäßigen Abständen die Spannung bestimmt.

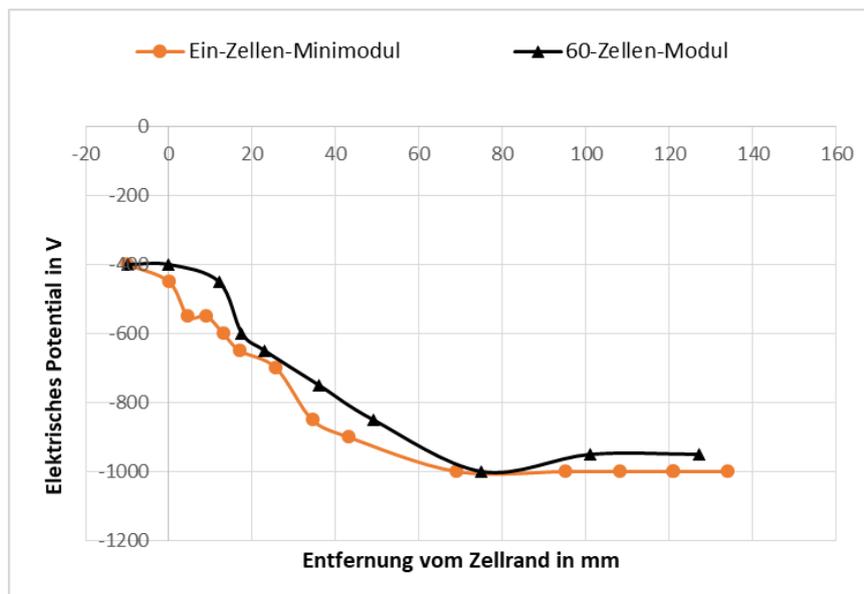


Abbildung 4.20.: Verlauf des elektrischen Feldes, gemessen mittels Rotationsvoltmeter eines Minimoduls und eines 60-Zellen-Moduls

Die beiden Messkurven in Abbildung 4.20. zeigen, dass der Verlauf des elektrischen Feldes an der Oberfläche eines Moduls nahezu deckungsgleich mit dem von in dieser Arbeit verwendeten Minimodulen ist. Direkt am Rahmen ist die Höhe der Spannung identisch. Mit steigendem Abstand nimmt die Spannung ab. Zwar liegt der Spannungsverlauf der Probe geringfügig unter dem des Moduls, doch kann dies ebenso auf die hohe Messunsicherheit des Elektrovoltmeters zurückgeführt werden. Der Einfluss durch das unterschiedliche Rahmendesign wird daher für die Untersuchungen als gering eingeschätzt.

5. Ergebnisse

Aufgrund des klar definierten Probenaufbaus beschäftigt sich die Laboruntersuchung in erster Linie mit dem Einfluss der Umweltbedingungen auf den Degradations- bzw. den Regenerationsprozess.

Es werden Degradations- und Regenerationsverläufe unter simulierten Umweltbedingungen im Labor präsentiert und analysiert. Dabei werden einzelne Umgebungsbedingungen isoliert verändert und mittels Parameter der S-Funktion quantitativ bestimmt. Die in diesem Kapitel quantifizierten Parameteränderungen der S-Funktion dienen im Anschluss als Basis für das iterative Simulationsmodellkonzept in Kapitel 7.1. Zusätzlich werden auf Basis der Laborergebnisse grundlegende physikalische Mechanismen der beiden Prozesse Degradation und Regeneration untersucht und beschrieben.

5.1. Degradationsuntersuchungen

Zu Beginn sollen die allgemein anerkannten Einflussfaktorabhängigkeiten der Degradation erläutert werden. Ein grundlegender Einflussfaktor für die PID-Alterung stellt die durch die Systemspannung verursachte Belastungszeit dar. Je länger die Spannung auf eine Probe oder ein Modul wirkt, desto weiter reduziert sich der Shunt-Widerstand des betrachteten Testobjekts. Unabhängig davon sind Kontaktierungsart, Einstrahlung, Temperatur und Spannung grundlegende Einflüsse für die PID, die im Folgenden näher betrachtet werden. Abschließend wird in diesem Abschnitt die Bestrahlung als PID-verzögernder Faktor behandelt.

5.1.1. Einfluss der Kontaktierungsart

In der Norm IEC 62804, dem Standard für PID-Testverfahren werden zwei unterschiedliche Methoden für den Nachweis von PID vorgeschlagen [IEC15]. Hauptsächlich unterscheiden sich die Verfahren darin, dass sie zum einen bei unterschiedlichen Temperaturen (25 und 60 °C) durchgeführt werden und zum zweiten in der Art und Weise, wie die Prüfkörper mit dem Netzteil bzw. der Erdung verbunden werden. Das erste Verfahren wird bei einem Temperaturlevel von 25 °C durchgeführt, wobei die Proben während der Testzeit von 168 Stunden flächig mit einer elektrisch leitenden Folie auf der Vorderseite bedeckt werden. Die Folie wird anschließend mit dem Netzteil bzw. der Erdung verbunden. Die Kontaktierung belastet alle Zellen eines Moduls über die gesamte Fläche gleichmäßig mit einem homogenen elektrischen Feld.

Für das zweite PID-Testverfahren wird die Erdung lediglich mit dem metallischen Rahmen der PV-Module kontaktiert. Dies spiegelt ebenso die übliche Installationsart in

5. Ergebnisse

realen Kraftwerken wider. Diese Erdungsart erzeugt, wie eigene Untersuchungen gezeigt haben, für im Labor belastete Module, vergleichbare Muster in EL-Aufnahmen wie in Kraftwerken belastete Module [Koc13]. Im folgenden Versuch sollen der Unterschied der beiden Kontaktierungsarten und ihr Einfluss auf den PID-Verlauf untersucht werden. Hierbei wird nur die Kontaktierungsart variiert, alle anderen Parameter bleiben unverändert.

Für den Versuch wurden acht Ein-Zellen-Minimodule hälftig mit Metallplatte auf der Frontseite und die verbleibenden vier mit Kupferband 8 mm vom Zellrand entfernt kontaktiert. Die Kontaktierungen wurden anschließend mit der Erdung verbunden. Die Anschlussstecker der Proben wurden hingegen kurzgeschlossen und mit dem Spannungsnetzteil verbunden. Bei einer Spannung von -1000 V, 60 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 85 % wurden die Proben in einem Klimaschrank belastet. In regelmäßigen Abständen wurden sie entnommen und der Shunt-Widerstand mittels BLS bestimmt. Für eine übersichtliche Auswertung wurden alle Verläufe auf ihren initialen Messwert normiert. Anschließend wurde für jede Kontaktierungsgruppe und jeden Zwischenmessungsschritt der Mittelwert berechnet. Durch Rückführung der Messwerte auf die S-Funktion mittels des Programms ORIGIN wurden die Parameterunterschiede $\Delta A_{K,1,2}$, $\Delta s_{K,1}$ und $\Delta p_{K,1}$ bestimmt.

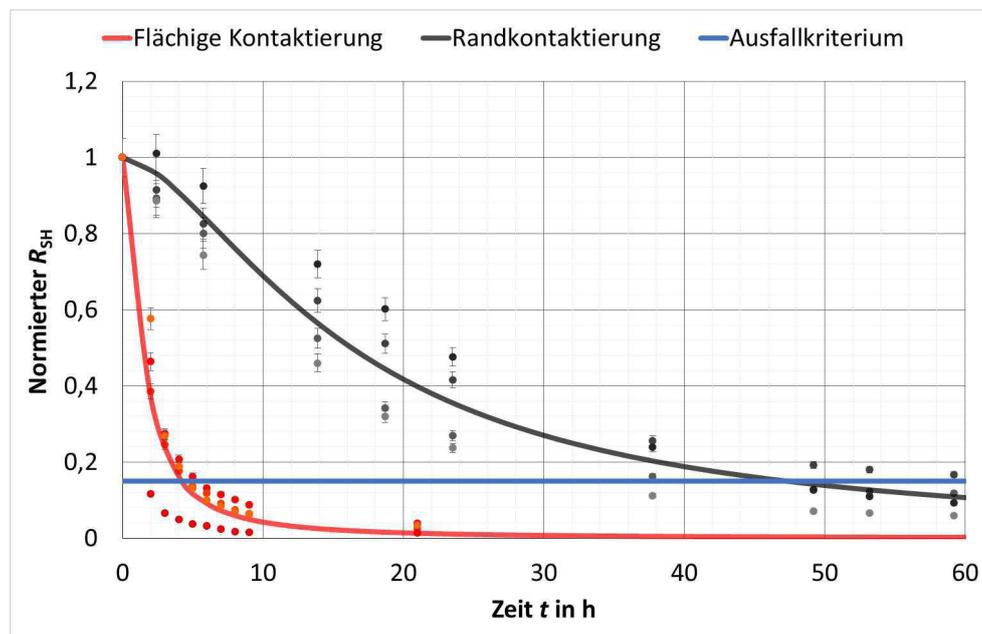


Abbildung 5.1.: Vergleich zwischen flächiger (rot) und randkontaktierter (schwarz) Proben während eines PID-Testlaufs

Durch Mittelwertbildung der Shunt-Widerstände beider Testgruppen erhält man die zeitlichen Verläufe, der in Abbildung 5.1. dargestellt S-Funktionen. Betrachtet man die flächig kontaktierten (roter Verlauf), ist aufgrund der schnellen Degradation keine Induktionsphase zu erkennen. Des Weiteren zeigen diese im Vergleich zu den am Rand kontaktierten Proben (schwarzer Verlauf) einen weitaus schnelleren Degradationsverlauf. Nach dem Erreichen des Ausfallkriterium konvergieren beide Verläufe gegen Null.

Betrachtet man die Differenz der beiden Funktionsparameter $\Delta s_{K,1}$ (14,86) und $\Delta p_{K,1}$ (0,02) zeigen diese ebenfalls eine Erhöhung. Es kann festgehalten werden, dass die Art und Weise der Kontaktierung für die Degradation einen entscheidenden Einfluss hat. Je flächiger die Proben kontaktiert sind, desto schneller scheinen diese zu degradieren.

5.1.2. Einfluss der Temperatur

Schon in den ersten Veröffentlichungen 2010 von BERGHOLD wurde die Temperatur als beschleunigender Faktor der PID beschrieben und ein Jahr später die PID durch SCHÜTZE als Arrheniusprozess aufgefasst [Sch11a]. Diese Beobachtungen wurden von HACKE und NAUMANN unterstützt, indem sie die Diffusion von Natrium als Ursache für die PID identifizierten [Hac10, Nau12]. Für die folgenden Untersuchungen wurden die Module in einem Temperaturbereich von 25-85 °C belastet. Dieser Temperaturbereich spiegelt in etwa den Arbeitsbereich wider, in dem sich ein Solarmodul in gemäßigten Breiten tagsüber befindet.

Für die Bestimmung der Beschleunigung wurden Ein-Zellen-Minimodule vollflächig mit einer Aluminiumplatte kontaktiert. Die Idee hinter der flächigen Kontaktierung war die Erzeugung eines homogenen elektrischen Feldes über die gesamte Zellfläche. Um etwaigen zusätzlichen Einfluss der Luftfeuchtigkeit zu beseitigen, fand die Probenbelastung in einem Wasserbad statt. Das Wasserbad wurde in dem Klimaschrank platziert und auf die gewünschte Temperatur eingestellt. Die Proben akklimatisierten vor dem Einschalten der Spannung mindestens zwei Stunden unter konstanten Bedingungen. Nach der Akklimatisierung wurde eine Spannung von -1000 V zwischen flächiger Frontkontaktierung und kurzgeschlossener Zelle angelegt und die Messung gestartet. Die Degradationsverläufe der Temperaturen 25, 30, 40, 50 und 85 °C (bzw. 298, 303, 313, 323 und 358 K) wurden sukzessive aufgezeichnet.

Die Shunt-Widerstandsbestimmung erfolgte mittels Hellkennlinienmessung. Für eine gute Vergleichbarkeit wurden die Shunt-Widerstände auf den jeweiligen initialen Messwert normiert. Die Shunt-Widerstandsverläufe der unterschiedlichen Proben werden je Temperaturschritt zu einem gemittelten Verlauf zusammengeführt. Für die betrachteten Temperaturen können somit die Verläufe übersichtlich miteinander verglichen werden. Abbildung 5.2. zeigt die unterschiedlichen, für jede Temperatur gemittelten Degradationsverläufe. Beim Vergleich der unterschiedlichen Widerstandsentwicklungen ist die Beschleunigung durch die Temperaturerhöhung mehr als deutlich. Eine kurze Induktionsphase ist auch bei niedrigen Temperaturen nur schwach zu identifizieren, verkürzt sich zusätzlich Schritt für Schritt hin zu hohen Temperaturen. Ebenso nimmt die Degradationsphase graduell mit der Temperatur ab.

Im Vergleich erreichen die Proben bei 298 K (blau) nach 22 Stunden das Ausfallkriterium und bei 358 K (gelb) schon nach 0,16 Stunden. Anhand der Parameter der S-Funktion wird die temperaturbedingte Beschleunigung ebenso deutlich. Aus Abbildung 5.2., in der beide Parameter $s_{T,1}$ und $p_{T,1}$ über die Temperatur aufgetragen sind, wird unmittelbar die Abhängigkeit sichtbar.

5. Ergebnisse

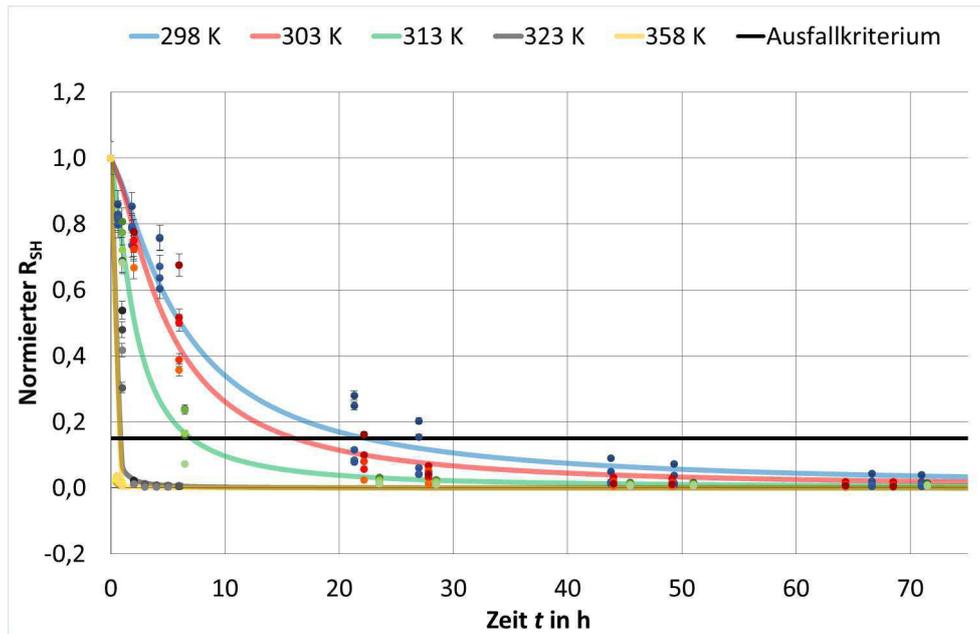


Abbildung 5.2.: Normierter gemittelter Shunt-Widerstandsverlauf unter PID-Belastung bei unterschiedlichen Temperaturen

Da es sich bei den Untersuchungen um Degradationsverläufe handelt, bei denen der Verlauf gegen Null konvergiert, wurde die Analyse auf die beiden Parameter $s_{T,1}$ und $p_{T,1}$ beschränkt und auf die Analyse des $A_{T,1,2}$ -Parameters verzichtet. Die Abweichung durch die Mittelwertbildung ist nun für die Funktionsparameter $s_{T,1}$ und $p_{T,1}$ dargestellt.

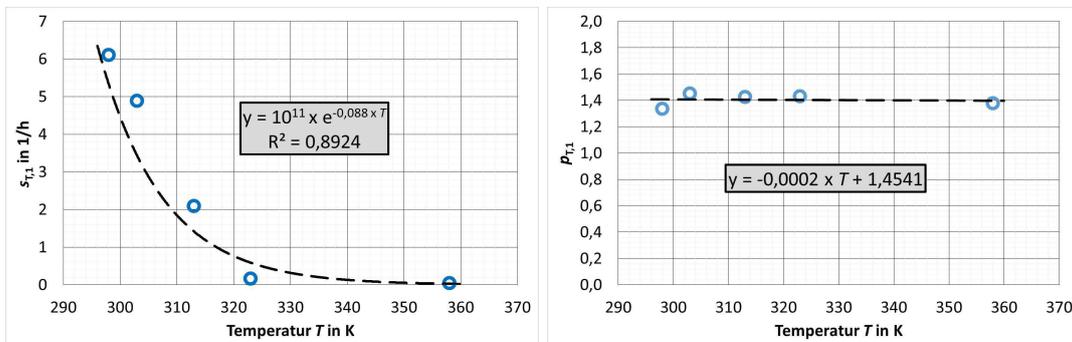


Abbildung 5.3.: Die Änderungen der Funktionsparameter $s_{T,1}$ und $p_{T,1}$ in Abhängigkeit von der Temperatur

Die Analyse des Parameters $s_{T,1}$ ergibt einen exponentiellen Abfall der Werte mit steigender Temperatur, gleichzeitig kann der $p_{T,1}$ -Parameter als konstant angenommen werden. Die in Abbildung 5.3. gezeigten Temperaturabhängigkeiten der Parameter sind noch einmal übersichtlich in Tabelle 5.1. gegenübergestellt.

Damit ist nach der Kontaktierungsart mit der Temperatur die zweite Einflussgröße zahlenmäßig für den betrachteten Probenaufbau bestimmt worden. Anhand der Ergebnisse kann später der Widerstandsverlauf mittels Temperatur T für beliebige Zeiträume berechnet werden.

Tabelle 5.1.: Berechnungsterme oder Konstanten für die Faktoren der S-Funktion in Abhängigkeit von der Temperatur

Parameterwert	Funktion/Konstante
$f_{s_{T,1}}(T)$	$10^{11} \cdot \text{EXP}(-0,088 \cdot T)$
$f_{p_{T,1}}(T)$	$T \cdot -0,0002 + 1,4541$
$f_{A_{T,1,2}}(T)$	0

5.1.3. Einfluss der Spannung

In einer der ersten Arbeiten zum Thema PID wurde die Spannungsabhängigkeit der Degradation anhand einer EL-Aufnahme präsentiert [Pin10]. Die Aufnahme zeigte, ähnlich wie Abbildung 5.4., das EL-Bild eines Modulstrings, der seit der Installation mit negativer und positiver Spannung belastet wurde. Zellen mit einem sehr geringen Shunt-Widerstand erscheinen im EL-Bild schwarz. Die Anzahl der schwarzen Zellen pro Modul nimmt mit abnehmender negativer Systemspannung (von links nach rechts) in dem vorliegenden Fall ebenfalls ab.

In einer Veröffentlichung, welche erstmals den Zusammenhang zwischen Degradationsgeschwindigkeit und Spannung untersuchte, zeigte SCHÜTZE, wie aus einer 20-fachen Spannung eine 25-fache Degradationsgeschwindigkeit resultierte [Sch11a]. Eine weitere Arbeit, die sich mit dem Einfluss der Spannung auf die PID auseinandersetzte, konnte ebenfalls die Beschleunigung durch hohe Spannungen bestätigen [Kad13].

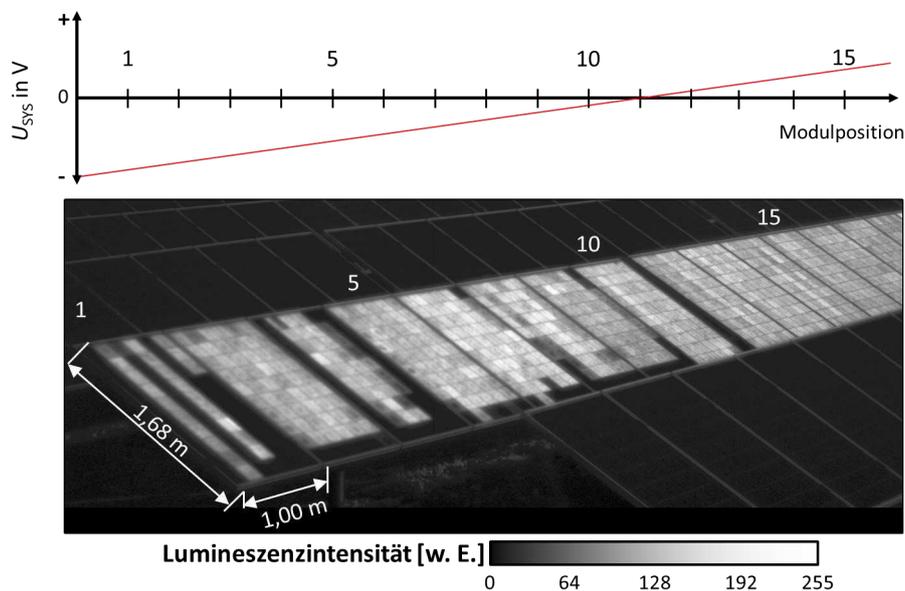


Abbildung 5.4.: EL-Aufnahme eines Modulstrings. In der Aufnahme sind die unterschiedlichen Ausprägungen der PID aufgrund der steigenden negativen Spannung von rechts nach links zu erkennen (Bild aus [Fra10] / modifiziert).

Die nun folgenden Messungen dieser Arbeit unterscheiden sich leicht von den vorherigen

5. Ergebnisse

Untersuchungen bzgl. derjenigen des Temperatureinflusses auf die PID. Im vorliegenden Fall wurde eine konstante Testumgebung von 60 °C und 85 % Luftfeuchtigkeit gewählt. Dies sind Testbedingungen, wie sie auch im Normvorschlag IEC 62804⁵ Anwendung finden. Die Proben wurden, im Unterschied zu der vorherigen Testsequenz, mittels einer Randkontaktierung ausgestattet. Dies kommt dem realen Betriebsfall in einem Modulverbund am nächsten und bildet – wie in Abschnitt 4.8.10. präsentiert – ein mit Modulen vergleichbares elektrisches Feld aus. Es wurden erneut vier Proben je Spannungslevel untersucht und der Shunt-Widerstand mittels Hellkennlinie bestimmt. Die gewählten Spannungslevel betragen -100, -200, -600, -1000 und -1500 V. Durch die Normierung auf den initialen Widerstandswert und die Mittlung der Proben für jede Spannungsstufe ergeben sich fünf unterschiedliche Degradationsverläufe.

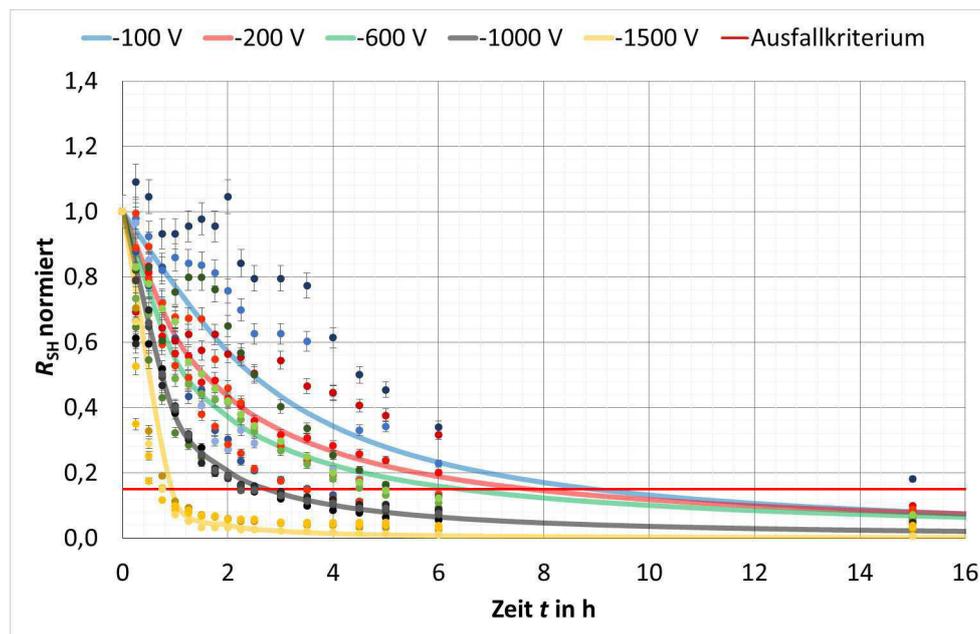


Abbildung 5.5.: Vergleich des Shunt-Widerstandsverlaufes während eines PID-Stress-tests in Abhängigkeit von der Spannung

Die Analyse der Graphik in Abbildung 5.5. ergibt eine Beschleunigung der Degradation in Abhängigkeit von der Spannung. Weiterführend bildet keiner der Verläufe infolge der hohen Temperaturen eine ausgeprägte Induktionsphase aus. Direkt nach Beginn der Spannungsbelastung startet der deutliche Abfall des Shunt-Widerstands. Nach spätestens zehn Stunden erreichen die Proben die Stabilisierungsphase. Auffällig ist die große Streuung der Messwerte bei -100 V. Die Ursache für diesen Unterschied wird der Varianz der Proben, aber auch mit dem Spannungsabfall über der Oberfläche und dem damit einhergehenden inhomogenen elektrischen Feld über der Zelloberfläche vermutet. Der Einfluss des elektrischen Felds wird in Kapitel 5.2. genauer erläutert.

Vergleicht man die einzelnen durch Mittelwertbildung erzeugten Verläufe, wird deutlich, dass die Erhöhung der Spannung eine deutliche Beschleunigung des Degradationsverlaufs mit sich bringt. Analysiert man die einzelnen Parameter der Regression $s_{S,1}$, $p_{S,1}$ genauer,

⁵ System voltage durability qualification test for crystalline silicon modules IEC 62804 Edition 1

5. Ergebnisse

wird diese Beobachtung noch einmal prägnanter.

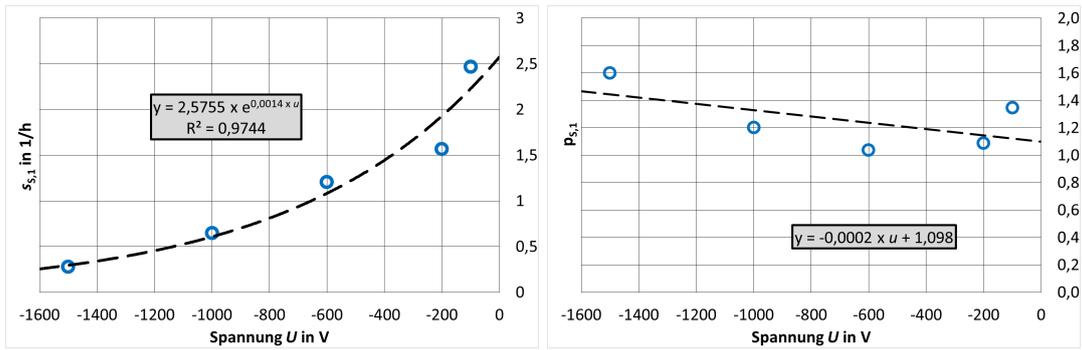


Abbildung 5.6.: Die Änderungen der Funktionsparameter $s_{S,1}$ und $p_{S,1}$ in Abhängigkeit von der Spannung U

In Abbildung 5.6., in der die Parameter $s_{S,1}$ und $p_{S,1}$ in Abhängigkeit von der Spannung dargestellt werden, zeigt der Parameter $s_{S,1}$ eine exponentielle Abhängigkeit, wogegen $p_{S,1}$ nur eine sehr schwache Änderung zeigt. Die Quantifizierung der einzelnen Funktionsparameter wurde zur besseren Vergleichbarkeit noch einmal in Tabelle 5.2. aufgelistet.

Tabelle 5.2.: Berechnungsterme oder Konstanten für die Faktoren der S-Funktion in Abhängigkeit der Spannung U

Faktoren	Funktion/Konstante
$f_{s_{S,1}}(U)$	$2,5755 \cdot \text{EXP}(0,0014 \cdot U)$
$f_{p_{S,1}}(U)$	$-0,0002 \cdot U + 1,098$
$f_{A_{S,1,2}}(U)$	0

Es kann festgehalten werden, dass durch die Erhöhung der Spannung, ähnlich wie durch die Temperatur, eine Beschleunigung der Degradation verursacht wird.

5.1.4. Einfluss der Einstrahlung

Vergleichende PID-Versuchsreihen zwischen Labor und realen Bedingungen bei ähnlichen Umweltbedingungen offenbaren stets deutlich abweichende Resultate. Es zeigte sich mehrfach, dass Proben in den Klimakammern weitaus schneller degradierten als Proben unter realen Bedingungen. Als Hauptunterschied zwischen beiden Versuchsumgebungen konnte die Einstrahlung identifiziert werden.

Zur detaillierteren Untersuchung des Strahlungseinflusses wurde vom Verfasser ein Versuchsaufbau entwickelt, welcher trotz des Ein- und Ausschaltens einer Strahlungsquelle nahezu identische Versuchsumgebungen ermöglicht. Die Hauptschwierigkeit in den Versuchsdurchführungen liegt darin begründet, dass durch das Zuschalten einer Strahlungsquelle stets der Zustand der Proben verändert wird.

Zum einen wird zusätzliche Energie in die Proben injiziert, welche die Zelltemperatur ansteigen lässt, zum anderen hat die Einstrahlung einen Einfluss auf die Oberflächenleitfähigkeit und somit das elektrische Feld der Proben (vgl. Kap. 5.2.). Damit jedoch eine

5. Ergebnisse

vergleichbare Temperatur sowie Oberflächenleitfähigkeit zwischen unbestrahlten und bestrahlten Proben gewährleistet werden konnte, wurden die Proben ähnlich wie in Kapitel 5.1.2. innerhalb eines Wasserbades belastet.

Der schematische Aufbau in Abbildung 5.7. visualisiert, in welcher Art und Weise die Minimodule in eine transparente und mit destilliertem Wasser (Wasserbad) gefüllte Box getaucht wurden. Die Box wurde zusammen mit einem Halogenstrahler im Klimaschrank positioniert. Nach dem Einschalten der Strahlungsquelle mit einer Anschlussleistung von 500 W wurde die Wassertemperatur auf ein Level von 40 °C eingestellt und für vier Stunden konstant gehalten, um ein Temperaturgleichgewicht zwischen Probe und Wasserbad zu erreichen.

Die Höhe der auf die Probe einwirkenden Strahlung wurde über den Kurzschlussstrom der Minimodule bestimmt und betrug während der Testläufe 2,5 A, was einer Einstrahlung von 312 W/m² entspricht. Nach der vierstündigen Einschwingzeit wurde eine Spannung in Höhe -1000 V zugeschaltet und somit die PID-Belastung gestartet. In einer ersten Testreihe wurden zwei randkontaktierte Proben unter dem Einfluss der Beleuchtungseinheit belastet, in einer zweiten Testreihe folgte eine Wiederholung der Messung mit identischer Randbedingungen, jedoch ohne den Einsatz der Strahlungsquelle.

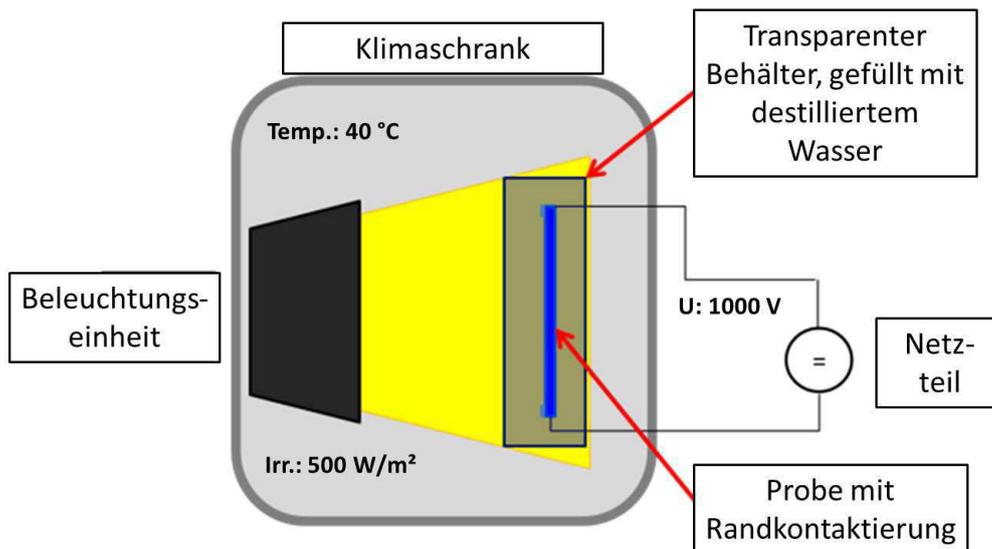


Abbildung 5.7.: Schematischer Aufbau zur Untersuchung des Strahlungseinflusses auf das PID-Verhalten

Der Verlauf der Shunt-Widerstände wurde für beide Probengruppen normiert und gemittelt und anhand Regressionsanalyse modelliert, so dass unterschiedliche Verläufe resultierten. In Abbildung 5.8. sind die beiden Gänge des Shunt-Widerstands graphisch dargestellt:

5. Ergebnisse

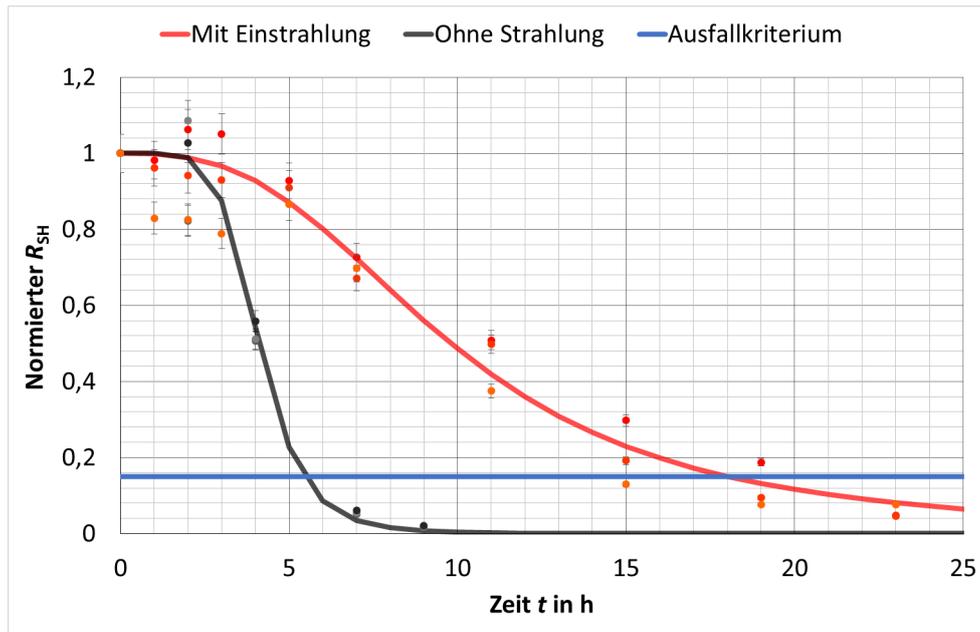


Abbildung 5.8.: Degradationsverläufe bei identischen Versuchsumgebungen mit (rot) und ohne (schwarz) Bestrahlung

Der Verlauf der beiden Messkurven zeigt einen eindeutigen Einfluss der Einstrahlung auf das Degradationsverhalten der Proben. Es ist deutlich zu erkennen, dass die beleuchteten Proben (roter Verlauf) im Vergleich eine weitaus ausgedehntere Induktionsphase zeigen. Zusätzlich wird die Degradationsphase durch die Bestrahlung signifikant in die Länge gezogen. Das Stabilisierungslevel scheint von der Strahlung jedoch unbeeinflusst und beide Verläufe konvergieren gegen den Wert Null. Betrachtet man die Differenz der quantifizierten Parameter der S-Funktion, ergibt sich für $\Delta s_{E,1}$ -5,69 und $\Delta p_{E,1}$ 3,39 (vgl. Tab. 5.3.).

Tabelle 5.3.: Übersicht der Funktionsparameter des bestrahlten und unbestrahlten Degradationsverlaufes im Vergleich

Parameter (Mittelwert)	Versuchsreihe ohne Bestrahlung (40 °C)	Versuchsreihe mit Bestrahlung (40 °C)
$A_{E,1,1}$	1,00	1,00
$A_{E,2,1}$	0,00	0,00
$s_{E,1}$ in 1/h	9,80	4,10
$p_{E,1}$	2,85	6,24

Analysiert man den Parameter $s_{E,1}$ im Detail, zeigt sich, dass die Einstrahlung im Gegensatz zu Temperatur und Spannung eine Reduzierung des Wertes nach sich zieht. Die hohen negativen Werte für $\Delta s_{E,1}$ belegen die klare Beschleunigung, die durch die Abwesenheit der Einstrahlung verursacht wird. Verstärkt wird dieser Effekt durch die deutliche Erhöhung des $p_{E,1}$ -Wertes, welcher einen Anstieg des Widerstand-Abfalls zur Folge hat. Damit konnte im Verlauf dieser Arbeit erstmals der Einfluss der Bestrah-

lung gezeigt werden und folgernd eine Erklärung für die Diskrepanz zwischen Labor und Feldversuchen gefunden werden.

5.1.5. Zusammenfassung

Bei den Untersuchungen der Abhängigkeiten auf die PID konnten vier unterschiedliche Einflussfaktoren identifiziert werden. Dabei hat sich herausgestellt, dass man beschleunigende und verzögernde Einflussfaktoren voneinander unterscheiden kann. Beschleunigungsfaktoren sind dadurch gekennzeichnet, dass sich bei einer Erhöhung des Einflussfaktors die PID-Entwicklung beschleunigt. Hierzu zählen die Temperatur, die Spannung und die Gestalt der Kontaktierung. Als verzögernder Einflussfaktor wurde die Einstrahlung eruiert. Um zu analysieren, welche Einflussfaktoren später in der Simulation die dominierenden Koeffizienten beisteuern werden, wurden für die einzelnen Faktoren die im Betriebsfall relevanten Minima und Maxima bestimmt. Vergleicht man die Beschleunigungen in den relevanten Bereichen (siehe Tab. 5.4.), wird der starke Einfluss der Temperatur noch einmal deutlich. Im Gegensatz zur Spannung ist die Einwirkung der Temperatur auf den Parameter s_1 leicht erhöht. Die stärkste Beschleunigung zeigt jedoch mit Abstand die Kontaktierung, die bei einer Änderung von Rand zu flächiger Kontaktierung um den Wert 14,86 sinkt.

Tabelle 5.4.: Übersicht der einzelnen Degradationseinflussfaktoren der PID

Einflussfaktor	Betrachteter Bereiche	Δs_1 in 1/h	Δp_1	$\Delta A_{1,2}$
Temperatur	274 bis 359 °C	-3,33	-0,01	0,00
Kontaktierungsart	Rand/flächig	-14,86	-0,02	0,00
Spannung	-100 bis -1000 V	-1,60	0,18	0,00
Einstrahlung	ja/nein	5,69	-3,39	0,00

Bei der Untersuchung der verzögernden Einflussgröße stellt sich heraus, dass besonders bei der Abschätzung der PID-Entwicklung eine Missachtung der Einstrahlung zu einer überproportional schnellen Alterung führt. Die Beschreibung dieses Einflusses und seine Quantifizierung stellen eine neue Forschungserkenntnis dar, die erstmals während des von NREL organisierten Reliability Workshop, welcher sich jährlich mit der Ausarbeitung der IEC Normen beschäftigt, vorgestellt wurde [Koc14b].

Abschließend ist zu erwähnen, dass die Luftfeuchtigkeit als entscheidende Einflussgröße bis hierhin außer acht gelassen wurde. Bei den Laboruntersuchungen hat sich jedoch gezeigt, dass die Luftfeuchtigkeit eine Sonderstellung unter den Einflussfaktoren einnimmt und daher in dieser Arbeit in einem eigenständigen Kapitel behandelt wird.

5.2. Die Sonderstellung der Luftfeuchtigkeit

Im Zuge der Untersuchungen des Einflusses der Luftfeuchtigkeit wurde deutlich, dass Minimodule bei Belastung mit gleicher relativer Luftfeuchtigkeit sehr unterschiedlich auf PID-Belastung reagieren. Dabei war insbesondere der Ort in der Klimakammer und die Positionierung der Proben bei am Rand kontaktierten Minimodulen signifikant starken Schwankungen ausgesetzt. Doch auch durch Einhaltung fester Positionen in der Klimakammer konnten keine reproduzierbaren Ergebnisse erzeugt werden. Dies war unabhängig davon, ob die relative oder die absolute Luftfeuchtigkeit als Parameter betrachtet wurde. Verstärkt wurden diese Schwankungen, je geringer die angelegte Spannung eingestellt wurde, wie am Beispiel der Spannungsbelastung mittels -100 V im vorherigen Kapitel erkennbar wurde. Bei Proben mit flächiger Kontaktierung konnte hingegen kaum eine Schwankung festgestellt werden.

Die Rolle der Luftfeuchtigkeit ist eines der am stärksten kontrovers diskutierten Themen in der PID-Forschung. Ein Großteil der Veröffentlichungen nimmt die Luftfeuchtigkeit bzw. ein Mindestmaß an Luftfeuchtigkeit als notwendig für die Degradation an. TAUBITZ (85 % RH) und auch HATTENDORF (70 % RH) verwenden in ihren Vorhersagemodellen die Feuchtigkeit als Schwellenwert für den Beginn der Degradation [Hat12, Tau14]. Hintergrund dieser Überlegung ist, dass der Leckstrom als Indikator für die geflossenen Natriumionen angesehen wird. HOFFMANN zeigt den Zusammenhang zwischen Leckstrom und Luftfeuchtigkeit bei konstanter Temperatur [Hom12]. Dort zeigt er, dass eine steigende Luftfeuchtigkeit für einen steigenden Leckstrom verantwortlich ist. Im Prinzip kommen alle PID-Untersuchungen, die den Leckstrom als Indikator der Belastung heranziehen, zu ähnlichen Schlüssen.

Diesen Beobachtungen stehen jedoch abweichende Resultate gegenüber. Eigene Untersuchungen des Verfassers [Koc11] und andere Experimente [Pin14] kommen zu dem Ergebnis, dass Module unter Klimaten mit Luftfeuchtigkeit weit unter 70 % dennoch deutliche Alterungserscheinungen aufweisen können. Zusätzlich findet, im Falle der PID bei kristallinen Zellen, im Gegensatz zur TCO-Korrosion bei Dünnschichtmodulen, die beide durch Spannungsbelastung verursacht werden, keine chemische Reaktion mit Wasser statt [Car03]. Diesen Sachverhalt bestätigt NAUMANN ausgiebig in seinen PID-Untersuchungen, die ausschließlich Natrium für die PID verantwortlich machen [Nau14]. Daher ist die Annahme in dieser Arbeit, dass die Luftfeuchtigkeit indirekt die PID beeinflusst und zwar dergestalt, dass die Luftfeuchtigkeit die Oberflächenleitfähigkeit verändert und damit die Ausprägung des elektrischen Felds, welches auf die Probe wirkt. Vermutet wird darüber hinaus, dass der Leckstrom ebenso die Änderung des elektrischen Feldes detektiert und nicht direkt Aufschluss über den PID-Status geben kann.

Zur Überprüfung der These wurden die Oberflächenleitfähigkeit und der Leckstrom ins Detail gehend betrachtet. Für eine Bestimmung der spezifischen Oberflächenleitfähigkeit der in dieser Arbeit verwendeten Proben wurde eine Versuchsanordnung nach ISO 93 gewählt. Dafür wurden zwei Elektroden mittig auf der Frontseite eines Minimoduls befestigt, so dass sie eine quadratische Testfläche begrenzen (siehe Abb. 5.9.). Dieser Aufbau wurde in dem Klimaschrank positioniert. Im Anschluss wurden sukzessive unter-

5. Ergebnisse

schiedliche Temperaturen und Luftfeuchtigkeitslevel eingestellt und für mehrere Stunden unverändert belassen. Für jede Einstellung wurde die Oberflächenleitfähigkeit im entsprechenden Zeitabschnitt bestimmt und gemittelt.

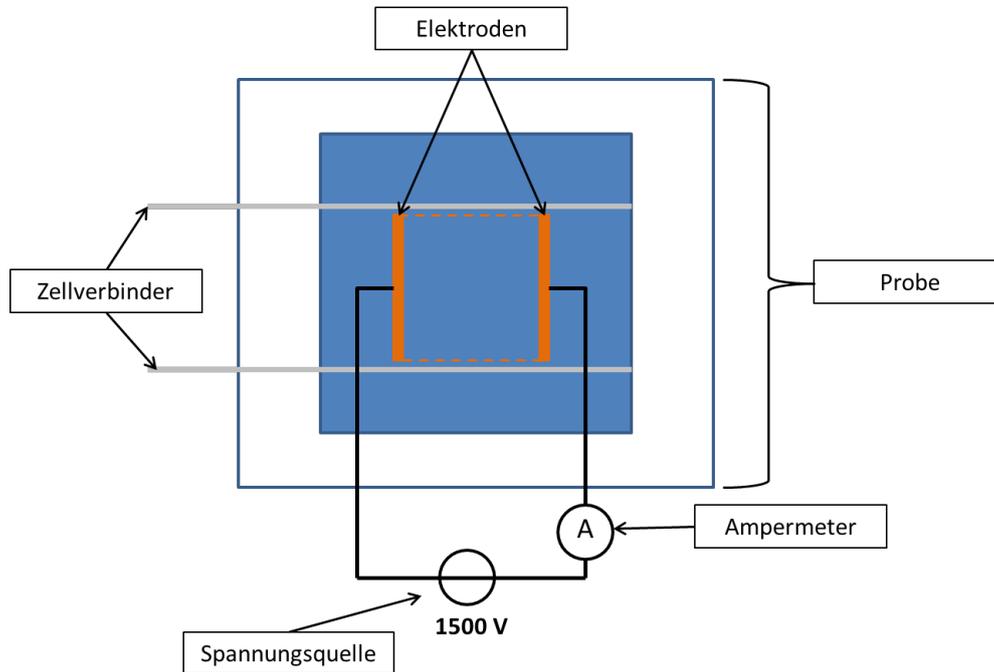


Abbildung 5.9.: Schematischer Testaufbau zur Bestimmung der Oberflächenleitfähigkeit nach ISO 93

Um die Rolle des Leckstroms genauer zu untersuchen, wurde parallel dazu ebenfalls eine Probe identisch zu den vorangegangenen Versuchsläufen mit einer Rahmenkontaktierung im Klimaschrank platziert. Diese Probe wurde mit -1000 V belegt und der daraus resultierende Leckstrom aufgezeichnet. Für beide Messungen kann nun jeweils der spezifische Leitwert σ bzw. der mittlere Leckstrom I_{Leck} für verschiedene Temperaturen in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit RH abgebildet werden. Stellt man beide Ergebnisse wie in Abbildung 5.10. gegenüber, so wird deutlich, dass der Leckstrom I_{Leck} sowie die spezifischen Oberflächenleitfähigkeit σ ein nahezu identisches Verhalten zeigen. Bei geringem relativen Luftfeuchtigkeitslevel zeigen Oberflächenleitfähigkeit und Leckstrom für alle betrachteten Temperaturen vergleichsweise niedrige Werte. Mit steigender Luftfeuchtigkeit steigen beide Größen an. Die Form des Anstiegs entspricht, wie von HOFFMANN für den Leckstrom gezeigt, einer sigmoidalen Wachstumsfunktion [Hom12]. Beide Werte sind absolut gesehen stark von der Temperatur abhängig, wobei der Unterschied zwischen den Temperaturen bei hohen relativen Luftfeuchtigkeitslevel geringer wird. Prinzipiell zeigen Leitwert und Leckstrom einen vergleichbaren Verlauf.

5. Ergebnisse

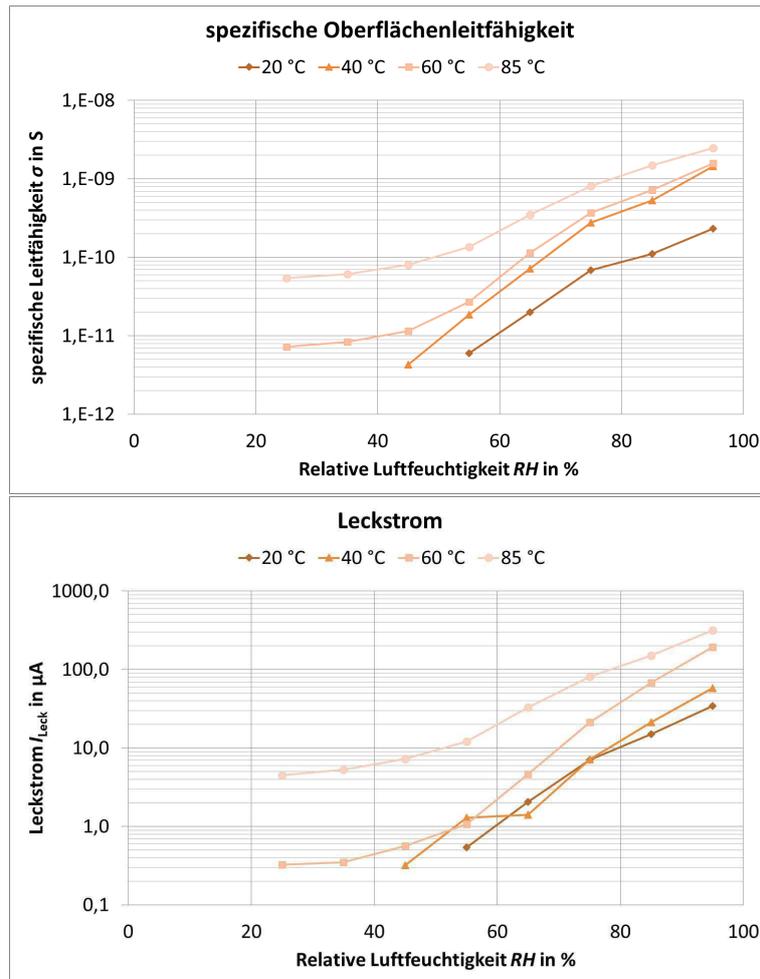


Abbildung 5.10.: Gegenüberstellung der spezifischen Oberflächenleitfähigkeit (oben) mit dem korrespondierenden mittleren Leckstrom (unten), welche durch Änderung des relativen Feuchtigkeitslevel ein nahezu identisches Verhalten erkennen lassen.

5.3. Regenerationsuntersuchungen

Die Möglichkeit der Regeneration ist charakteristisch für die PID. Es gibt unterschiedliche Methoden der Regeneration. Bei einer der Methoden wird die Regeneration durch positive Spannung erreicht [Ber10, Hac11]. Dies wird beispielsweise in PV-Kraftwerken eingesetzt, wenn eine PID festgestellt wurde und die betroffenen Module wieder von der PID befreit werden sollen. Für diese Fälle kann eine externe positive Spannung an die betroffenen Module angelegt werden. Diese Bedingungen werden u. a. durch den Pad-con Float Controller oder die PID-Box von Iumen erzeugt [Ilu16, Pad16]. Die Boxen arbeiten hauptsächlich in der Nacht. Während dieser Zeit wird positive Spannung an die Modulstrings angelegt, um somit eine tagsüber entstandene Degradation wieder auszuheilen. Das Anlegen einer positiven Spannung stellt einen Sonderfall dar, weil aktiv in das Kraftwerk eingegriffen wird daher findet diese Art der Regeneration in der vorliegenden Arbeit keine Berücksichtigung. Das Thema wurde jedoch von HINZ an anderer Stelle untersucht [Hin15].

Eine weitere Möglichkeit PID-betroffene Module auszuheilen, stellt die thermische Regeneration dar. Sie tritt in jedem Kraftwerk automatisch auf und ist fester Bestandteil einer „natürlichen“ PID-Alterung. Die thermische Regeneration tritt nach dem gängigen Modell ein, sobald die negative Spannung abklingt. Dies geschieht in einem realen Kraftwerk, sobald die Sonne untergegangen ist und damit keine Systemspannung mehr existent ist. Dadurch stellt sich im Tagesverlauf bei realen Kraftwerken ein natürlicher PID-Degradations-/Regenerationszyklus ein [Nag12a].

Erstmals wurde das thermische Regenerationsverhalten (bei einem Temperaturlevel von 100 °C) durch PINGEL [Pin10] dargelegt. Darüber hinaus konnten Untersuchungen von TAUBITZ die Temperaturabhängigkeit der Regeneration nachweisen [Tau12]. In späteren Analysen entdeckte TAUBITZ die Existenz eines Degradationslevels, ab welchem sich das Regenerationsverhalten deutlich ändert und in eine sogenannte Transitionsphase übergeht [Tau13].

Viele Untersuchungen beschreiben die PID-Degradation als vollständig reversiblen Prozess [Hat13, Pin10]. Im Gegensatz dazu haben eigene Untersuchungen gezeigt, dass in den betrachteten Fällen die Regeneration nicht vollständig ist und im Besonderen vom Ausmaß der Degradation abhängt [Koc12b]. Doch in einem Sachverhalt kommen alle Forschungsarbeiten zu demselben Ergebnis: Die thermische Regeneration läuft bei Weitem langsamer ab als die spannungs-induzierte Regeneration bei identischem Temperaturlevel [Tau13, Pin12].

Eine Grundvoraussetzung jeder Regeneration ist eine Degradation. Das heißt im Umkehrschluss jedoch auch, dass die Regeneration nicht allein von den Umgebungsbedingungen während der Regeneration abhängt, sondern stets von der vorangegangenen Degradation.

Daher ist es notwendig Proben durch identische Degradationsverfahren auf ein vordefiniertes Level zu regulieren, um identische Ausgangssituationen zu erzeugen. Da die verwendeten Minimodule zügig altern, ist für diesen Zweck der Einsatz einer *In-Situ*-Widerstandsmessung alternativlos. Vor diesem Hintergrund wurde für die Regenerationsuntersuchungen ausnahmslos die partielle Dunkelkennlinienmessung eingesetzt. Aus diesem und weiteren im aktuellen Kapitel behandelten Gründen sind die Untersuchungen der Regeneration weitaus komplexer als die der Degradation, was in einer geringeren Anzahl der Wiederholungen der Testprozeduren führt.

5.3.1. Einfluss der Degradationsart

Wie im Kapitel 5.3.1. bereits angewendet, wurden je nach Untersuchungsziel unterschiedliche Kontaktierungsformen gewählt. Dabei wurden grundsätzlich zwei Arten voneinander unterschieden: die flächige und die sich am Rand befindliche Kontaktart. Bei der Betrachtung der Regeneration wird die Frage der Kontaktierung erneut gestellt. Was geschieht mit dem Regenerationsverlauf, wenn Proben mit unterschiedlichen Kontaktierungen auf dasselbe Degradationslevel gealtert werden?

Für den folgenden Versuchslauf wurden zwei Minimodulgruppen bei 40 °C, 85 % relativer Luftfeuchtigkeit und mit einer Spannung von -1000 V belastet. Die erste Gruppe

5. Ergebnisse

wurde an einer Kante 8 mm vom Zellrand entfernt mit selbstklebendem Kupferband befestigt. Die zweite Modulgruppe wurde flächig auf der gesamten Vorderseite beklebt. Beide Gruppen wurden anschließend mittels kurzgeschlossener Anschlusskabel mit dem negativen Ausgang des Hochspannungsnetzteils verbunden, die metallischen Kontakte mit dem positiven Ausgang. Alle Proben wurden in der Vorbereitungsphase auf $30 \pm 2\%$ ihres initialen Widerstandswerts reduziert und durch Abschalten der Spannung bei identischen Klimabedingungen regeneriert.

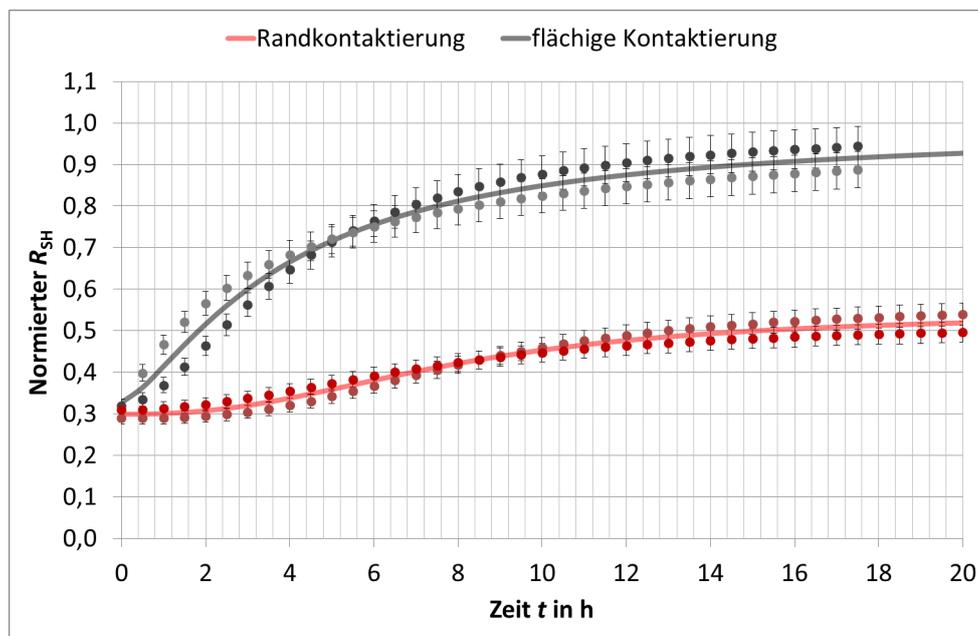


Abbildung 5.11.: Die unterschiedlichen Regenerationsverläufe bei vorangegangener Degradation Rand (rot) und flächig (schwarz)

Proben, welche mit einer flächigen Kontaktierung degradiert wurden, zeigen im Resultat eine äußerst schnelle Regeneration, welche sich auf einem Widerstandslevel von rund 99 % des Startwerts stabilisiert (vgl. Abb. 5.11.). Die Transitionsphase ist in diesem Fall minimal. Die Proben, die mittels einer Randkontaktierung gealtert wurden, zeigen im Vergleich dazu eine ausgeprägtere Transitionsphase. Darüber hinaus stabilisiert sich der Widerstandswert der Probe im Mittel auf ein deutlich niedrigeres Level von 54 %.

Für die Parameterunterschiede Vollkontaktierung zu Randkontaktierung $\Delta s_{K,2}$ und $\Delta p_{K,2}$ ergeben sich damit – im vorliegenden Fall – Werte von 4,1 bzw. 1,0. Diese Versuchsreihe zeigt somit eindeutig, dass die Art und Weise der Kontaktierung während der Degradation einen erheblichen Einfluss auf das Regenerationsverhalten besitzt. Durch die Degradationsart wird maßgeblich der Verlauf der Regeneration bestimmt. Für die Interpretation der später präsentierten Messungen unter realen Bedingungen ist diese Erkenntnis von entscheidender Bedeutung.

5.3.2. Einfluss der Zyklenanzahl

In realen Kraftwerken wechseln sich Degradations- und Regenerationszeiten kontinuierlich ab. In der Nacht sind die Module spannungsfrei und die Regeneration wirkt der

5. Ergebnisse

Degradation entgegen. Jede neue periodische Wiederholung verändert dabei die Ausgangslage der Proben. Wie sich aufeinander folgende Zyklen auf das Regenerationsverhalten auswirken, ist damit entscheidend für die Berechnung von PID-Entwicklungen. Für diesen Versuch wurde eine Probe kontinuierlich während eines stabilen Umgebungs-klimas von $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ und 85 \% RH abwechselnd mittels flächiger Kontaktierung und -1000 V Belastungsspannung zyklisch auf ungefähr $30\pm 2\text{ \%}$ des Eingangswerts degradiert und anschließend bei gleichen klimatischen Bedingungen wieder regeneriert. Der Shunt-Widerstand wurde fortwährend mittels Dunkelkennlinienmessung aufgezeichnet. Die Regeneration wurde bei denselben Umgebungsbedingungen durchgeführt. Die Regenerationsdauer pro Zyklus betrug mindestens 13 Stunden.

Die Messungen in Abbildung 5.12. zeigen, dass der Regenerationsverlauf zu Beginn der Aufzeichnung die höchste Steigung aufweist. Zusätzlich sind zwei deutliche Unterschiede zu dem im vorherigen Kapitel dargestellten Versuchsreihen zu identifizieren. Zum einen ist bei keinem der Verläufe eine eindeutige Transitionsphase zu erkennen, zum anderen sinkt die Regenerationsgeschwindigkeit mit steigender Zyklenzahl.

Abbildung 5.12. (links) zeigt deutlich, wie die Regenerationsfähigkeit mit jeder Wiederholung abnimmt (orange Kurvenabschnitte). Es stellt sich eine Art Sägezahnmuster ein, bei dem die Spitzen kontinuierlich abnehmen. Legt man nun die einzelnen Regenerationskurven, wie in Abbildung 5.12. (rechts) durchgeführt, übereinander, so ist die stagnierende Regenerationsfähigkeit der Probe noch prägnanter zu erkennen.

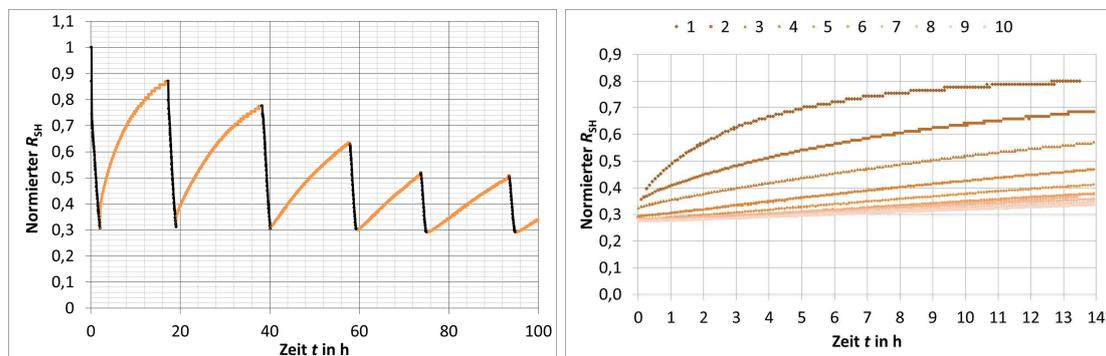


Abbildung 5.12.: Regenerationsverläufe zu Beginn mehrmaliger Degradation auf rund 30 \% des Anfangswertes (links) und zugehörige Steigung der unterschiedlichen Regenerationsverläufe in Abhängigkeit von zehn aufeinander folgenden PID-Zyklen

Durch lineare Regression der einzelnen Regenerationskurvenabschnitte mittels S-Kurve ist eine weiterführende Analyse und Quantifizierung der Verläufe möglich. Betrachtet man die Steigung in Abhängigkeit der Zyklenzahl (Abb. 5.13.), nimmt diese eine rasante Entwicklung und kann mit einem negativen Wachstum in Form einer Potenzfunktion beschrieben werden. Nach mehreren Zyklen kann man somit von einer Stabilisierung der Steigung ausgehen. Mit Hinblick auf noch folgende Versuchsreihen kann im vorliegenden Fall in guter Näherung davon ausgegangen werden, dass sich die Steigung nach fünf Zyklen nur noch unwesentlich ändert.

5. Ergebnisse

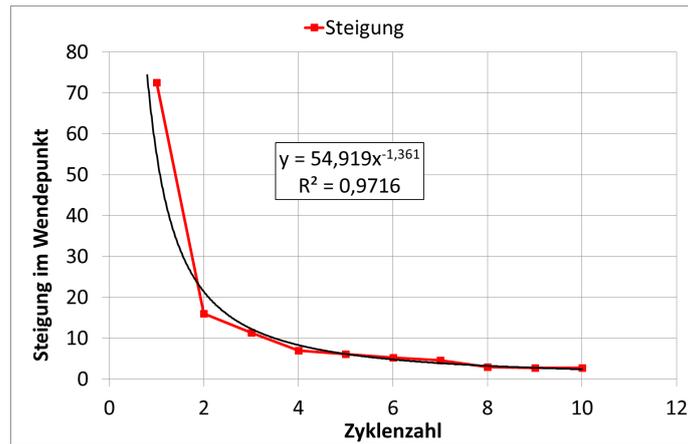


Abbildung 5.13.: Steigung der unterschiedlichen Degradationsverläufe

Die detaillierte Analyse der Parameter zeigt, dass die verzögerte Regeneration hauptsächlich durch den Parameter $s_{Z,2}$ -Wert bestimmt wird, der sich nach jedem Degradationszyklus deutlich erhöht. Parallel dazu sinkt das prognostizierte Regenerationslevel $A_{Z,2,2}$ schwach. Je häufiger die Degradation auf die Proben wirkt, desto unwahrscheinlicher scheint somit eine Regeneration auf den Anfangswert. Der Parameter $p_{Z,2}$ hingegen steigt leicht an, eine Ausprägung, die ebenso den verminderten Regenerationsverlauf charakterisiert. Die Änderungen der drei Parameter der Regeneration sind in Abbildung 5.14. aufgeführt.

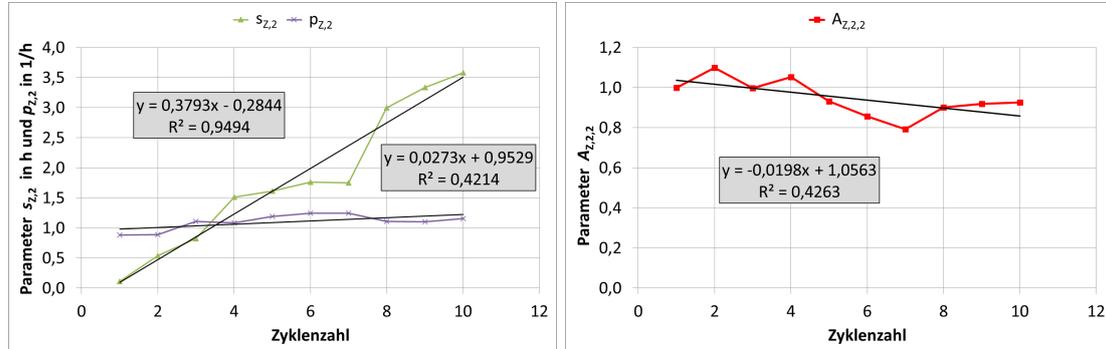


Abbildung 5.14.: Parametervergleich im Falle von mehrzyklischer Belastung für $s_{Z,2}$, $p_{Z,2}$ und $A_{Z,2,2}$

Betrachtet man abschließend das Regenerationsverhalten und vergleicht dieses mit dem der stets vorangehenden zyklischen Degradation (schwarze Kurvenabschnitte in Abb. 5.12. links), so kann bei dem Degradationverhalten keine Veränderung beobachtet werden. Durch Ausgleichsrechnung an die S-Funktion wurden leicht schwankende $s_{Z,1}$ und $p_{Z,1}$ -Werte ermittelt, jedoch ist keine klare steigende oder fallende Tendenz zu ermitteln. Anhand der Ergebnisse kann zusammengefasst werden, dass sich das Regenerationsverhalten durch mehrzyklische Belastung verändert, das Degradationsverhalten hingegen nicht. Die Ergebnisse wurden neben anderem auf der European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2015 vorgestellt [Koc15].

5.3.3. Einfluss der Temperatur

Die thermische Beschleunigung der Regeneration erscheint wie bei der Degradation am nächstliegenden. Vor diesem Hintergrund wurde der Einfluss der Temperatur an Proben untersucht. Diese Proben wurden durch eine mehrzyklische Belastung (fünf Zyklen) hinsichtlich ihres Regenerationsverhaltens stabilisiert. Für die Untersuchungen wurden die Proben vor jeder Temperaturänderung jeweils auf denselben Shunt-Widerstandswert degradiert.

Die Degradation wurde in allen Fällen bei -1000 V, 40 °C, 85 % RH und mit flächiger Kontaktierung vorgenommen. Das erzeugte Degradationslevel betrug dabei stets 35 ± 2 % des eingangs gemessenen Werts. Als Regenerationsumgebung wurde die Temperatur nacheinander mehrzyklisch auf 10, 20, 30 und 60 °C eingestellt. Die R_{SH} -Bestimmung erfolgte mittels Dunkelkennlinienmessung.

Im Zuge der Auswertung stellte sich heraus, dass sich die Regeneration bei niedrigen Temperaturen so stark verzögert, dass sie sich dem Verlauf einer Geraden annähert. Dieser Sachverhalt und die generellen Schwierigkeiten bei der temperaturabhängigen Shunt-Widerstandskorrektur (vgl. Kap. 4.8.) machten im Fall der Temperaturanalyse eine Auswertung mittels der S-Funktion nur näherungsweise möglich.

Um die Regeneration bewerten zu können, wurde zu Beginn und zum Ende jedes Regenerationszyklus' der Shunt-Widerstand bei einer Probertemperatur von 40 °C bestimmt. Anschließend wurden die Messpunkte über die Zeit aufgetragen und eine Ausgleichsgerade durch diese gelegt. Mit diesem Vorgehen wurden alle Regenerationsverläufe durch einen Anfangs- und einen Endwert klar definiert. Auf diese Weise wurde eine Möglichkeit eröffnet die Shunt-Widerstandsverläufe direkt miteinander zu vergleichen. Auf eine Temperaturkorrektur konnte somit verzichtet werden.

Um die Regenerationsgeraden der unterschiedlichen Temperaturen mittels der Parameter der S-Funktion zu quantifizieren, wurde näherungsweise angenommen, dass nur minimale Transmissions- und Stabilisierungsphasen existieren. Diese These beinhaltet, dass die Geraden gleichbedeutend mit den reinen Degradationsphasen sind und insofern mit der Steigung im Wendepunkt der S-Funktion gleichgesetzt werden können. Aus der Steigung wurde dann mit der weiteren Annahme, dass der Parameter $p_{T,2}$, so wie es in den meisten vorangegangenen Untersuchungen der Fall war, konstant bleibt, der Wert für $s_{T,2}$ berechnet.

Diese Vereinfachung bedeutet jedoch, dass neben dem Parameter $p_{T,2}$ der Parameter $A_{T,2,2}$ der S-Funktion nicht untersucht werden konnte. Unabhängig davon ergibt eine Betrachtung des Parameters $s_{T,2}$ bezüglich der Temperatur, wie sie in Abbildung 5.15. dargestellt ist, dass der $s_{T,2}$ -Wert mit steigender Temperatur stetig sinkt. Die Logarithmierung der Ordinate zeigt, dass der Verlauf in guter Näherung mit einem exponentiellen Verlauf beschrieben werden kann.

Mit dieser Darstellung wird das arrheniusartige Verhalten des Prozesses deutlich. Eine genauere Betrachtung dieses Sachverhalts wird im Kapitel 6.3. dargelegt.

5. Ergebnisse

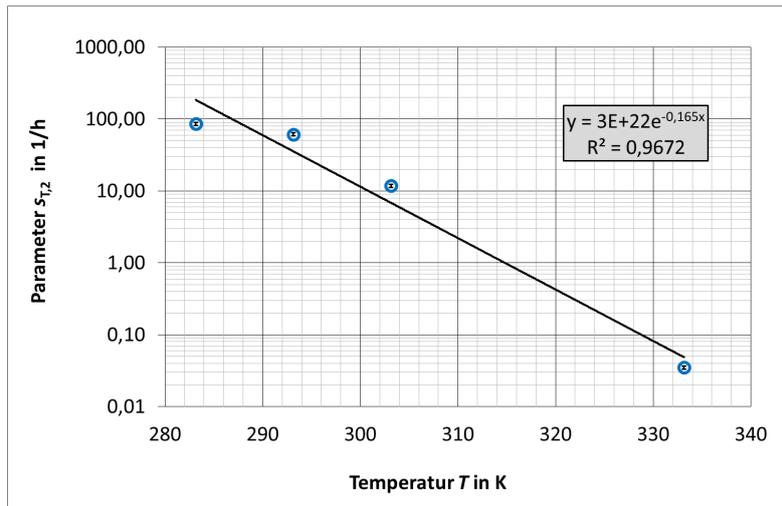


Abbildung 5.15.: Aus den Steigungen berechneter $s_{T,2}$ -Wert bei variierender Temperatur während der Regeneration

5.3.4. Einfluss der Einstrahlung

Eine Bestrahlung von Solarzellen mit Licht und eine gleichzeitige Regeneration werden von gängigen PID-Modellen ausgeschlossen. Grund hierfür ist, dass durch Einstrahlung umgehend eine Spannung in Solarmodulen erzeugt und somit die Voraussetzung für eine Degradation geschaffen wird. Eine Regeneration kann damit tagsüber vermeintlich nicht entstehen. Da jedoch, wie in Kapitel 5.2. dargelegt, der Spannungsabfall auf einem Solarmodul örtlichen Schwankungen unterliegt, zeigt diese Arbeit, dass auch tagsüber Bereiche der Zelle regenerieren können und in Summe die Degradation unterdrücken. Dieser Sachverhalt wird noch einmal ausführlich in Kapitel 4.6. erörtert.

An dieser Stelle wird jedoch evaluiert, ob die Regeneration generell durch Einstrahlung einen Einfluss erfährt. Zu diesem Zweck wurden Proben mit identischem Versuchsaufbau wie in Kapitel 5.1.4. in einem Klimaschrank mit integrierter Strahlungsquelle installiert. Der Aufbau wurde so gewählt, dass der Shunt-Widerstand, wie bereits in den vorangegangenen Versuchen, jeweils auf dasselbe Degradationsniveau eingestellt wurde. Das Degradationsniveau wurde auf $30 \pm 4\%$ des Initialwerts festgelegt. Für die Degradation wurden randkontaktierte Proben in einem Wasserbad bei 40°C und -1000 V belastet. Im Anschluss daran wurden jeweils zwei Proben mit und ohne Bestrahlung in Höhe von 312 W/m^2 , aber sonst unter identischen Bedingungen, regeneriert.

Im Gegensatz zu der Degradation, die durch Bestrahlung verlangsamt wird, zeigt sich bei der Regeneration eine signifikante Beschleunigung. Die Regenerationskurve der unbestrahlten Proben (schwarz) zeigt im Gegensatz zu den bestrahlten (rot) eine deutlich ausgeprägtere Transitionsphase. Zusätzlich ist das Stabilisierungslevel im nicht illuminierten Fall weitaus niedriger.

5. Ergebnisse

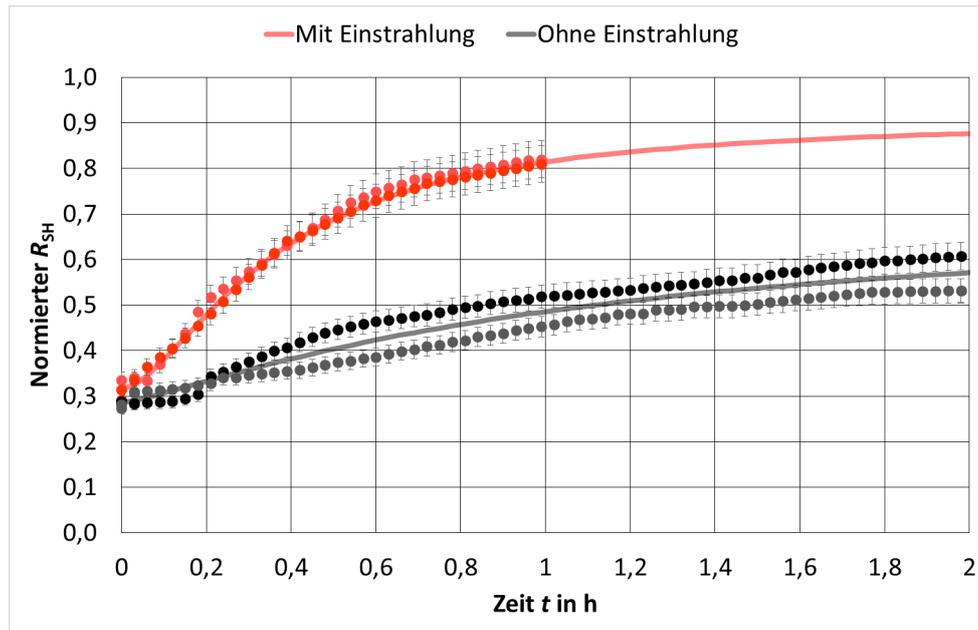


Abbildung 5.16.: Die unterschiedlichen Regenerationsverläufe während Testprozeduren mit (rot) und ohne (schwarz) Einstrahlung

Die Parameter der S-Funktion (vgl. Tab. 5.16.) zeigen das veränderte Verhalten ebenso deutlich wie die zugehörigen Verläufe. Besonders klar wird dieser Unterschied bei der Betrachtung des Parameters $A_{E,2,2}$, der um den Wert 0,20 höher liegt, sobald eine Strahlungsquelle auf die Minimodule wirkt. Die Parameter $s_{E,2}$ und $p_{E,2}$ zeigen ebenso eine ausgeprägte Änderung.

Tabelle 5.5.: Parameter der Regeneration bei Versuchsläufen mit und ohne Einstrahlung

Parameter (Mittelwert)	Versuchsreihe ohne Beleuchtung (40 °C)	Versuchsreihe mit Beleuchtung (40 °C)
$A_{E,2,1}$	0,29	0,31
$A_{E,2,2}$	0,71	0,91
$s_{E,2}$ in 1/h	1,09	0,37
$p_{E,2}$	1,22	1,62

Mit diesem Versuch konnte erstmals im Labor nachgewiesen werden, dass die Einstrahlung nicht nur einen deutlichen Einfluss auf die Degradation (vgl. Kap. 5.1.4.), sondern auch auf die Regeneration hat.

5.3.5. Zusammenfassung

In den vorangegangenen Abschnitten wurde erstmals eine differenzierte Betrachtung der Regeneration vorgenommen. Bei den Untersuchungen hat sich herausgestellt, dass das Regenerationsverhalten deutlich von der Art und Weise der Kontaktierung während der Degradation abhängt. Zusätzlich wurde gezeigt, dass neben der Temperatur auch

5. Ergebnisse

die Einstrahlung das Regenerationsverhalten merklich beeinflussen. In all diesen Fällen wird die Regeneration verstärkt und die Einflussfaktoren können als beschleunigend bezeichnet werden. Eine Verzögerung wird eindeutig durch mehrzyklische Belastung erzeugt. Je häufiger eine Probe eine tiefe Degradation erfährt, desto deutlicher nimmt die Regenerationsfähigkeit der Probe ab.

Die einzelnen Einflussfaktoren der Regeneration, im Rahmen ihrer typischen Betriebszustände, sind in Tabelle 5.6. gegenübergestellt. Im Fall der Temperatur wurde der betrachtete Bereich zwischen 0 und 25 °C festgelegt. Dies unterscheidet sich deutlich von dem Temperaturbereich von 25 bis 85 °C, der in Kapitel 5.1.5. für die Degradation angenommen wurde. Diese unterschiedliche Betrachtungsweise liegt darin begründet, dass eine rein thermische Regeneration ohne Einstrahlung ausschließlich nachts, während niedriger Umgebungstemperaturen stattfindet.

Tabelle 5.6.: Übersicht der einzelnen Einflussfaktoren der Regeneration

Einflussfaktor	Betrachtete Bereiche	$\Delta s_{2,1}$ in 1/h	$\Delta p_{2,1}$	$\Delta A_{2,2}$
Temperatur	0-25 °C	-0,9	0,0	-
Einstrahlung	ja/nein	-0,7	0,4	0,2
Kontaktierung	Rand/flächig	-4,1	-1,0	0,4
Zyklenzahl	0-100	37,6	2,7	-1,0

Der Einfluss der Einstrahlung nimmt bei der Betrachtung der Einflussfaktoren eine Sonderstellung ein, da die Einstrahlung im aktuellen PID-Verständnis die Grundlage für eine Degradation darstellt. Diese Diskrepanz kann jedoch in Verbindung mit den in Kapitel 4.6. gemachten PID-Beobachtungen unter realen Klimabedingung begründet und erklärt werden.

5.4. Untersuchung des Langzeitverhaltens der PID

Die in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellten Laboruntersuchungen ermöglichten eine isolierte Betrachtung der einzelnen Einflussparameter. Unter realen Bedingungen wirken diese jedoch gleichzeitig und ändern sich dazu innerhalb kurzer Zeiteinheiten, teilweise minütlich. Daher ist es für das PID-Verständnis unabdingbar, Degradationsprozesse unter realitätsnahen Bedingungen zu beobachten. Dazu wurde unter anderem der in Kapitel 4.5. beschriebene Messaufbau entwickelt.

Mithilfe des Aufbaus wurden Proben über einen Zeitraum von 300 Tagen (~7200 Stunden) beobachtet und der Shunt-Widerstandsverlauf regelmäßig durch Zwischenmessungen aufgezeichnet. Der gesamte Verlauf ist logarithmisch in Abbildung 5.17. dargestellt und gibt einen vollständigen Überblick über den Beobachtungszeitraum.

5. Ergebnisse

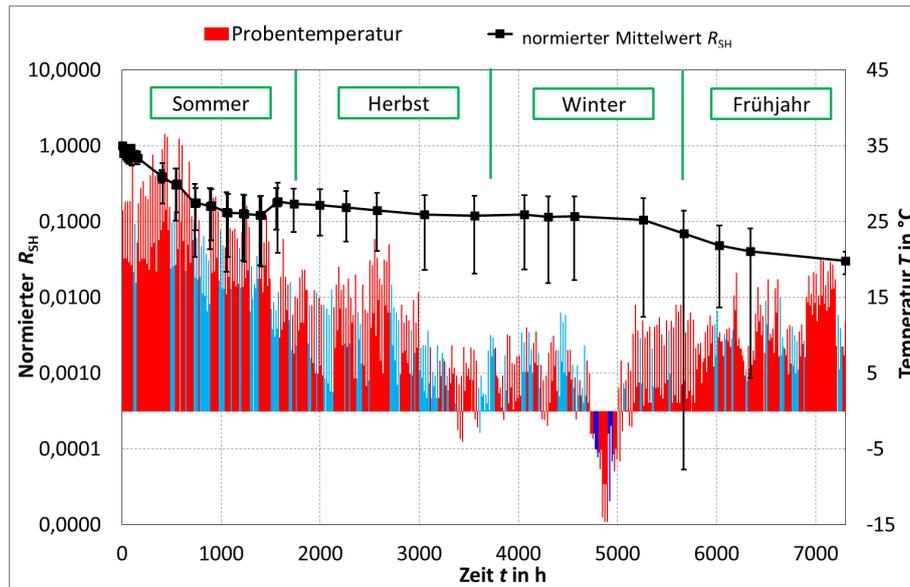


Abbildung 5.17.: Shunt-Widerstandsverlauf der Outdoor-Messergebnisse in Berlin. Die Säulen stehen für die durchschnittlichen Proben-temperaturen pro Tag bzw. Nacht (rot: kein Regen, hellblau: Regen, dunkelblau: Schnee). Die Streuung der Messpunkte um den gemittelten Shunt-Widerstand ist durch die schwarzen Balken gekennzeichnet.

Abbildung 5.17. zeigt eine deutliche Degradation des R_{SH} (schwarzer Verlauf) im Aufzeichnungszeitraum. Die vertikalen Säulen stehen für die durchschnittlichen Proben-temperaturen bei Tag und Nacht. Mit rot markierte Säulen repräsentieren Zeiträume, in denen kein Niederschlag, hellblau, an denen Niederschlag und dunkelblau, an denen Schnee aufgezeichnet wurden. Für den gesamten Beobachtungszeitraum ist ein stabiler oder kontinuierlich abfallender Shunt-Widerstand gemessen worden.

Die Ausnahme bildet eine Stufe nach rund 1500 Stunden, die durch einen technischen Defekt zustande kam. Dadurch wurden die Proben circa eine Woche nicht mit Spannung belastet und es kam zu einer Ausheilung des Widerstands. Der Einfluss des Defekts wird, aufgrund der in diesem Abschnitt durchgeführten Analysen, als gering eingeschätzt. Alle quantitativen Untersuchungen wurden im Zeitabschnitt vor dem Spannungsausfall durchgeführt.

Anhand der Outdoor-Messungen sollte im Einzelnen die im Labor gezeigten Abhängigkeiten genauer untersucht werden. Hauptsächlich wurden drei Fragestellungen bearbeitet:

1. Die Untersuchung von saisonalen Unterschieden des gesamten Alterungsprozesses. Wie unterscheidet sich die Alterung im Verlauf verschiedener Jahreszeiten?
2. Der Vergleich der maximalen Degradation während des Tagesverlaufs mit der korrespondierenden Regeneration in der Nacht. Wie stark ist die prozentuale R_{SH} -Änderung am Tag im Vergleich zu der Nacht?
3. Der Vergleich zwischen der Alterungsrate an sonnigen Tagen mit der an regnerischen Tagen. Wie groß ist der Einfluss von Niederschlag auf das PID-Verhalten?

5.4.1. Der Einfluss saisonaler Unterschiede

Eine genauere Betrachtung des Widerstandsverlaufs zu Beginn der Aufzeichnung, also im Sommer, zeigt eine deutliche und kontinuierliche Degradation bis zu dem Zeitpunkt des technischen Defekts. Die Temperaturen lagen dabei tags wie nachts meist über 15 °C. Ungefähr 75 % der Zeit waren frei von Niederschlag. Kam es jedoch zu Niederschlag, dauerte der Zeitraum, zu dem dieser auftrat, auch meist mehrere Tage an.

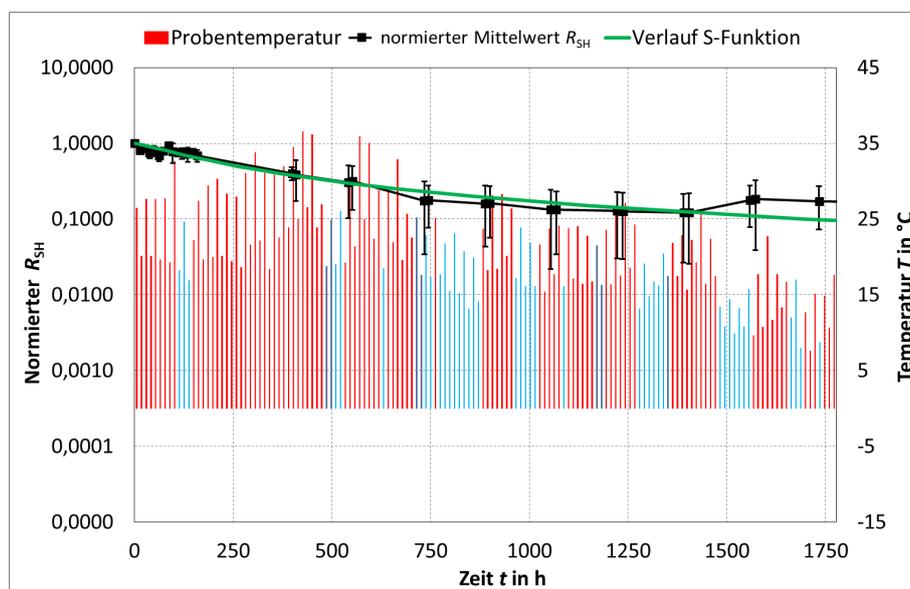


Abbildung 5.18.: Outdoor-Degradationsverlauf von R_{SH} (schwarz) während des Berliner Sommers 2013 und der durch S-Funktion angepasste Verlauf (grün). Tages- und Nachttemperaturen (Säulen); Regen (hellblau) und regenfreie Tage (rot) sind ebenfalls aufgetragen.

Betrachtet man den Shunt-Widerstandsverlauf der Degradation in den ersten 1400 Stunden vor dem Defekt, ähnelt dieser ziemlich genau dem Verlauf der vorgestellten S-Funktion, die zusätzlich als grüner mittels Ausgleichsrechnung angepasster Verlauf dargestellt ist. Die bekannten drei Parameter s_1 , p_1 und $A_{1,2}$ eines reinen Degradationsverlaufs ohne Berücksichtigung der Regeneration kann somit auch für die reale Entwicklung bestimmt werden. Dies bestätigt die Hypothese, dass der R_{SH} -Fortschritt der Degradation sehr gut mit dem Verlauf der S-Funktion beschrieben werden kann. Das hohe Bestimmtheitsmaß (R^2) war jedoch überraschend. Tabelle 5.7. zeigt die einzelnen Parameter der Analyse.

Tabelle 5.7.: Mittels Regressionsanalyse berechnete Funktionsparameter der S-Funktion

Parameter	s_1 in 1/h	p_1	$A_{1,2}$	R^2
Werte	260,8	1,2	0,0	0,95

Betrachtet man weiterführend die Entwicklung der Degradation im Herbst, Winter und Frühjahr (1777-7200 h), so lässt sich feststellen, dass die Shunt-Widerstandsverringern

5. Ergebnisse

zunächst stark verlangsamt wird, obwohl das Temperaturlevel zu Beginn noch recht hoch ist. Nach rund 2777 Stunden mit dem Absinken der Durchschnittstemperatur kommt die Degradation annähernd zum Erliegen. Die Tage und Nächte mit Niederschlägen belaufen sich in diesem Zeitraum auf rund 50 %. Pünktlich mit dem Beginn des meteorologischen Frühjahrs nach 5620 Stunden (lila Rechteck in Abb. 5.19.) schreitet die Degradation wieder deutlich fort. Der Niederschlag belief sich in diesem Zeitraum deutlich unter 50 % der analysierten Tage und Nächte.

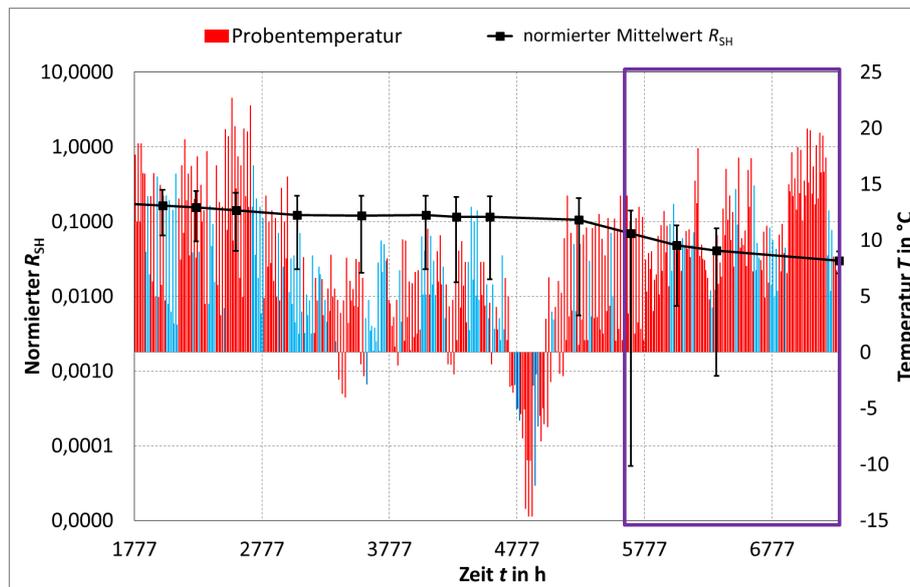


Abbildung 5.19.: Outdoor-Degradationsverlauf von R_{SH} (schwarz) während der Berliner Herbst-, Winter- und Frühjahrsmonate (lila Kasten). Tages- und Nachttemperaturen (Säulen); Regen (hellblau), Schnee (dunkelblau) und regenfreie Tage (rot) sind ebenfalls aufgetragen.

Die Ergebnisse lassen vermuten, dass Niederschläge eine untergeordnete Rolle bei der Alterung spielen, aber Probentemperatur als auch Tageslänge von entscheidender Bedeutung sind. Im Herbst und Winter scheinen diese beiden Effekte die gesamte PID-Alterung so stark abzubremsen, dass sie zum Erliegen kommt. Bestärkt wird diese Vermutung durch das erneute Einsetzen der Degradation mit Ende des meteorologischen Winters nach rund 5620 Stunden. Dies unterstreicht noch einmal deutlich den großen Einfluss der Tagesdauer auf den gesamten Alterungsverlauf. Das ist eine wichtige Erkenntnis, die später mittels Simulation noch einmal näher beleuchtet werden soll. Zunächst wird jedoch der Unterschied zwischen den Shunt-Widerstandsentwicklungen während der Nächte im Vergleich zu den Tagen im Detail untersucht.

5.4.2. Degradation und Regeneration im Tageswechsel

Zu Beginn der Aufzeichnungen wurden regelmäßig morgens und abends Zwischenmessungen durchgeführt. Abbildung 5.20. zeigt beispielhaft den Zeitraum vom 02.07.2013 bis zum 04.07.2013. Die Messergebnisse zeigen Verläufe, die als ideal bezeichnet werden können, da in dem betrachteten Zeitraum kein Niederschlag zu verzeichnen war.

5. Ergebnisse

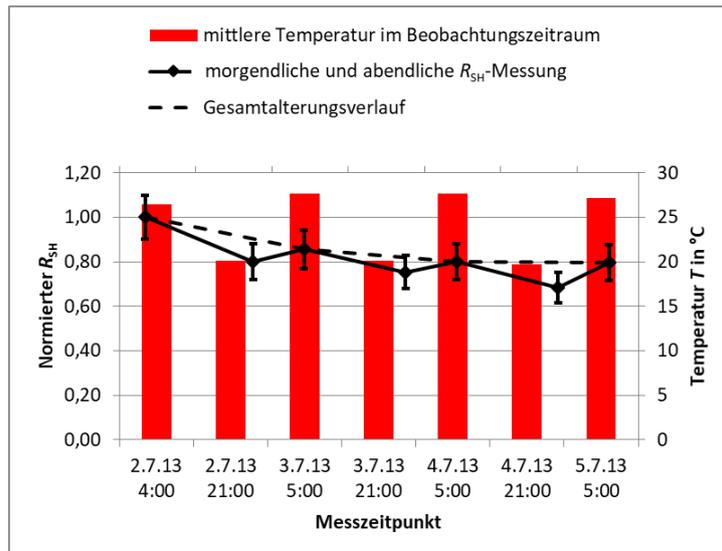


Abbildung 5.20.: Shunt-Widerstandsentwicklung innerhalb von drei Tagen Anfang Juli 2013 (schwarzer Verlauf). Zusätzlich ist die durchschnittliche Tages- und Nachttemperatur aufgetragen (rote Balken). Der gestrichelte schwarze Verlauf zeigt den Gesamalterungsverlauf der am Morgen gemessenen Shunt-Widerstände.

Bei genauer Betrachtung der Messwerte wird eine Zickzackform des R_{SH} deutlich. Abends wird stets ein niedrigerer Widerstand gemessen als am Morgen davor. Dieses Verhalten spiegelt gut den Wechsel von täglicher Degradation und nächtlicher Regeneration wider. Eine weitere Erkenntnis die anhand des Verhaltens festgemacht werden kann, beruht darauf, dass trotz der nächtlichen Regeneration die Degradation in Summe überwiegt und die Verringerung des Shunt-Widerstands mit der Zeit weiter fortschreitet (vgl. Abb. 5.20., schwarz-gestrichelte Linie). Anhand der Messwerte lässt sich darüber hinaus quantitativ bestimmen, wie stark sich die Degradation und die Regeneration entwickeln. Nach der ersten Belastungsdauer wurde eine durchschnittliche Degradation von circa -10 % pro Tag ermittelt. Im Gegensatz dazu lag die nächtliche Regeneration bei nur durchschnittlich 9 %. Diese Beobachtungen verdeutlichen, dass die Degradation innerhalb eines Tages in Abhängigkeit von der Temperatur relativ hoch sein kann. Die in der Nacht auftretende Regeneration wirkt jedoch kontinuierlich dagegen, kann allerdings den Degradationseffekt in Gänze nicht kompensieren. Eine komplette Regeneration der Proben war in keiner Nacht zu beobachten.

5.4.3. Einfluss von Regentagen

LECHNER zeigte in seinen Arbeiten deutlich, dass an Tagen mit Niederschlag eine starke Degradation zu verzeichnen ist [Lec14]. Zur Bestätigung dieses Ergebnisses wurden die vorliegenden Daten hinsichtlich der Widerstandsänderungen an regnerischen Tagen – in Gegenüberstellung zu den im vorherigen Abschnitt präsentierten Daten – analysiert. Abbildung 5.21. zeigt erneut beispielhaft den Degradationsverlauf der ersten Versuchsgruppe mit einer erhöhten Auflösung in der Zeit vom 09.07.2013 bis 11.07.2013. Die Balken stehen wie bei den vorherigen Graphiken für die durchschnittliche Proben-tempe-

5. Ergebnisse

ratur der Tage und Nächte. Mit blau sind die Zeitabschnitte gekennzeichnet, an denen Niederschlag detektiert wurde.

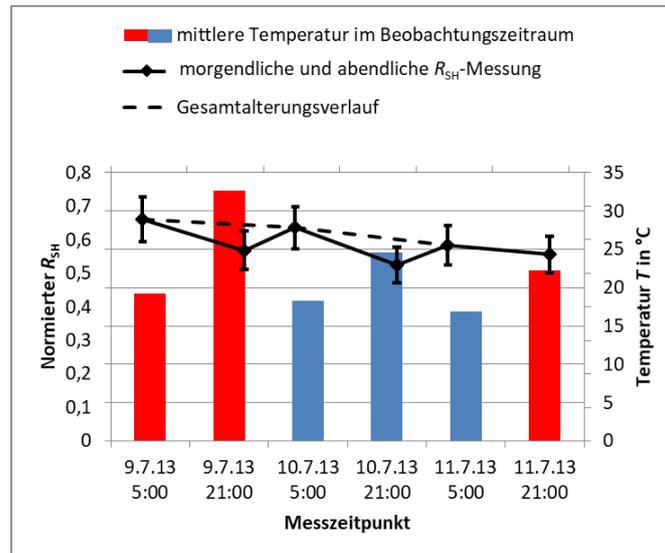


Abbildung 5.21.: Shunt-Widerstandsentwicklung (schwarzer Verlauf) innerhalb von drei Tagen in Berlin Anfang Juli 2013, in denen Niederschlag aufgezeichnet wurde. Die durchschnittlichen Tages- und Nachttemperaturen, sind anhand der Höhe der Balken abzulesen. Die Farbe der Balken zeigt, ob im Betrachtungszeitraum Niederschlag (blau) oder kein Niederschlag (rot) beobachtet wurde. Der gestrichelte schwarze Verlauf zeigt den Gesamalterungsverlauf der morgendlich gemessenen Shunt-Widerstände.

Auf den ersten Blick scheint es keinen Unterschied zu dem vorherigen Verlauf zu geben. Es stellt sich ebenso ein Zickzackmuster ein, in dem die Degradation die Regeneration dominiert. Betrachtet man jedoch die Widerstandswerte quantitativ, zeigt sich, dass die Shunt-Widerstandsdifferenz an dem regnerischen Tag -11 % betrug, während diese an den sonnigen Tagen -9 % bzw. -2 % betrug. Der Wert des einen beobachteten Regentages ist somit leicht erhöht und weist auf eine schwache Beschleunigung der Degradation durch den Niederschlag hin. So deutlich wie die Beschleunigung von LECHNER präsentiert wurde, ist sie jedoch nicht.

Analysiert man dahingehend den gesamten Jahresverlauf in Abbildung 5.17. erneut hinsichtlich des Niederschlagseinflusses, zeigt sich dort kein eindeutiger Einfluss der Regenzeiten. In den Zeiträumen gehäufte blauer Balken wurde kein deutliches Absinken des Shunt-Widerstands verzeichnet.

5.4.4. Elektrolumineszenzanalyse

Nach Beendigung der Freifeldmessungen nach 7200 Stunden wurden die EL-Aufnahmen der Proben mit denjenigen, die vor Beginn der Messungen gemacht wurden, verglichen und zusätzlich die Helligkeitsverteilungen ausgewertet. Abbildung 5.22. zeigt die EL-Aufnahmen zu Beginn (links) und zum Ende (rechts) der Messungen. Alle Proben waren während der 7200 Stunden, wie in der Graphik markiert, am linken Minimodulrand mittels Kupferband und Kabel mit dem Erdleiter verbunden. Bei genauer Betrachtung

5. Ergebnisse

der EL-Aufnahmen zeigen zwei von drei Zellen ein deutliches Muster (Zelle b) und c)), welches eine PID-Entwicklung ausgehend vom Rand repräsentiert. In beiden Fällen entwickelt sich der zu Beginn klar abgegrenzte linke Zellrand zu einer unregelmäßig verlaufenden Grenze (oranger Kasten). Dabei stehen die neu entstandenen dunklen Segmente für kurzgeschlossene Zellbereiche, die durch die Belastung mittels Spannung entstehen. Die Probe a), ohne erkennbares Muster, war zum Zeitpunkt der Aufnahme noch nicht so weit gealtert, als dass die Kurzschlüsse bei den Standardmesseinstellungen von 10 Ampere und 10 Sekunden zu detektieren waren. Dies bedeutet jedoch auch, was an dieser Stelle entscheidend ist, dass diese Probe ebenfalls wie die anderen Proben keine Anzeichen einer flächigen PID-Belastung aufweist.

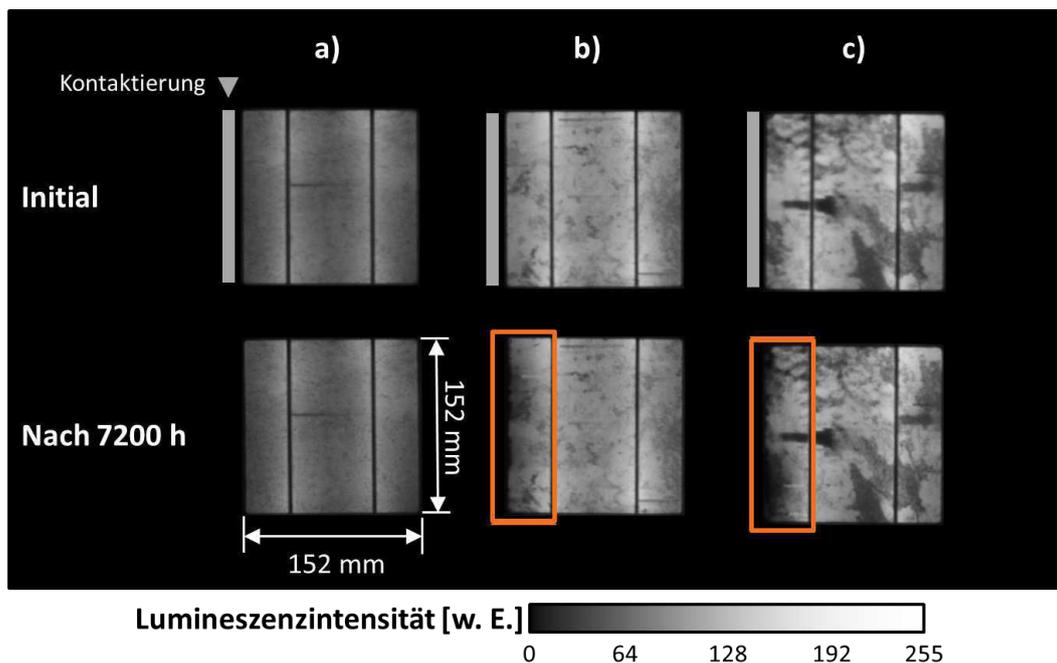


Abbildung 5.22.: Vergleich der EL-Aufnahmen vor und nach der Freifeldbelastung 2013 in Berlin. Die drei Proben a), b) und c) zeigen zu Beginn der Messung an allen Rändern klare Kanten (links). Nach 7200 Stunden Belastung zeigen zwei von drei Proben eindeutig kurzgeschlossene Bereiche in unmittelbarer Nähe der Kontaktierung (oranger Kasten).

Anhand der Betrachtung der EL-Aufnahmen kann davon ausgegangen werden, dass die Belastung im Randbereich der Zellen am höchsten war.

5.4.5. Zusammenfassung

Die Ergebnisse des Versuchs unter realen Bedingungen zeigen deutlich, dass es möglich war, eine Degradation über 300 Tage mit direktem Bezug zum Shunt-Widerstand zu beobachten. Betrachtet man den Gesamtverlauf der Alterungskurve, so weist dieser zumindest partiell ein S-Funktionsverhalten auf. Des Weiteren wird deutlich, dass die Alterung jahreszeitliche Unterschiede aufweist. Im Sommer erfahren die Proben eine beschleunigte Alterung, welche sich im Herbst und im Frühjahr verlangsamt und

augenscheinlich im Winter zum Erliegen kommt.

Betrachtet man dazu den Verlauf im Detail, kann man klare Unterschiede zwischen morgendlichem und abendlichem Shunt-Widerstandswert erkennen. Ob Degradationszyklen, -temperatur oder gar Strahlung dabei eine Rolle spielen, konnte nicht untersucht werden. Die Erfahrungen dieser Messreihe haben wohl doch gezeigt, dass eine genaue Analyse der PID mit einer Messintervallzeit von mehreren Stunden bzw. Tagen nur begrenzt möglich ist. Die Problematik der geringen Auflösung zeigt sich am deutlichsten bei der Analyse des Einflusses der Regentage und der Fragestellung, ob durch sie eine signifikante Beschleunigung der PID entsteht. Die Analyse der Shunt-Widerstandswerte an regnerischen Tagen ergab eine erhöhte Degradationsgeschwindigkeit. Dieser Sachverhalt spiegelt sich jedoch nicht im Gesamt-Shunt-Widerstandsverlauf wider. Dort scheinen Perioden mit Niederschlag keinen deutlichen Einfluss auf die Alterung zu besitzen.

Damit ist eine wichtige Erkenntnis der Untersuchung, dass die Degradation in der Summe hauptsächlich am Rand auftritt. Warum die Beschleunigung in Zeiten von Niederschlägen kurzzeitig zu beobachten ist, aber sich diese auf lange Sicht nicht durchsetzt, konnte nicht abschließend geklärt werden. Um ein besseres Verständnis dieses Sachverhalts zu generieren, wurde für einen zweiten Freifeldversuch die zeitliche Messauflösung, durch den Einsatz der Dunkelkennlinienmessung, deutlich erhöht. Mit der Erhöhung konnte, wie im nächsten Kapitel dargelegt wird, das Verhalten des Shunt-Widerstands anhand einer stündlichen Auflösung untersucht werden.

5.5. Untersuchung des Kurzzeitverhaltens der PID

Der Schwerpunkt des folgenden Kapitels liegt auf der Analyse von Degradations- und Regenerationsphasen, die innerhalb kürzester Zeit, also eines Tages (24 Stunden), auftreten. Hierzu werden im Detail Tagesverläufe bei unterschiedlichen Wetterlagen beispielhaft präsentiert und analysiert. Es werden Freifeldmessergebnisse gezeigt, welche in Berlin und in Nikosia (Zypern) erhoben wurden. Die Shunt-Widerstände wurden im Unterschied zur vorangegangenen Messreihe mittels Dunkelkennlinie bestimmt. Die Messungen in Berlin wurden unter Verwendung der ULFI (vgl. Kap. 4.1.3.) durchgeführt. Die Messungen in Nikosia wurde zwar mit derselben Dunkelkennlinienmesstechnik aufgenommen, jedoch wurde die notwendige Verschattung der Proben manuell durchgeführt. Wie im Kapitel 3.2. bereits erläutert, wird der Shunt-Widerstand durchweg auf 25 °C korrigiert. Um den Verlauf der Degradation und Regeneration zu verdeutlichen, wird jeweils die Abweichung zum Initialwert berechnet.

Die verwendete Dunkelkennlinienmessung könnte, technisch gesehen, einen 1-minütig aufgelösten Tagesverlauf aufnehmen. Da jedoch jede Messung eine Unterbrechung der Belastung und damit eine Verfälschung darstellt, wurde das Messintervall auf eine Stunde festgelegt. Dies entspricht ebenfalls der Auflösung der später vorgestellten Simulation.

5.5.1. Messkampagne Berlin

Für die ersten Untersuchungen der Tagesverläufe wurde das Dachlabor des PI Berlin genutzt. Vor dem Hintergrund, dass die Degradation bei hohen Temperaturen beschleunigt abläuft und damit die zu messenden Widerstandsänderungen ausgeprägt ausfallen, wurden die Sommermonate für die Untersuchung ausgewählt.

Es wurden zwei Proben und eine zusätzliche Referenzprobe betrachtet. Die Minimodule wurden am Rand kontaktiert und im 30°-Winkel installiert. Die Belastungsspannung in Höhe von -1000 V wurde anhand eines Helligkeitssensors zu- und abgeschaltet. Im stündlichen Rhythmus wurde der Shunt-Widerstand automatisch mittels Dunkelkennlinie bestimmt. Parallel dazu wurde die Oberflächenleitfähigkeit aufgenommen.

Aus der Vielzahl der aufgenommenen Tagesverläufe konnten neben vielen Ausnahmen zwei charakteristische Tagesverläufe identifiziert werden. In Abbildung 5.23. ist exemplarisch der 27.06.2013 als ein repräsentativer trockener Tag im Detail abgebildet.

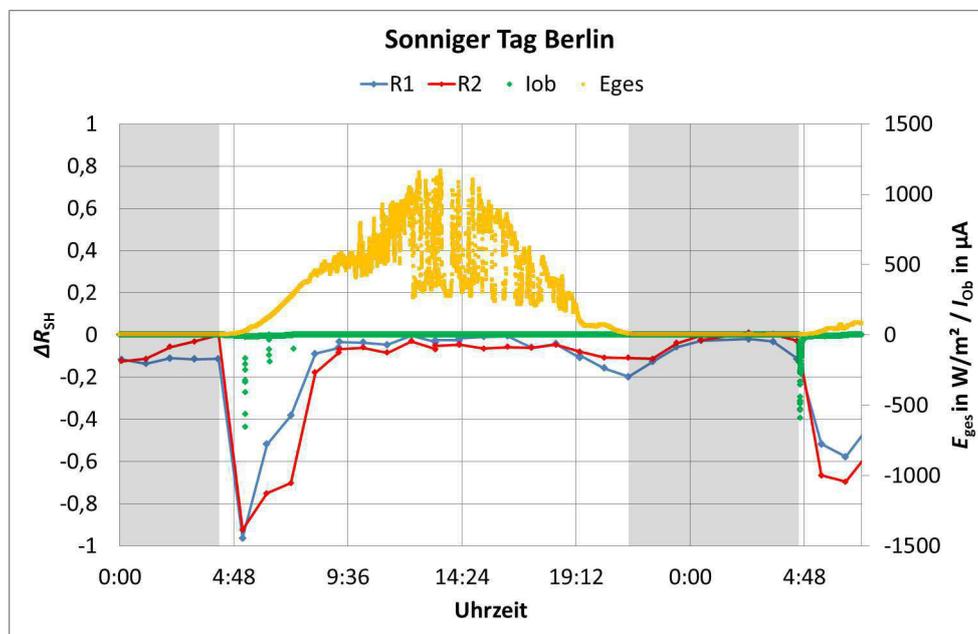


Abbildung 5.23.: ΔR_{SH} -Verlauf zweier Proben R1 und R2 an einem sonnigen Sommertag in Berlin. Die Einstrahlung E_{ges} (gelb) und der Oberflächenstrom I_{Ob} (grün) kennzeichnen die Degradationszeiten.

Ein typischer Sommertag in Berlin kann durch zwei charakteristische Degradationszeiten beschrieben werden. Es gibt eine deutliche Degradation in den Morgenstunden und eine zusätzliche, weitaus geringere Degradation in den Abendstunden. Am Morgen, nach Sonnenaufgang (Übergang vom grauen zum weißen Hintergrund) ist der Sachverhalt eindeutig. Der Oberflächenstrom I_{Ob} steigt aufgrund der morgendlichen Betauung, was durch den negativen Anstieg der grünen Punkte deutlich wird. Dies bedeutet, dass eine flächige Kontaktierung vorliegt und die Proben durch ein nahezu homogenes elektrisches Feld belastet werden. Die Folge ist eine deutliche Reduktion des Shunt-Widerstands (blauer und roter Verlauf). Zusätzlich dazu gibt es eine schwache ΔR_{SH} -Reduktion in

5. Ergebnisse

den Abendstunden, wenn die Einstrahlung (gelben Punkte) sukzessive abnimmt. Dieser Sachverhalt ist etwas schwieriger zu deuten, da der Oberflächensensor in diesem Zeitraum keinen Ausschlag zeigt. Schaut man sich jedoch die gemessenen Klimadaten im Detail an, so ist durch die Abkühlung der Umgebungsluft ein besonders deutlicher Anstieg der Luftfeuchtigkeit zu beobachten. Dieser Anstieg zeigt sich ebenfalls in einer erhöhten Oberflächenleitfähigkeit, welche jedoch unter der Auflösung des Leitfähigkeitsensors liegt. Ein Vergleich verschiedener sonniger Tage führt zu dem Ergebnis, dass die Degradation des Shunt-Widerstands immer wieder am Abend auftritt, in der Regel jedoch geringer ausfällt als am Morgen.

Eine Beobachtung durch LECHNER zeigt, dass die morgendliche Degradation laut der Messergebnisse noch am selben Tag wieder regenerieren kann, obwohl die Proben während des Tagbogens kontinuierlich einer Spannung von -1000 V ausgesetzt waren [Lec14]. Derselbe Effekt konnte mit weit höherer Auflösung in dem vorliegenden Beispiel bestätigt werden. Der Shunt-Widerstand der Proben erholt sich nach der morgendlichen Degradation im Tagesverlauf nahezu in Gänze. Diese starke Regeneration ist nicht allein am Morgen zu beobachten. Der zweite typische Tagesverlauf, welcher mehrere Regenereignisse während des Tagbogens beinhaltet, verdeutlicht dieses Verhalten.

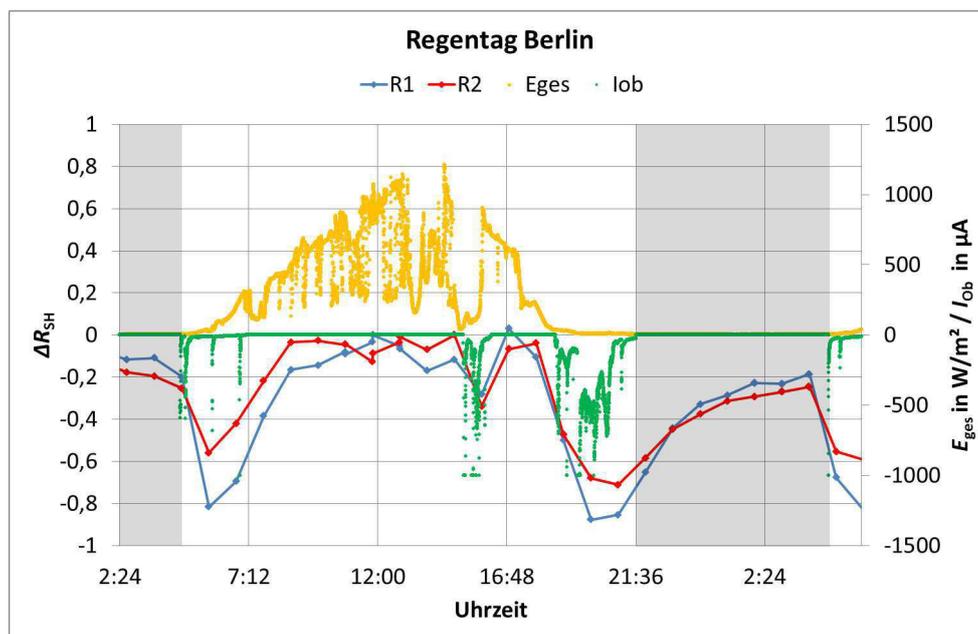


Abbildung 5.24.: ΔR_{SH} -Verlauf zweier Proben R1 und R2 an einem regnerischen Sommertag in Berlin. Die Einstrahlung (gelb) und der Oberflächenstrom (grün) kennzeichnen die Degradation.

Der Oberflächensensor in Abbildung 5.24., zeigt im Verlauf des Tages (weißer Hintergrund) mehrere Ausschläge (grüne Punkte). Wenn während dieser Ausschläge gleichzeitig die Einstrahlung (gelbe Punkte) deutlich abfällt, ist dies ein eindeutiges Indiz für einen Regenschauer. In allen anderen Zeiträumen ist es ein Zeichen für eine Betauung. Während beider Zeiträume sind die Proben flächig mit Tau oder Regenwasser bedeckt. Anhand der R_{SH} -Messung (roter und blauer Verlauf) ist klar ersichtlich, dass die De-

gradation gerade in diesen Momenten beschleunigt voranschreitet. Auffällig ist ebenfalls, dass die Degradation recht zügig wieder durch die Regeneration am Tag und in der Nacht kompensiert wird. Des Weiteren ist zu beobachten, dass die Regeneration während der Nachtstunden (grauer Hintergrund) weit aus langsamer voranschreitet als am Tag.

5.5.2. Messkampagne Nikosia

Um die in Berlin ermittelten Erkenntnisse zu validieren und um die PID in einer weiteren Klimaregion zu beobachten, wurde eine Versuchskampagne in Nikosia (Zypern) durchgeführt. Als Zeitraum der Messung wurde Ende August bis Mitte September 2014 gewählt. Zu dieser Zeit sind am Tag Temperaturen bis zu 40 °C bei gleichzeitig hohen Nachttemperaturen von über 25 °C möglich. Niederschläge sind in dieser Zeit extrem selten. Diese klimatischen Gegebenheiten inklusive einer hohen Luftfeuchtigkeit sollten ebenso wie in Berlin zu deutlichen Degradations- und Ausheilverläufen führen. Im Folgenden werden die Messungen erneut beispielhaft für jeweils charakteristische Tagesverläufe aufgeführt und im Einzelnen diskutiert.

Für die Untersuchungen auf Zypern konnten aufgrund des erhöhten Messaufwands nur eine Probe und eine zusätzlichen Referenz untersucht werden. Die Probe wurde wie bereits in Berlin an einer Seite mittels Kupferband kontaktiert und in einem Winkel von 30° in einer vorhandenen Aufständerung mittels Standardklemmen montiert. Die Spannung betrug -1000 V und wurde durch eine Helligkeitssensorschaltung gesteuert. Der Shunt-Widerstand wurde stündlich manuell für jede Probe bestimmt.

Für die Analyse wurden ebenso wie in Berlin zwei Beispieltage herausgesucht, einen nahezu idealtypischen Sonnentag ohne Bewölkung und einen der seltenen Regentage. Da das Messequipment im Vergleich zum Messaufbau in Berlin etwas reduzierter war (vgl. Kap. 4.6.), sind in den beiden Abbildungen 5.25. und 5.26. lediglich die Einstrahlung (gelber Verlauf), die Shunt-Widerstandsänderung (blauer Verlauf) einer Probe und einer Referenz (schwarzer Verlauf), welche ohne Spannungsbelastung gemessen wurde, abgebildet.

In Abbildung 5.25. ist ein annähernd idealtypischer Sonnentag abgebildet. Ein Kennzeichen hierfür ist der sinusförmige Verlauf der Einstrahlung E_{ges} über den gesamten Tag, nur unterbrochen von einer leichten Einbuchtung am Vormittag. Eine Gegenüberstellung mit den Ergebnissen aus Kapitel 5.5.1. zeigt einen vergleichbaren Degradationsverlauf. In den Morgenstunden ist ein ausgeprägter Shunt-Widerstandsabfall zu beobachten, die unmittelbar am Tage wieder ausheilt. Zusätzlich zur Degradation am Morgen kommt eine Degradationsphase vor Einbruch der Dunkelheit, welche durch die Ausheilung in der Nacht kompensiert wird. Vergleicht man die beiden Regenerationszeiten miteinander, bestätigen sich die Ergebnisse aus Berlin. Die Tagesregeneration verläuft deutlich schneller als die Nachtregeneration.

5. Ergebnisse

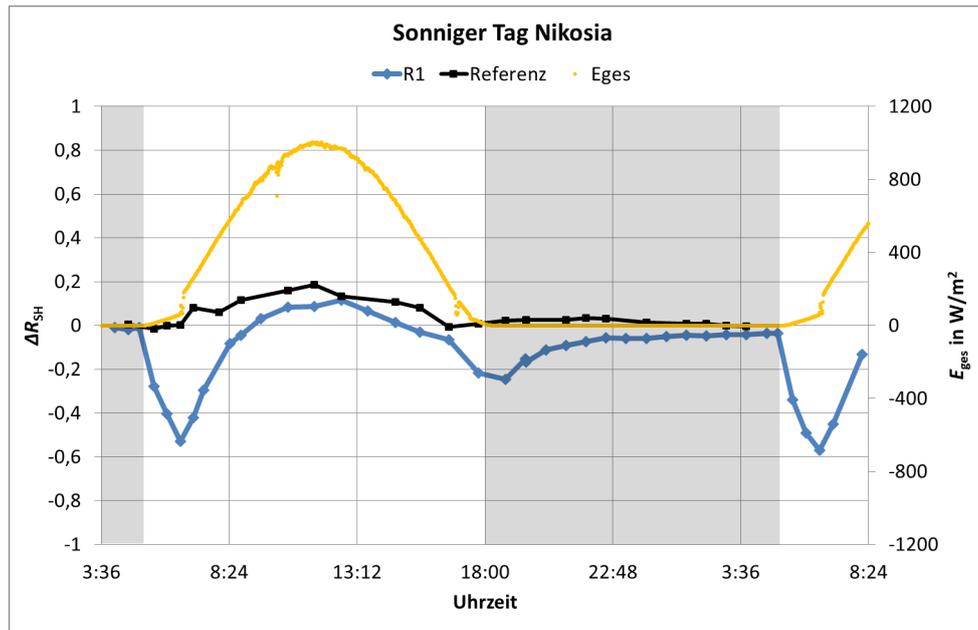


Abbildung 5.25.: ΔR_{SH} -Verlauf einer Probe (blau) im Vergleich zu einer Referenzprobe (schwarz) an einem sonnigen Tag, charakterisiert durch die durchgehend hohe Einstrahlung (gelb). Die grauen Bereiche markieren die Zeiten ohne Spannungsbelastung.

Auffällig ist ebenfalls, dass ΔR_{SH} im Verlauf des Tages (blaue Linie) über Null hinaus anwächst. Dies ist auf die Ungenauigkeiten der Temperaturmessung zurückzuführen. Für die Temperaturkorrektur wurde der Messzeitpunkt des Shunt-Widerstands, welcher während der Abdeckung der Probe durchgeführt wurde, mit dem Zeitpunkt der rückseitigen Proben temperaturmessung abgeglichen. Da unmittelbar nach dem Verschatten die in der Probe eingebettete Zelle schneller abkühlt als die Probenrückseite, wurden die tatsächlichen Proben temperaturen bei hoher Einstrahlung überschätzt. Dies spiegelt sich in einem positiven ΔR_{SH} -Wert wider. Dieser Sachverhalt wird durch einen Vergleich mit der Referenzmessung bestätigt, da diese ein identisches Verhalten aufzeigt.

Auch der Alterungsverlauf an einem Regentag in Zypern, in Abbildung 5.26. dargestellt, ist mit einem entsprechenden Tag in Berlin vergleichbar. Zusätzlich zur morgendlichen, ist während des Niederschlags, zwischen 12:00 und 14:00 Uhr eine weitere Degradation zu beobachten. Die Niederschlagszeit ist durch den massiven Einfall der Einstrahlung (gelbe Linie) gekennzeichnet. Kurz vor dem Sonnenuntergang ist ebenfalls ein leichtes Abfallen des Shunt-Widerstands aufgezeichnet worden. Die Degradation wird durch die folgende Regeneration immer wieder neutralisiert (blaue Linie). Der Verlauf der Referenz zeigt keine Auffälligkeiten.

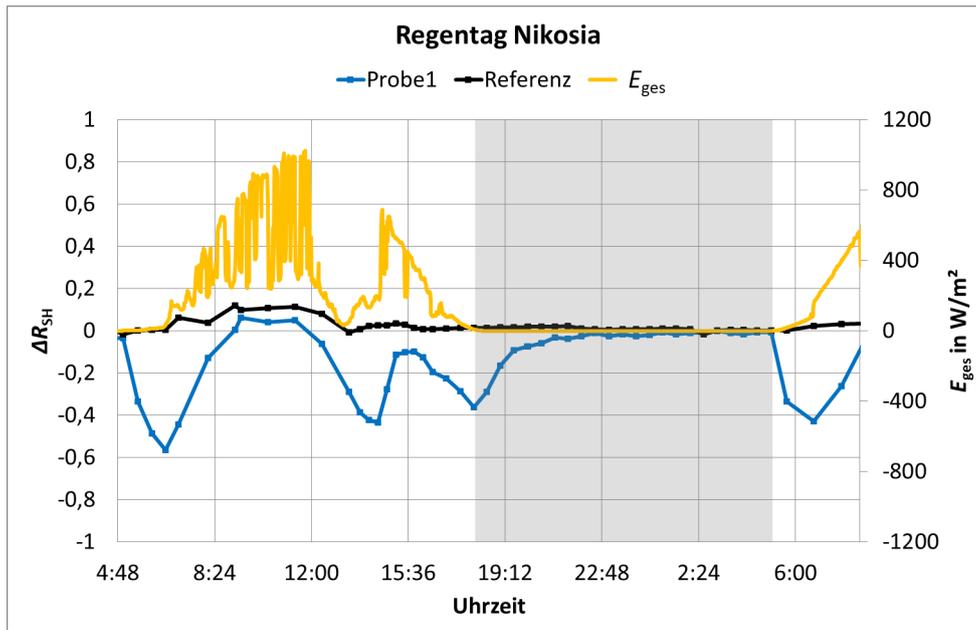


Abbildung 5.26.: ΔR_{SH} -Verlauf einer Probe (blau) im Vergleich zu einer Referenzprobe (schwarz) an einem regnerischen Tag, charakterisiert durch den unsteuigen Einstrahlungsverlauf (gelb). Die grauen Bereiche markieren die Zeiten ohne Spannungsbelastung.

5.5.3. Zusammenfassung

Mithilfe der erhöhten Auflösung der Shunt-Widerstandsmessung durch die partielle Dunkelkennlinienmessung konnte zum ersten Mal der PID-Einfluss im Verlauf eines Tages aufgezeichnet werden. Es konnte gezeigt werden, dass die PID, unabhängig von der Klimaregion, an regenfreien Tagen einem typischen Ablauf folgt. Ein charakteristischer Verlauf ist dadurch gekennzeichnet, dass der Shunt-Widerstand der Proben am Morgen deutlich sinkt und am Abend ein analoges Verhalten nur in abgeschwächter Form zu beobachten ist. Darüber hinaus erholt sich der Widerstand tagsüber, wenn die Probenoberfläche abgetrocknet ist und zudem in der Nacht, wenn die Spannung ausgeschaltet ist. Dass tagsüber eine Regeneration stattfindet, konnte ebenso erstmalig mit dem hier gezeigten Messaufbau nachgewiesen werden.

Zusätzlich konnte die kurzzeitige Beschleunigung der Degradation durch Regenschauer nachgewiesen werden sowie ihre vollständige Neutralisierung durch die ebenfalls beschleunigte Regeneration noch während der Tageszeit. Vergleicht man beide Regenerationsverläufe tags und nachts, scheint diejenige am Tag deutlich stärker zu wirken als diejenige in der Nacht. Die Ergebnisse wurden im Zuge einer Konferenz dem öffentlichen Fachpublikum zugänglich gemacht [Koc14b].

5.6. Untersuchungen auf der Basis von 60-Zellen-Modulen

Die bisher gezeigten Untersuchungen wurden auf der Basis von Ein-Zellen-Minimodulen erbracht. Kommerziell werden jedoch fast ausschließlich Modulgrößen mit 60 integrierten Zellen verwendet. Die folgenden Abschnitte sollen die Besonderheiten aufgrund der geometrischen Unterschiede ermitteln und das reale PID-Verhalten der Zellen innerhalb eines Solarmoduls analysieren.

5.6.1. Allgemeine Häufigkeitsverteilung PID-betroffener Zellen innerhalb von Modulen auf Basis von Elektrolumineszenzaufnahmen

Im Gegensatz zu den bisher in dieser Arbeit gezeigten Ein-Zellen-Minimodulen besitzen die in diesem Abschnitt analysierten Module eine abweichende Materialkomposition. Dabei sind alle im Folgenden betrachteten Module von einem einzigen Hersteller und eine Vergleichbarkeit ist damit zumindest untereinander gegeben. Allerdings können die Ergebnisse im Anschluss nur prinzipiell auf den bisher betrachteten Probenaufbau bezogen werden.

Die nun präsentierten Untersuchungen enthalten die in Kapitel 4.7.4. vorgestellte Analyse über die Häufigkeitsverteilung von PID-betroffenen Zellen innerhalb von Modulen verschiedener Kraftwerke. In Tabelle 5.8. sind exemplarisch Häufigkeitsverteilungen von fünf Kraftwerken für eine erste generelle Betrachtung dargestellt. Um die Häufigkeitsunterschiede hervorzuheben, wurden diese nach ihrer Größe eingefärbt. Rot bedeutet eine hohe und rosa eine geringe Häufigkeit. Die analysierten Module sind in unterschiedlichen PV-Kraftwerken in verschiedenen Regionen europaweit installiert. Anhand der Analyse können charakteristische Verteilungsmuster erkannt und erklärt werden. Die Kraftwerke wurden anonymisiert dargestellt und mit Standort 1, 2, 3 usw. bezeichnet, da die EL-Aufnahmen im Zuge kommerzieller Aufträge des PI Berlins entstanden.

Betrachtet man die in Tabelle 5.8. aufgeführten Häufigkeitsverteilungen, ist grundsätzlich ein deutlicher Unterschied zwischen den einzelnen Kraftwerken festzustellen. Ein repräsentatives, für nahezu alle Kraftwerke geltendes Muster kann dennoch identifiziert werden. Unabhängig von der Orientierung sind hauptsächlich die Randzellen von PID betroffen. Eine weiterführende detailliertere Betrachtung der Randzellen führt zu dem Ergebnis, dass vor allem die unteren Zellreihen, ebenfalls unabhängig von der Modulorientierung, gehäuft zur Degradation neigen. Dieses Muster scheint für alle Kraftwerke zu gelten, einzig Standort 3 passt nicht in diese Charakterisierung und wird daher im nächsten Abschnitt genauer analysiert.

5. Ergebnisse

Tabelle 5.8.: Häufigkeitsverteilung der PID-betroffenen Zellen in realen Kraftwerken

Kraftwerk	Häufigkeitsverteilung der von PID-betroffenen Zellen in %	Anzahl der untersuchten Module																																																																								
Standort 1	<table border="1" style="margin: auto; border-collapse: collapse;"> <tr><td>8</td><td>2</td><td>2</td><td>0</td><td>2</td><td>3</td><td>2</td><td>2</td><td>4</td><td>6</td></tr> <tr><td>2</td><td>0</td><td>2</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>4</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>0</td><td>0</td><td>4</td><td>0</td><td>2</td><td>6</td></tr> <tr><td>2</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>4</td><td>2</td><td>4</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>0</td><td>2</td><td>4</td></tr> <tr><td>10</td><td>18</td><td>12</td><td>12</td><td>8</td><td>6</td><td>10</td><td>8</td><td>8</td><td>16</td></tr> </table>	8	2	2	0	2	3	2	2	4	6	2	0	2	0	0	0	0	0	0	4	2	2	2	2	0	0	4	0	2	6	2	0	0	0	0	0	0	4	2	4	2	2	2	2	2	2	2	0	2	4	10	18	12	12	8	6	10	8	8	16	51												
8	2	2	0	2	3	2	2	4	6																																																																	
2	0	2	0	0	0	0	0	0	4																																																																	
2	2	2	2	0	0	4	0	2	6																																																																	
2	0	0	0	0	0	0	4	2	4																																																																	
2	2	2	2	2	2	2	0	2	4																																																																	
10	18	12	12	8	6	10	8	8	16																																																																	
Standort 2	<table border="1" style="margin: auto; border-collapse: collapse;"> <tr><td>28</td><td>28</td><td>38</td><td>28</td><td>26</td><td>26</td><td>26</td><td>23</td><td>15</td><td>26</td></tr> <tr><td>33</td><td>26</td><td>18</td><td>18</td><td>15</td><td>15</td><td>10</td><td>15</td><td>8</td><td>26</td></tr> <tr><td>28</td><td>0</td><td>5</td><td>3</td><td>8</td><td>3</td><td>5</td><td>3</td><td>5</td><td>21</td></tr> <tr><td>28</td><td>18</td><td>13</td><td>8</td><td>13</td><td>15</td><td>10</td><td>3</td><td>10</td><td>33</td></tr> <tr><td>26</td><td>18</td><td>5</td><td>15</td><td>10</td><td>13</td><td>5</td><td>8</td><td>8</td><td>21</td></tr> <tr><td>46</td><td>41</td><td>44</td><td>41</td><td>36</td><td>49</td><td>51</td><td>51</td><td>51</td><td>46</td></tr> </table>	28	28	38	28	26	26	26	23	15	26	33	26	18	18	15	15	10	15	8	26	28	0	5	3	8	3	5	3	5	21	28	18	13	8	13	15	10	3	10	33	26	18	5	15	10	13	5	8	8	21	46	41	44	41	36	49	51	51	51	46	39												
28	28	38	28	26	26	26	23	15	26																																																																	
33	26	18	18	15	15	10	15	8	26																																																																	
28	0	5	3	8	3	5	3	5	21																																																																	
28	18	13	8	13	15	10	3	10	33																																																																	
26	18	5	15	10	13	5	8	8	21																																																																	
46	41	44	41	36	49	51	51	51	46																																																																	
Standort 3	<table border="1" style="margin: auto; border-collapse: collapse;"> <tr><td>22</td><td>25</td><td>25</td><td>31</td><td>36</td><td>25</td><td>17</td><td>28</td><td>31</td><td>22</td><td>25</td><td>25</td></tr> <tr><td>19</td><td>33</td><td>28</td><td>19</td><td>28</td><td>25</td><td>22</td><td>11</td><td>25</td><td>19</td><td>11</td><td>31</td></tr> <tr><td>31</td><td>42</td><td>19</td><td>22</td><td>19</td><td>11</td><td>22</td><td>17</td><td>19</td><td>19</td><td>14</td><td>25</td></tr> <tr><td>28</td><td>19</td><td>11</td><td>8</td><td>14</td><td>14</td><td>8</td><td>8</td><td>14</td><td>6</td><td>11</td><td>33</td></tr> <tr><td>28</td><td>28</td><td>31</td><td>22</td><td>31</td><td>31</td><td>25</td><td>28</td><td>28</td><td>14</td><td>25</td><td>31</td></tr> <tr><td>36</td><td>39</td><td>28</td><td>22</td><td>14</td><td>33</td><td>25</td><td>31</td><td>36</td><td>39</td><td>33</td><td>50</td></tr> </table>	22	25	25	31	36	25	17	28	31	22	25	25	19	33	28	19	28	25	22	11	25	19	11	31	31	42	19	22	19	11	22	17	19	19	14	25	28	19	11	8	14	14	8	8	14	6	11	33	28	28	31	22	31	31	25	28	28	14	25	31	36	39	28	22	14	33	25	31	36	39	33	50	50
22	25	25	31	36	25	17	28	31	22	25	25																																																															
19	33	28	19	28	25	22	11	25	19	11	31																																																															
31	42	19	22	19	11	22	17	19	19	14	25																																																															
28	19	11	8	14	14	8	8	14	6	11	33																																																															
28	28	31	22	31	31	25	28	28	14	25	31																																																															
36	39	28	22	14	33	25	31	36	39	33	50																																																															
Standort 4	<table border="1" style="margin: auto; border-collapse: collapse;"> <tr><td>2</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>2</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>2</td></tr> <tr><td>3</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>2</td></tr> <tr><td>5</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>2</td></tr> <tr><td>14</td><td>19</td><td>22</td><td>19</td><td>18</td><td>14</td><td>20</td><td>20</td><td>23</td><td>23</td><td>21</td><td>17</td></tr> </table>	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	14	19	22	19	18	14	20	20	23	23	21	17	95
2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0																																																															
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0																																																															
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2																																																															
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2																																																															
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2																																																															
14	19	22	19	18	14	20	20	23	23	21	17																																																															
Standort 5	<table border="1" style="margin: auto; border-collapse: collapse;"> <tr><td>8</td><td>5</td><td>5</td><td>0</td><td>5</td><td>5</td></tr> <tr><td>5</td><td>3</td><td>3</td><td>2</td><td>0</td><td>10</td></tr> <tr><td>6</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>11</td></tr> <tr><td>8</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>3</td><td>11</td></tr> <tr><td>7</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>11</td></tr> <tr><td>11</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>1</td><td>14</td></tr> <tr><td>9</td><td>0</td><td>2</td><td>5</td><td>1</td><td>13</td></tr> <tr><td>14</td><td>2</td><td>5</td><td>2</td><td>3</td><td>14</td></tr> <tr><td>10</td><td>2</td><td>6</td><td>6</td><td>5</td><td>10</td></tr> <tr><td>16</td><td>9</td><td>14</td><td>13</td><td>9</td><td>21</td></tr> </table>	8	5	5	0	5	5	5	3	3	2	0	10	6	2	1	1	2	11	8	1	1	0	3	11	7	2	2	1	1	11	11	1	1	2	1	14	9	0	2	5	1	13	14	2	5	2	3	14	10	2	6	6	5	10	16	9	14	13	9	21	87												
8	5	5	0	5	5																																																																					
5	3	3	2	0	10																																																																					
6	2	1	1	2	11																																																																					
8	1	1	0	3	11																																																																					
7	2	2	1	1	11																																																																					
11	1	1	2	1	14																																																																					
9	0	2	5	1	13																																																																					
14	2	5	2	3	14																																																																					
10	2	6	6	5	10																																																																					
16	9	14	13	9	21																																																																					

PID-Häufigkeit [%] 0 25 50 75 100

5.6.2. Einfluss der Oberflächenkontamination auf die Häufigkeitsverteilung PID-betroffener Zellen

Betrachtet man die Verteilungen in Tabelle 5.9. etwas genauer, fällt auf, dass der dritte Standort im Vergleich zu allen übrigen Standorten eine deutlich homogenere Häufigkeitsverteilung der PID-betroffenen Zellen aufweist. Die Module sind in diesem speziellen Kraftwerk in drei Reihen (oben, mitte und unten) übereinander auf einer Unterkonstruktion befestigt. Die Module sind in horizontaler Orientierung mit Ausrichtung Süden in-

5. Ergebnisse

stalliert. Für eine detaillierte Analyse wurden die Module anhand ihrer unterschiedlichen Einbaupositionen geordnet und erneut zusammengefasst (vgl. Tab. 5.9.).

Tabelle 5.9.: Häufigkeitsverteilung eines ausgewählten Kraftwerks sortiert nach Einbaureihe und Aufständereungsareal

Einbaureihe	Aufständereungsareal 1	Aufständereungsareal 2																																																																																																																																																
Oben	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td>50</td><td>50</td><td>50</td><td>50</td><td>75</td><td>50</td><td>25</td><td>50</td><td>25</td><td>25</td><td>50</td><td>50</td></tr> <tr><td>0</td><td>25</td><td>0</td><td>25</td><td>25</td><td>50</td><td>25</td><td>0</td><td>25</td><td>0</td><td>0</td><td>25</td></tr> <tr><td>25</td><td>75</td><td>25</td><td>25</td><td>25</td><td>0</td><td>25</td><td>0</td><td>0</td><td>25</td><td>25</td><td>50</td></tr> <tr><td>0</td><td>50</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>50</td></tr> <tr><td>25</td><td>25</td><td>50</td><td>25</td><td>50</td><td>50</td><td>50</td><td>50</td><td>50</td><td>25</td><td>50</td><td>75</td></tr> <tr><td>25</td><td>25</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>25</td><td>25</td><td>25</td><td>0</td><td>0</td><td>50</td></tr> </table>	50	50	50	50	75	50	25	50	25	25	50	50	0	25	0	25	25	50	25	0	25	0	0	25	25	75	25	25	25	0	25	0	0	25	25	50	0	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50	25	25	50	25	50	50	50	50	50	25	50	75	25	25	0	0	0	0	25	25	25	0	0	50	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td>25</td><td>0</td><td>13</td><td>0</td><td>13</td><td>13</td><td>0</td><td>13</td><td>38</td><td>13</td><td>13</td><td>0</td></tr> <tr><td>13</td><td>25</td><td>25</td><td>13</td><td>13</td><td>0</td><td>25</td><td>13</td><td>25</td><td>13</td><td>0</td><td>25</td></tr> <tr><td>25</td><td>25</td><td>25</td><td>25</td><td>25</td><td>0</td><td>13</td><td>13</td><td>13</td><td>25</td><td>0</td><td>13</td></tr> <tr><td>38</td><td>13</td><td>13</td><td>13</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>13</td><td>0</td><td>25</td><td>25</td></tr> <tr><td>25</td><td>13</td><td>25</td><td>38</td><td>63</td><td>38</td><td>13</td><td>38</td><td>50</td><td>13</td><td>13</td><td>13</td></tr> <tr><td>38</td><td>38</td><td>25</td><td>25</td><td>25</td><td>38</td><td>38</td><td>38</td><td>38</td><td>50</td><td>38</td><td>38</td></tr> </table>	25	0	13	0	13	13	0	13	38	13	13	0	13	25	25	13	13	0	25	13	25	13	0	25	25	25	25	25	25	0	13	13	13	25	0	13	38	13	13	13	0	0	0	0	13	0	25	25	25	13	25	38	63	38	13	38	50	13	13	13	38	38	25	25	25	38	38	38	38	50	38	38
50	50	50	50	75	50	25	50	25	25	50	50																																																																																																																																							
0	25	0	25	25	50	25	0	25	0	0	25																																																																																																																																							
25	75	25	25	25	0	25	0	0	25	25	50																																																																																																																																							
0	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50																																																																																																																																							
25	25	50	25	50	50	50	50	50	25	50	75																																																																																																																																							
25	25	0	0	0	0	25	25	25	0	0	50																																																																																																																																							
25	0	13	0	13	13	0	13	38	13	13	0																																																																																																																																							
13	25	25	13	13	0	25	13	25	13	0	25																																																																																																																																							
25	25	25	25	25	0	13	13	13	25	0	13																																																																																																																																							
38	13	13	13	0	0	0	0	13	0	25	25																																																																																																																																							
25	13	25	38	63	38	13	38	50	13	13	13																																																																																																																																							
38	38	25	25	25	38	38	38	38	50	38	38																																																																																																																																							
Mitte	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td>25</td><td>0</td><td>0</td><td>25</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>25</td><td>0</td></tr> <tr><td>25</td><td>50</td><td>50</td><td>25</td><td>50</td><td>25</td><td>25</td><td>25</td><td>50</td><td>50</td><td>25</td><td>25</td></tr> <tr><td>25</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>25</td><td>25</td><td>25</td><td>25</td><td>25</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>25</td><td>0</td><td>25</td><td>0</td><td>25</td><td>25</td><td>25</td><td>25</td><td>25</td><td>0</td><td>0</td><td>50</td></tr> <tr><td>25</td><td>25</td><td>25</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>25</td><td>25</td><td>25</td><td>0</td><td>0</td><td>25</td><td>0</td><td>0</td><td>25</td><td>25</td><td>25</td><td>50</td></tr> </table>	25	0	0	25	0	0	0	0	0	0	25	0	25	50	50	25	50	25	25	25	50	50	25	25	25	0	0	0	25	25	25	25	25	0	0	0	25	0	25	0	25	25	25	25	25	0	0	50	25	25	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	25	25	0	0	25	0	0	25	25	25	50	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td>0</td><td>25</td><td>25</td><td>25</td><td>25</td><td>25</td><td>13</td><td>38</td><td>38</td><td>13</td><td>13</td><td>13</td></tr> <tr><td>25</td><td>13</td><td>13</td><td>0</td><td>0</td><td>13</td><td>0</td><td>13</td><td>0</td><td>0</td><td>13</td><td>13</td></tr> <tr><td>25</td><td>25</td><td>25</td><td>25</td><td>0</td><td>13</td><td>13</td><td>13</td><td>13</td><td>13</td><td>13</td><td>25</td></tr> <tr><td>25</td><td>13</td><td>13</td><td>13</td><td>13</td><td>13</td><td>13</td><td>13</td><td>13</td><td>13</td><td>13</td><td>0</td></tr> <tr><td>25</td><td>25</td><td>13</td><td>25</td><td>0</td><td>13</td><td>25</td><td>25</td><td>25</td><td>13</td><td>25</td><td>25</td></tr> <tr><td>38</td><td>25</td><td>38</td><td>25</td><td>25</td><td>38</td><td>38</td><td>38</td><td>38</td><td>50</td><td>38</td><td>38</td></tr> </table>	0	25	25	25	25	25	13	38	38	13	13	13	25	13	13	0	0	13	0	13	0	0	13	13	25	25	25	25	0	13	13	13	13	13	13	25	25	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	0	25	25	13	25	0	13	25	25	25	13	25	25	38	25	38	25	25	38	38	38	38	50	38	38
25	0	0	25	0	0	0	0	0	0	25	0																																																																																																																																							
25	50	50	25	50	25	25	25	50	50	25	25																																																																																																																																							
25	0	0	0	25	25	25	25	25	0	0	0																																																																																																																																							
25	0	25	0	25	25	25	25	25	0	0	50																																																																																																																																							
25	25	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0																																																																																																																																							
25	25	25	0	0	25	0	0	25	25	25	50																																																																																																																																							
0	25	25	25	25	25	13	38	38	13	13	13																																																																																																																																							
25	13	13	0	0	13	0	13	0	0	13	13																																																																																																																																							
25	25	25	25	0	13	13	13	13	13	13	25																																																																																																																																							
25	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	0																																																																																																																																							
25	25	13	25	0	13	25	25	25	13	25	25																																																																																																																																							
38	25	38	25	25	38	38	38	38	50	38	38																																																																																																																																							
Unten	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td>0</td><td>33</td><td>33</td><td>33</td><td>33</td><td>33</td><td>33</td><td>33</td><td>33</td><td>33</td><td>0</td><td>33</td></tr> <tr><td>0</td><td>33</td><td>33</td><td>33</td><td>33</td><td>33</td><td>33</td><td>33</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>33</td></tr> <tr><td>33</td><td>33</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>33</td><td>33</td><td>33</td><td>33</td><td>33</td><td>33</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>33</td></tr> <tr><td>0</td><td>33</td><td>33</td><td>0</td><td>33</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>33</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>33</td></tr> </table>	0	33	33	33	33	33	33	33	33	33	0	33	0	33	33	33	33	33	33	33	0	0	0	33	33	33	0	0	0	0	33	33	33	33	33	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	33	0	33	33	0	33	0	0	0	0	0	0	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	33	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td>0</td><td>11</td><td>0</td><td>11</td><td>22</td><td>0</td><td>11</td><td>0</td><td>11</td><td>22</td><td>11</td><td>22</td></tr> <tr><td>22</td><td>11</td><td>11</td><td>0</td><td>11</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>11</td><td>22</td><td>11</td><td>22</td></tr> <tr><td>11</td><td>33</td><td>11</td><td>22</td><td>11</td><td>11</td><td>0</td><td>0</td><td>11</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>33</td><td>11</td><td>0</td><td>11</td><td>22</td><td>22</td><td>0</td><td>0</td><td>11</td><td>11</td><td>11</td><td>0</td></tr> <tr><td>22</td><td>11</td><td>0</td><td>11</td><td>0</td><td>33</td><td>22</td><td>11</td><td>0</td><td>11</td><td>22</td><td>0</td></tr> <tr><td>33</td><td>56</td><td>33</td><td>44</td><td>11</td><td>44</td><td>11</td><td>33</td><td>33</td><td>44</td><td>44</td><td>22</td></tr> </table>	0	11	0	11	22	0	11	0	11	22	11	22	22	11	11	0	11	0	0	0	11	22	11	22	11	33	11	22	11	11	0	0	11	0	0	0	33	11	0	11	22	22	0	0	11	11	11	0	22	11	0	11	0	33	22	11	0	11	22	0	33	56	33	44	11	44	11	33	33	44	44	22
0	33	33	33	33	33	33	33	33	33	0	33																																																																																																																																							
0	33	33	33	33	33	33	33	0	0	0	33																																																																																																																																							
33	33	0	0	0	0	33	33	33	33	33	33																																																																																																																																							
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	33																																																																																																																																							
0	33	33	0	33	0	0	0	0	0	0	33																																																																																																																																							
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	33																																																																																																																																							
0	11	0	11	22	0	11	0	11	22	11	22																																																																																																																																							
22	11	11	0	11	0	0	0	11	22	11	22																																																																																																																																							
11	33	11	22	11	11	0	0	11	0	0	0																																																																																																																																							
33	11	0	11	22	22	0	0	11	11	11	0																																																																																																																																							
22	11	0	11	0	33	22	11	0	11	22	0																																																																																																																																							
33	56	33	44	11	44	11	33	33	44	44	22																																																																																																																																							

PID-Häufigkeit [%]

0 25 50 75 100

Im Falle dieses speziellen Kraftwerkes konnten die Module zusätzlich in zwei unterschiedliche Aufständereungsareale aufgeteilt werden. Das eine Areal (Aufständereungsareal 1) des Kraftwerkes war geprägt von starker Modulverschmutzung. Die dort untersuchten Module befanden sich in kurzer Distanz zu einer staubigen Straße. Vorbeifahrende Fahrzeuge wirbelten Staub auf, der sich auf der Moduloberfläche ablagerte. Wie stark und homogen die Verschmutzung der Module war, wird in Abbildung 5.27. ersichtlich. Das gereinigte Modul hebt sich deutlich durch seine blaue Färbung von den anderen Modulen ab. Das andere Areal (Aufständereungsareal 2) des Kraftwerkes zeigte keine Besonderheiten.



Abbildung 5.27.: Aufnahme eines Modulstrangs, welcher mit einer Staubschicht bedeckt ist. Zur Veranschaulichung wurde die Oberfläche des zweiten Moduls der unteren Modulreihe von links beginnend gereinigt.

5. Ergebnisse

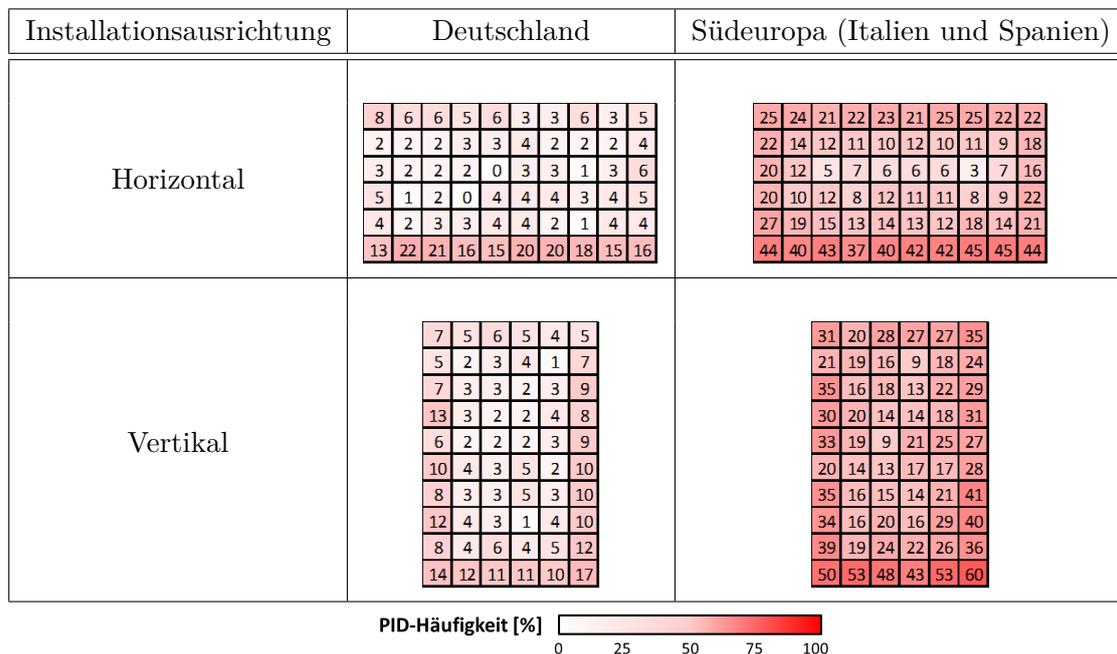
Untersucht man Tabelle 5.9. wird ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Bereichen ersichtlich. Das erste Areal zeigt eine homogenere, bis an den oberen Modulrand dominierende Häufigkeitsverteilung der PID-Zellen. Das zweite Areal zeigt hingegen die bereits bekannte Dominanz der unteren Zellreihe. Die Einbaureihe scheint wiederum keinen signifikanten Einfluss auf die Verteilung zu haben.

Die starke Verschmutzung scheint somit das Modul so stark zu beeinflussen, dass sich das PID-Fehlerbild dieser Module deutlich von allen anderen beobachteten Mustern unterscheidet.

5.6.3. Einfluss der Klimazone auf die Häufigkeitsverteilung PID-betroffener Zellen

In einem letzten Analyseschritt soll nun die Rolle unterschiedlicher klimatischer Regionen betrachtet werden. Dazu wird die PID-Häufigkeitsverteilung von Kraftwerken in Deutschland mit der von weiter südlich gelegenen Kraftwerken in Spanien und Italien verglichen. Zusätzlich wurden die Kraftwerke nach ihrer Installationsorientierung unterschieden. Dabei kamen zwei Orientierungsarten zur Anwendung: horizontal und vertikal.

Tabelle 5.10.: Übersicht der Häufigkeitsverteilung, separiert nach Einbauregion und Installationsausrichtung



Für diesen Vergleich standen insgesamt fünf deutsche Kraftwerke zur Verfügung, welche neun südeuropäischen gegenübergestellt werden konnten. In allen Kraftwerken wurden Module eines Herstellers und eines Modultyps verbaut. Alle Kraftwerke wurden innerhalb desselben Zeitraums von zwei Jahren erbaut und mit dem Stromnetz verbunden. Damit besteht die Annahme, dass alle Module sowohl eine ähnliche PID-Anfälligkeit besitzen als auch eine ähnliche Belastungszeit durchliefen und somit einem fundierten

Vergleich genügen. Für die Übersicht in Tabelle 5.10. wurden die Mittelwerte der einzelnen Häufigkeitsverteilungen der jeweiligen Orientierung und Aufbauregion dargestellt. Insgesamt wurden zu diesem Zweck 842 Module analysiert.

Eine übersichtliche Betrachtung der Verteilungen ergibt, dass die Kraftwerke in Deutschland eine weitaus geringere Gesamthäufigkeit PID-betroffener Zellen zeigen. Dieses Phänomen ist unabhängig von der Installationsorientierung. Begutachtet man die in Deutschland aufgeständerten Module, ist erneut die Anfälligkeit der Randzellen zu beobachten sowie die Dominanz der unteren Zellreihe. Dieselben Eigenschaften kann man ebenfalls bei der Häufigkeitsverteilung der in Südeuropa gelegenen Kraftwerke feststellen. Damit ist der Hauptunterschied der beiden Aufstellungsgebiete lediglich in der prägnanteren PID-Ausprägung in Südeuropa auszumachen.

5.6.4. Zusammenfassung

Die Untersuchungen in den vorangegangenen Kapiteln zeigen, dass die Ergebnisse, die auf Ein-Zellen-Minimulebene erbracht wurden, nicht ohne Weiteres auf Modulgrößen übertragen werden können. Die Analyse von realen Kraftwerken zeigt, dass unterschiedliche Zellpositionen unterschiedlich stark belastet werden und somit eine differenzierte PID-Ausprägung erzeugen. Die Zellen am Modulrand sind dadurch am stärksten betroffen. Besonders die untere Zellreihe ist unter realen Bedingungen besonders anfällig. Zusätzlich ergab die Analyse verschiedener Kraftwerke, dass die Oberflächenveränderungen der Solarmodule, z. B. durch Staub, zu einem deutlich veränderten PID-Verhalten führen können.

Abschließend ergaben Häufigkeitsverteilungen diverser Kraftwerke in unterschiedlichen klimatischen Regionen, dass Kraftwerke im südlichen Europa eine ausgeprägtere PID-Verteilung zeigen als vergleichbare Kraftwerke in Deutschland [Koc14a].

6. Interpretation und Diskussion der Versuchsergebnisse

Im vorangegangenen Kapitel wurden umfassende Ergebnisse von Versuchen präsentiert, mit Hilfe derer die Änderung der PID abhängig von zahlreichen Einflussfaktoren quantifiziert und grundlegende Mechanismen der PID untersucht werden konnten. In dem nun folgenden Kapitel werden die Hauptaspekte der Ergebnisse diskutiert, Besonderheiten betrachtet und mögliche Erklärungen erarbeitet. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse werden im Anschluss zu einem PID-Vorhersagemodell zusammengefügt.

6.1. Schlussfolgerungen der PID-Untersuchungen

Das Alleinstellungsmerkmal dieser Arbeit liegt darin begründet, dass der Großteil der Erkenntnisse erstmals mittels Messung des Shunt-Widerstands gewonnen wurden. Die grundlegenden, bereits von anderen Forschergruppen publizierten Abhängigkeiten wie elektrische Spannung, Temperatur und Luftfeuchtigkeit basieren jedoch meist auf Untersuchungen, die mittels Leckstrom nachgewiesen wurden. Vor diesem Hintergrund behandelt das nächste Kapitel die Erkenntnisse, die unter anderem durch die zahlreichen Testreihen mittels direkter Messung des Shunt-Widerstands gewonnen wurden. Dabei wird insbesondere auf die Luftfeuchtigkeit, den Einfluss der Einstrahlung und die Regeneration eingegangen. Abschließend werden die Beobachtungen diskutiert, die durch die Messungen und Analysen unter realen Umweltbedingungen und kraftwerksähnlichen Versuchsaufbauten erbracht wurden.

6.1.1. Die Oberflächenleitfähigkeit und das dadurch variierende elektrische Feld

In Kapitel 5.2. wurde ausführlich der Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf die Oberflächenleitfähigkeit untersucht. In welcher Art und Weise die Oberflächenleitfähigkeit auf die PID wirkt, soll im Folgenden genauer erläutert werden. Zuerst kann festgehalten werden, dass die PID maßgeblich durch den Spannungsabfall über der SiNx-Schicht bestimmt wird. Der Spannungsabfall ist jedoch nicht an jedem Ort der Zelle gleich. Das liegt darin begründet, dass sich das elektrische Feld, welches sich ausgehend von der Randkontaktierung über die Zelle ausbreitet, mit steigender Entfernung zur Kontaktierung schwächer wird. Um diesen Sachverhalt besser zu veranschaulichen wurde der Spannungsabfall, welcher sich über einer Probe ausbildet, für verschiedene relative Luftfeuchten und deren in Kapitel 5.2. gemessenen und korrespondierenden Oberflächenleitfähigkeiten ermittelt.

6. Interpretation und Diskussion der Versuchsergebnisse

Als Berechnungsgrundlage dienen die von HATTENDORF präsentierten, auf der Spannungsteilerregel basierenden, Formeln [Hat13]. Es gilt:

$$U_{\text{Cell}}(x) = \sqrt{\left(\frac{a}{x}\right)^2 + \frac{2aU}{x}} - \frac{a}{x} \quad (41)$$

$$a = \frac{R_1}{R_2} \quad (42)$$

$$R_1 = \frac{1}{\sigma} \quad (43)$$

$U_{\text{Cell}}(x)$ ist die Spannung über der Probe an der Stelle x ; U ist die angelegte Spannung; a das Verhältnis zwischen dem Oberflächenwiderstand R_1 und dem Probenwiderstand R_2 .

Die Spannung U wird mit Bezug zu den in dieser Arbeit durchgeführten Testreihen mit 1000 V und der Probenwiderstand (der hauptsächlich durch das Glas und EVA vorgegeben wird) mit $2 \cdot 10^{11} \Omega$ angenommen. Setzt man nun die in Kapitel 5.2. ermittelten Oberflächenleitfähigkeiten, beispielsweise für 40 °C ein, so kann der Spannungsabfall entlang einer Linie längs der Zelloberfläche berechnet werden. Abbildung 6.1. zeigt den Spannungsabfall über einer in der Probe eingebetteten Zelle, welche 8 mm am Rand kontaktiert wurde.

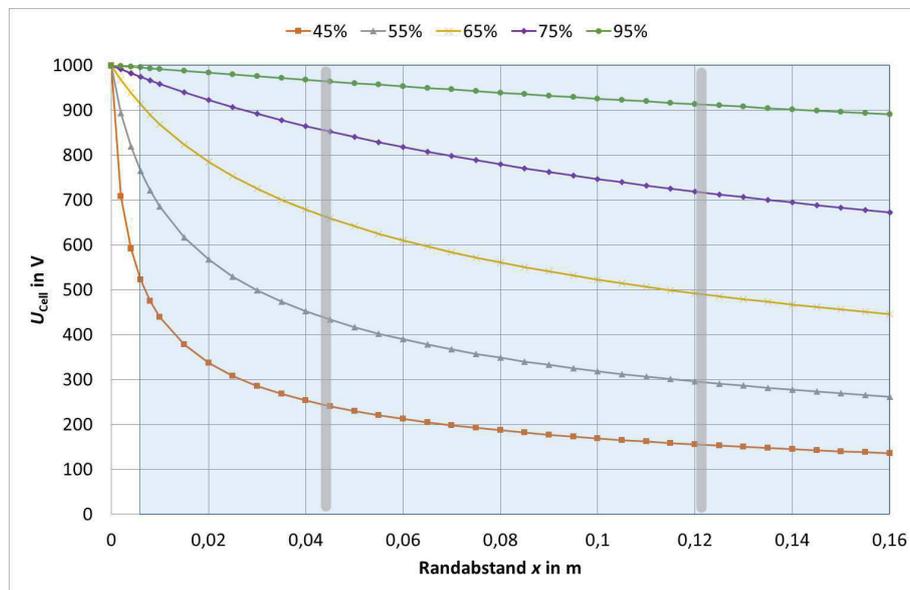


Abbildung 6.1.: Ausprägung des Spannungsabfalls über der Probe bei 40 °C in Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit. Die blaue Fläche markiert den Zellbereich und der Abszissenwert „0“ markiert den Beginn des Rahmens.

Zur besseren Orientierung wurde in der Abbildung 6.1. schematisch eine Solarzelle hinterlegt. Das Minimodulende der am Rand realisierten Kontaktierung befindet sich am Abszissenwert „0“. Beim Betrachten der Graphik wird deutlich, dass sich das Feld abhängig von der Luftfeuchtigkeit unterschiedlich stark verbiegt. Folglich erfahren unterschiedliche Bereiche der Zelle auch unterschiedliche Spannungsbelastungen. Dies bedeutet, dass

6. Interpretation und Diskussion der Versuchsergebnisse

es im Extremfall, beispielsweise bei 40 °C und 55 % relativer Feuchte (ein repräsentativer Wert während einer Belastung in einem realen Kraftwerk), zu einer Mehrbelastung zwischen den beiden äußeren Zellkanten (0,008 m und 0,16 m) von rund 500 V kommen kann. Bedenkt man die deutliche Beschleunigung durch die Spannung bzw. unterschiedliche Kontaktierungsart, wie sie im Kapitel 5.1.1. untersucht wurde, ist dieser Unterschied nicht zu vernachlässigen.

Für eine detailliertere Berechnung, der Degradation in Abhängigkeit des Spannungsabfalls müsste eine Probe als finite Einheit von Volumenelementen gesehen werden. Jedes Volumenelement erfährt dabei zu jedem Zeitpunkt eine variierende Spannungsbelastung. Im Prinzip kann das Modell von HATTENDORF auf ein Volumen übertragen und für jeden einzelnen Punkt berechnet werden. Dadurch müsste für jeden Punkt oder jedes Flächenstück der Zelle ein eigener Degradationsverlauf berechnet werden. Bei der Simulation dieser Methode stößt man mit den gängigen Simulationsprogrammen jedoch schnell an die technischen Grenzen. Ein Hauptproblem für die Simulation ist das spezielle Höhe-zu-Breite-Verhältnis (*aspect ratio*) der Proben. Bei den gängigen Finite-Element-Analyseprogrammen existiert eine obere Grenze (1:1000 [Cad16]), welche bei Solarmodulen überschritten wird und stellt somit ein unüberwindliches Problem dar. Ein Versuch, diese Problematik zu umgehen und ausschließlich die Randbereiche eines Moduls zu betrachten, konnte dennoch Änderungen des elektrischen Feldes simulieren und wurde von SHIRADKAR beschrieben [Shir14].

Eine weitere Schwierigkeit der finiten Separierung ist die anschließende Berechnung des Gesamt-Shunt-Widerstands der Zellen. Fasst man jedes Stück als Einzelzelle auf, können diese zwar mit dem Eindiodenmodell beschrieben werden und man erhält eine Parallelschaltung endlicher Eindiodenschaltungen. Damit die Gesamt-Shunt-Widerstandsbestimmung jedoch realitätsnah geschehen kann, ist eine reine Parallelschaltung der einzelnen Elemente nicht ausreichend. In diesem Fall würde der kleinste Einzelwiderstand den Gesamtwiderstand bestimmen. Dies ist bei realen Solarzellen nicht der Fall und zu einer geeigneten Berechnung müssen noch weitere laterale Widerstände berücksichtigt werden. Diese Problematik ist in den Arbeiten von GIAFFREDA und FÜHAUF übersichtlich aufgearbeitet worden [Fru17, Gia13].

Letzter und nicht zu unterschätzender Aspekt bei der realitätsnahen Betrachtung der Oberflächenleitfähigkeit sind, neben den untersuchten Abhängigkeiten von Temperatur und Feuchtigkeit, die bis dahin nicht erwähnten Einflussgrößen, die zusätzlich bei realen Proben auftreten und ebenfalls die Oberflächenleitfähigkeit entscheidend bestimmen. Dazu zählen:

- Einstrahlung,
- Windgeschwindigkeit und Windrichtung (indirekt durch Einfluss auf die Modultemperatur und die Leitfähigkeit auf der Frontseite),
- Struktur der Oberfläche (indirekter Einfluss in Form des Trocknungs- und Verschmutzungsverhaltens durch strukturiertes Glas oder Float-Glas),
- Oberflächenmaterial (Glas oder Material der Antireflexionsschicht),

- und Kontamination der Oberfläche (Staub, Schmutz, Salz, Bewuchs durch Flechten).

Wie stark diese Faktoren die Degradation beeinflussen, wurde bei der Analyse von realen Kraftwerken in Kapitel 5.6.1. am Beispiel der Verschmutzung deutlich. Die Verschmutzung änderte hierbei die Verteilung der PID-Zellen innerhalb eines Moduls grundlegend. Dies zeigt, dass die Zustände an der Moduloberfläche nicht allein durch Wetterdaten bestimmt werden können. Lokale Effekte, wie beispielsweise Nähe zu einem Tiermastbetrieb, Zementwerk oder der Meeresküste, haben stets das Potential, die Berechnungen zu verfälschen.

Somit wurde eine genaue Oberflächenleitfähigkeitsberechnung aufgrund ihrer Komplexität nicht durchgängig umgesetzt. Vor diesem Hintergrund wurden für das Simulationsmodell der PID, wie bereits erwähnt, nur zwei extreme Zustände voneinander unterschieden. Später in der Simulation werden diese Ausprägungen als „Randkontaktierung“ und „Flächenkontaktierung“ bezeichnet. Eine Randkontaktierung liegt dann vor, wenn die Oberflächenleitfähigkeit vergleichsweise niedrig ist. Sie ist geprägt von starken Unterschieden im Spannungsabfall zwischen randnahen und -fernen Bereichen. Der Grenzwert für dieses Modell, welcher später auch in der Simulation verwendet wird, wurde anhand der Untersuchungen bei 65 % relative Luftfeuchtigkeit festgelegt. Dies entspricht in dem vorliegenden Fall einem spezifischen Widerstand ρ von $1 \cdot 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$. Befindet sich die spezifische Leitfähigkeit unter diesem Schwellenwert, wird eine flächenähnliche Kontaktierung und damit ein nahezu homogenes Feld über der Zelle angenommen.

6.1.2. Der Einfluss der Einstrahlung auf die Degradation

Im Zuge dieser Arbeit wurde erstmals der Einfluss von Einstrahlung auf den PID-Verlauf untersucht. Wie in Abbildung 5.8. sehr deutlich zu erkennen ist, degradieren bestrahlte Proben im Vergleich zu nicht bestrahlten Proben weitaus langsamer. So klar wie der Unterschied zu beobachten ist, so schwer gestaltet sich die Interpretation dieses Effekts. Ein Erklärungsversuch besteht darin, dass Strahlung mit einer Wellenlänge von weniger als 600 nm möglicherweise zu einer erhöhten Leitfähigkeit der SiNx-Schicht führt. GÜNGÖR zeigt in seiner Veröffentlichung, dass die Einstrahlung einen wellenlängenabhängigen Einfluss auf die Leitfähigkeit der SiNx-Schicht hat, die umso stärker wirkt, je geringer die Wellenlänge der auftreffenden Photonen ist [Gue02]. Eine höhere Leitfähigkeit der SiNx-Schicht führt unter Beachtung des PID-Modells von NAUMANN, der die einzelnen Schichten der Solarzelle als Reihenschaltung von Widerständen begreift; zu einem geringeren Spannungsabfall und damit zu einer verminderten Ionenleitung [Nau14]. Damit würden weniger Ionen die n-dotierte Siliziumoberfläche erreichen und folglich die Degradation in einem geringeren Maße voranschreiten.

Nachdem der Einfluss der Bestrahlung auf die PID durch eigene Laboruntersuchungen gezeigt wurde [Koc14b], konnten die Ergebnisse durch HACKE bestätigt werden [Hac14]. Im Gegensatz zu dem in dieser Arbeit gezeigten Versuchsaufbau bestrahlt HACKE seine Proben hingegen mit UV-A-Strahlung in Höhe von 5 W/m^2 und erzielte dadurch eine verminderte PID-Alterung. Er erklärt die reduzierte PID-Geschwindigkeit damit,

dass UV-Licht Radikale erzeugt, die mit den schädlichen Natriumionen Bindungen eingehen und sie dadurch neutralisieren. Durch HACKES Versuchsreihe, die ausschließlich UV-Strahlung verwendet, stellt sich die Frage, ob der Einfluss der Strahlung ausschließlich durch den UV-Anteil hervorgerufen wird und ob die in dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungen ebenfalls durch die UV-Strahlung dominiert werden.

Die in der vorliegenden Arbeit verwendete Halogen-Lichtquelle besitzt einen sehr geringen UV-Lichtanteil, da das Glas der Lampenkolben UV-filternde Stoffe enthält [Led16]. Auch durchläuft der Strahlengang weitere Materialsichten, die aufgrund ihrer Transmissionseigenschaften den UV-Anteil beeinflussen. Dadurch wird zusätzlich der UV-Anteil der Strahlung durch die in dem Versuchsaufbau integrierten Lampenabdeckung aus Glas, dem Kunststoffbehälter und dem darin enthaltenem Wasser geschwächt. Trotz des daraus resultierenden geringen UV-Anteils ist der Verzögerungseffekt in den gezeigten Versuchen signifikant. Daher wird eine alleinige Degradationsverlangsamung durch Radikale ausgeschlossen. Es wird vielmehr vermutet, dass die durch die Einstrahlung erzeugte Leerlaufspannung zusätzlich gegen die Diffusionsrichtung der Natriumionen wirkt und somit im Fall der Degradation eine nicht unerhebliche Barriere für die positiven Ionen darstellt.

6.1.3. Die Wirkungsweise der Regeneration

Durch den Einsatz der partiellen Dunkelkennlinienmessung konnten in dieser Arbeit erstmalig systematische Regenerationsstudien durchgeführt werden. Dabei stellte sich heraus, dass eine Betrachtung der Regeneration allein anhand der Umweltbedingungen nicht genügt.

Belastungszyklen Die Versuchsläufe in Abschnitt 5.3.2. zeigen, dass die Regenerationsfähigkeit der Zellen mit der Anzahl der Belastungszyklen abnimmt. Vor dem Hintergrund, dass Natriumionen aus dem Glas für die PID verantwortlich sind, scheint dieses Verhalten nachvollziehbar. Vor Beginn der ersten PID-Belastungsphase sind die Zelloberfläche und die SiNx-Schicht nur unwesentlich durch Natrium kontaminiert. Nach der ersten Belastungsphase driften die Natriumionen aus dem Glas und dem Einbettungsmaterial – durch den Spannungsabfall – in Richtung Zelloberfläche und akkumulieren dort in der Nähe und innerhalb von Stapelfehlern [Nau14]. Nach dem Abschalten der externen Systemspannung folgt, durch das Konzentrationsgefälle getrieben, eine ungegerichtete Diffusion der Ionen. Dieser Diffusionsstrom ist jedoch nicht ausreichend um den Konzentrationsunterschied wieder auszugleichen. Damit erhöht sich die Natriumionenkonzentration kontinuierlich mit jedem Belastungszyklus.

Applikationszeit Zusätzlich scheint das Natrium eine Mindestreaktionszeit zu benötigen um sich an offenen Bindungen der Stapelfehler anzulagern. Das lässt vermuten, dass eine längere Applikationszeit des elektrischen Feldes die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass Natriumionen stabile Bindungen eingeht. Diese These leitet sich durch die Beobachtungen der Regenerationsverläufe unterschiedlicher Degradationsarten (vgl. Abschnitt 5.1.1.

und Abschnitt 5.3.1.) ab. Betrachtet man die zeitliche Shunt-Widerstandsänderung bei unterschiedlichen Kontaktierungsarten fällt auf, dass randkontaktierte Minimodule im Gegensatz zu Proben, die mit einer flächigen Kontaktierung versehen wurden, weitaus länger benötigen, um dasselbe Degradationslevel zu erreichen. Doch entscheidend ist, dass die randkontaktierten Proben weitaus länger benötigen, um nach der Belastung wieder zu regenerieren. Im direkten Vergleich zu der flächigen Kontaktierung wird zudem ein geringeres Regenerationslevel erreicht. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Dauer, in der ein Zellbereich belastet wird, entscheidend dafür ist, wie gut bzw. schlecht dieser Bereich wieder regeneriert.

Das bedeutet konkret für Module unter realen Bedingungen, dass Zellen, welche eine regelmäßig und lang andauernde Belastung erfahren, auf lange Sicht einen Teil ihrer Regenerationsfähigkeit einbüßen. In dem später vorgestellten PID-Vorhersagemodell wird dieser Sachverhalt ebenfalls berücksichtigt. Jedes Mal, wenn die Berechnungen einen Shunt-Widerstand von unter 30 % des Startwertes ermitteln, reduzieren sich die Regenerationsparameter stufenweise. Die 30 % sind ein Schätzwert, der aufgrund der Laboruntersuchungen veranschlagt wurde. Für den Shunt-Widerstandsverlauf bedeutet dies, dass bei den untersuchten Proben auf lange Sicht und unter konstanten Bedingungen der Prozess der Regeneration sukzessive schwächer wird.

Tag- und Nachtunterschied Ein weiterer wichtiger Aspekt der Regeneration ist das ungleiche Verhalten am Tag und in der Nacht. Bei den Untersuchungen der Tagesverläufe wird besonders deutlich, dass sich die Regeneration am Tag von der Regeneration in der Nacht unterscheidet. Eine Ursache dafür können die bereits angesprochenen Unterschiede in den Temperaturniveaus sein. Zur Analyse dieser These wurden die Regenerationsphasen mehrerer Tage aus Abschnitt 5.5.2. miteinander verglichen. Dabei wurde die Nachtregeneration gesondert von der Regeneration am Tag betrachtet. Zu diesem Zweck wurden die Regenerationskurven der Tages- und Nachtphase sowie deren Durchschnittstemperatur gesondert aufgenommen und ein Durchschnitt gebildet. Danach wurden mittels Regressionsanalyse die Parameter der S-Funktion der beiden resultierenden Regenerationsverläufe ermittelt. In den zwei Wochen der Messwerteaufnahme zeigte sich der in der Abbildung 6.2. dargestellte Verlauf.

Die Abbildung illustriert dabei deutlich die Unterschiede der beiden Regenerationsprozesse. Bei dem nächtlichen Verlauf wird der höhere Anfangswert ($f_{\text{Nacht}}(0) = 0,67$; $f_{\text{Tag}}(0) = 0,49$) deutlich, darüber hinaus ist das Regenerationslevel im Vergleich zur Regeneration am Tag signifikant niedriger ($f_{\text{Tag}}(\infty) - f_{\text{Nacht}}(\infty) = 0,07$). Um beide Verläufe der Degradationsgeschwindigkeit prägnanter vergleichen zu können, wurde zusätzlich die Steigung im Wendepunkt ermittelt und als rote Gerade dargestellt.

6. Interpretation und Diskussion der Versuchsergebnisse

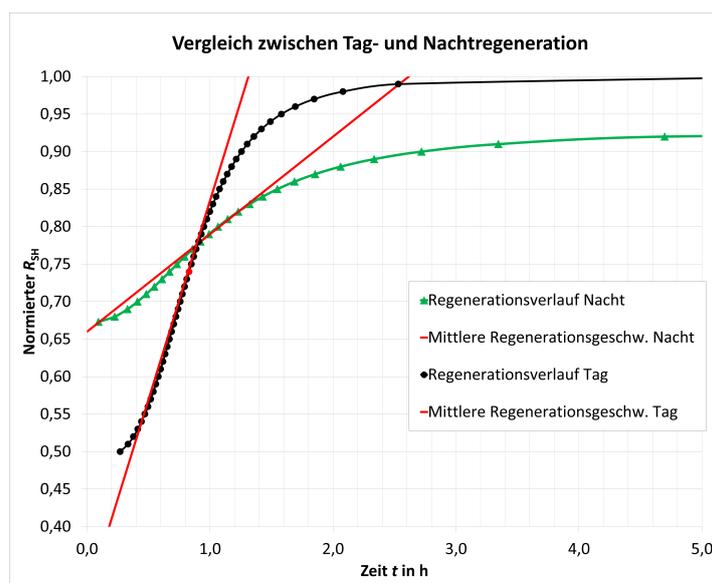


Abbildung 6.2.: Vergleich zwischen dem mittleren Regenerationsverlauf am Tag (schwarz) und in der Nacht (grün)

Die klaren Unterschiede zwischen der Regeneration unter Sonneneinstrahlung (schwarz) und der strahlungsfreien (grün) erfordern eine separate Ursachenforschung. Betrachtet man die Werte in Tabelle 6.1. fällt auf, dass die Durchschnittstemperatur \bar{T}_{Probe} während der Regeneration am Tag rund 7 K höher ausfiel als während der Nacht. Somit ist allein aufgrund der Temperaturdifferenz eine bessere Regeneration am Tag zu erwarten.

Tabelle 6.1.: Parameter des Vergleiches zwischen Regenerationsverlauf am Tag und in der Nacht

Parameter	\bar{T}_{Probe}	$f(0)$	$f(\infty)$	s_2 in 1/h	p_2	$f'(s_2)$
Tag	33,09	0,49	1,00	0,84	3,49	0,53
Nacht	25,91	0,67	0,93	1,07	2,18	0,13

Dagegen steht jedoch, dass die Regeneration am Tag durchschnittlich bei einem niedrigeren Anfangslevel $f(0)$ beginnt, d.h. auch ein geringeres Stabilisierungslevel $f(\infty)$ erreichen sollte. Dies ist bei den Messungen jedoch nicht der Fall und so zeigt sich etwa bei der Betrachtung des Stabilisierungslevels, dass die Regeneration am Tage die Fähigkeit besitzt, die gesamte vorgelagerte Degradation wieder rückgängig zu machen. Das Stabilisierungslevel in der Nacht liegt im Vergleich deutlich niedriger und erreicht den Ausgangswert nicht. Der Grund hierfür besteht möglicherweise in der bereits in Kapitel 6.1.2. angesprochenen erhöhten Leitfähigkeit des Siliziumnitrids unter dem Einfluss der Einstrahlung.

Zudem wird vermutet, dass durch die Absorption von Photonen zusätzliche Energie in das System gelangt. Dadurch erhöht sich die Stoßfrequenz der Atome, was wiederum die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass die Natriumionen die Bindungen eingegangen sind, diese auch wieder verlassen. Dieses Ergebnis deckt sich mit den in Abschnitt 5.3.4. ge-

machten Beobachtungen. Dort beginnt die Regeneration der Proben zwar auf demselben Level, aber auch dort stabilisierten sich die bestrahlten Proben auf einem höheren Shunt-Widerstandswert. Für die Simulation hat dies zur Folge, dass die Regeneration am Tag und in der Nacht als zwei separate Mechanismen aufgefasst werden.

6.1.4. Schlussfolgerungen aus der Beobachtung des Langzeitverhaltens der PID

Der PID-Alterungsversuch unter realen Bedingungen (vgl. Kap. 4.5.), mit einem maximal halbtägigen Messintervall, konnte sehr deutlich zeigen, dass die Shunt-Widerstandsreduzierungen, durch negative Spannung, von jahreszeitlichen Schwankungen beeinflusst wird. Verursacht wird dies durch eine Kombination von Tageslänge und mittlerer Tagestemperatur. Durch die langen Tage im Sommer ist die Belastungszeit auf die Proben im Vergleich zu dem restlichen Jahr deutlich gesteigert, zusätzlich ist die Umgebungstemperatur im Sommer höher. Dadurch ergibt sich im Sommer eine deutliche Shunt-Widerstandsreduzierung, welche im Frühjahr und Herbst abflacht und im Winter ganz zum Erliegen gelangt. Durch die langen Nächte und die damit verbundenen spannungsbelastungsfreien Zeitperioden könnte es theoretisch zu einer Ausheilung und damit zu einem Anstieg des Shunt-Widerstands kommen. Dies ist jedoch zu keinem Zeitpunkt der Fall (der Ausfall des Teststands wird nicht beachtet). Dieses Verhalten liegt mit größter Wahrscheinlichkeit in den im Winter vorherrschenden geringen Umgebungstemperaturen begründet. Dadurch verlaufen jegliche physikalische Prozesse verlangsamt ab und bestärken damit die These, dass es sich bei der PID um einen Arrhenius-Prozess handelt. Die Temperaturen befinden sich auf einem stabil geringen Niveau, sodass jegliche Degradation oder Regeneration messtechnisch nicht mehr zu erfassen sind.

Weiterführend konnte durch die Analyse des Unterschieds zwischen gemessenem Parallelwiderstand am Morgen zu demjenigen am Abend ein klarer Trend festgestellt werden. Der abends gemessene Shunt-Widerstand der Proben ist in 92 % der Fälle niedriger als der am Morgen. Dies zeigt gut das Wechselspiel zwischen Degradationsphase am Tag und Regenerationsphase in der Nacht. Trägt man die Messwerte über der Zeit auf, ergibt sich ein charakteristischer sägezahnförmiger Verlauf (vgl. Abb. 5.20.), wobei die Tendenz des Gesamtverlaufs monoton fallend ist. Der Unterschied entsteht im Grunde durch den Temperaturunterschied zwischen Tag und Nacht. Jede Degradationsphase während des Tages findet bei einer höheren durchschnittlichen Temperatur statt als die Regeneration in der Nacht. Verstärkt wird dieses Verhalten durch das Fehlen der Spannung in der Nacht und durch die mögliche Reduzierung der Regenerationsfähigkeit durch mehrzyklische Belastung (vgl. Kap. 5.3.2.). Vor diesem Hintergrund und dem des Temperatureinflusses kann davon ausgegangen werden, dass die Degradation stets ausgeprägter ausfällt als die Regeneration des Shunt-Widerstands.

Ferner konnte durch die Versuche gezeigt werden, dass die Degradation an Tagen mit Regen, im Vergleich zu trockenen Tagen, leicht erhöht ist (vgl. Abb. 5.21.). Dies hängt damit zusammen, dass sich die Art der Kontaktierung durch den Niederschlag verändert und sich von einer Randkontaktierung zu einer flächigen Kontaktierung entwickelt. Wie

die Laboruntersuchungen zeigen, wird durch die Änderung einer Randkontaktierung hin zu einer vollen Oberflächenkontaktierung die Shunt-Widerstandsalterung deutlich beschleunigt. Dieser Effekt scheint jedoch nur kurzzeitig anzuhalten und spielt für den Gesamtdegradationsverlauf nur eine untergeordnete Rolle. Begründet ist diese Vermutung darin, dass der Verlauf des Widerstands nicht klar durch regenreichen Zeitperioden verändert wird, sondern sogar leicht stagniert (Abb. 5.18 720-890 h und 1240-1400 h). Im Zeitraum mit der prozentual gesehen geringsten Häufigkeit an registrierten Regentagen im Sommer (25 %) schreitet zudem die Degradation am stärksten voran. Die Ursache hierfür sind – mit größter Wahrscheinlichkeit – die niedrigen Temperaturen, die sich auf natürliche Weise einstellen, sobald es mehrere Tage nacheinander regnet. Unterstützt wird dieser Effekt durch eine durchgehend hohe Bewölkung in diesen Zeiträumen. Eine weitere Ursache für dieses Verhalten wird im Abschnitt 6.1.5. erläutert, in dem Regenerationsphasen am Tag als Folge des sich ändernden elektrischen Felds diskutiert werden.

Zum Abschluss der Untersuchungen zum Langzeitverhalten wurden die Proben nach rund einem Jahr anhand ihrer EL-Aufnahmen bewertet. Wie in Abbildung 5.22. klar zu sehen, beginnen die durch PID verursachten Kurzschlüsse am äußeren Rand der Zellen. Dieses Fehlerbild suggeriert, dass die PID, über einen langen Zeitraum betrachtet, ausschließlich durch die Randkontaktierung der Proben bestimmt wird. Damit drängt sich die Vermutung auf, dass die gesamte PID durch die Zeiträume, die durch niedrige relative Luftfeuchtigkeit und somit von niedriger Oberflächenleitfähigkeit bestimmt werden. Dies steht im Gegensatz zu den Annahmen, die bei anderen PID-Modellen gemacht wurden. Dort werden die Zeiten mit hoher Luftfeuchtigkeit für das Voranschreiten der PID verantwortlich gemacht. Dort nimmt man an, dass die PID hauptsächlich durch die Zeitperioden mit hoher relativer Luftfeuchtigkeit und damit hoher Oberflächenleitfähigkeit getrieben wird. In diesem Fall sollten die Kurzschlüsse, in den EL-Aufnahmen, jedoch überall auf der Zelloberfläche zu finden sein.

Zusammenfassend kann man festhalten, dass sich durch den jahreszeitlichen Wechsel in gemäßigten Breiten ein stufenförmiger Shunt-Widerstandsverlauf einstellt. Im Sommer ist eine klare Degradation zu erkennen, die in den Übergangsphasen (Herbst und Frühling) abschwächt und im Winter zum Erliegen kommt. Im Wechsel zwischen Tag und Nacht betrachtet man ein sägezahnförmiges Shunt-Widerstandsverlaufsmuster. Dabei ist die Degradation am Tag fortwährend ein wenig stärker als die Regeneration in der Nacht. Des Weiteren ist eine leichte Beschleunigung der Degradation durch einzelne Regentage zu erkennen, doch auf die langfristige Entwicklung des Shunt-Widerstands hat dies keinen merklichen Einfluss.

6.1.5. Einfluss von realen Umweltbedingungen auf die Oberflächenleitfähigkeit, den Spannungsabfall und somit auf den Verlauf der PID

Anhand der Langzeituntersuchungen konnte gezeigt werden, dass sich die PID von der Randkontaktierung ausgehend zur Mitte hin ausbreitet. Dies scheint, ebenso im Gegen-

6. Interpretation und Diskussion der Versuchsergebnisse

satz zu den hoch aufgelösten Untersuchungen (vgl. Kap. 5.5.) mit einem stundenaufgelöstem Messintervall, zu stehen. Bei den besagten Messungen konnte eindeutig belegt werden, dass die stärksten Degradationsphasen in den Zeiten geschehen, in denen eine hohe Oberflächenleitfähigkeit besteht (Regen, Tau und hohe relative Feuchtigkeit in den Abendstunden).

Eine Erklärung liefert zum einen die Kontinuität der vom Rand ausgehenden Belastung, also die längere Applikationszeit und zum anderen der Wechsel zweier unterschiedlicher Regenerationsphasen also die Regeneration am Tag und in der Nacht. Die in Abschnitt 6.1.1. gewonnenen Erkenntnisse implizieren, dass es keiner hohen Oberflächenleitfähigkeit bedarf, damit die Randbereiche einer Zelle potential-induziert degradieren. Losgelöst von der Ausprägung des elektrischen Felds erfahren die Randbereiche der Zelle kontinuierlich einen hohen Spannungsabfall. Daraus folgt, dass unabhängig von der Wetterlage Randzellenbereiche signifikant belastet werden und dies so lange geschieht, wie eine Systemspannung anliegt. Sobald die Systemspannung nicht mehr wirkt, also sobald keine Einstrahlung mehr vorliegt, regenerieren die belasteten Zellbereiche wieder. Dieser Wechsel vollzieht sich unabhängig von der Oberflächenleitfähigkeit jeden Tag und wird hauptsächlich durch den Tagbogen und die Probertemperatur bestimmt.

Demgegenüber stehen Zeiten, an denen Proben, unter realen Bedingungen eine hohe Oberflächenleitfähigkeit und damit eine starke Degradation aufweisen. In diesem Fall werden die gesamten Bereiche der Zelle stark belastet und der erhöhte Abfall des Shunt-Widerstand ist einleuchtend. Diesen Phasen folgt jedoch fast ausschließlich eine Phase mit hoher Einstrahlung und niedriger Oberflächenleitfähigkeit. Während dieser Phase stellt sich der bereits erläuterte Zustand ein, in dem die Bereiche nahe der Kontaktierung einen hohen Spannungsabfall aufweisen und weit entfernte einen geringen. In den betrachteten Fällen scheint dieser geringe Spannungsabfall nicht auszureichen, um die Potentialdifferenz (Aktivierungsbarriere) zu überwinden, welche nötig wäre, damit die Natriumionen sich an Stapelfehlern anlagern. Zusätzlich wirkt eine, durch die Einstrahlung gesteigerte, Regenerationsfähigkeit der Zellen, welche die Dämpfung unterstützt.

Die detaillierten Zusammenhänge während eines idealisierten Tagesverlaufs sind in Abbildung 6.3. noch einmal übersichtlich mit allen entscheidenden Aspekten zusammengefasst. Es sind im Einzelnen der Systemspannungsverlauf, die Einstrahlung, die schematisch dargestellte Ausprägung des Spannungsabfalls über der Zelle, die korrespondierenden Umgebungsbedingungen, die dazugehörige prinzipielle Degradationsverteilung auf der Zelloberfläche und der schematische Shunt-Widerstandsverlauf abgebildet. Die roten Balken separieren die unterschiedlichen Phasen des Einstrahlungs- und Shunt-Widerstandsverlaufs. Die Systemspannung wurde der Einfachheit halber über den gesamten Tag als konstant angesehen.

6. Interpretation und Diskussion der Versuchsergebnisse

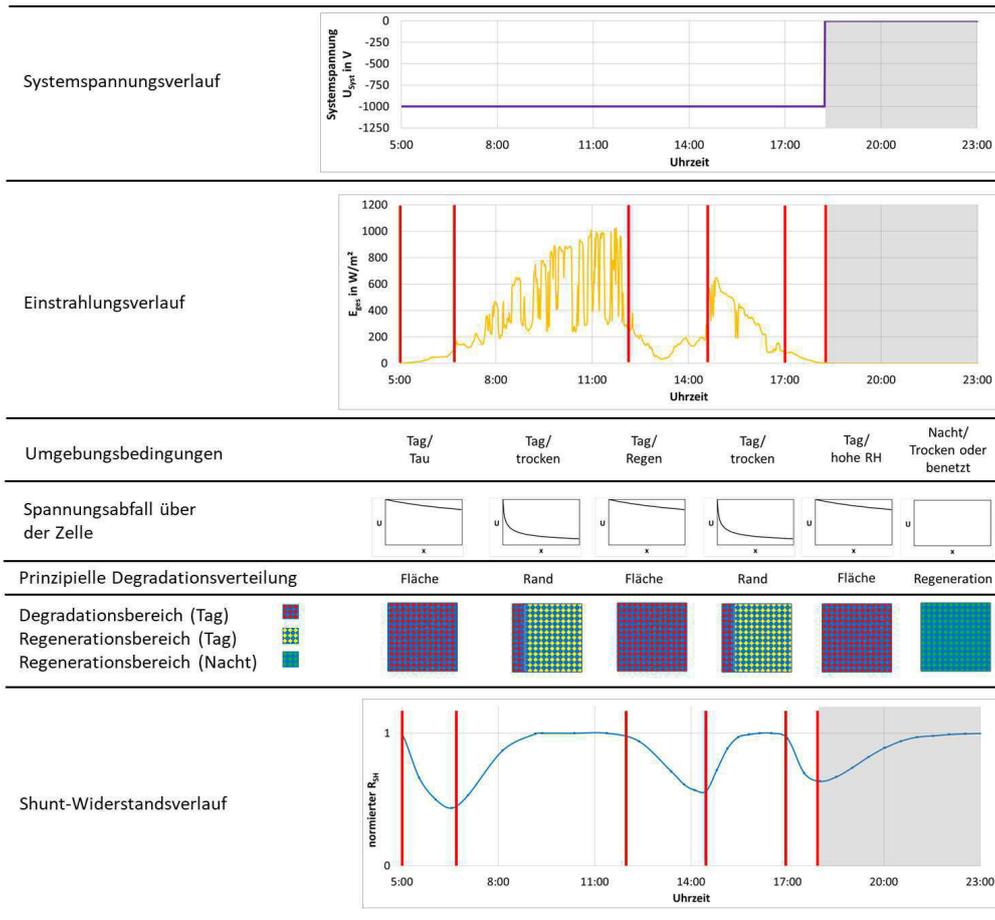


Abbildung 6.3.: Übersicht der einzelnen Phasen der Kurzzeitdegradation und -regeneration während eines idealisierten Tagesverlaufes

Im Grunde bestimmt die Einstrahlung die unterschiedlichen Phasen der PID. Nach dem Sonnenaufgang belastet die Systemspannung die Proben. Die erste Phase ist durch einen flachen Verlauf des elektrischen Felds gekennzeichnet, morgens befindet sich Tau auf den Modulen oder zumindest ist die relative Luftfeuchtigkeit in den meisten betrachteten Fällen aufgrund der geringen Temperaturen erhöht und demzufolge die Oberflächenleitfähigkeit ebenfalls hoch. Dadurch wird die gesamte Zellfläche belastet und ein starker Shunt-Widerstandsverlust, vergleichbar mit einer flächigen Kontaktierung (vgl. Abschnitt 5.1.1.), entsteht.

Im weiteren Tagesverlauf, der zweiten Phase, steigt die Einstrahlung. Die Moduloberfläche trocknet, die Oberflächenleitfähigkeit sinkt und ein starker Spannungsabfall bildet sich über die gesamte Zellbreite aus. Die Folge ist, dass nur noch der Randbereich degradiert. Zusätzlich zeigen die restlichen Bereiche eine starke, durch die Einstrahlung beschleunigte Regeneration (vgl. Abschnitt 5.1.4.). Dies hat wiederum zur Folge, dass sich in Summe der Shunt-Widerstand der Probe erholt.

In der dritten Phase des Tagesverlaufs setzt ein kurzer Schauer ein, was zu dem starken Abfall der Einstrahlung führt. Durch den Schauer steigt die Oberflächenleitfähigkeit und ein flacher Spannungsabfall über die Zellbreite stellt sich ein. Damit wird die gesamte

6. Interpretation und Diskussion der Versuchsergebnisse

Probenoberfläche abermals belastet. Dies erzeugt eine erneut starke flächige Degradation.

Nachdem der Schauer vorüber ist, folgt die vierte Phase, die mit der zweiten Phase zu vergleichen ist und in Summe erneut die Probe regenerieren lässt.

Die letzte Phase am Tag ist die Dämmerungsphase, in der die relative Luftfeuchtigkeit wieder ansteigt und für einen kurzen Zeitraum vor dem Sonnenuntergang eine letzte flächig Kontaktierung der Probe erzeugt. In der sich anschließenden Nachtphase ist die Oberflächenleitfähigkeit aufgrund der fehlenden Systemspannung unerheblich und die Zelle regeneriert homogen über den gesamten Zellbereich. Die Regeneration ist in diesem Fall aufgrund der fehlenden Einstrahlung und der niedrigen Nachttemperaturen weitaus träger, was auch durch die Analyse in Abschnitt 5.5.2. bestätigt wurde.

Betrachtet man abschließend noch einmal die örtliche Ausdehnung der prinzipiellen Degradationsverteilung (vgl. Abbildung 6.3. Reihe 5 und 6), wird deutlich, dass trotz der Schwankungen während der unterschiedlichen Phasen, tagsüber eine kontinuierliche Degradationsbelastung in den Randbereichen angenommen werden kann. Diese wird nur partiell immer wieder von flächiger Degradation überlagert, die wiederum durch beschleunigte Regeneration neutralisiert wird.

Auf einen weiteren Aspekt soll an dieser Stelle noch einmal explizit hingewiesen werden: Vergleicht man die jeweiligen Klimabedingungen in Berlin und auf Zypern, so unterscheiden sich die beiden Standorte hauptsächlich in ihrer Durchschnittstemperatur. Damit sollten sich die Kurzzeitverläufe im Prinzip nur marginal unterscheiden. Es kann jedoch abermals festgestellt werden, dass das Mikroklima, d.h. die Gegebenheiten direkt auf der Probenoberfläche, vor Ort einen entscheidenden Einfluss auf die Degradation und die Ausprägung der unterschiedlichen Degradationsphasen hat.

In den Morgenstunden in Berlin wurde ein Betauungszeitraum von rund einer Stunde ermittelt. Dieser Zeitraum hält in Nikosia fast doppelt so lange an. Die Ursache sind jedoch nicht die Wetterverhältnisse vor Ort, sondern die Aufständigung und die dort vorherrschende Vegetation. In Berlin befinden sich die Proben auf einem exponierten Dach. Sobald die Sonne aufgeht, kann die Strahlung ungehindert auf die Proben einwirken, sie erwärmen und den Tau zügig verdampfen. In Nikosia ist der Aufständigungsort von einem Waldstück umgeben. Dies hatte zur Folge, dass die Einstrahlung erst rund 45 Minuten nach Sonnenaufgang die Proben erreichte. Demnach kann die Betauung im Sommer um fast genau diese 45 Minuten länger auf den Modulen verweilen und damit liegt, im Vergleich zu Berlin, täglich rund eine Stunde länger ein flächige Kontaktierung an.

Abbildung 6.4. illustriert diesen Sachverhalt noch einmal deutlich. Der Einstrahlungsverlauf E_{ges} zeigt am Morgen einen deutlichen Sprung. Der Sprung entsteht, wenn die Sonne die im Osten befindlichen Baumwipfel übersteigt. In dem später vorgestellten Simulationsmodell können solche Effekte nicht berücksichtigt werden; dieses Beispiel zeigt jedoch erneut wie stark die PID von lokalen Besonderheiten beeinflusst werden kann.

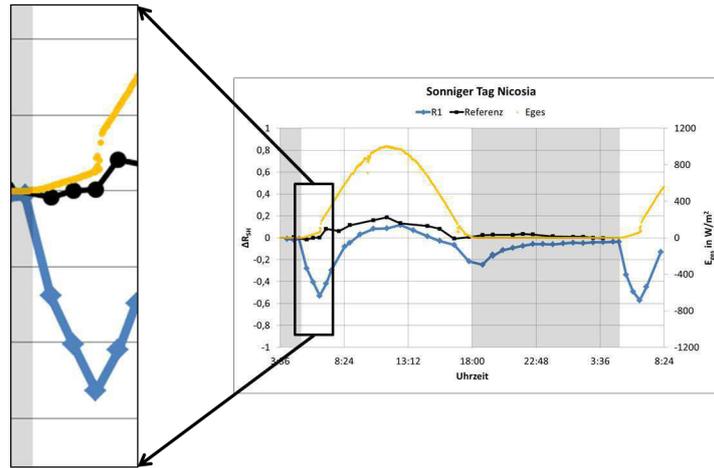


Abbildung 6.4.: Der Einstrahlungsverlauf E_{ges} (gelb) beeinflusst die Degradationsphase (blau) am Morgen entscheidend

Aufgrund der in diesem Kapitel erbrachten Erkenntnisse wird die Berechnung der Vorhersage in unterschiedliche Phasen eingeteilt, die maßgeblich durch die Luftfeuchte und die Einstrahlung statuiert werden.

Mit dieser Betrachtung ist die Analyse der Mechanismen der PID für die Ein-Zellen-Minimodule abgeschlossen und alle Voraussetzungen für ein realitätsnahes PID-Vorhersagemodell gegeben. Die Beschreibung des Modells folgt in Kapitel 7. und basiert maßgeblich auf den hier dargelegten Erkenntnissen.

6.2. Schlussfolgerungen anhand der statistischen Auswertung realer PV-Module auf Basis von Elektrolumineszenzaufnahmen

Die statistische Auswertung kommerziell erhältlicher PV-Module in Abschnitt 5.6.1. zeigt ebenfalls, dass die Oberflächenleitfähigkeit eine entscheidende Rolle bei der PID spielt. Unter Berücksichtigung der gezeigten Untersuchungen sprechen alle Indizien dafür, dass Veränderungen der Oberflächenleitfähigkeit, sei es durch Schmutz, Feuchtigkeit, lokal auf dem unteren Rahmenteil oder flächig auf dem Glas, zu einer Beschleunigung der Degradation führen.

Beispielsweise zeigt die statistische Auswertung der Module in realen Kraftwerken, dass Module unabhängig von ihrer Einbauorientierung am unteren Modulrand die höchste Anzahl an PID-betroffenen Zellen zeigen.

Die Hauptursache dafür ist, dass sich Tau und Regen während des Trocknungsvorgangs am unteren Rand eines Moduls sammeln. Die Form des Modulrahmens, welcher sich über das Glas erhebt und somit eine Kante bildet, begünstigt dieses Verhalten zusätzlich. Verstärkt wird dieses Phänomen überdies durch die Ablagerung von Schmutz und das damit einhergehende Wachstum von Moosen und Flechten [Noa14]. Durch die längere Verweildauer der Feuchtigkeit und die damit einhergehende Erhöhung der Oberflä-

chenleitfähigkeit erzeugt dieser Umstand einen ausgedehnten Zeitraum, der durch einen konstant hohen Spannungsabfall entlang der Zelloberfläche geprägt ist. Im Vergleich zu den anderen Rahmenteilern ergibt sich dadurch eine stärkere PID-Belastung. Das hat letztendlich zur Folge, dass die untere Zellreihe eines Moduls stets am schnellsten altert. Betrachtet man darüber hinaus im Allgemeinen die Verteilung der PID-betroffenen Zellen aller Kraftwerke in Abschnitt 5.6.1., so zeigen diese, dass – unabhängig von Einbauort und -orientierung – die am Modulrahmen angrenzenden Zellen am häufigsten von PID betroffen sind. Damit zeigen die Häufigkeitsverteilungen – unabhängig von Orientierung und Einbauort – im Vergleich ein analoges Muster. Diese Beobachtung bestätigt indirekt die Erkenntnisse auf Minimodulebene in Kapitel 4.5., welche ebenfalls eine Randkontaktierung bei Langzeitdegradationsverläufen als vorherrschend identifizierten.

Weiterhin zeigt die Analyse von Solarmodulen hinsichtlich der von einer PID-betroffenen Zellverteilung innerhalb realer Module, dass Module in Südeuropa weitaus stärkere PID-Ausprägungen zeigen als im Norden. Dies liegt mit hoher Wahrscheinlichkeit an der im Mittel höheren Durchschnittstemperatur der südlich gelegenen Kraftwerke. Hintergrund für diese Vermutung ist, dass alle der betrachteten Module baugleich sind und zusätzlich, dass die Zeiträume, in denen die Anlagen – egal ob im Norden oder Süden Europas – in Betrieb genommen wurden, sich nur unwesentlich unterscheiden. Damit ist die Temperatur als Einfluss am nachvollziehbarsten.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass im Feld die dominierende PID-Belastung vom Modulrahmen ausgeht und dies unabhängig davon, an welchem Ort und mit welcher Orientierung die Module verbaut wurden. Diese Erkenntnis spricht dafür, dass, ebenso wie bei Minimodulen, Wetterperioden, die Regen und Tau verursachen, nur kurzzeitig für eine erhöhte Degradation sorgen. Diese verstärkte Belastung wird jedoch langfristig wiederkehrend durch die Regeneration neutralisiert.

Trotz alledem treten bei den Modulanalysen immer wieder einzelne Zellen auf, die im Zentrum der Module verbaut sind und besonders starke Degradationen aufweisen. Hier wird vermutet, dass die Zellen eine sehr ausgeprägte PID-Anfälligkeit besitzen, sodass sie in den kurzen Degradationsphasen während hoher Oberflächenleitfähigkeit massiv degradieren. Die Degradation ist so ausgeprägt, dass die Zellen im Anschluss ein verlangsamtes Regenerationsverhalten zeigen, so wie es auch von TAUBITZ in seiner Arbeit beschrieben wurde [Tau13].

Ein flächiges Verteilungsmuster konnte nur bei einer Kontamination der Frontseite mit Staub beobachtet werden. Dort scheint es, dass der Staub entweder kontinuierlich die Oberflächenleitfähigkeit heraufsetzt oder die Zeit verlängert, die die Module benötigen, um nach Regen oder Tau wieder zu trocknen. Diese Erkenntnis unterstreicht abermals den Einfluss des auf der Oberfläche herrschende Mikroklimas. Werden die Trocknungsvorgänge durch Verschattung, Verschmutzung oder Pflanzenbewuchs verändert, macht sich dies in der Degradationsgeschwindigkeit der einzelnen Zellen bemerkbar. Eine Abweichung vom Standardverteilungsmuster ist somit stets ein Indiz für einen außergewöhnlichen, zusätzlichen Umgebungseinfluss.

6.3. Bestimmung der Aktivierungsenergien von Degradation und Regeneration

Nachdem die einzelnen Degradations- und Regenerationsmechanismen qualitativ diskutiert wurden, soll in diesem Kapitel ein Exkurs unternommen werden, der die phänomenologisch ermittelten Größen physikalischen Mechanismen zuordnet. Eine Erkenntnis, die bereits zu Beginn der PID-Untersuchungen gewonnen wurde, besteht darin, dass die Ausheilungsentwicklung langsamer voranschreitet als die durch die Potentialdifferenz verursachte Degradationsentwicklung [Pin10]. Der zugrundeliegende Mechanismus dahinter soll in diesem Kapitel geklärt werden.

Zu diesem Zweck wird auf Ergebnisse aus den vorherigen Abschnitten zurückgegriffen. In Kapitel 4.3. und 4.4. wurde unter anderem das thermische Alterungsverhalten der Proben für die Degradation und Regeneration bestimmt. Hierbei wurde der besonders ausgeprägte Einfluss der Temperatur auf die Degradation und Regeneration deutlich.

Unter der Annahme, dass den Degradations- und Regenerationsmechanismen über das gesamte betrachtete Temperaturspektrum dieselben physikalischen Vorgänge zugrunde liegen, so werden durch eine Temperaturerhöhung alle Vorgänge im gleichen Maße beschleunigt. Trifft diese Annahme auf ein System zu, so wie es für die PID angenommen wird, so spricht man in der Materialwissenschaft auch von einem thermorheologisch einfachen System [Wil55]. In den Materialwissenschaften wird diese Annahme unter anderem verwendet, um Versuche, die von ihrer Dauer in einem schwierig zu realisierenden Zeitfenster liegen, experimentell zugänglich zu machen. Die prinzipielle Vorgehensweise bei dieser sogenannten Zeit-Temperatur-Superposition wird von MENGES [Men98] beschrieben und ist in Abbildung 6.5. schematisch für die Degradation sowie die Regeneration dargestellt:

6. Interpretation und Diskussion der Versuchsergebnisse

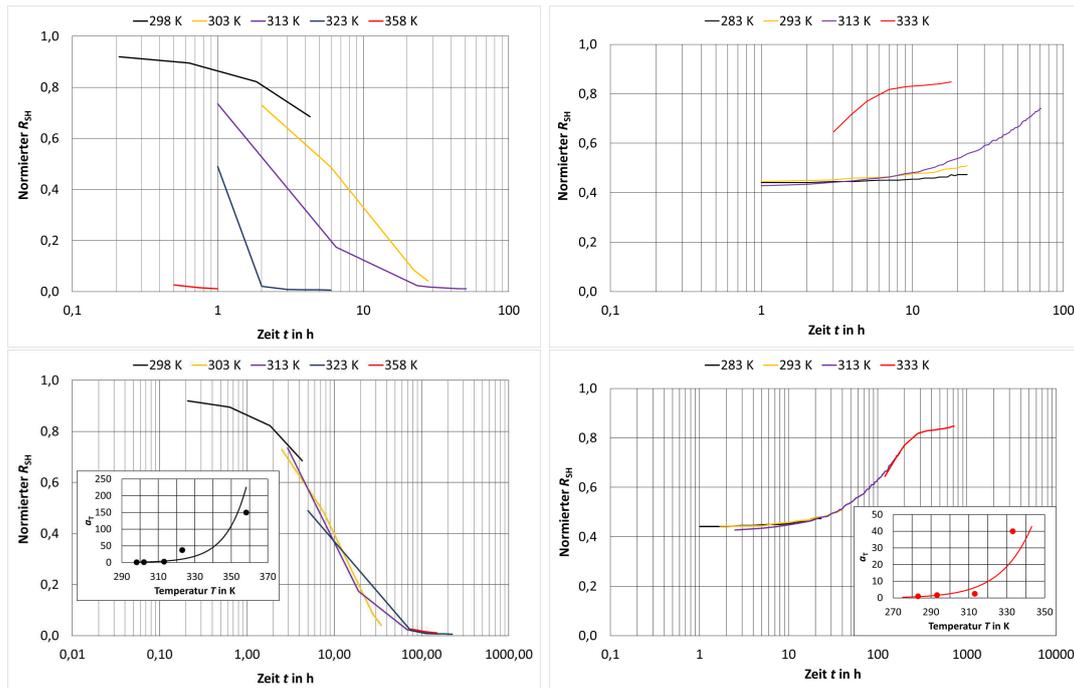


Abbildung 6.5.: Gemessene und normierte R_{SH} -Verläufe unterschiedlicher Umgebungstemperaturen (oben), Anwendung der Zeit-Temperatur-Superposition (große Grafik unten) und zugehörige Amplituden-Temperatur-Verschiebung (kleine Grafik unten) für die Degradation (links) und Regeneration (rechts)

Die bei verschiedenen Temperaturen und einem vorgegebenen Zeitfenster (Belastungszeit) ermittelte Messgröße, hier der Shunt-Widerstand, wird in den oberen Diagrammen aufgezeigt. Es wird eine Referenztemperatur T_{ref} definiert, auf welche sich die Kurvenstücke beziehen sollen. In dem Fall der Degradation wurden als Referenztemperatur 298 K, also die in der PV übliche STC-Temperatur, gewählt. Im Fall der Regeneration wurde eine niedrigere Temperatur von 283 K gewählt. Die Messwerte der jeweiligen Versuchstemperaturen werden anschließend mit einem Faktor a_T multipliziert, was im logarithmischen Maßstab einer Addition (resp. einer horizontalen Verschiebung im Diagramm) entspricht. Die Faktoren werden so gewählt, dass sich die einzelnen Kurvenstücke zu einem durchgängigen Verlauf bei der gewählten Referenztemperatur ergänzen. Die Kurve, die durch die Verschiebung entsteht, ist die sogenannte Masterkurve, welche das Degradationsverhalten über den gesamten erstellten Zeitbereich bei der Referenztemperatur wiedergibt. Die Verschiebungsfaktoren a_T zur Erstellung dieser Masterkurve sind von der jeweiligen Versuchstemperatur T und der Referenztemperatur T_{ref} abhängig:

$$a_T = f(T, T_{ref}) \quad (44)$$

Im Fall der PID kann die Konzentration der an Stapelfehlern angelagerten positiven Natriumionen proportional zur Shunt-Widerstandsverringerung angenommen werden. Des Weiteren kann unter der Annahme, dass im vorliegenden Temperaturbereich kei-

6. Interpretation und Diskussion der Versuchsergebnisse

ne Umwandlungsprozesse der beteiligten Materialien stattfinden, die Arrheniusgleichung angesetzt werden:

$$k = v_0 \cdot e^{\frac{-E_A}{k_B \cdot T}} \quad (45)$$

E_A entspricht der Aktivierungsenergie in eV, k_B der Boltzmann-Konstante in $\frac{eV}{K}$, v_0 der Frequenzfaktor (engl. Attempt-to-escape frequency) in Hz und k der Reaktionsgeschwindigkeitskonstante [Krat15].

In Kombination mit dem Ergebnis der Superposition kann die folgende Formel hergeleitet werden [Gra02]:

$$\ln(a_T) = \frac{E_A}{k_B} \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\text{ref}}} \right) \quad (46)$$

Zusätzlich zur Aktivierungsenergie kann der Frequenzfaktor berechnet werden, was wiederum Schlüsse auf die vorliegende Reaktionsgeschwindigkeit zulässt [Dea98]. Es gilt:

$$\ln(a_T) = \ln(v_0 t) \quad (47)$$

mit t in s.

Wird nun a_T logarithmisch gegen $1/T$ aufgetragen, kann aus der Steigung der Geraden die jeweilige Aktivierungsenergie und mittels Ordinatenabschnitt der Frequenzfaktor ermittelt werden.

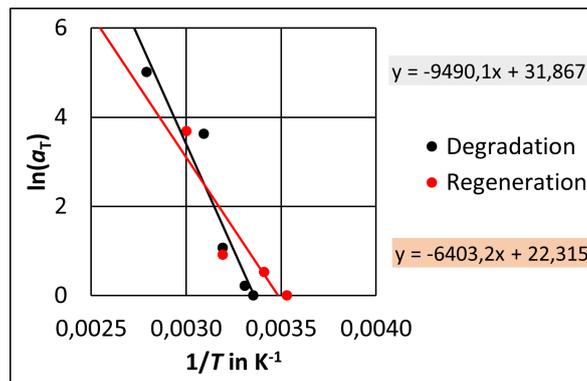


Abbildung 6.6.: Die Verschiebungsfaktoren a_T der Degradation (rot) und Regeneration (schwarz) logarithmisch gegen $1/T$ aufgetragen

Die einzelnen Größen, die sich aus den beiden Geraden ergeben, wurden in Abbildung 6.6. gegenübergestellt.

6. Interpretation und Diskussion der Versuchsergebnisse

Tabelle 6.2.: Aus Abbildung 6.6. ermittelte Aktivierungsenergie und Frequenzfaktor für Degradation und Regeneration

PID-Phase	E_A in eV	ν_0 in Hz	R^2
Degradation	$0,82 \pm 0,15$	$6,9 \cdot 10^{13} \pm 2,0 \cdot 10^2$	0,91
Regeneration	$0,55 \pm 0,17$	$4,9 \cdot 10^9 \pm 7,7 \cdot 10^2$	0,83

Mittels der Zeit-Temperatur-Superposition wurde für die Degradation eine Aktivierungsenergie von 0,82 eV bestimmt. Dieser Wert liegt etwas höher als der von HOFFMANN [Hom12] bestimmte Wert von 0,78 eV, dem von TAUBITZ [Tau12] bestimmten Wert von $0,7 \pm 0,3$ eV sowie dem von LECHNER [Lec16] bestimmten Wert von 0,7 eV. Dabei ist zu beachten, dass der direkte Vergleich zwischen den Werten von LECHNER und HOFFMANN kaum möglich ist. Beide Arbeiten verwenden den Leckstrom zur Ermittlung der Aktivierungsenergien und nicht den Shunt-Widerstand. Generell ist die ermittelte Aktivierungsenergie in Höhe von 0,82 eV laut OBREJA ein typischer Wert für Silizium [Obr09].

Im Falle der Regeneration konnte das Ergebnis nur mit einer Arbeit verglichen werden. In der Arbeit von LECHNER [Lec14] wurden zwei Aktivierungsenergien in Höhe von 0,9 und 1,0 eV ermittelt. Die dort präsentierten Aktivierungsenergien wurden jeweils einer Regenerationsmethode zugeordnet (Labor und Freifeld). Bedauerlicherweise gibt es nur ungenaue Informationen darüber, welches Degradationslevel die von LECHNER untersuchten Proben vor der Regeneration aufwiesen. Die Berechnung der Werte wurde damit abweichend zu der in dieser Arbeit präsentierten Aktivierungsenergiebestimmung durchgeführt. Zudem wurden die Aktivierungsenergien durch Leistungsmessungen und Messungen des Leckstroms erarbeitet und sind somit nicht ohne Weiteres zu vergleichen. In dem vorliegenden Fall wurde eine Aktivierungsenergie der Regeneration von 0,55 eV bestimmt. Dieser Wert liegt somit leicht über dem Wert, der durch ESTREICHER für die Wasserstoffdiffusion im Silizium von 0,48 eV aufgeführt wurde und wird an dieser Stelle als grober Richtwert mit aufgeführt [Est11].

Durch die in dieser Arbeit errechneten Aktivierungsenergien ergeben sich einige Schlussfolgerungen. Wie in Abbildung 6.7. links oben zu erkennen ist, durchlaufen die Natriumionen, getrieben von der lokal anliegenden negativen Spannung U_{Cell} auf dem Weg (oben nach unten) zu den Stapelfehlern im Silizium diverse Materialschichten (Glas, EVA, SiNx und SiOx). Die Natriumionen können dabei erst quantifiziert werden, wenn sie sich in den Stapelfehlern anlagern. Erst zu diesem Zeitpunkt wirken die mit Natrium besetzten Stapelfehler wie ein lokaler Kurzschluss und verringern den gesamt Shunt-Widerstand. In Abbildung 6.7. links unten ist zusätzlich schematisch der Verlauf der Energien (Potentiallandschaft) für ein Natriumion eingezeichnet. Das Natriumion befindet sich zunächst im Potentialminimum I. Um sich zu bewegen, muss das Natriumion die Aktivierungsbarriere E_{Ia} oder E_{Ib} überwinden. Insofern dass kein elektrisches Feld angelegt ist (oranger Verlauf), bewegt sich das Ion im thermodynamischen Gleichgewicht in beide Richtungen. Die Rate der Platzwechsel nach links und rechts ist gleich groß.

6. Interpretation und Diskussion der Versuchsergebnisse

Dadurch existiert netto kein gerichteter Materialstrom.

Durch das Anlegen eines elektrischen Felds E_{el} verändert sich jedoch die Potentiallandschaft und die Aktivierungsbarriere E_{Ia} ist nun höher als E_{Ib} . In Summe führt dies zu einem Ungleichgewicht der Platzwechselraten und ein Driftstrom in Richtung Solarzelle zu den Potentialminima der Stapelfehler (II und III) entsteht. Die mittlere Aktivierungsenergie E_A , die für das Durchlaufen des Driftpfads notwendig ist, beträgt 0,82 eV. Die Platzwechsel geschehen ferner mit einer Frequenz von $6,9 \cdot 10^{13}$ Hz.

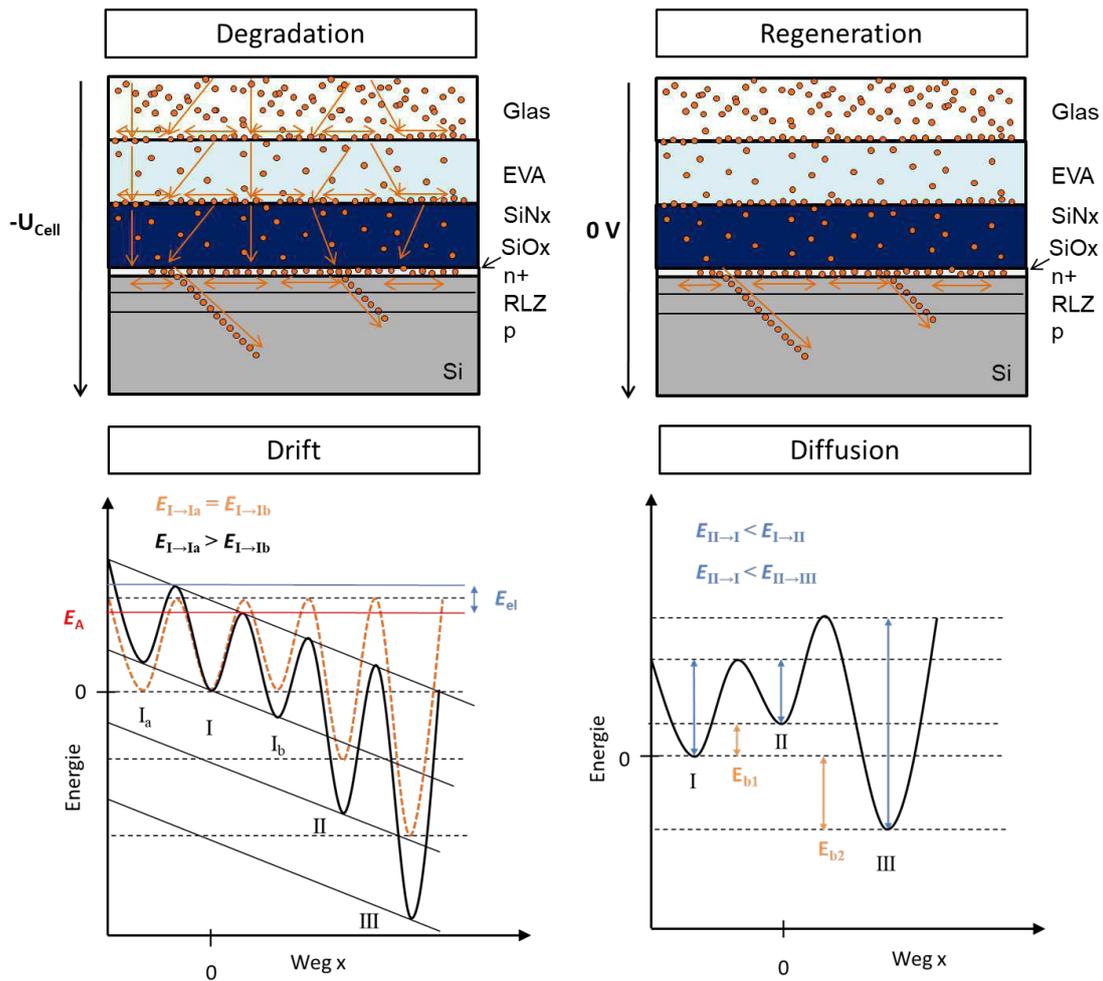


Abbildung 6.7.: Drift- und Diffusionspfade der Degradation und Regeneration sowie die korrespondierenden Potentiallandschaften mit eingezeichneten Energieniveaus

Die Pfade der Natriumionen während der Regeneration verhalten sich abweichend zu denen der Degradation. Im Falle der Regeneration wird vermutet, dass hauptsächlich die Pipe-Diffusion entlang der Versetzungen maßgebend ist (vgl. Abbildung 6.7. oben rechts). Dies liegt ebenso darin begründet, dass der Shunt-Widerstand als PID-Indikator herangezogen wurde. Der Shunt-Widerstand erholt sich unmittelbar nachdem die Natriumionen die Stapelfehler verlassen haben, eine weitere Wanderung der Ionen kann nicht durch die Messergebnisse bestimmt werden. Dadurch, dass sich eine hohe Konzentration von Natriumionen im Bereich der Stapelfehler befindet, sind im Idealfall die gesamten

6. Interpretation und Diskussion der Versuchsergebnisse

Potentialminima (II und III) besetzt und eine Netto-Teilchenbewegung resultiert aus den Stapelfehlern heraus.

Die berechnete Aktivierungsbarriere ($E_{\text{II} \rightarrow \text{I}}$) für die Regeneration in Höhe von 0,55 eV lassen zudem vermuten, dass die Anreicherung von Natriumionen innerhalb der Stapelfehler die Aktivierungsenergie herabsetzt und damit zusätzlich die Diffusion aus den Stapelfehlern heraus begünstigt. Die Bindungsenergie E_{b1} kann durch die Subtraktion der Aktivierungsbarrieren ($E_{\text{I} \rightarrow \text{II}}$) der Degradation und der Aktivierungsbarriere ($E_{\text{II} \rightarrow \text{I}}$) der Regeneration bestimmt werden und beträgt im vorliegenden Fall -0,27 eV. Die tatsächliche Bindungsenergie wird in der Realität etwas höher liegen, da die Reduzierung der Energiebarriere durch das elektrische Feld während der Degradation noch Berücksichtigung finden muss. Damit gehen die positiven Natriumionen nur schwache oder gar keine Bindungen mit den Siliziumatomen ein, wenn man sie in Relation mit kovalenten Einfachbindungen setzt, die im Energiebereich von 1,5 und 5 eV liegen oder Ionenbindungen, die noch weitaus höher liegen [Huh03]. Der deutlich niedrigere Frequenzfaktor von $4,9 \cdot 10^9$ Hz bestätigt darüber hinaus, dass die Regeneration im Verhältnis zur Degradation bei gleicher Temperatur deutlich langsamer voranschreitet.

Das Phänomen, dass sich der Shunt-Widerstand nach einer starken Degradation nicht wieder auf seinen Anfangswert erholt, kann zudem damit erklärt werden, dass die Natriumionen womöglich vereinzelt doch Bindungen mit den Siliziumatomen eingehen bzw. sich an sogenannten „Trapping-Center“ (vgl. III in Abbildung 6.7) anlagern [Koi74]. Diese Vermutung beruht auf der Erkenntnis, dass die PID nicht vollständig reversibel ist, sondern zu Teilen auch nach aktiver Regeneration mit positiver Spannung, bestehen bleibt [Koc12b]. Die Aktivierungsbarriere ($E_{\text{III} \rightarrow \text{I}}$) und somit die Bindungsenergie E_{b2} der tiefer liegenden Trapping-Center konnte jedoch anhand der Messergebnisse nicht ermittelt werden. Um die Eigenschaften der Trapping-Center besser verstehen zu können, sollte für zukünftige Arbeiten die Proben zusätzlich systematisch mittels positiver Spannung regeneriert werden. Anhand dieser Untersuchungen ist es sehr wahrscheinlich möglich, die Bindungsenergien der tiefer liegenden Trapping-Center relativ genau zu bestimmen.

7. Vorhersagemodell für die PID

Basierend auf den in den vorherigen Kapiteln erarbeiteten Erkenntnissen wurde vom Verfasser ein phänomenologisches Modell erarbeitet, mit dessen Hilfe die Vorhersage des PID-Verhaltens des betrachteten Probenaufbaus ermöglicht wird. Die Grundlage hierfür liefern die bereits ermittelten beschleunigenden und verzögernden Einflussfaktoren der Regeneration und Degradation. Überdies werden die Erkenntnisse aus den Analysen der PID-Verläufe unter realen Bedingungen aus dem vorangegangenen Kapitel verarbeitet. Die Berechnungen wurden auf Basis des Programms Visual Basic von Microsoft umgesetzt.

Die Simulation wurde mittels historischer Wetterdaten gespeist. Ein Ziel der folgenden Analysen war dabei, Simulationsergebnisse an Standorten mit nördlicher bzw. südlicher Entfernungen zum Äquator miteinander zu vergleichen. Hintergrund dieses Vergleichs sind die unterschiedlichen Ausprägung der Jahreszeiten, die mit steigender Entfernung zum Äquator prägnanter werden.

Der erste entscheidende Punkt der Simulation ist die Berechnung der Probertemperatur. Die Probertemperatur wird hauptsächlich aus der Umgebungstemperatur und der sich ändernden Globalstrahlung während des Tagesverlaufs berechnet. Die detaillierte Berechnung aus Klimadaten wird im Anhang A.2. erläutert.

Die nun folgenden Abschnitte beschreiben die unterschiedlichen Entwicklungsschritte des PID-Modells. Die Entwicklung zu einem realitätsnahen Degradationsmodell wird in drei Stufen erfolgen. Dabei entspricht jede neue Stufe einer Weiterentwicklung der vorherigen. Die Stufen wurden so gewählt, dass im ersten Schritt die prägnantesten Einflussfaktoren implementiert wurden und sich das Modell mit jeder Stufe verfeinert und weitere, weniger prägnante Einflussgrößen integriert. Im Anschluss daran werden die simulierten Ergebnisse mit real gemessenen Widerstandsverläufen von Minimodulen sowie Modulgrößen verglichen.

7.1. Iteratives Modellkonzept

Zur Einführung in das Thema ist in Abbildung 7.1. das Ablaufschema des Modellkonzepts zur Vorhersage von PID mittels Umweltdaten dargestellt. Es besteht im Prinzip aus den Eingangsgrößen, welche anhand der Klimadaten bestimmt werden, und drei iterativen Modellstufen. Jede der Modellstufen baut auf die vorangegangene auf und erweitert diese um einen oder mehrere Aspekte. Grundsätzliches Ziel des Gesamtmodells ist es, die kurzzeitigen Degradationserscheinungen, die in Kapitel 5.5. beobachtet wurden, mit denen der Langzeitdegradationsverläufe aus Kapitel 4.5. zu kombinieren und zusätzlich nahezu die gesamten im Labor erforschten Abhängigkeiten zu implementieren. Die drei

7. Vorhersagemodell für die PID

Stufen des iterativen Ansatzes werden mit Degradationsmodell, Regenerationsmodell und Kurzzeitmodell benannt.

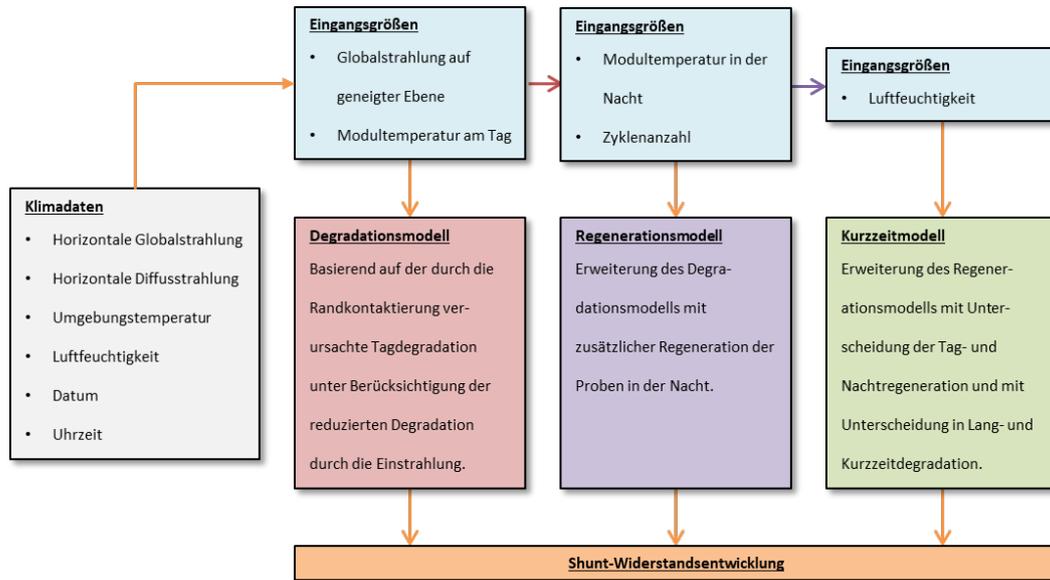


Abbildung 7.1.: Struktur des Gesamtmodells mit seinen einzelnen Teilmodellen: Degradationsmodell, Regenerationsmodell und Kurzzeitmodell

Zu Beginn der Simulationsberechnung wird anhand der Wetterdaten die Einstrahlung auf die Proben bestimmt. Im weiteren Verlauf der Simulation werden alle Stundenwerte, welche einen Globalstrahlungswert von größer 50 W/m^2 aufweisen, als Tagesstunden, alle Globalstrahlungswerte kleiner oder gleich 50 W/m^2 , als Nachtstunden aufgefasst. Überdies wird die Systemspannung in Höhe von -1000 V für die Tagesstunden als konstant angenommen. Dies deckt sich mit den Rahmenbedingungen der bereits präsentierten Versuchen, bei denen die Spannung mittels Helligkeitssensor zu- und abgeschaltet wurde. Ausgehend dieser Unterscheidung wird für die Tagstunden die Degradation und für die Nachtstunden die Regeneration und die jeweiligen Berechnungsformeln zugrunde gelegt.

Im Anschluss an die Auswahl der Berechnungsformel wird die Probertemperatur des folgenden Zeitraums von einer Stunde bestimmt (siehe Anhang A.2.). Anhand der Temperatur werden die Faktoren s_1 , p_1 und $A_{1,2}$ für die Degradation und die Faktoren s_2 , p_2 und $A_{2,2}$ für die Regeneration, der S-Funktion auf Basis der Laborergebnisse errechnet. Diese werden je nach angewendetem Simulationsmodell mit zusätzlichen Einflussfaktoren und ihren korrespondierenden Parameteränderungen $\Delta s_1/\Delta s_2$, $\Delta p_1/\Delta p_2$ und $\Delta A_{1,2}/\Delta A_{2,2}$ verrechnet. Mittels der resultierenden Koeffizienten wird anschließend das resultierende Shunt-Widerstandslevel $R_{SH,1+x}$ für den Zeitraum von einer Stunde bestimmt und die Berechnung der ersten Stunde ist abgeschlossen (vgl. Abb. 7.2.).

7. Vorhersagemodell für die PID

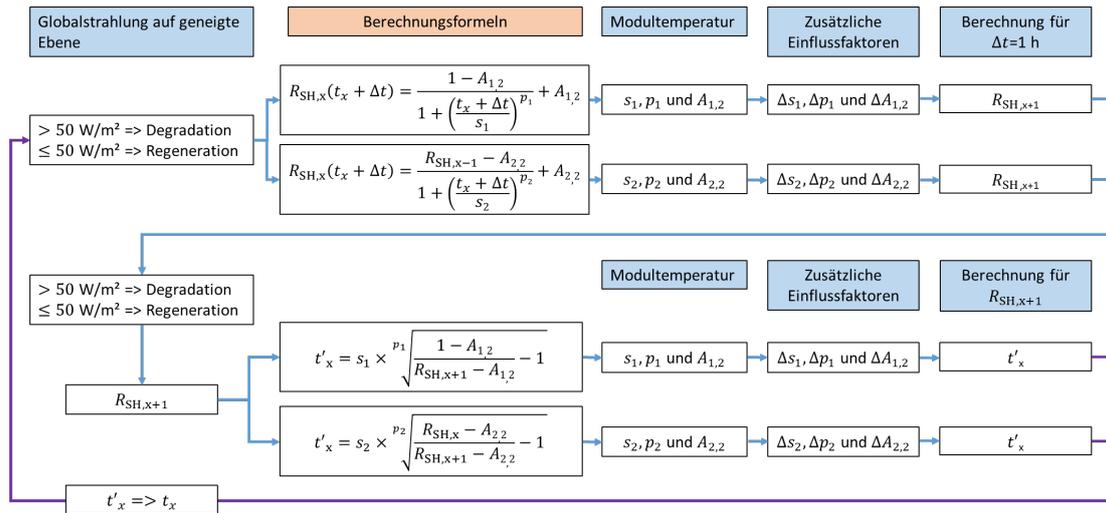


Abbildung 7.2.: Grundlegendes Berechnungsschema für das PID-Simulationsmodell

Für die Berechnung der nächsten Stunde, muss im Anschluss das Zeitäquivalent (t'_x) des aktuell berechneten Shunt-Widerstands ($R_{SH,x+1}$) im Hinblick auf die neue Funktion ($R_{SH,x+2}$) der darauf folgenden Stunde ermittelt werden. Konkret bedeutet dies, dass das berechnete Shunt-Widerstandslevel nur in Kombination mit den Parametern s_1 , p_1 und $A_{1,2}$ (im Falle der Degradation) der ersten Stunde auch der Shunt-Widerstandsentwicklung von exakt einer Stunden entspricht. Ändern sich nun die Parameter der S-Funktion, ändert sich auch der korrespondierende Zeitpunkt, wann dieses Shunt-Widerstandslevel erreicht wird. Dieser muss zunächst ermittelt werden, damit von diesem Zeitpunkt ausgehend die nächste Shunt-Widerstandsentwicklung von einer Stunde berechnet werden kann. Dies geschieht erneut durch die Abfrage der Einstrahlung und der Bestimmung, ob es sich im nächsten Schritt um eine Degradations- oder Regenerationsphase handelt. Daraufhin wird mit Hilfe der entsprechenden Formel und den dazugehörigen Parametern der Zeitpunkt t'_x ermittelt. Abschließend wird das neue Shunt-Widerstandslevel $R_{SH,x+2}$ für die nächste Stunde berechnet. Für jede Stunde wird dieser Rechenschritt sukzessive wiederholt.

Für den späteren Standortvergleich ist der Ausfallzeitpunkt mit dem in Kapitel 1.2. diskutierten Widerstandslevel von 15 % des normierten Shunt-Widerstands definiert.

7.2. Das Degradationsmodell

Die erste Phase des Vorhersagemodells basiert auf den drei entscheidenden Erkenntnissen der vorangegangenen Untersuchungen. Die Temperatur ist der dominierende Einflussfaktor der PID, weshalb sie als treibende Kraft der PID bezeichnet werden kann (vgl. Kap. 5.1.2.). Des Weiteren stellt die Einstrahlung einen der stärksten Verzögerungsfaktoren der Degradation (vgl. Kap. 5.1.4.) dar. Zusätzlich dominiert die vom Rand ausgehende Degradation (vgl. Kap. 4.5.). Anhand dieser drei Grundthesen wurden die unterschiedlichen klimatischen Standorte mittels eines ersten Modells untersucht und miteinander verglichen. Die Regeneration wurde dabei bewusst nicht betrachtet.

7. Vorhersagemodell für die PID

Zu Beginn wird die Einstrahlung auf die Proben und im Anschluss daran deren Temperatur ermittelt (siehe Kap. A.2.). Anhand der Temperatur werden die Faktoren s_1 und p_1 auf Basis der Laborergebnisse bestimmt. Diese werden mit den jeweiligen Unterschieden Δs_1 und Δp_1 aufgrund der Einstrahlung verrechnet. Mittels der Parameter wird nun die Shunt-Widerstandsänderung für den Zeitraum von einer Stunde ermittelt. $A_{1,1}$ und $A_{1,2}$ nehmen für die gesamte Simulation konstant den Wert 1 und 0 an. Für jede Tagesstunde wird dieser Rechenschritt sukzessive wiederholt. In allen anderen Simulationsstunden bleibt der Shunt-Widerstand konstant.

Mit dem ersten Modell ist es bereits möglich, unterschiedliche Standorte auf ihren Degradationsverlauf hin zu untersuchen. Zur Veranschaulichung wurden die Standorte Berlin, Nikosia, Miami, Las Vegas, Seattle und Singapur ausgewählt. Die Auswahl erfolgte aufgrund der deutlich unterschiedlichen klimatischen Bedingungen der jeweiligen Standorte, was insbesondere Berlin, Nikosia, Miami und Singapur betrifft. Der Standort Seattle wurde zur Validierung ausgewählt, da er ein ähnliches Klima wie Berlin aufweist. Dasselbe gilt für das Städtepaar Las Vegas und Nikosia. Abbildung 7.3. zeigt alle Degradationsverläufe der Standorte in einer Graphik. Der Beginn der Simulation ist jeweils der 1. Januar des betrachteten Jahres. Die Tabelle 7.1. zeigt die einzelnen Ausfallzeitpunkte im Überblick.

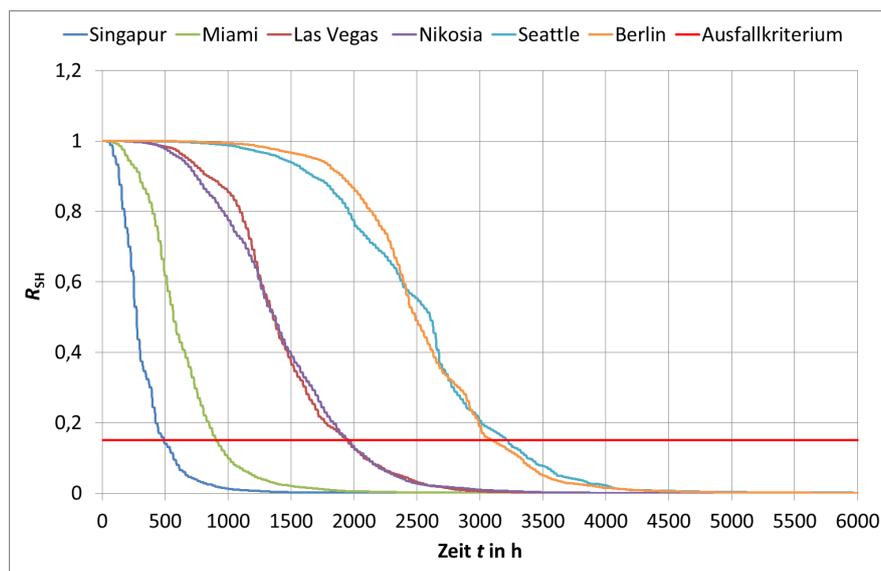


Abbildung 7.3.: Vergleich der Degradationsverläufe des Shunt-Widerstands unterschiedlicher Standorte anhand des Degradationsmodells

An erster Stelle kann festgehalten werden, dass durch die Simulation deutliche Unterschiede der Degradationsverläufe für die einzelnen Standorte berechnet werden. Es ist erkennbar, dass die Standorte nahe des Äquators eine schnellere Alterung zeigen als weiter entlang der Längengrade entfernte Standorte. Die klimatisch ähnlichen Standorte zeigen auch eine ähnliche Ausfallzeit (vergleiche Tab. 7.1.).

Dessen ungeachtet wird bei der Analyse der Ergebnisse etwas Grundsätzliches deutlich. Die schnelle Degradationsgeschwindigkeit der Proben ist ein Vorteil bei der Kennwertbestimmung im Labor und der Alterungsanalyse unter realen Bedingungen. Allerdings

7. Vorhersagemodell für die PID

wird dies bei der Auswertung der unterschiedlichen Standorte hinsichtlich des Einflusses der wechselnden Jahreszeiten zum Nachteil. Alle Proben erreichen innerhalb weniger Monate bereits das Ausfallkriterium und eine differenzierte Betrachtung des Jahreszeiteinflusses ist nicht ohne Weiteres möglich.

Tabelle 7.1.: Vergleich der Ausfallzeitpunkte in Stunden und Tagen unterschiedlicher Standorte anhand des Degradationsmodells

Standort	Ausfallzeitpunkt in Stunden	Ausfallzeitpunkt in Tagen
Singapur	491	20
Miami	903	38
Las Vegas	1951	81
Nikosia	1956	82
Berlin	3104	129
Seattle	3224	134

Aufgrund der schnellen Degradationsgeschwindigkeit ist es von entscheidender Bedeutung, welches Datum als Start der Simulation gewählt wird. Ein Start beispielsweise am 1. Januar in Berlin zeigt einen klaren Unterschied zu einem Start am 1. Juli in Berlin. Dies wird insbesondere an unterschiedlichen Ausfallzeitpunkten in Berlin deutlich. Simuliert man beispielsweise die Ausfallzeit beginnend im Sommer, liegt der simulierte Ausfallzeitpunkt bei 21 Tagen. Der Ausfallzeitpunkt bei einem Start im Winter liegt dagegen bei 129 Tagen.

Um dennoch den Einfluss der Jahreszeiten zu studieren, kann anhand einer Logarithmierung der Ordinate, der Shunt-Widerstandsverlauf Rückschlüsse auf den Einfluss der saisonal bedingten Wetterschwankungen zeigen. In Abbildung 7.4. sind die drei klimatisch unterschiedlichsten Standorte abermals, jedoch mit logarithmischer Ordinate, gegenübergestellt.

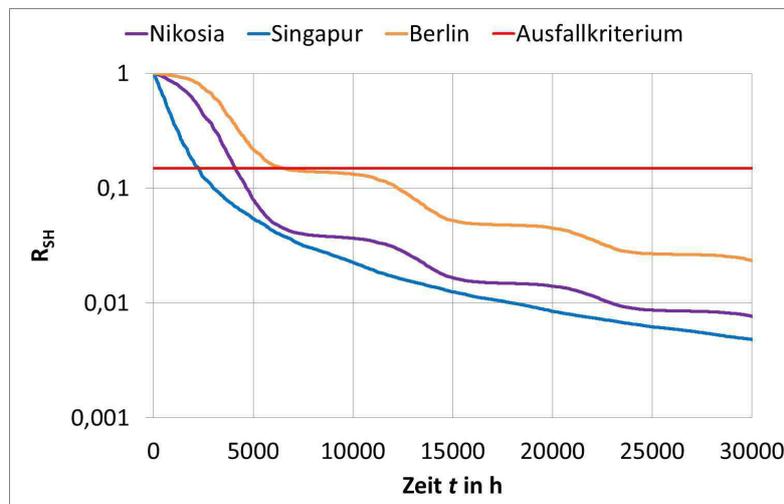


Abbildung 7.4.: Vergleich der Degradationsverläufe unterschiedlicher Standorte anhand des Degradationsmodells in logarithmischer Darstellung

7. Vorhersagemodell für die PID

Durch die Modifikation können nun die Verläufe über einen weitaus größeren Zeitraum betrachtet werden. Am Beispiel Singapur ist ein stetiger Abfall des Shunt-Widerstands zu verzeichnen. Die Nähe Singapurs zum Äquator hat zur Folge, dass sich vor Ort keine Jahreszeiten ausbilden und somit die Alterung kontinuierlich über das Jahr anhält. Nikosia wiederum zeigt, durch seine hohe Durchschnittstemperatur im Sommer, einen sehr steilen Abfall des Shunt-Widerstands zu Beginn der Simulation. Der Verlauf bildet im weiteren Fortschritt einen wellenförmigen Graphen aus. Dieser charakteristische Verlauf findet sich genauso deutlich bei der Berlin-Simulation wieder. Grund für die Periodizität sind die Unterschiede der Temperatur und der Sonnenstandsentwicklung der Jahreszeiten. Im Sommer geschieht die Degradation aufgrund der langen Tage und hohen Temperaturen beschleunigt und im Winter kommt sie durch die kurzen Tage und geringen Temperaturen fast zum Erliegen.

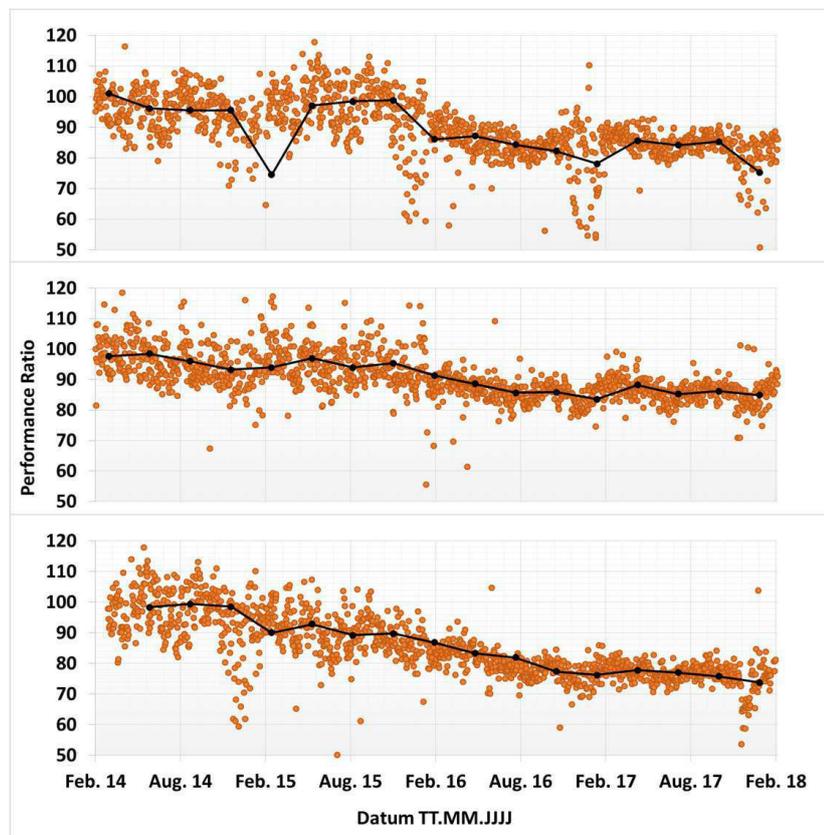


Abbildung 7.5.: Entwicklung der Performance Ratio PID-betroffener Kraftwerke in unterschiedlichen Klimaregionen (gemäßigt kontinental, gemäßigt maritim und subtropisch maritim)

Dies deckt sich hervorragend mit den in Kapitel 4.5. gemachten Beobachtungen, bei denen genau diese saisonale Schwankung an realen Proben detektiert wurde. Ebenso konnte ein solches Verhalten bei der Analyse von realen Kraftwerken in Ansätzen ermittelt werden. Dies konnte beispielhaft mittels einer Analyse der Performance-Ratio-Entwicklung⁶ mehrerer Kraftwerke gezeigt werden. Die Fertigstellung aller Kraftwerke erfolgt in den

⁶ Das Performance Ratio (PR) beschreibt das Verhältnis zwischen dem tatsächlichen Nutzertrag und dem Soll-Ertrag einer Anlage.

7. Vorhersagemodell für die PID

Wintermonaten 2014. Die Kraftwerke befinden sich in unterschiedlichen Regionen Frankreichs. In allen Kraftwerken wurde derselbe PID-anfällige Modultyp verbaut. Für die PR des in gemäßigten kontinentalen Klima befindlichen Kraftwerks lässt sich ein stufenförmiger Verlauf erkennen (Abb. 7.5.). Dieser Verlauf flacht für den gemäßigten maritimen Standort deutlich ab. Der Grund hierfür sind mit hoher Wahrscheinlichkeit die weniger deutlich ausgebildeten Jahreszeiten, was natürlicherweise auf der Nähe zum Meer gründet.

Für den subtropischen Standort ist kein stufenförmiger Verlauf mehr auszumachen und ein nahezu linearer Abfall der PR ist zu verzeichnen. Zusätzlich ist die durchschnittliche PR im letzten Aufzeichnungsjahr 2017 deutlich niedriger (76) im Vergleich zu den anderen beiden Standorten (gemäßigt kontinental 81 und gemäßigt maritim 85).

Die Analyse der PR ist jedoch mit Vorsicht zu behandeln. Die PR wird nicht allein durch die PID bestimmt. Zusätzliche Modulalterungsmechanismen, wie beispielsweise die Weiterentwicklung von Zellbrüchen oder der Ausfall von Bypass-Dioden reduzieren in den ersten Jahren die PR [Koe14]. Darüber hinaus spielt die zeitliche Veränderung der Verschmutzung der Modulfrontseite bzw. mögliche Reinigungsintervalle eine merkliche Rolle für die Höhe der PR. Am deutlichsten wird dies bei der Betrachtung der PR für den in gemäßigten kontinental befindlichen Standort. Hier ist für die jeweiligen Wintermonate ein markanter Abfall der PID zu verzeichnen. Dieser Abfall entsteht allein durch Schnee und Eis, welche sich auf den Modulen ablagern. Es wird zusätzlich vermutet, dass die Verschmutzung durch Abgase, welche durch den stark frequentierten Parkplatz in der Nähe verursacht werden, diesen Effekt noch weiter verstärken.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Analyse von PR-Daten im Nachhinein nur schwer eindeutige Erkenntnisse hinsichtlich PID zulässt. Es gibt jedoch Indizien dafür, dass die PID saisonalen Schwankungen – wie durch die Simulation gezeigt – unterworfen ist und diese umso schwächer wird je weniger stark die Jahreszeiten ausgebildet sind. Auch scheint die jährliche Durchschnittstemperatur einen Einfluss auf die Degradationsgeschwindigkeit zu besitzen.

7.3. Das Regenerationsmodell

Im nächsten Schritt des Modellkonzepts soll nunmehr das Regenerationsverhalten der Proben implementiert werden. In dem sogenannten Regenerationsmodell werden alle Stunden, in denen die Einstrahlung weniger als 50 W/m^2 beträgt, nicht als konstant, sondern als Regenerationszeit deklariert. Für die Regeneration wurden die Ergebnisse aus den Kapiteln 5.3.3. und 5.3.2. herangezogen. Ähnlich wie bei der Degradation wurden für jeden stündlichen Berechnungsschritt die Parameter s_2 und p_2 in Abhängigkeit von der jeweiligen Temperaturwerte bestimmt. Zusätzlich wurden, nach dem Erreichen gestaffelter Werte ($5 \cdot R_{SH,tx} < R_{SH,tx+1}$), die Degradationsparameter der Regeneration mittels der Faktoren $k_{sz,2}$ und $k_{pz,2}$ verrechnet, um die reduzierte Regenerationsfähigkeit nach mehreren Zyklen zu berücksichtigen.

7. Vorhersagemodell für die PID

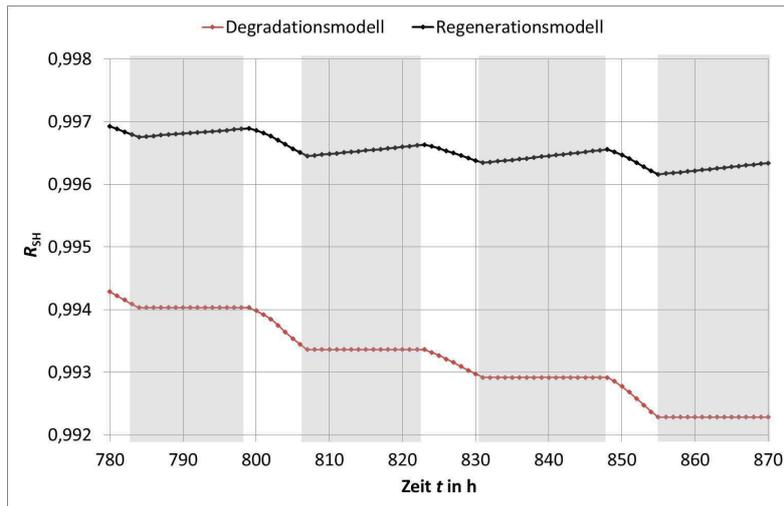


Abbildung 7.6.: Vergleich der unterschiedlichen Verläufe von Degradationsmodell und Regenerationsmodell in zeitlich hoch aufgelöster Darstellung

Um die unterschiedlichen Berechnungsweisen zu veranschaulichen, wird das Degradationsmodell dem Regenerationsmodell gegenübergestellt. Wie in Abbildung 7.6. am Beispiel Seattle illustriert wird, zeigen der Shunt-Widerstand zwischen 780 und 870 Stunden nach Beginn der Spannungsbelastung ein deutlich voneinander abweichendes Verhalten. Am Tag (weißer Hintergrund) zeigen beide Modelle einen linearen Abfall des Shunt-Widerstands. In den Nachtphasen (grauer Hintergrund) bleibt der Shunt-Widerstand, bei der Berechnung mittels Degradationsmodell (roter Verlauf) konstant auf einem Wert. Bei Ermittlung mittels Regenerationsmodell (schwarzer Verlauf) steigt dieser an. Die Änderungen sind von ihrem Betrag her sehr gering, was damit zusammenhängt, dass 780 Stunden kalendarisch dem 2. Februar entsprechen. Somit sind die Probertemperaturen in dem betrachteten Zeitintervall auf einem konstant niedrigem Level. Dieses vergrößert sich später im Jahr mit steigenden Temperaturen. Durch die Implementierung der Regeneration kann somit das Zickzackverhalten, welches an realen Proben beobachtet wurde (vgl. Abb. 5.20. und 5.21.), simuliert nachempfunden werden.

Für den Gesamtdegradationsverlauf bedeutet die nächtliche Erholung des Shunt-Widerstands eine längere Lebensdauer der Proben. Die Alterungsverläufe in Abhängigkeit vom Standort sind in der Abbildung 7.7. und der Tabelle 7.2. vergleichend zusammengefasst. Für die klimatisch ähnlichen Standortpärchen Nikosia/Las Vegas (lila/rot) und Berlin/Seattle (orange/hellblau) erhält man erneut ungefähr dieselbe Lebensdauer.

7. Vorhersagemodell für die PID

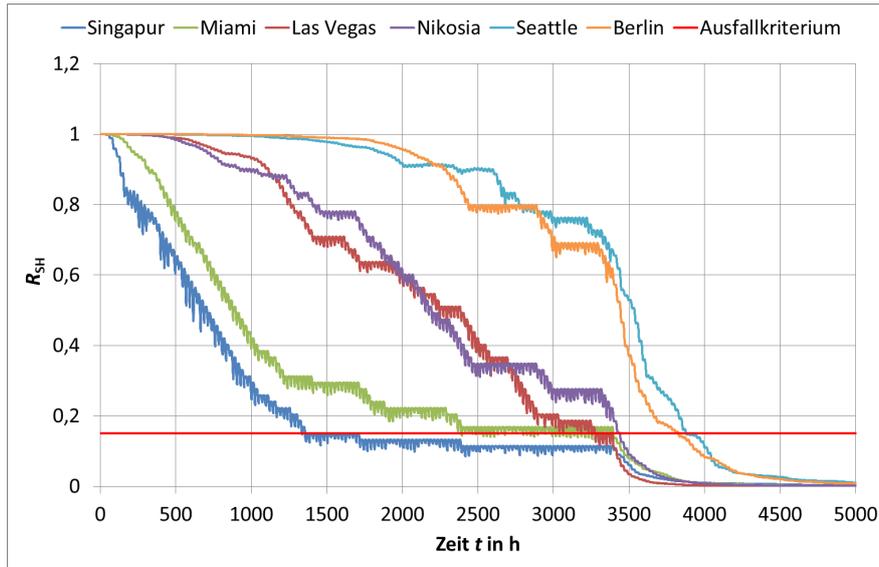


Abbildung 7.7.: Vergleich der Alterungsverläufe unterschiedlicher Standorte anhand des Regenerationsmodells

Tabelle 7.2.: Vergleich der Ausfallzeitpunkte in Stunden und Tagen unterschiedlicher Standorte anhand des Regenerationsmodells

Standort	Ausfallzeitpunkt in Stunden	Ausfallzeitpunkt in Tagen
Singapur	1520	63
Miami	2922	122
Las Vegas	3284	137
Nikosia	3439	143
Berlin	3827	159
Seattle	3890	162

Stellt man die Ergebnisse, denen des vorangegangenen Modells gegenüber, so hat sich die Zeit zum Erreichen des Ausfallkriteriums verlängert. Die Entfernung zum Äquator bestimmt dabei erneut die Degradationsgeschwindigkeit. Es zeigt sich, dass in den hier betrachteten Fällen die Degradation über einen langen Zeitraum – wie bereits diskutiert – stets gegenüber der Regeneration dominiert.

Die größte Änderung in der Ausfallzeit offenbart sich für das Regenerationsmodell, bei den Standorten Miami (grün) und Singapur (blau), für beide verdreifacht sich die Ausfallzeit. Ausschlaggebend hierfür sind die hohen Nachttemperaturen. Durch deren konstant hohes Level verzögert die Regenerationsperioden die Degradation besonders stark. Eigentlich sollte man vermuten, dass die Degradation aufgrund der konstant hohen Luftfeuchtigkeit besonders schnell abläuft. Der Grund für dieses gegensätzliche Ergebnis liegt mit höchster Wahrscheinlichkeit im fehlenden Einfluss der Regentage. Dieser Sachverhalt wird, mittels der nächsten Modellerweiterung genauer beleuchtet.

7.4. Das Kurzzeitmodell

In den Kapiteln 5.2. und 4.6. wurden Ergebnisse präsentiert, anhand derer eine Überlagerung zweier Degradationsmechanismen identifiziert werden konnten. Überlagert werden die durch Randkontaktierung getriebene Degradation, auf die allein die nächtliche Regenerationsperiode wirkt, und die weitaus stärkere, durch vollflächige Kontaktierung getriebene, Degradation auf die die ebenfalls stärkere Regenerationsphase unter Einstrahlung folgt. Diese Mechanismen wurden in dem folgenden Modell implementiert. Als Randbedingung wurde für jede Morgenstunde eine Betaung der Proben angenommen. An dieser Stelle war jene Vereinfachung notwendig, da die detaillierte Berechnung einer Betaung mit der Auflösung von einer Stunde nicht für eine adäquate Betaungszeitberechnung ausreichend ist.

Darüber hinaus wurden Stundenintervalle, für die die Luftfeuchtigkeit RH über 65 % beträgt, als Zeiten verrechnet, an denen die Proben eine flächige Kontaktierung aufweisen. In diesen Phasen ist die Degradation durch die entsprechenden p_1 und s_1 -Werte erhöht. Zuletzt wurde in dem Kurzzeitmodell berücksichtigt, dass die Regeneration am Tag ebenso gesteigert ist.

Durch die weitere Differenzierung des Simulationsmodells bilden sich – zusätzlich zu den saisonalen – zeitlich auf mehrere Tage begrenzten Schwankungen aus (vgl. Abb. 7.9.). Die Zeitperioden mit einer erhöhten Degradationsgeschwindigkeit sind durch Niederschlag oder hohe Luftfeuchtigkeit geprägt. Dies führt im Fall des Standortes Singapur (dunkelblauer Verlauf) zu einer besonders kurzen Dauer bis zum Erreichen des Ausfallkriteriums. Für andere Standorte erzeugt das Vorhersagemodell Zeitperioden, in denen die Alterung einen positiven Trend zeigt. Diese Zeitperioden charakterisiert eine geringere relative Luftfeuchtigkeit. Trotz dieser Schwankungen wird die Ausfalldauer maßgeblich durch die überlagerte Randkontaktierungsalterung bestimmt. Am deutlichsten wird dies anhand des Alterungsverlaufs von Las Vegas (roter Verlauf), bei dem durch die konstant niedrige Luftfeuchtigkeit die Schwankungen am geringsten ausfallen. Die einzelnen Ausfallzeitpunkte für die unterschiedlichen Standorte sind in Tabelle 7.3. aufgeführt und zeigen ein weiter nuanciertes Verhalten der einzelnen Städte.

Für die Standorte Berlin, Nikosia, Seattle und Las Vegas stellt sich dies durch eine moderate Erhöhung der Ausfallzeitpunkte dar. An diesen Standorten treten ausschließlich periodisch Regenzeiten auf. Die deutlich beschleunigten Alterungsphasen werden in den trockenen Zeitperioden durch eine Erholung wieder ausgeglichen und spiegeln somit sehr gut das reale Verhalten der Proben wider.

7. Vorhersagemodell für die PID

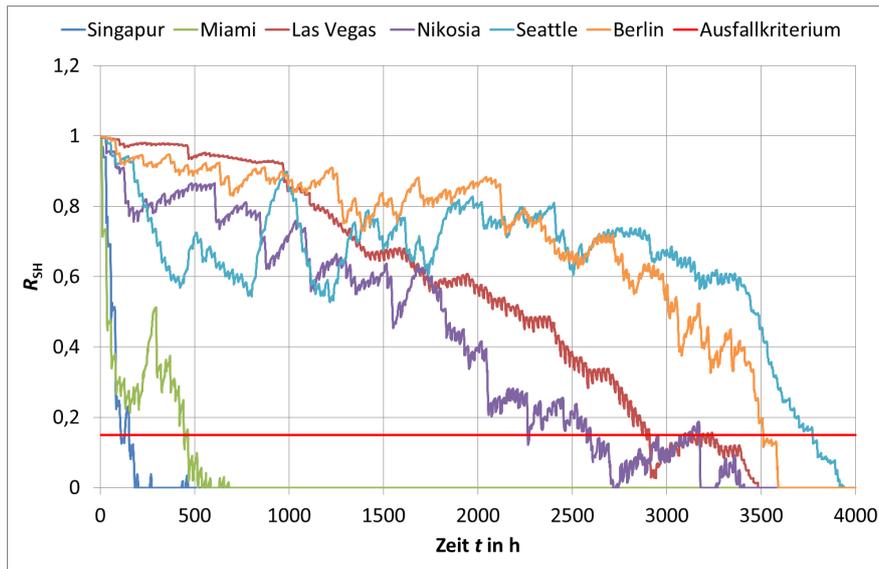


Abbildung 7.8.: Vergleich der Alterungsverläufe unterschiedlicher Standorte anhand des Kurzzeitmodells

Für die Standorte Berlin, Nikosia, Seattle und Las Vegas stellt sich dies durch eine moderate Erhöhung der Ausfallzeitpunkte dar. An diesen Standorten treten ausschließlich periodisch Regenzeiten auf. Die deutlich beschleunigten Alterungsphasen werden in den trockenen Zeitperioden durch eine Erholung wieder ausgeglichen und spiegeln somit sehr gut das reale Verhalten der Proben wider.

Tabelle 7.3.: Vergleich der Ausfallzeitpunkte in Stunden und Tagen unterschiedlicher Standorte anhand des Kurzzeitmodells

Standort	Ausfallzeitpunkt in Stunden	Ausfallzeitpunkt in Tagen
Singapur	130	5
Miami	454	19
Las Vegas	2921	122
Nikosia	3073	128
Berlin	3530	147
Seattle	3773	157

Die beiden Standorte Singapur und Miami sind im Gegensatz dazu durch konstante Regenperioden gekennzeichnet. Dies beeinflusst die Ausfallzeitpunkte immens: In beiden Fällen ist eine deutliche Erhöhung der Ausfallzeitpunkte zu verzeichnen.

7.5. Validierung der Simulationsergebnisse

Im vorangegangenen Abschnitt wurde die prinzipielle Wirkungsweise des Vorhersagemodells erläutert und klimatische Besonderheiten verschiedener Standorte und ihres Einflusses auf die PID-Entwicklung diskutiert. Inwieweit die jeweiligen Modellstufen reale PID-

Verläufe vorhersagen können, soll in den zwei folgenden Abschnitten für Mini-Module und für 60-Zellen-Module gleichen Materialaufbaus untersucht werden.

7.5.1. Ein-Zellen-Minimodule

Zur Validierung des iterativ entwickelten PID-Vorhersagemodells wurden die einzelnen Simulationsergebnisse mit dem in Kapitel 5.5.1. real gemessenen Shunt-Widerstandsverlauf (lila Verlauf) verglichen. Der erste Simulationsverlauf beruht auf dem in Kapitel 4.6. vorgestellten Degradationsmodell (roter Verlauf), der zweite auf dem in Kapitel 7.3. präsentierten Regenerationsmodell (oranger Verlauf) und der dritte auf dem im vorigen Kapitel erläuterten Kurzzeitmodell (schwarzer Verlauf). Um die Berechnungsweise des letzten Modells besser zu visualisieren, wurden zusätzlich die Zeiten, in denen die relative Luftfeuchtigkeit über 65 % beträgt, mit in die Abbildung aufgenommen (grüner Verlauf).

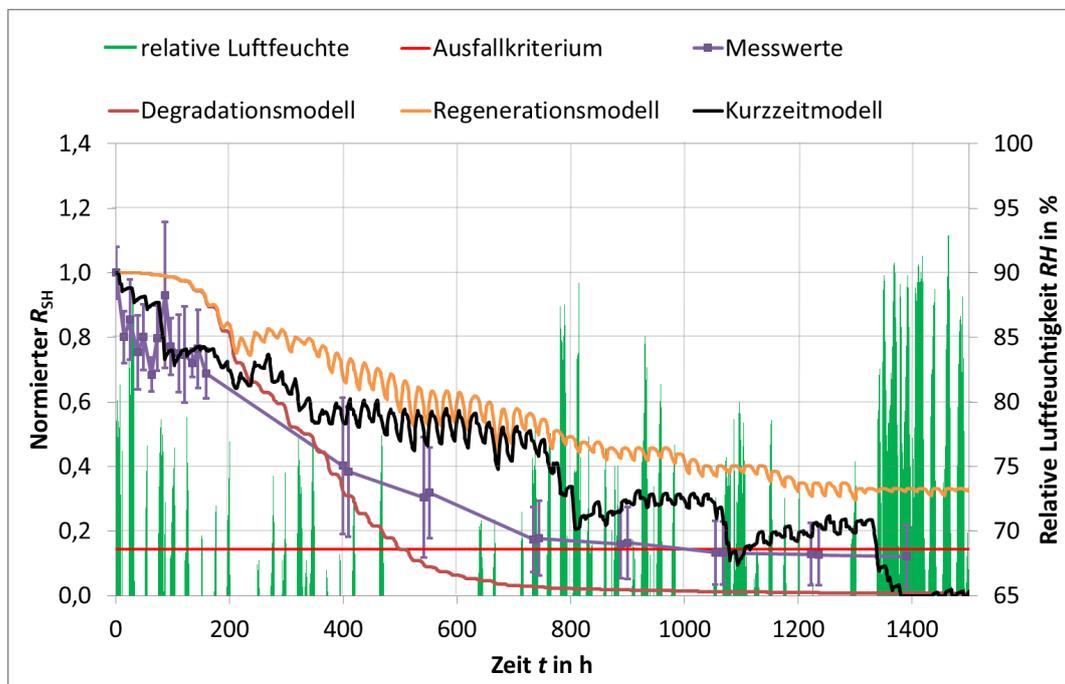


Abbildung 7.9.: Simulierter Degradationsverlauf mittels Degradationsmodell (rot), Regenerationsmodell (orange) und Kurzzeitmodell (schwarz) im Vergleich zu realen Messergebnissen. Zeitperioden, in denen die relative Luftfeuchtigkeit über 65 % betrug (grün), sind ebenfalls aufgetragen.

Die Darstellung zeigt, dass alle Simulationsmodelle einen ähnlichen Verlauf aufweisen. Zu Beginn sinkt der Shunt-Widerstand nur schwach und eine Induktionsphase bildet sich aus. Im weiteren Verlauf sinkt der Widerstand signifikant und die simulierten Verläufe heben sich deutlicher voneinander ab. Dabei erreicht das Degradationsmodell, welches jegliche Regeneration vernachlässigt, erwartungsgemäß zuerst das Ausfallkriterium nach 508 Stunden. Der Residuenquadratsumme des Degradationsmodells beträgt 0,86. Im Gegensatz dazu erreicht das Regenerationsmodell in dem gesamten betrachteten Zeitraum das Ausfallkriterium nicht. Zusätzlich beträgt die Residuenquadratsumme 1,66 und ist

7. Vorhersagemodell für die PID

damit fast doppelt so hoch wie die des Degradationsmodell.

Folgt man nun dem schwarzen Verlauf, wird die sehr gute Übereinstimmung mit den Messwerten gerade zu Beginn der Simulation deutlich. Im Zeitraum zwischen 0 und 160 Stunden beträgt die Summe der Residuumquadratrate 0,18. Zum Vergleich beläuft sich der Wert der anderen zwei Modelle in dem selben Zeitraum auf 0,59. Die Abweichung zwischen Simulations- und Messwerten wird im weiteren Verlauf wieder etwas größer, aber zum Erreichen des Ausfallkriteriums nähern sich die beiden Verläufe wieder an. Die Residuumquadratsumme des Kurzzeitmodells über den gesamten Zeitraum berechnet sich zu 0,59 und liegt somit deutlich unter denen der beiden anderen Modelle.

In diesem Beispiel werden die Wirkungsweisen der einzelnen Modelle noch einmal sehr deutlich. Das Degradationsmodell berechnet eine kontinuierliche Widerstandsreduktion, die nur durch die Nachtphasen unterbrochen wird. Im Unterschied dazu zeigt das Regenerationsmodell zusätzlich in der Nacht eine Ausheilung des Shunt-Widerstands, was wiederum ein periodisches Ansteigen und Abfallen des Verlaufs zur Folge hat. Das Kurzzeitmodell übernimmt diesen wellenförmigen Verlauf. Im Grunde folgt das Kurzzeitmodell dem Verlauf des Regenerationsmodells mit dem Unterschied, dass in Zeiten hoher Luftfeuchtigkeiten (Regentage) der Shunt-Widerstand eine ausgeprägte Beschleunigung erfährt. Diese starken Degradationsphasen werden teilweise während der trockenen Zeiten wieder neutralisiert.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass das Degradationsmodell und das Kurzzeitmodell zwar die geringere Summe der Residuumquadratrate aufweist, jedoch nur grob mit dem real gemessenen Shunt-Widerstandsverlauf übereinstimmen. Die Berechnungen auf Basis des Degradationsmodells zeigen, dass weder zu Beginn noch zum Ende der Beobachtungszeit eine gute Übereinstimmung existiert. Die Standardabweichung des Residuummittelwerts beträgt 0,17. Der Hauptgrund liegt mit großer Sicherheit in der Vernachlässigung der Regeneration, was zur Folge hat, dass die simulierte Degradation weitaus schneller voranschreitet als die gemessenen Werte dies aufzeigen. Auch das Kurzzeitmodell zeigt deutlich schwankende Unterschiede zu den Messungen, was sich in einer Standardabweichung des Residuummittelwerts in Höhe von 0,11 widerspiegelt. Im Vergleich dazu zeigt das Regenerationsmodell eine sehr gute Übereinstimmung mit dem prinzipiellen Verlauf des gemessenen Shunt-Widerstands. Auffällig ist, dass der Regenerationsmodellverlauf zwar grundsätzlich übereinstimmt (Standardabweichung des Residuummittelwerts 0,08), dieser sich jedoch konstant um den Wert 0,23 über den gemessenen Werten befindet. Eine mögliche Erklärung liefert die geringe Anzahl der gemessenen Zellen (siehe Abschnitt 4.8.3.). Für den dargestellten Verlauf wurden drei Proben vermessen und gemittelt. Den Messungen zur Bestimmung der Parameter, die den Simulationsmodellen zugrunde liegen, wurden zum Vergleich mehrere Dutzend Proben untersucht. Die Vermutung, dass dieser Unterschied zu den Messergebnissen durch das Kurzzeitmodell aufgehoben werden kann, konnte ebenso wenig bestätigt werden.

Zwar stimmt der Kurzzeitmodellverlauf zu Beginn gut mit den Messwerten überein und die jeweiligen Zeiten bis zum Erreichen des Ausfallkriteriums sind nahezu kongruent, doch scheinen die starken Schwankungen des Shunt-Widerstands zum Ende der Simu-

7. Vorhersagemodell für die PID

lation bei rund 800, 1100 sowie 1350 Stunden nicht das Verhalten der real gemessenen Werte widerzuspiegeln. Die starken Widerstandsgefälle, welche durch die Zeiten in denen im Zuge der Simulationsberechnung eine flächige Kontaktierung angenommen wurde, scheinen zu stark ausgebildet zu sein.

Zum einen ist dieser Sachverhalt damit zu erklären, dass die Untersuchung zu den PID-Tagesverläufen in Kapitel 5.5., dessen Ergebnisse und Schlussfolgerungen dem Kurzzeitmodell zugrunde liegen, an Proben durchgeführt wurden, die nur für wenige Tage belastet wurden. Es scheint, wie auch der Versuch zu dem Einfluss der Zyklen (vgl. Kap. 5.3.2.) zeigt, dass sich das Verhalten der Proben unter lang andauernder Belastung verändert. Diese Variation kann mehrere Ursachen haben, beispielsweise:

- Anreicherung der Zelloberfläche mit Natrium,
- Ausbildung von nicht regenerierbaren Kurzschlüssen,
- Veränderung der Einbettungsmaterialeigenschaften durch Verwitterung,
- Korrosion an der Zelloberfläche.

Darüber hinaus entwickelt sich die Oberflächenleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit kontinuierlich und nicht abrupt, wie es für das Simulationsmodell angenommen wurde. Damit existieren neben den zwei betrachteten Zuständen beliebig viele Zwischenzustände und somit auch Degradationsgeschwindigkeiten, die jedoch in der vorliegenden Simulation nicht berücksichtigt wurden. Abschließend ist noch zu bedenken, dass der gemessene Fortschritt aus der Mittlung dreier Shunt-Widerstandsverläufe resultiert und somit einer Glättung unterliegt.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass das Degradationsmodell nur eine grobe Abschätzung des Shunt-Widerstands zulässt und einer genauen Betrachtung nicht genügt. Durch das Regenerationsmodell wird eine deutliche Verbesserung erreicht, und der prinzipielle Verlauf des Shunt-Widerstands stimmt gut mit den Aufzeichnungen über den gesamten betrachteten Zeitraum überein. Das Kurzzeitmodell erhöht die Analogie zwischen gemessenen und berechneten Widerstandsverläufen insbesondere zu Beginn deutlich. Obwohl im weiteren Verlauf die Unterschiede zunehmen, nähern sie sich bis zum Erreichen des Ausfallkriteriums wieder einander an.

7.5.2. 60-Zellen-Module

Zum Abschluss der PID-Untersuchungen wird das PID-Verhalten zum einen hinsichtlich der Leistung und zum anderen hinsichtlich der 60-Zellen-Module untersucht. Zu diesem Zweck wurde die Leistung eines Moduls unter simulierten Kraftwerksbedingungen für rund 10000 Stunden aufgezeichnet. Das betrachtete Modul besteht aus exakt derselben Materialkomposition wie auch die in dieser Arbeit verwendeten Ein-Zellen-Minimodule (vgl. Kap. 4.2.). Es wurde im Zuge eines Ringversuches hergestellt, der unter anderem einen PID-Nachweisverfahrensvergleich mehrerer Laboratorien zum Ziel hatte und 2014 im Zuge der European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition vorgestellt wurde [Ber14].

7. Vorhersagemodell für die PID

Infolge dieser Untersuchungen wurde unter anderem ein Modul in einer Freifeldanlage durch das National Renewable Energy Laboratory in Miami installiert und mittels einer simulierten Systemspannung belastet. Ebenso wie bei den Minimodulen in Kapitel 4.7. wurde das Modul tagsüber mit einer negativen Spannung in Höhe von -1000 V gegen Erde verbunden und in der Nacht wieder getrennt. In regelmäßigen Abständen wurde in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen (Einstrahlungsschwellwert >700 W) die Leistung der Module bestimmt. Zusätzlich wurden durchgehend die Einstrahlungsdaten und die Umgebungsbedingungen aufgezeichnet. In Abbildung 7.10. ist der normierte Leistungsverlauf des Moduls, wie er zum Teil (0-5800 h) durch Peter HACKE 2014 veröffentlicht wurde, dargestellt [Hac14].

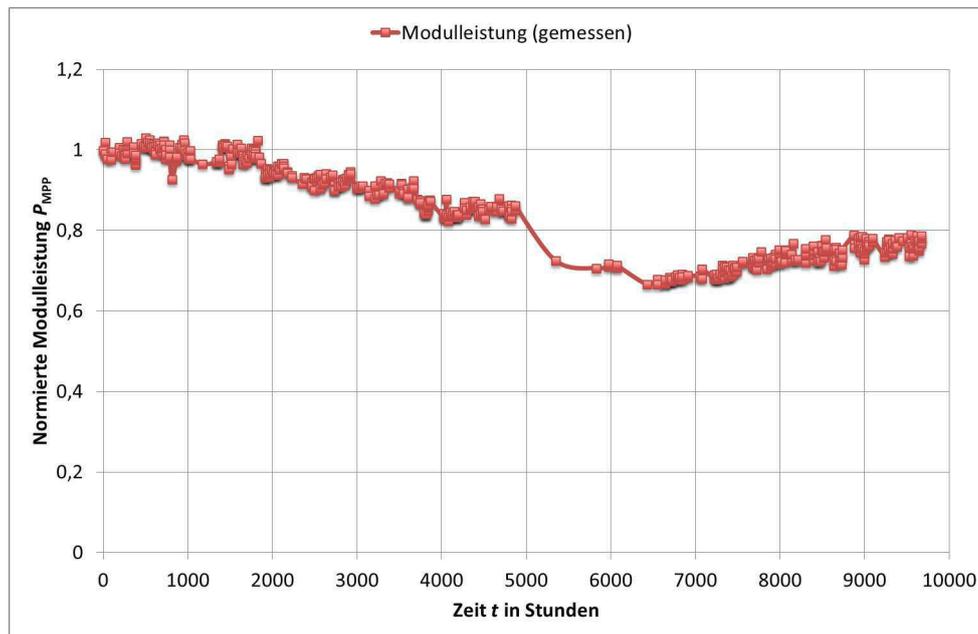


Abbildung 7.10.: Darstellung der gemessenen Modulleistung (rot) in Florida während eines Zeitraums von rund 10000 Stunden unter Spannungsbelastung

Es ist zu erkennen, dass das Modul nach einer stabilen Anfangszeit erste Degradationserscheinungen aufweist und dadurch die Leistung mit der Zeit stetig sinkt. Zu Beginn verharrt die Leistung auf einem stabilen Niveau, bis sie dann von 1000 bis 5000 Stunden linear bis auf rund 85 % der Eingangsleistung sinkt. Im Anschluss stehen bis 6500 Stunden aufgrund der niedrigen Einstrahlungswerte während dieses Zeitraums vergleichsweise wenig Messpunkte zur Verfügung. Die wenigen Messpunkte weisen jedoch eine leichte Beschleunigung der Degradation auf. Die Leistung erreicht zum Ende dieses Zeitraums mit 67 % den geringsten Wert. Im weiteren Verlauf erholt sich die Modulleistung wieder und stabilisiert sich nach rund 9500 Stunden auf einen Wert von 75 %.

Analog zur Validierung der Simulation anhand der Minimodule soll nun überprüft werden, inwieweit man mit dem PID-Simulationsmodell auch den Leistungsverlauf eines 60-Zellen-Moduls errechnen kann.

Für die Übertragung des PID-Modells für Minimodule auf 60-Zellen-Module müssen einige Annahmen getroffen werden. Ein Unterschied zwischen Minimodulen und 60-Zellen-

7. Vorhersagemodell für die PID

Modulen besteht im Rahmendesign und dem Abstand zwischen Modulrahmen und Zelle. Der Einfluss der Rahmenausführung wird, wie in Abschnitt 4.8.10. dargelegt, als gering eingeschätzt und nicht betrachtet. Durch die unterschiedlichen Abstände zwischen Rahmenteilern und Zellen ergeben sich jedoch für die Zellen positionsabhängig unterschiedliche Belastungen innerhalb eines Moduls. Bei den Ein-Zellen-Proben ist der Abstand zum Rahmen immer exakt derselbe und alle Zellen werden durch dieselbe Ausprägung des elektrischen Feldes belastet. In einem 60-Zellen-Modul kann man im Prinzip 15 unterschiedliche Zellpositionen definieren. Die Positionen ergeben sich durch eine vertikale und horizontale Symmetrieachse, welche ein Modul in vier gleiche Sektionen unterteilt (vgl. Abb. 7.11.).

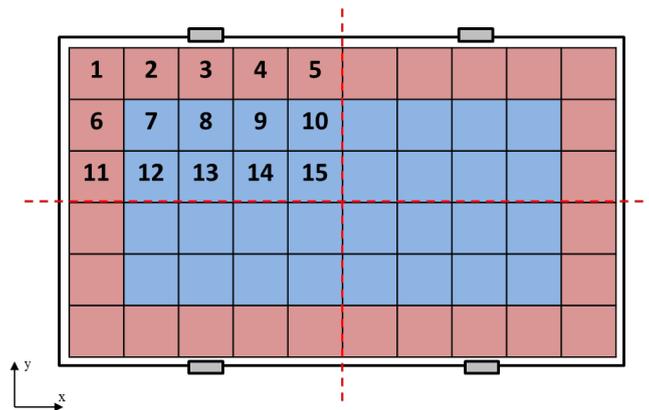


Abbildung 7.11.: Unterteilung des Moduls in 15 unterschiedliche Zellpositionen und zusätzliche Unterteilung in Randzellen (rot) und Zellen im Zentrum (blau)

In diesen Vierteln erfahren alle Zellen unterschiedliche Belastungen, die sich allein aus den variierenden Abständen zu den einzelnen Rahmenteilern ergeben. Hierbei gilt: Je weiter entfernt vom Rahmen, desto geringer ist der Potentialunterschied gegen Erde. Die Zellen, welche am Rahmen angrenzen, erfahren dabei die höchste Belastung (rot eingefärbte Zellen in Abb. 7.11.). Für diese Zellen ergibt sich ein ähnlicher Potentialverlauf wie bei den Minimodulen. Die Ein-Zellen-Minimodule können demnach theoretisch in guter Näherung mit Randzellen verglichen werden.

Die Zellen im Zentrum des Moduls (blau eingefärbte Zellen) erfahren im Vergleich dazu eine deutlich geringere Belastung. Es kann sogar davon ausgegangen werden, dass der Spannungsabfall bei trockener Oberfläche so stark abnimmt, dass für diese Zellen keine PID mehr hervorgerufen wird.

Für die Simulation werden alle Zellen, welche an mindestens ein Rahmenteil angrenzen, somit als „Randzellen“ deklariert. Hierbei wird nicht unterschieden, ob die Zellen an mehrere oder nur an ein Rahmenteil angrenzen. Alle übrigen Zellen werden als „Zentrumzellen“ betrachtet.

Für die eigentliche Simulation wird im Folgenden die Entwicklung anhand einer einzelnen Zelle stündlich mittels Regenerationsmodell berechnet. Das Regenerationsmodell wurde gewählt, da hiermit quantitativ die besten Ergebnisse für Einzellenmodule erreicht wurden. Diese einzelne Zelle steht stellvertretend für alle sich am Rand befindlichen

7. Vorhersagemodell für die PID

Zellen. Anhand der simulierten Shunt-Widerstandswerte und unter Zuhilfenahme des Eindiodenmodells wurde im nächsten Schritt die Leistung dieser Zelle bestimmt. Die so berechnete Leistung wird für die restlichen Randzellen übernommen und aufgrund der Reihenschaltung miteinander addiert. Für die Zellen im Zentrum des Moduls wurde angenommen, dass sich der Shunt-Widerstand im gesamten betrachteten Zeitraum nicht verändert.

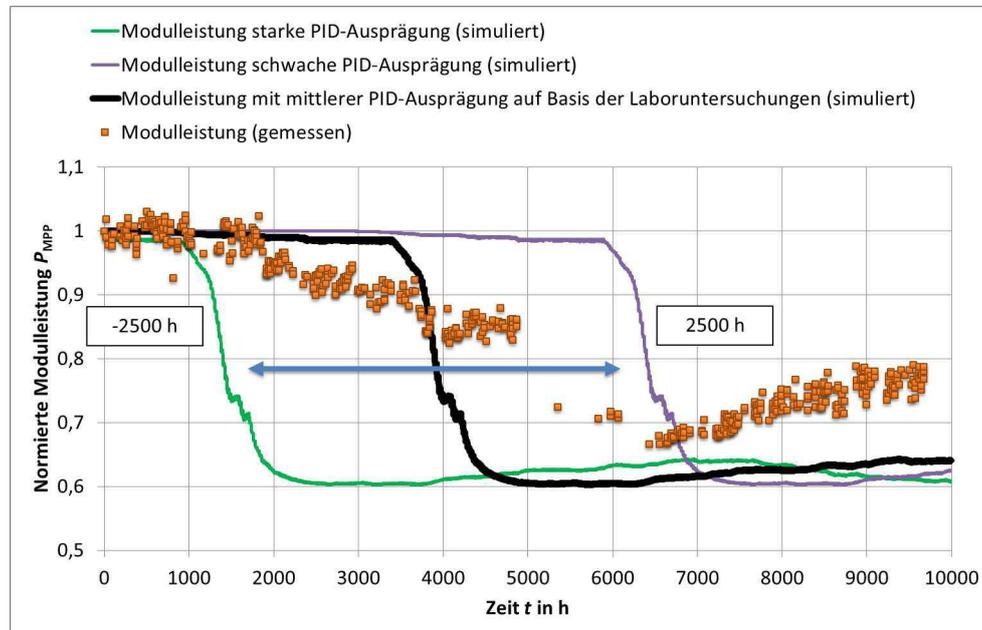


Abbildung 7.12.: Vergleich zwischen realer Modulalterung (orange) in Florida mit simulierten Alterungsverläufen (schwarz, grün und orange)

Verrechnet man alle Zellen miteinander und trägt die resultierende Gesamtleistung über der Zeit auf, so erhält man die in Abbildung 7.12. simulierte Modulleistungsentwicklung (schwarz). Vergleicht man simulierte und gemessene Leistung miteinander, zeigen beide in den Grundzügen ein ähnliches Verhalten. Nach einer Induktionsphase, in der die Leistung eine relativ stabile Entwicklung zeigt, sinkt sie nach rund 2000 Stunden deutlich ab. Zum Ende des Verlaufes, nach dem Erreichen eines Minimums zwischen 4500 und 6500 Stunden, zeigen beide Leistungen eine saisonalbedingte Erholung. Das Ergebnis zeigt, dass es ebenso möglich ist, die durch eine PID verursachte Alterung von 60-Zellen-Minimodulen prinzipiell zu simulieren. Eine Anwendung des auf Minimodulbasis entwickelten Modells auf 60-Zellen-Module ist damit möglich.

In Summe gibt es jedoch auch deutliche Unterschiede zwischen den beiden Verläufen. Man kann hauptsächlich zwei Sachverhalte identifizieren. So liegt die gemessene Leistungsalterung, besonders am Ende, deutlich über der der Simulation. Auch ist der Großteil der Leistungsdegradation auf einen kurzen Zeitraum (3500 bis 4500 Stunden) begrenzt. Im Gegensatz dazu zeigt sich bei den real gemessenen Werten ein Absinken der Leistung über einen längeren Zeitraum. Dies ergibt alles in allem eine Summe der Residuumquadrate von 13,43.

Die Ursache hierfür ist die für die Simulation vorgenommene Unterteilung der Zellen in

7. Vorhersagemodell für die PID

ausschließlich zwei Kategorien. Dies bedeutet, wie bereits angesprochen, dass die Simulation im Prinzip die Alterungserscheinung eines einzigen Zelltyps berechnet. Für eine realitätsnahe Simulation muss eine differenziertere Unterscheidung vorgenommen werden. Beispielsweise muss für die vier Eckzellen, welche an zwei Rahmenteile angrenzen, eine deutlich stärkere Belastung angenommen und simuliert werden.

Des Weiteren variiert der Rahmenabstand konstruktionsbedingt innerhalb eines 60-Zellen-Moduls. An den kurzen Seiten, an denen die einzelnen Zellstrings mittels Zellverbinder miteinander verschaltet werden, ist der Abstand im Durchschnitt 3-4 Mal größer⁷ als auf der gegenüberliegenden Seite. Zusätzlich belastet das Mikroklima, wie in Kapitel 6.2. gezeigt, die unterste Zellreihe besonders stark. Zuletzt wurden die individuellen Zellunterschiede durch die Mittelwertbildung bei der Bestimmung der PID-Abhängigkeiten auf Basis von Ein-Zellen-Minimodulen in Kapitel 4. ebenfalls unterdrückt.

Würde man alle diese Einflüsse berücksichtigen, ergäbe sich für jede Zelle im Modul ein individueller Leistungsverlauf. Damit würde man 60 individuelle, links und rechts auf der Abszisse verschobene, Verläufe erhalten, wie es beispielhaft für zwei Degradationsverläufe in Abbildung 7.12. veranschaulicht ist. Der grüne Verlauf repräsentiert dabei ein Modul mit Zellen schwacher PID-Ausprägung und der violette Verlauf ein Modul mit starker PID-Ausprägung.

Um diesen Sachverhalt genauer zu studieren, wurde in einem weiteren Schritt der Modulleistungssimulation angenommen, dass alle 28 sich am Rand befindlichen Zellen unterschiedliche PID-Ausprägungen zeigen. Für jede PID-Ausprägung wurde die Modulsimulation durchgeführt, so dass sich 28 individuelle Verläufe ergaben. Die Leistungsverläufe sind identisch mit dem ursprünglichen Verlauf, nur um 2500 h nach rechts und links entlang der x-Achse verschoben. Durch Mittelwertbildung der einzelnen Kurven ergibt sich die in Abbildung 7.13. gezeigte rote Leistungsentwicklung. Durch die Verrechnung der einzelnen Kurven miteinander resultiert aus dem abrupten ein kontinuierlicher Leistungsabfall und somit eine bessere Übereinstimmung mit den gemessenen Werten, welche sich in der Summe der Residuumquadrate in Höhe von 2,15 widerspiegelt.

Der zweite Unterschied zwischen simulierten und gemessenen Daten ist das Leistungslevel, welches nach einiger Zeit erreicht wird. Die gemessene Modulleistung liegt am Ende der Aufzeichnung rund 15 % über den Werten, welche auf der Basis des Simulationsmodells ermittelt wurden. Der Unterschied kann erneut mit der Zellsortierung begründet werden. Bei PID-empfindlichen Zellchargen gibt es immer wieder Zellen, die besonders sensitiv und Zellen, die kaum auf eine PID-Belastung reagieren, was anschaulich im „Patchwork“-Muster in Abbildung 4.14. deutlich wird. In den in dieser Arbeit durchgeführten Laborversuchen, anhand derer die Simulationsparameter quantifiziert wurden, wurden nicht-PID-anfällige Zellen, wie in Abschnitt 4.8 beschrieben, aussortiert. Im Fall des in Florida gealterten Moduls wurde diese Sortierung nicht vorgenommen und so existieren innerhalb des Moduls mit hoher Wahrscheinlichkeit Zellen, die deutlich unempfindlicher auf die PID reagierten. Eine Abschätzung zeigt, wenn 8 der 28 am Rand befindlichen Zellen zusätzlich zu den Zellen im Zentrum ein stabiles Verhalten aufwiesen,

⁷ Bestimmt aus technischen Modulzeichnungen, welche für die Modulzertifizierungen nach IEC 61215 in der Vergangenheit am PI Berlin eingereicht wurden.

7. Vorhersagemodell für die PID

würden simulierter und gemessener Verlauf mit einer niedrigeren Residuumquadratensumme von 0,71 übereinstimmen.

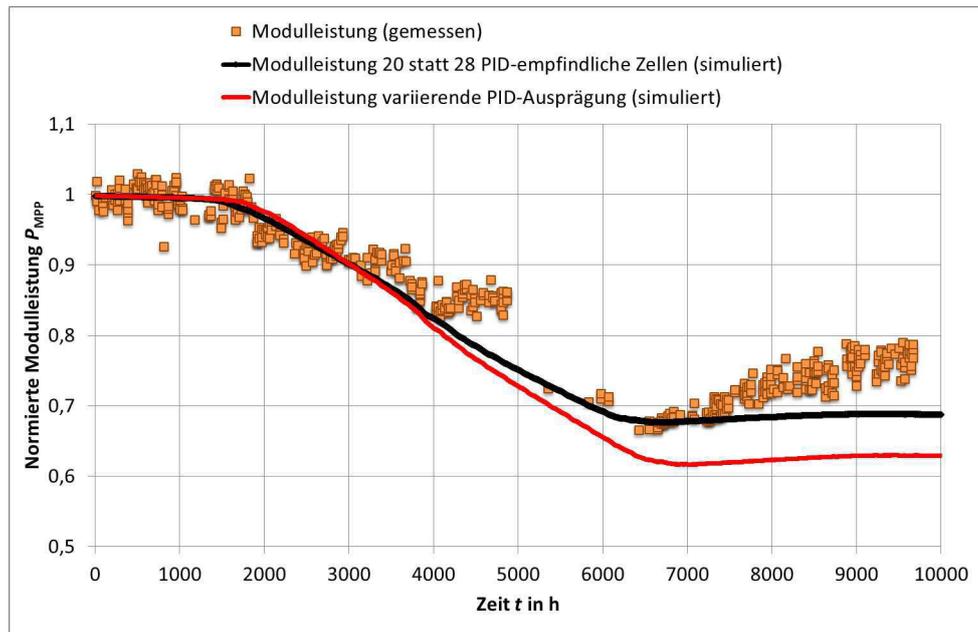


Abbildung 7.13.: Angepasste Simulationsverläufe der Modulleistung auf Grundlage individuell variierender PID-Ausprägungen der Randzellen (rot) und zusätzlicher Reduktion der PID-empfindlichen Randzellen von 28 auf 20

Zur Veranschaulichung wurde zu diesem Zweck, die zuvor beschriebene Prozedur der Mittelwertbildung durchgeführt, nur mit dem Unterschied, dass 20 Randzellen unterschiedlich sensitiv und 8 – zusätzlich zu den 32 im Zentrum befindlichen Zellen – stabil auf die PID reagieren. Durch diese Modifikation erhält man nach der Simulation den in Abbildung 7.13. dargestellten schwarzen Modulleistungsverlauf.

7.5.3. Zusammenfassung und Bewertung der Simulationsmodelle

Die vorangegangenen Ausführungen belegen, dass es anhand des iterativen Modellkonzepts möglich ist, grundsätzlich das PID-Verhalten des Shunt-Widerstands zu simulieren. Der Vergleich der drei Simulationsmodelle zeigt, dass die Berücksichtigung des Einstrahlungseinflusses die bedeutendste Neuerung im Vergleich zu bereits existierenden Simulationsmodellen ist. Mithilfe des Einstrahlungseinflusses konnte eine gute Übereinstimmung mit gemessenen PID-Verläufen erzielt werden.

Zusätzlich stellte sich heraus, dass die Regeneration ein wichtiger Bestandteil der PID ist. Besonders im mittleren Abschnitt der dargestellten Regenerationsmodellsimulation wird prinzipiell der wellenförmige Verlauf der in Kapitel 5.5. beobachteten Tagesverläufe nachempfunden. Trotz allem wurde in dieser Arbeit deutlich, dass es noch einiger Anstrengung bedarf, um die Regeneration in ihren Einzelheiten noch besser zu verstehen. Von daher konnte zum jetzigen Zeitpunkt das Vorhersagemodell nicht mit voller Zufriedenheit umgesetzt werden. Besonders deutlich wird dieser Aspekt bei der Umsetzung des Einflusses der Zyklenzahlen und die dadurch resultierende verminderte Regenera-

7. Vorhersagemodell für die PID

tionsfähigkeit. Durch die reduzierte Regenerationsfähigkeit entsteht ein stufenförmiger Verlauf (vgl. Abb. 7.7.), der in dieser Form bei realen Proben nicht beobachtet werden konnte.

Die Berücksichtigung der Zeitspannen, in denen die Proben eine flächige Kontaktierung aufweisen (durch Regen oder Tau), und die Integration von Regeneration am Tag optimieren das Vorhersagemodell deutlich. Neben einer verbesserten Übereinstimmung mit dem Messergebnisverlauf konnte auch das Phänomen simuliert werden, dass nach ausgedehnten Zeiten flächiger Kontaktierung (Regentage) im Anschluss für einige Tage brutto eine Regeneration stattfindet.

Bei dem ersten Versuch, die Simulation auf 60-Zellen-Module zu übertragen, konnte nur eine befriedigende Übereinstimmung mit realen Messwerten erzielt werden. Darüber hinaus wurde deutlich, dass eine alleinige Unterscheidung von Rand- und Zentrumszellen für eine exakte Vorhersage nicht ausreichend ist. Im Fall einer verbesserten Simulation für 60-Zellen-Module müsste eine genauere Differenzierung für jede Zellposition vorgenommen werden, welche durch einfache Anpassung der Simulation gezeigt werden konnte. Darüber hinaus ist unter anderem die bereits in der Fehlerbetrachtung angesprochene Zellvarianz, welche sich in ihrer stärksten Ausprägung in einer Vermischung von PID-empfindlichen und PID-unempfindlichen Zellen zeigt, ausschlaggebend für deutliche Abweichungen zwischen Simulation und real gemessenen Werten. Eine weitere Modifikation der Simulation hinsichtlich dieses Sachverhalts ergab eine weitere Verbesserung des Simulationsergebnisses.

Nachdem die einzelnen Simulationsergebnisse gezeigt wurden, soll abschließend eine kurze Bewertung der unterschiedlichen Simulationsmodelle hinsichtlich ihrer Praxistauglichkeit für die PV-Industrie oder Prüflaboratorien gegeben werden. Für die Praxistauglichkeit sind Zeit und Kosten neben der Simulationsgenauigkeit die entscheidenden Faktoren. Für die Anwendbarkeit der Modelle in Industriebetrieben kommt man zu dem Schluss, dass das Regenerations- und Kurzzeitmodell aufgrund der aufwendigen Erzeugung, der Vielzahl von Simulationsparameter nur für Forschungs- und Entwicklungslaboratorien geeignet ist. Eine detaillierte Bestimmung aller Einflussgrößen würde das Zeit- und Kostenbudget potentieller Industriekunden um ein Vielfaches übersteigen. Ein Kompromiss zwischen Zeit und Kosten für die Bestimmung der Eingangsgrößen und die Genauigkeit eines simulierten Ausfallzeitpunkts stellt das Degradationsmodell dar. Dieses Modell benötigt nur zwei Eingangsgrößen, das Temperaturverhalten und den Einfluss der Einstrahlung auf die PID. Somit könnte mithilfe von nur wenigen Messungen eine ausreichend genaue PID-Entwicklungsvorhersage für unterschiedliche Standorte ermittelt werden. Die Arbeit kommt damit zu dem Schluss, dass für eine grobe PID-Risikoabschätzung das Degradationsmodell in der Praxis die zeit- und kostengünstigste Lösung bereitstellt.

8. Resümee und Ausblick

Das formulierte Ziel der vorgelegten Arbeit war es, fundierte Abschätzungen über die Ausfallzeitpunkte von PID-anfälligen Solarmodulen in Abhängigkeit von unterschiedlichen Standorten und den dort vorherrschenden klimatischen Bedingungen zu treffen. Die Ausfallzeitpunkte sollten, mittels geeigneter Charakterisierung und allein durch klimatische Daten gespeist, die Veränderung des Shunt-Widerstands unter dem Einfluss eines negativen Potentials zwischen Rahmen und Zellen berechnen. Um ein Grundverständnis für die Mechanismen des Alterungsprozesses zu erlangen, wurden umfassende Untersuchungen hinsichtlich des Degradations- und Regenerationsverhaltens im Labormaßstab durchgeführt.

Durch den Einsatz von speziell PID-empfindlich konstruierten Minimodulen und den Aufbau von eigens für die PID-Untersuchung entwickelten Testständen konnten die PID alleinig anhand der Shunt-Widerstandsentwicklung untersucht werden.

Im Falle der Degradation kristallisierte sich heraus, dass die Proben temperatur und die elektrische Spannung die entscheidenden Beschleunigungsfaktoren darstellen. Die Einstrahlung, welche erstmals im Zuge dieser Arbeit als Einflussgröße identifiziert werden konnte, ist hingegen der stärkste Verzögerungsfaktor.

Das Luftfeuchtigkeitslevel spielt bei der Degradation ebenfalls eine entscheidende Rolle; ein hohes Level ist nicht zwingend notwendig für die Degradationsentwicklung, aber Unterschiede in der Luftfeuchtigkeit beeinflussen die Oberflächenleitfähigkeit und somit die Ausprägung des elektrischen Felds oberhalb der eingebetteten Zellen. In der vorliegenden Arbeit konnten zwei Hauptzustände des elektrischen Feldes beschrieben werden, die mittels unterschiedlicher Kontaktierungsformen verglichen wurden: die Randkontaktierung bei niedriger Luftfeuchtigkeit und die flächige Kontaktierung bei hoher Luftfeuchtigkeit. Es wurde experimentell ein Luftfeuchtigkeitsgrenzwert in Höhe von 65 % ermittelt. Steigt die Luftfeuchtigkeit über diesen Grenzwert, ändert sich die durch den Spannungsabfall belastete Fläche von einer lokalen Randbelastungsfläche zu einer, die die gesamte Oberfläche oktruiert.

Bei der Untersuchung hinsichtlich der Regeneration, die erstmalig in diesem Umfang durchgeführt wurden hat sich ebenfalls die Proben temperatur als signifikanter Beschleunigungsfaktor herausgestellt. Die Einstrahlung wirkt während Regenerationsperioden im Gegensatz zu den Degradationsphasen beschleunigend und erhöht das erreichbare Regenerationslevel zusätzlich. Abschließend konnte für die Regeneration festgestellt werden, dass eine mehrmalige zyklische PID-Belastung die Regenerationsfähigkeit der Proben herabsetzt.

Auf der Basis der Quantifizierung konnte für die beiden Phasen (Degradation/Regeneration) die jeweilige thermische Aktivierungsenergie bestimmt werden. Dies wurde mittels

eines Zeit-Temperatur-Superpositions-Ansatzes realisiert, womit für die thermische Aktivierungsenergie der Degradation der Wert $0,82 \pm 0,15$ eV und für die Regeneration der Wert $0,55 \pm 0,17$ eV ermittelt werden konnte. Die Ergebnisse zeigen damit, dass sich die Natriumionen durch die PID an sogenannten Trapping-Centern anlagern, die die thermische Regeneration erschweren.

Parallel zu den Laboruntersuchungen wurden Alterungsversuche unter realitätsnahen Bedingungen in Berlin durchgeführt. Hier hat sich herausgestellt, dass eine Trennung zwischen Kurz- und Langzeituntersuchungen unterschiedliche Alterungsmechanismen akzentuiert. Betrachtet man eine Degradation über einen langen Zeitraum zeigt sich, dass aufgrund der Tageszeiten und Durchschnittstemperaturen saisonalen Schwankungen auftreten. Parallel dazu haben Beobachtungen anhand von EL-Aufnahmen gezeigt, dass die PID in realen Belastungssituationen von der Randkontaktierung dominiert wird. Untersucht man hingegen die PID-Entwicklungen im Tagesverlauf, scheinen diese hauptsächlich durch die flächige Kontaktierungsart, die durch hohe Oberflächenleitfähigkeit bestimmt wird, beherrscht. Diese Erkenntnis konnte erstmals mittels der selbst entwickelten Messapparatur ULFI aufgezeichnet werden. Mit einer Vergleichsmessung wurden die in Berlin gemachten Beobachtungen in Nikosia bestätigt.

Anhand der S-Funktion und der Laboruntersuchungen war es daraufhin möglich, die unterschiedlichen Shunt-Widerstandsentwicklungsphasen im Tagesverlauf den zuvor bestimmten Abhängigkeiten von verschiedenen Einflussfaktoren zuzuordnen. Damit konnte erstmals nachgewiesen werden, zu welchen Zeitpunkten Regenerationsphasen trotz Spannungsbelastung bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen auftreten. Dies geschieht immer dann, wenn auf Zeiten mit hoher Oberflächenleitfähigkeit (Regen, Tau und hohe relative Luftfeuchtigkeit) Zeiten mit niedriger Oberflächenleitfähigkeit (hohe Einstrahlung und niedrige relative Luftfeuchtigkeit) folgen.

Im Anschluss war es möglich, mit den im Labor und außerhalb des Labors gewonnenen Resultaten mittels eines iterativen Ansatzes eine Simulation des PID-Verhaltens anhand diverser Klimadaten durchzuführen. Beispielhaft wurden verschiedene Standorte ausgewählt, die sich anhand ihrer klimatischen Bedingungen unterscheiden.

Für alle Standorte wurden drei separate Stufen des Vorhersagemodells, welche sich in der Anzahl der implementierten Einflussfaktoren unterscheiden, simuliert. Dabei enthält das Degradationsmodell Temperatur, Strahlung und Spannungsbelastungszeit, das Regenerationsmodell zusätzlich die Regeneration in der Nacht und den Einfluss der Zyklenzahl. Das Kurzzeitmodell fügt letztendlich noch den Einfluss der Luftfeuchtigkeit hinzu und unterscheidet zwischen Regeneration unter Einstrahlung und Regeneration in der Nacht. In diesem Zusammenhang konnte bestätigt werden, dass saisonale Schwankungen einen erheblichen Einfluss auf die Degradationsgeschwindigkeit haben können und diese mit Abstand zum Äquator in südlicher und nördlicher Richtung signifikanter werden. Ebenso zeigen klimatisch ähnliche Standorte vergleichbare Ausfallzeiten. Darüber hinaus wurde deutlich, dass Standorte mit einer hohen Jahresdurchschnittstemperatur als besonders kritisch für PID-empfindliche Module anzusehen sind. Aber auch Standorte mit hoher durchschnittlicher relativer Luftfeuchtigkeit zeigen kurze Ausfallzeiten. Im Vergleich der

unterschiedlichen Modelle scheint das Degradationsmodell die Ausfallzeit für gemäßigte Standorte zu unterschätzen und für klimatisch feuchte Standorte zu überschätzen. Wägt man jedoch den Aufwand zur Bestimmung der Einflussgrößen mit der Qualität der Ausfallzeitberechnung ab, so scheint das Degradationsmodell für eine grobe Lebensdauerabschätzung funktional zu sein.

Aufbauend auf den Ergebnissen auf Minimodulebene wurde die Anwendbarkeit der Simulation auf 60-Zellen-Modulen untersucht. Zu diesem Zweck wurden verschiedene reale, von einer PID betroffene PV-Kraftwerke analysiert. Anhand von EL-Aufnahmen wurden PID-Verteilungsmuster der Zellen innerhalb eines Moduls und darauf aufbauend eines PV-Kraftwerkes bestimmt. Dabei zeigte sich, dass die Degradation ausgehend vom Rand, unabhängig von den untersuchten Standorten, das entscheidende PID-Alterungsmuster darstellt. Dies deckt sich mit der Beobachtung auf der Basis von Minimodulen, bei denen die Degradation ausgehend vom Rand ebenso beobachtet wurde.

Gleichfalls konnte der enorme Einfluss des Mikroklimas der Moduloberfläche gezeigt werden. Der Einfluss ist so groß, dass er Zellen an unterschiedlichen Positionen innerhalb eines Moduls unterschiedlich stark degradieren lässt. Zuletzt wurde anhand eines 60-Zellen-Moduls, welches unter realen Bedingungen in Florida belastet wurde, gezeigt, dass die Simulation für eine befriedigende PID-Vorhersage, auch für Module, genügt.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass es möglich war, aus einer Kombination aus Laboruntersuchungen und der Analyse realer PID-Verläufe ein Vorhersagemodell für die PID-Degradation zu entwickeln. Des Weiteren ist es möglich, mittels der aufgebauten Expertise die Lebensdauer von Solarmodulen im Hinblick auf ihr PID-Verhalten zu simulieren und somit die Gefahr für künftige Defekte im Feld zu vermindern.

Das größte Verbesserungspotential für die erarbeitete Vorhersage liegt in einem detaillierten Verständnis der Regenerationsmechanismen. Hier ist beispielsweise die Rolle der Vorbelastung ein entscheidender Punkt, der in dieser Arbeit erstmals in den Grundzügen beschrieben werden konnte. Zusätzlich ist die genauere Untersuchung der Regeneration unter Tageslichteinfluss für eine optimierte Prognose der Ausfalldauer von entscheidender Bedeutung.

Bei der Betrachtung von 60-Zellen-Modulen ist eine differenzierte Analyse der Zellen anhand ihrer Position im Modul ein maßgeblicher Schritt zu einer verbesserten Lebensdauerprognose. Darüber hinaus stellt die Untersuchung des Einflusses der Oberflächenleitfähigkeit und des sich damit ändernden elektrischen Felds mögliche Lösungsansätze für den größten Teil der beschriebenen Unsicherheiten. Um eine verbesserte PID-Vorhersage erzielen zu können, sollten diese Ansätze mit all ihren Facetten im Fokus zukünftiger PID-Untersuchungen stehen.

A.

A.1. PID-Untersuchung an unterschiedlichen Einbettungsmaterialien

Neben EVA besitzen auch andere Materialien, wie PVB, TPU oder Ionomere, die Voraussetzungen, als Einbettungsmaterial für Solarzellen eingesetzt zu werden. Aus diesem Grund wurden in einem breit angelegten Vorversuch unterschiedliche Einbettungsmaterialien auf ihre Empfindlichkeit gegenüber der PID untersucht um eine Basis für das Probendesign zu erhalten. Zu diesem Zweck wurden Ein-Zellen-Module mit demselben Frontglas, derselben Rückseitenfolie und PID-empfindlichen Zellen hergestellt. Diese Proben wurden gleichzeitig in einer Klimakammer belastet und in bestimmten Intervallen mittels BLS wiederholt gemessen.

Alle Proben wurde mit identischen Verfahren hergestellt, einzig der Laminationsprozess wurde an das jeweilige Einbettungsmaterial angepasst. Dafür wurde ebenfalls auf Erfahrungen aus vorangegangenen Experimenten zurückgegriffen [Koc12a]. Zwar war die Vermeidung der PID das Ziel der damaligen Untersuchungen, doch konnten anhand der Ergebnisse und im Umkehrschluss ebenfalls die Voraussetzungen für PID-sensible Zellen definiert werden. Die Zellen und Proben wurden mit -1000 V bei 60 °C und 85 % relativer Luftfeuchtigkeit belastet.

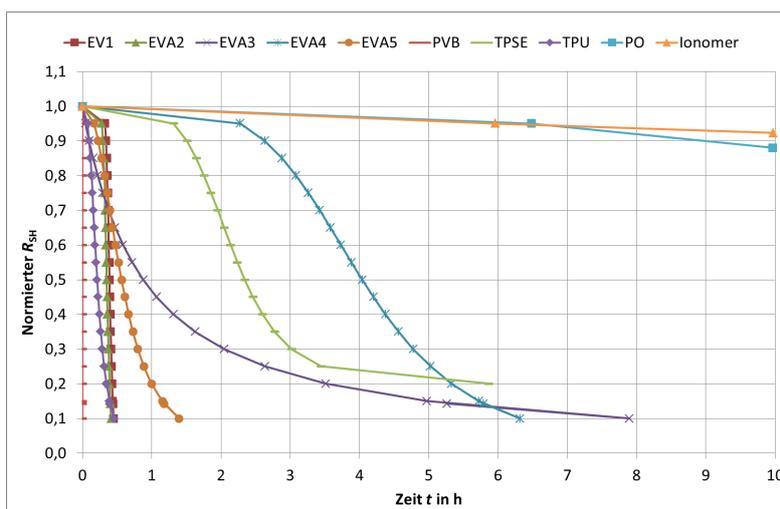


Abbildung A.1.: Gemittelte R_{SH} -Verläufe verschiedener Proben mit variierenden Einbettungsfolien während einer 85 °C/85 %-PID-Belastung.

Abbildung A.1. zeigt dabei deutlich die großen Unterschiede der einzelnen Proben. Es sind sehr steile PID-Verläufe zu beobachten, aber auch Verläufe, die nahezu keine De-

gradation aufweisen. Die Polyolefine- und die Ionomer-Proben zeigen in der Summe vergleichsweise nahezu keine Degradationserscheinungen. Darüber hinaus konnte festgestellt werden, dass innerhalb der EVA-Materialgruppe extreme Unterschiede bestehen.

A.2. Aufbereitung der Eingangsgrößen für das Vorhersagemodell

Als Eingangsgrößen der Simulation dienen gemessene Wetterdaten. Die Daten müssen mindestens stundenaufgelöste Werte der Gesamtstrahlung auf horizontaler Fläche, Diffusstrahlung auf horizontaler Fläche, der Umgebungstemperatur und relativen Luftfeuchtigkeit enthalten, um für die Simulation verwertbar zu sein.

Darüber hinaus sollten zwei unterschiedliche Klimadatensätze miteinander verglichen werden. Für die Standorte Miami, Las Vegas und Seattle wurden die Wetterdaten der Jahre 1982-1986 genutzt. Diese Daten sind auf der Website mit der Adresse <https://sam.nrel.gov/weather-data> frei zugänglich und beinhalten die benötigten, stundenaufgelösten Daten. Dies sind u. a. Daten zu diffuser und direkter Einstrahlung auf eine horizontale Fläche, Umgebungstemperatur und relativer Luftfeuchtigkeit. Ein zweiter Datensatz wurde aus dem Programm Meteororm generiert. Bei diesem handelt es sich nicht um real gemessene Werte, sondern um ein erstelltes Referenzjahr, welches über mehrere Jahre gemittelte Werte enthält. Für die Simulation wurden dieselben Referenzjahre mehrmals hintereinander gereiht, um den gewünschten Betrachtungszeitraum zu erreichen. Es wurden die Wetterdaten von Berlin, Nikosia und Singapur ausgewählt. Im Gegensatz zu den von NREL bereitgestellten Daten kann bei den Meteororm-Daten die Einstrahlung auf eine geneigte Fläche direkt ausgegeben werden. In späteren Simulationen konnte kein gravierender Unterschied zwischen den unterschiedlichen Datensätzen festgestellt werden. In Vorbereitung auf die eigentliche Simulation müssen die Daten aufbereitet werden.

A.2.1. Ermittlung der Einstrahlung auf eine geneigte Fläche

Die Intensität der Einstrahlung $E_{g,hor}$ auf die zu untersuchende Probe ist einer der Hauptkennwerte, die für die Simulation berechnet werden müssen. Die von den Klimadaten bereitgestellten Messwerte der Direktstrahlung $E_{dir,hor}$ auf eine horizontale Fläche und die korrespondierende Diffusstrahlung $E_{diff,hor}$ stellen den Ausgangspunkt der Berechnungen dar. Mittels dieser beiden Werte kann nun in einem ersten Schritt die Gesamtstrahlung auf die horizontale Fläche berechnet werden [Qua00].

Es gilt:

$$E_{g,hor} = E_{dir,hor} + E_{diff,hor} \quad (48)$$

In einem nächsten Schritt kann die Einstrahlung auf eine beliebig geneigte Fläche berechnet werden. Die Einstrahlung auf eine geneigte Fläche $E_{g,gen}$ setzt sich aus den drei Teilen Direktstrahlung ($E_{dir,gen}$), Diffusstrahlung ($E_{diff,gen}$) und Reflexion der Umgebung ($E_{ref,gen}$) auf die geneigte Ebene zusammen.

$$E_{g,gen} = E_{dir,gen} + E_{diff,gen} + E_{ref,gen} \quad (49)$$

Die Bodenreflexion lässt sich mittels Albedowert (A) berechnen. Der Albedowert ist ein Indikator für die Reflexionseigenschaften unterschiedlicher Bodenarten und wurde in der Vergangenheit durch unterschiedliche Arbeiten bestimmt [Cun08, Gor11, Org77]. Die Höhe des Albedos kann je nach Untergrundart zwischen 0,15 (Asphalt) und 0,9 (Neuschnee) schwanken. Ein gängiger Wert beträgt 0,2 und entspricht dem Albedo von Gras oder bewittertem Beton. In den Simulationen wird dieser Wert durchgängig verwendet und es wird darauf verzichtet, unterschiedliche Untergründe zu quantifizieren. Dies kann jedoch mittels geeigneter Daten ohne Weiteres für die Simulation adaptiert werden.

Es gilt:

$$E_{\text{refl,gen}} = E_{\text{g,hor}} \cdot A_U \cdot \frac{1}{2} \cdot (1 - \cos\gamma_E), \quad (50)$$

wobei γ_E den Anstellwinkel der Probe (senkrecht = 90°) und A_U den Albedowert repräsentieren.

Zur Berechnung der diffusen Strahlung existieren mit dem isotropen Modell und dem anisotropen Modell zwei gängige Vorgehensweisen. Das isotrope Modell geht davon aus, dass die diffuse Strahlung gleichmäßig über den Himmel verteilt ist. Die Berechnung der Diffusstrahlung auf eine geneigte Ebene erfolgt durch folgende Formel:

$$E_{\text{diff,gen}} = E_{\text{diff,hor}} \frac{1 + \cos\gamma_E}{2} \quad (51)$$

mit $E_{\text{diff,gen}}$ als Diffusstrahlung auf eine geneigte Oberfläche und γ_E als Neigung der Oberfläche.

Das anisotrope Modell geht von einer ungleichmäßigen Diffusstrahlungsverteilung mit einem Schwerpunkt in sonnennahen Bereichen aus. Dies ist umso ausgeprägter, je klarer der Himmel ist. Es gibt unterschiedliche Ansätze für ein anisotropes Modell. Die bekanntesten sind die Modelle von PEREZ [Per90], HAY und DAVIS [Hay80] sowie REINDEL [Rei90]. Jedes Modell besitzt für sich bestimmte Vor- und Nachteile, die bereits an anderer Stelle diskutiert wurden [Ine11]. Für die hier gemachten Berechnungen soll das einfachere isotrope Modell aufgrund seiner leichten Handhabung genügen.

Schlussendlich kann die Direktstrahlung auf eine geneigte Fläche mittels Einfallswinkel auf die geneigte Fläche θ_{gen} und der Sonnenhöhe γ_S berechnet werden [Qua00]:

$$E_{\text{dir,gen}} = E_{\text{dir,hor}} \cdot \left\{ \max\left(0, \frac{\cos\theta_{\text{gen}}}{\sin\gamma_S}\right) \right\} \quad (52)$$

Durch Einsetzen der Ergebnisse aus den Formeln 50, 51 und 52 in Formel 49 kann nachfolgend die Gesamteinstrahlung $E_{\text{g,gen}}$ auf eine geneigte Ebene bestimmt werden. In der Simulation wird diese Gesamteinstrahlung zur Unterscheidung der Tag- und Nachtzeiten verwendet sowie um die jeweilige Proben temperatur zu ermitteln.

A.2.2. Ermittlung der Zelltemperatur

Mithilfe der im vorangegangenen Kapitel berechneten Gesamtstrahlung ist es nun möglich, die Modultemperatur zu jedem Tageszeitpunkt zu berechnen. Dabei werden Tages-

und Nachttemperaturen voneinander unterschieden. Ein wichtiger Parameter für die Berechnung der Zelltemperatur ist die Normal Operating Cell Temperature (NOCT). Dieser Wert wird nach Norm IEC 61215 [IEC05] ermittelt und ist Teil der Zulassungsprüfung nach selbiger. Die hierbei ermittelte Temperatur im „Normalbetrieb“ wird anhand der in Tabelle A.2. aufgeführten Durchschnittswerte bestimmt.

Abbildung A.2.: NOCT-Zielwerte und korrespondierende Toleranzbereiche

Kennwert	Zielwert	Toleranzbereich
Bestrahlungsstärke	800 W/m ²	>400 W/m ²
Air-Mass	1,5	-
Temperatur	20 °C	15-80 °C
Umgebungstemperatur	-	5-40 °C
Windgeschwindigkeit	1 m/s	0-4 m/s
Arbeitspunkt	Leerlauf	-

Es kann nun die Modultemperatur T_{mod} mittels folgender Formel berechnet werden [Wag99]:

$$T_{\text{mod}} = (T_a + (\text{NOCT} - T_{\text{ambN}})) \cdot E_{\text{g,gen}}/E_{\text{NOCT}} \quad (53)$$

T_a Umgebungstemperatur,

T_{ambN} Korrekturtemperatur,

$E_{\text{g,gen}}$ Gesamtstrahlung,

E_{NOCT} Bestrahlungsstärke bei NOCT (800 W/m²).

Die Korrekturtemperatur wird dabei aus der in der Literatur angegebenen Übertemperatur ΔT_{add} , welche mit 20-24 K beziffert wird, berechnet [Mac14].

$$T_{\text{ambN}} = \text{NOCT} - \Delta T_{\text{add}} \quad (54)$$

Eigene Vergleichsmessungen mittels realer Messdaten haben jedoch gezeigt, dass eine Korrekturtemperatur von 26 K ein weitaus besseres Ergebnis generiert. Die Ursache für diesen Unterschied ist das geringe Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis der Proben und die damit verbundene stärkere Abkühlung durch die Umgebungsluft. Da die verwendete Formel für Modulgrößen entwickelt wurde, die aufgrund ihrer Größe ein unterschiedliches thermisches Verhalten zeigen, scheint die Modifikation der Korrekturtemperatur legitim. Die Bestimmung der Modultemperaturen während der Zeiten ohne Einstrahlung ist weitaus aufwendiger. Bei einer Bestimmung der Probertemperatur wird die Probe als grauer Strahler aufgefasst, welcher mit dem Himmel und dem Boden einen thermischen Energieausgleich durchführt. Für diese Berechnung ist die Himmelstemperatur von entscheidender Bedeutung [Kra98]. Diese ist jedoch stark von der gegebenen Bewölkung abhängig. Diese Information wird von den vorliegenden Wetterdaten nicht zur Verfügung

gestellt und so wurde die Probennachttemperatur anhand der in Kapitel 4.5. gemachten Messungen abgeschätzt. Bei den Messungen hat sich eine 2 °C kühlere Proben-temperatur im Vergleich zur Umgebung als durchschnittliche Differenz gezeigt. Diese Differenz wurde als konstant angenommen.

A.2.3. Ermittlung der Stresszeit

Im einfachsten Fall wird davon ausgegangen, dass bei Sonnenaufgang, Solarzellen in einer logarithmischen Abhängigkeit von der Einstrahlung eine Spannung aufbauen. Diese summiert sich durch die Reihenschaltung der Solarzellen und Solarmodule zu der Systemspannung. Durch das Vorhandensein einer Systemspannung beginnt die Degradation. Mit dem Sonnenuntergang kommt die Spannung zum Erliegen und die Belastung endet wieder. Damit ist die Belastungszeit eindeutig durch den Tagbogen definiert. Der Tagbogen kann durch eine aus der Astronomie bekannte Näherungskurve bestimmt werden. Da die tatsächliche Sonnenaufgangszeit eines Ortes nicht nur von der Zeitzone, sondern von der genauen Position auf dem betreffenden Längengrad (L) abhängig ist, wird dies in den Berechnungen berücksichtigt werden [Lex14].

$$\text{Aufgang} = \text{AufgangOrtszeit} - \frac{L}{15} + \text{Zeitzone} \quad (55)$$

$$\text{Untergang} = \text{UntergangOrtszeit} - \frac{L}{15} + \text{Zeitzone} \quad (56)$$

Das Verhältnis zwischen Degradations- und Regenerationszeit ist ein entscheidender Faktor bei der Betrachtung von PID-Entwicklungen. Besonders ausschlaggebend ist dieser Umstand bei der Betrachtung saisonaler Unterschiede in der Degradation. Aufgrund der Verschiebung der Erdachse gibt es je nach Betrachtungsort einen deutlichen Unterschied zwischen Tag- und Nachtlängen. So erzeugt z. B. in Deutschland der 21. Juni als längster Tag des Jahres, mit rund 17 Stunden eine sehr lange Degradationsdauer, während diese am 21. Dezember mit rund acht Stunden vergleichsweise kurz ausfällt.

A.

A.3. Schaltpläne

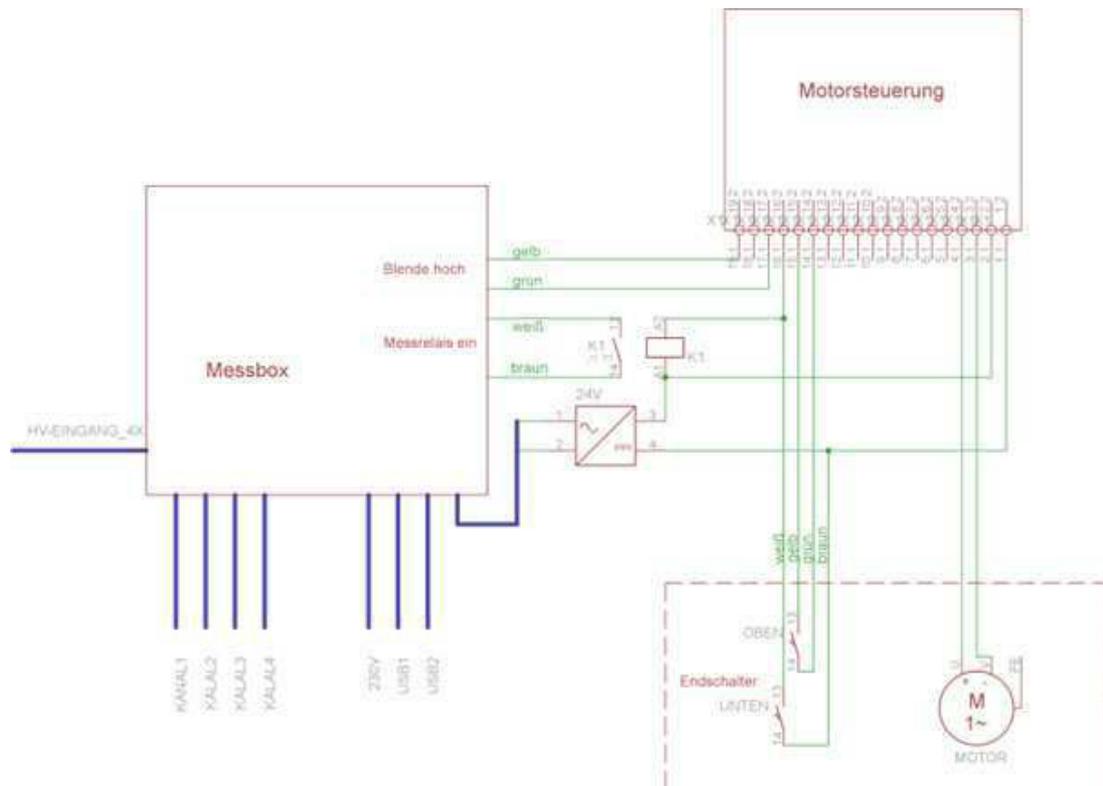


Abbildung A.3.: Blockschaltbild Motorsteuerung

A.

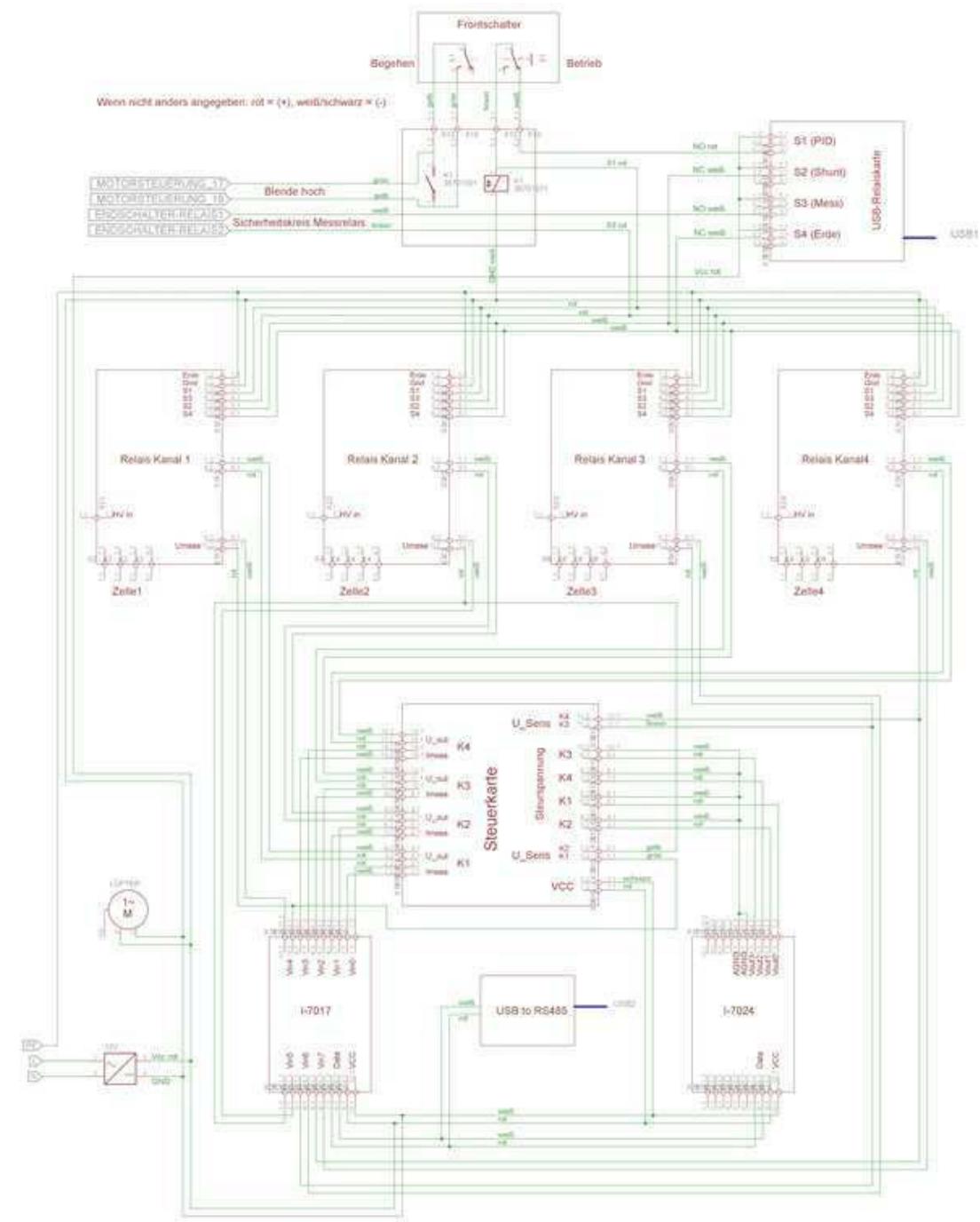


Abbildung A.4.: Blockschaltbild ULFI

A.

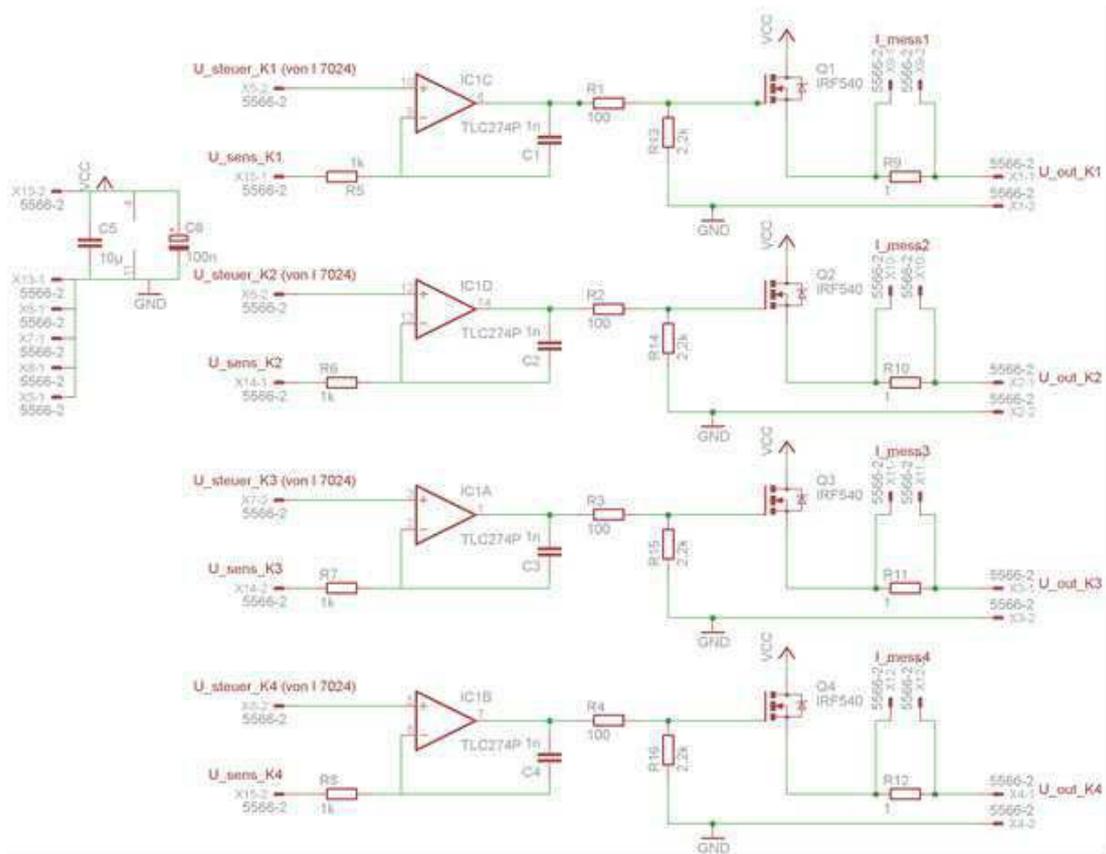


Abbildung A.5.: Schaltplan Steuerkarte

A.

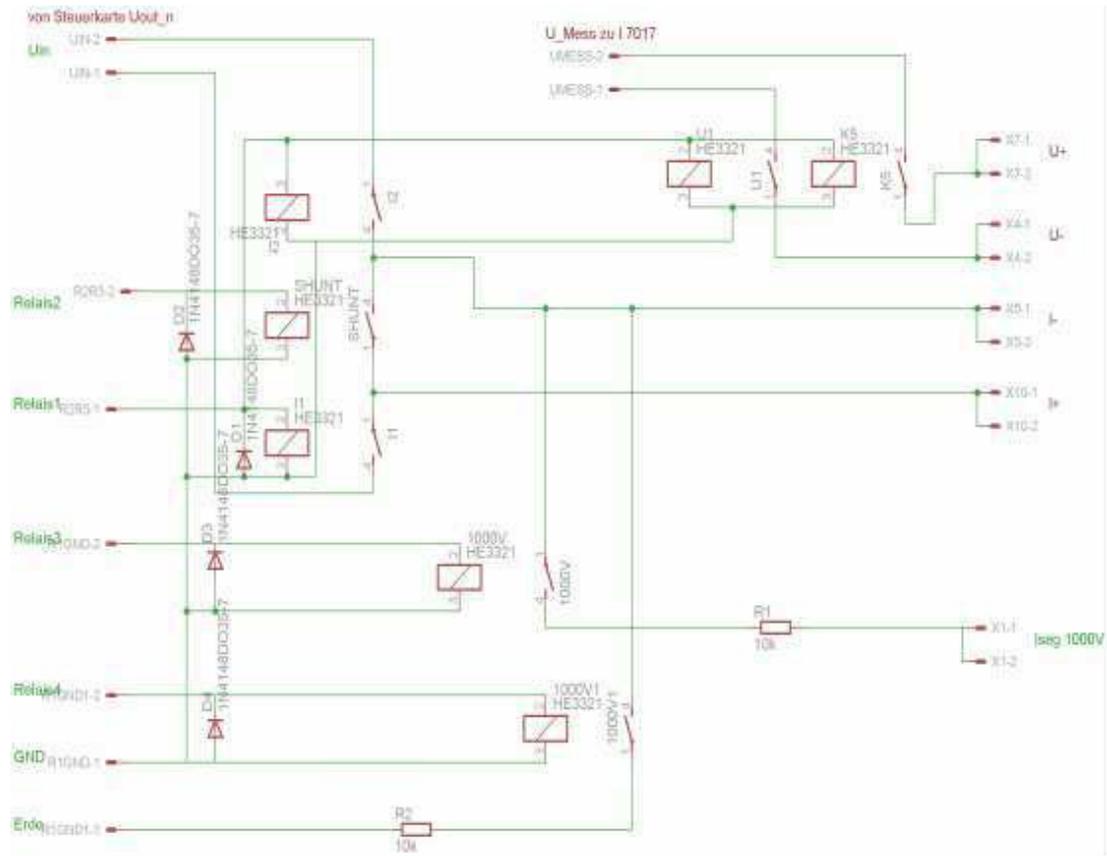


Abbildung A.6.: Schaltplan Relaiskarte

Literaturverzeichnis

- [Bau12] J. Bauer, V. Naumann, S. Großer, C. Hagendorf, M. Schütze und O. Breitenstein: *On the mechanism of potential-induced degradation in crystalline silicon solar cells*. In: Phys. status solidi (RRL) – Rapid Research Letters 6 – (8), S. 331, 2012.
- [Ber10] J. Berghold, O. Frank, H. Hoehn, S. Pingel, B. Richardson und M. Winkler: *Potential Induced Degradation of solar cells and panels*. In: Proceedings 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, S. 3753, 2010.
- [Ber12] J. Berghold, S. Koch, A. Böttcher, A. Ukar und P. Grunow: *Potential-induced degradation (PID) and its correlation with field experiences*. In: Proceedings 3rd International PV module QA forum, 2012.
- [Ber13a] J. Berghold, S. Koch, A. Böttcher, A. Ukar, M. Leers und P. Grunow: *Potential-induced degradation (PID) and its correlation with experience in the field*. Photovoltaics International, Edition 19, S. 85, 2013.
- [Ber13b] J. Berghold, P. Grunow, P. Hacke, W. Hermann, S. Hoffmann, S. Janke, B. Jaekel, S. Koch, M. Koehl, G. Mathiak, S. Pingel, L. Poehlman, P. Reinig, A. Ukar: *PID test round robins and outdoor correlation*. In: Proceedings 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, S. 3003, 2013.
- [Ber14] J. Berghold, S. Koch, B. Frohmann, P. Hacke und P. Grunow: *Properties of Encapsulation Materials and Their Relevance for Recent Field Failures*. In: Proceedings 40th Photovoltaic Specialist Conference, S. 1987, 2014.
- [Bit12] E. Bittmann: *Viel Potenzial für die solare Zukunft*. Tagung: Kunststoffe in der Photovoltaik SKZ Würzburg, 2012.
- [Bre14] O. Breitenstein, J. Rakotoniaina, M. H. Al Rifai und M. Werner: *Shunt Types in Crystalline Silicon Solar Cells*. In: Progress in Photovoltaics: Research and Applications 23 (7), S. 529, 2004.
- [Cad16] CADFEM (2016): *Netzqualität*. URL: <http://www.cae-wiki.info/wikiplus/-index.php/Netzqualit%C3%A4t> [Stand 12.10.16].
- [Car03] D. E. Carlson, R. Romero, F. Willing, D. Meakin, L. Gonzalez, R. Murphy, H. R. Moutinho und M. Al-Jassim: *Corrosion effects in thin-film photovoltaic modules*. In: Progress in Photovoltaics: Research and Applications 11 (6), S. 377, 2003.

- [Cun08] W. P. Cunningham and M. A. Cunningham: *Environmental Science: A global concern*. 10. Auflage, New York: McGraw-Hill Education, 2008.
- [Dea98] S. C. Deane, R. B. Wehrspohn und M. J. Powell: *Unification of the time and temperature dependence of dangling-bond-defect creation and removal in amorphous-silicon thin-film transistors*. In: Phys. Rev. B 58, S. 12625, 1998.
- [Ene14] Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e.V. (2013): *Bundesrepublik Deutschland*. URL: <http://www.energymap.info/energieregionen/DE/105.html> [Stand 22.12.2014].
- [Eng10] J. Engel: *Anwendungsorientierte Mathematik. Von Daten zur Funktion*. Berlin: Springer Verlag, S. 152, 2010.
- [Est11] S. K Estreicher, D. J Backlund, C. Carbogno und M. Scheffler: *Activation Energies for Diffusion of Defects in Silicon: The Role of the Exchange-Correlation Functional*. Angewandte Chemie International Edition 50 (43), 2011.
- [Fah83] A. L. Fahrenbruch und R. H. Bube: *Fundamentals of solar cells: Photovoltaic solar energy conversion*. New York: Academic Press, 1983.
- [Fho14] FHO-Emden (2014): *Die Kennlinie von Solarmodulen*. URL: http://www.et-inf.fho-emden.de/~elmalab/PV_Solar/download/PV_Solar_2.pdf [Stand 22.07.2014].
- [Fra10] O. Frank: *Die Entwicklung einer Labor-Prüfmethode für Photovoltaik-Module und deren Korrelation zu Potential-induzierter Degradation in Solarkraftwerken*. Diplomarbeit. Technischen Universität Berlin, S. 61, 2010.
- [Fri14] M. Friedrichs, A. Drobisch und M. Hanusch: *EL im Flasher*, QMA-Dokument. PI Photovoltaik-Institut Berlin AG, 2014.
- [Fru17] F. Frühauf, J. Wong, J. Bauer und O. Breitenstein: *Finite element simulation of inhomogeneous solar cells based on lock-in thermography and luminescence imaging*. In: Solar Energy Materials & Solar Cells 162, S. 102, 2017.
- [Fuy05] T. Fuyuki, H. Kondo, T. Yamazaki, Y. Takahashi und Y. Uraoka: *Photographic surveying of minority carrier diffusion length in polycrystalline silicon solar cells by electroluminescence*. In: Appl. Phys. Lett. 86, S. 262108, 2005.
- [Gia13] D. Giuffreda, P. Magnone, M. Meneghini, M. Barbato: *Local Shunting in Multicrystalline Silicon Solar Cells: Distributed Electrical Simulations and Experiments*. In: IEEE Journal of Photovoltaics, 4 (1), S. 40, 2013.
- [Gla16] W. Nigischer (2001): *Glas und sein Rohstoff*. URL: http://www.fn-glas.at/glas_def.pdf [Stand 28.11.2016].
- [Goe97] A. Götzberger, B. Voß und J. Knoblauch: *Sonnenenergie: Photovoltaik*. Stuttgart: B.G. Teubner, S. 83, 1992.

- [Gra02] A. Grambow: *Bestimmung der Materialparameter gefüllter Elastomere in Abhängigkeit von Zeit, Temperatur und Beanspruchungszustand*. Dissertation. Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, S. 41, 2002.
- [Gor11] K. M. Gorski: *The Albedo Project*. URL: <https://sites.google.com/site/albedo-project/> [Stand 14.12.2014].
- [Gre82] M. A. Green: *Solar Cells: operating principles, technology, and system applications*. Edition 1, Kensington: University of NSW, S. 52, 1992.
- [Gru04] P. Grunow, S. Lust, D. Sauter, V. Hoffmann, C. Beneking, B. Litzenburger, L. Podlowski: *Weak light performance and annual yields of PV modules and systems as a result of the basic parameter set of industrial solar cells*. In: Proceedings European Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris, 2004.
- [Gug62] W. Guggenbühl, M. J. O. Strutt, W. Wunderlin: *Halbleiterbauelemente: Band I Halbleiter und Halbleiterdioden*. Edition 1, Basel: Springer Basel Verlag, 1962.
- [Gue02] T. Güngör and H. Tolunay: *Effects of Substrate Temperature on Properties of α -Si-Nx:H Films*. In: Turk. J. Phys. 26, S. 269, 2002.
- [Haa12] H. Haarmann und H. Wolpers: *Mathematik zur Erlangung der allgemeinen Hochschulreife, Nichttechnische Fachrichtungen*. 2. Auflage, Rinteln: Merkur Verlag, 2012, S. 275, 2012.
- [Hac10] P. Hacke, M. Kempe, K. Terwilliger, S. Glick, N. Call, S. Johnston, S. Kurtz, I. Bennet und M. Kloos: *Characterization of Multicrystalline Silicon Modules with System Bias Voltage Applied in Damp Heat*. In: Proceedings of European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, S. 3760, 2010.
- [Hac11] P. Hacke: *Degradation Mechanisms of PV Modules at System Voltage*. Vortrag. PV Module Reliability Workshop Berlin, 2011.
- [Hac12a] P. Hacke, R. Smith, K. Terwilliger, S. Glick, D. Jordan, S. Johnston, M. Kempe und S. Kurtz: *Testing and analysis for life time prediction of crystalline silicon PV modules undergoing degradation by system voltage stress*. In: Proceedings of Photovoltaic Specialists Conference, S. 1750, 2012.
- [Hac12b] P. Hacke, R. Smith, K. Terwilliger, G. Perrin, B. Sekulic und S. Kurtz: *Development of an IEC Test for Crystalline Silicon Modules to Qualify their Resistance to System Voltage Stress*. In: Proceedings of: 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, S. 2944, 2012.
- [Hac14] P. Hacke: *Testing modules for potential-induced degradation– a status update of IEC 62804*. In: Proceedings of Photovoltaic Module Reliability Workshop Denver, 2014.

- [Hag14] C. Hage: *Grundlegende Aspekte des 2K-Metallpulverspritzgiessens*. Schriftenreihe des Instituts für Angewandte Materialien, Band 36, Karlsruher Institut für Technologie, 2014.
- [Hat12] J. Hattendorf, R. Löw, W.-M. Gnehr, L. Wulff, M. C. Koekten, D. Koshnicharov, A. Blauaermel und J. A. Esquivel: *Potential Induced Degradation in Mono-Crystalline Silicon Based Modules: An Acceleration Model*. In: Proceedings of 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, S. 3405, 2012.
- [Hat13] J. Hattendorf, W.-M. Gnehr, R. Löw, T. Roth, D. Koshnicharov und M. Zentgraf: *Potential-Induced Degradation and Temperature-Driven Regeneration: A Realistic Simulation*. In: Proceedings of 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, S. 3303, 2013.
- [Hay80] I. E. Hay, J. A. Davies: *Calculations of the solar radiation incident on an inclined surface*. In: Proceedings of First Canadian Solar Radiation Data Workshop, Ministry of Supply and Services, S. 59, 1980.
- [Hin15] C. Hinz: *Regeneration von Potential-induzierter Degradation*. Masterarbeit. Studiengang Regenerative Energien, Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, 2015.
- [Hof78] A. R. Hoffman und E. L. Miller: *Bias-Humidity Testing Of Solar Cell Modules*. Low-Cost Solar Array Project, California Institute of Technology Pasadena, S. 5101, 1978.
- [Hom12] S. Hoffmann und M. Köhl: *Effect of humidity and temperature on the potential-induced degradation*. In: Progress of Photovoltaics: Research and Applications, S. 173, 2012.
- [Huh03] J. E. Huheey, E. A. Keiter, R. L. Keiter: *Anorganische Chemie*. 3. Auflage, de Gruyter, Berlin, S. 1164, 2003.
- [IEC05] IEC 61215: *Crystalline Silicon Terrestrial Photovoltaic Modules – Design Qualification and Type Approval*. Norm. Edition 2, 2005.
- [IEC98] IEC 61724: *Photovoltaic system performance monitoring – Guidelines for measurement, data exchange and analysis*. Norm. Edition 1, 1998.
- [IEC11] IEC 61730: *Photovoltaic (PV) module safety qualification*. Norm. Edition 2, 2011.
- [IEC15] IEC 62804: *Photovoltaic (PV) modules – Test methods for the detection of potential-induced degradation*. Norm. Edition 1, 2015.
- [Ilu16] Ilumen (2016): *PIDbox Mini*. URL: <http://www.ilumen.be/en/all-products/pid-box-mini> [Stand 18.12.2016]

- [Ine11] P. Ineichen (2011): *Global irradiance on tilted and oriented planes: model validations*. URL: http://www.cuepe.ch/html/biblio/pdf/ineichen_2011_transposition-validation.pdf [Stand 2.1.2015].
- [Jan01] K. W. Jansen und A. E. Delahoy: *A laboratory technique for the evaluation of electrochemical transparent conductive oxide delamination from glass substrates*. In: *Thin Solid Films*, 423 (2), S. 153, 2003.
- [JaS16] JA Solar (2016): *PV Module*. URL: http://en.jasolar.com/site/Double_glass/558 [Stand 29.11.2016].
- [Jos60] W. Jost: *Diffusion in solids, liquids and gases*. Academic Press Inc., New York, 1960.
- [Kae16] Beko Käuferportal GmbH (2008): *Photovoltaikmodule Vergleich*. URL: <http://www.kaeufportal.de/energie/solaranlagen/photovoltaikmodule-vergleich/#0> [Stand 29.11.2016].
- [Kad13] T. Kaden, F. Fengler, N. Jost und H. J. Möller: *Solar Modules Under High External Voltage: Potential Induced Degradation, Leakage Currents and Electrostatic Field*. In: *Proceedings of the 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, S. 3347, 2013.
- [Kin13] N. Kindyni and G. E. Georghiou: *Description and analysis of potential-induced degradation in crystalline silicon solar cells and modules based on transistor principles*. In: *Proceedings of 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, S. 3388, 2013.
- [Koc11] S. Koch, C. Seidel, P. Grunow, S. Krauter und M. Schoppa: *Polarization effects and tests for crystalline silicon cells*. In: *Proceedings of 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, S. 1726, 2011.
- [Koc12a] S. Koch, J. Berghold, O. Okoroafor, S. Krauter und P. Grunow: *Encapsulation influence on the Potential Induced Degradation of Crystalline Silicon Cells with Selective Emitter Structures*. In: *Proceedings of 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, S. 3388, 2012.
- [Koc12b] S. Koch, J. Berghold und P. Grunow: *Potential-induced degradation effects on crystalline silicon cells with various anti-reflective coatings*. *Photovoltaics International*, Edition 18, S. 128, 2012.
- [Koc13] S. Koch, B. Abdullah, C. Hinz, S. Shafiq, J. Berghold und P. Grunow: *Works towards simulation model for the potential-induced degradation effect on crystalline silicon cells*. In: *Proceedings of 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, S. 1665, 2013.
- [Koc14a] S. Koch, J. Berghold, B. Abdullah, C. Hinz und P. Grunow: *Prediction Model for Potential Induced Degradation Effects on Crystalline Silicon Cells*. In:

- Proceedings of 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, S. 3327, 2014.
- [Koc14b] S. Koch, J. Berghold und P. Grunow: *Towards a Prediction Model for Potential-Induced Degradation(PID) Based on Climate Data*. In: Proceedings of Photovoltaic Module Reliability Workshop, S. 221, 2014.
- [Koc15] S. Koch, J. Berghold, C. Hinz, S. Krauter and P. Grunow: *Improvement of a Prediction Model for Potential Induced Degradation by better Understanding the Regeneration Mechanism*. In: Proceedings 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, S. 1813, 2015.
- [Koe14] M. Köntges, S. Kurtz, C. Packard, U. Jahn, K. A. Berger, K. Kato, T. Friesen, H. Liu und M. Van Iseghem: *Performance and Reliability of Photovoltaic Systems*. Report IEA-PVPS T13-01. International Energy Agency Photovoltaics Power Systems Programm, 2014.
- [Koi74] M. Koila: *Trapping effect in diffusion of interstitial impurity atoms in B.C.C. lattices*. In: Acta Metallurgica, Volume 22, S. 1259, 1974.
- [Kol16] H. Kolanoski und N. Wermes: *Teilchendetektoren: Grundlagen und Anwendungen*. Springer Verlag Berlin, S. 127, 2016.
- [Krat15] A. Kratochwill (2015): *Kinetik*. URL: http://akratochwill.homepage.t-online.de/b1/b_40c.htm [Stand 2.1.18].
- [Kra98] S. Krauter: *Energiebilanzierung photovoltaischer Generatoren unter Berücksichtigung der Reduktion des anthropogenen CO₂-Ausstoßes*. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 6 Nr. 392, Düsseldorf: VDI Verlag, 1998.
- [Kra09] S. Krauter und P. Grunow: *PV module characterization*. Photovoltaics International, 4(1), 2009.
- [Lau14] D. Lausch, V. Naumann, A. Graff, A. Hähnel, O. Breitenstein, C. Hagendorf und J. Bagdahn: *Sodium outdiffusion from stacking faults as root cause for the recovery process of potential-induced degradation (PID)*. In: Proceedings of 4th International Conference on Silicon Photovoltaics, Silicon PV, S. 486, 2014.
- [Lec12] P. Lechner, D. Sanchez, D. Geyer und H.-D. Möring: *Estimation of Time to PID-failure by Characterisation of Module Leakage Currents*. In: Proceedings of 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, S. 3152, 2012.
- [Lec13] P. Lechner: *PID Failure of c-Si and Thin-Film Modules and Possible Correlation with Leakage Currents*. Vortrag. NREL Photovoltaic Module Reliability Workshop, 2013.

- [Lec14] P. Lechner: *Potential-induzierte Degradation (PID): Korrelation von Labor- und Feldmessungen*. Vortrag. 29. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 2014.
- [Lec16] P. Lechner, S. Hummel und J. Schnepf: *Evaluation of Recovery Methods after Potential Induced Degradation of PV Modules*. In: Proceedings of 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, S. 1821, 2016.
- [Lue05] R. Lüdemann, H. Schmidhube, H. Wirth, R. Brendel, K. Bothe, B. Rech, M. Powalla und S. Oelting: *Photovoltaik – Innovationen bei Solarzellen und Modulen*. In BINE-Themeninfo III, 2005.
- [Lew95] H.-J. Lewerenz und H. Jungblut: *Photovoltaik*. Springer-Verlag Berlin, S. 11, 1995.
- [Lex14] A. Barmettler (2017): *Die Zeitgleichung*. URL: <http://lexikon.astronomie.info/zeitgleichung> [Stand 10.12.2017].
- [Mac14] M. Mack, L. Busch, M. Egler, T. Schäfer, W. Song (2013): *Ertragsberechnungen für PV-Systeme – Status und künftige Anforderungen*. URL: http://www.solar-engineering.de/m104v01_upload/Ertragsberechnungen%20f%C3%BCr%20PV-Systeme%20-%20Status%20und%20k%C3%BCnftige%20Anforderungen.pdf [Stand 14.12.2014].
- [Mar12] M. Martin, R. Krause, H. Eckert, M. Pfeifer und D. Kohake: *Investigation of Potential Induced Degradation for Various Module Manufacturers and Technologies*. In: Proceedings of 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, S. 3394, 2012.
- [Mat12] G. Mathiak, M. Schweiger und W. Herrmann: *Potential-Induced Degradation – Comparison of Different Test Methods and Low Irradiance Performance Measurements*. In: Proceedings of 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, S. 3157, 2012.
- [Meh12] H. Mehlich, D. Decker, U. Scheit, M. Uhlig, S. Frigge, M. Runge, B. Heinze, H.-P. Sperlich, J. Mai, H. Schlemm, E. Vetter, J. Höhne, S. Reichel und W. Stein: *A new method for high resistance against potential induced degradation*. In: Proceedings of 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, S. 3411, 2012.
- [Men98] G. Menges: *Werkstoffkunde der Kunststoffe*. München: Carl Hanser Verlag, 1998.
- [Mon84] G. R. Mon, J. Orehotsky, R. G. Ross und G. Whitla: *Predicting electrochemical breakdown in terrestrial photovoltaic modules*. In: Proceedings of 23rd Project Integration Meeting, S. 279, 1984.

- [Mon85a] G. R. Mon und R. G. Ross: *Electrochemical degradation of amorphous silicon photovoltaic modules*. In: Proceedings of 18th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, S. 1142, 1985.
- [Mon85b] G. R. Mon, L. Wen, R. G. Ross, D. Adent: *Effect of temperature and moisture on module leakage currents*. In: Proceedings of 18th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, S. 1179, 1985.
- [Moo97] E. Moore und L. Smart: *Einführung in die Festkörperchemie*. Braunschweig/-Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 2. Auflage, 1997.
- [Mue07] W. von Münch und E. Ivers-Tiffée: *Werkstofftechnik der Elektrotechnik*. Wiesbaden: B. G. Teubner Verlag, 10. Auflage, 2007.
- [Nag11] H. Nagel, A. Metz und K. Wangemann: *Crystalline Si solar cells and modules featuring excellent stability against potential-induced degradation*. In: Proceedings of 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference, S. 3107, 2011.
- [Nag12a] H. Nagel, R. Pfeiffer, A. Raykov und K. Wangemann: *Lifetime warranty of crystalline silicon modules for potential-induced degradation*. In: Proceedings of 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference, S. 3163, 2012.
- [Nau12] V. Naumann, D. Lausch, S. Großer, M. Werner, S. Swatek, C. Hagendorf und J. Bagdahn: *Microstructural Analysis of Crystal Defects Leading to Potential-Induced Degradation (PID) of Si Solar Cells*. In: Proceedings of PV Asia Pacific Conference, S. 76, 2012.
- [Nau13] V. Naumann, D. Lausch, A. Hähnel, J. Bauer, O. Breitenstein, A. Graff, M. Werner, S. Swatek, S. Großer, J. Bagdahn und C. Hagendorf: *Explanation of potential-induced degradation of the shunting type by Na decoration of stacking faults in Si solar cells*. Solar Energy Materials and Solar Cells, S. 383, 2014.
- [Nau14] V. Naumann: *Degradation Mechanisms of PV Modules at System Voltage*. Dissertation. Naturwissenschaftliche Fakultät II – Chemie, Physik und Mathematik der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 2014.
- [Nef86] M. Neff, G. R. Mon, G. Whitla und R. J. Ross: *Testing and analysis of Photovoltaic Modules for Electrochemical Corrosion*. In: Proceedings of ISTFA International Symposium for Testing and Analysis Los Angeles, S. 39, 1986.
- [Nie04] H. Niedrig und M. Sternberg: *Das Ingenieurwissen: Physik*. Berlin: Springer-Verlag, S. 97, 2013.
- [Noa14] S. Noack-Schönmann, O. Spagina, K.-P. Gründer, M. Breithaupt, A. Günter, B. Muschik, und A. A. Gorbushina: *Sub-aerial biofilms as blockers of solar radiation: spectral properties as tools to characterise material-relevant microbial growth*. International Biodeterioration & Biodegradation, 86 (C), S. 286, 2014.

- [Obr09] V. V. N. Obreja und A. C. Obreja: *Activation energy values from the temperature dependence of silicon PN junction reverse current and its origin*. Phys. Status Solidi A, S. 1, 2009.
- [Org77] J. F. Orgill und K. G. T. Hollands: *Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface*. Solar Energy, 19 (4), S. 357, 1977.
- [Pad16] PADCON GmbH: *FLOAT CONTROLLER CI*. URL: http://www.padcon.de/en/The_PID_solution_for_central_inverter.html [Stand 10.12.2016]
- [Per90] R. Perez, P. Ineichen, R. Seals, J. Michalsky und R. Stewart: *Modeling Daylight Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance*. Solar Energy, Vol. 44, S. 271, 1990.
- [Pin10] S. Pingel, O. Frank, M. Winkler, S. Daryan, T. Geipel, H. Hoehne und J. Berghold: *Potential Induced Degradation of solar cells and panels*. In: Proceedings of 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2010.
- [Pin12] S. Pingel, S. Janke und O. Frank: *Recovery methods for modules affected by potential induced degradation (PID)*. In: Proceedings of 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, S. 3379, 2012.
- [Pin14] S. Pingel, S. Janke, J. Seydewitz, R. Alam, S. Koch, J. Kupke und J. Berghold: *The local potential distribution as driver of PID & live PID monitoring method*. In: Proceedings of 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, S. 2335, 2014.
- [Pre10] A. Preiss: *Leistungsmessung bei STC W.10.2-10.6v03*. QMA-Dokument, PI Berlin AG, 2011.
- [PVB17] M. Diel (2012): *Wie gut ist die MPP Regelung meines Photovoltaikwechselrichters?* URL: <https://www.photovoltaikbuero.de/pv-know-how-blog/wie-gut-ist-die-mpp-regelung-meines-photovoltaikwechselrichters> [Stand 29.07.2017]
- [Qua00] V. Quachning: *Systemtechnik einer klimaverträglichen Elektrizitätsversorgung in Deutschland für das 21. Jahrhundert*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 6, Nr. 437, Düsseldorf: VDI Verlag, 2000.
- [Que62] Queisser, H. J., Solid-St. Electron: *Forward characteristic and efficiencies of silicon solar cells*. Solid-State Electronics, Volume 5, 1962.
- [Rap17] RAPP Instruments: *Physikalische, chemische und elektrische Experimente*. URL <http://www.rapp-instruments.de/static-machines/measuring/feldmuehle/feldmuehle.htm> [Stand 29.07.2017]
- [Ray12] A. Raykov, H. Nagel, D.-J. Amankwah und W. Bergholz: *Climate model for potential-induced degradation of crystalline silicon photovoltaic modules*. In: Proceedings of 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, S. 3399, 2012.

- [Ray13] A. Raykov, H. Hahn, K.-H. Stegemann, M. Kutzerl, O. Storbeckl, H. Neuhausl, und W. Bergholz: *Towards a root cause model for potential-induced degradation in crystalline silicon photovoltaic cells and modules*. In: Proceedings of 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, S. 2998, 2013.
- [Rei90] D. T. Reindl, W. A. Beckmann, und J. A. Duffie: *Evaluation of hourly tilted surface radiation models*. In: Solar Energy 45 (1), S. 9, 1990.
- [Rut08] I. Rutschmann: *Noch nicht ausgelernt, Auch Module von Evergreen zeigen Polarizationsverhalten*. In: PHOTON – Das Solarstrom-Magazin, S. 122, 2008
- [Sam09] T. Sample, A. Skoczek, M. Field, M. Köhl, D. Geyer und W. Herrmann: *Accelerated ageing of seven different thin-film module types by sequential exposure to damp heat with either additional applied voltage or ultraviolet light*. In: Proceedings of 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, S. 3241, 2009.
- [Sch11a] M. Schütze, M. Junghänel, M. B. Koentopp, S. Cwikla, S. Friedrich, J. W. Müller and P. Wawer: *Laboratory study of potential induced degradation of silicon*. Manuscript, Bitterfeld-Wolfen: Q-Cells SE, 2011.
- [Sch11b] M. Schütze, M. Junghänel, O. Friedrichs, R. Wichtendahl, M. Scherff, J. Müller und P. Wawer: *Investigations of Potential Induced Degradation of Silicon Photovoltaic Modules*. In: Proceedings of 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, S. 3097, 2011.
- [Shir14] N. Shiradkar, E. Schnellera und N. G. Dharea: *Finite Element Analysis based model to study the electric field distribution and leakage current in PV modules under high voltage bias*. In: Proceedings SPIE, Vol. 8825 (88250G-1), 2014.
- [Sha05] James F. Shackelford: *Werkstofftechnologie für Ingenieure*. München: Pearson Education Deutschland GmbH, 6. Auflage, 2005.
- [SMA17] SMA Solar Technology AG (2010): *Auslegung wirtschaftlich optimierter PV-Anlagen*. URL: <http://files.sma.de/dl/7680/PV-Ausl-TI-de-10.pdf> [Stand 20.07.2017].
- [Sol14] NPD Solarbuzz (2013): *Multicrystalline Silicon Modules to Dominate Solar PV Industry in 2014*. URL: <http://www.solarbuzz.com/news/recent-findings/multicrystalline-silicon-modules-dominate-solar-pv-industry-2014> [Stand 12.11.2014].
- [Spe98] Spektrum Akademischer Verlag (1998): *Diffusion in Festkörpern*. URL: <http://www.spektrum.de/lexikon/physik/diffusion-in-festkoerpern/3071> [Stand 01.02.2018].
- [Str12] H. Stroppe: *PHYSIK: für Studierende der Natur- und Ingenieurwissenschaften*. Carl Hanser Verlag München, S. 201, 2012.

- [Swa05] R. Swanson, M. Cudzinovic, D. DeCeuster, V. Desai , J. Jürgens, N. Kaminar und W. L. Mulligan: *The Surface Polarization Effect in High-Efficiency Silicon Solar Cells* In: Proceedings of 15th IEEE PVSC, S. 410, 2005.
- [Tau12] C. Taubitz, M. Schütze und M. B. Köntopp: *Towards a kinetic model of potential-induced shunting*. In: Proceedings of 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference, S. 3172, 2012.
- [Tau13] C. Taubitz, M. Kröber, M. Schütze und M. B. Köntopp: *Kinetic description and modelling of potential induced degradation*. In: Proceedings of 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, S. 3321, 2013.
- [Tau14] C. Taubitz, M. Schütze, M. Kröber und M. B. Köntopp: *Potential induced degradation: Model calculations and correlation between laboratory tests and outdoor occurrence*. In: Proceedings of 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, S. 2490, 2014.
- [Uni09] M. Schmidt (2011): *PCIII-20*. URL: <http://www.uni-mainz.de/FB/-Chemie/AK-Maskos/Dateien/PCIII-20.pdf> [Stand 15.01.2015].
- [Led16] LEDVANCE GmbH (2018): *UV-Filter-Technologie: dotiertes Quarzglas für Halogenlampen*. URL: <https://www.ledvance.de/produkte/produktwissen/halogenlampen/professionelles-wissen/uv-filter-technologie/index.jsp> [Stand 15.12.2016].
- [Ver66] P. F. Verhulst: In: *Sciences Mathématiques et Physiques chez les Belges au commencement du XIX siècle*. Brüssel: H. Thiry-Van Buggenhoudt, S. 165, 1866.
- [Vos15] S. Voswinckel, V. Wesselak, E. Fokuhl, C. Schmidt und K. Watzlawik: *Dos and Dont's of Leakage Current Measurements*. In: Proceedings of 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, S. 2508, 2015.
- [Wag99] A. Wagner: *Photovoltaik Engineering: Die Methode der Effektiven Solarzellen-Kennlinie*, Berlin: Springer-Verlag, 1999.
- [Web13] T. Weber, J. Berghold, F. Heilmann, M. Roericht, S. Krauter und P. Grunow: *Test Sequence Development for Evaluation of Potential Induced Degradation on Thin-Film Modules*. In: Proceedings of 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, S. 3324, 2013.
- [Wer16] [Online] Werkstoffe II: Glas, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kalk-Natron-Glas_2D.png [Stand 28.11.2016].
- [Wil55] M.L. Williams, R. F. Landel, J. D. Ferry: *The Temperature Dependence of Relaxation Mechanism in Amorphous Polymers and other Glass-forming Liquids*. In *Journal of the American Chemical Society* 77, S. 3701, 1955.

Literaturverzeichnis

- [Won13] J. Wong: *Griddler: intelligent computer aided design of complex solar cells*. In: Proceedings of the 40th IEEE PVSC, S. 933, 2013.
- [Wor06] R. Wortman: *Reliability Physics of Nanoelectronic Devices*. Lecture 6, NBTI: Temperature activation, 2006.
- [Wue00] P. Würfel: *Physik der Solarzelle*. Berlin: Spektrum Akademischer Verlag, 2000.

Publikationsliste

- [Koch10] S. Koch, J. Kupke, D. Tornow, M. Schoppa, S. Krauter und P. Grunow: *Dynamic Mechanical Load Tests on Crystalline Silicon Modules*. In: Proceedings of 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, S. 3998, 2010.
- [Koch11] S. Koch, C. Seidel, P. Grunow, S. Krauter und M. Schoppa: *Polarization effects and tests for crystalline silicon cells*. In: Proceedings of 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, S. 1726, 2011.
- [Koch12a] S. Koch, J. Berghold, O. Okoroafor, S. Krauter und P. Grunow: *Encapsulation influence on the Potential Induced Degradation of Crystalline Silicon Cells with Selective Emitter Structures*. In Proceedings of 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, S. 3388, 2012.
- [Koch12b] S. Koch, J. Berghold und P. Grunow: *Potential-induced degradation effects on crystalline silicon cells with various anti-reflective coatings*. In: Photovoltaics International, Edition 18, S. 128, 2012.
- [Koch12c] S. Koch, D. Nieschalk, J. Berghold, S. Wendlandt, S. Krauter und P. Grunow: *Potential Induced Degradation effects on crystalline silicon cells with various antireflective coatings*. In: Proceedings of 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, S. 1985, 2012.
- [Koch12d] A. Schneider, R. Harney, S. Aulehla, S. Hummel, E. Lemp, S. Koch und K. Schröder: *Conductive Gluing as Interconnection Technique towards Solar Cells without Front Busbars and Rear Pads*. In: Proceedings of 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, S. 335, 2012.
- [Koch12e] J. Berghold, M. Roericht, A. Böttcher, S. Wendlandt, M. Hanusch, S. Koch, P. Grunow und B. Stegemann: *Electrochemical Corrosion within Solar Panels*. In: Proceedings of 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, S. 3511, 2012.
- [Koch13a] J. Berghold, S. Koch, A. Böttcher, A. Ukar, M. Leers und P. Grunow: *Potential-induced degradation (PID) and its correlation with experience in the field, Photovoltaics International*. In: Photovoltaics International, Edition 19, S. 85, 2013.
- [Koch13b] S. Koch, B. Abdullah, C. Hinz, S. Shafiq, J. Berghold und P. Grunow: *Work towards simulation model for the potential-induced degradation effect on cry-*

- stalline silicon cells*. In: Proceedings 30th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, S. 1665, 2013.
- [Koch13c] J. Berghold, P. Grunow, P. Hacke, W. Herrmann, S. Hoffmann, S. Janke, B. Jaeckel, S. Koch, M. Köhl, G. Mathiak, S. Pingel, L. Pöhlmann, P. Reinig und A. Ukar: *PID Test Round Robins and Outdoor Correlation*. In: Proceedings 30th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, S. 3003, 2013.
- [Koch13d] A. Schneider, R. Harney, S. Aulehla, E. Lemp und S. Koch: *Progress in interconnection of busbar-less solar cells by means of conductive gluing*. In: Proceedings of 3rd International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaics, S. 387, 2013.
- [Koch14a] S. Koch, J. Berghold, B. Abdullah, C. Hinz und P. Grunow: *Prediction Model for Potential Induced Degradation Effects on Crystalline Silicon Cells*. In: Proceedings of 30th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, S. 3327, 2014.
- [Koch14b] P. Hacke and K. Terwilliger of NREL; S. Koch, T. Weber und J. Berghold of PI Berlin; S. Hoffmann, H. Ambrosi, and M. Koehl of Fraunhofer ISE; S. Dietrich and M. Ebert of Fraunhofer CSP und G. Mathiak of TUV Rheinland: *Initial Round Robin Results of the IEC 62804 (draft) System Voltage Durability Qualification Test for Crystalline Silicon Modules*. In: NREL/PR-5200-58378, 2014.
- [Koch14c] T. Weber, M. Hanusch, S. Koch, M. Trawny, A. Janker, A. Böttcher, J. Berghold und P. Grunow: *From the Impact of Harsh Climates and Environmental Conditions on PV-Modules – Development of a Soiling and Abrasion Test*. In: Proceedings 30th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, S. 2499, 2014.
- [Koch14d] A. Schneider, S. Koch, T. Horiuchi, S. Aulehla und R. Harney: *Conductive Film Application to Replace the Soldering Process and Allow for Busbar-Less Cell Interconnection*. In: Proceedings 30th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, S. 158, 2014.
- [Koch15a] A. Schneider, R. Harney und S. Koch: *Impact of cell texturing quality on cell to module losses*: In: Proceedings of 5rd International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaics, 2015.
- [Koch15b] S. Koch, J. Berghold, C. Hinz, S. Krauter und P. Grunow: *Improvement of a Prediction Model for Potential Induced Degradation by better Understanding the Regeneration Mechanism*. In: Proceedings 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, S. 1813, 2015.

Publikationsliste

- [Koch16a] C. Hinz, S. Koch, T. Weber und J. Berghold: *Regeneration of Potential Induced Degradation Affected Modules*. In: Proceedings of 32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, S. 1552, 2016.
- [Koch16b] S. Koch, T. Weber, C. Sobottka, A. Fladung, P. Clemens und J. Berghold: *Outdoor Electroluminescence Imaging of Crystalline Photovoltaic Modules: Comparative Study between Manual Ground-level Inspections and Drone-based Aerial Surveys*. In: Proceedings of 32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, S. 1736, 2016.

Lebenslauf

Persönliches

Name: Simon Koch

Geboren: 18. Juli 1982 in Linz am Rhein

Staatsangehörigkeit: Deutsch

Ausbildung

01/2012-05/2018 Projektmanager und Bearbeitung der vorliegenden Doktorarbeit unter der Leitung von Dr. Juliane Berghold am PI Photovoltaik-Institut Berlin AG, Berlin.

08/2014-09/2014 Forschungsk Kooperation über potential-induzierte Degradation unter der Leitung von Prof. Dr. G. E. Georghiou an der University of Cyprus, Nikosia, Zypern.

07/2012-07/2014 Projektleiter des erfolgreich abgeschlossenen FutureFab-Förderprojekts 13N11445, Forschungsschwerpunkte: Potential-induzierte Degradation, leitfähiges Kleben, Hochleistungszellen und neuartige Modulmaterialien.

03/2011-10/2011 Projektleiter des erfolgreich abgeschlossenen ZIM-Förderprojekts KU2371801AB9: „Erforschung und Entwicklung eines inlinefähigen Photolumineszenzmessapparats“.

11/2008-02/2011 Wissenschaftlicher Mitarbeiter und Qualitätsmanagementbeauftragter, Einführung und Etablierung des Qualitätsmanagements nach IEC 17025 am PI Photovoltaik-Institut Berlin AG, Berlin.

05/2008-10/2008 Diplomarbeit über „Fehlerdiagnose von Photovoltaik-Modulen und -Zellen mittels Lumineszenz“ unter der Leitung von Dr. Paul Grunow am PI Photovoltaik-Institut Berlin AG, Berlin.

04/2004-10/2008 Fachhochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, Diplomstudiengang Umwelttechnik/Regenerative Energien

- Studienschwerpunkte: Photoelektrische Prozesse und Elektrotechnik
- Gesamt-Abschlussnote: sehr gut (1,3)

bis 04/2003 Rhein Gymnasium Sinzig, Abitur.

Eidesstattliche Versicherung

Ehrenwörtliche Erklärung zu meiner Dissertation mit dem Titel: „Entwicklung eines Vorhersagemodells für die potential-induzierte Degradation in Abhängigkeit von lokalen Umweltbedingungen“

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

I declare under oath that this thesis is my own work entirely and has been written without any help from other people. I used only the sources mentioned and included all the citations correctly both in word or content.

Datum,

Unterschrift

Danksagung

Nach vielen Jahren intensiver Arbeit liegt sie nun vor Ihnen: meine Dissertation. Damit ist es an der Zeit, mich bei denjenigen zu bedanken, die mich in dieser spannenden Phase meiner akademischen Laufbahn begleitet haben. Mein Dank gilt Prof. Dr. Ralf B. Wehrspohn für die Übernahme der Betreuung der Arbeit und die hilfreichen Anregungen, die zu ihrem Gelingen beigetragen haben. Ebenso gilt mein Dank Dr. Juliane Berghold für die Übernahme des Koreferats, für die inhaltliche Betreuung an der PI Photovoltaik-Institut Berlin AG und die gute Zusammenarbeit zum Thema PID. Außerdem gilt mein Dank Dr. Matthias Ebert und dem gesamten Team des Fraunhofer CSP, welches mir bei den regelmäßigen Treffen in Halle durch die fachlichen Diskussionen immer wieder neue Impulse und Denkanstöße geliefert hat.

Die Arbeit wurde in wesentlichen Teilen im Rahmen des Verbundprojekts FutureFab (Förderkennzeichen 13N10445) durch das BMBF finanziert. Diesem und den Projektpartnern möchte ich für die mir so entstandenen Möglichkeiten danken, die den Abschluss der Dissertation deutlich erleichtert haben.

Ich danke auch den Kollegen der University of Cyprus, die es mir ermöglicht haben, meine Messungen auf Zypern durchzuführen. George E. Georghiou und George Makrides gebührt hier mein besonderer Dank. Auch danke ich dem National Renewable Energy Laboratory und Peter Hacke für die vielen ertragreichen Diskussion zu PID und die Übermittlung des Moduldegradationsverlaufes aus Florida. Ferner danke ich meinen Kolleginnen und Kollegen am Photovoltaik Institut Berlin für die inhaltlichen Diskussionen und die lustigen produktiven und auch unproduktiven Momente, die die Arbeit immer wieder aufgelockert und bereichert haben.

Ich danke all meinen Freunden, die meine Hochs und Tiefs in der Zeit des Verfassens meiner Dissertation ertragen haben und besonders denen, die mich immer wieder motiviert und bestärkt haben, mich in meinem Tun zu verbessern. Und nicht zuletzt danke ich meinen Eltern, die in jeglicher Hinsicht die Grundsteine für meinen Weg gelegt haben und mich in meinem ganzen Leben, bei allen meinen Vorhaben, stets bestärkt und unterstützt haben.