

Thomas Glotzbach

**Ein Beitrag zur mathematischen Charakterisierung  
von Photovoltaik-Dünnschichttechnologien  
auf Basis realer I/U-Kennlinien**

Erneuerbare Energien und Energieeffizienz  
Renewable Energies and Energy Efficiency  
Band 18 / Vol. 18

Herausgegeben von / Edited by  
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schmid, Universität Kassel



Thomas Glotzbach

Ein Beitrag zur mathematischen Charakterisierung von Photovoltaik-  
Dünnschichttechnologien auf Basis realer I/U-Kennlinien



Die vorliegende Arbeit wurde vom Fachbereich Elektrotechnik / Informatik der Universität Kassel als Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) angenommen.

Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schmid

Zweiter Gutachter: Dr.-Ing. Norbert Henze

Tag der mündlichen Prüfung

21. Dezember 2010

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar

Zugl.: Kassel, Univ., Diss. 2010

ISBN print: 978-3-86219-054-6

ISBN online: 978-3-86219-055-3

URN: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0002-30551>

© 2011, kassel university press GmbH, Kassel  
[www.upress.uni-kassel.de](http://www.upress.uni-kassel.de)

Printed in Germany

## VORWORT

Durch die zunehmende Umweltverschmutzung bzw. -zerstörung und die weitere Erwärmung des Weltklimas durch die Verwendung fossiler Energieträger und deren Auswirkungen auf Menschen, Tiere, Pflanzen und deren Lebensraum ist ein Umdenken im Bereich der Energieversorgung unumgänglich. Alternativen dazu schaffen die sogenannten Erneuerbaren Energien. Eine zusätzliche Reduktion des „Energieverbrauchs“ zum Beispiel durch effizientere Geräte oder den Bau verlustärmerer Gebäude können zu einer Wende dieser Problematik beitragen. Da ich mich schon in frühen Jahren meines Lebens mit alternativen Energieversorgungssystemen beschäftigt habe, bin ich froh, dass das Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (Fraunhofer IWES), dem ehemaligen Institut für Solare Energieversorgungstechnik e.V. (ISET e.V.), mir die Chance geboten hat, in einem Teilbereich der Erneuerbaren Energien, dem Bereich der Photovoltaik, zu arbeiten und zu promovieren. Mit dieser Arbeit hoffe ich einen kleinen Teil zur Wende in der Energieversorgung beizutragen, bzw. die heute schon vorangeschrittenen Erkenntnisse und Umsetzungen weiter voranzutreiben.

Für eine sehr gute Betreuung während der Arbeit und für die unzähligen hilfreichen Anregungen möchte ich mich herzlich bei meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schmid und dem Zweitgutachter Herrn Dr.-Ing. Norbert Henze bedanken. Dank gilt auch den beiden Beisitzern Herrn Prof. Dr.-Ing. Siegfried Heier und Herrn Prof. Dr. rer. nat. Arno Linnemann.

Weiterhin möchte ich mich bei meiner Lebensgefährtin Christina bedanken, die mich immer moralisch unterstützt hat und mir gerade in der Endphase der Arbeit stets den Rücken freigehalten hat. Dank gilt auch meiner Mutter und den Eheleuten Maria und Emil, die mich, hauptsächlich während der Studienzeit, stets unterstützt haben und mir das Studium auf zweitem Bildungswege damit überhaupt ermöglichen.

Ein weiterer Dank gilt allen Mitarbeitern der Gruppe Anlagen- und Messtechnik (AM), des Bereiches Anlagentechnik und Netzintegration des Fraunhofer IWES, die mir ebenfalls immer mit Rat und Tat zur Seite gestanden haben. Vergessen möchte ich nicht die Universität Kassel, die mir die Möglichkeit der Promotion eröffnete.

Ein herzlicher Dank gilt auch meinen beiden Kollegen Herrn Jörg Kirchhof und Herrn Björn Schulz, die beide bei der Entwicklung des ISET-*mpp meter* beteiligt

waren. Herr Kirchhof war in erster Linie für die Hardwareentwicklung des ISET-*mpp meter* verantwortlich, während ich die Softwareentwicklung übernommen habe. Herr Schulz war zusammen mit Herrn Kirchhof in erster Linie für das Kalibrierungsverfahren verantwortlich.

Weiterhin bedanke ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Christian Bendel, meinem ehemaligen Abteilungsleiter, der sich inzwischen im Ruhestand befindet. Mit seinem nahezu unendlichen Wissen im Bereich der Photovoltaik stand er mir stets zur Seite und bot mir die Chance am damaligen ISET e.V. wissenschaftliche Arbeiten zu tätigen.

Zu erwähnen sei an dieser Stelle noch, dass die vorliegende Arbeit in erster Linie innerhalb des Forschungsprojektes MULTIELEMENT entstanden ist. In diesem befasst sich das Fraunhofer IWES zusammen mit 14 Partnern aus Industrie und Wirtschaft mit „Untersuchungen zur Entwicklung von Fertigungs-, Prüf- sowie Einbaumethoden von multifunktional nutzbaren Photovoltaik Bauelementen/Baugruppen in der Gebäudetechnik“.

Kassel, im September 2010

## ZUSAMMENFASSUNG

Eine wichtige elektrisch / physikalische Eigenschaft von PV-Zellen und Modulen ist die Strom/Spannungskennlinie (I/U-Kennlinie), bei welcher der Stromverlauf in Abhängigkeit der Spannung aufgetragen wird. Die Kennlinie kann mit einer variablen Last und einer speziellen Messtechnik, einem sogenannten Kennlinienmessgerät, zum Beispiel dem *ISET-mpp meter* (Kapitel 3) erzeugt werden. Grundsätzlich ist die Form dieser Kennlinie abhängig von der verwendeten Technologie der Zelle. Weiteren Einfluss haben die Bestrahlungsstärke der Sonne, die Zusammensetzung der spektralen Anteile des Sonnenlichts (Kapitel 2) und die Zelltemperatur. Eine mathematisch / physikalische Nachbildung dieser PV-Zellen bzw. Module kann mit verschiedenen Simulationsmodellen erfolgen. Durch geeignete Parametrisierung dieser Modelle kann die I/U-Kennlinie für jeden beliebigen Arbeitspunkt simulativ erzeugt werden. Als Beispiel seien das Ein- und Zweidiodenmodell (Kapitel 4) genannt. Diese Modelle funktionieren nach Parametrisierung sehr gut für kristalline Zellen bzw. Module. Kupfer-Indium-Diselenid-Technologien (CIS) lassen sich mit dem Ein- oder Zweidiodenmodell noch relativ gut beschreiben. Ein modifiziertes Eindiodenmodell ist für Cadmium-Tellurid-Technologien (CdTe) entwickelt worden und kann diese für bestimmte Arbeitspunkte gut beschreiben. Bei amorphem Silizium (a-Si) oder bei Tandem- bzw. Trippelzellen erreichen diese Modelle jedoch nicht mehr die gewünschte Genauigkeit. Bei a-Si ergibt sich zusätzlich das Problem des Annealing-Effekts, eine jahreszeitabhängige Veränderung der Effizienz der a-Si Zelle. Dieser Effekt lässt sich durch die vorhandenen Modelle ebenfalls nicht beschreiben.

Die beschriebenen Simulationsmodelle gehören zu den sogenannten physikalischen Modellen. Eine weitere Kategorie bilden die sogenannten numerischen oder empirischen Modelle. Der neue, in dieser Arbeit beschriebene Ansatz, stützt sich genau auf diese Kategorie von Modellen, um die I/U-Kennlinien mathematisch zu beschreiben. Hierzu wird in dem neu entwickelten Modell ein künstliches neuronales Netz (KNN) verwendet. Das Modell kann in Verbindung mit dem *ISET-mpp meter* die I/U-Kennlinien simulativ bestimmen. Mit den Messdaten des *ISET-mpp meter* wird das neuronale Netz trainiert. Der Vorteil der vorgestellten Methode zur Simulation von I/U-Kennlinien ist, dass sich unabhängig von der Technologie die Kennlinien jeder Zelle bzw. jedes Moduls beschreiben lassen, auch von kristallinen Modulen.

Das Simulationsmodell besteht, wie bereits oben erwähnt, aus einem künstlichen neuronalen Netz, welches trainiert werden muss (Kapitel 5). Ein Training ist die Optimierung einer Anzahl von Parametern im Netz. Damit solch ein Training stattfinden kann, müssen möglichst viele verschiedene Messdaten des nachzubildenden PV-Moduls vorhanden sein. In Verbindung mit dem ISET-*mpp meter*, welches diese Messdaten, also die charakteristischen Kennlinien (I/U-Kennlinien) in allen denkbaren Betriebszuständen von PV-Zellen, PV-Modulen oder PV-Modulverbünden liefert, kann eine Parametrisierung erfolgen. Eine Vorrichtung und ein Verfahren wurden zur quasi automatisierten Parametrisierung entwickelt (Kapitel 6). Diese Vorrichtung besteht aus dem ISET-*mpp meter* und einer Software, welche die Parameter bestimmt. Solch eine Vorrichtung (Teststand) wird im Outdoor-Bereich aufgebaut und kann über einen längeren Zeitraum Messdaten liefern, zum Beispiel ein oder mehrere Jahre. Diese Messdaten werden dann nach Vorgaben des Anwenders dazu verwendet, die Parametrisierung des KNN vorzunehmen (Verfahren).

In dieser Arbeit werden somit einerseits eine neue Messtechnik zur Messung von I/U-Kennlinien präsentiert und beschrieben und andererseits ein neues Simulationsmodell zur mathematischen Nachbildung photovoltaischer Zellen und Module vorgestellt. Diese beiden Komponenten werden zusammen für ein Verfahren und eine Vorrichtung verwendet, welche die Parameter für das neue Simulationsmodell quasi automatisiert bestimmt.

## ABSTRACT

A major electrical / physical property of PV cells and modules is the current / voltage characteristic (I/V-curve) in which the current is a function of the voltage. This curve can be obtained with a variable load and a special measuring technique. These devices are known as measurement devices for I/V-curves, for example the *ISET-mpp meter* (Chapter 3). While the shape of this curve depends on the technology of the cell, it is influenced by the solar irradiance, the composition of the spectral components of sunlight (Chapter 2) and the temperature of the cell. A mathematical / physical simulation of PV cells and modules may be done using a variety of simulation models. With a correct parameterization of these models, the I/V-curve of any given operating points may be simulated. Two of the most commonly used models are the one- and two-diode-models (Chapter 4). Once parameterized, these models work very well for crystalline cells and modules. Copper Indium Diselenid (CIS) technologies can still be relatively well described with the one- or two-diode-models. A modified one-diode-model has been developed for Cadmium Telluride (CdTe) technology, which is able to describe the behaviour of this technology at certain operating points. However, when used for amorphous silicon (a-Si) or for tandem or triple solar cells, these models no longer reach the desired accuracy. An additional problem with a-Si is the annealing effect: a seasonal change of the efficiency of a-Si solar cells, which cannot be described by existing models.

The described simulation models are among the so-called physical models. The so-called numerical or empirical models are another category. The new approach, described in this work, is based precisely on the latter category. In this case the I/V-curves are described mathematically. The newly developed model is based on the use of artificial neural networks (ANN). The model may be used in conjunction with the *ISET-mpp meter* for determining the I/V-curves. In this work, the neural network will be trained with the measured data of the *ISET-mpp meter*. The advantage of the presented method for the simulation of I/V-curves is, that regardless of the technology, the characteristics can be described for each cell or each module, including crystalline modules.

As mentioned above the simulation model is based on an artificial neural network approach, which requires training (Chapter 5). A training is the optimization of a number of parameters in the network. In order to perform such a training, a considerable amount of measured data of a real PV module must be available. The *ISET-mpp meter* supplies the measured data of the characteristic curves (I/V-

curves) in all possible modes of operation of either PV cells, PV modules or PV module arrays. By using this data, a successful parameterization can be done. An apparatus and a process have been developed for an automatic parameterization (Chapter 6). This equipment consists of the ISET-*mpp meter* and software which determines the parameters. Such an apparatus (test stand) is built up in the outdoor area and can deliver data over a longer period, for example over one or more years. The measurement data is then used for the determination of the parameters of the ANN by specifications of the user (process).

In this work, a new technique for measuring I/V-curves will be presented and described. Moreover, a new simulation model of photovoltaic cells and modules was developed. These two components are used for a process and an apparatus, which determines the parameters for the new simulation model automatically.

---

## INHALTSVERZEICHNIS

Vorwort .....	V
Zusammenfassung .....	VII
Abstract.....	IX
Inhaltsverzeichnis .....	XI
1 Einleitung.....	1
1.1 Erneuerbare Energien .....	2
1.2 Photovoltaik und ihre Potenziale .....	4
1.3 Ertragsberechnungen durch Simulation .....	6
1.4 Gliederung der Arbeit .....	7
2 Physikalische Effekte und Zeitreihenanalysen.....	10
2.1 Physikalische Effekte .....	10
2.1.1 Solarstrahlung.....	10
2.1.2 Messung der Solarstrahlung .....	12
2.1.3 Spektrale Empfindlichkeit verschiedener PV-Technologien.....	13
2.2 Zeitreihenanalysen mit Messdaten des IWES PV-Testfeldes .....	15
3 Messung der I/U-Kennlinien .....	20
3.1 ISET- <i>mpp meter</i> .....	20
3.2 Funktionsweise des ISET- <i>mpp meter</i> .....	22
3.3 Messunsicherheitsbetrachtung.....	26
3.3.1 Messunsicherheitsbeiträge der MPP-Spannung [Kir-10] .....	27
3.3.2 Messunsicherheitsbeiträge des MPP-Stroms [Kir-10].....	31
3.3.3 Einfluss der Messpunkteanzahl auf die Messunsicherheit.....	35
3.4 Messdaten des ISET- <i>mpp meters</i> .....	40
4 I/U-Kennlinien Simulationsmodelle .....	42
4.1 Physikalische Simulationsmodelle .....	42
4.1.1 Eindiodenmodell .....	42
4.1.2 Zweidiodenmodell .....	46
4.1.3 Modifiziertes Eindiodenmodell für CdTe-Technologien [Bey-07], [Bey-08] .....	49
4.1.4 Modifiziertes Eindiodenmodell für a-Si-Technologien [Bey-02].....	51
4.1.5 Modifiziertes Zweidiodenmodell [Eli-09].....	53
4.2 Numerische (empirische) Simulationsmodelle .....	53
4.2.1 Effektive Solarzellenkennlinie [Wag-06].....	53
4.2.2 Simulationsmodell mittels linearer Regression [Schm-10] .....	55



4.2.3	Simulation mittels eines künstlichen neuronalen Netzes nach [Zar-08] .....	56
4.2.4	Simulation mittels eines künstlichen neuronalen Netzes nach [Amo-00] .....	57
4.2.5	Simulation mittels des Eindiodenmodells und eines künstlichen neuronalen Netzes nach [Kar-07] .....	59
4.3	Weitere Simulationsmodelle .....	60
5	Neues Modell für I/U-Kennlinien .....	62
5.1	Künstliche Neuronale Netze (KNN) .....	62
5.1.1	Grundlagen künstlicher neuronaler Netze .....	62
5.1.2	Netzarchitektur .....	65
5.1.3	Trainings- und Testphase .....	67
5.1.4	Lernregeln und Netztypen .....	67
5.2	Verschiedene Ansätze der Simulation mit KNN .....	74
5.2.1	Kennlinienbestimmung mit einem KNN .....	75
5.2.2	Kennlinienbestimmung mit einem KNN und Spannungskategorien .....	77
5.2.3	Kennlinienbestimmung mit großer Anzahl KNN .....	79
5.2.4	Kennlinienbestimmung mit großer Anzahl KNN und Spannungskategorien .....	81
5.2.5	Kennlinienbestimmung mit wenigen KNN .....	82
6	Verfahren und Vorrichtung zur Bestimmung des Modells .....	96
6.1	Verfahren und Vorrichtung .....	96
6.2	Software .....	97
7	Zusammenfassung und Ausblick .....	100
8	Anhang .....	104
8.1	ISET- <i>mpp meter</i> Kalibrierschein (Nr. 10-047-141860) [IWES-10] .....	104
8.2	Einfluss der Messpunkteanzahl auf die Messunsicherheit (weitere Technologien) .....	113
8.3	Simulationen mit dem Zweidiodenmodell verschiedener Technologien .....	118
	Literaturverzeichnis .....	127
	Liste der eigenen Veröffentlichungen .....	136
	Nomenklatur .....	139
	Bildungsgang .....	144

## 1 EINLEITUNG

Durch die Industrialisierung im 19. und 20. Jahrhundert war ein enormer Anstieg des Energiebedarfs in Europa und den USA zu verzeichnen. Die damals hauptsächlich durch den Primärenergieträger Kohle, später auch Öl, erzeugte Energie verursachte immense CO<sub>2</sub> Emissionen und ging mit einer starken Luft- und Umweltverschmutzung einher. Die Erfindung des Automobils verschlimmerte die Situation weiter. Die Umweltzerstörung durch die hohe CO<sub>2</sub> Belastung und die Luftverschmutzung durch Aerosole schritt damit weiter fort. Mitte des 20. Jahrhunderts glaubte man die Lösung der Energieproblematik mit der Nutzung von Kernenergie gefunden zu haben. Aber auch hier sollte schnell festgestellt werden, dass diese Lösung nur als Übergang genutzt werden kann. Der exponentiell steigende weltweite Energiebedarf verschärft die Lage weiter. Bedenkt man, dass sich Staaten wie China oder Indien im wirtschaftlichen Aufschwung befinden, wird der Energiebedarf enorm wachsen. Passen sich ein Großteil dieser vielen Menschen (mehr als zweieinhalb Milliarden Menschen in diesen beiden Ländern) an den westlichen Standard und damit an den Energieverbrauch an, so ist die Umweltkatastrophe bei Nutzung konventioneller Energieträger vorprogrammiert. Abhilfe schaffen an dieser Stelle nur Alternativen zu den konventionellen Energieträgern: die Erneuerbaren Energien. In Verbindung mit einer insgesamt effizienteren Nutzung von Energie können die Auswirkungen der globalen CO<sub>2</sub>-Belastung gemildert werden. Den bisherigen und den möglichen Verlauf der weltweiten Energieversorgung illustriert die Abbildung 1.1 [ISET-06].

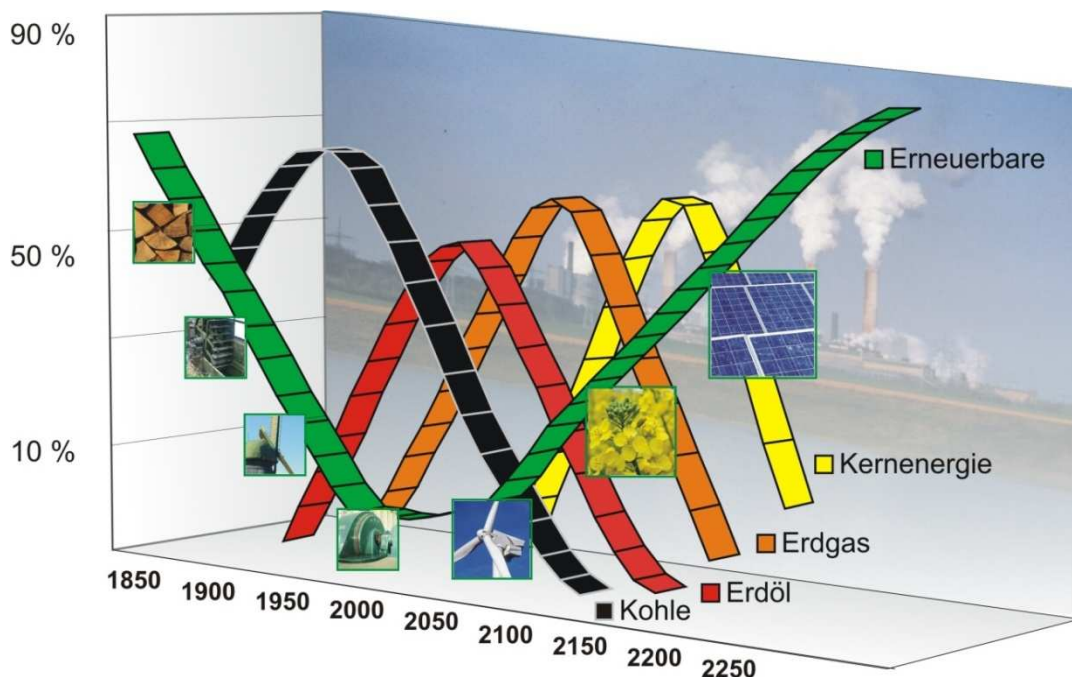
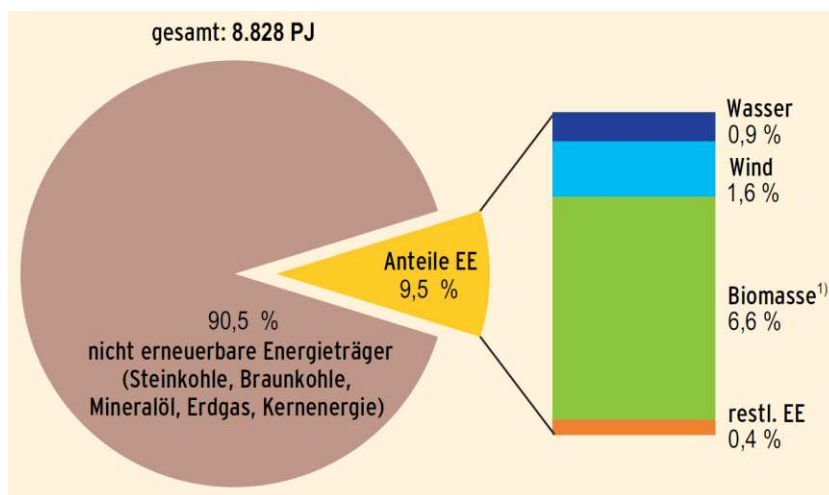


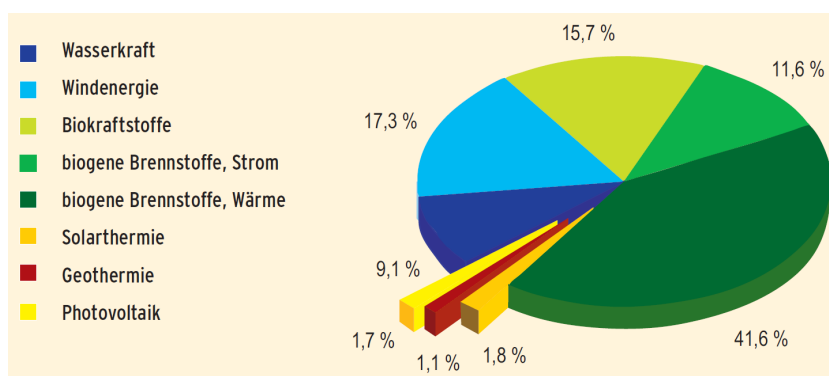
Abbildung 1.1: Bisherige und zukünftige Energieversorgung [ISET-06]

## 1.1 ERNEUERBARE ENERGIEN

Erneuerbare Energien stellen eine Alternative zu konventionellen Energieträgern wie Kohle, Öl oder Kernenergie dar. Zu diesen Energien zählen unter anderem die Nutzung der Sonne, des Windes, des Wassers, von Biogas oder der Erdwärme, wobei Wind, Wasser und Biogas eine indirekte Nutzung der Sonnenenergie darstellen. Schon heute sind diese Energieträger ökonomisch und ökologisch nutzbar und verbreitet im Einsatz. In Ländern mit Förderprogrammen, wie zum Beispiel in Deutschland das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) [EEG-09], wird der Ausbau dieser Energieträger vorangetrieben. Die Abbildungen 1.2 und 1.3 zeigen den Anteil Erneuerbarer Energien am gesamten Endenergieverbrauch in Deutschland 2008.



**Abbildung 1.2: Anteile der Erneuerbaren Energien am gesamten Endenergieverbrauch in Deutschland 2008 [BMU-09]**

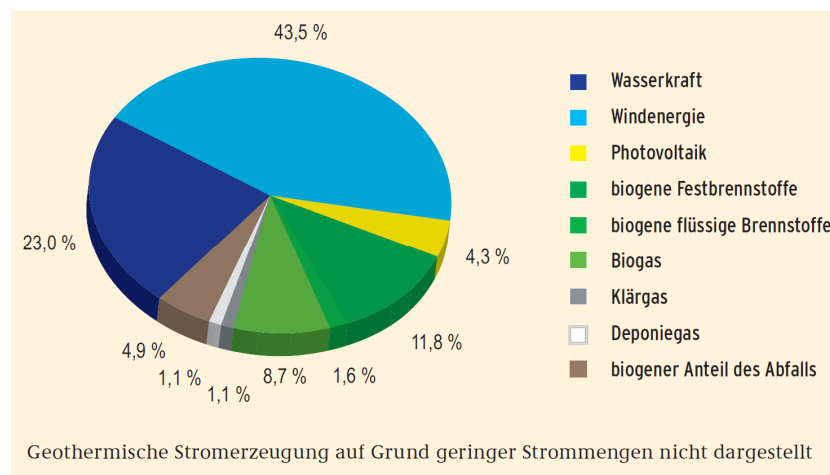


**Abbildung 1.3: Struktur der Endenergiebereitstellung aus Erneuerbaren Energien in Deutschland 2008 [BMU-09]**

Knapp 70 % der gesamten Endenergie aus Erneuerbaren Energiequellen wird durch die gesamte Biomasse<sup>1</sup> bereitgestellt. Bei der Wärmeerzeugung aus Erneuerbaren Energien hat Biomasse (hauptsächlich Holz) einen Anteil von knapp 94 %. [BMU-09]

Die direkte Nutzung der Sonne lässt sich in zwei übergeordnete Kategorien einteilen. Auf der einen Seite ist das die Solarthermie, auf der anderen die Photovoltaik. Bei der Solarthermie wird die Strahlungsenergie der Sonne in Wärme umgewandelt indem Wasser oder andere Flüssigkeiten aufgeheizt werden. Die Photovoltaik hingegen wandelt die eingestrahlte Energie der Sonne direkt in elektrischen Strom um. Das geschieht über einen physikalischen Vorgang, den sogenannten photovoltaischen Effekt.

Die Stromerzeugung durch Erneuerbare Energien betrug im Jahr 2008 rund 92,8 TWh. Das entspricht einem Anteil von 15,1% des gesamten Stromverbrauchs in Deutschland für das genannte Jahr. Die Abbildung 1.4 zeigt die einzelnen Anteile der verschiedenen Technologien der Erneuerbaren Energien. [BMU-09]



**Abbildung 1.4: Struktur der Strombereitstellung aus Erneuerbaren Energien in Deutschland 2008 ([BMU-09])**

Wie in der Abbildung 1.4 zu erkennen ist, ist der Anteil der Photovoltaik an der Gesamtstrombereitstellung durch Erneuerbare Energien noch relativ klein, verzeichnete allerdings in den letzten zehn Jahren den größten Zuwachs [BMU-09], [Waf-09].

<sup>1</sup> biogene Festbrennstoffe, biogene flüssige und gasförmige Brennstoffe, biogener Anteil des Abfalls, Biogas sowie Klär- und Deponiegas und Biokraftstoffe

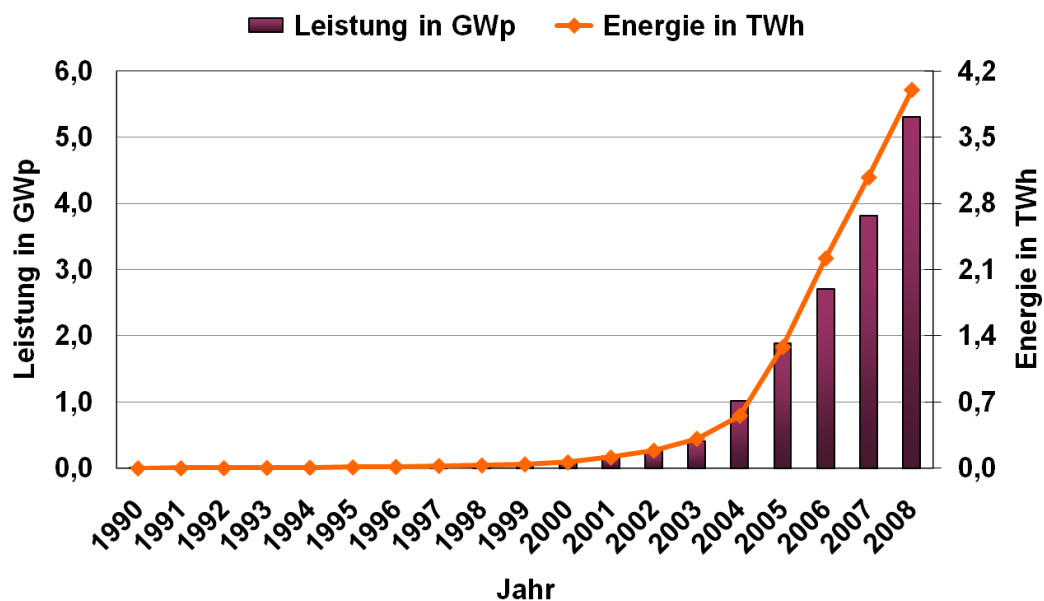
## 1.2 PHOTOVOLTAIK UND IHRE POTENZIALE

Die Photovoltaik (PV) bietet mit verschiedenen Systemlösungen und Technologien sehr große Potenziale der Energieversorgung für Deutschland. So ist es möglich Anlagen mittlerer Größe ( $5 \text{ kWp} \leq \text{Leistung} \leq 100 \text{ kWp}$  [ISET-08]) zu installieren, welche im Freifeld oder auf großflächigen Industriedächern aufgebaut werden. Des Weiteren können Großanlagen mit Leistungen  $> 100 \text{ kWp}$  installiert werden [ISET-08]. Ein weiteres großes Potenzial bieten kleinflächige Dachanlagen, wie zum Beispiel auf Wohnhäusern, wobei sich hier in Zukunft, gerade bei Neubauten, dachintegrierte Anlagen durchsetzen werden. Kleinanlagen haben eine Leistung  $< 5 \text{ kWp}$  [ISET-08]. Diese dachintegrierten PV-Anlagen, oder allgemein gebäudeintegrierte PV (BIPV), also zum Beispiel auch Fassadenanlagen werden in Zukunft eine große Bedeutung haben [EuPD-10], [PtJ-09], [Mis-09], [Mul-10]. Bei dieser Möglichkeit der PV sind nicht nur die Vorteile dieser allein zu sehen. Die BIPV bietet eine gewisse Mehrfachnutzung von Funktionen. Beispielsweise ist eine Dachintegrierte PV-Anlage gleichzeitig Dach und auch PV. Die Multifunktionalität kann sich zudem durch die Einbringung von PV-Zellen in die Glasscheiben von Fenstern ergeben. Werden diese semitransparent gestaltet, so ist das Fenster nicht nur allein Fenster, sondern kann neben der Produktion von Strom auch als Abschattung der Innenräume dienen. Weitere solcher Funktionen sind zum Beispiel in [Mul-09a], [Mul-09b] oder [Mul-10] beschrieben. Diese Mehrfachnutzung bei gleichzeitiger Kostenreduktion ist sozusagen inklusive. Gebäudeintegrierte Anlagen haben bisher nur einen sehr geringen Anteil der PV in Deutschland. In naher und ferner Zukunft werden Neubauten bzw. Altbausanierungen mehr und mehr mit BIPV ausgerüstet, was zu einer deutlichen Zunahme dieser Art von PV führen wird [ISET-08]. Nachgeführte Anlagen werden in Deutschland eine eher untergeordnete Rolle spielen. Der Vorteil des Mehrertrages geht durch die Mehrkosten der Anlagen wieder verloren, da in Deutschland der Direktstrahlungsanteil relativ gering ist. Dieser ist aber gerade für nachgeführte PV-Anlagen ausschlaggebend.

Der Ausbau der PV in Deutschland lässt sich somit grob in drei Kategorien gliedern. Freifeldanlagen, Anlagen welche auf einem Dach montiert sind und Gebäudeintegrierte Anlagen (Fassade, Dach). Durch die Einschränkung der zur Verfügung stehenden Freiflächen in Deutschland ist den Freiflächenanlagen allerdings eine Grenze des Ausbaus gesetzt. Die gesamte installierte Leistung und deren Ertrag in den Jahren von 1990 bis 2008 zeigt die Abbildung 1.5.

Zusätzlich zu den verschiedenen Ausführungen der PV-Module sind diese in verschiedenen Technologien verfügbar. Verwendet werden heutzutage verschiedene Halbleiterverbindungen. Typische Varianten sind zum Beispiel mono-

kristallines Silizium (c-Si) oder polykristallines Silizium (mc-Si). Diese beiden Technologien gehören zu den sogenannten Dickschichttechnologien. Die Schichtdicken sind in der Regel größer 150 µm. Des Weiteren gibt es die dünn-schichtigen Technologien, wie zum Beispiel Kupfer-Indium-Diselenid (CIS), Cadmium-Telurid (CdTe) und amorphes Silizium (a-Si). Aber auch mehrschichti-ge Zellen bei den zwei oder drei verschiedene Technologien in Schichten über-einander verbunden werden, sind auf dem Markt verfügbar. Die dünn-schichtigen Technologien spielen zurzeit noch eine eher untergeordnete Rolle. Dies kann sich in Zukunft gerade im Bereich der BIPV ändern.



**Abbildung 1.5: Installierte Leistung und jährlich erzeugte Energie der PV in Deutschland von 1990 bis 2008 [BMU-09]**

Die heutige Nutzung der PV ist eher marginal. Das verdeutlichen die Abbildungen 1.2 bis 1.4. Das Potenzial der PV ist allerdings unerschöpflich. Bereits mit heutigen Technologien würde bei einer Flächenbelegung von ca. 5000 km<sup>2</sup> ( $\approx 70,7 \text{ km} \times 70,7 \text{ km}$ ), das ist weniger als 1% der gesamten Fläche Deutschlands, der jährliche elektrische Energiebedarf gedeckt werden [Waf-09]. Das würde etwa nur 21% der gesamten Siedlungsfläche in Deutschland oder 12% der Siedlungsfläche inkl. der Verkehrsflächen [Waf-09] entsprechen. Ähnliche Ergebnisse lassen sich auf Grundlage von [Qua-00] berechnen.

Durch einen fortschreitenden Ausbau der PV wird eine genaue Planung des Energieangebots immer wichtiger da diese Energieform nicht zu beliebigen Zeiten zur Verfügung steht. Weiterhin schreitet die Dezentralisierung der Energieversorgung durch die PV und anderen Erneuerbaren Energien weiter fort. Des-

halb sind auf der einen Seite entsprechende Netzausbauten und Energiemanagementsysteme zu entwickeln. Auf der anderen Seite wird aber auch die Kurzzeitvorhersage (ca. 24h) der PV notwendig. Diese ist bei der Windenergie schon seit einiger Zeit üblich. Aber auch genaue Langzeitertragsprognosen, zum Beispiel für Ertragsgutachten, müssen für die PV gewährleistet werden. Ermöglicht werden solche Rechnungen durch die Simulation. Gut funktionierende Simulationsmodelle für die PV sind damit zwingend notwendig.

### 1.3 ERTRAGSBERECHNUNGEN DURCH SIMULATION

Heutige Ertragsberechnungen werden mit speziellen Simulationsprogrammen durchgeführt [Zeh-09]. In diesen stützt man sich in der Regel auf mehrjährige Wetterdaten, welche zum Beispiel als 15-Minuten- oder Stundenmittelwerte zur Verfügung stehen. Mehrere Jahre werden dabei auf ein Durchschnittsjahr gemittelt. Durch mathematische Modellierung der elektrischen Komponenten (PV-Modul, Wechselrichter, Kabel, Transformator etc.) kann dann die Leistungszeitreihe berechnet werden. Eine Aufsummierung (Integration) dieser über die Zeit ergibt schließlich den Energieertrag.

Die Modellierung der Module erfolgt in der Regel mit dem 1- oder 2-Dioden-Modell, welche im Prinzip auf der Diodengleichung von Shockley basieren. In der Literatur sind diese Modelle beispielsweise beschrieben in [Wag-06], [Qua-96], [Qua-06], [Schu-91]. Diese Modelle beschreiben gut bzw. sehr gut kristalline Technologien (c-Si, mc-Si). Auch CIS-Technologien lassen sich als einzige Dünnschichttechnologie relativ gut beschreiben [Schu-01]. Diese Modelle können aber nicht oder nur sehr bedingt mit einem großen Fehler andere Dünnschichttechnologien nachbilden. Bei amorphem Silizium werden mit dem Zweidiodenmodell keine zufriedenstellenden Ergebnisse erreicht [Bey-02]. Es gibt heute einige erweiterte Modelle welche zum Beispiel Module aus CdTe gut beschreiben [Bey-07], [Bey-08]. Dennoch fehlen andere, wie beispielsweise a-Si. Hier ist neben der Anfangsdegradation (Staebler-Wronski-Effekt) von 10% bis 30% auch der Annealing-Effekt zu berücksichtigen. Die Anfangsdegradation bewirken einzelne einfallende Photonen, welche schwache Verbindungen zwischen den Siliziumatomen aufbrechen, wodurch zusätzliche gebrochene Bindungen entstehen. Diese Tatsache geht mit einem Sinken des Wirkungsgrades einher [Häb-07]. Der Annealing-Effekt hat zur Folge, dass das Modul bei niedrigen Temperaturen im Wirkungsgrad schlechter wird und bei steigenden Temperaturen wieder besser (Sommer-Winter). Dieser hängt somit stark von der Einbausituation ab. Die Modellierung von Modulen bezieht sich in der Regel auf solche, die als Aufdach- oder Freifeldanlagen installiert werden. Für gebäudeintegrierte

Module gibt es so gut wie keine Modelle. Bei der BIPV spielt nicht nur die Verschattung eine bedeutende Rolle, sondern auch die Mehrfachfunktion. Diese wird einen mehr oder weniger großen Einfluss auf den Ertrag haben. Modelle zur Simulation von Abschattungssituationen bei kristallinen Technologien sind vorhanden (beschrieben zum Beispiel in [Qua-96]).

In Abhängigkeit der klimatischen Bedingungen am Standort macht es Sinn eine Auswahl der PV-Technologie (kristallin, CdTe, CIS, amorphes Silizium etc.) und der Wechselrichtertopologie (Zentralwechselrichter, Stringwechselrichter, modul-integrierter Wechselrichter etc.) zu treffen. Hier kann durch eine geschickte Wahl ein höherer wirtschaftlicher Nutzen erzielt werden. Auch im Hinblick darauf sind genaue Simulationsmodelle für PV-Dünnschichttechnologien notwendig.

Eine realitätsgetreue Nachbildung der PV-Komponenten und deren Zusammenspiel ist zwingend notwendig. In dieser Arbeit wird eine neuartige simulative Beschreibung von PV-Zellen und Modulen als eine dieser Komponenten vorgestellt, beschrieben und validiert.

## 1.4 GLIEDERUNG DER ARBEIT

### Kapitel 2

Im Kapitel 2 werden wichtige physikalische Grundlagen und am Fraunhofer IWES durchgeführte Zeitreihenanalysen vorgestellt. Die Solarstrahlung und der Einfluss der spektralen Empfindlichkeit auf die energetische Umsetzung der Solarstrahlung durch photovoltaische Zellen werden beschrieben. Durch eine indirekte Methode wird die spektrale Empfindlichkeit nachgewiesen. Dieser indirekte Nachweis könnte hilfreich sein das neu entwickelte Simulationsmodell zu verbessern.

### Kapitel 3

Damit ein Modell entwickelt werden kann, müssen reale Messdaten von PV-Zellen oder Modulen vorhanden sein. Wichtig hierfür sind die I/U-Kennlinien und die Temperatur der Module. Im Kapitel 3 wird eine neue am Fraunhofer IWES und im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Messtechnik zur Bestimmung von I/U-Kennlinien vorgestellt: das ISET *mpp-meter*. Mit diesem ist es möglich I/U-Kennlinien in vorgebbaren Intervallen (zum Beispiel einmal pro Minute, wie in dieser Arbeit) automatisiert zu messen. Zeitsynchron werden von diesem Messgerät die Modultemperatur und die Bestrahlungsstärke gemessen. Ein System zur zeitgleichen Verwendung mehrerer dieser Messgeräte wird vorgestellt. Im Rahmen einer Messungenauigkeitsbetrachtung wird außerdem gezeigt, wie genau diese Messtechnik arbeitet.



## **Kapitel 4**

Der Stand der Technik wird im Kapitel 4 vorgestellt. Dieser teilt sich in zwei übergeordnete Kategorien. Zum einen sind dies die physikalischen Simulationsmodelle die beschrieben werden und zum anderen die numerischen oder empirischen. So werden beispielsweise das Ein- und Zweidiodenmodell als bekannteste und älteste physikalische Modelle vorgestellt. Diese spielen in der Simulation photovoltaischer Komponenten allerdings immer noch eine sehr wichtige Rolle und werden dies auch in Zukunft tun.

## **Kapitel 5**

Im Kapitel 5 wird ein neues Simulationsmodell für PV-Zellen bzw. Module vorgestellt. An einem konkreten Beispiel wird gezeigt, dass das Modell die geforderte Qualität der Ergebnisse erreicht. Dazu wurde ein PV-Modul der Technologie Kupfer-Indium-Diselenid (CIS) über einen längeren Zeitraum mittels des *ISET-mpp meter* vermessen. Die gespeicherten I/U-Kennlinien mit einer Anzahl von mehr als 68.000 wurden zum Entwickeln und Validieren des Modells verwendet. Das Simulationsmodell basiert dabei auf einem künstlichen neuronalen Netz (KNN). Als Eingangsgrößen dieses Netzes wurden die Bestrahlungsstärke auf Modulebene und die Modultemperatur verwendet. Als Ausgangsgrößen liefert das Modell fünf Punkte auf der I/U-Kennlinie. Mit einem Interpolationsverfahren werden die fünf Punkte sinnvoll verbunden, um die gesamte Kennlinie zu erzeugen.

## **Kapitel 6**

Damit die Bestimmung der Parameter des KNN für den Anwender in einfacher Weise ablaufen kann, wurde ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Bestimmung der I/U-Kennlinien von photovoltaischen Bauelementen entwickelt und zum Patent angemeldet. Dieses wird im Kapitel 6 vorgestellt und beschrieben. Das *ISET-mpp meter* liefert die zur Modellerstellung nötigen charakteristischen Werte (I/U-Kennlinien, Modultemperatur und Bestrahlungsstärke auf Modulebene) in allen denkbaren Betriebszuständen von PV-Modulen. Diese gemessenen Daten werden als Eingangsparameter verwendet, um das KNN zu trainieren und zu testen. Eine speziell entwickelte Software nimmt alle nötigen Schritte zur Bestimmung der Parameter des KNN nach Vorgaben des Anwenders quasi automatisiert vor.

---

In dieser Arbeit wird gezeigt, dass es möglich ist, die elektrischen Parameter inklusive der I/U-Kennlinie mit einem künstlichen neuronalen Netz nachzubilden. Ein physikalischer Zusammenhang zwischen Modell und Realität ist dadurch zwar nicht mehr gegeben, wie dies zum Beispiel beim Zweidiodenmodell der Fall ist, dafür ist aber die enge Kopplung an kristalline Technologien nicht vorhanden. Mit diesem Modell, welches in erster Linie für dünnschichtige Technologien entwickelt worden ist, lassen sich alle beliebigen Technologien nachbilden.

## 2 PHYSIKALISCHE EFFEKTE UND ZEITREIHENANALYSEN

Um Simulationen durchführen zu können muss zu einem gewissen Grad die Physik photovoltaischer Bauelemente bekannt sein. Aus Messungen mit verschiedenen Messinstrumenten können physikalische Grundlagen hergeleitet oder verifiziert werden. Wenn diese Messungen über einen längeren Zeitraum gemacht werden, so sind Zeitreihenanalysen eine gute Möglichkeit die Physik zu beschreiben. Diese spielen gerade bei wetterabhängigen physikalischen Ereignissen eine bedeutende Rolle. In den folgenden Unterkapiteln werden einige wichtige physikalische Effekte erklärt, sowie Zeitreihenanalysen und deren Auswertungen, welche über mehrere Jahre am Fraunhofer IWES in Kassel stattgefunden haben vorgestellt.

### 2.1 PHYSIKALISCHE EFFEKTE

#### 2.1.1 SOLARSTRAHLUNG

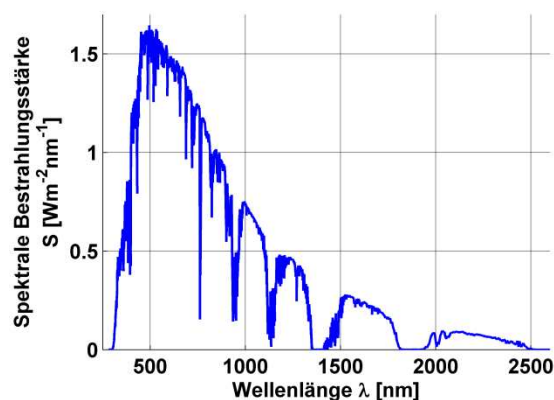


Abbildung 2.1.1: Normspektrum AM 1,5  
[DIN-08], [IEC-08]

Die Sonne liefert die zum Leben notwendige Energie in Form von Strahlung. Die Eigenschaft der Strahlung lässt sich durch ihre Wellenlänge und Intensität, der sogenannten spektralen Bestrahlungsstärke  $S$  [ $W m^{-2} nm^{-1}$ ], beschreiben. Da die Sonne eine ganze Bandbreite an Strahlung liefert, wird diese sinnvollerweise in einem Diagramm dargestellt. Dort trägt man die spektrale Bestrahlungsstärke in Abhängigkeit der Wellenlänge auf (siehe Abbildung 2.1.1). Die Strahlung mit

den höchsten Intensitäten bewegt sich hauptsächlich in einem Spektralbereich von 200 nm bis 4000 nm. Durch verschiedene Streu- und Absorptionsprozesse in der Erdatmosphäre wird die Strahlung teilweise sehr stark gedämpft. Die größten Amplituden der spektralen Bestrahlungsstärke befinden sich im Bereich des für das menschliche Auge sichtbaren Lichts (ca. 450 nm bis 680 nm). Nach links zu den kleineren Wellenlängen und nach rechts zu den größeren Wellenlängen nimmt die Amplitude unterschiedlich schnell ab. Einige Wellenlängen werden durch die Atmosphäre (teilweise auch durch die chemische Zusammensetzung der Sonne selbst) stark gedämpft, teilweise bis fast null. Je nachdem, ob klar blauer oder bewölkter Himmel ist (Wetterverhältnisse) verändert sich das Spek-

rum. Weitere Einflussgrößen sind der Breitengrad und die Luftverschmutzungen, zum Beispiel durch Aerosole. Durch den Einfallswinkel verändert sich die Länge des Weges, welche die Strahlen durch die Atmosphäre zurücklegen müssen. Dadurch wird das Spektrum ebenfalls beeinflusst. Eine Klassifikation verschiedener Spektren ist schwierig. Dennoch wurde ein Maß für das Spektrum eingeführt, die sogenannte Air Mass (AM). Ein AM ist die Weglänge, die das Licht der Sonne normal zum Erdboden ( $90^\circ$ ) durch die Atmosphäre zurücklegen muss. Dieses hat die Bezeichnung AM1 und ist somit der kürzeste Weg durch die Atmosphäre. Wird der Winkel kleiner, verändert sich das Spektrum. Die Abbildung 2.1.2 zeigt an einigen Beispielen die AirMass für den Standort Kassel.

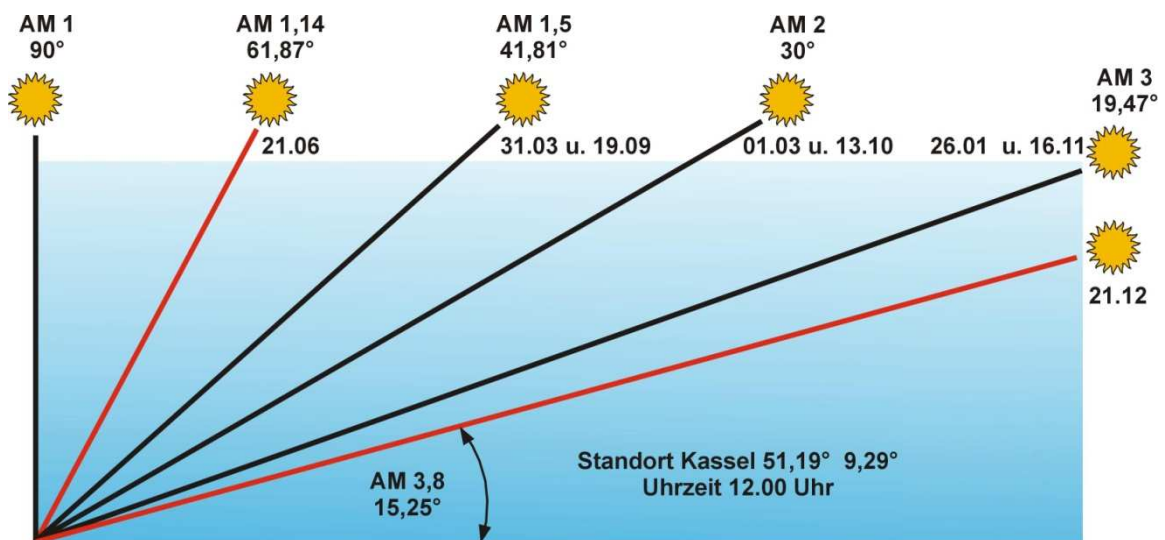


Abbildung 2.1.2: Weglänge der Sonnenstrahlung durch die Erdatmosphäre, die AirMass (AM) [Mul-06]

Ergibt sich für die Weglänge das 1,5-fache der Atmosphärendicke, so spricht man von AM1,5. Diese Größe spielt in der PV eine wichtige Rolle, da dieses Spektrum für Normungs- und Prüfzwecke herangezogen wird. Dieses Spektrum ist genormt in [DIN-08] oder [IEC-08]. Die Abbildung 2.1.1 zeigt das Normspektrum AM1,5. Der Spektralbereich, welcher für die PV relevant ist, bewegt sich im Bereich von ca. 300 nm bis 1200 nm. Direkt über der Erdatmosphäre, also dort wo noch keine Dämpfung durch die Atmosphäre stattgefunden hat, spricht man von AM0. Die Abbildung 2.1.3 zeigt verschiedenen Spektren bei klarem Himmel und ohne Luftverschmutzungen.

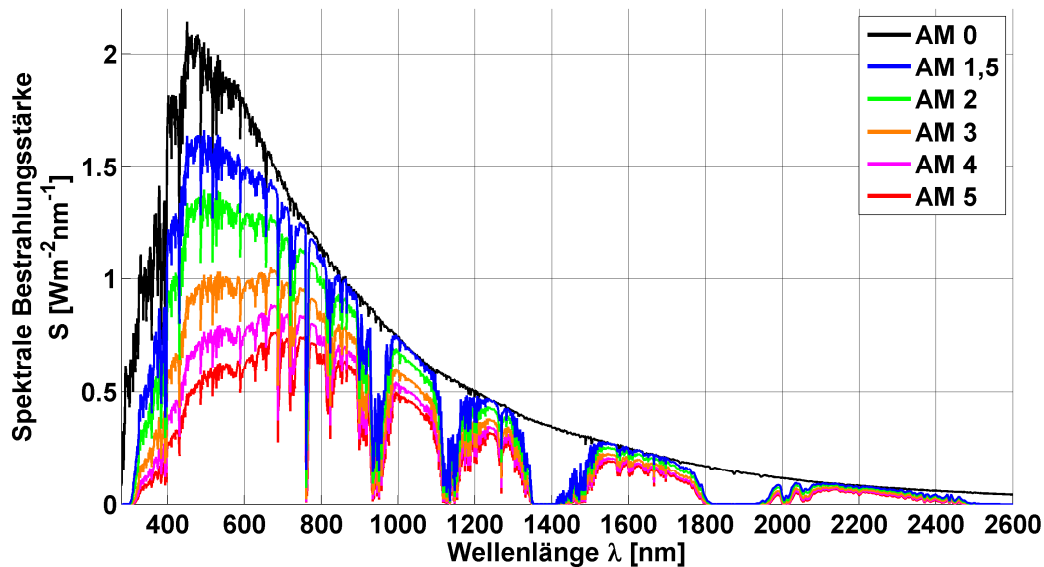


Abbildung 2.1.3: Verschiedene Spektren unterschiedlicher AirMass (AM) bei klarem Himmel und ohne Luftverschmutzungen [SCS-06]

### 2.1.2 MESSUNG DER SOLARSTRAHLUNG

Die Messung der Solarstrahlung kann mit unterschiedlichen Verfahren erfolgen. Eine sehr aufwendige Methode ist die Messung mittels eines Spektrometers. Mit solch einer Messeinrichtung können Spektren ermittelt werden, wie sie zum Beispiel in den Abbildung 2.1.1 oder 2.1.3 zu sehen sind. Durch Integration der spektralen Bestrahlungsstärke über die Wellenlänge erhält man die Bestrahlungsstärke (2.1.1). Diese hat die Einheit  $[W/m^2]$ . Im Fall des Normspektrums ergibt das Integral exakt  $1000 Wm^{-2}$ .

$$G = \int_0^{\infty} S(\lambda) d\lambda \quad (2.1.1)$$

Die Bestimmung der Bestrahlungsstärke lässt sich allerdings auch mit wesentlich einfacheren Methoden ermitteln. Hierzu kann zum Beispiel ein Pyranometer verwendet werden. Ein Pyranometer wirkt wie ein Integrator der spektralen Bestrahlungsstärke. Durch Absorption der Sonnenstrahlung und eine Umsetzung dieser in Wärme (Thermosäule) kann über diesen Sensor, welcher die Wärme in eine elektrische Spannung wandelt, mit Hilfe eines Kalibrierfaktors auf die Bestrahlungsstärke geschlossen werden. Die Spannung verhält sich proportional zur Bestrahlungsstärke. Durch eine interne Temperaturkompensation erfolgt diese Prozedur nahezu unabhängig von der Umgebungstemperatur. Ein Pyranometer deckt einen spektralen Bereich von ca. 300 nm bis 3000 nm ab. Das heißt, es

absorbiert in diesem Bereich die gesamte spektrale Bestrahlungsstärke und integriert diese quasi auf [Kip-09a], [Kip-09b].

Eine weitere Möglichkeit zur Messung der Bestrahlungsstärke kann mit einem Solarzellensensor realisiert werden. Dabei verhält sich der Kurzschlussstrom der Solarzelle direkt proportional zur Bestrahlungsstärke [IKS-09]. Aufgrund des im jeweiligen Solarzellenmaterials vorherrschenden Bandabstandes können diese Sensoren das Sonnenspektrum nur selektiv erfassen. Die spektrale Empfindlichkeit von amorphem Silizium zum Beispiel liegt mehr im Blaubereich des Sonnenspektrums, die von monokristallinem Silizium mehr im Rotbereich (siehe Abbildung 2.1.4). Solarzellensensoren, zum Beispiel der *ISetsensor* sc [Geb-99], [Ges-99], werden mit einem Kalibriernormal (Mastersensor) kalibriert, indem man die Ausgangsströme der beiden Sensoren unter bestimmten Bedingungen vergleicht. Der Mastersensor selbst wird in einem akkreditierten Prüflabor (zum Beispiel bei der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB)), unter Standard-Test-Bedingungen (STC) kalibriert.

### 2.1.3 SPEKTRALE EMPFINDLICHKEIT VERSCHIEDENER PV-TECHNOLOGIEN

Verschiedene photovoltaische Technologien weisen unterschiedliche physikalische Eigenschaften auf. Einen wichtigen und entscheidenden Einfluss hat die sogenannte spektrale Empfindlichkeit. Diese ergibt sich durch den im PV-Material vorherrschenden Bandabstand. Aufgrund dessen können die PV-Zellen nur in bestimmten Bereichen das Licht energetisch umsetzen. Die Abbildung 2.1.4 zeigt die spektrale Empfindlichkeit von vier verschiedenen Technologien (c-Si, CIS, CdTe, a-Si). Eine fünfte dargestellte Kurve zeigt das Normspektrum AM1,5. Zu beachten ist, dass die dargestellten Kurven jeweils auf ihren Maximalwert normiert wurden. Die spektralen Empfindlichkeiten der vier Technologien wurden unter Standard-Test-Bedingungen (STC) ermittelt. STC bedeuten eine Bestrahlungsstärke von  $1000 \text{ W/m}^2$ , welche aus dem Normspektrum AM1,5 zusammengesetzt ist und eine Zelltemperatur von  $25^\circ\text{C}$ .

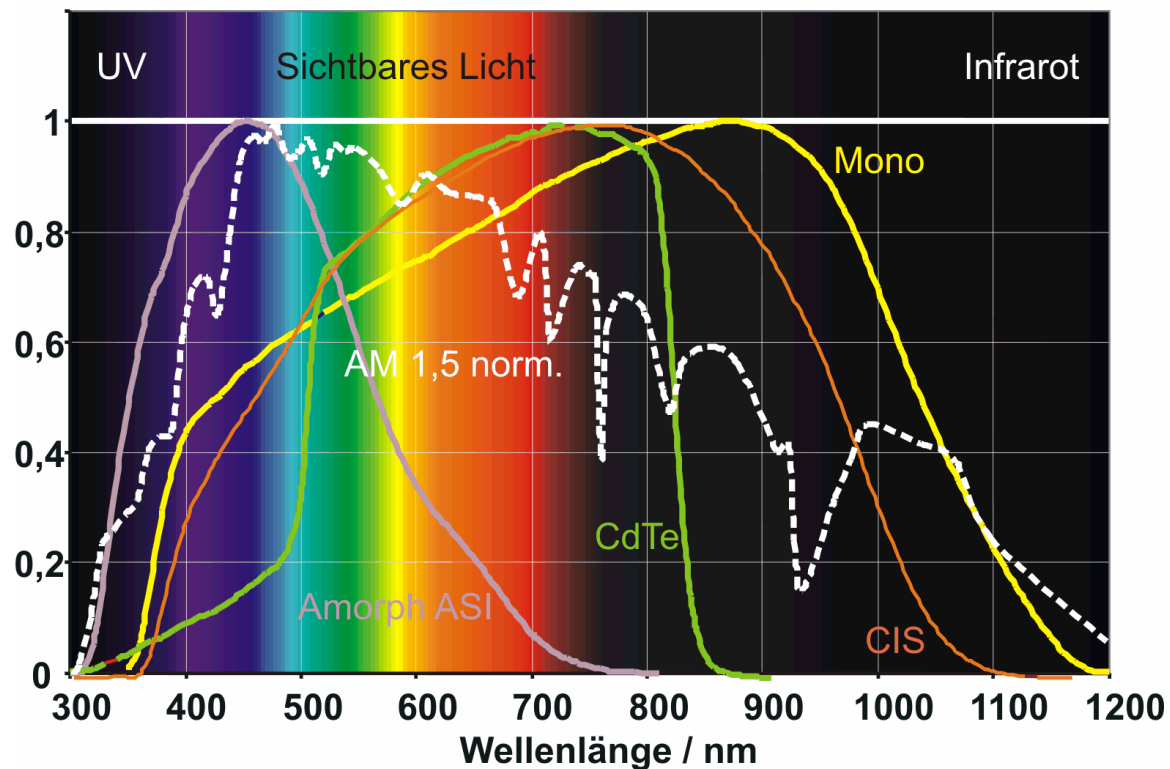


Abbildung 2.1.4: Spektrale Empfindlichkeit unterschiedlicher Solarzellensensoren (amorph, CdTe, CIS, mono) unter STC [Glo-07], [Glo-08]

Die spektrale Bestrahlungsstärke  $S$  hat die Einheit  $W m^{-2} nm^{-1}$ , die spektrale Empfindlichkeit  $SE$  die Einheit  $V m^2 W^{-1}$ . Die spektrale Empfindlichkeit mit dieser Einheit gilt nur für Bestrahlungsstärkesensoren auf Basis von PV-Zellen mit eingebautem Shunt. Die Multiplikation beider und die Integration über die Wellenlänge ergibt die Spannung am Shunt, welche die PV-Zelle bei einem bestimmten Solarspektrum erzeugt. Mit einem Kalibrierfaktor und der Multiplikation mit  $1000 W/m^2$  kann auf die Bestrahlungsstärke geschlossen werden.

$$G_{Zelle} = \frac{1000 \frac{W}{m^2}}{U_{Kal}} \cdot \int_0^{\infty} S(\lambda) \cdot SE(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2.1.2)$$

Es ist leicht zu verstehen, dass die Bestrahlungsstärke bei unterschiedlichen Spektren der Solarstrahlung und Technologien unterschiedliche Ergebnisse hervorruft. So wird eine a-Si-Zelle mehr Energie erzeugen, wenn das Spektrum im linken Bereich überwiegt. Umgekehrt ist es, wenn das Spektrum (relativ) im rechten Bereich überwiegt. Dann können die c-Si Technologien mehr Energie umsetzen. Allein diese Tatsache erschwert die Simulation. Da in den meisten Fällen

das Sonnenspektrum nicht bekannt ist, ist es schwierig diesen physikalischen Effekt mit in die Rechnung einzubeziehen.

## 2.2 ZEITREIHENANALYSEN MIT MESSDATEN DES IWES PV-TESTFELDES

Um ein Modell für Solarzellen und -module entwickeln zu können, ist eine geeignete Messdatengrundlage notwendig. Diese Daten stammen vom Fraunhofer IWES Standort Kassel. Eine über mehrere Jahre dauernde Messkampagne mit verschiedenen Sensoren wird einen Teil der Grundlage der Modellrechnung bilden. Über einen Zeitraum von 2003 bis 2008 wurden die Daten nahezu lückenlos aufgenommen. Die Abtastrate beträgt 15 Sekunden, es handelt sich somit um eine für diese Zwecke sehr hoch aufgelöste Datenreihe. Die Tabelle 2.2.1 zeigt eine Auflistung der in dieser Arbeit verwendeten Sensoren.

Sensor	Ausrichtung
Pyranometer Kipp & ZonenCM 21 (Globalstrahlung)	horizontal
Pyranometer Kipp & Zonen CM 21 (Diffusstrahlung)	horizontal
Pyranometer Kipp & Zonen CM 21	30°, Süd
ISetsensor <i>sc</i> <sup>®</sup> aus monokristallinem Silizium	30°, Süd
ISetsensor <i>sc</i> <sup>®</sup> aus amorphem Silizium	30°, Süd

**Tabelle 2.2.1: Verwendete Bestrahlungsstärkesensoren für die Auswertung [IKS-09], [Kip-09a], [Kip-09b]**

Um die Abhängigkeit der spektralen Empfindlichkeit auf die energetische Umsetzung von Strahlung in elektrische Energie auf indirekte Weise nachzuweisen, werden diese Messdaten des Fraunhofer IWES Standort Kassel verwendet. Mit verschiedenen Messsensoren kann eine Wetterabhängigkeit verschiedener PV-Technologien gezeigt werden. Verwendet werden die Messdaten von den Bestrahlungsstärkesensoren, die in der Tabelle 2.2.1 aufgelistet sind. Bei dem Vergleich dieser Bestrahlungsstärkesensoren hat sich gezeigt, dass sich bei der Bestrahlungsstärkemessung mit Solarzellensensoren unterschiedlicher Technologie Abweichungen ergeben, welche mit spektralen Effekten in der Erdatmosphäre variieren. Zeigt beispielsweise ein Sensor aus amorphem Silizium an einem Sommertag mit hoher Direktstrahlung einen größeren Globalstrahlungswert an als der Sensor mit kristallinem Silizium, so ist diese Aussage völlig korrekt. Denn die normierte Energieausbeute einer PV-Anlage aus amorphem Silizium ist in diesem Zustand relativ höher, als die einer PV-Anlage aus kristallinem Silizium. Andere Technologien zeigen ähnlich abweichendes Verhalten [Ben-03] [Glo-07].



Beim Vergleich eines Pyranometers mit einem Solarzellensensor würde sich nun folgende Situation ergeben: Bei einem Spektrum von AM 1,5, einer Temperatur von 25°C und einer Bestrahlungsstärke von  $1000 \text{ Wm}^{-2}$  (STC) zeigen alle Sensoren den gleichen Wert an, nämlich  $1000 \text{ Wm}^{-2}$ , da die Sensoren unter diesen Bedingungen kalibriert sind. Stellt sich ein anderes Spektrum ein, so würden die Sensoren, wenn alle die gleiche spektrale Empfindlichkeit hätten, auch weiterhin den gleichen Wert anzeigen. Dies ist in der Praxis nicht der Fall und es ergeben sich Abweichungen in Abhängigkeit von verschiedenen atmosphärischen Extinktionsprozessen. Je nachdem in welchem Bereich das Spektrum mehr gedämpft wird, variieren die Ergebnisse. Bei klarem Wetter und kleiner AM kann die amorphe Technologie relativ mehr Energie umsetzen als eine mit kristallinem Silizium, da sich seine spektrale Empfindlichkeit im blauen Bereich bewegt und hier das Sonnenspektrum sehr stark ausgeprägt ist. Ist der Himmel bewölkt (in diesem Fall hat die Diffusstrahlung einen großen Anteil an der Globalstrahlung – großer Diffusanteil) oder herrscht Hochnebel, wird der Rotanteil des Spektrums mehr gedämpft (Absorption von infraroter Strahlung durch Wasserdampf). Der relative Blauanteil nimmt somit zu. In diesem Zustand wird auch hier die amorphe Technologie mehr umsetzen. Umgekehrt ist es, wenn ein klarer Himmel herrscht, aber die Sonnenstrahlen einen langen Weg durch die Atmosphäre zurücklegen müssen (große AM). Dann nämlich wird nach den Gesetzmäßigkeiten der Rayleigh Streuung der Blauanteil relativ mehr geschwächt, was dazu führt, dass der relative Rotanteil zunimmt. In diesem Fall werden die kristallinen Technologien besser sein.

Das Verhalten eines monokristallinen bzw. amorphen Sensors im Vergleich zu einem Pyranometer bei unterschiedlichen Bewölkungsverhältnissen und AM über zwei Jahre (2004 und 2005) ist in den Abbildungen 2.2.2 und 2.2.3 dargestellt. Als Maß für die Bewölkung wurde dabei das Verhältnis der Diffus- zur Globalstrahlung, der relative Diffusanteil  $F_D$ , verwendet. Bei einem relativen Diffusanteil von 1 entspricht die Diffusstrahlung der Globalstrahlung. Folglich ist Direktstrahlung gleich null und es liegt eine starke Bewölkung vor. Relative Diffusanteile von ca. 0,1 werden an sehr sonnigen Tagen erreicht.

Des Weiteren wurden bei den Untersuchungen lediglich Messwerte mit einem solarem Einfallswinkel  $\theta$  von kleiner als  $45^\circ$  normal zur Zellfläche verwendet. Somit wird das unterschiedliche Winkelverhalten des Pyranometers und der ISET Sensoren berücksichtigt. Durch die Einschränkung über den Einfallswinkel ergeben sich nur bestimmte AM-Werte. Größere AM-Werte liegen im Winter vor, während kleine AM-Werte im Sommer erreicht werden (Abbildung 2.2.1).

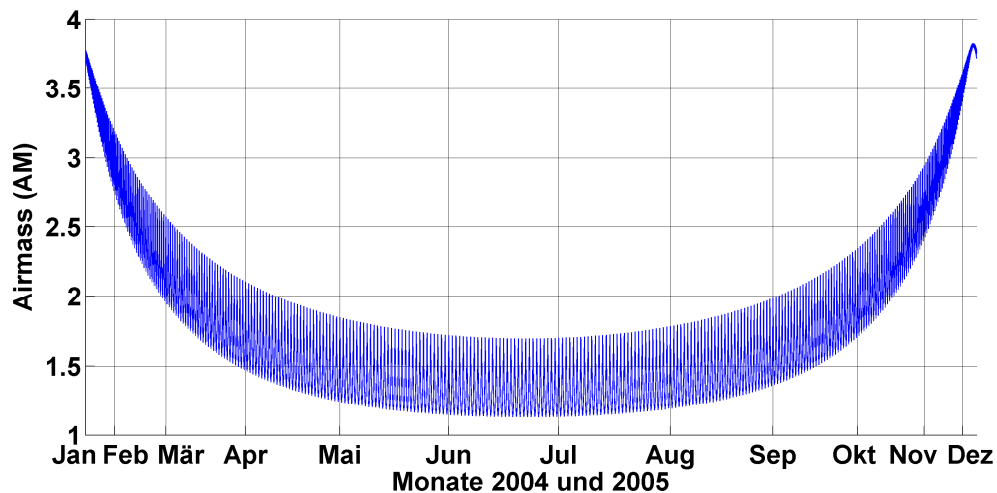


Abbildung 2.2.1: AM-Werte in Abhängigkeit des Monats

Die Messwerte der ISET *Sensoren* sc wurden temperaturkompensiert. Außerdem wurden Tage, an denen Schneeablagerungen auf den Sensoren vorhanden waren, von der Betrachtung ausgeschlossen.

Die in den Abbildungen 2.2.2 und 2.2.3 vorliegenden Abweichungen zwischen den ISET *Sensoren* sc mit monokristallinem bzw. amorphem Silizium und dem Pyranometer lassen sich daher ausschließlich durch Veränderungen im Solarpektrum erklären. Der einzige Effekt der zusätzlich einfließt, ist der Annealing-Effekt des amorphen Siliziums.

Deutlich zu erkennen ist, dass bei der monokristallinen Technologie die Abweichung quasi nur vom Verhältnis  $G_{Diff}/G$  abhängt. Der spektrale Einfluss der AM liegt in einem Wellenlängenbereich für den die monokristalline Technologie keine ausgeprägte Empfindlichkeit besitzt. Eine kleine Abhängigkeit der AM ist bei klarem Himmel erkennbar. Diese Technologie liegt aber immer unter dem Pyranometer. Anders ist es beim amorphen Sensor, der eine starke Abhängigkeit sowohl vom Verhältnis  $G_{Diff}/G$ , als auch von der AM zeigt. Diese Technologie zeigt Werte über und unter dem Pyranometer. Untersuchungen in [Got-04] zeigen vergleichbare Ergebnisse.

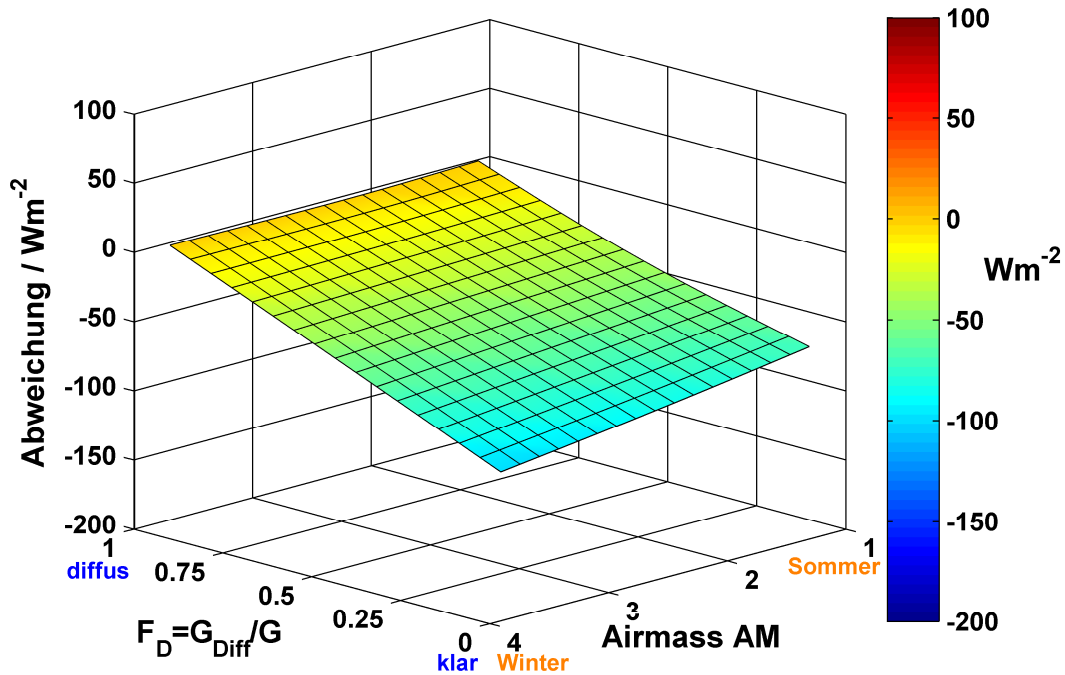


Abbildung 2.2.2: Abhängigkeiten der Abweichung zwischen einem ISET Sensor sc mono und einem Pyranometer (Standort Kassel), Messwerte aus 2004 & 2005 mit Einfallswinkeln  $\Theta \leq 45^\circ$

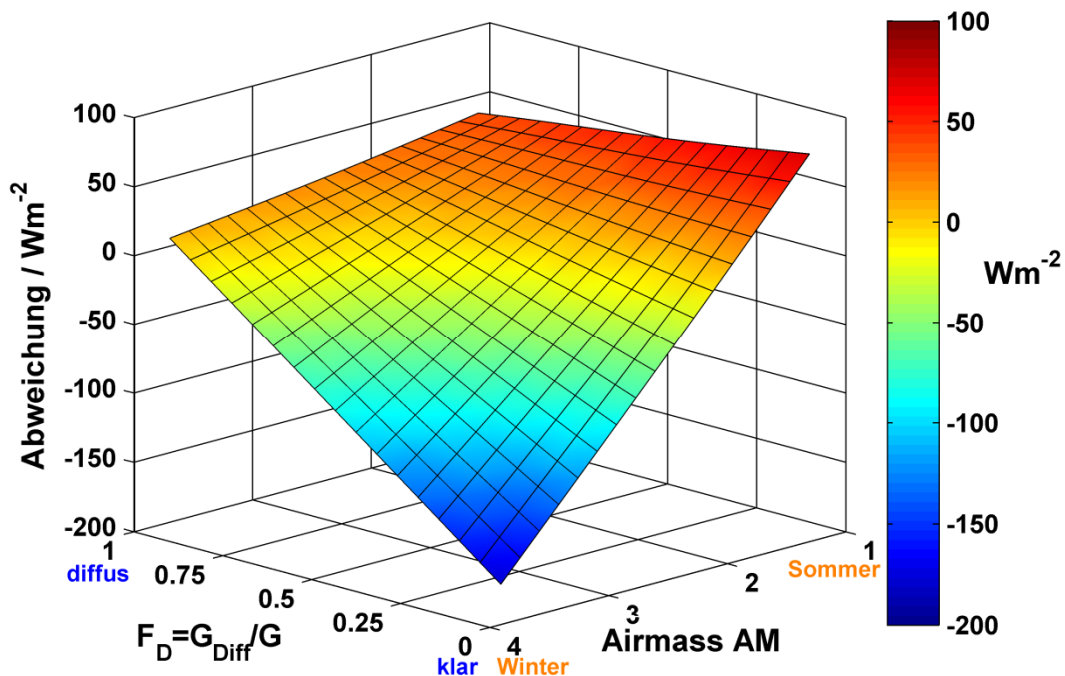


Abbildung 2.2.3: Abhängigkeiten der Abweichung zwischen einem ISET Sensor sc amorph und einem Pyranometer (Standort Kassel), Messwerte aus 2004 & 2005 mit Einfallswinkeln  $\Theta \leq 45^\circ$

Zur weiteren Verdeutlichung werden die Abweichungen der verschiedenen Sensoren auf eine andere Weise dargestellt. Die Abbildung 2.2.4 zeigt die relativen Abweichungen der Energiedichte [ $\text{W/m}^2$ ] des ISETSensor sc mono zum Pyranometer und des ISETSensor sc amorph zum Pyranometer in den Jahren 2004 und 2005. Auch in dieser Abbildung ist eine deutlich größer variierende Abweichung des ISETSensor sc amorph zum Pyranometer über die beiden Jahre zu erkennen, wie dies beim ISETSensor sc mono der Fall war.

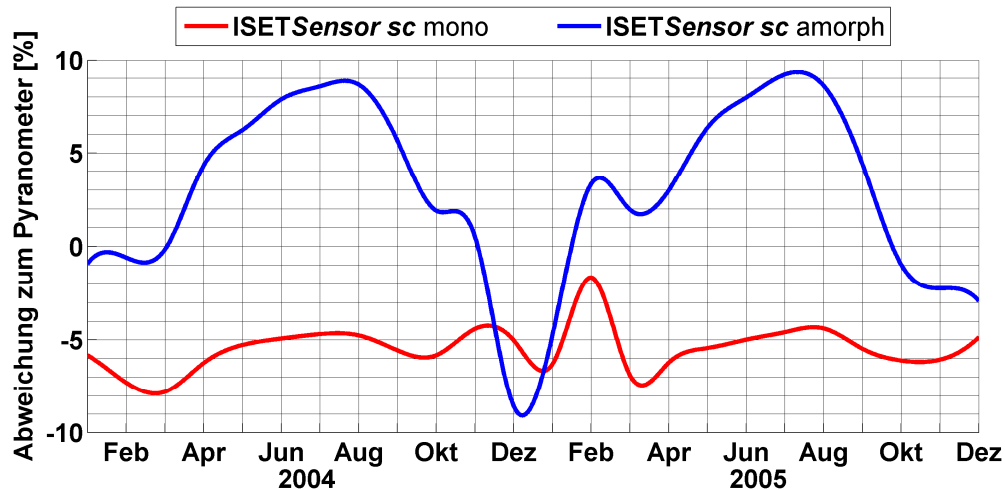


Abbildung 2.2.4: Relative Abweichungen der Energiedichte [ $\text{W/m}^2$ ] des ISETSensor sc mono zum Pyranometer und des ISETSensor sc amorph zum Pyranometer in den Jahren 2004 und 2005

Wie schon erwähnt, liegt das starke variierende Verhalten des ISETSensor sc amorph einerseits am Annealing-Effekt. Andererseits spielen auch die unterschiedlichen Sonnenspektren über das Jahr eine bedeutende Rolle. Dies konnte durch weitere Auswertungen gezeigt werden. Schaut man sich in diesem Zeitraum die Temperatur an, so ist festzustellen, dass im Winter 2004/2005 diese nicht wesentlich kleiner ist als in den Wintermonaten 2003/2004 und 2005/2006. Die Grafik zeigt aber einen deutlichen Einbruch der Abweichung des amorphen Sensors im Dezember 2004. Der Annealing-Effekt kann hierfür somit nicht verantwortlich sein. Weitere Untersuchungen des relativen Diffusanteils  $F_D$  in den genannten Zeiträumen zeigen, dass im Winter 2004/2005 oft ein sehr kleiner relativen Diffusanteil vorherrschte, im Gegensatz zu den anderen beiden Wintern. Das heißt konkret: im Dezember 2004 gab es sehr viele schöne Tage mit hohem Direktstrahlungsanteil. Die große AM in dieser Zeit bedeutet wiederum einen hohen relativen Rotanteil im Spektrum, was das Verhalten der Sensoren bestätigt.

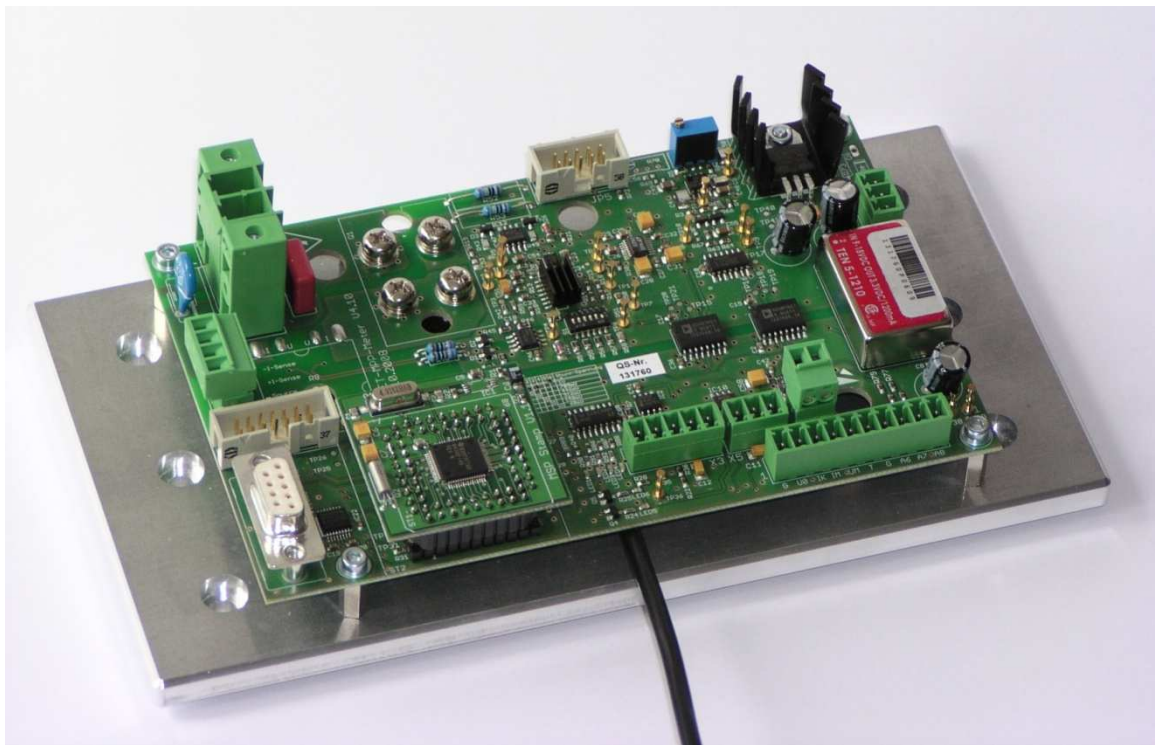
### 3 MESSUNG DER I/U-KENNLINIEN

Eine wichtige physikalische Eigenschaft von PV-Zellen und Modulen ist die Strom/Spannungskennlinie (I/U-Kennlinie), bei der der Stromverlauf in Abhängigkeit der Spannung aufgetragen wird. Die I/U-Kennlinie kann mit einer variablen Last und einer speziellen Messtechnik (Kennlinienmessgerät) erzeugt und gemessen werden. Grundsätzlich ist die Form dieser Kennlinie abhängig von der verwendeten Technologie der Zelle. Weitere Einflüsse haben die Bestrahlungsstärke der Sonne, die Zusammensetzung der spektralen Anteile des Sonnenlichts und die Zelltemperatur [Ben-03], [Glo-07], [Glo-08], [Zeh-09], [PVT-10]. Für die Auswertung zur Bewertung und der Modellbildung von PV-Zellen und Modulen sind die durch diese messtechnischen Apparaturen gewonnenen physikalischen Daten nötig. Einige solcher Messgeräte sind heute auf dem Markt verfügbar. Viele dieser Messinstrumente sind jedoch nicht in der Lage kontinuierlich die Kennlinien in äquidistanten Abständen zu messen und zu speichern, zum Beispiel in einer Datenbank. Aus diesem Grund wurde am Fraunhofer IWES eine neue Messtechnik zur Langzeitmessung für PV-Module entwickelt. Diese neue Messtechnik in Form einer elektronischen Messkarte nennt sich ISET *mpp-meter* (Abbildung 3.1.1) [Glo-09].

#### 3.1 ISET-MPP METER

Das ISET-*mpp meter* ist ein am Fraunhofer IWES entwickeltes Kennlinienmessgerät zur Vermessung von PV-Modulen und kleinen Modulverbünden bis 250 Wp. Eine zusätzlich entwickelte Boostervariante ermöglicht Leistungen bis 500 Wp. Das Messgerät ermöglicht nicht nur die Messung der wichtigsten Parameter des Moduls, wie zum Beispiel  $U_{MPP}$ ,  $I_{MPP}$  oder Modultemperatur, sondern auch die komplette I/U-Charakteristik. Die Messung erfolgt vollautomatisiert in individuell vorgebbaren Zeitintervallen. Für diese Arbeit wurde beispielsweise ein Zeitintervall von einer Minute gewählt. Speziell für neu entwickelte Module bietet dieser Ansatz ein großes Potenzial für Performance-Tests, die Herleitung der Modellparameter zum Beispiel für das 2-Dioden-Modell und für die Entwicklung neuer Modellgleichungen. Durch den Einsatz standardisierter Kommandos für die Kommunikation ist es möglich, die Messkarte in ein Datenerfassungssystem zu integrieren. Langzeitmessungen von PV-Modulen in verschiedenen Betriebsarten und in verschiedenen Umgebungen bzw. Standorten werden ermöglicht. Damit können zum Beispiel auch die Einflüsse verschiedener Wetter- bzw. Klimabedingungen oder Abschattungen auf die Leistung des Moduls beurteilt werden. Soll ein mathematisches Modell für ein ausgewähltes Modul entwickelt wer-

den, so ist es notwendig, nicht nur die typischen charakteristischen physikalischen Parameter wie den MPP-Strom oder die MPP-Spannung zu kennen. Mehrere I/U-Kennlinien zu verschiedenen Betriebszuständen werden dazu benötigt. Mit den herkömmlichen Kennlinienmessgeräten können in der Regel nur eine bis wenige I/U-Kennlinien, meist nicht automatisch per Hand aufgenommen werden. Das ISET-*mpp meter* hingegen ist in der Lage, in beliebig langen äquidistanten Abständen (zum Beispiel eine Kennlinie pro Minute) diese Messung vollautomatisiert vorzunehmen. Zeitgleich mit der Kennlinienmessung werden die charakteristischen Werte eines angeschlossenen Moduls bestimmt. Dies sind die Leerlaufspannung ( $U_0$ ), der Kurzschlussstrom ( $I_K$ ), die MPP-Spannung ( $U_{MPP}$ ), der MPP-Strom ( $I_{MPP}$ ), die Modultemperatur ( $T_{Mod}$ ) und die Bestrahlungsstärke in Modulebene ( $G_t$ ). Letztere wird mittels eines Bestrahlungsstärkemessers (z.B. einem Pyranometer oder einem ISETSensor sc) bestimmt. Die Messergebnisse können per analoge Schnittstellen oder per serieller Schnittstelle zur weiteren Verarbeitung ausgegeben werden. Die folgende Abbildung 3.1.1 zeigt das ISET-*mpp meter*.



**Abbildung 3.1.1: ISET-*mpp meter* zur automatisierten Messung der I/U-Kennlinie**

Das ISET-*mpp meter* ist Mikrocontroller gesteuert. Bei Bedarf können mehrere dieser Messkarten parallel betrieben werden. Ein sogenannter Broadcast-Befehl an alle ISET-*mpp meter* stellt eine absolut zeitgleiche Messung aller zu vermes-

senden Module sicher. Dies ermöglicht den Vergleich mehrerer verschiedener oder baugleicher Module. Im Folgenden sind stichpunktartig die wichtigsten Eigenschaften des ISET-*mpp meters* dargestellt:

- Langzeitvermessung von Modulen und Modulverbünden bis 250 Wp (500 Wp),
- sehr geringe Messunsicherheit, kleiner 1%,
- synchrone Aufzeichnung der I/U-Kennlinie,  $I_{MPP}$ ,  $U_{MPP}$ ,  $I_K$ ,  $U_0$ , der Modultemperatur und der momentanen Bestrahlungsstärke,
- synchrone Messung von mehreren Modulen durch Parallelbetrieb mehrerer ISET-*mpp meter* möglich,
- keine HF-Störungen der gemessenen Werte durch gepulste Leistungselektronik.

### 3.2 FUNKTIONSWEISE DES ISET-MPP METER

Eine Stromsenke (Transistor), welche durch den Mikrocontroller gesteuert wird, steuert ein angeschlossenes Modul in diskreten Schritten aus dem Leerlauf in den Kurzschluss. Die Spannung am Modul und der Modulstrom werden mittels eines 16-Bit A/D-Wandlers gemessen. Aus den gemessenen I/U-Kennlinien werden  $I_{MPP}$ ,  $U_{MPP}$ ,  $I_K$ ,  $U_0$  ermittelt. Nach der Kennlinienmessung wird das Modul im aus der Kennlinie ermittelten MPP betrieben, bis die nächste Kennlinienmessung angestoßen wird [Geb-04]. Zusätzlich wird die Modultemperatur mittels eines PT1000 und die momentane Bestrahlungsstärke bestimmt. Die Bestrahlungsstärke wird unmittelbar vor und direkt nach der Kennlinienmessung durchgeführt. Diese zweifache Messung von  $G_t$  kann zur Plausibilitätsprüfung herangezogen werden. Über eine RS232-Schnittstelle können die Messdaten an einen PC oder Server gesendet werden. Alle Werte, außer der I/U-Kennlinie, können auch als Analogwerte an der Messkarte als Spannungswert abgegriffen werden. Über einen D/A-Wandler werden die Messwerte in den Analogwert gewandelt. Die Spannung liegt im Bereich zwischen 0 bis 2 V und ist mit entsprechenden Kalibrierfaktoren versehen. Mittels dieser Analogausgänge kann die Messkarte bei Bedarf in ein bestehendes analoges Logger-System eingebunden werden. Die Messungenauigkeit der am Fraunhofer IWES kalibrierten Messkarte ist kleiner 1%. Eine synchronisierte Messung mehrerer Module ist neben dem Broadcast-Befehl per digitaler serieller Schnittstelle auch mit Hilfe eines Triggersignals möglich. Dazu besitzt die Messkarte einen entsprechenden digitalen Eingang. Wird bei mehreren Messkarten zeitgleich dieser Eingang kurzzeitig auf high gesetzt, so erfolgt eine gleichzeitige Messung aller angeschlossenen Karten



interruptgesteuert. Dies macht Sinn, wenn die Messkarte in ein bestehendes analoges Messsystem integriert werden soll, obwohl keine serielle Kommunikation zwischen Datenbanksystem und Messkarten besteht. Für die gemessenen Werte (außer der I/U-Kennlinie) können in diesem Fall die bereits oben beschriebenen analogen Ausgänge der Karte zum Einsatz kommen. Abbildung 3.2.1 zeigt das Funktionsprinzip als Blockdiagramm.

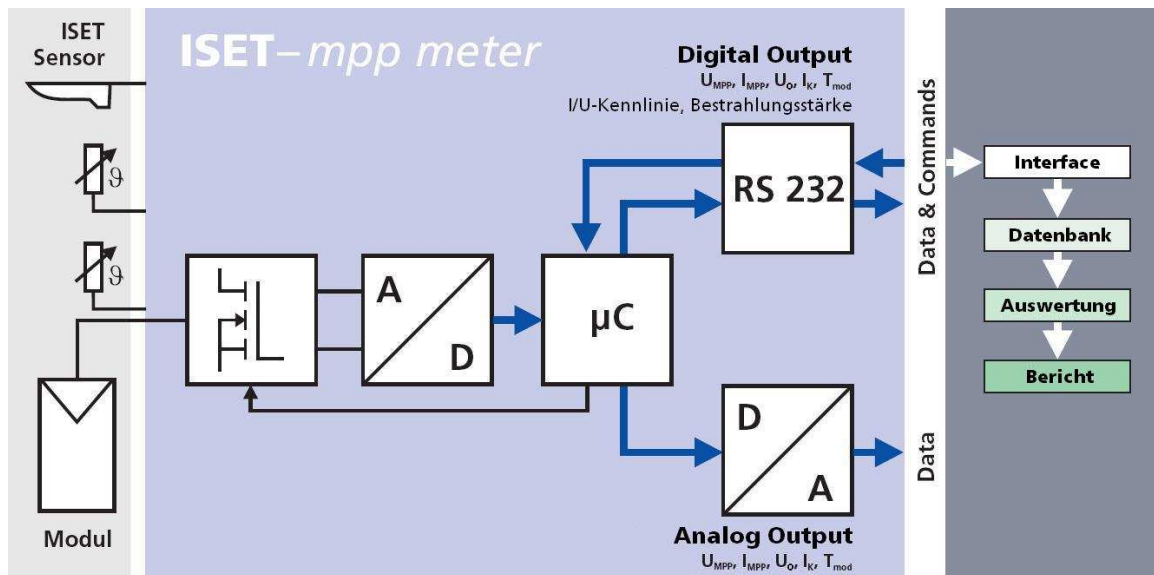


Abbildung 3.2.1: Funktionsprinzip des ISET-mpp meter als Blockdiagramm

Die I/U-Kennlinie wird in 256 diskreten Stromschritten durchlaufen. Der Transistor wird dabei mittels der Pulsweitenmodulation (PWM) des Mikrocontrollers über ein Tiefpassfilter angesteuert. Direkt vor der Kennlinienmessung wird der Kurzschlussstrom des Moduls bestimmt, indem der Transistor voll angesteuert wird. Aus dem ermittelten Kurzschlussstromwert wird dann die Stromschrittweite berechnet, um den gemessenen Kurzschlussstrom in 256 Teile aufzuspalten. Ist der Kurzschlussstrom ermittelt, wird das Modul wieder in den Leerlauf gebracht. Nach einer kurzen Verweilzeit bis alle Einschwingvorgänge abgeschlossen sind, wird mit der Messung der I/U-Kennlinie begonnen. Ein PI-Regler übernimmt dabei die Regelung der einzelnen Stromschritte. Der gesamte Vorgang dauert etwa 300 ms. Das heißt, eine Stromstufe wird für  $300 \text{ ms} / 256 \text{ Schritte} = 1,17 \text{ ms}$  gehalten. Innerhalb dieser Zeitspanne kann der Regler den Strom einregeln. Nur wenige  $\mu\text{s}$  bevor der nächste Stromschritt angeregt wird, erfolgt die Messung der aktuellen Spannung und des Stroms. Diese Verweilzeit von 1,17 ms kann bei Bedarf verlängert werden. Die Gesamtmesszeit von 300 ms wird dann in 1 ms Schritten erhöht. Sinn macht eine Verlängerung dann, wenn das angeschlossene Modul hohe Kapazitäten aufweist. Es kann dann passieren, dass der Ein-



schwingvorgang bei der Strom-/Spannungsmessung noch nicht abgeschlossen ist, bevor die eigentliche Messung angestoßen wird. Dann wäre die Messung definitiv falsch. Damit sichergestellt werden kann, dass die Messung korrekt ausgeführt wird, ist ein Modus Vorwärts-Rückwärtsmessung implementiert worden. In diesem Modus wird die Kennlinie vom Leerlauf in den Kurzschluss gefahren und sofort wieder in die andere Richtung bis in den Leerlauf. Diese beiden gemessenen Kennlinien können zum Beispiel auf einem PC in einem Koordinatensystem grafisch dargestellt werden. Liegt in diesem Fall eine fehlerhafte Messung durch eine zu hohe Kapazität des Moduls vor, so werden die beiden gemessenen Kennlinien beim Vergleich nicht exakt übereinander liegen. Eine Hysterese entsteht. Um diese fehlerhafte Messung zu beseitigen, muss die Messzeit verlängert werden, bis beide Kennlinien exakt übereinander liegen. Diese Prozedur muss quasi per Hand vor einer Messkampagne durchgeführt werden. Die Gesamtmesszeit von ca. 300 ms kann bis maximal 65 Sekunden verlängert werden. Wird eine Messung per RS232 mit dem entsprechenden Befehl angestoßen, so erfolgt diese in Echtzeit über einen Interrupt. Das bedeutet alle Aufgaben, die der Mikrocontroller zurzeit bearbeitet, werden abgebrochen und es wird unmittelbar mit der Kennlinienmessung begonnen. Diese Funktionalität ist bei der später beschriebenen zeitgleichen Messung mehrerer Module unabdingbar. Den zeitlichen Betriebsablauf einer Kennlinienmessung zeigt die Abbildung 3.2.2.

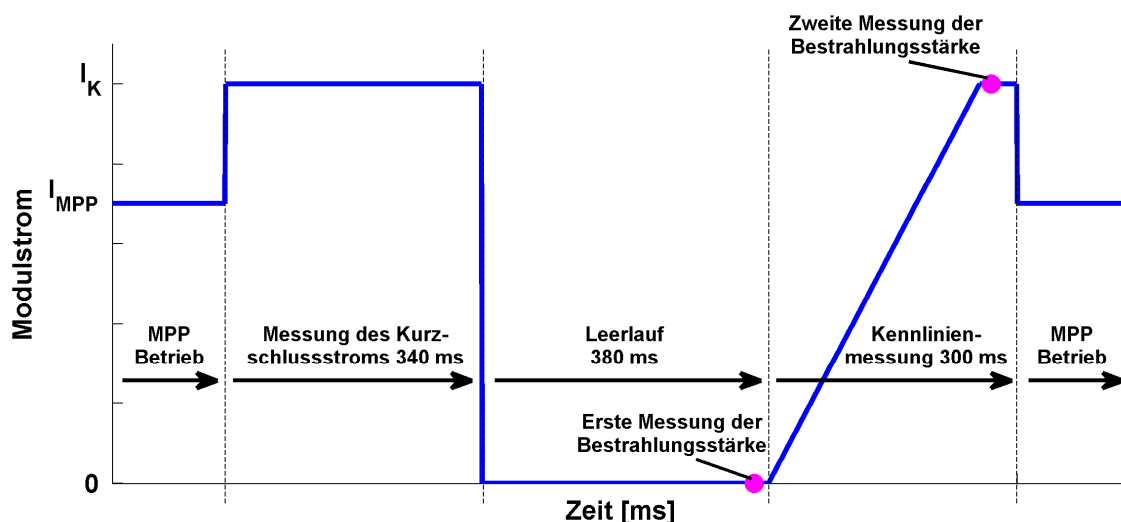


Abbildung 3.2.2: Stromverlauf während eines Messvorgangs (zeitlicher Betriebsablauf)

Die charakteristischen Werte  $I_{MPP}$ ,  $U_{MPP}$ ,  $I_K$  und  $U_0$  werden aus der Kennlinienmessung bestimmt. Der letzte Wert (256.) des Stroms ist  $I_K$ , der erste gemessene Wert der Spannung ist  $U_0$ . Um die MPP-Werte  $I_{MPP}$  und  $U_{MPP}$  zu ermitteln,

wird eine Produktbildung aller Strom-Spannungspaare vorgenommen und das Maximum der Leistung gesucht. Die Messwerte für Spannung und Strom liegen intern im Mikrocontroller als vorzeichenlose Integerwerte<sup>2</sup> (16-Bit) vor. Der Controller rechnet diese Werte mit Einrechnung von zwei Kalibrierwerten (auf diese wird später noch eingegangen) in Gleitkommazahlen, welche als Strings<sup>3</sup> über die RS232 ausgegeben werden, um. Die beiden Temperaturen werden über den Widerstandswert eines PT1000 ermittelt und ebenfalls intern als Integerwerte verarbeitet, um diese dann als Strings über die RS232 auszugeben.

Um mehrere Module zeitgleich messen zu können, wurde ein Schnittstellenwandler entwickelt, der die RS232 Kommunikation in eine RS485 umwandelt. Mittels dieses Wandlers ist es möglich, über einen Kommunikationskanal eine Anzahl von ISET-*mpp meter* anzusprechen. Über den schon erwähnten Broadcastbefehl wird an allen angeschlossenen MPP-Metern eine Messung angestoßen. Durch die interruptgesteuerte Messung der einzelnen Messkarten ist eine absolut zeitgleiche Messung aller zu vermessenden Module gewährleistet. Schnittstellenwandler dieser Art sind zwar auf dem Markt verfügbar, die Besonderheit dieses Schnittstellenwandlers ist allerdings, dass dieser die Messwerte der ISET-*mpp meter* nach einer Messung zwischenspeichern kann. Diese Messdaten können dann nacheinander ausgelesen und in eine Datenbank gespeichert werden. Eine Konfigurations- und Datenerfassungssoftware, welche auf einem PC oder Server betrieben wird, wurde zu diesem Zweck entwickelt. Die Abbildung 3.2.3 zeigt die Struktur eines solchen Messaufbaus.

---

<sup>2</sup> Ein Integer ist ein Datentyp, der ganzzahlige Werte speichern kann. Der Wertebereich hängt von der Länge des Integertyps ab. Beispielsweise überspannt ein Integer mit einer Länge von 16-Bit einen Wertebereich von 0...65535, wenn dieser vorzeichenlos angelegt wird. Dieser kann somit 65536 ( $2^{16}$ ) Werte darstellen. Wird dieser mit Vorzeichen angelegt, verschiebt sich der Wertebereich um 32.768 ins Negative: -32767...32767 ( $2^{15}$ ). Das 16. Bit wird nun für das Vorzeichen verwendet. [Her-01]

<sup>3</sup> Ein String ist ein Datentyp, der Zeichenketten speichern kann. Die Länge dieses Datentyps ist vom Anwender variabel einstellbar. [Her-01]

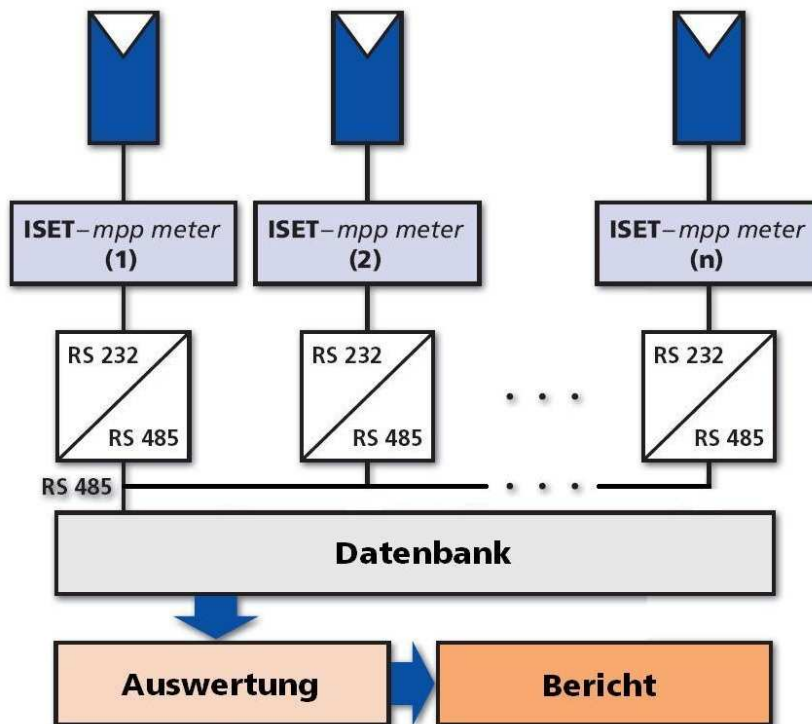


Abbildung 3.2.3: Messaufbau mehrerer ISET-mpp meter  
inkl. RS232 / RS485-Schnittstellenwandler

### 3.3 MESSUNSICHERHEITSBETRACHTUNG

Das ISET-mpp meter ist, wie in den vorherigen Kapiteln bereits beschrieben, ein Kennlinienmessgerät für PV-Module und kleine Modulverbünde mit zusätzlicher zeitsynchroner Messung der Bestrahlungsstärke und zwei Temperaturen. Zur Qualitätssicherung wird das Gerät am Fraunhofer IWES rückführbar kalibriert und erhält ein ausgewiesenes Zertifikat. Solch ein Musterzertifikat bzw. Musterkalibrierschein ist im Kapitel 8.1 (Anhang) zu finden. Die Kalibrierung erfolgt nach dem internationalen Standard IEC 17025 [IEC-05] bzw. der deutschen Fassung DIN-EN 17025 [DIN-05]. Die folgenden Einflussgrößen werden bei der Betrachtung berücksichtigt:

- Messdaten aus dem Kalibrierschein
- Messunsicherheit bei der Kalibrierung
- Anzahl der zur Verfügung stehenden Messpunkte
- Temperatureffekte
- Quantisierungsfehler

Nach GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) [ISO-08] werden einzelne Einflussgrößen in Form einer Modellgleichung zusammenge-

fasst. Diese Modellgleichung erlaubt zum Beispiel die Darstellung von verketteten Eingangsgrößen mit Hilfe von sogenannten Empfindlichkeitskoeffizienten. Durch Bewertung der Einzelgrößen und der zugehörigen Empfindlichkeitskoeffizienten können die Einzelunsicherheiten geometrisch addiert werden. Daraus ergibt sich die Gesamtunsicherheit.

Zur Kalibrierung werden im Gerät zwei Werte gespeichert, um die Ausgabewerte des Messgerätes zu variieren. Der erste Wert wird dazu verwendet, das Ausgangssignal zu skalieren, der Zweite, um einen Offset hinzuzufügen. Beide Werte werden nicht nur für Ausgangsgrößen des Messgerätes, sondern auch für die Messeingänge ermittelt. Die Kalibrierung erfolgt in einer vordefinierten Schrittweite über den gesamten Eingangs- und Ausgangsbereich des Messgerätes. Aus den ermittelten Werten werden durch eine lineare Regression Skalierungsfaktoren und Offsets bestimmt und im Gerät gespeichert.

### 3.3.1 MESSUNSICHERHEITSBEITRÄGE DER MPP-SPANNUNG [KIR-10]

Zur Kalibrierung der Spannung wird der Spannungsbereich in 10 V Schritten, bis 20 V in 5 V Schritten durchfahren. Der wahre Wert wird sodann mit dem Anzeigewert des ISET-*mpp meters* verglichen. Mittels einer rückführbar kalibrierten Spannungsquelle wird der wahre Wert erzeugt. Die Abweichungen, die dabei entstehen können, haben maximal einen Wert, der mit der folgenden Gleichung zu ermitteln ist.

$$\begin{aligned} \delta U_{MPP} = & C_1 \delta U_{Ber} + C_2 \delta U_{Wert} + C_3 \delta U_{lin} + C_4 \delta U_{MPPT} + C_5 \delta U_{Quant} + C_6 \delta U_{TK} + \\ & C_7 \delta U_{Wied} + C_8 \delta U_{Rausch} + C_9 \delta U_{kal} + C_{10} \delta U_{OE} + C_{11} \delta U_{OE-TK} + C_{12} \delta U_{LDJ} \end{aligned} \quad (3.3.1)$$

Die Empfindlichkeitskoeffizienten  $C_1$  bis  $C_{12}$  und der weiter unten beschriebene Empfindlichkeitskoeffizient  $C_A$  haben alle einen Wert von eins.

Eine Liste der einzelnen Unsicherheiten zeigt die Tabelle 3.3.1.

i	Symbol	Einheit	Definition
0	$\delta U_{MPP}$	Volt	Messfehler des angezeigten Messwerts
1	$\delta U_{Ber}$	Volt	Bereichsabhängiger Messfehler (es liegt nur ein Bereich vor)
2	$\delta U_{Wert}$	Volt	Wertabhängiger Messfehler
3	$\delta U_{lin}$	Volt	Linearitätsfehler der Messung
4	$\delta U_{MPPT}$	Volt	MPP-Treffergenauigkeit (siehe Kapitel 3.3.3)
5	$\delta U_{Quant}$	Volt	Quantisierungsfehler der Messung
6	$\delta U_{TK}$	Volt	Fehler aufgrund Temperaturabhängigkeit
7	$\delta U_{Wied}$	Volt	Wiederholpräzision
8	$U_{Rausch}$	Volt	Fehler durch Eingangsrauschen
9	$\delta U_{kal}$	Volt	Genauigkeit der Kalibrierung
10	$\delta U_{OE}$	Volt	Offset-Fehler
11	$\delta U_{OE-TK}$	Volt	Temperaturkoeffizient des Offset-Fehlers
12	$\delta U_{LDJ}$	Volt	Langzeit-Driftfehler über 1 Jahr

**Tabelle 3.3.1: Liste der auftretenden Messunsicherheiten für die Spannung**

Eine beispielhafte Liste der Spannungsmessungen eines ISET-*mpp meters* am Kalibrierstand zeigt die folgende Tabelle 3.3.2 [IWES-10].

Richtiger Wert [V]	Anzeige wert [V]	Relative Abwei- chung [%]	Absolute Abwei- chung [V]	Zulässige Toleranz [V]	Erweiterte Messunsi- cherheit [V]
0,0000	0,02	- *	0,0200	+/- 0,69361	+/- 0,040
4,9940	5,00	0,1201	0,0060	+/- 0,69361	+/- 0,040
9,9788	9,98	0,0120	0,0012	+/- 0,69361	+/- 0,040
14,9646	14,96	-0,0307	-0,0046	+/- 0,69361	+/- 0,040
20,0181	20,02	0,0095	0,0019	+/- 0,69361	+/- 0,040
29,9924	29,99	-0,0080	-0,0024	+/- 0,69361	+/- 0,040
40,0252	40,02	-0,0130	-0,0052	+/- 0,69361	+/- 0,040
49,9985	50,00	0,0030	0,0015	+/- 0,69361	+/- 0,040
60,0407	60,04	-0,0012	-0,0007	+/- 0,69361	+/- 0,040
70,0172	70,01	-0,0103	-0,0072	+/- 0,69361	+/- 0,040
79,9907	79,98	-0,0134	-0,0107	+/- 0,69361	+/- 0,040
90,0333	90,03	-0,0037	-0,0033	+/- 0,69361	+/- 0,040
100,0074	100,01	0,0026	0,0026	+/- 0,69361	+/- 0,040
110,0403	110,04	-0,0003	-0,0003	+/- 0,69361	+/- 0,041
120,0140	120,01	-0,0033	-0,0040	+/- 0,69361	+/- 0,042
129,9881	129,98	-0,0062	-0,0081	+/- 0,69361	+/- 0,042
140,0273	140,02	-0,0052	-0,0073	+/- 0,69361	+/- 0,042
150,0694	150,07	0,0004	0,0006	+/- 0,69361	+/- 0,042
160,0432	160,04	-0,0020	-0,0032	+/- 0,69361	+/- 0,042
170,0170	170,02	0,0018	0,0030	+/- 0,69361	+/- 0,042
180,0495	180,05	0,0003	0,0005	+/- 0,69361	+/- 0,042

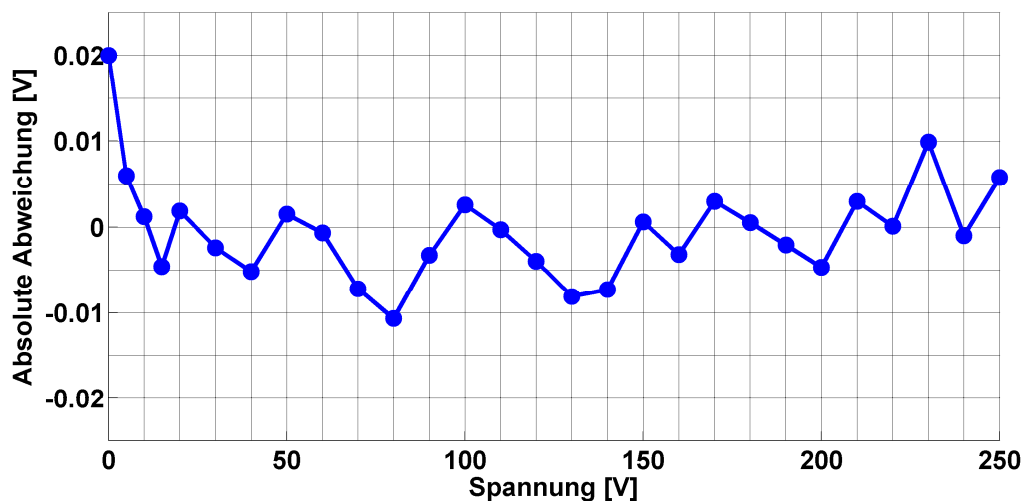
190,0921	190,09	-0,0011	-0,0021	+/- 0,69361	+/- 0,042
199,9947	199,99	-0,0024	-0,0047	+/- 0,69361	+/- 0,042
210,0370	210,04	0,0014	0,0030	+/- 0,69361	+/- 0,042
220,0799	220,08	0,0000	0,0001	+/- 0,69361	+/- 0,043
230,0501	230,06	0,0043	0,0099	+/- 0,69361	+/- 0,043
240,0210	240,02	-0,0004	-0,0010	+/- 0,69361	+/- 0,043
250,0542	250,06	0,0023	0,0058	+/- 0,69361	+/- 0,043

**Tabelle 3.3.2: Auszug aus einem ISET-*mpp meter* Kalibrierschein [IWES-10]**

In diesem Fall beinhaltet der Vergleich zwischen richtigem Wert und Anzeigewert die Kombination mehrerer Unsicherheitsbeiträge. Aus der dokumentierten Abweichung lassen sich daher die zusammengefassten Unsicherheitsbeiträge

$$C_A \delta U_{Abw} = C_1 \delta U_{Ber} + C_2 \delta U_{Wert} + C_3 \delta U_{lin} + C_{10} \delta U_{OE} \quad (3.3.2)$$

gewinnen. Die absolute Abweichung ist in der Abbildung 3.3.1. dargestellt.



**Abbildung 3.3.1: Absolute Abweichung der Spannungskalibrierung eines ISET-*mpp meters***

Aus Abbildung 3.3.1 wird deutlich, dass man die Abweichungen nicht mehr bezüglich Offset oder messwertabhängiger Fehlerkomponenten auftrennen kann. Die Schwankungen zeigen, dass ein relativ hoher Linearitätsfehleranteil vorliegt. Auf Basis dieser Information kann ein zusammengesetzter Fehler  $\delta U_{Abw}$  von +/- 0,02 V über den gesamten Bereich angegeben werden.

Die konkreten Werte der Messunsicherheitsbeiträge sind in der folgenden Tabelle 3.3.3 dargestellt.

i	Symbol	Verteilungs- funktion	Erweiter- ungsfaktor	Wert	Quelle	Einheit
A	$\delta U_{Abw}$	Normal	2,0000	0,0200	Kalibrierschein	V
2	$\delta U_{Wert}$ , enthalten in $\delta U_{Abw}$					
3	$\delta U_{lin}$ , enthalten in $\delta U_{Abw}$					
4	$\delta U_{MPPT}$	Rechteck	1,7321		Berechnung	%
5	$\delta U_{Quant}$	Rechteck	1,7321	0,0100	Kalibrierschein, Anzahl der Nachkommastellen	V
6	$\delta U_{TK}$	Rechteck	1,7321	0,0600	Berechnung anhand Datenblattangaben	%
7	$\delta U_{Wied}$	Normal	2,2800	0,0194	IWES-Messung	V
8	$U_{Rausch}$ , enthalten in $\delta U_{Wied}$					
9	$\delta U_{kal}$	Normal	2,0000	0,0430	Kalibrierschein	V
10	$\delta U_{OE}$ , enthalten in $\delta U_{Abw}$					
11	$\delta U_{OE-TK}$	Entfällt, da vernachlässigbar				
12	$\delta U_{LDJ}$	Normal	2,6500	0,2320	IWES-Messung	V

**Tabelle 3.3.3: Darstellung der Messunsicherheitsbeiträge und Angabe der zu verwendenden Werte. Die grün gekennzeichneten Werte können aus dem jeweiligen individuellen Kalibrierscheinen der ISET-*mpp meter* (Kapitel 8.1) entnommen werden.**

Die bei den Einzelabweichungen angewandten Verteilungsfunktionen sind die Normal- (Gauß'sche Glockenkurve) und Rechteckfunktion (Gleichverteilung zwischen zwei Grenzen). Die Normalfunktion kann auf Messreihen angewendet werden. Der Erweiterungsfaktor dieser Funktion ist abhängig von der Anzahl der durchgeführten Messungen. Je höher die Anzahl der Messungen, desto weiter nähert sich der Erweiterungsfaktor dem Wert 2. Dieser ist der kleinste Wert, den der Erweiterungsfaktor dieser Funktion erreichen kann. Bei der Rechteckfunktion kann der wahre Wert sich nur zwischen den Grenzen aufhalten, weil zum Beispiel eine Selektion durchgeführt wurde oder weil Ausreißer derart justiert wurden, dass die Grenzen eingehalten werden. Diese Verteilung ist bei Datenblatt-Angaben zur Toleranz anzuwenden und hat einen konstanten Erweiterungsfaktor von  $\sqrt{3} \approx 1,7321$ . [ISO-08]

Die Unsicherheitsbeiträge können nach folgendem Rechenschema dargestellt und zusammengefasst werden (Tabelle 3.3.4). Die Berechnung erfolgt mit der Annahme einer Messpunkteanzahl auf der I/U-Kennlinie von 230. Die Anzahl der Messpunkte liegt in der Regel bei der realen Messung geringfügig unterhalb von 256, sodass mit 230 Messpunkten der Worst-Case angenommen wurde.

Nr. (i)	Sym- bol	Erwar- tungs- wert	Unsich- erheit	Ein- heit	Verteilung	Teiler	Standard MU	Empfindl. Koeff.	Unsicher- heits- beitrag	Quadr. Unsich- erheits- beitrag
0	$\delta U_{MPP}$	259	000,0E+0	V	Rechteck	1,7321	000,0E+0	1,0E+0	000,0E+0	000,0E+0
A	$\delta U_{Abw}$	0	20,9E-3	V	Normal	2,0000	10,5E-3	1,0E+0	10,5E-3	109,2E-6
4	$\delta U_{MPPT}$	0	857,6E-3	V	Rechteck	1,7321	495,2E-3	1,0E+0	495,2E-3	245,2E-3
5	$\delta U_{Quant}$	0	10,0E-3	V	Rechteck	1,7321	5,8E-3	1,0E+0	5,8E-3	33,3E-6
6	$\delta U_{TK}$	0	155,4E-3	V	Rechteck	1,7321	89,7E-3	1,0E+0	89,7E-3	8,0E-3
7	$\delta U_{Wied}$	0	19,4E-3	V	Normal	2,2800	8,5E-3	1,0E+0	8,5E-3	72,4E-6
9	$\delta U_{kal}$	0	43,0E-3	V	Normal	2,0000	21,5E-3	1,0E+0	21,5E-3	462,3E-6
12	$\delta U_{LDJ}$	0	232,0E-3	V	Normal	2,6500	87,5E-3	1,0E+0	87,5E-3	7,7E-3
									<b>MU</b>	<b>0,5114 V</b>
									<b>erw. MU</b>	<b>1,0228 V</b>
									<b>rel. erw. MU</b>	<b>0,39 %</b>

**Tabelle 3.3.4: Berechnung der erweiterten Messunsicherheit (MU) für die MPP-Spannung mit Hilfe der Kalibrierangaben eines individuellen ISET-mpp meters.**

Die folgenden Gleichungen wurden zur Bestimmung der Werte in der Tabelle 3.3.4 verwendet:

$$\text{Erwartungswert } (\delta U_{MPP}) = \text{Eingangsspannung} \quad (3.3.3)$$

$$\text{Unsicherheit } (\delta U_{MPPT}) = 10^{-1,0574 \log x + 2,0173} / 100 \cdot \text{Erwartungswert } (\delta U_{MPP}) \quad (3.3.4)$$

$$\text{Standard MU} = \text{Unsicherheit} / \text{Teiler} \quad (3.3.5)$$

$$\text{Unsicherheitsbeitrag} = \text{Standard MU} \cdot \text{Empfindl.Koeff.} \quad (3.3.6)$$

$$\text{Quadr. Unsicherheitsbeitrag} = \text{Unsicherheitsbeitrag}^2 \quad (3.3.7)$$

$$\text{MU} = \sqrt{\sum_i \text{Quadr. Unsicherheitsbeitrag}(i)} \quad (3.3.8)$$

$$\text{Erw. MU} = \text{MU} \cdot 2 \quad (3.3.9)$$

$$\text{Erw. MU}_{\%} = \text{Erw. MU} / \text{Erwartungswert} \cdot 100 \quad (3.3.10)$$

### 3.3.2 MESSUNSICHERHEITSBEITRÄGE DES MPP-STROMS [KIR-10]

Zur Kalibrierung des Stroms wird der Strombereich in 1 A Schritten, bis 2 A in 0,2 A Schritten durchfahren. Der wahre Wert wird mit dem Anzeigewert des ISET-mpp meters verglichen. Mittels einer rückführbar kalibrierten Stromquelle wird der wahre Wert erzeugt. Die Abweichungen, die dabei entstehen können, haben maximal eine Größe, die mit der folgenden Gleichung zu ermitteln ist.

$$\begin{aligned} \delta I_{MPP} = & C_1 \delta I_{Ber} + C_2 \delta I_{Wert} + C_3 \delta I_{lin} + C_4 \delta I_{MPPT} + C_5 \delta I_{Quant} + C_6 \delta I_{TK} + \\ & C_7 \delta I_{Wied} + C_8 \delta I_{Rausch} + C_9 \delta I_{kal} + C_{10} \delta I_{OE} + C_{11} \delta I_{OE-TK} + C_{12} \delta I_{LDJ} \end{aligned} \quad (3.3.11)$$



Die Empfindlichkeitskoeffizienten  $C_1$  bis  $C_{12}$  und der weiter unten beschriebene Empfindlichkeitskoeffizient  $C_A$  haben alle einen Wert von eins.

Eine Liste der einzelnen Unsicherheiten zeigt die Tabelle 3.3.5.

i	Symbol	Einheit	Definition
0	$\delta I_{MPP}$	Ampere	Messfehler des angezeigten Messwerts
1	$\delta I_{Ber}$	Ampere	Bereichsabhängiger Messfehler
2	$\delta I_{Wert}$	Ampere	Wertabhängiger Messfehler
3	$\delta I_{lin}$	Ampere	Linearitätsfehler der Messung
4	$\delta I_{MPPT}$	Ampere	MPP-Treffergenauigkeit (siehe Kapitel 3.3.3)
5	$\delta I_{Quant}$	Ampere	Quantisierungsfehler der Messung
6	$\delta I_{TK}$	Ampere	Fehler aufgrund Temperaturabhängigkeit
7	$\delta I_{Wied}$	Ampere	Wiederholpräzision
8	$I_{Rausch}$	Ampere	Fehler durch Eingangsrauschen
9	$\delta I_{kal}$	Ampere	Genauigkeit der Kalibrierung
10	$\delta I_{OE}$	Ampere	Offset-Fehler
11	$\delta I_{OE-TK}$	Ampere	Temperaturkoeffizient des Offset-Fehlers
12	$\delta I_{LDJ}$	Ampere	Langzeit-Driftfehler über 1 Jahr

**Tabelle 3.3.5: Liste der auftretenden Messunsicherheiten für den Strom**

Eine beispielhafte Liste der Strommessungen eines ISET-*mpp meters* am Kalibrierstand zeigt die folgende Tabelle 3.3.6 [IWES-10].

Richtiger Wert [A]	Anzeige-wert [A]	Relative Abwei-chung [%]	Absolute Abwei-chung [A]	Zulässige Toleranz [A]	Erweiterte Messunsi-cherheit [A]
-0,0009	0,000	- *	0,0009	+/- 0,06888	+/- 0,0016
0,2023	0,203	0,3460	0,0007	+/- 0,06888	+/- 0,0016
0,3982	0,399	0,2009	0,0008	+/- 0,06888	+/- 0,0016
0,6069	0,607	0,0165	0,0001	+/- 0,06888	+/- 0,0017
0,8026	0,803	0,0498	0,0004	+/- 0,06888	+/- 0,0018
0,9993	0,999	-0,0300	-0,0003	+/- 0,06888	+/- 0,0020
1,2071	1,207	-0,0083	-0,0001	+/- 0,06888	+/- 0,0021
1,4037	1,404	0,0214	0,0003	+/- 0,06888	+/- 0,0023
1,5993	1,598	-0,0813	-0,0013	+/- 0,06888	+/- 0,0024
1,8079	1,809	0,0608	0,0011	+/- 0,06888	+/- 0,0026
2,0041	2,005	0,0449	0,0009	+/- 0,06888	+/- 0,0028
2,9985	2,999	0,0167	0,0005	+/- 0,06888	+/- 0,0038
4,0025	4,004	0,0375	0,0015	+/- 0,06888	+/- 0,0049
5,0082	5,010	0,0359	0,0018	+/- 0,06888	+/- 0,0060
6,0018	6,003	0,0200	0,0012	+/- 0,06888	+/- 0,0071
7,0044	7,005	0,0086	0,0006	+/- 0,06888	+/- 0,0082

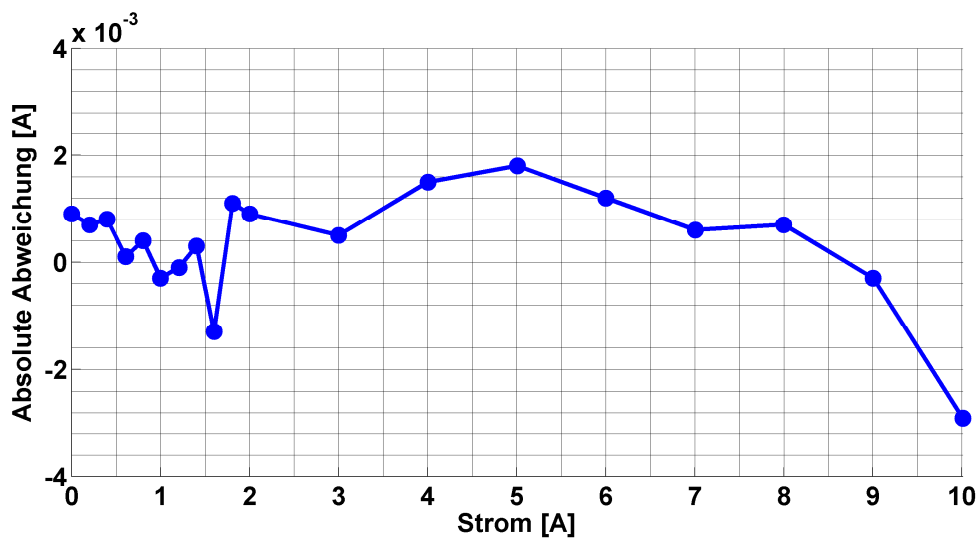
7,9983	7,999	0,0088	0,0007	+/- 0,06888	+/- 0,0093
9,0033	9,003	-0,0033	-0,0003	+/- 0,06888	+/- 0,0104
10,0089	10,006	-0,0290	-0,0029	+/- 0,06888	+/- 0,0116

Tabelle 3.3.6: Auszug aus einem ISET-*mpp meter* Kalibrierschein [IWES-10]

Wie bei der Spannung beinhaltet der Vergleich zwischen richtigem Wert und Anzeigewert die Kombination mehrerer Unsicherheitsbeiträge. Aus der dokumentierten Abweichung lassen sich daher die zusammengefassten Unsicherheitsbeiträge

$$C_A \delta I_{Abw} = C_1 \delta I_{Ber} + C_2 \delta I_{Wert} + C_3 \delta I_{lin} + C_{10} \delta I_{OE} \quad (3.3.12)$$

gewinnen. Die absolute Abweichung ist in der Abbildung 3.3.2. dargestellt.

Abbildung 3.3.2: Absolute Abweichung der Stromkalibrierung eines ISET-*mpp meters*

Aus Abbildung 3.3.2 wird deutlich, dass man die Abweichungen nicht mehr bezüglich Offset oder messwertabhängiger Fehlerkomponenten auftrennen kann. Die Schwankungen zeigen, dass ein relativ hoher Linearitätsfehleranteil vorliegt. Auf Basis dieser Information kann ein zusammengesetzter Fehler  $\delta I_{Abw}$  von +/- 0,0029 A über den gesamten Bereich angegeben werden.

Die konkreten Werte der Messunsicherheitsbeiträge sind in der folgenden Tabelle 3.3.7 dargestellt.

i	Symbol	Verteilungs- funktion	Erweite- rungsfaktor	Wert	Quelle	Einheit
A	$\delta I_{Abw}$	Normal	2,0000	0,0029	Kalibrierschein	A
2	$\delta I_{Wert}$ , enthalten in $\delta I_{Abw}$					
3	$\delta I_{lin}$ , enthalten in $\delta I_{Abw}$					
4	$\delta I_{MPPT}$	Rechteck	1,7321		Berechnung	%
5	$\delta I_{Quant}$	Rechteck	1,7321	0,00100	Kalibrierschein, Anzahl der Nachkommastellen	A
6	$\delta I_{TK}$	Rechteck	1,7321	0,13500	Berechnung anhand Datenblattangaben	%
7	$\delta I_{Wied}$	Normal	2,2800	0,00279 4	IWES-Messung	A
8	$I_{Rausch}$ , enthalten in $\delta I_{Wied}$					
9	$\delta I_{kal}$	Normal	2,0000	0,01160	Kalibrierschein	A
10	$\delta I_{OE}$ , enthalten in $\delta I_{Abw}$					
11	$\delta I_{OE-TK}$	Entfällt, da vernachlässigbar				
12	$\delta I_{LDJ}$	Normal	2,65000	0,00869	IWES-Messung	A

**Tabelle 3.3.7: Darstellung der Messunsicherheitsbeiträge und Angabe der zu verwendenden Werte. Die grün gekennzeichneten Werte können aus dem jeweiligen individuellen Kalibrierscheinen der ISET-*mpp meter* (Kapitel 8.1) entnommen werden.**

Die bei den Einzelabweichungen angewandten Verteilungsfunktionen sind die Normal- (Gauß'sche Glockenkurve) und Rechteckfunktion (Gleichverteilung zwischen zwei Grenzen). Die Normalfunktion kann auf Messreihen angewendet werden. Der Erweiterungsfaktor dieser Funktion ist abhängig von der Anzahl der durchgeführten Messungen. Je höher die Anzahl der Messungen, desto weiter nähert sich der Erweiterungsfaktor dem Wert 2. Dieser ist der kleinste Wert, den der Erweiterungsfaktor dieser Funktion erreichen kann. Bei der Rechteckfunktion kann sich der wahre Wert nur zwischen den Grenzen aufhalten, weil zum Beispiel eine Selektion durchgeführt wurde oder weil Ausreißer derart justiert wurden, dass die Grenzen eingehalten werden. Diese Verteilung ist bei Datenblatt-Angaben zur Toleranz anzuwenden und hat einen konstanten Erweiterungsfaktor von  $\sqrt{3} \approx 1,7321$ . [ISO-08]

Die Unsicherheitsbeiträge können nach folgendem Rechenschema dargestellt und zusammengefasst werden (Tabelle 3.3.8). Die Berechnung erfolgte mit der Annahme einer Messpunkteanzahl auf der I/U-Kennlinie von 230. Die Anzahl der Messpunkte liegt in der Regel bei der realen Messung geringfügig unterhalb von 256, sodass mit 230 Messpunkten der Worst-Case angenommen wurde.

Nr. (i)	Sym- bol	Erwar- tungs- wert	Unsich- erheit	Ein- heit	Verteilung	Teiler	Standard MU	Empfindl. Koeff.	Unsicher- heits- beitrag	Quadr. Unsicher- heits- beitrag
0	$\delta I_{MPP}$	10	000,0E+0	A	Rechteck	1,7321	000,0E+0	1,0E+0	000,0E+0	000,0E+0
A	$\delta I_{Abw}$	0	3,0E-3	A	Normal	2,0000	1,5E-3	1,0E+0	1,5E-3	2,3E-6
4	$\delta I_{MPPT}$	0	33,1E-3	A	Rechteck	1,7321	19,1E-3	1,0E+0	19,1E-3	365,5E-6
5	$\delta I_{Quant}$	0	1,0E-3	A	Rechteck	1,7321	577,4E-6	1,0E+0	577,4E-6	333,3E-9
6	$\delta I_{TK}$	0	13,5E-3	A	Rechteck	1,7321	7,8E-3	1,0E+0	7,8E-3	60,8E-6
7	$\delta I_{Wied}$	0	2,8E-3	A	Normal	2,2800	1,2E-3	1,0E+0	1,2E-3	1,5E-6
9	$\delta I_{kal}$	0	11,6E-3	A	Normal	2,0000	5,8E-3	1,0E+0	5,8E-3	33,6E-6
12	$\delta I_{LDJ}$	0	8,7E-3	A	Normal	2,6500	3,3E-3	1,0E+0	3,3E-3	10,8E-6
									<b>MU</b>	<b>0,0218 A</b>
									<b>erw. MU</b>	<b>0,0436 A</b>
									<b>rel. erw. MU</b>	<b>0,44 %</b>

**Tabelle 3.3.8: Berechnung der erweiterten Messunsicherheit (MU) für den MPP-Strom mit Hilfe der Kalibrierangaben eines individuellen ISET-mpp meters.**

Die folgenden Gleichungen wurden zur Bestimmung der Werte in der Tabelle 3.3.8 verwendet:

$$\text{Erwartungswert } (\delta I_{MPP}) = \text{Eingangsstrom} \quad (3.3.13)$$

$$\text{Unsicherheit } (\delta I_{MPPT}) = 10^{-1,0574 \cdot \log x + 2,0173} / 100 \cdot \text{Erwartungswert } (\delta I_{MPP}) \quad (3.3.14)$$

$$\text{Standard MU} = \text{Unsicherheit} / \text{Teiler} \quad (3.3.15)$$

$$\text{Unsicherheitsbeitrag} = \text{Standard MU} \cdot \text{Empfindl. Koeff.} \quad (3.3.16)$$

$$\text{Quadr. Unsicherheitsbeitrag} = \text{Unsicherheitsbeitrag}^2 \quad (3.3.17)$$

$$\text{MU} = \sqrt{\sum_i \text{Quadr. Unsicherheitsbeitrag } (i)} \quad (3.3.18)$$

$$\text{Erw. MU} = \text{MU} \cdot 2 \quad (3.3.19)$$

$$\text{Erw. MU}_{\%} = \text{Erw. MU} / \text{Erwartungswert} \cdot 100 \quad (3.3.20)$$

### 3.3.3 EINFLUSS DER MESSPUNKTEANZAHL AUF DIE MESSUNSICHERHEIT

Der Einfluss der Messpunkteanzahl auf die Messunsicherheit wird in diesem Kapitel auf theoretischem Wege ermittelt. Dazu werden acht gemessene Kennlinien vier verschiedener Technologien mit dem Zweidiodenmodell simuliert. Folgende Technologien wurden verwendet:

- kristallines Silizium (c-Si),
- mikroamorphes Silizium ( $\mu$ a-Si),
- Cadmium-Telurid (CdTe),
- Kupfer-Indium-Diselenid (CIS).

Diese vier Technologien wurden jeweils bei ca.  $100 \text{ W/m}^2$  (Schwachlicht) und ca.  $1000 \text{ W/m}^2$  (Starklicht) simuliert. Die Parameter für das Zweiodenmodell wurden für jede einzelne Kennlinie ermittelt, sodass eine sehr gute Approximationsqualität, auch für die dünnsschichtigen Technologien, garantiert ist. Die Simulation erfolgt jeweils zweimal pro Kennlinie. Beim ersten Durchlauf wird die Kennlinie mit sehr vielen Punkten berechnet. Sie wird mit 100.000 Punkten simuliert. Bei einer so hohen Anzahl an Punkten kann von einer quasikontinuierlichen Kennlinie gesprochen werden, da die Schrittweite von Strom und Spannung im 0,001%-Bereich des jeweiligen Maximalwertes liegt. Diese Kennlinie wird im Folgenden Referenzkennlinie genannt. Von dieser werden sodann der MPP-Strom, die MPP-Spannung und die MPP-Leistung berechnet. Die zweite Kennlinie hat eine variierende Anzahl an Punkten von 1 bis 1000. Von diesen 1000 Kennlinien wird wie bei der Referenzkennlinie jeweils der MPP-Strom, die MPP-Spannung und die MPP-Leistung berechnet und mit den Werten der Referenzkennlinie ins Verhältnis gesetzt. Werden diese Ergebnisse in ein Diagramm gezeichnet, so ergeben sich die folgenden beiden Abbildungen 3.3.3 und 3.3.4 für das CIS-Modul bei  $100 \text{ W/m}^2$  und  $1000 \text{ W/m}^2$ . Damit sich die Kennlinien so ge-

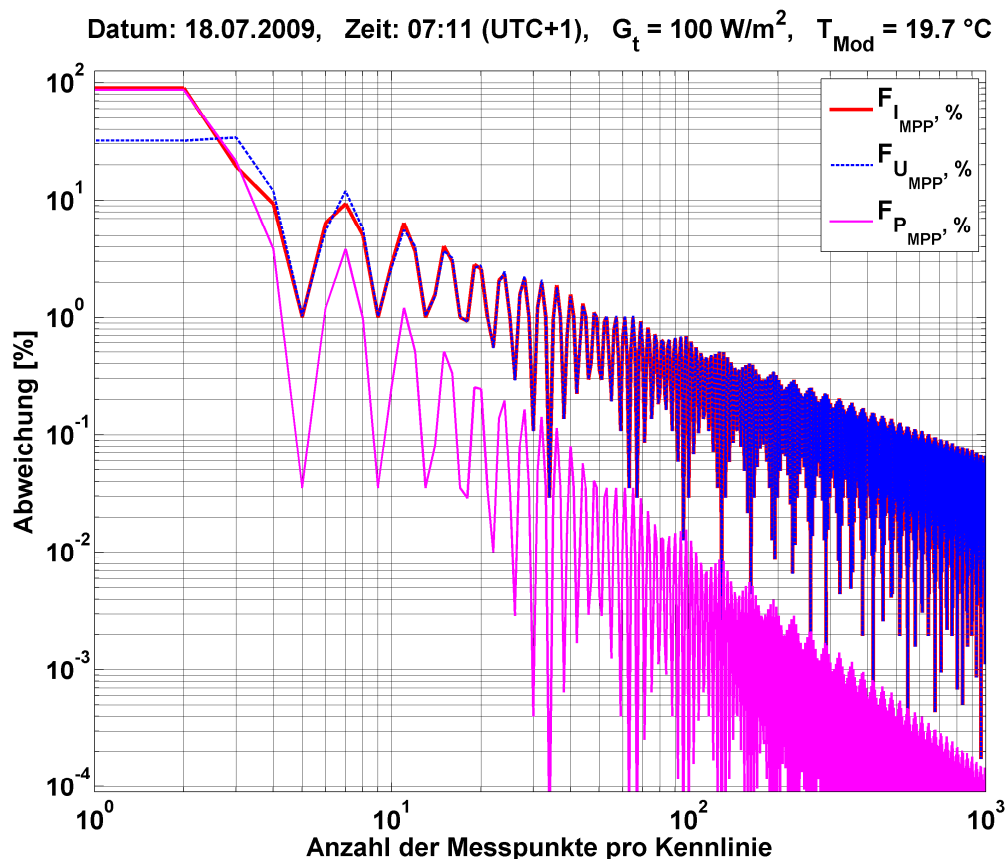
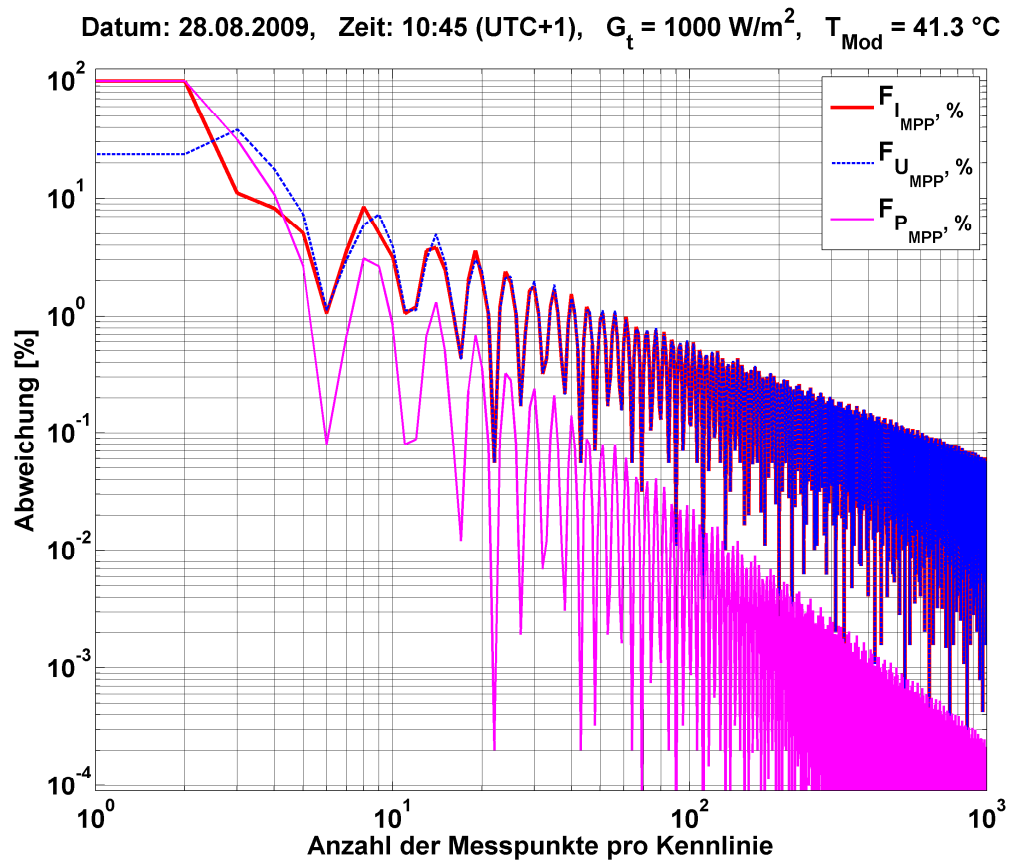


Abbildung 3.3.3: Einfluss der Messpunkteanzahl auf die Messunsicherheit (CIS-Modul bei einer Bestrahlungsstärke von  $100 \text{ W/m}^2$  (Schwachlicht))

nau wie möglich an die Technologien anlehnen, wurden zur Simulation die gleiche Bestrahlungsstärke und Modultemperatur als Eingangsgrößen für das Zweidiodenmodell gewählt, wie zur Parametrisierung dieses Modells.



**Abbildung 3.3.4: Einfluss der Messpunkteanzahl auf die Messunsicherheit (CIS-Modul bei einer Bestrahlungsstärke von  $1000 \text{ W/m}^2$  (Starklicht))**

Die drei weiteren Technologien finden sich im Kapitel 8.2 (Anhang). Die Unterschiede der Fehlerfunktionen der verschiedenen Technologien sind minimal. Eine Reduzierung der Messpunkte der Referenzkennlinie auf 10.000 ergab die gleichen Ergebnisse, sodass davon ausgegangen wird, dass die gewählte Anzahl von 100.000 Punkten für diese Auswertung ausreichend ist. Die Oszillation der relativen Fehlerkurven ergibt sich dadurch, dass durch die variierende Anzahl an Stützstellen sich diese über den wahren MPP schieben. Die dabei auftretenden lokalen Minima können nicht zur Betrachtung der Messgenauigkeit herangezogen werden. Stattdessen kann die obere Tangente, welche die lokalen Maxima der Fehlerfunktionen bilden als "Worst Case" der MPP-Genauigkeit verwendet werden. Da, wie bereits erläutert, die Unterschiede der Fehlerfunktionen der verschiedenen Technologien marginal ist, kann eine allgemeingültige Fehlerfunktion hergeleitet werden. Diese lässt sich als lineare Funktion (obere Tangen-

te der Fehlerfunktionen) in die doppellogarithmischen Grafen einzeichnen. Dabei ergeben sich zwei Tangenten, eine für MPP-Strom und -Spannung, die andere für die MPP-Leistung. Lineare Funktionen lassen sich durch die allgemeine Gleichung

$$y = mx + b \quad (3.3.21)$$

beschreiben, wobei im konkreten Fall  $x$  der Anzahl der Messpunkte pro Kennlinie entspricht,  $y$  der Abweichung,  $m$  der Steigung der Funktion und  $b$  dem Absolutglied. Da die linearen Funktionen in ein doppeltlogarithmisches Diagramm eingezeichnet werden sollen, erweitert sich die allgemeine lineare Darstellung zu

$$\log y = m \cdot \log x + b \quad \Rightarrow \quad y = 10^{m \cdot \log x + b} . \quad (3.3.22)$$

Die Steigung und das Absolutglied werden durch zwei ausgewählte Punkte mittels eines linearen Gleichungssystems bestimmt. Die zwei ausgewählten Punkte werden durch visuelle Abschätzung ermittelt. Für diese ergeben sich:

$$P_1 = (2 \cdot 10^0 \mid 5 \cdot 10^1) , \quad P_2 = (1 \cdot 10^3 \mid 7 \cdot 10^{-2}) \quad \text{für MPP-Strom und -Spannung}$$

$$P_3 = (2 \cdot 10^0 \mid 6 \cdot 10^1) , \quad P_4 = (1 \cdot 10^3 \mid 3 \cdot 10^{-4}) \quad \text{für die MPP-Leistung.}$$

Nach Lösung des linearen Gleichungssystems ergeben sich für die Steigung und das Absolutglied

$$m = -1,0574 , \quad b = 2,0173 \quad \text{für MPP-Strom und -Spannung}$$

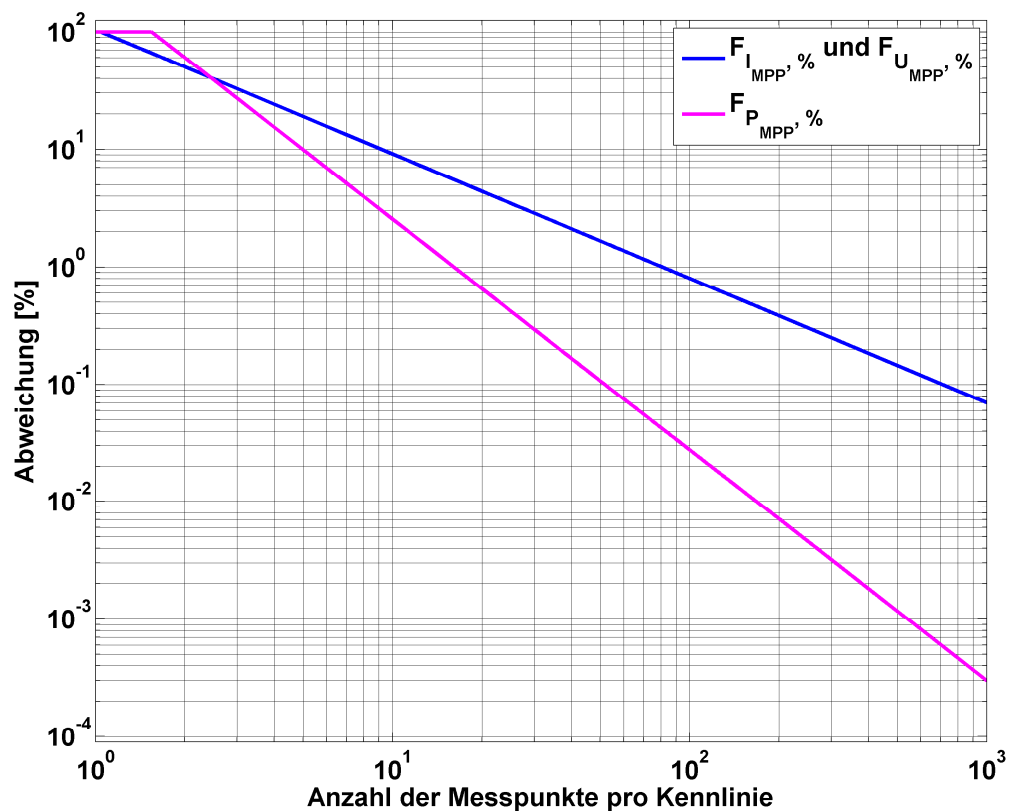
$$m = -1,9641 , \quad b = 2,3694 \quad \text{für die MPP-Leistung}$$

und eingesetzt in die Funktionsgleichung

$$y = 10^{-1,0574 \log x + 2,0173} \quad \text{für MPP-Strom und -Spannung} \quad (3.3.23)$$

$$y = 10^{-1,9641 \log x + 2,3694} \quad \text{für die MPP-Leistung.} \quad (3.3.24)$$

Werden die beiden Funktionen in einem doppellogarithmischen Diagramm dargestellt, so ergibt sich der allgemeingültige relative Fehler in Abhängigkeit der Messpunkte pro I/U-Kennlinie. Die Abbildung 3.3.5 zeigt die entsprechenden Diagramme.



**Abbildung 3.3.5: Einfluss der Messpunkteanzahl auf die Messunsicherheit  
(allgemeingültig)**

Aus der Abbildung 3.3.5 kann die Mindestanzahl an Messpunkten abgelesen werden, die notwendig ist, um eine vorgegebene Genauigkeit zu erreichen. Soll beispielsweise die Ungenauigkeit kleiner als 1% sein, so ergibt sich eine Mindestanzahl für MPP-Strom und -Spannung von 81 Messpunkten. Für die MPP-Leistung errechnet sich laut Formel eine Mindestanzahl von 17 Punkten. Dieser gravierende Unterschied der Fehlerfunktion zwischen MPP-Strom bzw. -Spannung und MPP-Leistung liegt am flachen Verlauf der Leistungskurve im Bereich des MPP. Eine Variation um den wahren MPP wirkt sich nicht so stark aus, wie beim MPP-Strom und der MPP-Spannung.

Da das ISET-*mpp meter* die I/U-Kennlinien mit einer Anzahl von 256 Messpunkten erfasst, liegt der Fehler weit unter einem Prozent. Die Messpunkteanzahl ist nahezu unabhängig von der Bestrahlungsstärke. Erst bei sehr kleinen Bestrahlungsstärken von kleiner  $30 \text{ W/m}^2$  nimmt die Anzahl der Messpunkte linear ab. Das würde bedeuten, dass bei einer Bestrahlungsstärke von  $10 \text{ W/m}^2$  die I/U-Kennlinie noch aus 85 Messpunkten bestünde. Der Fehler des MPP-Stroms und der MPP-Spannung ist in diesem Fall noch kleiner als ein Prozent.



### 3.4 MESSDATEN DES ISET-MPP METERS

Messungen mit dem ISET-*mpp meter* durchgeführt am IWES zeigen, dass die Messtechnik die Erwartungen erfüllt. Eine I/U-Kennlinie eines PV-Moduls in CIS-Technologie und die berechnete P/U-Kennlinie zeigt die Abbildung 3.4.1. Abbildung 3.4.2 zeigt beispielhaft 861 im Minutentakt gemessene Kennlinien eines ausgewählten Tages. Hier wird deutlich, wie viele Kennlinien sich nur an einem Tag auf eine einfache Weise ansammeln.

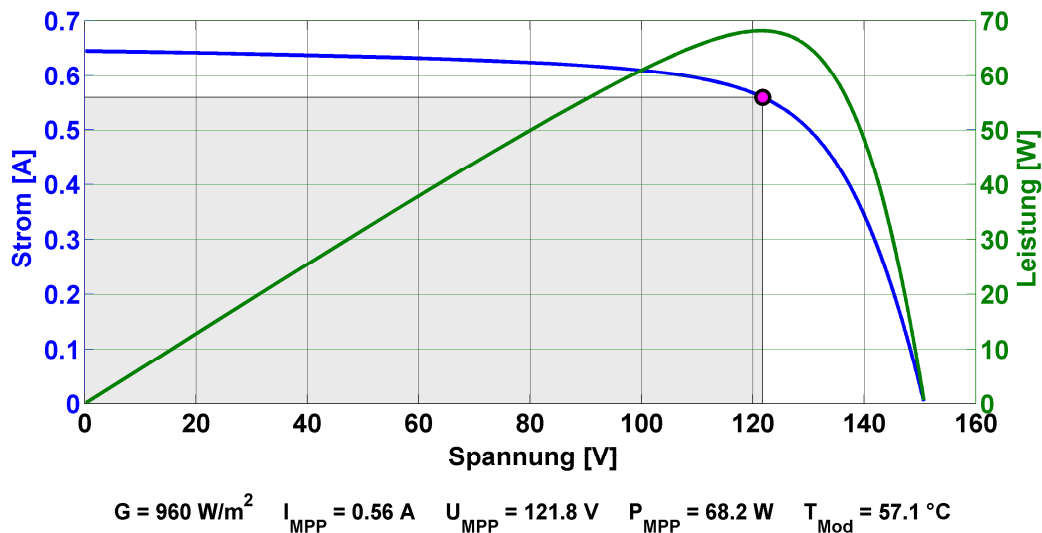


Abbildung 3.4.1: Exemplarisch gemessene I/U-Kennlinie  
gemessen mit dem ISET-*mpp meter*

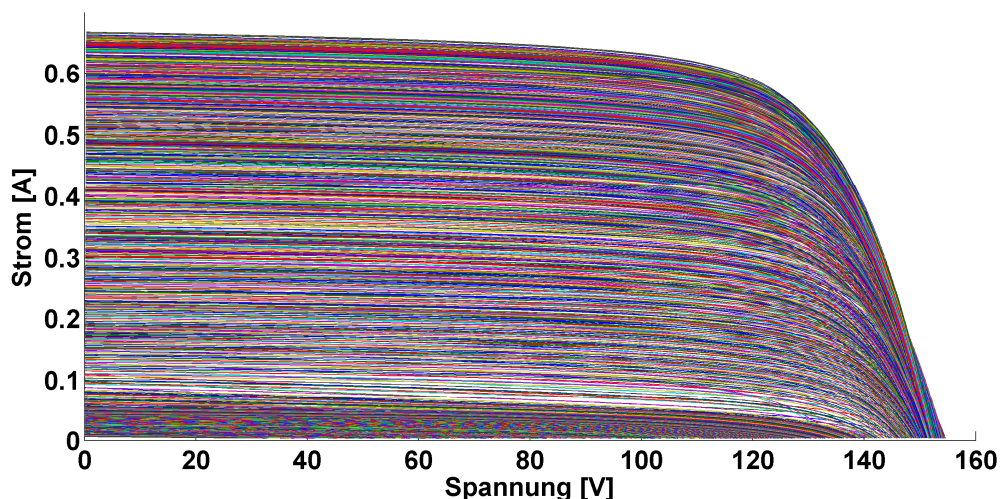


Abbildung 3.4.2: 861 im Minutentakt gemessene I/U-Kennlinien eines ganzen  
Tages gemessen mit dem ISET-*mpp meter* (05.08.2009,  $G_t > 10 \text{ W/m}^2$ )

Die Messkarten können für wissenschaftliche Zwecke verwendet werden. Speziell für Langzeitmessungen von PV-Modulen bietet diese Messtechnik neue Möglichkeiten der Performance-Tests und Zeitreihen-Analyse für wissenschaftliche als auch industrielle Anwendungen. Eine regelmäßige Aufnahme von PV-Kennlinien, die Messung und Berechnung der charakteristischen Eigenschaften von PV-Modulen bei gleichzeitiger Messung der Bestrahlungsstärke mit einem Sensor sowie der synchrone Betrieb mehrerer Karten in Kombination mit mehreren Modulen zur gleichen Zeit ist mit dieser Lösung möglich. Auf eine einfache Art und Weise können innerhalb einer Messkampagne riesige Datenmengen gesammelt und in einer Datenbank zur Weiterverarbeitung gespeichert werden. Statistische und mathematische Analysen dieser Messwerte helfen, genaue Modelle für PV-Module unter Berücksichtigung aller relevanten Umweltbedingungen zu erstellen.

Das ISET-*mpp meter* ist ein neuer Ansatz für die Messung von PV-Modulen. Erweiterungen für die verschiedenen Leistungsklassen sind verfügbar. Die Rückverfolgbarkeit der Kalibrierung auf nationale Standards und die Berechnung der Messunsicherheit nach GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) [ISO-08] werden durchgeführt. Die Messkarte ist eine Innovation für den Einsatz im Bereich der Forschung und Entwicklung.

## 4 I/U-KENNLINIEN SIMULATIONSMODELLE

In diesem Kapitel soll der momentane Stand der Forschung bezüglich I/U-Kennliniensimulation gezeigt werden. Die bekannten Modelle lassen sich in zwei übergeordnete Kategorien einteilen. Zum einen existieren Modelle, welche sich an die physikalischen Eigenschaften der realen PV-Zelle oder des realen Moduls anlehnen. Dies sind die sogenannten physikalischen Modelle. Zum anderen gibt es Modelle, welche rein mathematisch sind. Dies sind sogenannte numerische oder empirische Modelle. Es sei an dieser Stelle noch erwähnt, dass in dieser Arbeit ausschließlich die Vorwärtskennlinie, also die Kennlinie, die eine Zelle oder Modul im bestrahlten Zustand aufweist, betrachtet wird.

### 4.1 PHYSIKALISCHE SIMULATIONSMODELLE

Physikalische Simulationsmodelle sind Modelle, welche PV-Zellen und Module mathematisch/physikalisch beschreiben. Bei diesen Modellen ist stets ein Bezug zum realen Bauteil vorhanden. Eine Beschreibung durch die Mathematik mit anschließender physikalischer Deutung ist gewährleistet. Im Folgenden werden verschiedene physikalische Simulationsmodelle aus der Literatur beschrieben.

#### 4.1.1 EINDIODENMODELL

Die wohl am häufigsten verwendeten Simulationsmodelle sind die Diodenmodelle. In diesem Abschnitt soll das Eindiodenmodell beschrieben werden. Dieses Modell ist von den physikalischen Modellen das einfachste. Eine unbestrahlte PV-Zelle bzw. ein unbestrahltes PV-Modul ist nichts anderes als eine großflächige Diode. So ist es naheliegend, dieses elektrische Bauelement mittels der Diodengleichung nach Shockley zu beschreiben. Diese Gleichung beschreibt mit einer Exponentialfunktion die I/U-Kennlinie der Diode und hat die folgende Gestalt [Tie-99]:

$$I = I_s \cdot \left( e^{\frac{U}{mU_T}} - 1 \right) \quad (4.1.1)$$

$I_s$  ist der Sättigungsstrom in Sperrrichtung. Der Wert für  $I_s$  ist vom verwendeten Halbleitermaterial, der Fläche der Sperrschicht und der Temperatur abhängig.  $m$  ist der Emissionskoeffizient (im Zusammenhang mit der PV meist Diodenfaktor genannt) und  $U_T$  ist die sogenannte Temperaturspannung. Sie lässt sich formal mit

$$U_T = \frac{kT}{q} \quad (4.1.2)$$

beschreiben. Darin sind

$k$  Boltzmann-Konstante  $1,380658 \cdot 10^{-23} JK^{-1}$

$q$  Elementarladung  $1,60217733 \cdot 10^{-19} As$

$T$  Absolute Temperatur  $[K]$  .

Die Temperaturspannung hat bei einer Temperatur von  $25^\circ C$  einen Wert ca. 25 mV.

Wird eine PV-Zelle oder ein Modul einer Bestrahlung durch Licht ausgesetzt, so entsteht durch den photovoltaischen Effekt ein Photostrom  $I_{ph}$ . Dieser Strom kann theoretisch durch eine Stromquelle, welche der Diode parallel geschaltet wird, dargestellt werden (Abbildung 4.1.1). Dieser Photostrom ist in erster Linie von der Bestrahlungsstärke abhängig und errechnet sich durch

$$I_{ph} = c_0 \cdot G_t \quad (4.1.3)$$

mit

$c_0$  Koeffizient des Photostroms  $I_{ph} \left[ \frac{m^2}{V} \right]$

$G_t$  Bestrahlungsstärke auf Modulebene  $\left[ \frac{W}{m^2} \right]$

Diese Beschreibung der Zellen und Module nennt sich vereinfachtes Solarzellenmodell mit idealen Annahmen. Die Abbildung 4.1.1 zeigt das dazugehörige Ersatzschaltbild. [Qua-96]

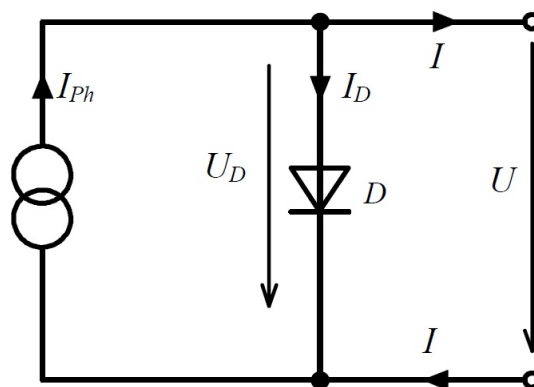


Abbildung 4.1.1: Vereinfachtes Ersatzschaltbild der bestrahlten Solarzelle [Qua-96]

Aus dem Ersatzschaltbild (Abbildung 4.1.1) ergibt sich die folgende Modellgleichung:

$$I = I_{ph} - I_S \cdot \left( e^{\frac{U}{m \cdot U_T}} - 1 \right). \quad (4.1.4)$$

Das vereinfachte Modell beschreibt allerdings die meisten PV-Zellen und Module nicht mit hinreichender Genauigkeit, da es ein idealisierter Ansatz ist. Um die Realität genauer beschreiben zu können, wird dieses Modell mit zwei Widerständen erweitert. Ein Widerstand  $R_p$  wird der Diode parallel geschaltet und beschreibt Verluste wie Rekombination und Leckströme. Ein weiterer Widerstand  $R_s$  beschreibt den Spannungsabfall, welcher sich beim Transport der Ladungsträger vom Halbleiter bis zu den externen Kontakten ergibt, also zum Beispiel ohmsche Verluste des Rückkontaktes und generell interne und externe Kontaktwiderstände. Die Abbildung 4.1.2 zeigt das Ersatzschaltbild dieses Modells. [Qua-96]

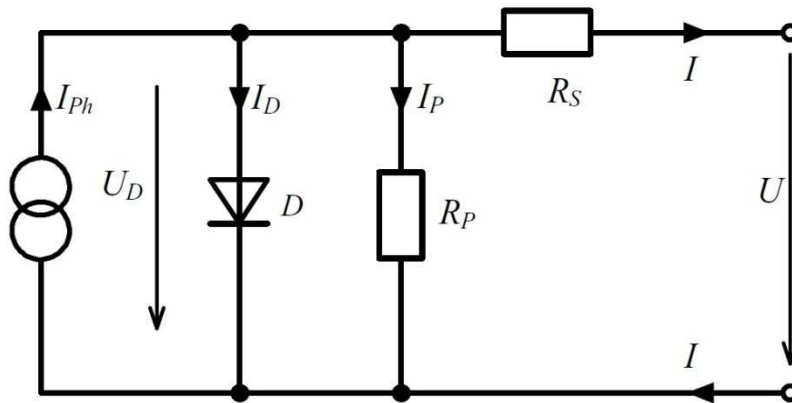


Abbildung 4.1.2: Erweitertes Ersatzschaltbild (Eindiodenmodell) der Solarzelle [Qua-96]

Durch die Anwendung der Kirchhoff'schen Gesetze ergibt sich die Modellgleichung

$$I = I_{ph} - I_S \cdot \left( e^{\frac{U + I \cdot R_s}{m \cdot U_T}} - 1 \right) - \frac{U + I \cdot R_s}{R_p}. \quad (4.1.5)$$

Das Eindiodenmodell hat vier Parameter ( $I_S, m, R_s, R_p$ ), welche so optimiert werden müssen, dass das Modell das gleiche elektrische Verhalten zeigt wie die reale PV-Zelle bzw. das reale PV-Modul. Die Parameterbestimmung stellt heut-

zutage mit den aktuellen Rechnerleistungen kein Problem mehr dar. Im Prinzip handelt es sich um ein mehrdimensionales nichtlineares Optimierungsproblem. Als Optimierungsalgorithmus kann das Levenberg-Marquardt-Verfahren zum Einsatz kommen. Der Levenberg-Marquardt-Algorithmus ist der erweiterte Gauß-Newton-Algorithmus, aber deutlich robuster als das Gauß-Newton-Verfahren. Zum Anpassen der Parameter werden ausgewählte gemessene Kennlinien verwendet. Die Parameter werden dann durch den Algorithmus solange variiert, bis der Unterschied der gemessenen und simulierten Kennlinien den kleinsten Wert erreicht hat. Sind die Parameter bestimmt, so muss zum Lösen der Modellgleichung ein numerisches Verfahren zur Anwendung kommen, da das Eindiodenmodell keine explizite Lösung besitzt. Das bedeutet, dass  $f(I, U) = 0$  sein muss. Hierzu kann die Newton'sche Iterationsvorschrift (4.1.6) verwendet werden [Qua-96].

$$I_{i+1} = I_i - \frac{f(I, U)}{\frac{\partial f(I, U)}{\partial I}} \quad (4.1.6)$$

Diese Iteration wird so oft ausgeführt, bis die Abbruchbedingung  $|I_i - I_{i+1}| < \varepsilon$  erfüllt ist. Dabei sind

- $I_i$  Berechneter Strom im Iterationsschritt  $i$  [A]
- $I_{i+1}$  Berechneter Strom im Iterationsschritt  $i + 1$  [A]
- $\varepsilon$  Untere Schranke der Abbruchbedingung der Iteration .

Für die Funktion  $f(I, U) = 0$  ergibt sich

$$\begin{aligned} f(I, U) &= I_{ph} - I_s \cdot \left( e^{\frac{U + I \cdot R_s}{m \cdot U_T}} - 1 \right) - \frac{U + I \cdot R_s}{R_p} - I \\ &= I_{ph} - I_s \cdot e^{\frac{U}{m \cdot U_T}} \cdot e^{\frac{I \cdot R_s}{m \cdot U_T}} + I_s - \frac{U}{R_p} - \frac{I \cdot R_s}{R_p} - I \stackrel{!}{=} 0 \end{aligned} \quad (4.1.7)$$

und für die Ableitung  $\frac{\partial f(I, U)}{\partial I}$

$$\frac{\partial f(I, U)}{\partial I} = -\frac{I_s \cdot R_s}{m \cdot U_T} \cdot e^{\frac{U + I \cdot R_s}{m \cdot U_T}} - \frac{R_s}{R_p} - 1 \quad (4.1.8)$$

### 4.1.2 ZWEIDIODENMODELL

Die mit dem Eindiodenmodell erreichbaren Ergebnisse sind für einige Simulationen nicht ausreichend. Um die Qualität der Ergebnisse zu erhöhen, kann das Zweidiodenmodell Verwendung finden. Bei diesem Modell wird der ersten Diode eine zweite parallel geschaltet. Diese Diode wird anders parametrisiert. Das Zweidiodenmodell hat somit sechs Parameter ( $c_{S_1}, c_{S_2}, m_1, m_2, R_S, R_P$ ), welche so optimiert werden müssen, dass das Modell das gleiche elektrische Verhalten zeigt wie die reale PV-Zelle bzw. das reale PV-Modul. Die Parametrisierung kann über das gleiche Verfahren wie in Kapitel 4.1.1 beschrieben zur Anwendung kommen. Die Abbildung 4.1.3 zeigt das Ersatzschaltbild des Modells.

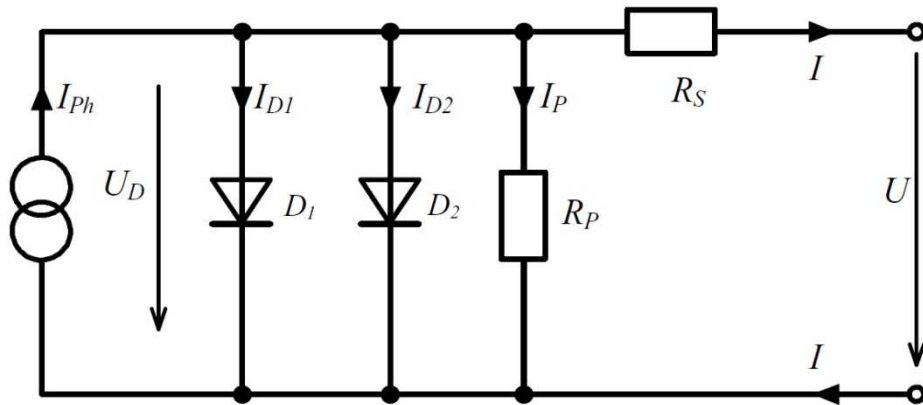


Abbildung 4.1.3: Zweidiodenmodell der Solarzelle [Qua-96]

In der Modellgleichung fügt sich ein zweiter Term der Diodengleichung nach Shockley ein. (4.1.9) zeigt die implizite Modellgleichung.

$$I = I_{ph} - I_{S_1} \cdot \left( e^{\frac{U+I \cdot R_S}{m_1 \cdot U_T}} - 1 \right) - I_{S_2} \cdot \left( e^{\frac{U+I \cdot R_S}{m_2 \cdot U_T}} - 1 \right) - \frac{U + I \cdot R_S}{R_P} \quad (4.1.9)$$

Die beiden Sättigungsströme  $I_{S_1}$  und  $I_{S_2}$  können bei variierender Temperatur nicht als konstant angenommen werden. Diese sind temperaturabhängig und können nach [Wolf-77] mit den folgenden Gleichungen beschrieben werden:

$$I_{S_1} = c_{S_1} \cdot T^3 \cdot e^{-\frac{E_g}{k \cdot T}} \quad (4.1.10)$$

$$I_{S_2} = c_{S_2} \cdot T^{\frac{5}{2}} \cdot e^{-\frac{E_g}{2 \cdot k \cdot T}} \quad (4.1.11)$$

mit

$$c_{S_1} \quad \text{Koeffizient des Sättigungsstroms } I_{S_1} \left[ \frac{A}{K^3} \right]$$

$$c_{S_2} \quad \text{Koeffizient des Sättigungsstroms } I_{S_2} \left[ \frac{A}{K^{5/2}} \right]$$

$$E_g \quad \text{Bandabstand [eV]}$$

Typische Werte für die Bandabstände verschiedener Materialien sind in der Tabelle 4.1.1 aufgelistet [Häb-07].

Halbleiter	Abkürzung	Bandabstand [eV]
Germanium	Ge	0,66
Kupfer-Indium-Diselenid	CIS	1,02
Kristallines Silizium	c-Si	1,12
Indium-Phosphid	InP	1,35
Gallium-Arsenid	GaAs	1,42
Cadmium-Tellurid	CdTe	1,46
Amorphes Silizium	a-Si	≈ 1,75
Cadmium-Sulfid	CdS	2,40

**Tabelle 4.1.1: Bandabstände einiger Halbleitermaterialien [Häb-07]**

Gelöst werden kann die Gleichung (4.1.9) wie im vorherigen Abschnitt mit

$$I_{i+1} = I_i - \frac{f(I, U)}{\frac{\partial f(I, U)}{\partial I}} \quad (4.1.6) \quad \text{und der Abbruchbedingung } |I_i - I_{i+1}| < \varepsilon.$$

Für die Funktion  $f(I, U) = 0$  ergibt sich

$$f(I, U) = I_{ph} - I_{S_1} \cdot \left( e^{\frac{U + I \cdot R_S}{m_1 U_T}} - 1 \right) - I_{S_2} \cdot \left( e^{\frac{U + I \cdot R_S}{m_2 U_T}} - 1 \right) - \frac{U + I \cdot R_S}{R_p} - I$$

$$= I_{ph} - I_{S_1} \cdot e^{\frac{U}{m_1 U_T}} \cdot e^{\frac{I \cdot R_S}{m_1 U_T}} + I_{S_1} - I_{S_2} \cdot e^{\frac{U}{m_2 U_T}} \cdot e^{\frac{I \cdot R_S}{m_2 U_T}} + I_{S_2} - \frac{U}{R_p} - \frac{I \cdot R_S}{R_p} - I \stackrel{!}{=} 0$$

(4.1.12)

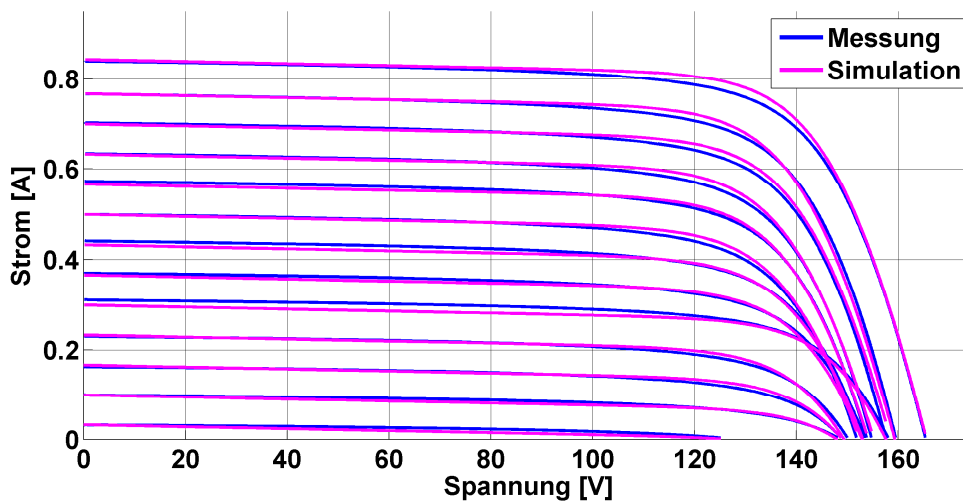
und für die Ableitung  $\frac{\partial f(I, U)}{\partial I}$



$$\begin{aligned}
\frac{\partial f(I, U)}{\partial I} &= -\frac{I_{S1} \cdot R_S}{m_1 \cdot U_T} \cdot e^{\frac{U}{m_1 U_T}} \cdot e^{\frac{I \cdot R_S}{m_1 U_T}} - \frac{I_{S2} \cdot R_S}{m_2 \cdot U_T} \cdot e^{\frac{U}{m_2 U_T}} \cdot e^{\frac{I \cdot R_S}{m_2 U_T}} - \frac{R_S}{R_P} - 1 \\
&= -\frac{R_S}{U_T} \cdot \left( \frac{I_{S1}}{m_1} \cdot e^{\frac{U+I \cdot R_S}{m_1 U_T}} + \frac{I_{S2}}{m_2} \cdot e^{\frac{U+I \cdot R_S}{m_2 U_T}} \right) - \frac{R_S}{R_P} - 1 .
\end{aligned} \tag{4.1.13}$$

In dieser Arbeit wurde das Zweidiodenmodell als Vergleichsmodell herangezogen. Zur Optimierung der Parameter und der Lösung der impliziten Gleichung (4.1.9) des Zweidiodenmodells wurden die numerischen Verfahren angewandt, welche in den Kapiteln 4.1.1 und 4.1.2 beschrieben sind.

Die Abbildung 4.1.4 zeigt Ergebnisse des Zweidiodenmodells an einigen exemplarisch ausgewählten gemessenen Kennlinien. Die Parameter des Zweidiodenmodells wurden nicht mit diesen ausgewählten Kennlinien bestimmt, um die Tauglichkeit des Modells zu zeigen.



**Abbildung 4.1.4: Simulation mit dem Zweidiodenmodell  
mit exemplarisch ausgewählten Kennlinien**

In der Tabelle 4.1.2 sind wichtige Daten zu den für die Simulation mit dem Zweidiodenmodell ausgewählten gemessenen Kennlinien aufgelistet.

Kennlinie	Datum	Uhrzeit	$G_t$ [W/m <sup>2</sup> ]	$T_{Mod}$ [°C]	$I_{MPP}$ [A]	$U_{MPP}$ [V]	$I_K$ [A]	$U_0$ [V]
1	24.09.2009	10:26	50	16,4	0,0216	88,9	0,033	125,1
2	04.09.2009	06:30	150	16,2	0,0750	115,6	0,0998	148,1
3	05.09.2009	12:26	250	29,7	0,1280	119,8	0,163	148,7
4	29.07.2009	15:16	350	37,4	0,1880	121,5	0,2304	150,0
5	19.11.2009	11:03	450	21,1	0,2625	129,1	0,3111	158,0
6	09.09.2009	11:08	550	39	0,3139	125,5	0,3706	153,5
7	26.09.2009	14:18	650	42,4	0,3764	125,6	0,4415	153,1
8	06.08.2009	09:02	750	47,2	0,4312	123,2	0,4998	151,8
9	26.08.2009	09:40	850	45,5	0,4973	124,8	0,5725	153,8
10	26.07.2009	10:22	950	45,3	0,5523	125,2	0,6345	154,7
11	30.07.2009	11:46	1051	39,1	0,6163	127,3	0,7028	157,5
12	28.07.2009	11:54	1152	39,1	0,6750	128,8	0,7668	159,5
13	20.07.2009	11:05	1266	24,1	0,7434	133,2	0,8401	165,3

**Tabelle 4.1.2: Einige wichtige Daten zu den für die Simulation mit dem Zweiodenmodell ausgewählten gemessenen Kennlinien**

Weitere Ergebnisse mit weiteren Technologien finden sich im Kapitel 8.3 (Anhang).

#### **4.1.3 MODIFIZIERTES EINDIODENMODELL FÜR CdTe-TECHNOLOGIEN [BEY-07], [BEY-08]**

Die im Kapitel 4.1.1 und 4.1.2 vorgestellten Simulationsmodelle liefern für Solarmodule auf Basis von CdTe-Solarzellen nur unzureichende Ergebnisse [Bey-07], [Bey-08]. Aus diesem Grund wurde ein Modell entwickelt, bei dem sich auch CdTe-Zellen und Module simulativ abbilden lassen. Dazu wurde das Eindiodenmodell um eine weitere in Serie geschaltete Diode erweitert. Diese in Reihe zum Serienwiderstand geschaltete Diode soll das nichtlineare Verhalten des Serienwiderstandes berücksichtigen. Ein solches Verhalten, welches durch die Eigenschaften des Rückkontaktes der Zellen hervorgerufen wird, wird zum Beispiel in [Sto-95], [McC-98], [Nie-97], [Got-03] diskutiert. In der Abbildung 4.1.5 ist das Ersatzschaltbild dargestellt.

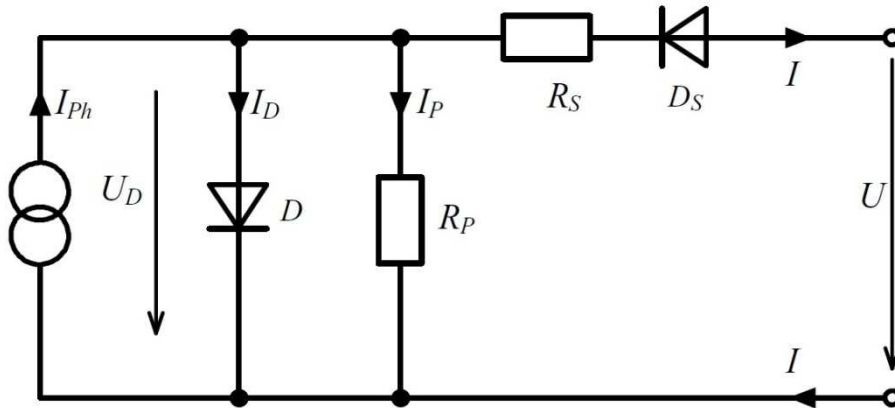


Abbildung 4.1.5: Ersatzschaltbild des erweiterten Eindiodenmodells für Solarmodule auf Basis von CdTe Solarzellen [Bey-07], [Bey-08]

Aus dem Ersatzschaltbild ergibt sich die folgende Modellgleichung

$$I = I_{ph} - C \cdot T^a \cdot e^{-\frac{E_g}{m \cdot k \cdot T}} \cdot \left( e^{\frac{U + I \cdot R_s + U_{D_s}}{m U_T}} - 1 \right) - \frac{U + I \cdot R_s + U_{D_s}}{R_p} \quad (4.1.14)$$

mit

$a, C$  Parameter

$U_{D_s}$  Diodenspannung an serieller Diode [V] .

Der Spannungsabfall an der seriellen Diode kann mit dem folgenden Zusammenhang beschrieben werden:

$$U_{D_s} = \frac{b_1 \cdot T}{q} \cdot \ln \left( \frac{I}{b_2 \cdot T^2 \cdot e^{\frac{b_3}{U_T}}} \right) \quad (4.1.15)$$

mit

$b_1, b_2, b_3$  Parameter.

Zur Überprüfung dieses Modells wurden in einem Labor gemessene Kennlinien von zwei unterschiedlichen Modulen verwendet. Die Bestrahlungsstärke lag im Bereich von  $200 \text{ W/m}^2$  bis  $1000 \text{ W/m}^2$  und die Modultemperaturen zwischen  $23^\circ\text{C}$  und  $65^\circ\text{C}$ . In dem in der angegebenen Literatur beschriebenen Modell

werden mit den Kennlinien die zur Parameteroptimierung benutzt wurden, die folgenden Ergebnisse erreicht:

Mittlerer quadratischer Fehler aller gemessenen Ströme:  $\sim 0,012$  A (der maximal gemessene Strom betrug bei  $800 \text{ W/m}^2$  und  $23^\circ\text{C}$ :  $0,56$  A). Die Werte der MPPs erreichen Genauigkeiten von  $\sim 1\%$  bei  $800 \text{ W/m}^2$  und  $\sim 4\%$  bei  $200 \text{ W/m}^2$ .

Für eine Kennlinie bei  $1000 \text{ W/m}^2$  und  $25^\circ\text{C}$  Modultemperatur, die nicht im Optimierungsparametersatz enthalten war, ergab sich ein Fehler von  $3\%$  des MPPs. Für zwei weitere Kennlinien ( $600 \text{ W/m}^2 / 60^\circ\text{C}$ ,  $400 \text{ W/m}^2 / 30^\circ\text{C}$ ) wurden keine konkreten Fehlerangaben gemacht.

Erkennbare Abweichungen der simulierten Kennlinien treten im Bereich der Leerlaufspannung auf.

#### 4.1.4 MODIFIZIERTES EINDIODENMODELL FÜR A-SI-TECHNOLOGIEN [BEY-02]

Solarzellen und Module aus amorphem Silizium zeigen gegenüber Zellen aus kristallinem Silizium unterschiedliches Verhalten. Dies betrifft auch die Strom/Spannungs-Charakteristik. Lassen sich Zellen und Module aus kristallinem Silizium mit dem Zweidiodenmodell hinreichend genau beschreiben, so liefern diese Modelle für a-Si Technologien keine zufriedenstellenden Ergebnisse. In diesem Abschnitt wird ein modifiziertes Eindiodenmodell vorgestellt, welches diese Technologie mathematisch nachbilden kann. Die Grundannahme beim Zweidiodenmodells ist die additive Überlagerung eines nur durch Einstrahlung und Temperatur bestimmten Photostroms mit der Diodencharakteristik des p-n-Übergangs der Zelle. Bei a-Si Zellen zeigt sich eine zusätzliche Abhängigkeit der Klemmenspannung. Dies ist bedingt durch die p-i-n-Struktur der Zellen. Zur Abbildung dieses Effekts wurde in diesem Modell ein zusätzlicher Verlustterm für den Photostrom vorgeschlagen. Dieser lehnt sich an die Arbeiten von [Hub-95] und [Mer-98] an. Dieser Verlustterm wird für die Kennliniennachbildung von a-Si PV-Zellen und Modulen in Verbindung mit dem Eindiodenmodell (4.1.5) verwendet. Der Photostrom wird im Eindiodenmodell durch die folgende Gleichung beschrieben.

$$I_{ph} = I'_{ph} \cdot \left( 1 - \frac{1}{\frac{\mu\tau}{d_i^2} \cdot (U_{fb} - (U + I \cdot R_s))} \right) \quad (4.1.16)$$

mit

$I'_{ph}$	Photostromparameter (einstrahlungs- und temperaturabhängig)
$U_{fb}$	Flatband-Spannung [V]
$\mu$	Ladungsträgermobilität
$\tau$	Ladungsträgerlebensdauer
$d_i$	Dicke der intrinsischen Schicht.

Der Bruch innerhalb der Klammer von (4.1.16) stellt die spannungsabhängigen Rekombinationen dar. Dieser ist von der Ladungsträgermobilität, Ladungsträgerlebensdauer und der Dicke der intrinsischen Schicht der Zelle abhängig. Der Photostromparameter wird beschrieben durch:

$$I'_{ph} = (C_0 + C_1 \cdot T) \cdot G_{eff} \quad (4.1.17)$$

mit

$C_0, C_1$  Parameter

$G_{eff}$  Effektive Bestrahlungsstärke  $\left[ \frac{W}{m^2} \right]$ .

Der Diodensättigungsstrom lässt sich mit der folgenden Gleichung berechnen:

$$I_s = c_s \cdot T^{\frac{5}{2}} \cdot e^{-\frac{E_g}{m \cdot k \cdot T}} \quad (4.1.18)$$

mit

$c_s$  Koeffizient des Sättigungsstroms  $I_s \left[ \frac{A}{K^{5/2}} \right]$ .

Die effektive Bestrahlungsstärke wurde in [Bey-02] durch ein Spektrometer ermittelt. Die Globalstrahlung lässt sich berechnen mit dem Integral über den gesamten Wellenlängenbereich des Sonnenspektrums. Für die effektive Bestrahlungsstärke wird das Integral nur über den Wellenlängenbereich von 300 nm bis 780 nm gebildet. Dieser Bereich bildet die Grenzwellenlänge des a-Si Materials. Da eine Spektrometermessung sehr aufwendig und teuer ist und zudem für nicht viele Standorte zur Verfügung steht, wird eine Vereinfachung zur Ermittlung der effektiven Bestrahlungsstärke in [Got-01] und [Bey-03] vorgeschlagen.

#### 4.1.5 MODIFIZIERTES ZWEIDIODENMODELL [ELI-09]

Das in dieser Veröffentlichung beschriebene modifizierte Zweiodenmodell ist in der Weise verändert, dass die sechs zu optimierenden Parameter  $c_{S_1}, c_{S_2}, m_1, m_2, R_S, R_P$  auf die zwei Parameter  $c_{S_1}, c_{S_2}$  reduziert werden. Des Weiteren sind für die Optimierung selbst nur sehr wenige I/U-Kennlinien nötig. Die Parameter  $m_1$  und  $m_2$  werden für alle Modellierungen konstant gehalten ( $m_1 = 1$ ,  $m_2 = 2$ ). Das Zweiodenmodell hat außer dem Photostrom keine Abhängigkeit der Einstrahlung. Das ist in diesem Modell anders. Der Diodensättigungsstrom  $I_{S_2}$  bekommt eine Abhängigkeit der Bestrahlungsstärke und wird somit zu  $I_{S_2}(G)$ .

Das beschriebene Modell reduziert zwar die zu optimierenden Parameter und auch die zum Optimieren notwendigen gemessenen I/U-Kennlinien. Verwendet werden kann das Modell in erster Linie allerdings, wie das nicht modifizierte Zweiodenmodell auch, nur für kristalline PV-Zellen und Module.

### 4.2 NUMERISCHE (EMPIRISCHE) SIMULATIONSMODELLE

Numerische bzw. empirische Simulationsmodelle sind Modelle, welche PV-Zellen und Module mathematisch beschreiben. Bei diesen Modellen ist kein physikalischer Bezug zum realen Bauteil vorhanden. Eine Beschreibung durch die Mathematik mit anschließender physikalischer Deutung ist nicht möglich, dennoch können diese Modelle gute bis sehr gute Ergebnisse liefern. Im Folgenden werden verschiedene numerische bzw. empirische Simulationsmodelle aus der Literatur beschrieben.

#### 4.2.1 EFFEKTIVE SOLARZELLENKENNLINIE [WAG-06]

Das Simulationsmodell nach [Wag-06] ist prinzipiell das Eindiodenmodell mit nur einem Widerstand, dem seriellen Widerstand  $R_S$ . Dieser darf, im Gegensatz zum physikalischen Modell, auch negative Werte annehmen. In der Realität können ohmsche Widerstände nicht negativ sein. Das in diesem Modell eingesetzte Bauteil wird daher durch ein fiktives photoelektrisches Bauelement dargestellt, dessen Typ nicht genau bezeichnet wird und dessen Kennlinie in erster Näherung der eines positiven oder negativen Widerstandes entspricht. Dieses Bauelement bekommt die Bezeichnung  $R_{PV}$  (Photovoltaik-Widerstand). Die Abbildung 4.2.1 zeigt das Ersatzschaltbild des Modells mit dem speziell gekennzeichneten Photovoltaik-Widerstand. Dieses Modell besitzt, wie auch die oben gezeigten Dio-

denmodelle, verschiedene Parameter, die bestimmt werden müssen. Im Gegensatz zu den in den Kapiteln 4.1.1 bis 4.1.5 gezeigten Modellen werden diese Parameter analytisch mit einfachen mathematischen Operationen ermittelt. Eine Optimierung der Parameter mit sehr aufwendigen numerischen Rechenverfahren ist nicht nötig. Der Autor benennt das Ergebnis mit diesem Modell „effektive Solarzellenkennlinie“. Dieser Begriff ist als Analogie des Effektivwertes in der Wechselstromtechnik zu verstehen. Dort können für Wechselspannungen und -ströme Effektivwerte berechnet werden, welche den Gleichspannungs- und Gleichstromwerten entsprechen. Eine einfache Leistungsberechnung ist damit möglich. Die Anforderungen an dieses Modell ist eine explizite analytische Lösung mit einer dennoch hohen Genauigkeit.

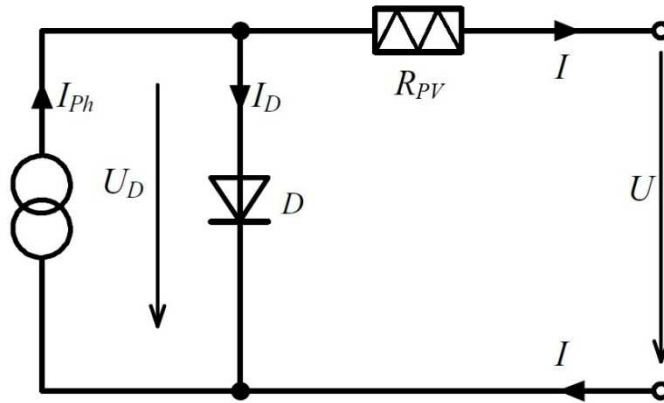


Abbildung 4.2.1: Ersatzschaltbild für die Effektive Solarzellen-Kennlinie [Wag-06]

Aus dem Ersatzschaltbild ergibt sich mittels der Kirchhoff'schen Gesetze die folgende Gleichung:

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left( e^{\frac{U + I \cdot R_{PV}}{U_T}} - 1 \right) \quad (4.2.1)$$

mit der expliziten Lösung:

$$U = U_T \cdot \ln \left( \frac{I_{ph} - I + I_0}{I_0} \right) - I \cdot R_{PV} . \quad (4.2.2)$$

Die vier Parameter  $I_0$ ,  $I_{ph}$ ,  $R_{PV}$  und  $U_T$  lassen sich mit vier bekannten Standardwerten für  $I_K$ ,  $I_{MPP}$ ,  $U_0$  und  $U_{MPP}$  eines Moduls eindeutig bestimmen. Für die einmalige Bestimmung der Parameter können zum Beispiel die STC Kenn-

werte aus dem Datenblatt verwendet werden. Eine Berechnung erfolgt über die Gleichungen (4.2.3) bis (4.2.6).

$$R_{PV} = -M \cdot \frac{I_K}{I_{MPP}} + \frac{U_{MPP}}{I_{MPP}} \cdot \left(1 - \frac{I_K}{I_{MPP}}\right) \quad (4.2.3)$$

$$U_T = -(M + R_{PV}) \cdot I_K \quad (4.2.4)$$

$$I_0 = I_K \cdot e^{-\frac{U_0}{U_T}} \quad (4.2.5)$$

$$I_{Ph} = I_K \quad (4.2.6)$$

Dabei ist  $M$  die Steigung der I/U-Kennlinie an der Stelle  $I = 0$  und lässt sich wie im Folgenden gezeigt wird berechnen

$$M = \frac{dU}{dI}(I = 0) . \quad (4.2.7)$$

Diese Differenzialgleichung 1. Grades kann mit einer Approximationsfunktion hinreichend genau gelöst werden, welche die folgende Form hat:

$$\begin{aligned} M &= f(I_K, U_0, I_{MPP}, U_{MPP}) \\ &= \frac{U_0}{I_K} \cdot \left( k_1 \cdot \frac{I_{MPP} \cdot U_{MPP}}{I_K \cdot U_0} + k_2 \cdot \frac{U_{MPP}}{U_0} + k_3 \cdot \frac{I_{MPP}}{I_K} + k_4 \right) . \end{aligned} \quad (4.2.8)$$

Diese Gleichung für die Steigung  $M$  ist allgemeingültig und hat die Konstanten

$$k_1 = -5,411 \quad , \quad k_2 = 6,450 \quad , \quad k_3 = 3,417 \quad , \quad k_4 = -4,422$$

Die Herleitung der Gleichung (4.2.8) und die Bestimmung ihrer Konstanten sind in [Wag-95] und [Wag-06] beschrieben.

#### 4.2.2 SIMULATIONSMODELL MITTELS LINEARER REGRESSION [SCHM-10]

In diesem Modell werden lineare Zusammenhänge zwischen I/U-Kennlinien, Bestrahlungsstärken und Temperaturen genutzt, um von einer Anzahl gemessener I/U-Kennlinien auf die Vorhersage weiterer zu schließen. Gegeben sind gemessene I/U-Kennlinien bei verschiedenen Umgebungsbedingungen, wie zum Beispiel Bestrahlungsstärke  $G$  und Zelltemperatur  $T_{Zelle}$



$$(G^{(1)}, T_{Zelle}^{(1)}), (G^{(2)}, T_{Zelle}^{(2)}), \dots, (G^{(N)}, T_{Zelle}^{(N)}) , \quad N \in \mathbb{N} \quad (4.2.9)$$

Ziel ist es nun, die I/U-Kennlinien für Umgebungsbedingungen  $(G^{(*)}, T_{Zelle}^{(*)})$  zu bestimmen, welche nicht gemessen wurden. Dazu wird eine lineare Regression separat für die verschiedenen I/U-Punkte der gemessenen I/U-Kennlinien durchgeführt. Die Ergebnisse dieser punktwisen Regression werden verwendet zur Abschätzung der gesamten I/U-Kennlinien im neuen Betriebszustand  $(G^{(*)}, T_{Zelle}^{(*)})$ . Hintergrund dieses Ansatzes ist, dass der Strom bei einer festen Spannung in den meisten Fällen einen fast linearen Zusammenhang zur Bestrahlungsstärke und Zelltemperatur zeigt. Dieses Verfahren ermöglicht somit eine direkte Bestimmung von den bekannten Umgebungsbedingungen zu den unbekannten. Diese Methode ist schnell in der Berechnung und verlangt keine numerischen Lösungen für implizite Gleichungen wie zum Beispiel beim Zweidiodenmodell.

#### 4.2.3 SIMULATION MITTELS EINES KÜNSTLICHEN NEURONALEN NETZES NACH [ZAR-08]

In dieser Arbeit wird die I/U-Kennliniennachbildung mittels eines künstlichen neuronalen Netzes (KNN) realisiert. Wie ein KNN funktioniert, welche verschiedenen Netztypen existieren und wie diese trainiert (optimiert) werden, wird im Kapitel 5 ausführlich beschrieben. Ein multilayer KNN kommt in dem Modell nach [Zar-08] zum Einsatz. Die Anzahl der Neuronen der Hidden-Layer ist  $2R+1$ , wobei  $R$  die Anzahl der Netzeingänge ist. Es wird ein überwachendes Lernen verwendet, das sogenannte „Backpropagation“.

Die Eingangsvariablen des KNN sind die PV-Zellen- bzw. Modulspannung  $U$ , die Bestrahlungsstärke auf geneigte Ebene  $G_t$  und die Modultemperatur  $T_{Mod}$ . Der durch das KNN bestimmte PV-Zellen- bzw. Modulstrom  $I$  ist die Ausgangsvariable. Die Abbildung 4.2.2 zeigt die prinzipielle Darstellung als Blockschaltbild. Das Netz beinhaltet sieben Neuronen ( $2R+1$ ) in dem Hidden-Layer und ein Neuron in dem Ausgangs-Layer. Der Modulstrom als Ausgangsvariable ist somit eine Funktion, welche von den Eingangsvariablen abhängt.

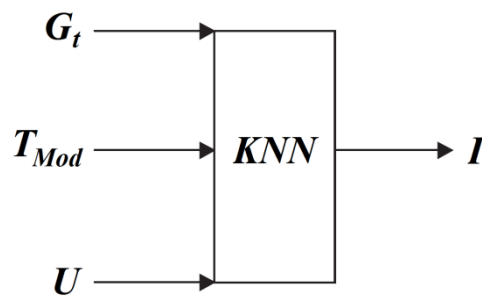


Abbildung 4.2.2: Prinzipielle Darstellung des künstlichen neuronalen Netzes [Zar-08]

$$f(G_t, T_{Mod}, U) \xrightarrow{KNN} I \quad (4.2.10)$$

Die nichtlineare Log-Sigmoide-Funktion wurde als Aktivitätsfunktion verwendet. Mit verschiedenen Trainingsdatensätzen, welche aus gemessenen I/U-Kennlinien bestehen, wird das KNN trainiert. Dabei wird die Fehlerfunktion zwischen Messdaten und Simulationsdaten minimiert. Die sogenannte "Lernrate" bestimmt sich mittels Gradientenverfahren und Konvergenzfaktor.

#### **4.2.4 SIMULATION MITTELS EINES KÜNSTLICHEN NEURONALEN NETZES NACH [AMO-00]**

Das im Kapitel 4.2.3 vorgestellte Simulationsmodell mittels eines KNN gehört zur Kategorie der sogenannten Multilayer-Perzeptron-Netze (MLP-Netze). Eine andere Möglichkeit ist die Verwendung von Radiale-Basisfunktionen-Netze (RBF-Netze). RBF-Netze gehören zu der Gruppe mehrschichtiger, vorwärtsgerichteter (feed-forward) KNN mit genau einer Schicht verdeckter Neuronen (Hidden-Layer). Die Aktivierungsfunktionen der Neuronen in der Hidden-Layer haben radialsymmetrische Basisfunktionen. Mathematisch gesehen bilden sie die Basis eines Funktionensystems zur Approximation von mehrdimensionalen Funktionen an Hand von Stützstellen. Es sind radialsymmetrische Funktionen mit genau einem Maximum und monoton abfallenden Flanken. Häufig verwendet man Gauß-funktionen als Basisfunktionen. Diese Zentrumsfunktionen interpolieren die Funktion an den Stützstellen. [Har-95], [Zell-03]

Mehr Informationen zu RBF-Netzen finden sich zum Beispiel in [Sche-97] oder [Zell-03].

Die Struktur des RBF-Netzes ist in der folgenden Abbildung 4.2.3 dargestellt:

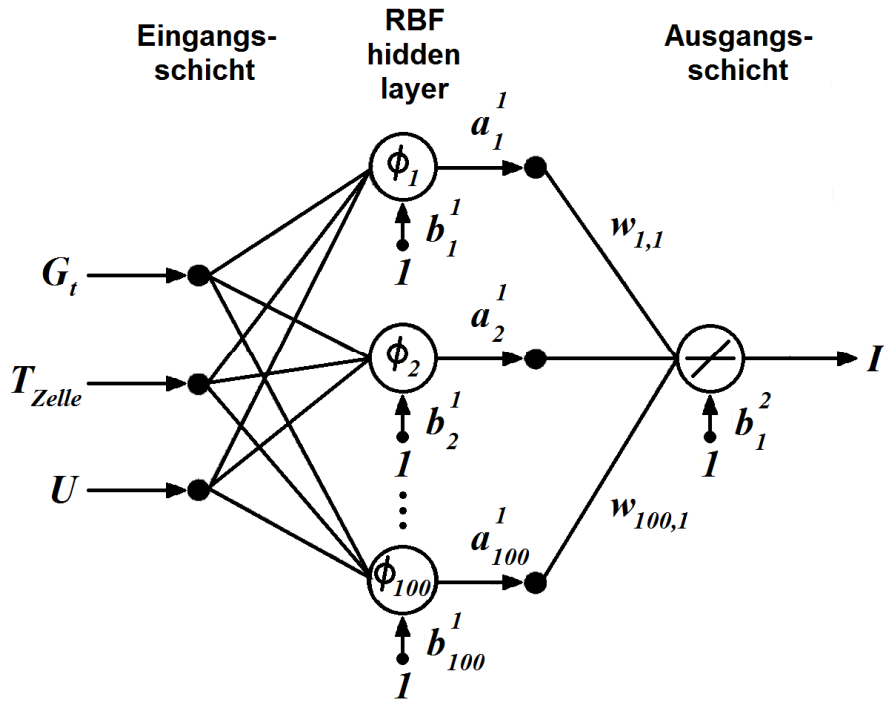


Abbildung 4.2.3: Struktur des RBF-Netzes [Amo-00]

Zunächst werden Ein- und Ausgangsvariablen definiert:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} G_t^i \\ T_{Zelle}^i \\ U^i \end{bmatrix}, \quad Y = I^i \quad (i = 1, 2, \dots, N). \quad (4.2.11)$$

Der Hidden-Layer besteht aus  $M$  ( $j = 1, 2, \dots, M$ ) RBF und wird als eine Matrix dargestellt

$$\Phi = \begin{bmatrix} \phi_1^1 & \phi_2^1 & \dots & \phi_M^1 \\ \phi_1^2 & \phi_2^2 & \dots & \phi_M^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_1^N & \phi_2^N & \dots & \phi_M^N \end{bmatrix} \quad (4.2.12)$$

und der Vektor mit den Gewichten

$$\mathbf{w} = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_M \end{bmatrix}. \quad (4.2.13)$$

Als Aktivierungsfunktionen  $\phi_j(X^N)$  kommen die Gauß'sche Glockenkurven zum Einsatz, mit der Form:

$$\phi_j(X^N) = e^{-\frac{\|X^N - C_j\|^2}{r^2}} \quad (4.2.14)$$

mit  $C_j$  ( $j = 1, 2, \dots, M$ ), ein Vektor welcher die gleiche Dimension wie  $\mathbf{X}$  hat. Dieser repräsentiert die Zentren der Radial Basis Funktionen  $\phi_j$ . Der Skalar  $r$  definiert die Weite oder den Radius einer RBF. Werden die obigen Definitionen zusammengefasst, ergibt sich die Gesamtfunktion:

$$y^n(X^N) = \sum_{j=1}^M w_j \phi_j(X^N) + b_j \quad (4.2.15)$$

#### 4.2.5 SIMULATION MITTELS DES EINDIODENMODELLS UND EINES KÜNSTLICHEN NEURONALEN NETZES NACH [KAR-07]

Eine weitere Möglichkeit, die Problematik mittels eines KNN zu lösen, wird in diesem Abschnitt gezeigt. Das hier vorgestellte Simulationsmodell verwendet ein modifiziertes Eindiodenmodell. Gegenüber dem Eindiodenmodell sind in diesem Modell die Parameter nicht konstant und werden mittels eines KNN bestimmt. Die folgende Abbildung zeigt die prinzipielle Struktur des Modells.

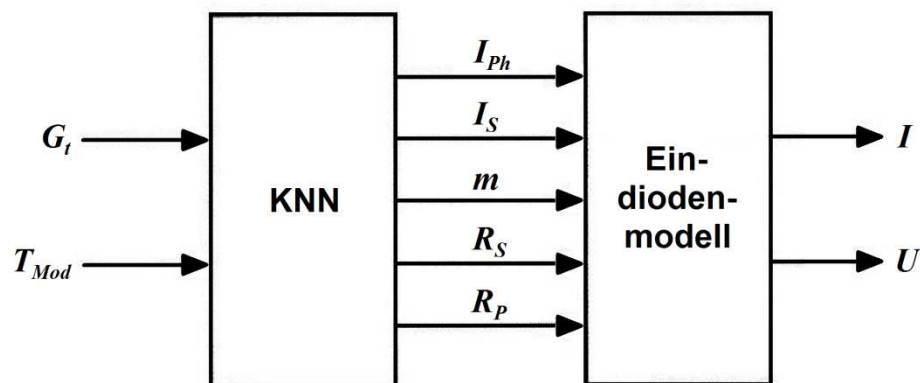


Abbildung 4.2.4: Prinzipielle Struktur des Modells [Kar-07]

Mit einer Anpassung der Parameter für verschiedene Betriebszustände ist es möglich, Kennlinien auch von nichtkristallinen PV-Zellen und Modulen nachzubilden. Die Struktur des KNN ist in der Abbildung 4.2.5 zu sehen.

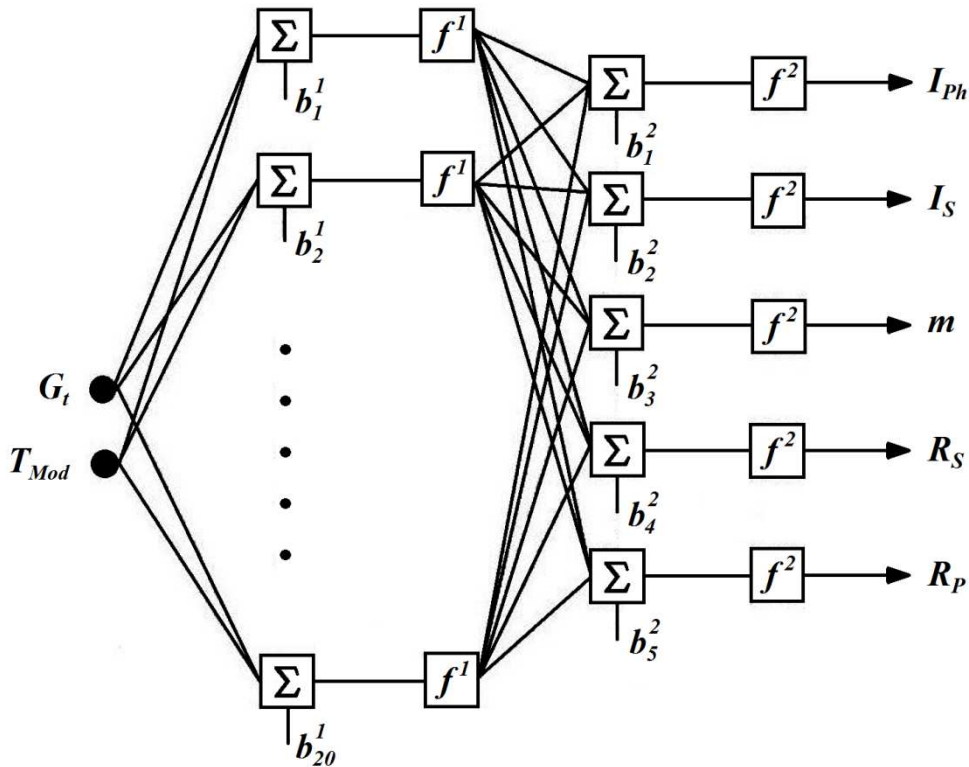


Abbildung 4.2.5: Architektur des künstlichen neuronalen Netzes (KNN) [Kar-07]

Zum Einsatz kommt ein Feed-Forward-KNN, welches einen Eingangs-Layer, einen Hidden-Layer und eine Ausgangs-Schicht besitzt. Der Eingangs-Layer hat zwei Neuronen, der Hidden-Layer 20 und der Ausgangs-Layer fünf.

### 4.3 WEITERE SIMULATIONSMODELLE

Die für diese Arbeit wichtigsten physikalischen und numerischen bzw. empirischen Simulationsmodelle wurden in den Kapiteln 4.1 und 4.2 beschrieben. An dieser Stelle sei noch auf weitere Modelle hingewiesen. Diese sind zum Beispiel [Abd-04], [Bal-05], [Gra-05], [Kar-06], [Mar-04], [Maz-06], [Mer-98], [Pat-10], [SNL-04], [Vil-09] und [Zha-05].

Außerdem sei an dieser Stelle noch auf [Schu-07] verwiesen. In dieser Arbeit wird ein analytisches Verfahren zur Berechnung der Parameter des Eindiodenmodells aus Datenblattangaben beschrieben. Soll eine Genauigkeit der Ergebnisse von wenigen Prozent erreicht werden, so ist dieses Verfahren laut der Autoren nicht verwendbar. Weitere Veröffentlichungen zur Bestimmung der Parameter der Diodenmodelle sind zum Beispiel [Che-06], [Hao-05] und [Kim-10].

Außer den Simulationsmodellen zur Simulation der kompletten I/U-Kennlinie existieren weitere, welche zum Beispiel nur die MPP-Charakteristik von bestimm-

---

ten Modulen beschreiben. Auf die Modelle in [Amo-00], [Bah-04], [Bey-04a] bzw. [Bey-04b], [Doll-09] und [Sya-09] sei an dieser Stelle hingewiesen.

## 5 NEUES MODELL FÜR I/U-KENNLINIEN

Im Kapitel 4 wurden verschiedene Simulationsmodelle für PV-Zellen und Module gezeigt. Dabei wurden die Modelle in zwei übergeordnete Kategorien eingeteilt. Zum Einen sind das die sogenannten physikalischen und zum Anderen die numerischen oder empirischen Modelle. Das in dieser Arbeit vorgestellte Simulationsmodell stützt sich auf den numerischen (empirischen) Ansatz. Hierzu wird in dem neu entwickelten Modell ein künstliches neuronales Netz (KNN) verwendet [Glo-10], ähnlich wie in den Kapiteln 4.2.3 bis 4.2.5. KNN sind in der Lage Funktionen zu approximieren, auch solche die hochgradig nichtlinear sind. Ein KNN besteht im Prinzip aus einer Vernetzung von Gewichtungsfaktoren und Übertragungsfunktionen. Dabei hat die Struktur des Netzes einen entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis. Die Gewichtungsfaktoren müssen, ähnlich wie zum Beispiel beim Zweidiodenmodell, optimiert werden. Man spricht dann vom Trainieren des KNN. Zum Trainieren existieren verschiedene Lernmethoden. Eine sehr effiziente Variante bietet dabei das sogenannte Backpropagation-Verfahren, welches in dem hier beschriebenen Modell angewandt wird. Als Optimierungs-Algorithmus kommt das Levenberg-Marquardt-Verfahren zum Einsatz. Mit ausgewählten Kennlinien, welche mit dem ISET-*mpp meter* gemessen wurden, wurde das KNN trainiert.

Der Vorteil dieses Modells ist, dass sich unabhängig der Technologie die Kennlinien jeder Zelle bzw. jedes Moduls sowohl von kristallinen als auch von dünn-schichtigen Technologien beschreiben lassen.

### 5.1 KÜNSTLICHE NEURONALE NETZE (KNN)

Zum Verständnis und zur Heranführung an die Struktur und Funktionsweise des neuen Modells, werden in diesem Abschnitt KNN beschrieben. Dazu werden einerseits die grundsätzliche Funktionsweise, andererseits aber auch verschiedene Modelle von KNN beschrieben. Damit ein KNN die gewünschten Eigenschaften aufweisen kann die ein Modell besitzen soll, muss es trainiert werden. Verschiedene Lernregeln werden dazu vorgestellt.

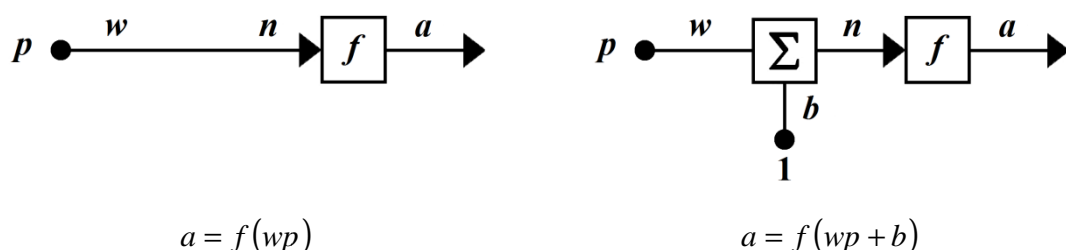
#### 5.1.1 GRUNDLAGEN KÜNSTLICHER NEURONALER NETZE

KNN bestehen aus mehreren künstlichen Neuronen, welche auch als Units, Einheiten oder Knoten bezeichnet werden. Zur Vereinfachung wird im weiteren Verlauf der Arbeit von Neuronen statt künstlichen Neuronen gesprochen. Neuronen dienen dazu, Informationen aufzunehmen, diese weiterzuleiten und schließlich

auszugeben. Die Informationen werden bei der Weitergabe in der Regel modifiziert. Drei verschiedene Arten von künstlichen Neuronen existieren: Input-Neuronen, Hidden-Neuronen und Output-Neuronen. Mehrere Neuronen, die logisch zueinander gehören, werden zu Schichten oder Layern zusammengefasst. Mehrere Input-Neuronen bilden den Input-Layer, mehrere Hidden-Neuronen den Hidden-Layer und mehrere Output-Neuronen den Output-Layer. In- und Output-Layer existieren nur einmal, Hidden-Layer dagegen können je nach Netzstruktur gar nicht, einmal oder auch mehrfach vorkommen. Ein Neuron besteht aus einem Gewichtungsfaktor und einer Aktivitätsfunktion (Übertragungsfunktion). Sind zwei Neuronen miteinander verbunden, so bestimmt der Gewichtungsfaktor die Stärke der Verbindung. Je größer der Betrag eines Gewichtes, desto größer ist der Einfluss eines Neurons auf ein anderes. Grundsätzlich können drei Fälle unterschieden werden:

- Positives Gewicht: Der Einfluss eines Neurons auf ein anderes ist exzitatorisch (erregend).
- Negatives Gewicht: Der Einfluss eines Neurons auf ein anderes ist inhibitorisch (hemmend).
- Gewicht ist gleich Null: Ein Neuron hat auf ein anderes keinen Einfluss.

Das „Wissen“ eines künstlichen neuronalen Netzes ist in den Gewichtungsfaktoren gespeichert. Erlernt wird das „Wissen“ durch Variation der Gewichtungsfaktoren. Zusätzlich kann bei Bedarf ein Bias (Schwellenwert) eingeführt werden. Dies kann nützlich sein, wenn eine gewisse Schwelle benötigt wird, bevor eine Information weitergeleitet wird. Die Abbildung 5.1.1 zeigt die beiden beschriebenen Neuronen und ihre mathematische Darstellung. [Rey-08], [Rey-10]

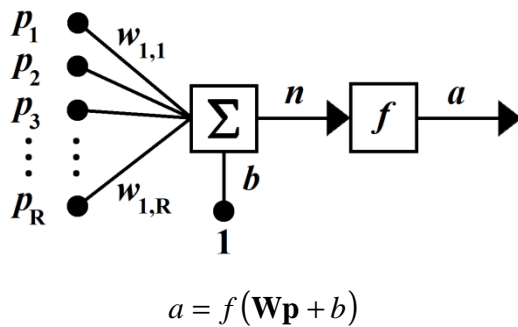


**Abbildung 5.1.1: Neuron ohne Bias (links) und mit Bias (rechts) [Mat-09]**

Die Aktivitätsfunktion  $f$  hat den Eingang  $n$  und den Ausgang  $a$ . Der Ausgang der Aktivitätsfunktion bildet auch gleichzeitig den Ausgang des Neurons und nennt sich Aktivitätslevel des sendenden Neurons. Beim Neuron ohne Bias wird der Eingang des Neurons  $p$  mit einem Gewichtungsfaktor  $w$  multipliziert. Bei



dem Neuron mit Bias bildet die Summe aus  $w p$  und  $b$  den Eingang der Aktivitätsfunktion.

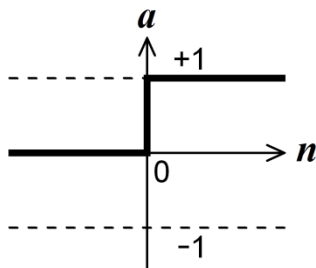


**Abbildung 5.1.2: Neuron mit BIAS und einem vektoriellen Eingang [Mat-09]**

In der Abbildung 5.1.1 sind die Neuronen mit nur einem Eingang dargestellt. Sie können aber auch vektorielle Eingänge besitzen, wie Abbildung 5.1.2 illustriert.  $\mathbf{W}$  ist dabei die Gewichtungsmatrix mit  $1 \times R$  Elementen und  $\mathbf{p}$  der Eingangsvektor mit  $R$  Elementen.

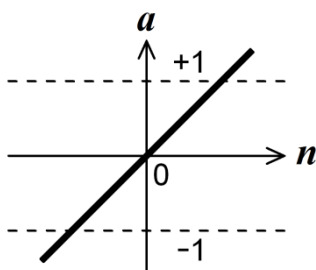
Es besteht die Möglichkeit, verschiedene Aktivitätsfunktionen einzusetzen. Sie bilden zusätzlich zu den Gewichtungsfaktoren den Zusammenhang zwischen Neuronen-Input und dem Aktivitätslevel eines Neurons.

Die Funktionen haben zweidimensionalen Charakter. Die Abszisse bildet den Input der Funktion und die Ordinate den Output bzw. den Aktivitätslevel. Die folgenden Aktivitätsfunktionen finden Verwendung [Rey-10]:



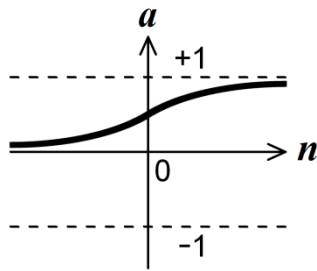
[Mat-09]

Binäre Schwellenfunktion: Bei dieser Funktion existieren nur zwei Zustände des Aktivitätslevels.

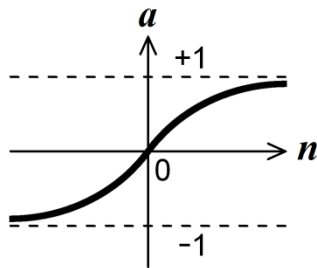


[Mat-09]

Lineare Aktivitätsfunktion: Der Zusammenhang zwischen Neuronen-Input und dem Aktivitätslevel ist linear.



(1) [Mat-09]



(2) [Mat-09]

Sigmoide Aktivitätsfunktionen: Diese beiden Funktionen sind die meistverwendeten in Modellen, die kognitive Prozesse simulieren. Sie sind im Prinzip mit der binären Schwellenfunktion vergleichbar, der Übergang ist allerdings stetig. Diese hat die Eigenschaft wie die Tangens-Hyperbolicus-Funktion. Die wesentlichen Vorteile sind die Begrenzung des Aktivitätslevels und die stetige Differenzierbarkeit. Letzteres ist notwendig für das später beschriebene Gradientenabstiegsverfahren.

Log-Sigmoide Aktivitätsfunktion (1)

Tan-Sigmoide Aktivitätsfunktion (2)

### 5.1.2 NETZARCHITEKTUR

Wie bereits beschrieben, können zwei oder mehrere Neuronen zu einem Layer (Schicht) zusammengefasst werden. Ein künstliches neuronales Netz wiederum, kann aus mehreren Layer bestehen. Die folgende Abbildung zeigt die Struktur und die mathematische Beschreibung eines KNN mit einem Layer. Dieser ist auch gleichzeitig der Output-Layer.

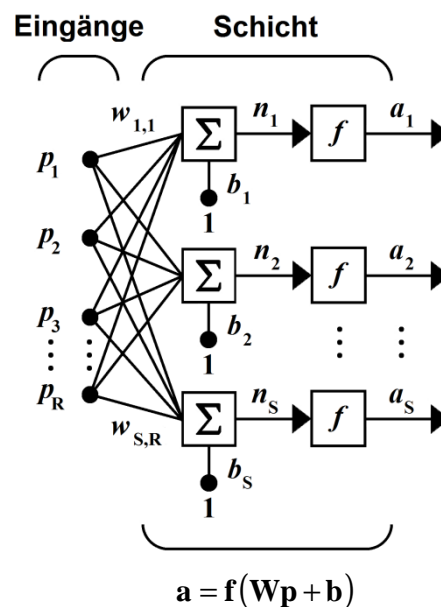


Abbildung 5.1.3: Architektur einer Schicht von Neuronen [Mat-09]

Mit:

$R$  Anzahl der Elemente des Eingangsvektors eines KNN

$S$ : Anzahl der Neuronen innerhalb einer Layer

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} w_{1,1} & w_{1,2} & \cdots & w_{1,R} \\ w_{2,1} & w_{2,2} & \cdots & w_{2,R} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ w_{S,1} & w_{S,2} & \cdots & w_{S,R} \end{bmatrix} \quad \text{Gewichtungsmatrix}$$

Die Abbildung 5.1.4 zeigt die Struktur und die mathematische Beschreibung eines KNN mit mehreren Layer (beispielhaft mit drei Schichten). Die Inputs und die erste Schicht von Neuronen repräsentieren den Input-Layer (Schicht 1). Die zweite Schicht ist der Hidden-Layer (Schicht 2). Die Schicht, welche die Netzausgänge bildet, nennt sich Output-Layer (Schicht 3). Die Gewichtungsmatrix, welche mit dem Eingangsvektor  $\mathbf{p}$  verbunden ist, wird als Input-Gewichtsmatrix bezeichnet und ist mit  $\mathbf{IW}^{1,1}$  gekennzeichnet. Der zweite Index bezieht sich auf eine Quelle (im konkreten Fall 1), der erste Index auf ein Ziel (im konkreten Fall ebenfalls 1). Elemente der 1. Schicht, also der Bias, Netzeingang und -ausgang haben eine hochgestellte 1, um die Zugehörigkeit zur 1. Schicht zu verdeutlichen. Die Matrix, welche mit dem Eingang verbunden ist, hat die Bezeichnung  $\mathbf{IW}$ , alle weiteren Matrizen der darauffolgenden Schichten (Hidden-Layer und Output-Layer) haben die Bezeichnung  $\mathbf{LW}$ .

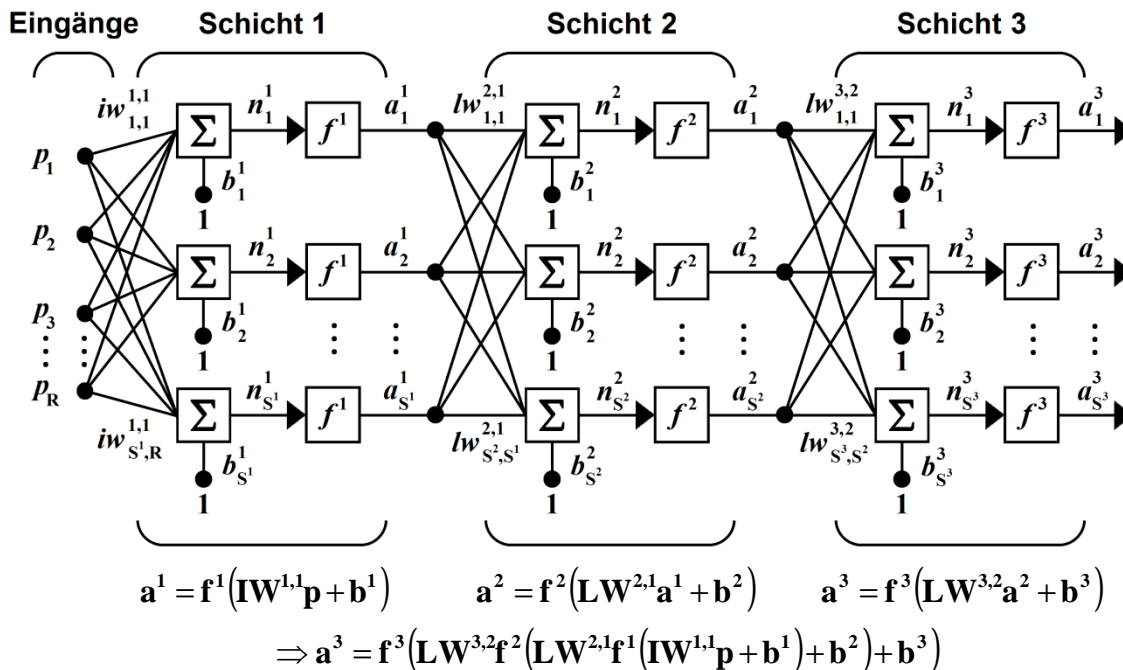


Abbildung 5.1.4: Architektur mehrerer Schichten von Neuronen  
(beispielhaft hier drei Schichten) [Mat-09]

### 5.1.3 TRAININGS- UND TESTPHASE

Damit das KNN die gewünschten Eigenschaften besitzen kann, muss es trainiert werden. Es muss sozusagen das „Wissen“ lernen. In der Trainingsphase wird dem Netz „Trainingsmaterial“ (in der Regel Messdaten) zur Verfügung gestellt. Die Gewichte des Netzes werden dann mit verschiedenen Lernregeln (siehe nächster Abschnitt) modifiziert. Diese Lernregeln lassen sich in der Regel in zwei Kategorien einordnen: überwachendes oder beaufsichtigtes Lernen (supervised learning) und nicht überwachendes oder unbeaufsichtigtes Lernen (unsupervised learning). Eine weitere Möglichkeit würde das bestärkende Lernen (reinforcement learning) [Zell-03] bieten, worauf in dieser Arbeit jedoch nicht eingegangen wird. Beim überwachenden Lernen wird ein korrekter Ausgangssatz dem Netz vorgegeben und daran werden die Gewichte optimiert. Beim nicht überwachenden Lernen werden keine Ausgangsdaten vorgegeben. In Abhängigkeit der Ähnlichkeit der Gewichte mit den Inputreizen werden die Gewichtsveränderungen vorgenommen. In dieser Arbeit wird zum Trainieren der später verwendeten KNN ein überwachendes Lernen verwendet.

In der Testphase wird das KNN auf korrekte Funktion geprüft. Es werden keine Gewichtsveränderungen mehr vorgenommen. Zum Testen werden dem Netz Eingangsdaten präsentiert und geprüft, ob die Ausgangsdaten die gewünschten Ergebnisse liefern. Im ersten Schritt werden dem KNN die auch zum Trainieren schon verwendeten Ein- und Ausgangsdaten präsentiert. Sind die Ergebnisse zufriedenstellend, so können im zweiten Schritt dem KNN Ein- und Ausgangsdaten präsentiert werden, welche dem Netz noch unbekannt sind. Sind diese Ergebnisse ebenfalls in Ordnung, findet eine Generalisierung auf neue Eingangsdaten statt. [Rey-08], [Rey-10]

### 5.1.4 LERNREGELN UND NETZTYPEN

In diesem Kapitel werden einige der wichtigsten Lernregeln und Netztypen vorgestellt. Regeln und Netze sind meistens aneinander gekoppelt, wodurch eine klare Trennung nicht immer möglich ist. Der Übergang von Regel und Netz „verschmiert“ somit. Damit die Gewichte in der Trainingsphase sinnvoll und effizient angepasst werden können, entwickelten sich die Regeln und Netze. Alle diese Regeln und Netze haben eines gemeinsam: Sie minimieren den Fehler durch Variation der Gewichte  $\mathbf{W} = w_{i,j}$  ( $i, j \in \mathbb{N}$ ) zwischen vorgegebenen Ausgangsgrößen (Messgrößen) und vom KNN berechneten Ausgangsgrößen. Die Minimierung erfolgt mittels eines Gradientenabstiegsverfahren, indem eine Änderung

aller Gewichte um einen Bruchteil des negativen Gradienten der Fehlerfunktion vorgenommen wird. [Zell-03]

$$\Delta \mathbf{W} = -\eta \nabla F(\mathbf{W}) . \quad (5.1.1)$$

Für ein einzelnes Argument gilt:

$$\Delta w_{i,j} = -\eta \frac{\partial}{\partial w_{i,j}} F(\mathbf{W}) \quad (5.1.2)$$

mit:

$-\nabla F(\mathbf{W})$	Gradient der Fehlerfunktion in Abhängigkeit der Gewichtungen
$\Delta \mathbf{W}$	Änderung der Gewichtsmatrix
$\eta$	Faktor (auch Lernfaktor oder Schrittweite genannt).

Als Fehlerfunktion wird oft der quadratische Abstand zwischen realer und erwarteter Ausgabe verwendet (MSE – Mean Squared Error). Der Gesamtfehler ergibt sich durch die Aufsummierung aller Einzelfehler der verwendeten Ausgangsmuster. [Zell-03]

$$F = \sum_{\psi} F_{\psi} \quad (5.1.3)$$

mit:

$$F_{\psi} = \frac{1}{2} \sum_j (a_{\psi,j,Mess} - a_{\psi,j})^2 \quad (5.1.4)$$

$a_{\psi,j}$	Ausgabe des Neurons $j$ bei Ausgangsmuster $\psi$
$a_{\psi,j,Mess}$	Lerneingabe (teaching input).

Der Faktor 0,5 wird eingeführt, damit sich dieser mit einem Faktor 2, welcher durch eine spätere Differentiation entsteht, wieder kürzt. Aus den Formeln (5.1.1) bis (5.1.4) lassen sich die Regeln zur Optimierung neuronaler Netze herleiten [Zell-03]. Im Folgenden werden drei wichtige Regeln vorgestellt und teilweise hergeleitet:

- Delta-Regel
- Backpropagation
- Competitive Learning

Die zweite dieser Regeln kommt auch in dieser Arbeit zum Einsatz.

### Delta-Regel [Zell-03]

Die Delta-Regel ist eine der einfachsten Regeln zum Trainieren von KNN. Aus ihr lässt sich die später beschriebene Backpropagation herleiten. Die Delta-Regel lässt sich in einstufigen Netzen mit linearen Aktivierungsfunktionen verwenden. Sie basiert auf den vorher vorgestellten Gleichungen des Gradientenabstiegsverfahrens. Aus der Gleichung (5.1.2) gilt:

$$\Delta w_{i,j} = -\eta \frac{\partial}{\partial w_{i,j}} F(\mathbf{W}) = \sum_{\psi} -\eta \frac{\partial}{\partial w_{i,j}} F_{\psi} . \quad (5.1.5)$$

Mit der Kettenregel folgt

$$\frac{\partial F_{\psi}}{\partial w_{i,j}} = \frac{\partial F_{\psi}}{\partial a_{\psi,j}} \cdot \frac{\partial a_{\psi,j}}{\partial w_{i,j}} . \quad (5.1.6)$$

Durch Einsetzen der Gleichung (5.1.4) folgt

$$\frac{\partial F_{\psi}}{\partial a_{\psi,j}} = -(a_{\psi,j, \text{Mess}} - a_{\psi,j}) = -\delta_{\psi,j} . \quad (5.1.7)$$

Da nur lineare Einheiten vorhanden sind, ist

$$\frac{\partial a_{\psi,j}}{\partial w_{i,j}} = \frac{\partial}{\partial w_{i,j}} \sum_i a_{\psi,i} w_{i,j} = a_{\psi,i} . \quad (5.1.8)$$

Mit (5.1.7) und (5.1.8) ergibt sich damit aus der Gleichung (5.1.6)

$$\frac{\partial F_{\psi}}{\partial w_{i,j}} = -a_{\psi,i} \delta_{\psi,j} . \quad (5.1.9)$$

Damit ergibt sich insgesamt als Modifikationsregel

$$\Delta w_{i,j} = \eta \sum_{\psi} a_{\psi,i} \delta_{\psi,j} . \quad (5.1.10)$$

In der dargestellten Form müssen alle Trainingsmuster  $\psi$  dem KNN präsentiert werden, um danach die Gewichte in einem Schritt zu ändern. Die Modifikationen der Gewichte werden sozusagen von einem Trainingsmuster zum nächsten aufsummiert, was durch die Summe in der Gleichung 5.1.10 beschrieben wird.

Neue Muster können dadurch nicht einfach nachtrainiert werden. Man spricht bei dieser Methode von einem sogenannten batch- oder offline-Trainingsverfahren. Zur praktischen Anwendung kommen stattdessen meist die online-Trainingsverfahren, bei denen die Änderung der Gewichte direkt nach Anlegen jedes einzelnen Musters erfolgt:

$$\Delta_{\psi} w_{i,j} = \eta a_{\psi,i} \delta_{\psi,j} = \eta a_{\psi,i} (a_{\psi,j, Mess} - a_{\psi,j}) \quad (5.1.11)$$

### Backpropagation [Zell-03]

Die Delta-Regel wurde für einstufige Netze mit linearer Aktivierungsfunktion hergeleitet. Diese Netze können nur lineare funktionale Zusammenhänge nachbilden. Weil es meistens gewünscht ist auch nichtlineare Zusammenhänge nachzubilden und oft einstufige Netze nicht ausreichen, sind Trainingsverfahren für mehrstufige Netze mit nichtlinearen Aktivierungsfunktionen notwendig. Eine der wichtigsten und meistverwendeten Regeln für solche KNN ist das Backpropagation-Verfahren. Dieses stellt eine Erweiterung der Delta-Regel dar und ist auch für mehrstufige Netze mit nichtlinearen Aktivierungsfunktionen verwendbar, wie zum Beispiel für Netzstrukturen, wie sie in Abbildung 5.1.4 zu sehen ist. Das Problem mehrstufiger Netze ist, dass es für die inneren Schichten (Hidden-Layer) nicht möglich ist, Messwerte als Lern-Input vorzugeben, welche real auch nicht existieren. Auch das Backpropagation basiert auf den vorher vorgestellten Gleichungen des Gradientenabstiegsverfahrens. Im Folgenden wird nach [Rum-86] eine Verallgemeinerung der Delta-Regel (Backpropagation) für

- Netze mit mehreren Ebenen und
- semilineare (d.h. monotone, differenzierbare, im allgemeinen jedoch nicht-lineare) Aktivierungsfunktionen

hergeleitet. Die Netzeingabe eines einzelnen Neurons  $j$  bei dem Muster  $\psi$  ist gegeben durch

$$net_{\psi,j} = \sum_i a_{\psi,i} w_{i,j} \quad (5.1.12)$$

Für ein Neuron  $j$  mit semilinearer Aktivierungsfunktion  $f_{Akt,j}$  gilt

$$a_j = f_{Akt}(net_{\psi,j}) \quad (5.1.13)$$

Analog zur Gleichung (5.1.5) ergibt sich mit der gleichen Definition des Fehlers diesmal

$$\Delta w_{i,j} = \sum_{\psi} -\eta \frac{\partial F_{\psi}}{\partial w_{i,j}} . \quad (5.1.14)$$

Auch hier erfolgt die Anwendung der Kettenregel

$$\frac{\partial F_{\psi}}{\partial w_{i,j}} = \frac{\partial F_{\psi}}{\partial net_{\psi,j}} \cdot \frac{\partial net_{\psi,j}}{\partial w_{i,j}} . \quad (5.1.15)$$

Aus der Gleichung (5.1.12) ergibt sich für den zweiten Faktor

$$\frac{\partial net_{\psi,j}}{\partial w_{i,j}} = \frac{\partial}{\partial w_{i,j}} \sum_i a_{\psi,i} w_{i,j} = a_{\psi,i} . \quad (5.1.16)$$

Der erste Faktor der Gleichung (5.1.6) wird als Fehlersignal definiert

$$\delta_{\psi,j} = -\frac{\partial F_{\psi}}{\partial net_{\psi,j}} \quad (5.1.17)$$

und die Gleichungen (5.1.16) und (5.1.17) werden in die Gleichung (5.1.15) eingesetzt, so erhält man für die Gleichung (5.1.14)

$$\Delta w_{i,j} = \eta \sum_{\psi} a_{\psi,i} \delta_{\psi,j} , \quad (5.1.18)$$

genau wie bei der Delta-Regel, jedoch sind hier die  $\delta_{\psi,j}$  komplizierter definiert:

$$\delta_{\psi,j} = -\frac{\partial F_{\psi}}{\partial net_{\psi,j}} = -\frac{\partial F_{\psi}}{\partial a_{\psi,j}} \cdot \frac{\partial a_{\psi,j}}{\partial net_{\psi,j}} . \quad (5.1.19)$$

Für den zweiten Faktor folgt aus der Gleichung (5.1.13)

$$\frac{\partial a_{\psi,j}}{\partial net_{\psi,j}} = \frac{\partial}{\partial net_{\psi,j}} f_{Akt}(net_{\psi,j}) = f'_{Akt}(net_{\psi,j}) , \quad (5.1.20)$$

d.h. die erste Ableitung der Aktivierungsfunktion  $f_{Akt,j}$  von Neuron  $j$ .

Aus der Gleichung (5.1.18) ergibt sich

$$\Delta_{\psi} w_{i,j} = \eta a_{\psi,i} \delta_{\psi,j} , \quad (5.1.21)$$



mit der gleichen Definition von  $\delta_{\psi,j}$ . Zu bestimmen ist nun noch der erste Faktor des Produkts in Gleichung (5.1.6), welcher in der Gleichung (5.1.17) als Fehler-signal definiert wurde. Für diesen lassen sich zwei Fälle unterscheiden:

1.  $j$  ist Index eines Ausgabeneurons,
2.  $j$  ist Index eines Neurons der verdeckten Ebenen (Hidden-Layer).

Im ersten Fall ergibt sich nach Definition der  $\delta_{\psi,j}$  für die Ableitung der  $F_{\psi}$

$$-\left(\frac{\partial F_{\psi}}{\partial a_{\psi,j}}\right) = (a_{\psi,j,Mess} - a_{\psi,j}) . \quad (5.1.22)$$

Im zweiten Fall kann die partielle Ableitung  $-\partial F_{\psi}/\partial a_{\psi,j}$  nur indirekt berechnet werden, indem die Kettenregel und die Gleichungen (5.1.12) und (5.1.17) zur Anwendung kommen:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial F_{\psi}}{\partial a_{\psi,j}} &= -\sum_k \frac{\partial F_{\psi}}{\partial net_{\psi,k}} \cdot \frac{\partial net_{\psi,k}}{\partial a_{\psi,j}} = \sum_k \left( \delta_{\psi,k} \cdot \frac{\partial}{\partial a_{\psi,j}} \sum_i a_{\psi,i} w_{i,k} \right) \\ &= \sum_k \delta_{\psi,k} w_{j,k} . \end{aligned} \quad (5.1.23)$$

Dies bedeutet, dass der Gesamtfehler des Neurons  $j$  für die Muster  $\psi$  in diesem Fall aus den gewichteten Fehlern  $\delta_{\psi,k}$  aller Nachfolgeneuronen  $k$  und der Gewichte der Verbindungen von  $j$  zu diesen  $k$  berechnet werden kann. Man beachte in der Gleichung (5.1.23) die Summation über alle Nachfolgeneuronen  $k$  von  $j$ , weil das Neuron  $j$  bei allen diesen Nachfolgeneuronen einen Fehler verursacht.

Insgesamt ergibt sich dann eingesetzt in die Gleichung (5.1.17) im ersten Fall ( $j$  ist ein Ausgabeneuron)

$$\delta_{\psi,j} = f'_{Akt}(net_{\psi,j}) \cdot (a_{\psi,j,Mess} - a_{\psi,j}) \quad (5.1.24)$$

und im zweiten Fall ( $j$  ist das verdeckte Neuron (Hidden-Layer))

$$\delta_{\psi,j} = f'_{Akt}(net_{\psi,j}) \cdot \sum_k \delta_{\psi,k} w_{j,k} . \quad (5.1.25)$$

Diese beiden Gleichungen ermöglichen eine rekursive Berechnung der  $\delta_{\psi,j}$  für alle Neuronen des feedforward-Netzwerks, ausgehend von den Ausgabeneuronen zurück bis zu den Eingangsneuronen.

Zusammengefasst ergibt sich folgende Backpropagation-Regel:

$$\Delta_{\psi} w_{i,j} = \eta a_{\psi,i} \delta_{\psi,j} \quad (5.1.26)$$

mit

$$\delta_{\psi,j} = \begin{cases} f'_{Akt}(net_{\psi,j}) \cdot (a_{\psi,j,Mess} - a_{\psi,j}) & \text{falls } j \text{ Ausgabezelle ist} \\ f'_{Akt}(net_{\psi,j}) \cdot \sum_k \delta_{\psi,k} w_{j,k} & \text{falls } j \text{ verdeckte Zelle ist} \end{cases} \quad (5.1.27)$$

### Competitive Learning [Rey-08], [Rey-10]

Diese Lernregel soll nur kurz beschrieben werden und wird aus diesem Grund nicht hergeleitet. Im Gegensatz zu der Backpropagation kommt das kompetitive Lernen ohne Vorgabe von konkreten externen Reizen aus. Damit reiht es sich in die Regeln des unbeaufsichtigten Lernens ein. Das neuronale Netz nimmt anhand der Ähnlichkeit der präsentierten Input-Reize eine Kategorisierung vor. Drei verschiedene Phasen des Lernens werden unterschieden:

1. Erregung (excitation): Zunächst wird für alle Output-Units der Netinput bestimmt.
2. Wettbewerb (competition): Anschließend werden die Netz-Inputs sämtlicher Output-Units miteinander verglichen. Diejenige Unit mit dem höchsten Netz-Input ist der Gewinner.
3. Adjustierung der Gewichte (weight adjustment): Im letzten Schritt werden die Gewichte verändert und zwar bei allen Verbindungen, die zur Gewinner-Unit führen. Alle anderen Gewichte werden nicht verändert. Die Gewichte zum Gewinner werden so modifiziert, dass sie dem Input ähnlicher werden.

Außer den bisher beschriebenen Lernregeln und Netztypen gibt es eine Anzahl weitere, die in dieser Arbeit nicht explizit beschrieben werden, da sie für diese Arbeit bisher nicht benötigt wurden. Ausnahme von den im Folgenden aufgelisteten Lernregeln und Netztypen bildet dabei die Radiale-Basisfunktionen-Netze (RBF-Netze), welche im Kapitel 4.2.4 beschrieben wurden. Für die anderen finden sich Beschreibungen zum Beispiel in [Rey-08], [Rey-10], [Sche-97] und

[Zell-03]. Weitere mögliche Lernregeln bzw. Netztypen sind im Folgenden aufgelistet:

- Pattern Associator
- Rekurrente Netze bzw. Simple Recurrent Networks (SRNs)
- Kompetitive Netze
- Kohonen-Netze bzw. Selforganizing Maps (SOM's)
- Adaptive-Resonanz-Theorie-Netze (ART-Netze)
- Hopfield-Netze
- Boltzmann-Maschine
- Cascade-Correlation-Netze
- Counterpropagation
- Probabilistische Neuronale Netze
- Radiale-Basisfunktionen-Netze (RBF-Netze), eine kurze Beschreibung dieser Netze findet sich im Kapitel 4.2.4

Dieser Überblick über Lernregeln und Netztypen kann als Einleitung für das folgende Kapitel gesehen werden. In diesem wird eine dieser Lernregeln bzw. Netztypen, die Backpropagation, zur Simulation von I/U-Kennlinien photovoltaischer Bauelement verwendet.

## 5.2 VERSCHIEDENE ANSÄTZE DER SIMULATION MIT KNN

Die Ergebnisse eines neuronalen Netzes sind entscheidend davon abhängig, wie seine Struktur gewählt wird. Dabei spielt nicht nur die Anzahl der Neuronen und Layer eine Rolle, sondern auch der Einsatzbereich des Netzes. Auch ist die Frage wichtig, ob die Problemstellung ein einziges Netz lösen kann oder mehrere Netze Verwendung finden. In diesem Kapitel werden einige Varianten vorgestellt und bewertet. Grundsätzlich werden als Eingangsgrößen die Bestrahlungsstärke  $G_i$  und die Modultemperatur  $T_{Mod}$  gewählt. Die Zelltemperatur  $T_{Zelle}$  wäre ebenfalls geeignet, wird in dieser Arbeit aber nicht verwendet. Bei allen durchgeführten Messungen an den Modulen wurde die Modultemperatur ermittelt. Die zur Simulation verwendeten Modulmessdaten stammen von einem CIS-Modul mit einer Leistung von 80 Wp. Um den Einfluss der Messungenauigkeit von Bestrahlungsstärkesensoren auf die Simulation zu vermeiden, wurde die Bestrahlungsstärke mit der sogenannten Self-Referencing-Methode ermittelt. Dabei fungiert das verwendete CIS-Modul als Sensor. Der gemessene Kurzschlussstrom wird temperaturkompensiert und verhält sich damit proportional zur Bestrahlungsstärke. Dieser Wert wird in Bezug zum STC-Kurzschlussstrom gestellt und

mit  $1000 \text{ W/m}^2$  multipliziert. Ein Solarzellensensor funktioniert auf die gleiche Weise. Ein zusätzlicher Vorteil ist, dass bei dieser Methode kein spektraler Mismatch zwischen Sensor und Modul besteht. Weitere Eingangsgrößen zu  $G_t$  und  $T_{Mod}$  des KNN sind denkbar, werden später auch diskutiert, aber nicht simuliert. Ausgangsgrößen und gleichzeitig die Werte zum Trainieren des Netzes sind immer der Zell- bzw. Modulstrom und bei einigen Varianten die Zell- bzw. Modulspannung. Die Grundidee der verschiedenen Varianten geht dabei immer davon aus, die Kennlinie in einer Anzahl von Strom-/Spannungswertepaaren darzustellen. Die Zwischenwerte dieser simulierten I/U-Punkte auf der Kennlinie können dann mittels verschiedener Interpolationsverfahren berechnet werden. Alle Simulationen wurden mit der Software Matlab und der darin enthaltenen Neural Network Toolbox durchgeführt.

Der Vorteil des in dieser Arbeit entwickelten neuronalen Netzes zur Simulation von I/U-Kennlinien für PV-Zellen und Module zu den im Kapitel 4.2 gezeigten Varianten ist die Verwendung weniger einfacher KNN, die zu einem KNN-System zusammengefasst werden (siehe Kapitel 5.2.5). Die einzelnen KNN lassen sich durch ihre Einfachheit ohne großen Aufwand sehr leicht trainieren und in der Praxis einsetzen. Die Verwendung mehrerer KNN hat zudem den Vorteil, dass sehr gute Ergebnisse mit geringem Aufwand erzielt werden.

### 5.2.1 KENNLINIENBESTIMMUNG MIT EINEM KNN

In der ersten hier vorgestellten Variante wird die vom Verständnis her einfachste Variante zur Lösung des Problems verwendet. In dieser soll ein einziges Netz die Ergebnisse liefern. Als Eingangsgrößen hat das Netz  $G_{t,i}$  (Bestrahlungsstärke auf Modulebene zum Zeitpunkt  $i$ ) und  $T_{Mod,i}$  (Modultemperatur zum Zeitpunkt  $i$ ). Das Netz hat des Weiteren jeweils 256 Ausgangsgrößen für Strom und Spannung. Gemessene I/U-Kennlinien und die dazugehörigen Werte für Bestrahlungsstärke und Modultemperatur werden dem Netz zum Trainieren vorgegeben. Ist das Netz trainiert, gibt es zu einem Eingangstupel die komplette I/U-Kennlinie mit jeweils 256 Werten für  $I$  und  $U$  aus. Da 256 Werte eine gute Auflösung der Kennlinie ermöglichen, können Zwischenwerte zum Beispiel mittels einer punktwisen linearen Interpolation berechnet werden. Lineare Interpolationen zeichnen sich durch ihre Einfachheit aus. Die Struktur des KNN in der Trainingsphase und Simulationsphase zeigen die beiden folgenden Abbildungen.

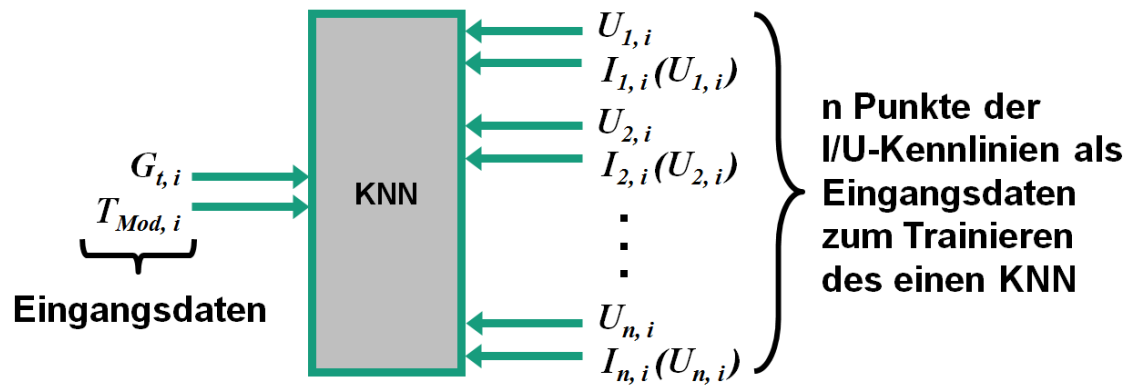


Abbildung 5.2.1: Struktur des KNN mit jeweils 256 Ausgängen für Ströme und Spannungen in der Trainingsphase

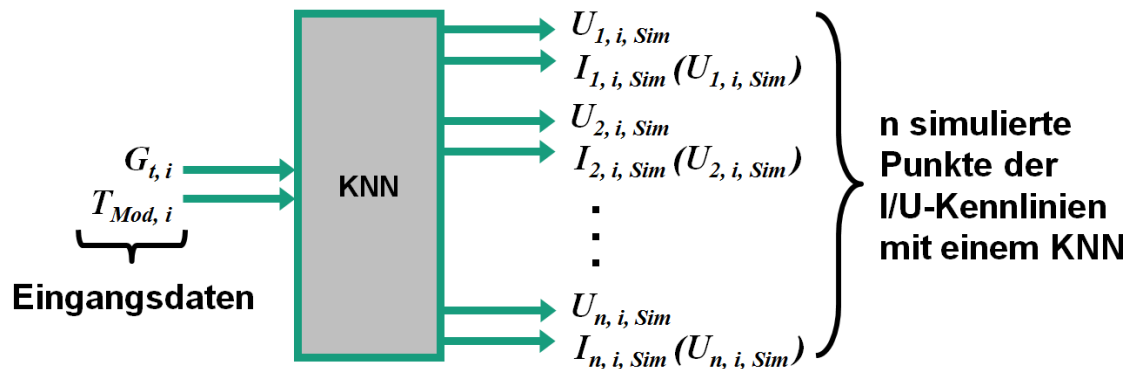


Abbildung 5.2.2: Struktur des KNN mit jeweils 256 Ausgängen für Ströme und Spannungen in der Simulationsphase

Mit:

- $i$  Zeitpunkt der Messung
- $n$  Anzahl der Messpunkte der I/U-Kennlinie.

Diese Netzstruktur zeigt beim Trainieren gewisse Nachteile. Je nachdem wie viele Neuronen in den Hidden-Layern und wie viele Hidden-Layer selbst verwendet werden, kann das Netz sehr komplex werden. Die große Anzahl an Gewichten führt zu Optimierungsproblemen. Diese Anzahl der Neuronen in einem Hidden-Layer bestimmt die Dimension der zu trainierenden bzw. optimierenden Fehlerfunktion. Da sich die zu optimierenden Gewichte zwischen Hidden-Layer und Ausgangsschicht durch Multiplikation der Anzahl Neuronen in den beiden Layern ergeben, kann die Anzahl stark anwachsen. Die Ausgangsschicht hat entsprechend der Ausgänge 512 Neuronen. In dem Hidden-Layer wurden 100 Neuronen eingebaut, so ergibt sich eine Gesamtanzahl von  $512 \cdot 100 = 51200$

Gewichten. Das bedeutet, die Fehlerfunktion hat eine Dimension von 51200 plus zusätzlich 612 Werte für die Bias. Ein Finden des Minimums dieser Funktion ist ausgeschlossen. Auch sehr gute Optimierungsalgorithmen haben bei dieser Anzahl an Dimension keine Chance. Der Versuch das Netz zu trainieren scheiterte.

### 5.2.2 KENNLINIENBESTIMMUNG MIT EINEM KNN UND SPANNUNGSKATEGORIEN

In der zweiten Variante des Simulationsmodells wird das KNN aus dem vorherigen Kapitel etwas modifiziert. Nun werden nicht Spannung und Strom berechnet, sondern nur der Strom. Dazu müssen die Messdaten vor Verwendung aufbereitet werden. Zunächst werden durch eine lineare Interpolation die einzelnen Punkte der gemessenen Strom-/Spannungskennlinien verbunden. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit die Ströme definierten Spannungskategorien zuzuordnen. Die Anzahl der Kategorien lehnt sich dabei an die Messpunkteanzahl des ISET-*mpp meter* mit 256 an. Die Anzahl von 256 ist nicht zwingend, dennoch ist diese Anzahl sinnvoll, da die Messkarte diese Anzahl an Punkten über einen weiten Einstrahlungsbereich nicht verändert und damit die Auflösung der Kennlinie an Messpunkten erreicht ist. Erst bei sehr kleinen Bestrahlungsstärken von kleiner  $30 \text{ W/m}^2$  nimmt die Anzahl der Messpunkte linear ab. Würden weniger Spannungskategorien als 256 gewählt werden, würde dies eine Verschlechterung der Auflösung darstellen. Damit die Aufteilung der Spannungskategorien erfolgen kann, muss die Maximalspannung des PV-Moduls ermittelt werden. Dies kann sowohl messtechnisch geschehen, als auch vom Datenblatt entnommen werden. In der Regel ist allerdings im Datenblatt die Leerlaufspannung unter STC aufgeführt, weshalb diese erhöht werden sollte. Da die Modulspannung im hohen Strahlungsbereich quasi unabhängig von der Bestrahlungsstärke ist und nur noch von der Temperatur beeinflusst wird, richtet sich die Spannungserhöhung in erster Linie nach der Temperatur und dem Temperaturkoeffizient des Moduls. Bei abnehmender Temperatur steigt die Modulspannung in Abhängigkeit des Temperaturkoeffizienten an. Ist der Betrag des Koeffizienten groß, muss die Beaufschlagung ebenfalls etwas größer ausfallen. Aus Sicherheitsgründen sollte die Leerlaufspannung bei einer Einstrahlung von  $1000 \text{ W/m}^2$  und einer Modultemperatur von  $-10^\circ\text{C}$  berechnet werden. Da dies eine  $G_t, T_{Mod}$  Konstellation sehr unwahrscheinlich ist, kann davon ausgegangen werden, dass diese Spannung der höchste anzunehmende Wert ist. Diese ermittelte maximale Spannung wird sodann in 256 gleich große Teile aufgeteilt. Jede gemessene I/U-Kennlinie wird nun so umgerechnet, dass der entsprechende Strom der Spannungskategorie zugeordnet wird.

Die beiden Abbildungen 5.2.3 und 5.2.4 zeigen die Struktur des Netzes. Demnach hat es wieder die zwei Eingänge  $G_{t,i}$  (Bestrahlungsstärke auf Modulebene zum Zeitpunkt  $i$ ) und  $T_{Mod,i}$  (Zelltemperatur zum Zeitpunkt  $i$ ). Ausgänge für den Strom besitzt das Netz entsprechend der Spannungskategorien 256 Stück. Zur ersten Variante bedeutet diese eine Reduzierung der Ausgänge um die Hälfte. Jeder einzelne Ausgang gibt zu einem Eingangstupel einen Strom aus. Dieser gehört zu der definierten Spannung, welche für jeden einzelnen Ausgang konstant ist. Der dabei auftretende Fehler durch Variation des Stroms bei gleichbleibender Spannung wird zunächst in Kauf genommen. Dieser liegt im Größenbereich von

$$I_{Fehler} \leq \pm \frac{I_{\max}}{2 \cdot 256} \quad \text{bzw.} \quad I_{Fehler,\%} \leq \pm 0,195\% \quad (5.2.1)$$

und wird vernachlässigt. Die Zwischenwerte von Strom und Spannung der simulierten Kennlinien kann wieder mittels einer linearen Interpolation erfolgen. Die beiden folgenden Abbildungen zeigen die Struktur des Netzes. Die erste zeigt das Netz in der Trainingsphase, die zweite in der Simulationsphase.

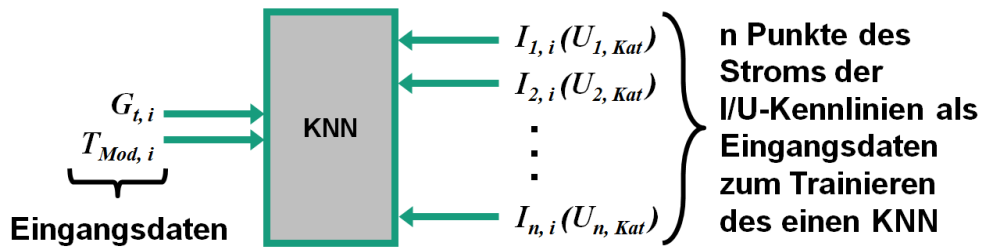


Abbildung 5.2.3: Struktur des KNN mit 256 Ausgängen für die Ströme, aufgeteilt in Spannungskategorien in der Trainingsphase

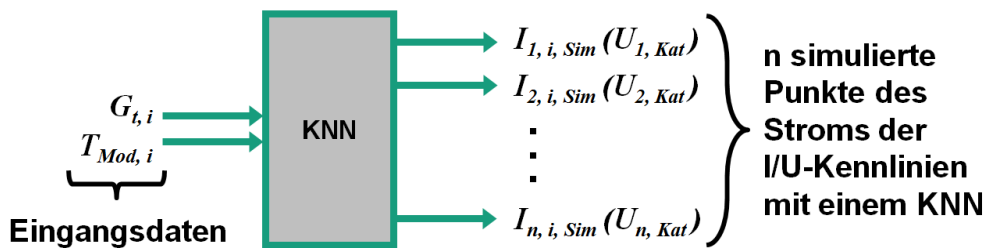


Abbildung 5.2.4: Struktur des KNN mit 256 Ausgängen für die Ströme, aufgeteilt in Spannungskategorien in der Simulationsphase

Mit:

- $i$  Zeitpunkt der Messung
- $n$  Anzahl der Messpunkte der I/U-Kennlinie

Trotz der Reduzierung der Anzahl der Ausgänge ist auch in dieser Variante mit Optimierungsproblemen zu rechnen. Die Anzahl der Neuronen in einem Hidden-Layer bestimmt die Dimension der zu trainierenden bzw. optimierenden Fehlerfunktion. Da die zu optimierenden Gewichte zwischen Hidden-Layer und Ausgangsschicht durch Multiplikation die Anzahl Neuronen in den beiden Layern ergibt, kann die Anzahl auch hier wieder stark anwachsen. Die Ausgangsschicht hat entsprechend der Ausgänge 256 Neuronen. In dem Hidden-Layer wurden in dieser Variante 50 Neuronen eingebaut, so ergibt sich eine Gesamtanzahl von  $256 \cdot 50 = 12800$  Gewichten. Das bedeutet, die Fehlerfunktion hat eine Dimension von 12800 plus zusätzlich 306 Werte für die Bias. Ein Finden des Minimums dieser Funktion ist auch in dieser Variante ausgeschlossen. Auch hier scheiterte der Versuch das Netz zu trainieren.

### 5.2.3 KENNLINIENBESTIMMUNG MIT GROßER ANZAHL KNN

Die im Kapitel 5.2.1 und 5.2.2 vorgestellten Varianten haben, wie gezeigt wurde, gewisse Nachteile. Die große Anzahl an Neuronen führt zu Optimierungsproblemen. In der dritten Variante werden zur Nachbildung der Kennlinien eine große Anzahl KNN verwendet. Jedes einzelne KNN hat dann eine sehr einfache Struktur und lässt sich relativ einfach trainieren bzw. optimieren. Die Anzahl der KNN lehnt sich dabei an die Anzahl der Messpunkte des ISET-*mpp meter* an. Dieses erzeugt jeweils für Strom und Spannung 256 Messpunkte. Die Struktur des Netzes mit 256 einzelnen KNN zeigen die folgenden Abbildungen 5.2.5 und 5.2.6. Die erste Abbildung zeigt das Netz in der Trainingsphase, die zweite in der Simulationsphase. Die Berechnung der Zwischenwerte der simulierten Punkte kann auch hier mit einer linearen Interpolation erfolgen.



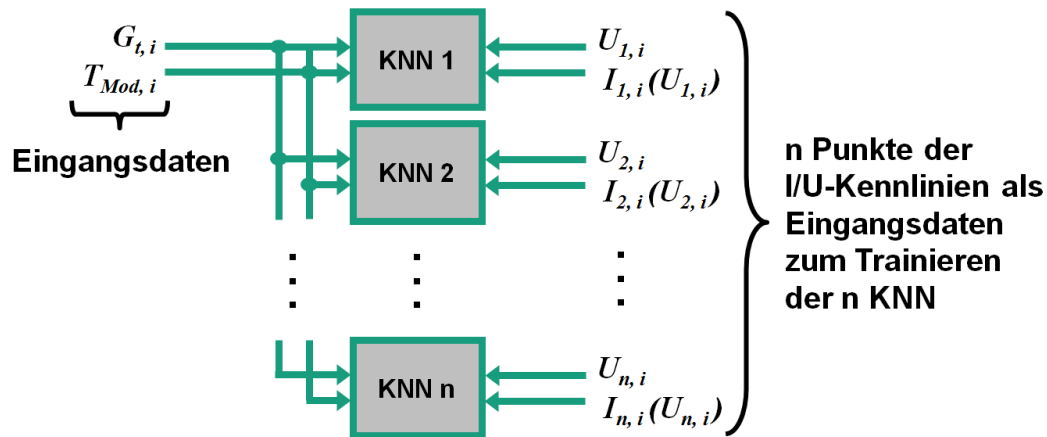


Abbildung 5.2.5: Struktur des KNN-Systems mit 256 KNN für Ströme und Spannungen in der Trainingsphase

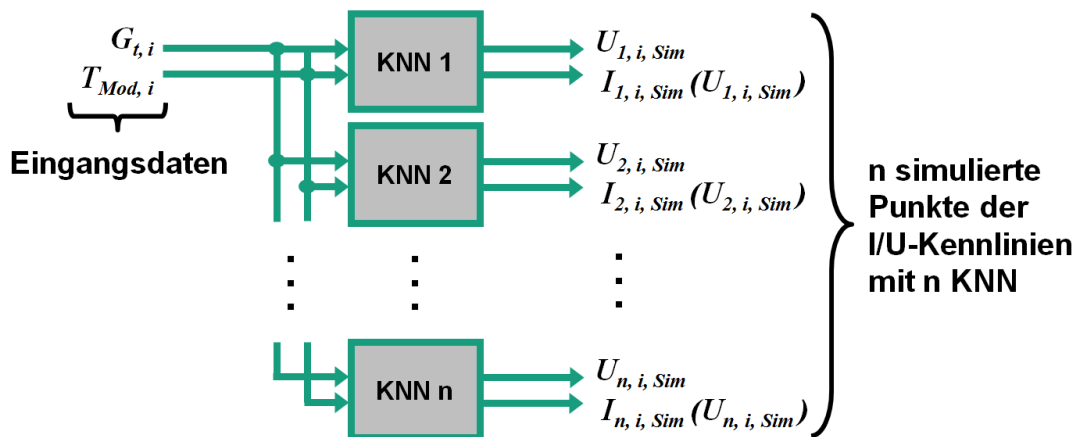


Abbildung 5.2.6: Struktur des KNN-Systems mit 256 KNN für Ströme und Spannungen in der Simulationsphase

Mit:

- $i$  Zeitpunkt der Messung
- $n$  Anzahl der Messpunkte der I/U-Kennlinie.

Die Netzstruktur jedes einzelnen KNN hatte die Form wie sie die Abbildung 5.2.12 zeigt mit einem zusätzlichen zweiten Ausgang. Die Ergebnisse erzielten nicht die geforderte Qualität. Auch ist dieses Gesamtnetz mit seinen vielen einzelnen KNN eher aufwendig und schwer handhabbar. Das Trainieren der vielen einzelnen Netze braucht zudem viel Zeit. Der Grund für die schlechten Ergebnisse liegt darin, dass ein KNN jeweils zwei Ausgangsgrößen hat, nämlich für Strom und Spannung. Der funktionale Zusammenhang zwischen Strom und Spannung zeigt ein im Kurzschlussfall lineares Verhalten in Bezug zur Bestrah-

lungsstärke. Beim Übergang vom Kurzschluss in den Leerlauf geht dieses Verhalten in ein stark nichtlineares über. Die Temperatur wird als weitere Größe die Kennlinien beeinflussen. Abhilfe kann eine Vereinfachung des Modells schaffen. Dazu werden die Spannungen wie beim Modell in Kapitel 5.2.2 wieder in Spannungskategorien aufgeteilt. Das folgende Kapitel beschreibt diese Variante.

#### 5.2.4 KENNLINIENBESTIMMUNG MIT GROßER ANZAHL KNN UND SPANNUNGSKATEGORIEN

In dieser Variante wird versucht, das in Kapitel 5.2.3 beschriebene Netz durch Einführung von Spannungskategorien zu vereinfachen. Diese bewirken eine Vereinfachung des funktionalen Zusammenhangs der einzelnen KNN, da die Spannung konstant ist und keinen weiteren Ausgang der KNN darstellt. Die Anzahl der Ausgänge verringert sich entsprechend um die Hälfte. Die Berechnung der Spannungskategorien erfolgt auf die gleiche Weise, wie in Kapitel 5.2.2 an diesem Modell gezeigt wurde. Die beiden folgenden Abbildungen zeigen die Gesamtstruktur in Trainings- und Simulationsphase. Eine lineare Interpolation kann die Zwischenwerte der simulierten Wertepaare von Strom und Spannung ermitteln.

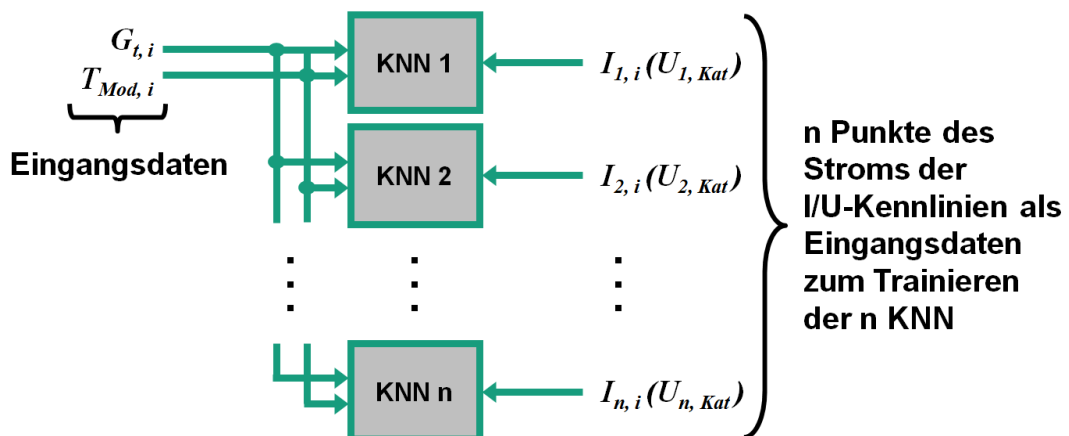


Abbildung 5.2.7: Struktur des KNN-Systems mit 256 KNN für die Ströme, aufgeteilt in Spannungskategorien in der Trainingsphase

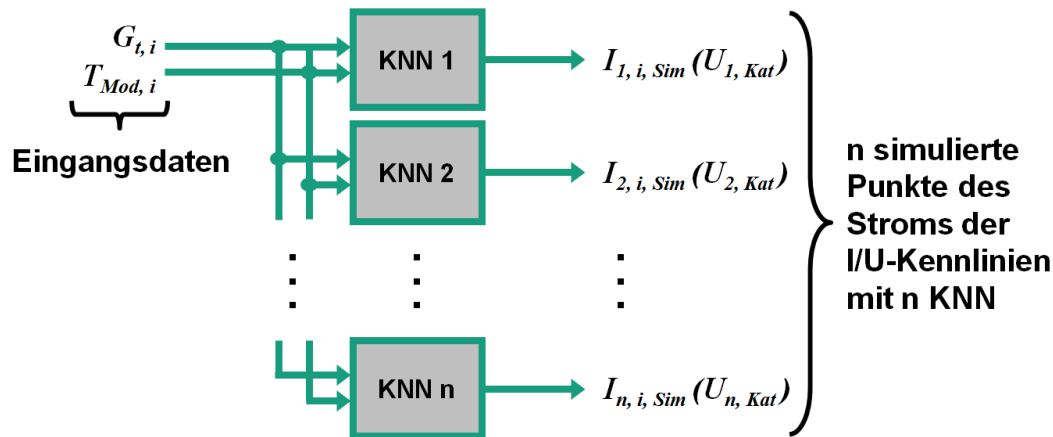


Abbildung 5.2.8: Struktur des KNN-Systems mit 256 KNN für die Ströme, aufgeteilt in Spannungskategorien in der Simulationsphase

Mit:

- $i$  Zeitpunkt der Messung
- $n$  Anzahl der Messpunkte der I/U-Kennlinie.

Die Netzstruktur jedes einzelnen KNN hatte die Form, wie sie die Abbildung 5.2.12 zeigt. Die Ergebnisse dieser Netzstruktur erzielen zwar die geforderte Qualität, dennoch ist auch dieses Netz mit seinen vielen einzelnen KNN eher aufwendig und schwer handhabbar. Das Trainieren der vielen einzelnen Netze braucht zudem viel Zeit.

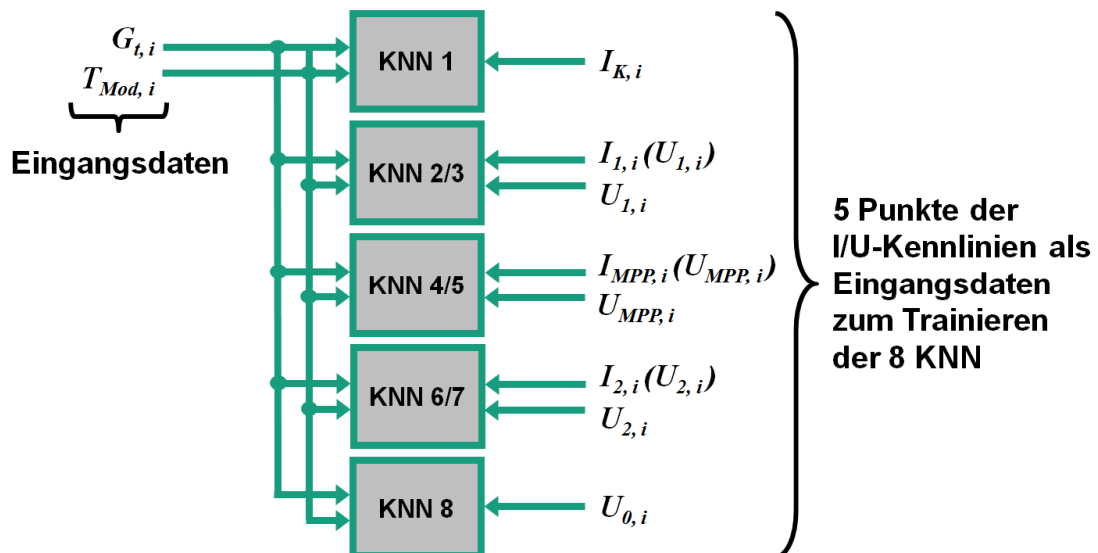
Eine weitere Reduzierung der simulierten Punkte durch die einzelnen KNN soll für die genannten Nachteile Abhilfe schaffen. Diese Variante wird im nächsten Kapitel vorgestellt.

### 5.2.5 KENNLINIENBESTIMMUNG MIT WENIGEN KNN

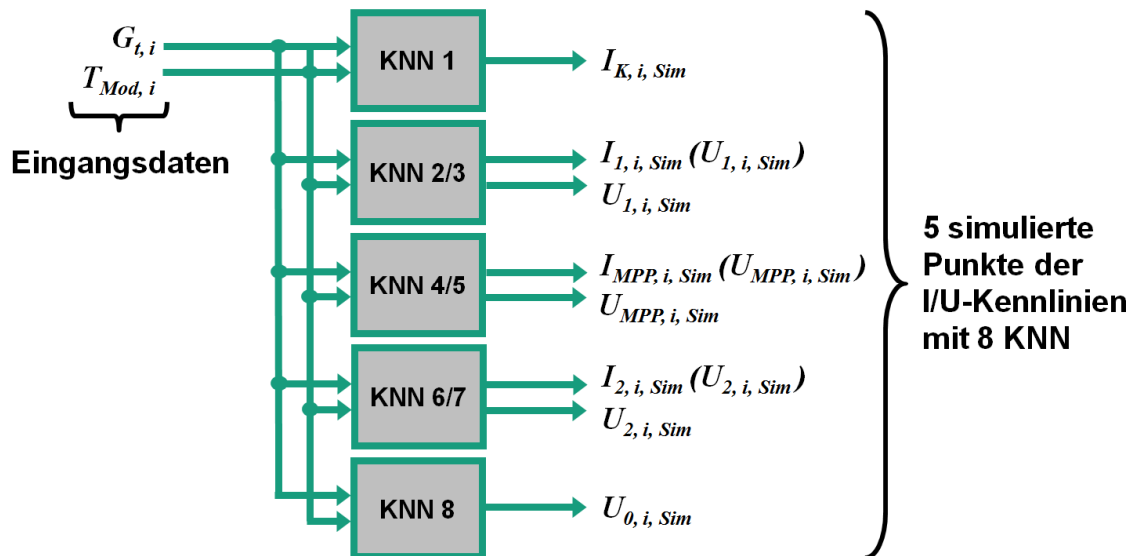
In den vier vorherigen Kapiteln konnte gezeigt werden, dass es grundsätzlich möglich ist, I/U-Kennlinien mittels KNN zu simulieren. Es wurde dabei festgestellt, dass zwei Versionen der KNN gar nicht funktionieren (Kapitel 5.2.1 und Kapitel 5.2.2), eine Version sich zwar trainieren lässt, aber nicht die geforderten Ergebnisse erreicht (Kapitel 5.2.3), und eine Version die Ergebnisse erreicht, aber dennoch sehr komplex und schwer handhabbar ist (Kapitel 5.2.4). Aus diesem Grund wird die Version aus Kapitel 5.2.4 vereinfacht. Dazu werden die 256 KNN, welche jeweils einen Stromwert auf der Kennlinie simulieren, auf zehn Werte reduziert. Diese zehn Werte bilden fünf I/U-Wertepaare und sind im Folgenden aufgelistet:

1. Kurzschluss ( $I_K, U = 0$ )
2. Zwischen Kurzschluss und MPP ( $I_1, U_1$ )
3. MPP ( $I_{MPP}, U_{MPP}$ )
4. Zwischen MPP und Leerlauf ( $I_2, U_2$ )
5. Leerlauf ( $I = 0, U_0$ )

Zwei der zehn Werte sind bereits bekannt und müssen nicht simuliert werden. Befindet sich das Modul im Leerlauf, ist der Strom immer null. Die Spannung ist immer null, sobald sich das Modul im Kurzschluss befindet. Es verbleiben acht Werte, welche simulativ dargestellt werden müssen. Für diese acht Werte wird jeweils ein KNN definiert. Die beiden folgenden Abbildungen zeigen die grundsätzliche Struktur des gesamten KNN-Systems.



**Abbildung 5.2.9: Struktur des KNN-Systems mit 8 KNN für Ströme und Spannungen als Punkte auf der I/U-Kennlinie in der Trainingsphase**



**Abbildung 5.2.10: Struktur des KNN-Systems mit 8 KNN für Ströme und Spannungen als Punkte auf der I/U-Kennlinie in der Simulationsphase**

Mit:

$i$  Zeitpunkt der Messung.

Die acht KNN lassen sich ihrer Struktur nach in zwei Gruppen aufteilen. Da der Strom von PV-Zellen und Modulen funktional eher lineares Verhalten zeigt, erwies es sich als sinnvoll, diesen einer Gruppe zuzuordnen (KNN 1, KNN 2, KNN 4 und KNN 6 in den Abbildungen 5.2.9 und 5.2.10). Die Spannungen haben ein eher nichtlineares Verhalten (logarithmisch) und werden somit der zweiten Gruppe zugeordnet (KNN 3, KNN 5, KNN 7 und KNN 8 in den Abbildungen 5.2.9 und 5.2.10). Die vier KNN, welche die linearen Anteile simulieren sollen, haben ein Neuron in der Eingangsschicht und ein Neuron in der Ausgangsschicht. Eine verdeckte Schicht (Hidden-Layer) ist nicht vorhanden. Als Aktivierungsfunktionen kommen lineare Funktionen zum Einsatz. Bei dieser Konfiguration ergeben sich in der Eingangsschicht 2·1 Gewichte und in der Ausgangsschicht 1·1 Gewichte. Jedes Neuron hat zusätzlich noch einen Bias. Insgesamt ergibt sich die relativ kleine Anzahl von fünf zu optimierenden Gewichten inklusive der Gewichte für die Bias. Diese Netzstruktur für die linearen Anteile der I/U-Kennlinien wurde empirisch ermittelt. Die Abbildung 5.2.11 zeigt die Struktur der KNN 1, KNN 2, KNN 4 und KNN 6.

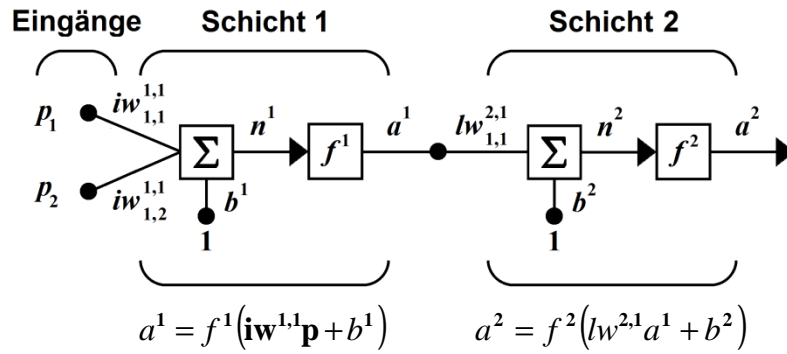


Abbildung 5.2.11: Struktur der KNN 1, KNN 2, KNN 4 und KNN 6 zur Simulation der vier Ströme

Im Folgenden ist die Gesamtübertragungsfunktion zur Simulation der linearen Anteile (Ströme) dargestellt:

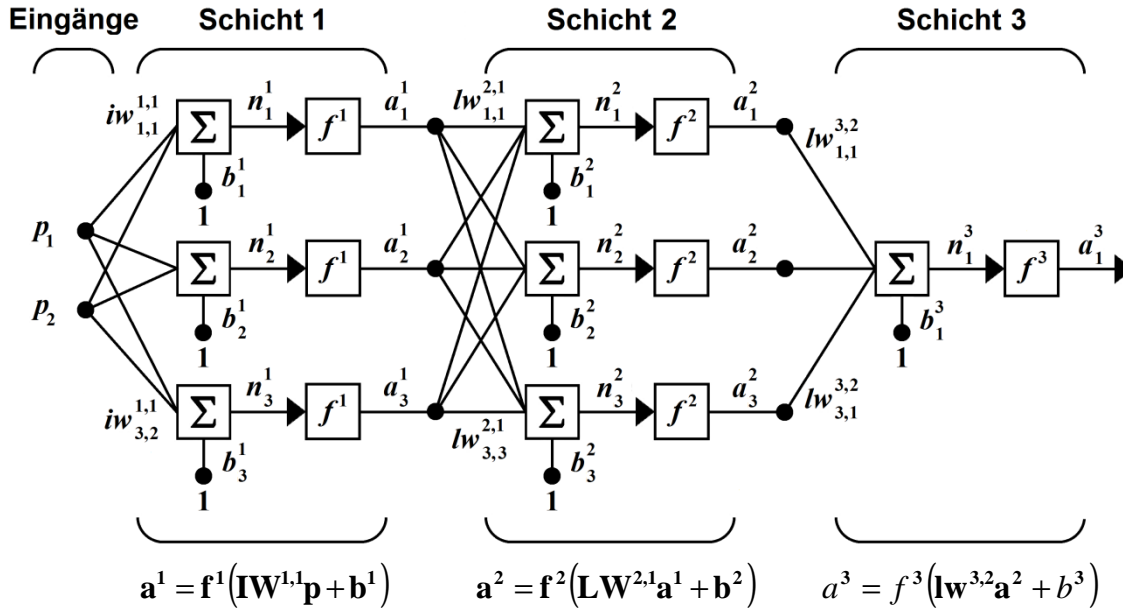
$$a^2 = f^2(lw^{2,1}f^1(iw^{1,1}p + b^1) + b^2) \quad (5.2.2)$$

mit

$$p = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{bmatrix}.$$

Wobei  $p_1 = G_t$  und  $p_2 = T_{Mod}$  jeweils die Eingänge der vier KNN sind. Die Ausgänge der vier einzelnen KNN sind  $a^2 = I_K$ ,  $a^2 = I_1$ ,  $a^2 = I_{MPP}$  und  $a^2 = I_2$ .

Die KNN, welche die nichtlinearen Anteile der I/U-Kennlinien simulieren sollen, haben drei Neuronen in der Eingangsschicht, drei Neuronen in der verdeckten Schicht (Hidden-Layer) und ein Neuron in der Ausgangsschicht. In der Eingangsschicht sind damit 2·3 Gewichte, in der verdeckten Schicht 3·3 Gewichte und in der Ausgangsschicht 3·1 Gewichte. Jedes Neuron besitzt auch hier einen Bias. Insgesamt ergeben sich daraus 25 zu optimierende Gewichte inklusive der Gewichte für die Bias. Für die Aktivierungsfunktionen der Eingangs- und der verdeckten Schicht erwiesen sich log-sigmoide Funktionen als sinnvoll. Die Ausgangsschicht hat eine lineare Aktivierungsfunktion. Diese Netzstruktur für die nichtlinearen Anteile der I/U-Kennlinien wurde empirisch ermittelt. Die Abbildung 5.2.12 zeigt die Struktur der KNN 3, KNN 5, KNN 7 und KNN 8.



**Abbildung 5.2.12: Struktur der KNN 3, KNN 5, KNN 7 und KNN 8 zur Simulation der vier Spannungen**

Als Gesamtübertragungsfunktion zur Simulation der nichtlinearen Anteile ergibt sich die folgende Gleichung:

$$a^3 = f^3(\mathbf{lw}^{3,2} \mathbf{f}^2(\mathbf{LW}^{2,1} \mathbf{f}^1(\mathbf{IW}^{1,1} \mathbf{p} + \mathbf{b}^1) + \mathbf{b}^2) + \mathbf{b}^3) \quad (5.2.3)$$

mit

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{bmatrix}.$$

Wobei  $p_1 = G_t$  und  $p_2 = T_{Mod}$  jeweils die Eingänge der vier KNN sind. Die Ausgänge der vier einzelnen KNN sind  $a^3 = U_1$ ,  $a^3 = U_{MPP}$ ,  $a^3 = U_2$  und  $a^3 = U_0$ .

Wird das KNN-System mit ausgewählten gemessenen Kennlinien trainiert, so ergeben sich bei der Simulation die Ergebnisse in der Abbildung 5.2.13. Zum Trainieren wurden insgesamt 336 I/U-Kennlinien verwendet, die bei einer Bestrahlungsstärke im Bereich von 50 W/m<sup>2</sup> bis 1240 W/m<sup>2</sup> gemessen wurden. Die Modultemperatur bewegte sich im Bereich von 7,4°C bis 52,1°C. Die im Folgenden zehn verwendeten I/U-Kennlinien sind keine Kennlinien, mit denen das KNN-System trainiert wurde. Diese wurden verwendet, um zu zeigen, dass das KNN-System sich generalisieren lässt, zumindest auf zehn Kennlinien, die das System noch nicht kennt.

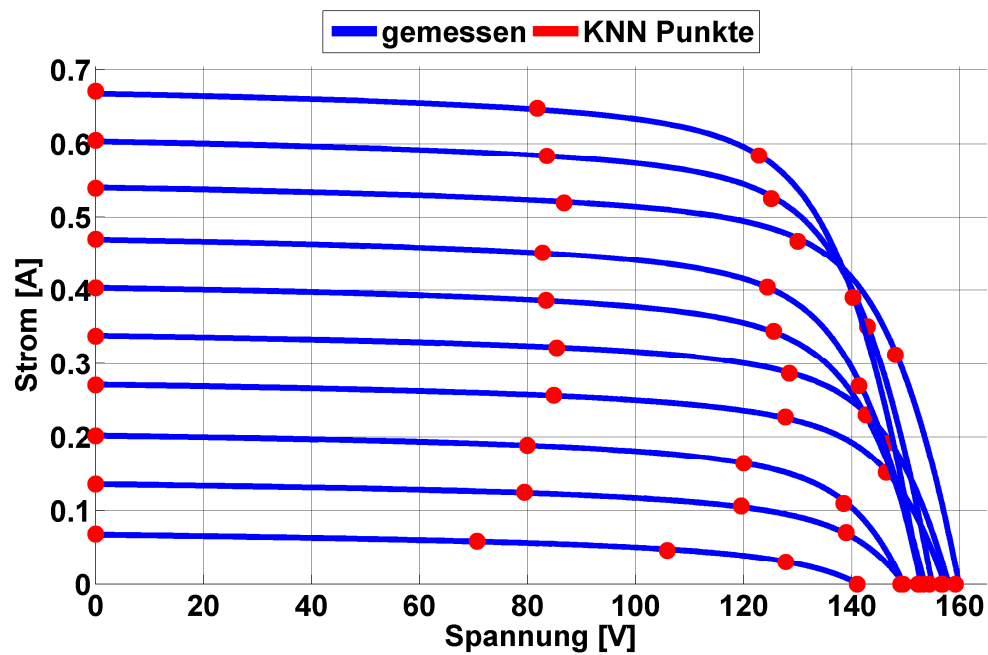
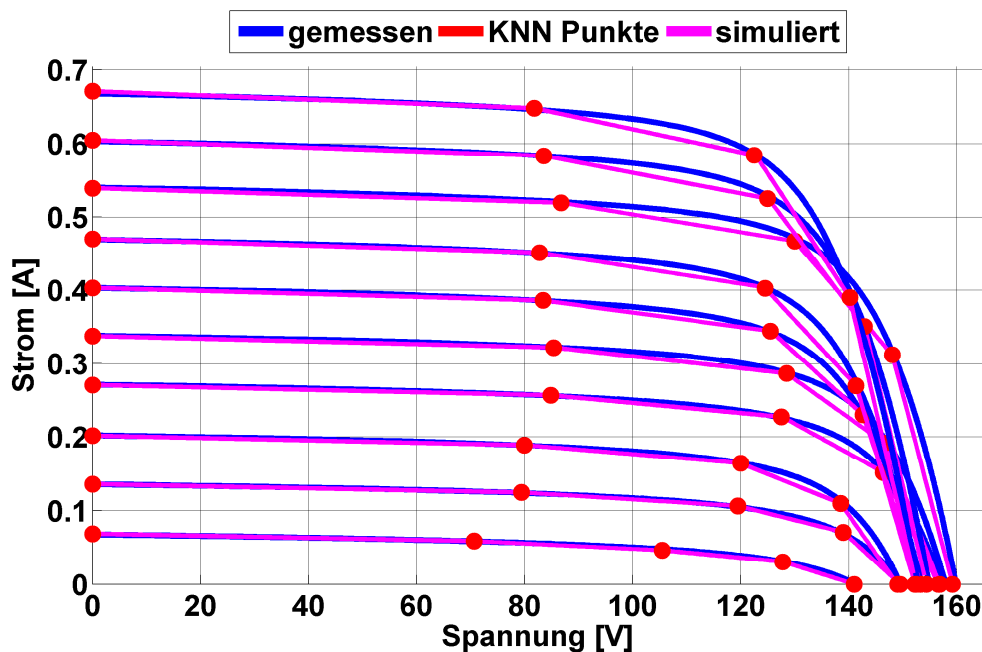


Abbildung 5.2.13: Simulierte Punkte für einige ausgewählte gemessene Bestrahlungsstärke-Temperatur-Kombinationen

In den Kapiteln 5.2.1 bis 5.2.4 kamen zur Berechnung der Zwischenwerte lineare Interpolationen zum Einsatz. In diesem Fall würde eine lineare Interpolation kein befriedigendes Ergebnis liefern. Die Anzahl von fünf mit dem KNN-System berechneten Punkte ist zu gering. Die Abbildung 5.2.14 zeigt das Ergebnis, bei dem die Zwischenergebnisse mittels einer linearen Interpolation berechnet wurden.



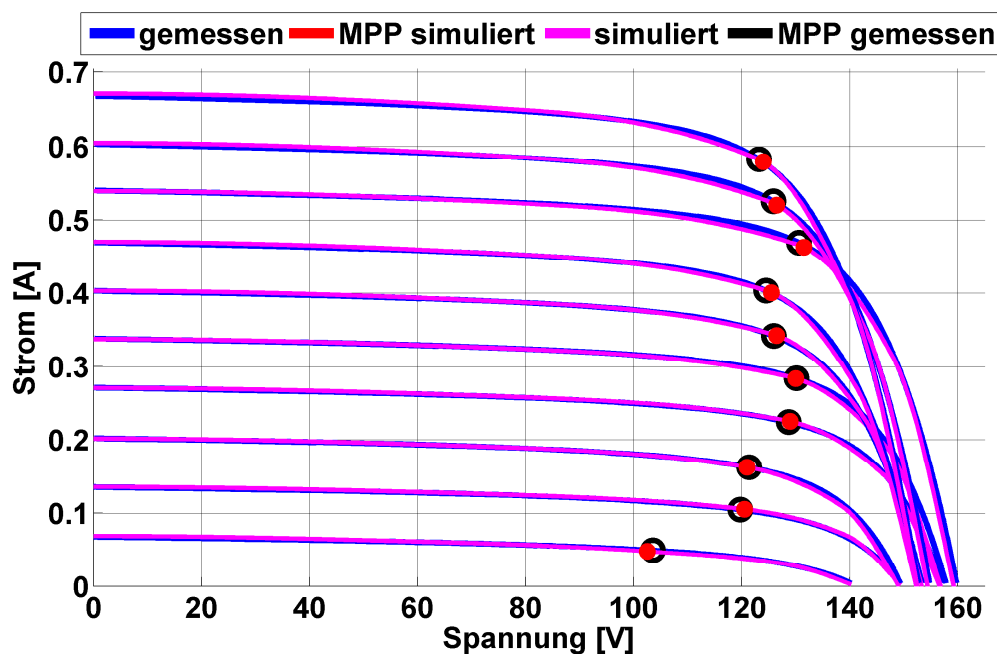


**Abbildung 5.2.14:** Simulierte Punkte für einige ausgewählte gemessene Bestrahlungsstärke-Temperatur-Kombinationen und linearer Interpolation zwischen den Punkten

Zur Berechnung der Zwischenwerte muss ein anderes Verfahren zum Einsatz kommen. Naheliegender wäre ein lineares Modell mit e-Funktionstermen. Diese lassen sich in der Regel leicht durch lineare Gleichungssysteme lösen. Bei diesen Funktionen ergibt sich allerdings das Problem, dass einige Varianten zum Schwingen neigen. Andere wiederum, welche bessere Ergebnisse erzielen könnten, lassen sich nur numerisch durch Optimierung lösen. Diese Optimierung müsste dann für jede simulierte Kennlinie erfolgen, was einen enormen Rechenaufwand bedeuten würde. Solch eine Optimierung für jede einzelne Kennlinie könnte auch sofort mit dem Zweiodenmodell erfolgen. Die aufwendige Berechnung der fünf Punkte mittels KNN wäre dann nicht notwendig. Dennoch ist der Aufwand enorm und die Berechnung soll auf möglichst einfachem Wege erfolgen. Eine weitere Methode, die fünf Punkte zu verbinden, wäre die Anwendung eines Polynoms höheren Grades. Die Koeffizienten von Polynomen lassen sich durch lineare Gleichungssysteme berechnen. Sind diese Gleichungssysteme voll definiert (also  $n$  Unbekannte und  $n$  Gleichungen, mit  $n \in \mathbb{N}$ ), so ist die Lösung mit einfachen mathematischen Operationen möglich (Addition und Multiplikation). Aber auch diese Funktionen neigen zum Schwingen, was eine Beschreibung der I/U-Kennlinien unmöglich macht.

Zur Anwendung kommen in dieser Arbeit stückweise Interpolationen mit kubischen Funktionen [Boor-78], [Fri-80]. Diese werden von Punkt zu Punkt berech-

net, hängen dabei aber voneinander ab. Die kubischen Polynome lassen sich leicht berechnen, da die Koeffizienten durch volldefinierte lineare Gleichungssysteme berechnet werden ( $n$  Unbekannte und  $n$  Gleichungen, mit  $n = 4$ ). Bei fünf Punkten ergeben sich vier kubische, voneinander abhängige Funktionen. Die Koeffizienten dieser Funktionen werden mit vier Gleichungssystemen, welche jeweils aus vier Gleichungen bestehen, berechnet. Das Lösen der Gleichungssysteme muss für jede simulierte Kennlinie erfolgen. Da sich lineare Gleichungssysteme mit einfachen mathematischen Operationen berechnen lassen (Addition und Multiplikation), ist der Rechenaufwand gering und stellt für heutige Rechenmaschinen kein Problem dar. Das Ergebnis für einige ausgewählte Funktionen zeigt die Abbildung 5.2.15.



**Abbildung 5.2.15: Simulierte Punkte für einige ausgewählte gemessene Bestrahlungsstärke-Temperatur-Kombinationen und stückweiser kubischer Interpolation ([Boor-78], [Fri-80]) zwischen den Punkten**

In der Abbildung 5.2.15 sind die gemessenen I/U-Kennlinien den simulierten gegenübergestellt. Eine gute Übereinstimmung ist erkennbar. Des Weiteren sind im Diagramm die gemessenen und simulierten MPPs dargestellt. Auch hier ist die Übereinstimmung sehr gut. Die Abbildung 5.2.16 zeigt die prozentualen Abweichungen der gemessenen und simulierten Kennlinien zueinander.

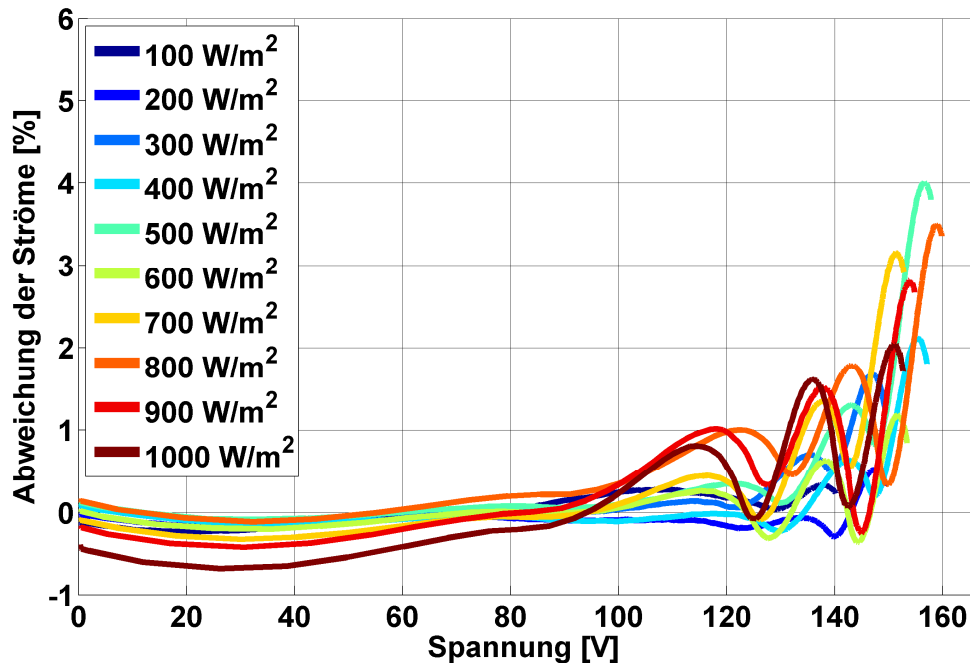


Abbildung 5.2.16: Prozentuale Abweichungen der zehn ausgewählten gemessenen und simulierten Kennlinien zueinander

Die Abweichung nimmt mit zunehmender Spannung zu. Die größten Abweichungen liegen im Bereich der Leerlaufspannung. Der Grund dafür liegt im starken nichtlinearen Verhalten der Leerlaufspannung. Der Übergang vom linearen Verhalten im Kurzschluss in das nichtlineare im Bereich der Leerlaufspannung ist deutlich an der Abweichung erkennbar. Je stärker die Nichtlinearität, desto schwerer fällt dem KNN die Nachbildung. Das schwingende Verhalten dieser Kurven resultiert aus den einzelnen KNN-Punkten und der stückweisen kubischen Interpolation. Die lokalen Minima korrelieren mit den KNN-Punkten. Die Abweichungen nehmen im Bereich der stückweisen kubischen Interpolation zu (lokale Maxima).

In der Tabelle 5.2.1 sind wichtige Daten zu den für die Simulation mit dem KNN ausgewählten gemessenen Kennlinien aufgelistet.

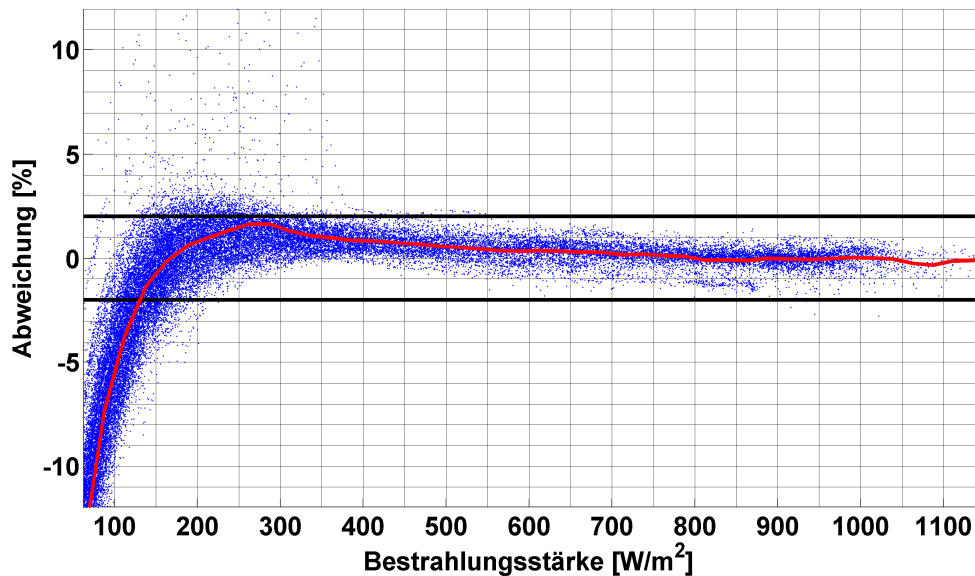
Kennlinie	Datum	Uhrzeit	$G_t$ [W/m <sup>2</sup> ]	$T_{Mod}$ [°C]	$I_{MPP}$ [A]	$U_{MPP}$ [V]	$I_K$ [A]	$U_0$ [V]
1	18.07.2009	07:11	100	19,7	0,0493	103,5	0,0679	140,3
2	29.09.2009	09:54	200	22,9	0,1048	119,7	0,1356	149,3
3	22.09.2009	13:59	300	35,8	0,1627	121,3	0,2022	149,4
4	03.09.2009	15:40	400	23,5	0,2240	128,7	0,2713	157,1
5	18.10.2009	11:37	500	27,3	0,2854	129,5	0,3383	157,8
6	02.09.2009	10:03	600	40,1	0,3420	125,9	0,4034	153,4
7	26.08.2009	14:08	700	45,2	0,4035	124,5	0,4695	152,8
8	20.10.2009	10:00	800	30,9	0,4692	130,6	0,5402	159,8
9	22.09.2009	12:07	900	45,1	0,5252	125,9	0,6036	154,8
10	07.08.2009	11:29	1000	51,6	0,5826	123,2	0,6684	152,7

**Tabelle 5.2.1: Einige wichtige Daten zu den ausgewählten gemessenen Kennlinien, die für Simulation und Validierung des KNN-Systems verwendet wurden**

Es stellen sich nun die Fragen: Wie simuliert das KNN-System bei weiteren Bestrahlungsstärke-Temperatur-Eingangsdaten und wie groß ist der konkrete Fehler, der dabei entsteht? Um diese Fragen zu beantworten, wurden insgesamt 68.107 gemessene I/U-Kennlinien ausgewertet. Diese wurden in einem Zeitraum von Juli bis Dezember 2009 mit dem ISET-*mpp meter* am Standort des Fraunhofer IWES in Kassel gemessen. Damit ein Vergleich der gemessenen und simulierten Kennlinien stattfinden kann, wurden zunächst die MPPs verglichen. Für jede gemessene und simulierte Kennlinie wurde der MPP berechnet und nach der folgenden Vorschrift verglichen:

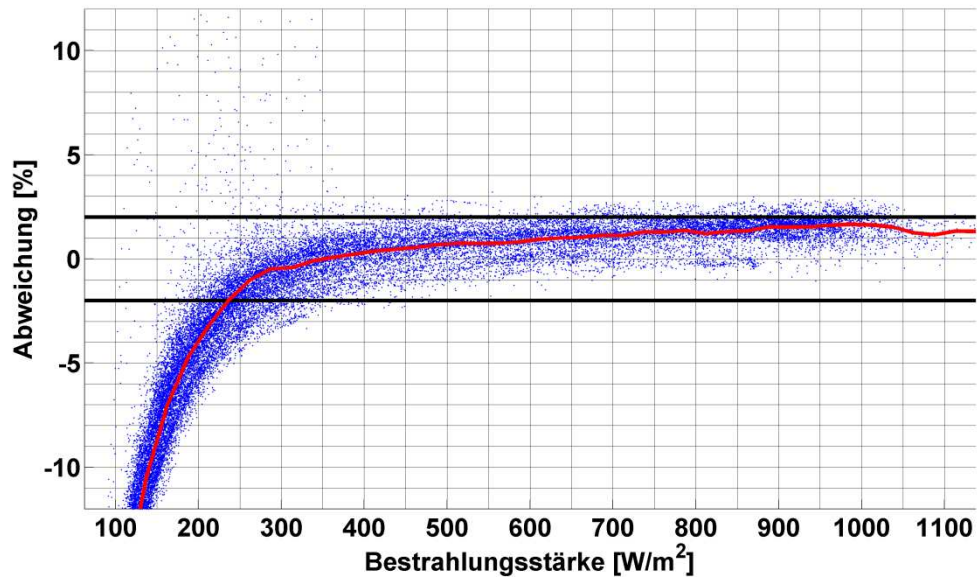
$$F_{P_{MPP},\%} = \left( \frac{P_{MPP_{Sim}}}{P_{MPP_{Mess}}} - 1 \right) \cdot 100\% \quad (5.2.4)$$

Die Abbildung 5.2.17 zeigt die prozentualen Abweichungen aller 68.107 MPPs.



**Abbildung 5.2.17: Prozentuale Abweichungen aller 68.107 MPPs  
simuliert mit dem neuen Modell**

Die beiden Linien bei +2% und -2% in der Abbildung 5.2.17 wurden als Hilfslinien eingefügt (schwarz), um die Anschaulichkeit zu verbessern. Außerdem wurden für Bestrahlungsstärkeklassen von jeweils  $25 \text{ W/m}^2$  Mittelwerte der einzelnen Abweichungen gebildet, um eine mittlere Abweichung aller Punkte in Abhängigkeit der Bestrahlungsstärke zu bekommen (rote Linie). Deutlich erkennbar ist, dass der Großteil der Fehler innerhalb dieses  $\pm 2\%$  Bandes liegt. Erst bei einer Einstrahlung kleiner ca.  $125 \text{ W/m}^2$  nimmt der Fehler deutlich zu. Allerdings darf bei den kleinen Bestrahlungsstärken auch die Messungenauigkeit nicht vernachlässigt werden. Beträgt beispielsweise der prozentuale Fehler bei  $50 \text{ W/m}^2$  5%, entspricht dies einer Bestrahlungsstärke von  $2,5 \text{ W/m}^2$ . Selbst Pyranometer der höchsten Genauigkeitsklasse, laut internationaler Norm ISO 9060 mit der Spezifikation „Secondary Standard“, erreichen damit ihre Grenze der Messgenauigkeit [Kip-09a], [Kip-09b], [Pho-09]. Zum direkten Vergleich mit konventionellen Simulationsmethoden wurden die 68.107 Kennlinien mit dem Zweidiodenmodell simuliert, was die folgende Abbildung 5.2.18 zeigt. Ein deutlich schlechteres Ergebnis im Schwachlichtbereich ist erkennbar, aber auch im Starklichtbereich konnte eine Verbesserung mit dem neuen Modell erzielt werden.



**Abbildung 5.2.18: Prozentuale Abweichungen aller 68.107 MPPs  
simuliert mit dem Zweidiodenmodell**

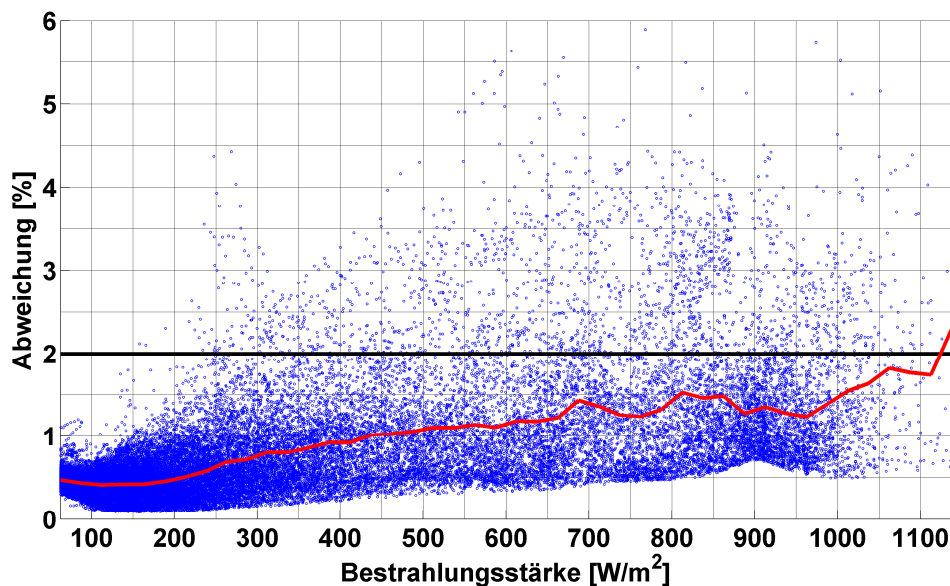
Bisher konnte gezeigt werden, dass die geforderte Genauigkeit der MPPs mit dem neuen Modell erreicht wird. Diese sagt allerdings nichts über die Qualität der gesamten simulierten Kennlinie aus. In der Abbildung 5.2.15 konnte zwar gezeigt werden, dass für zehn ausgewählte Kennlinien der Kurvenverlauf gut nachgebildet wird, dagegen ist nicht erkennbar, ob sich dieses Ergebnis auf weitere Kennlinien übertragen lässt. Um zu zeigen, wie genau der Kennlinienverlauf der einzelnen Kennlinien in Bezug zu den gemessenen ist, wurden diese miteinander verglichen. Dazu wurde von jeder gemessenen und simulierten Kennlinie der mittlere quadratische Fehler (RMSE) berechnet. Dieser hat die Einheit Ampere. Damit die Auswertung anschaulicher wird, wurden die Werte auf eine feste Bezugsgröße bezogen. Verwendet wurde dabei der Modulstrom im Kurzschluss unter Standard-Test-Bedingungen (STC), womit sich folgende Formel zur Berechnung der Fehler ergibt:

$$RMSE_{i,\%} = \frac{\sqrt{\frac{1}{k} \sum_{v=1}^k (I_{Sim_v} - I_{Mess_v})^2}}{I_{K_{STC}}} \quad (5.2.5)$$

mit:

- $i$       Zeitpunkt der Messung
- $k$       Anzahl der Messpunkte pro Kennlinie.

Die Abbildung 5.2.19 zeigt die prozentualen RMSE, berechnet nach der Vorschrift (5.2.5) für alle 68.107 Kennlinien.



**Abbildung 5.2.19: Prozentuale RMSE für die mit dem neuen Modell simulierten I/U-Kennlinien**

Auch in dieser Darstellung (Abbildung 5.2.19) wurde bei 2% wieder eine Hilfslinie eingefügt, um die Anschaulichkeit zu verbessern (schwarze Linie). Ebenfalls wurden wieder Mittelwerte aus Bestrahlungsstärkeklassen von  $25 \text{ W/m}^2$  gebildet. Zum Vergleich mit konventionellen Simulationsmethoden wurde auch hier wieder mit dem Zweidiodenmodell gegengerechnet. Die Abbildung 5.2.20 zeigt diese Ergebnisse. Der Unterschied zwischen beiden Modellen ist zwar nicht so deutlich wie beim Vergleich der MPPs, dennoch ist auch hier eine Verbesserung mit dem neuen Modell wieder im Schwachlichtbereich zu erkennen.

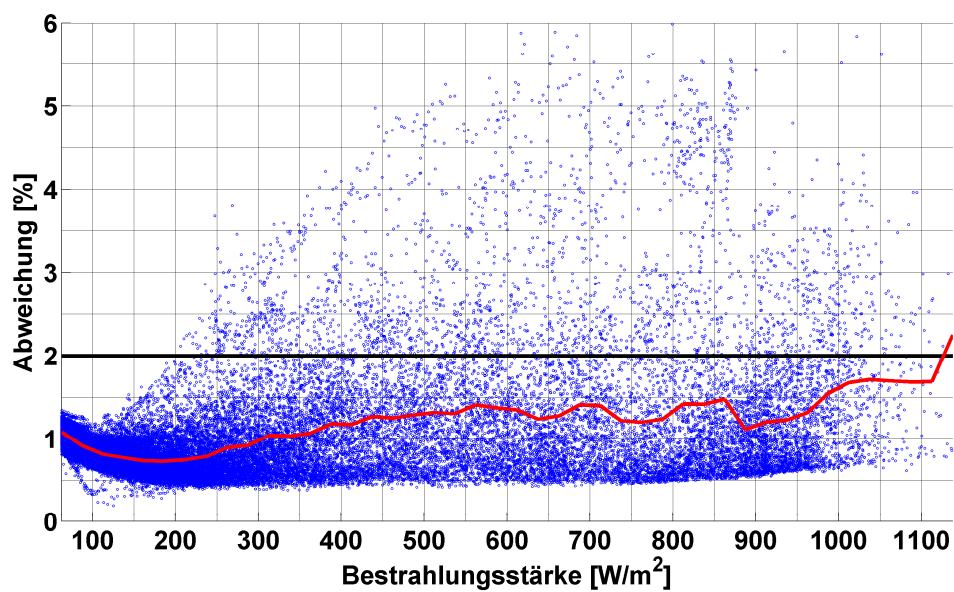


Abbildung 5.2.20: Prozentuale RMSE für die mit dem Zweidiodenmodell simulierten I/U-Kennlinien



## 6 VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUR BESTIMMUNG DES MODELLS

Mit dem neuen Modell, dem ISET-*mpp meter* als Messtechnik und zwei speziellen Programmen (Software) wurde ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Ermittlung der Kennlinien von photovoltaischen Bauelementen entwickelt, welches als Patent angemeldet wurde [Pat-09]. Das ISET-*mpp meter* liefert die zur Modellerstellung nötigen charakteristischen Werte (I/U-Kennlinien) in allen denkbaren Betriebszuständen von PV-Modulen oder PV-Modulverbünden. Diese gemessenen Daten werden als Eingangsparameter verwendet, um ein KNN zu trainieren und zu testen. Die Software nimmt alle nötigen Schritte nach Vorgaben des Anwenders quasi automatisiert vor.

### 6.1 VERFAHREN UND VORRICHTUNG

Damit die Bestimmung eines Modells für eine ausgewählte Technologie möglichst anwenderfreundlich ablaufen kann, wurden ein Verfahren und eine Vorrichtung entwickelt, welche diese Aufgabe weitgehend automatisiert übernehmen. Das Verfahren und die Vorrichtung bestehen im Prinzip aus dem ISET-*mpp meter* als Messtechnik und einem geeigneten Datenloggersystem (z.B. ein PC oder Server inkl. einer SQL-Datenbank), zwei neu entwickelten Programmen (Software) und dem neuen Simulationsmodell. Mit dem Titel „Verfahren und Vorrichtung zur Ermittlung der Kennlinien von photovoltaischen Bauelementen“ wurde dieses System als Patent angemeldet [Pat-09]. Das ISET-*mpp meter* liefert die zur Modellerstellung nötigen charakteristischen Werte (I/U-Kennlinien) von PV-Modulen oder PV-Modulverbünden, Bestrahlungsstärke und Temperaturen in allen denkbaren Betriebszuständen (Wetter- und Lichtverhältnisse). Diese gemessenen Daten werden als Eingangsparameter verwendet, um das KNN zu trainieren und zu testen. Die Software besteht dabei aus zwei Teilen, welche im weiteren Verlauf Software 1 und Software 2 genannt werden. Software 1 konfiguriert und steuert das bzw. die ISET-*mpp meter* und speichert die Daten in einer Datenbank. Zur Konfiguration lassen sich zum Beispiel die Einstellung der Anzahl der ISET-*mpp meter*, der Speicherort der Messdaten oder die Einstellung des Messintervalls vornehmen. Die zweite Software übernimmt alle nötigen Schritte nach Vorgaben des Anwenders, um automatisiert das Modell zu parametrisieren. Die Abbildung 6.1.1 veranschaulicht schematisch den prinzipiellen Aufbau des Verfahrens.

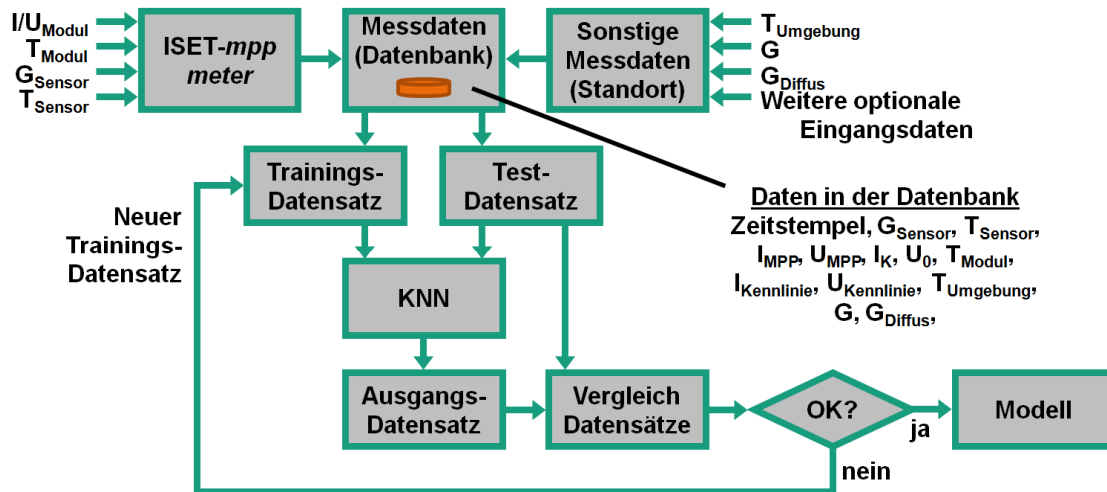


Abbildung 6.1.1: Schematische Darstellung des Verfahrens

## 6.2 SOFTWARE

### Software zur Ansteuerung des ISET-mpp meter (Software 1)

Diese Software wird benötigt, um eine ISET-mpp meter-Konfiguration bestehend aus  $n$  ( $n \in \mathbb{N}$ ) Messgeräten zu konfigurieren, Datenbankeinstellungen vorzunehmen und die Zeitintervalle, mit welchen die einzelnen Messgeräte messen sollen, einzustellen. Sie stellt damit die Basis des Messsystems dar. Sie kann einmal gestartet werden und ist über einen mehr oder weniger langen Zeitraum in Betrieb. Auch sehr lange Zeiträume sind möglich (zum Beispiel ein oder mehrere Jahre). Die Software ist plattformunabhängig in Java programmiert, so dass sie auch auf einem Rechner oder Server betrieben werden kann, bei dem eine Linux-Applikation installiert ist. Dies macht besonders dann Sinn, wenn über längere Zeiträume gemessen werden soll. Die Daten werden in einer SQL-Datenbank gespeichert. Dadurch sind diese über ein TCP/IP-Netzwerk von nahezu überall erreichbar und es eröffnet sich auch die Möglichkeit, ein Messsystem bestehend aus dem ISET-mpp meter und der Datenbank örtlich getrennt vom Auswertesystem aufzubauen. Die aufgebaute Applikation am Fraunhofer IWES nutzt diese Funktion, da die Messsysteme im IWES-SysTec (Testzentrum für intelligente Netze und Elektromobilität), einem Testgelände für Freifeldversuche am Standort Rothwesten, nördlich von Kassel, installiert sind. Die Auswertungen finden ausschließlich im Institutsgebäude, Standort Kassel, Königstor 59, statt, welches ca. 15 km entfernt vom Testfeld liegt.

### Software zur Parametrisierung des Modells (Software 2)

Die Verbindung zwischen der Vorrichtung, dem Datenspeicher und dem Modell stellt eine weitere spezielle Software her. Diese sucht aus den gemessenen Kennlinien, welche in der SQL-Datenbank gespeichert sind, durch „Abscannen“ der gesamten gespeicherten Betriebszustände (repräsentiert zum Beispiel durch Bestrahlungsstärke und Temperatur) geeignete Kennlinien zum Trainieren des KNN heraus. Die Kennlinien werden so ausgewählt, dass möglichst viele verschiedene Betriebszustände zur Modellierung verwendet werden. Damit die Datenmenge nicht zu groß wird, werden nur bestimmte Stützstellen ausgewählt (zum Beispiel in 50 W/m<sup>2</sup>-Schritten und 10°C-Schritten). Ist die Datenmenge nicht ausreichend (zu wenige gemessene Kennlinien oder nur ein kleiner Teil des Bestrahlungsstärkebereichs ist vorhanden), signalisiert die Software diesen Missstand per Warnung. Ein Training ist dennoch möglich, wenn der Benutzer dies möchte und eine entsprechende Bestätigung quittiert. Die grafische Oberfläche der Software zur Bestimmung des Modells veranschaulicht die Abbildung 6.1.2.

The screenshot shows a software window with the following sections:

- Meteorologische Daten:** Datenbank: Meteorologie\Logger\_001, Auflösung: 1min\_Data
- Modul Daten:** Datenbank: Module\SET\_mpp\_meter\_001, Auflösung: 1min\_Data
- Allgemeine Einstellungen:**
  - ☒ KNN neu berechnen
  - KNN laden: KNN
  - KNN speichern: KNN
  - Daten für das Training von 01.08.2009 bis 30.09.2009
  - ☐ Für den Test gleichen Zeitraum wie für das Training benutzen
  - Daten für den Test von 01.07.2009 bis 31.12.2009
- Einstrahlung:**
  - ☒ auf Modulebene
  - ☐ global
  - ☐ diffus
- Temperatur:**
  - ☒ Modul
  - ☐ Umgebung
- Optionale Eingangsparameter:**
  - ☐ Einfallswinkel
  - ☐ Datum (Monate)
  - ☐ Zeit (Stunden)
- Berechnung starten:** Start button

Abbildung 6.1.2: Grafische Oberfläche zur Eingabe und Auswahl verschiedener Konfigurationen zur Parametrisierung des Simulationsmodells

In dieser grafischen Benutzeroberfläche lassen sich zunächst die Pfade und Dateinamen der Datengrundlage, bestehend aus meteorologischen Daten und den Moduldaten, einstellen. Meteorologische Daten sind Globalstrahlung  $G$ , Diffusstrahlung  $G_{Diff}$  und Umgebungstemperatur  $T_{Umg}$ . Die Moduldaten sind die vom ISET-*mpp meter* gemessenen Daten. Hierzu zählen der MPP-Strom  $I_{MPP}$ , MPP-Spannung  $U_{MPP}$ , Kurzschlussstrom  $I_K$ , Leerlaufspannung  $U_0$ , Modultemperatur  $T_{Mod}$ , Bestrahlungsstärke auf geneigter Ebene  $G_t$  und die I/U-Kennlinie. Sind diese Einstellungen vorgenommen, kann als weiteres eingestellt werden, ob ein schon vorhandenes Modell erneut oder mit neuen Datensätzen getestet werden soll. Soll ein neues Modell berechnet werden, werden die Modellparameter gespeichert. Eine Vorgabe des Trainingszeitraums und des Testzeitraumes ist möglich. Bei Bedarf können auch beide den gleichen Zeitraum umfassen. Die Software sucht dann automatisch für Trainings- und Testphase verschiedene Datensätze aus der Datenbank heraus. Auf der linken Seite der grafischen Oberfläche lassen sich Einstrahlung und Temperatur auswählen. Da das Modell bisher nur auf die Bestrahlungsstärke auf Modulebene und die Modultemperatur getestet wurde, sind die beiden anderen Eingangsparameter zurzeit noch nicht verwendbar. Genauso verhält es sich mit den weiteren optionalen Eingabeparametern (Einfallswinkel, Datum, Zeit). Durch Betätigen des Buttons Start wird die Parametrisierung gestartet. War diese erfolgreich, gibt die Software eine entsprechende Nachricht aus. Die Ergebnisse werden an einigen ausgewählten I/U-Kennlinien grafisch dargestellt (ähnlich wie in den Abbildungen 5.2.13 und 5.2.15). Das Ergebnis ist eine Übertragungsfunktion in Form einer Matrix. Diese kann, wenn entsprechende Schnittstellen geschaffen werden, in bestehende Simulationsprogramme eingesetzt werden. Leider verfügen die meisten bisher auf dem Markt verfügbaren Simulationsprogramme nicht über solche Schnittstellen.

## 7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In dieser Arbeit wurde ein neu entwickeltes Simulationsmodell für dünnsschichtige Photovoltaik-Technologien vorgestellt. Zur Herleitung von Simulationsmodellen ist es notwendig, reale Messdaten zu kennen, um einerseits eine Modellierung vornehmen zu können und andererseits das neu entwickelte Modell zu validieren. Die Validierung beinhaltet auch einen Test zur Generalisierung, also die Feststellung, ob das Modell auch in Betriebszuständen funktioniert, die für die Modellierung nicht verwendet wurden. Daraus lässt sich eine Aussage darüber treffen, ob das Modell zwischen bekannten Stützstellen quasi interpolieren kann. Im konkreten Fall waren als Modellierungs- bzw. Validierungsdaten gemessene I/U-Kennlinien nötig. Diese wurden mit einem neuartigen Messgerät, dem sogenannten *ISSET-mpp meter*, ermittelt. Den Abschluss der Arbeit bilden ein Verfahren und eine Vorrichtung zur automatisierten Parametrisierung dieses neuartigen Modells. Die Vorrichtung besteht aus dem neuen Messgerät (*ISSET-mpp meter*) und einer Software, mit der eine Konfiguration des Messgerätes möglich ist, die dieses steuert und die Messdaten in einer SQL-Datenbank ablegt. Das Verfahren verwendet alle neuen Komponenten und eine weitere Software, um quasi automatisiert das Modell zu parametrisieren.

Das *ISSET-mpp meter* ist ein Messgerät zur Ermittlung charakteristischer Werte und der gesamten I/U-Kennlinie von PV-Modulen und kleinen Modulverbünden bis 250 Wp bzw. 500 Wp (Boostervariante). Das Messgerät ist kalibriert und beliebig kombinier- und erweiterbar mit weiteren *ISSET-mpp metern*. Es ist einsetzbar über einen beliebig langen Zeitraum, der auch mehrere Jahre andauern kann. Die Ausgabe der Messdaten erfolgt digital über eine RS232-Schnittstelle und gleichzeitig analog per Spannungsausgänge, welche sich im Bereich von 0-2 V bewegen. Mit den analogen Ausgängen ergibt sich die Möglichkeit, das Messgerät in ein schon vorhandenes System einzubinden. Die per RS232-Schnittstelle digital ausgegebenen Daten können mittels eines Schnittstellenwandlers in ein RS485-Signal umgewandelt werden. Damit eröffnet sich die Möglichkeit, mehrere dieser Messgeräte an einem Strang (Bus) zu betreiben. Bis zu 31 dieser sogenannten Knoten können an einem Strang realisiert werden. Sollte diese Anzahl nicht ausreichen, kann ein zweiter Strang aufgebaut werden. Dazu ist lediglich eine zweite RS485-Schnittstelle am Steuerrechner (zum Beispiel ein PC oder Server) nötig. Die Software zur Konfiguration und Steuerung der *ISSET-mpp meter* kann theoretisch beliebig viele Stränge verwalten. Begrenzend sind lediglich die nicht beliebig erweiterbare Anzahl an RS485-Schnittstellen am Steuerrechner und die Rechenleistung des Rechners selbst.

(wobei der zweite Punkt nahezu ausgeschlossen werden kann bei modernen Rechnern). Der Schnittstellenwandler, welcher am Fraunhofer IWES entwickelt wurde, kann zusätzlich zur Schnittstellenwandlung die Messdaten zwischenspeichern. Mittels eines Broadcast-Befehls über alle Stränge an die angeschlossenen Konten wird an allen ISET-*mpp metern* zeitgleich (per Interrupt) eine Messung angestoßen. Auf diese Weise werden die Messdaten mehrerer Module vergleichbar. Die angeschlossenen ISET-*mpp meter* senden nach erfolgter Messung die Daten sofort an den Schnittstellenwandler, wo diese zunächst zwischengespeichert werden. Die entwickelte Software liest sodann die Schnittstellenwandler hintereinander aus und speichert die Daten in einer SQL-Datenbank.

Das neuartige Simulationsmodell basiert auf der Verwendung künstlicher neuronaler Netze (KNN). Damit reiht es sich in die sogenannten numerischen bzw. empirischen Modelle ein. Diese können zwar genauso gute oder, wie im konkreten Fall, sogar bessere Ergebnisse erreichen, lassen aber keine direkte physikalische Deutung zu. Auch für die Herleitung können keine physikalischen Gegebenheiten verwendet werden. Mehrere Varianten des neuen Modells wurden in dieser Arbeit vorgestellt. Die Vor- und Nachteile wurden ausgearbeitet, um zum Schluss ein Modell zu haben, welches die Problemstellung mit zufriedenstellenden Ergebnissen lösen kann. Das neuartige Modell wurde mit Messdaten eines CIS-Moduls parametrisiert und getestet. Dazu wurden Messdaten aus dem Zeitraum von Juni bis Dezember 2009 verwendet. Insgesamt standen mehr als 68.000 Kennlinien zur Verfügung. Mit einer Anzahl von 336 Kennlinien wurde das Modell parametrisiert bzw. trainiert und mit einer weiteren Anzahl an Kennlinien getestet. Unter diesem zweiten Satz von Kennlinien ist keine dabei, welche zum Trainieren bereits verwendet wurde. Für eine noch bessere Generalisierung des Modells wurden alle zur Verfügung stehenden Kennlinien simuliert und mit den realen Messdaten verglichen. Mit den in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnissen kann gesagt werden, dass das Modell zumindest für die dünnsschichtige Photovoltaik-Technologie CIS funktioniert und sehr gute Ergebnisse erzielt.

Das neue Modell und die neue Messtechnik wurden zu einer Einheit zusammengefügt, um das Modell quasi automatisiert zu parametrisieren. Diese Kombination aus Modell und Messtechnik (Verfahren und Vorrichtung) wurde zu einem Patent angemeldet ([Pat-09] "*Verfahren und Vorrichtung zur Ermittlung der Kennlinien von photovoltaischen Bauelementen*"). Mit mehreren dieser Vorrichtungen lassen sich Messdaten und Modelle gleichzeitig erstellen und vergleichen. Die mögliche Anzahl wurde bereits weiter oben diskutiert. Zwei Programme (Software) werden dazu verwendet, das Modell zu parametrisieren. Das ers-

te Programm steuert die ISET-*mpp meter* und lässt eine Konfiguration dieser zu, wie zum Beispiel Einstellung der Anzahl der ISET-*mpp meter*, Speicherort der Messdaten oder Messintervall. Das zweite Programm parametrisiert nach Anwendungsvorgaben quasi automatisiert das Modell.

In Zukunft soll das Modell an weiteren dünnsschichtigen Technologien getestet werden. Geplant sind zunächst die Technologien CdTe und a-Si. Die nötigen Daten für diese Versuche standen bis zum Schluss der Arbeit noch nicht zur Verfügung. Des Weiteren soll aber auch gezeigt werden, dass das Modell für dickschichtige Technologien, wie zum Beispiel c-Si oder mc-Si (polykristallines Silizium), anwendbar ist. Weitere Versuche sollen zeigen, ob mehr als fünf mit dem KNN trainierten Punkte auf der Kennlinie eine Verbesserung bringen. In Frage kämen zum Beispiel sieben oder neun. Die ungerade Anzahl ergibt sich daraus, dass der MPP von der Gesamtanzahl immer in der Mitte liegt und nach rechts und links die gleiche Anzahl an Punkten existiert. Vorstellbar wären aber auch unsymmetrische Lösungen. Da die Qualität der Kennlinie im Bereich vom Kurzschluss bis zum MPP schon jetzt sehr gute Ergebnisse erreicht, könnten an dieser Stelle weniger Punkte zum Einsatz kommen. Ob sich diese Idee allerdings auf andere Technologien erweitern lässt oder nur auf diese eine beschränkt ist, muss geprüft werden. Die Technologie a-Si zum Beispiel hat, im Vergleich zu anderen Technologien, einen eher kleinen Füllfaktor. Diese Tatsache könnte den wenigen Punkten im Bereich vom Kurzschlussstrom bis zum MPP entgegenstehen.

Neben dem Test der Variation der Punkteanzahl der KNN zur Verbesserung der Qualität sollten weitere Eingangsgrößen getestet werden. Wie in Kapitel 6 bereits vorgeschlagen wurde, könnten die Globalstrahlung, Diffusstrahlung, der Quotient aus Diffusstrahlung und Globalstrahlung (relativer Diffusanteil), die Umgebungstemperatur, der Einstrahlungswinkel, das Datum und die Zeit zur Anwendung kommen. Aus diesen Vorschlägen müssen Kombinationen getestet werden. Sicherlich dürfen nicht zu viele Eingangsgrößen gewählt werden, da das dazu führen kann, dass das Modell nicht mehr die gewünschten Ergebnisse liefert. Die Eingangsgrößen könnten sich zueinander zu stochastisch verhalten. Eine sicherlich gute Variante, die zu testen wäre, sind die zusätzlichen Eingänge: relativer Diffusanteil, der Einfallswinkel, das Datum und die Zeit. Aus Datum und Zeit kann bei bekannten Standortkoordinaten die immer aktuelle vorherrschende AirMass (AM) berechnet werden. Mit dieser Kombination könnte es möglich sein, auf indirektem Wege spektrale Effekte mit einzubeziehen. Ob es mit einem Verfahren möglich ist, auch die Rückwärtskennlinie zu ermitteln und

mit einem KNN zu simulieren, soll als Anregung für weitere Experimente so stehen bleiben. Ein eher unerwünschter Effekt bei a-Si-Technologien oder mehrschichtigen Zellen mit a-Si ist der sogenannte Annealing-Effekt. Dieser hat zur Folge, dass das Modul bei niedrigen Temperaturen im Wirkungsgrad schlechter wird und bei steigenden Temperaturen wieder besser (Sommer-Winter). Dieser Effekt entsteht durch Änderungen der amorphen Struktur. Man spricht vom Erkranken und Ausheilen der Struktur. Wird dieser Effekt über einen längeren Zeitraum (mehrere Jahre) aufgetragen, so ergibt sich eine sinusartige Bewegung der Effizienz. Ein Einbezug dieses Effekts in das Modell mit einer Modellierung durch KNN sollte getestet werden.

Die Ergebnisse dieser Arbeit haben gezeigt, dass eine Simulation der dünn-schichtigen Photovoltaik-Technologie CIS möglich ist. Mit der Implementierung dieses Modells in vorhandene Simulationsprogramme wäre zum Beispiel eine genauere Prognose von Energieerträgen von Photovoltaikanlagen möglich. Leider fehlen bei den meisten heute vorhandenen Simulationsprogrammen entsprechende Schnittstellen, um neue Modelle einzelner Komponenten zu implementieren. Bleibt zu hoffen, dass die Hersteller solcher Programme entsprechende Schnittstellen in Zukunft an ihren Programmen zur Verfügung stellen. Denn jeder Schritt, der zur Verbesserung und Ausbreitung der Erneuerbaren Energien beiträgt, ist ein Schritt in eine zukünftige Welt ohne Treibhauseffekt, die das Leben unserer Nachkommen sichert.



## 8 ANHANG

### 8.1 ISET-MPP METER KALIBRIERSCHEIN (NR. 10-047-141860) [IWES-10]

#### WERKS-KALIBRIERSCHEIN

Kalibrierschein-Nr.:	10-047-141860	Dieser Kalibrierschein dokumentiert die Rückführbarkeit der verwendeten Geräte auf Normale der Physikalisch Technischen Bundesanstalt (PTB) oder anderer internationaler Staatseinstitute zur Darstellung der physikalischen Einheiten in Übereinstimmung mit dem internationalen Einheitensystem (SI).
Gegenstand:	PV-Kennlinienmessgerät	
Hersteller:		
Typ:	ISET-mpp meter V4.10	
Seriennummer:	141860P3109	Die Kalibrierung erfolgt auf Grundlage interner Arbeitsanweisungen sowie in Anlehnung an anerkannte Normen und Richtlinien der PTB.
Auftraggeber:		Die Abschätzung der Messungenauigkeit für die Kalibrierung gemäß GUM wurde vor der Kalibrierung durchgeführt.
Datum der Kalibrierung:	07.05.10	
Zustand des Kalibriergegenstands:	Der Kalibriergegenstand war zum Zeitpunkt der Kalibrierung innerhalb der Spezifikation	
Anzahl der Seiten des Kalibrierscheins:	9	

Die Kalibrierergebnisse beziehen sich nur auf den kalibrierten Gegenstand. Eine Übertragung der Kalibrierergebnisse auf andere Geräte ist nicht zulässig.

Dieser Kalibrierschein darf nur vollständig und unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge oder Änderungen bedürfen der Genehmigung des Gruppenleiters. Kalibrierscheine ohne Unterschrift haben keine Gültigkeit.

Geprüft: \_\_\_\_\_  
Datum Dr. Ing. N. Henze  
Gruppenleiter Anlagen- und Messtechnik

Fraunhofer Institut für Windenergie und  
Energiesystemtechnik (IWES)

Königstor 59  
34119 Kassel

Tel.: (0561) 7294-254  
Fax: (0561) 7294-200

Kalibrierschein-Nr.: 10-047-141860

**1. Kalibrierverfahren**

Die Kalibrierung erfolgte durch Vergleich von richtigem Wert und Anzeigewert.

**2. Messunsicherheit des Kalibrierverfahrens**

Die Messunsicherheiten des Kalibrierverfahrens stellen erweiterte Messunsicherheiten (wenn nicht anders angegeben:  $k=2$ , 95 % Vertrauensbereich) dar.

**3. Umgebungsbedingungen**

Temperatur: +15 bis +35 °C  
Luftdruck: 860 bis 1060 hPa  
Luftfeuchte: 25 bis 75 % rel.

**4. Messtechnische Rückführung**

Verwendete Prüfgeräte (Gebrauchsnormale):	Typ	Seriennummer / Inventarnummer	Kalibrierschein Nummer:	Rekalibrierung erforderlich am:
34970A, Agilent	Datenlogger	MY44020955	3772 DKD-K-07901 08-10	01.06.2010
Siemens B1046	Multimeter	W483905DD	3771 DKD-K-07901 08-10	01.06.2010

Kalibrierschein-Nr.: 10-047-141860

## 5. Messergebnisse

### 5.1. Kalibrierung der PV-Spannungsmessung

richtiger Wert / V	Anzeigewert / V	relative Abweichung / %	absolute Abweichung / V	zulässige Toleranz / V	erweiterte Mess-unsicherheit / V
0,0000	0,02	- *	0,0200	+/- 0,69361	+/- 0,040
4,9940	5,00	0,1201	0,0060	+/- 0,69361	+/- 0,040
9,9788	9,98	0,0120	0,0012	+/- 0,69361	+/- 0,040
14,9646	14,96	-0,0307	-0,0046	+/- 0,69361	+/- 0,040
20,0181	20,02	0,0095	0,0019	+/- 0,69361	+/- 0,040
29,9924	29,99	-0,0080	-0,0024	+/- 0,69361	+/- 0,040
40,0252	40,02	-0,0130	-0,0052	+/- 0,69361	+/- 0,040
49,9985	50,00	0,0030	0,0015	+/- 0,69361	+/- 0,040
60,0407	60,04	-0,0012	-0,0007	+/- 0,69361	+/- 0,040
70,0172	70,01	-0,0103	-0,0072	+/- 0,69361	+/- 0,040
79,9907	79,98	-0,0134	-0,0107	+/- 0,69361	+/- 0,040
90,0333	90,03	-0,0037	-0,0033	+/- 0,69361	+/- 0,040
100,0074	100,01	0,0026	0,0026	+/- 0,69361	+/- 0,040
110,0403	110,04	-0,0003	-0,0003	+/- 0,69361	+/- 0,041
120,0140	120,01	-0,0033	-0,0040	+/- 0,69361	+/- 0,042
129,9881	129,98	-0,0062	-0,0081	+/- 0,69361	+/- 0,042
140,0273	140,02	-0,0052	-0,0073	+/- 0,69361	+/- 0,042
150,0694	150,07	0,0004	0,0006	+/- 0,69361	+/- 0,042
160,0432	160,04	-0,0020	-0,0032	+/- 0,69361	+/- 0,042
170,0170	170,02	0,0018	0,0030	+/- 0,69361	+/- 0,042
180,0495	180,05	0,0003	0,0005	+/- 0,69361	+/- 0,042
190,0921	190,09	-0,0011	-0,0021	+/- 0,69361	+/- 0,042
199,9947	199,99	-0,0024	-0,0047	+/- 0,69361	+/- 0,042
210,0370	210,04	0,0014	0,0030	+/- 0,69361	+/- 0,042
220,0799	220,08	0,0000	0,0001	+/- 0,69361	+/- 0,043
230,0501	230,06	0,0043	0,0099	+/- 0,69361	+/- 0,043
240,0210	240,02	-0,0004	-0,0010	+/- 0,69361	+/- 0,043
250,0542	250,06	0,0023	0,0058	+/- 0,69361	+/- 0,043

Kalibrierschein-Nr.: 10-047-141860

## 5.2. Kalibrierung der PV-Strommessung

richtiger Wert / A	Anzeigewert / A	relative Abweichung / %	absolute Abweichung / A	zulässige Toleranz / A	erweiterte Messunsicherheit / A
-0,0009	0,000	- *	0,0009	+/- 0,06888	+/- 0,0016
0,2023	0,203	0,3460	0,0007	+/- 0,06888	+/- 0,0016
0,3982	0,399	0,2009	0,0008	+/- 0,06888	+/- 0,0016
0,6069	0,607	0,0165	0,0001	+/- 0,06888	+/- 0,0017
0,8026	0,803	0,0498	0,0004	+/- 0,06888	+/- 0,0018
0,9993	0,999	-0,0300	-0,0003	+/- 0,06888	+/- 0,0020
1,2071	1,207	-0,0083	-0,0001	+/- 0,06888	+/- 0,0021
1,4037	1,404	0,0214	0,0003	+/- 0,06888	+/- 0,0023
1,5993	1,598	-0,0813	-0,0013	+/- 0,06888	+/- 0,0024
1,8079	1,809	0,0608	0,0011	+/- 0,06888	+/- 0,0026
2,0041	2,005	0,0449	0,0009	+/- 0,06888	+/- 0,0028
2,9985	2,999	0,0167	0,0005	+/- 0,06888	+/- 0,0038
4,0025	4,004	0,0375	0,0015	+/- 0,06888	+/- 0,0049
5,0082	5,010	0,0359	0,0018	+/- 0,06888	+/- 0,0060
6,0018	6,003	0,0200	0,0012	+/- 0,06888	+/- 0,0071
7,0044	7,005	0,0086	0,0006	+/- 0,06888	+/- 0,0082
7,9983	7,999	0,0088	0,0007	+/- 0,06888	+/- 0,0093
9,0033	9,003	-0,0033	-0,0003	+/- 0,06888	+/- 0,0104
10,0089	10,006	-0,0290	-0,0029	+/- 0,06888	+/- 0,0116

## 5.3. Kalibrierung der analogen Ausgangsspannungen

Kalibrierung von Analogausgabe  $U_0$ 

richtiger Wert / V	Anzeigewert / V	relative Abweichung / %	absolute Abweichung / V	zulässige Toleranz / V	erweiterte Messunsicherheit / V
0,00	0,0005	- *	0,0005	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,10	0,0980	-2,0000	-0,0020	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,20	0,1980	-1,0000	-0,0020	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,30	0,2982	-0,6000	-0,0018	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,40	0,3982	-0,4500	-0,0018	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,50	0,4984	-0,3200	-0,0016	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,60	0,5985	-0,2500	-0,0015	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,70	0,6987	-0,1857	-0,0013	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,80	0,7988	-0,1500	-0,0012	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,90	0,8989	-0,1222	-0,0011	+/- 0,008	+/- 0,00061
1,00	0,9993	-0,0700	-0,0007	+/- 0,008	+/- 0,00061
1,10	1,0989	-0,1000	-0,0011	+/- 0,008	+/- 0,00061
1,20	1,1991	-0,0750	-0,0009	+/- 0,008	+/- 0,00061
1,30	1,2993	-0,0538	-0,0007	+/- 0,008	+/- 0,00061
1,40	1,3996	-0,0286	-0,0004	+/- 0,008	+/- 0,00061
1,50	1,4995	-0,0333	-0,0005	+/- 0,008	+/- 0,00061
2,00	2,0007	0,0350	0,0007	+/- 0,008	+/- 0,00061

Kalibrierschein-Nr.: 10-047-141860

**Kalibrierung von Analogausgabe I<sub>k</sub>**

richtiger Wert / V	Anzeigewert / V	relative Abweichung / %	absolute Abweichung / V	zulässige Toleranz / V	erweiterte Messunsicherheit / V
0,00	0,0008	- *	0,0008	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,10	0,0990	-1,0000	-0,0010	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,20	0,1992	-0,4000	-0,0008	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,30	0,2994	-0,2000	-0,0006	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,40	0,3996	-0,1000	-0,0004	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,50	0,4996	-0,0800	-0,0004	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,60	0,5997	-0,0500	-0,0003	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,70	0,6999	-0,0143	-0,0001	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,80	0,7994	-0,0750	-0,0006	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,90	0,8994	-0,0667	-0,0006	+/- 0,008	+/- 0,00061
1,00	0,9997	-0,0300	-0,0003	+/- 0,008	+/- 0,00061
1,10	1,0999	-0,0091	-0,0001	+/- 0,008	+/- 0,00061
1,20	1,2001	0,0083	0,0001	+/- 0,008	+/- 0,00061
1,30	1,3002	0,0154	0,0002	+/- 0,008	+/- 0,00061
1,40	1,4004	0,0286	0,0004	+/- 0,008	+/- 0,00061
1,50	1,4998	-0,0133	-0,0002	+/- 0,008	+/- 0,00061
2,00	2,0005	0,0250	0,0005	+/- 0,008	+/- 0,00061

**Kalibrierung von Analogausgabe I<sub>MPP</sub>**

richtiger Wert / V	Anzeigewert / V	relative Abweichung / %	absolute Abweichung / V	zulässige Toleranz / V	erweiterte Messunsicherheit / V
0,00	0,0010	- *	0,0010	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,10	0,0991	-0,9000	-0,0009	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,20	0,1990	-0,5000	-0,0010	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,30	0,2992	-0,2667	-0,0008	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,40	0,3994	-0,1500	-0,0006	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,50	0,4995	-0,1000	-0,0005	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,60	0,5990	-0,1667	-0,0010	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,70	0,6993	-0,1000	-0,0007	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,80	0,7995	-0,0625	-0,0005	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,90	0,8994	-0,0667	-0,0006	+/- 0,008	+/- 0,00061
1,00	0,9995	-0,0500	-0,0005	+/- 0,008	+/- 0,00061
1,10	1,0995	-0,0455	-0,0005	+/- 0,008	+/- 0,00061
1,20	1,1997	-0,0250	-0,0003	+/- 0,008	+/- 0,00061
1,30	1,2997	-0,0231	-0,0003	+/- 0,008	+/- 0,00061
1,40	1,3999	-0,0071	-0,0001	+/- 0,008	+/- 0,00061
1,50	1,5002	0,0133	0,0002	+/- 0,008	+/- 0,00061
2,00	2,0006	0,0300	0,0006	+/- 0,008	+/- 0,00061

Kalibrierschein-Nr.: 10-047-141860

**Kalibrierung von Analogausgabe  $U_{MPP}$** 

richtiger Wert / V	Anzeigewert / V	relative Abweichung / %	absolute Abweichung / V	zulässige Toleranz / V	erweiterte Messunsicherheit / V
0,00	0,0012	- *	0,0012	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,10	0,0973	-2,7000	-0,0027	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,20	0,1972	-1,4000	-0,0028	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,30	0,2974	-0,8667	-0,0026	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,40	0,3982	-0,4500	-0,0018	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,50	0,4982	-0,3600	-0,0018	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,60	0,5983	-0,2833	-0,0017	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,70	0,6984	-0,2286	-0,0016	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,80	0,7984	-0,2000	-0,0016	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,90	0,8985	-0,1667	-0,0015	+/- 0,008	+/- 0,00061
1,00	0,9986	-0,1400	-0,0014	+/- 0,008	+/- 0,00061
1,10	1,0984	-0,1455	-0,0016	+/- 0,008	+/- 0,00061
1,20	1,1988	-0,1000	-0,0012	+/- 0,008	+/- 0,00061
1,30	1,2990	-0,0769	-0,0010	+/- 0,008	+/- 0,00061
1,40	1,3992	-0,0571	-0,0008	+/- 0,008	+/- 0,00061
1,50	1,4993	-0,0467	-0,0007	+/- 0,008	+/- 0,00061
2,00	2,0004	0,0200	0,0004	+/- 0,008	+/- 0,00061

**Kalibrierung von Analogausgabe  $T_{Modul}$** 

richtiger Wert / V	Anzeigewert / V	relative Abweichung / %	absolute Abweichung / V	zulässige Toleranz / V	erweiterte Messunsicherheit / V
0,00	0,0008	- *	0,0008	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,10	0,0990	-1,0000	-0,0010	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,20	0,1990	-0,5000	-0,0010	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,30	0,2991	-0,3000	-0,0009	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,40	0,3989	-0,2750	-0,0011	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,50	0,4990	-0,2000	-0,0010	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,60	0,5991	-0,1500	-0,0009	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,70	0,6992	-0,1143	-0,0008	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,80	0,7992	-0,1000	-0,0008	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,90	0,8993	-0,0778	-0,0007	+/- 0,008	+/- 0,00061
1,00	0,9995	-0,0500	-0,0005	+/- 0,008	+/- 0,00061
1,10	1,0993	-0,0636	-0,0007	+/- 0,008	+/- 0,00061
1,20	1,1995	-0,0417	-0,0005	+/- 0,008	+/- 0,00061
1,30	1,2994	-0,0462	-0,0006	+/- 0,008	+/- 0,00061
1,40	1,3994	-0,0429	-0,0006	+/- 0,008	+/- 0,00061
1,50	1,4997	-0,0200	-0,0003	+/- 0,008	+/- 0,00061
2,00	2,0006	0,0300	0,0006	+/- 0,008	+/- 0,00061

Kalibrierschein-Nr.: 10-047-141860

**Kalibrierung von Analogausgabe Reserve 1**

richtiger Wert / V	Anzeigewert / V	relative Abweichung / %	absolute Abweichung / V	zulässige Toleranz / V	erweiterte Messunsicherheit / V
0,00	0,0010	- *	0,0010	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,10	0,0988	-1,2000	-0,0012	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,20	0,1988	-0,6000	-0,0012	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,30	0,2990	-0,3333	-0,0010	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,40	0,3990	-0,2500	-0,0010	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,50	0,4989	-0,2200	-0,0011	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,60	0,5989	-0,1833	-0,0011	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,70	0,6991	-0,1286	-0,0009	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,80	0,7993	-0,0875	-0,0007	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,90	0,8992	-0,0889	-0,0008	+/- 0,008	+/- 0,00061
1,00	0,9999	-0,0100	-0,0001	+/- 0,008	+/- 0,00061
1,10	1,1000	0,0000	0,0000	+/- 0,008	+/- 0,00061
1,20	1,2000	0,0000	0,0000	+/- 0,008	+/- 0,00061
1,30	1,3001	0,0077	0,0001	+/- 0,008	+/- 0,00061
1,40	1,4004	0,0286	0,0004	+/- 0,008	+/- 0,00061
1,50	1,5004	0,0267	0,0004	+/- 0,008	+/- 0,00061
2,00	2,0002	0,0100	0,0002	+/- 0,008	+/- 0,00061

**Kalibrierung von Analogausgabe Reserve 2**

richtiger Wert / V	Anzeigewert / V	relative Abweichung / %	absolute Abweichung / V	zulässige Toleranz / V	erweiterte Messunsicherheit / V
0,00	0,0014	- *	0,0014	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,10	0,0983	-1,7000	-0,0017	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,20	0,1985	-0,7500	-0,0015	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,30	0,2985	-0,5000	-0,0015	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,40	0,3986	-0,3500	-0,0014	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,50	0,4988	-0,2400	-0,0012	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,60	0,5991	-0,1500	-0,0009	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,70	0,6998	-0,0286	-0,0002	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,80	0,7998	-0,0250	-0,0002	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,90	0,8998	-0,0222	-0,0002	+/- 0,008	+/- 0,00061
1,00	0,9999	-0,0100	-0,0001	+/- 0,008	+/- 0,00061
1,10	1,1000	0,0000	0,0000	+/- 0,008	+/- 0,00061
1,20	1,1999	-0,0083	-0,0001	+/- 0,008	+/- 0,00061
1,30	1,3000	0,0000	0,0000	+/- 0,008	+/- 0,00061
1,40	1,4000	0,0000	0,0000	+/- 0,008	+/- 0,00061
1,50	1,5002	0,0133	0,0002	+/- 0,008	+/- 0,00061
2,00	2,0002	0,0100	0,0002	+/- 0,008	+/- 0,00061

Kalibrierschein-Nr.: 10-047-141860

**Kalibrierung von Analogausgabe Reserve 3**

richtiger Wert / V	Anzeigewert / V	relative Abweichung / %	absolute Abweichung / V	zulässige Toleranz / V	erweiterte Messunsicherheit / V
0,00	0,0013	- *	0,0013	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,10	0,0983	-1,7000	-0,0017	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,20	0,1983	-0,8500	-0,0017	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,30	0,2986	-0,4667	-0,0014	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,40	0,3987	-0,3250	-0,0013	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,50	0,4994	-0,1200	-0,0006	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,60	0,5995	-0,0833	-0,0005	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,70	0,6994	-0,0857	-0,0006	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,80	0,7993	-0,0875	-0,0007	+/- 0,008	+/- 0,00061
0,90	0,8994	-0,0667	-0,0006	+/- 0,008	+/- 0,00061
1,00	0,9993	-0,0700	-0,0007	+/- 0,008	+/- 0,00061
1,10	1,0993	-0,0636	-0,0007	+/- 0,008	+/- 0,00061
1,20	1,1994	-0,0500	-0,0006	+/- 0,008	+/- 0,00061
1,30	1,2994	-0,0462	-0,0006	+/- 0,008	+/- 0,00061
1,40	1,3995	-0,0357	-0,0005	+/- 0,008	+/- 0,00061
1,50	1,4996	-0,0267	-0,0004	+/- 0,008	+/- 0,00061
2,00	2,0004	0,0200	0,0004	+/- 0,008	+/- 0,00061

**5.4. Kalibrierung des Bestrahlungsstärke-Eingangs**

richtiger Wert / mV	Anzeigewert** / mV	relative Abweichung / %	absolute Abweichung / mV	zulässige Toleranz / mV	erweiterte Messunsicherheit / mV
0,017	0,44	- *	0,423	+/- 0,952	+/- 0,090
10,027	9,90	-1,267	-0,127	+/- 0,952	+/- 0,090
20,023	19,90	-0,614	-0,123	+/- 0,952	+/- 0,090
30,029	29,95	-0,263	-0,079	+/- 0,952	+/- 0,090
40,026	39,96	-0,165	-0,066	+/- 0,952	+/- 0,090
50,034	50,00	-0,068	-0,034	+/- 0,952	+/- 0,090
60,025	60,01	-0,025	-0,015	+/- 0,952	+/- 0,090
70,034	70,01	-0,034	-0,024	+/- 0,952	+/- 0,090
80,032	80,04	0,010	0,008	+/- 0,952	+/- 0,090
90,036	90,07	0,038	0,034	+/- 0,952	+/- 0,090
100,037	100,15	0,113	0,113	+/- 0,952	+/- 0,090
110,036	110,20	0,149	0,164	+/- 0,952	+/- 0,090



Kalibrierschein-Nr.: 10-047-141860

### 5.5. Kalibrierung des Bestrahlungsstärke-PT1000-Eingangs

richtiger Wert / °C	Anzeigewert** / °C	relative Abweichung / %	absolute Abweichung / °C	zulässige Toleranz / °C	erweiterte Messunsicherheit / °C
-19,831	-20,02	0,953	-0,189	+/- 1,000	+/- 0,222
-9,944	-10,02	0,764	-0,076	+/- 1,000	+/- 0,222
-0,054	-0,11	- *	-0,056	+/- 1,000	+/- 0,222
9,949	9,83	-1,196	-0,119	+/- 1,000	+/- 0,222
19,918	19,90	-0,090	-0,018	+/- 1,000	+/- 0,222
29,937	29,94	0,010	0,003	+/- 1,000	+/- 0,222
39,998	40,00	0,005	0,002	+/- 1,000	+/- 0,222
49,977	49,97	-0,014	-0,007	+/- 1,000	+/- 0,222
60,056	60,01	-0,077	-0,046	+/- 1,000	+/- 0,222
70,188	70,07	-0,168	-0,118	+/- 1,000	+/- 0,222
79,668	79,46	-0,261	-0,208	+/- 1,000	+/- 0,222
89,718	89,49	-0,254	-0,228	+/- 1,000	+/- 0,222

### 5.6. Kalibrierung des Modul-PT1000-Eingangs

richtiger Wert / °C	Anzeigewert** / °C	relative Abweichung / %	absolute Abweichung / °C	zulässige Toleranz / °C	erweiterte Messunsicherheit / °C
-19,831	-20,10	1,356	-0,269	+/- 1,000	+/- 0,222
-9,944	-10,14	1,971	-0,196	+/- 1,000	+/- 0,222
-0,054	-0,08	- *	-0,026	+/- 1,000	+/- 0,222
9,949	9,72	-2,302	-0,229	+/- 1,000	+/- 0,222
19,918	19,77	-0,743	-0,148	+/- 1,000	+/- 0,222
29,937	29,82	-0,391	-0,117	+/- 1,000	+/- 0,222
39,998	39,89	-0,270	-0,108	+/- 1,000	+/- 0,222
49,977	49,95	-0,054	-0,027	+/- 1,000	+/- 0,222
60,056	59,95	-0,177	-0,106	+/- 1,000	+/- 0,222
70,188	69,97	-0,311	-0,218	+/- 1,000	+/- 0,222
79,668	79,40	-0,336	-0,268	+/- 1,000	+/- 0,222
89,718	89,38	-0,377	-0,338	+/- 1,000	+/- 0,222

Ende des Kalibrierscheins

\* Richtiger Wert und Anzeigewert liegen nahe bei Null. Mathematisch bedingt liefert die Messung große relative Abweichungen.

\*\* Messwerte, die vom ISET-mpp meter mit einstelliger Genauigkeit bestimmt werden. Die Genauigkeit von zwei Kommastellen ergibt sich aus der Mittelung über 10 Messwerte.

## 8.2 EINFLUSS DER MESSPUNKTEANZAHL AUF DIE MESSUNSICHERHEIT (WEITERE TECHNOLOGIEN)

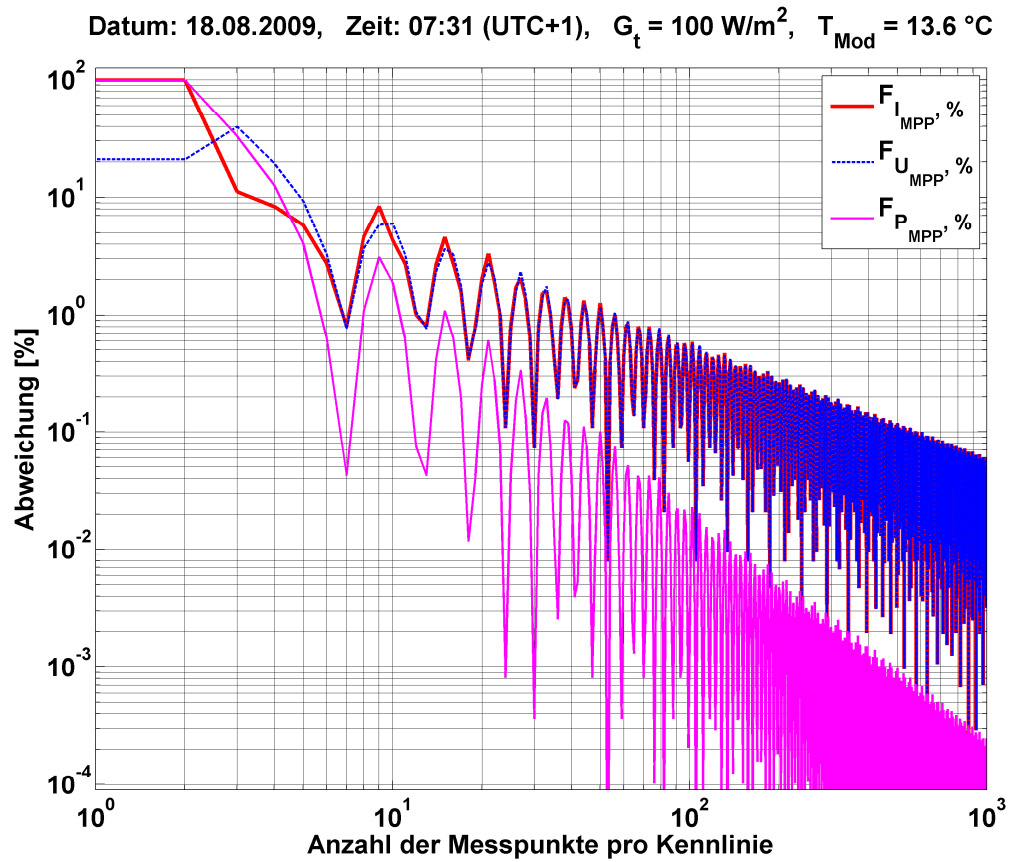


Abbildung 8.2.1: Einfluss der Messpunkteanzahl auf die Messunsicherheit  
(c-Si-Modul bei einer Bestrahlungsstärke ca.  $100 \text{ W/m}^2$  (Schwachlicht))

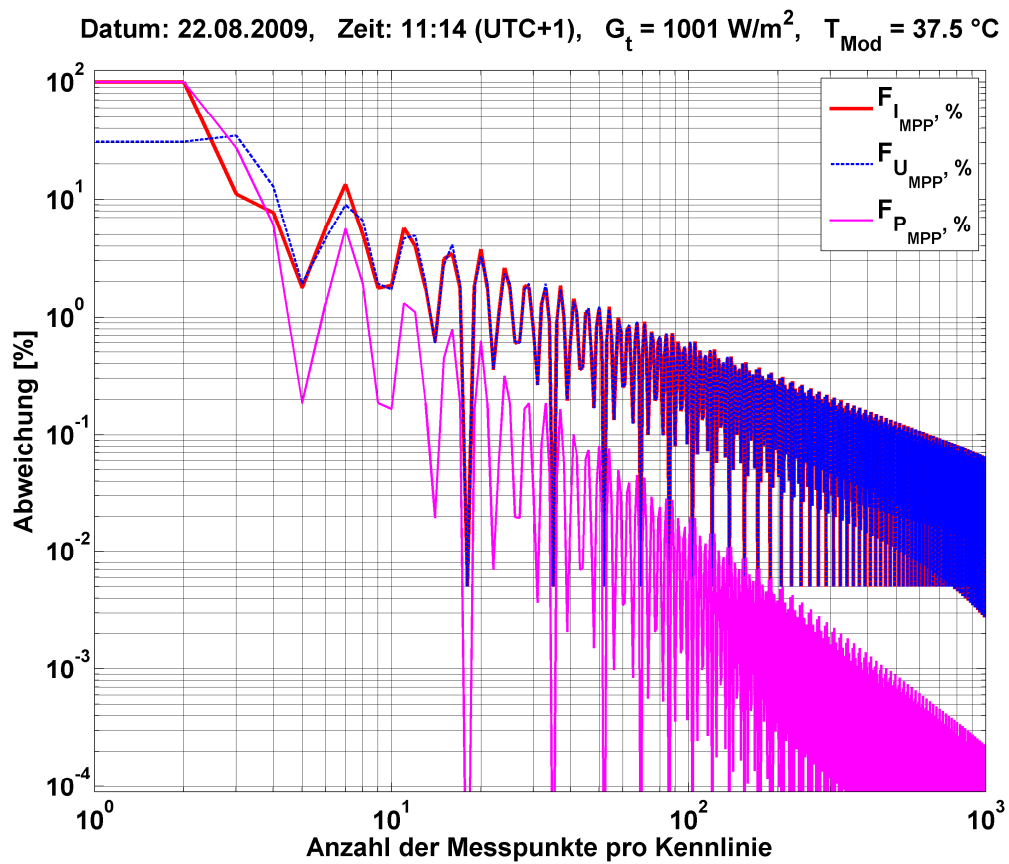


Abbildung 8.2.2: Einfluss der Messpunkteanzahl auf die Messunsicherheit  
(c-Si-Modul bei einer Bestrahlungsstärke ca.  $1000 \text{ W/m}^2$  (Starklicht))

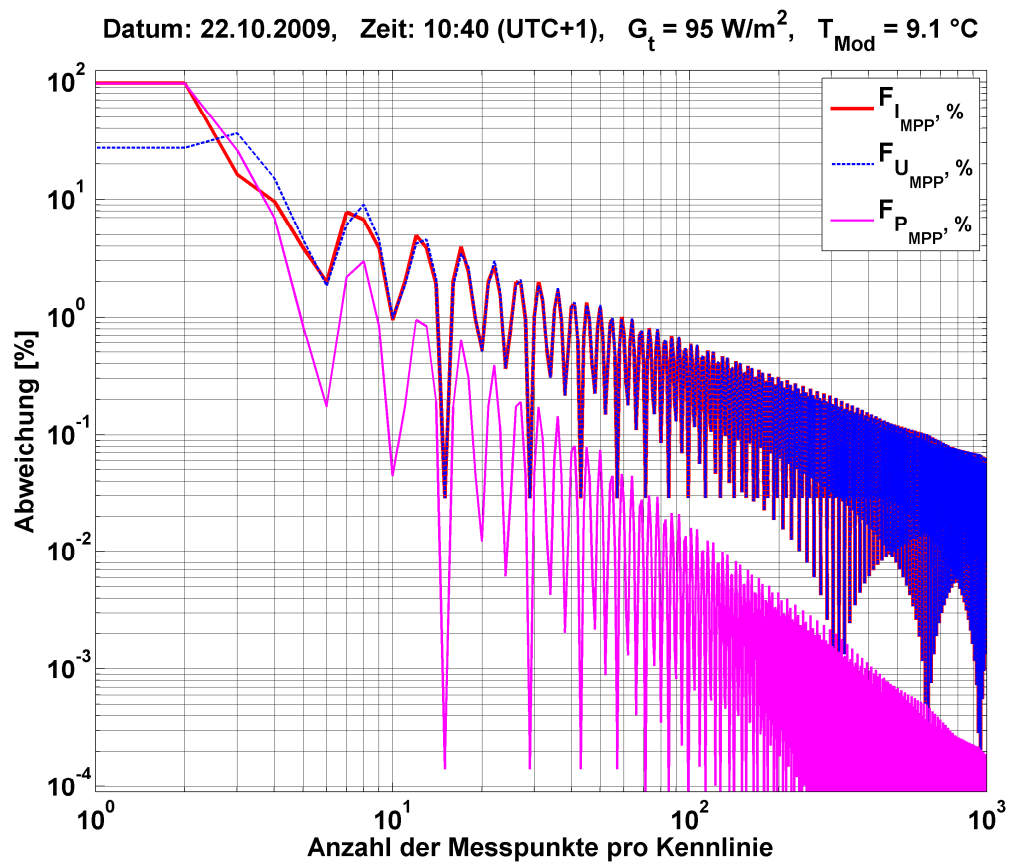


Abbildung 8.2.3: Einfluss der Messpunkteanzahl auf die Messunsicherheit ( $\mu$ -Si-Modul bei einer Bestrahlungsstärke ca.  $100 \text{ W/m}^2$  (Schwachlicht))

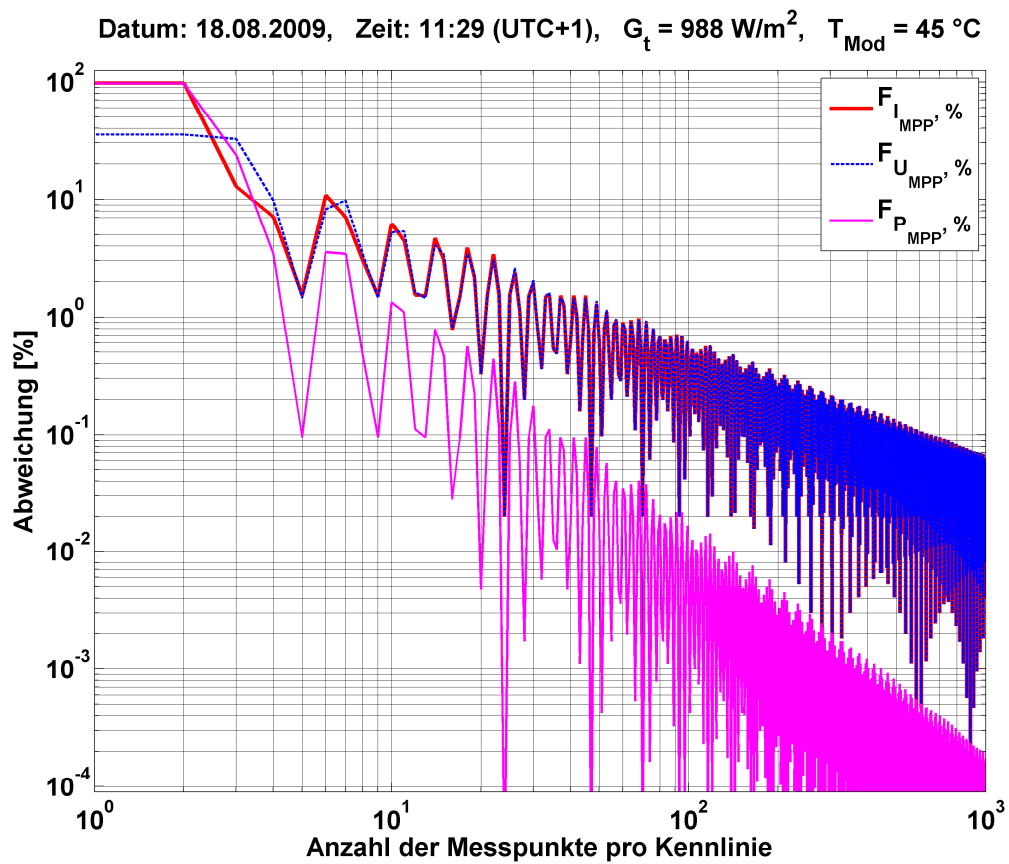


Abbildung 8.2.4: Einfluss der Messpunkteanzahl auf die Messunsicherheit  
( $\mu\text{a-Si}$ -Modul bei einer Bestrahlungsstärke ca.  $1000 \text{ W/m}^2$  (Starklicht))

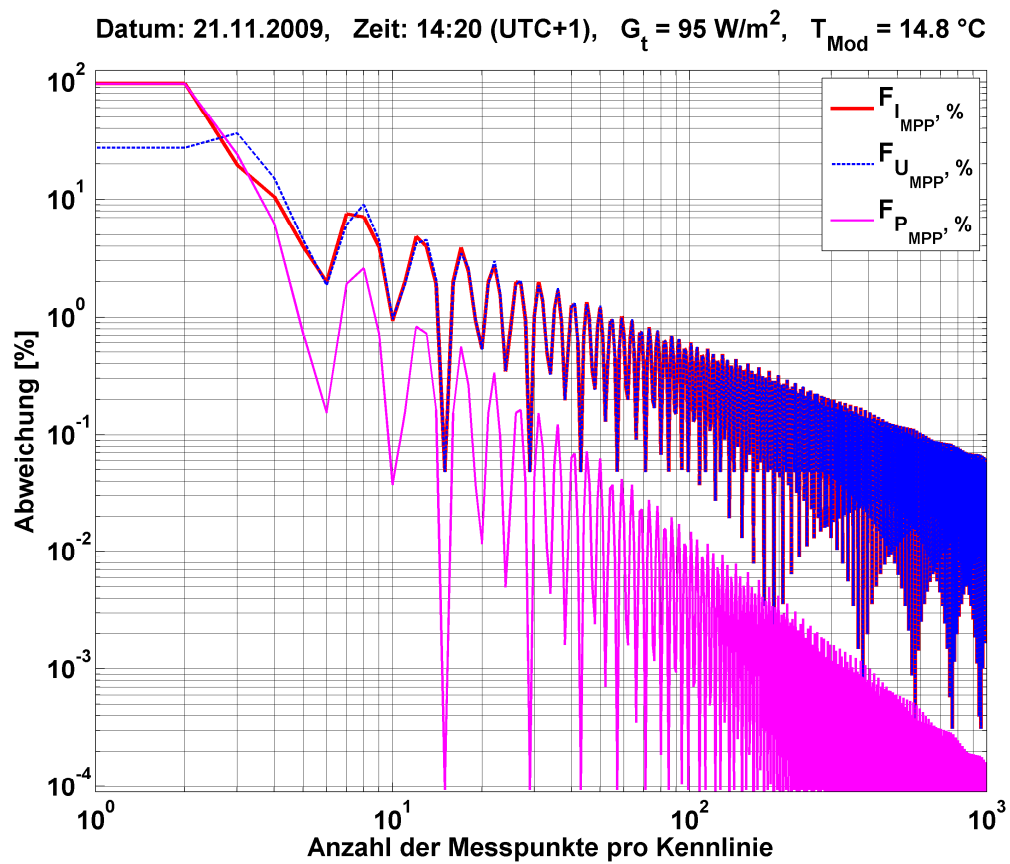


Abbildung 8.2.5: Einfluss der Messpunkteanzahl auf die Messunsicherheit (CdTe-Modul bei einer Bestrahlungsstärke ca.  $100 \text{ W/m}^2$  (Schwachlicht))

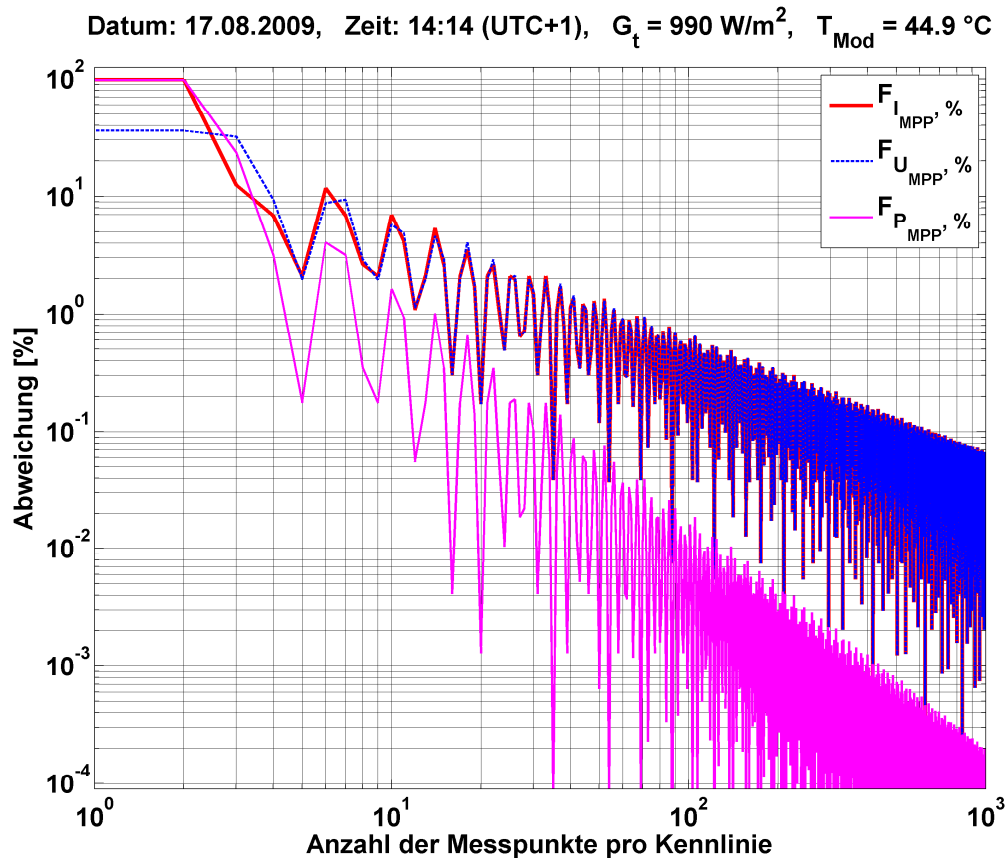


Abbildung 8.2.6: Einfluss der Messpunkteanzahl auf die Messunsicherheit  
(CdTe-Modul bei einer Bestrahlungsstärke ca.  $1000 \text{ W/m}^2$  (Starklicht))

### 8.3 SIMULATIONEN MIT DEM ZWEIDIODENMODELL VERSCHIEDENER TECHNOLOGIEN

In diesem Teil des Anhangs werden die Simulationsergebnisse von vier verschiedenen Technologien (c-Si,  $\mu$ a-Si, CdTe, CIS) mit dem Zweiodenmodell dargestellt. Es werden für jede Technologie immer vier verschiedene Simulationen erstellt. In den jeweils ersten beiden werden nur einzelne Kennlinien betrachtet (jeweils ca. bei  $100 \text{ W/m}^2$  und  $1000 \text{ W/m}^2$ ). Die Modellparameter werden genau auf diese einzelnen Kennlinien gefittet. Das soll zeigen, dass es möglich ist, einzelne Kennlinien verschiedener Technologien mit dem Zweiodenmodell zu simulieren. In der jeweils dritten Abbildung ist die Simulation über einen weiten Bestrahlungsstärkebereich dargestellt. Die dargestellten Kennlinien sind genau die, mit denen die Modellparameter bestimmt wurden. Die jeweils vierte Abbildung zeigt die Simulationsergebnisse mit Kennlinien, die nicht zum Parametrisieren des Zweiodenmodells verwendet wurden.

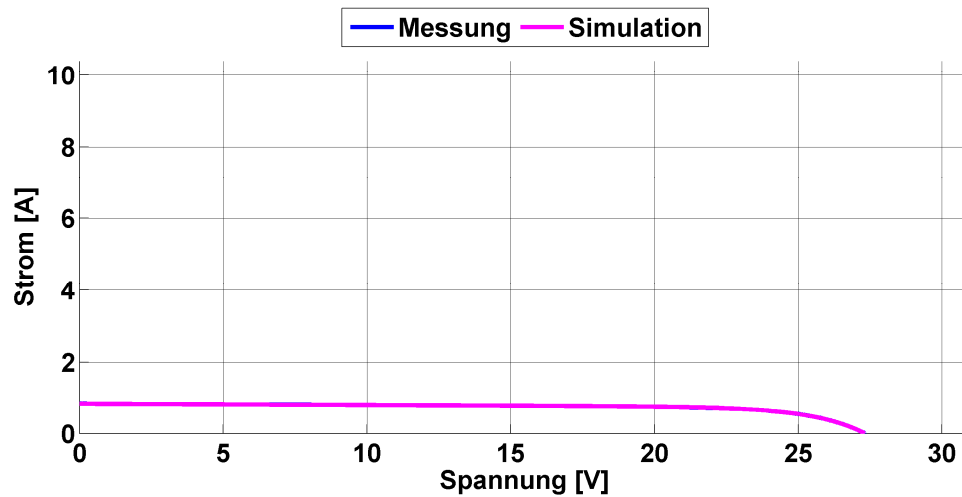


Abbildung 8.3.1: Simulation einer I/U-Kennlinie eines monokristallinen Moduls bei einer Bestrahlungsstärke von ca. 100 W/m<sup>2</sup> mit dem Zweidiodenmodell. Die Parameter des Modells wurden nur auf diese Kennlinie gefittet.

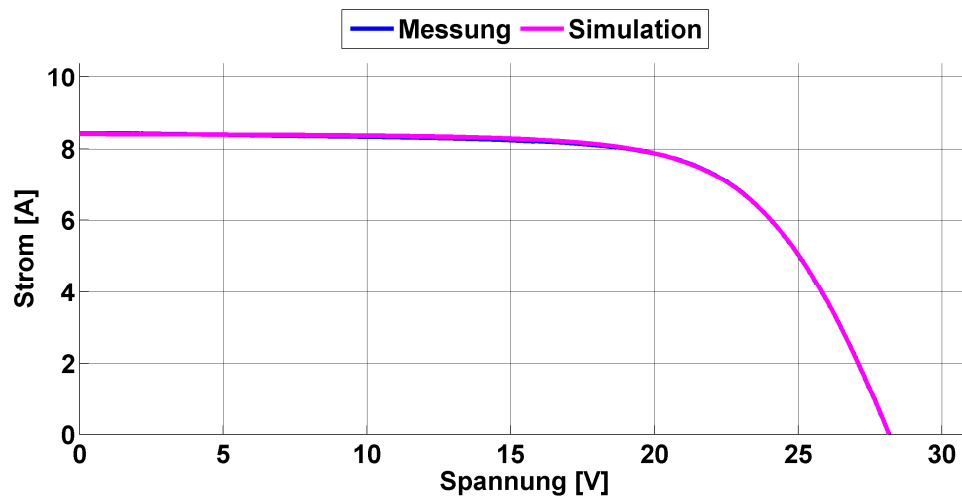
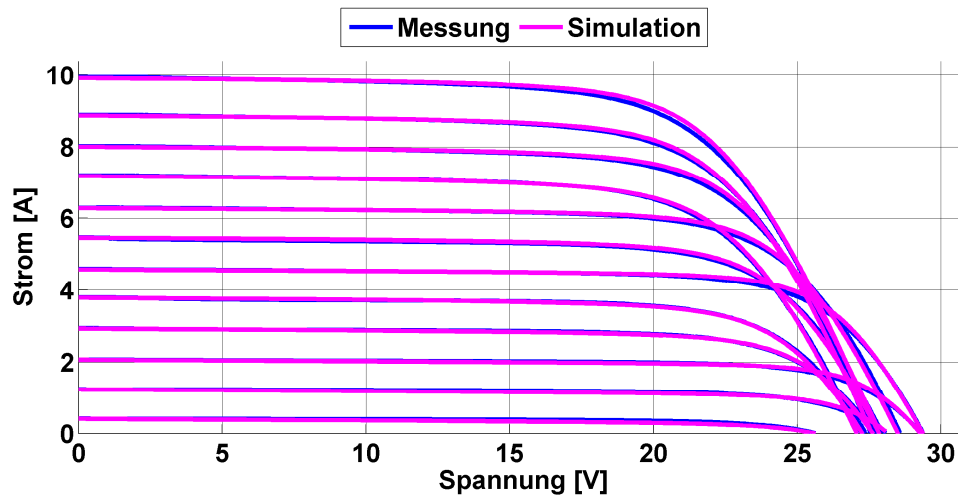
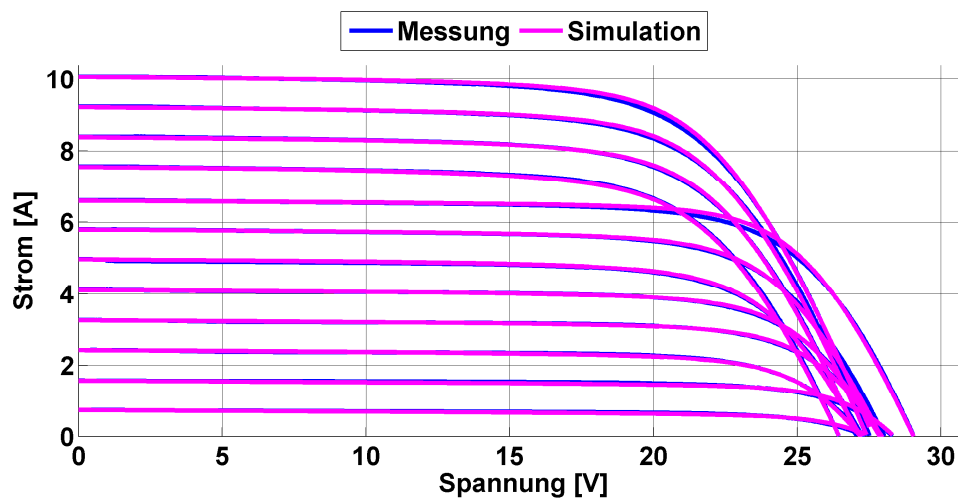


Abbildung 8.3.2: Simulation einer I/U-Kennlinie eines monokristallinen Moduls bei einer Bestrahlungsstärke von ca. 1000 W/m<sup>2</sup> mit dem Zweidiodenmodell. Die Parameter des Modells wurden nur auf diese Kennlinie gefittet.





**Abbildung 8.3.3:** Simulation von 12 I/U-Kennlinien eines monokristallinen Moduls über einen weiten Bestrahlungsstärkebereich mit dem Zweidiodenmodell. Die Parameter des Modells wurden auf diese Kennlinien gefittet.



**Abbildung 8.3.4:** Simulation von 12 I/U-Kennlinien eines monokristallinen Moduls über einen weiten Bestrahlungsstärkebereich mit dem Zweidiodenmodell. Die Parameter des Modells sind auf der Grundlage der Kennlinien aus Abbildung 8.2.3 gefittet worden.

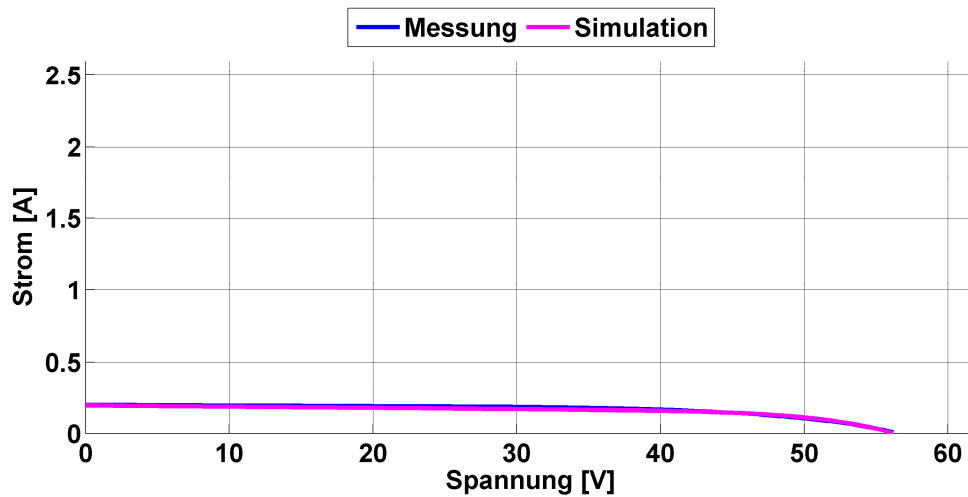


Abbildung 8.3.5: Simulation einer I/U-Kennlinie eines mikroamorphen Moduls bei einer Bestrahlungsstärke von ca. 100 W/m<sup>2</sup> mit dem Zweidiodenmodell. Die Parameter des Modells wurden nur auf diese Kennlinie gefittet.

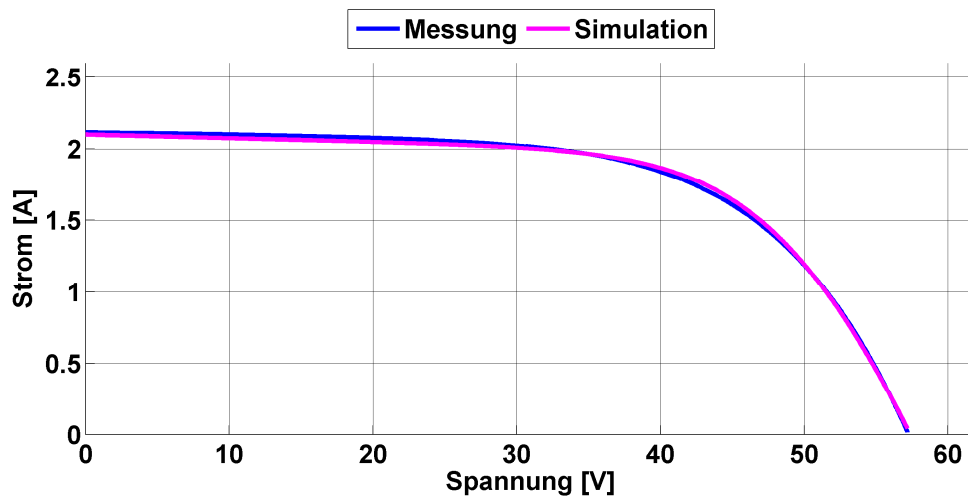


Abbildung 8.3.6: Simulation einer I/U-Kennlinie eines mikroamorphen Moduls bei einer Bestrahlungsstärke von ca. 1000 W/m<sup>2</sup> mit dem Zweidiodenmodell. Die Parameter des Modells wurden nur auf diese Kennlinie gefittet.

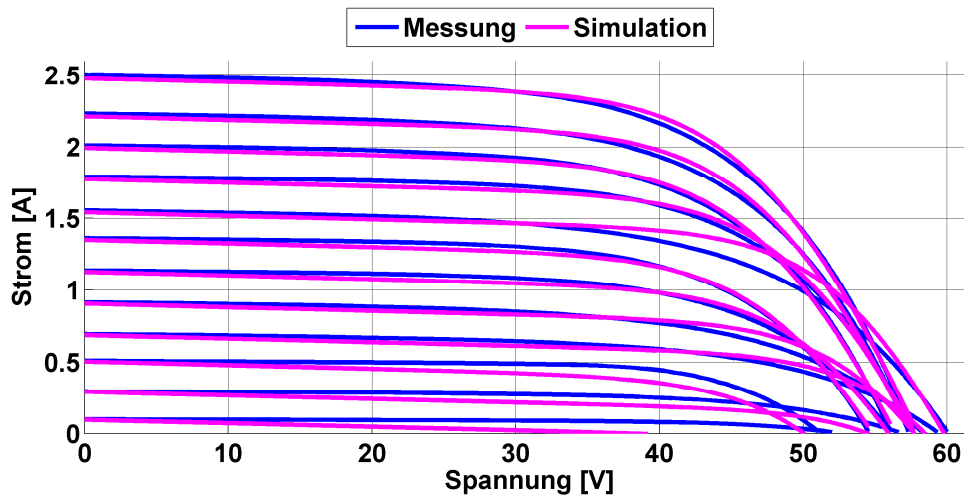


Abbildung 8.3.7: Simulation von 12 I/U-Kennlinien eines mikroamorphen Moduls über einen weiten Bestrahlungsstärkebereich mit dem Zweidiodenmodell. Die Parameter des Modells wurden auf diese Kennlinien gefittet.

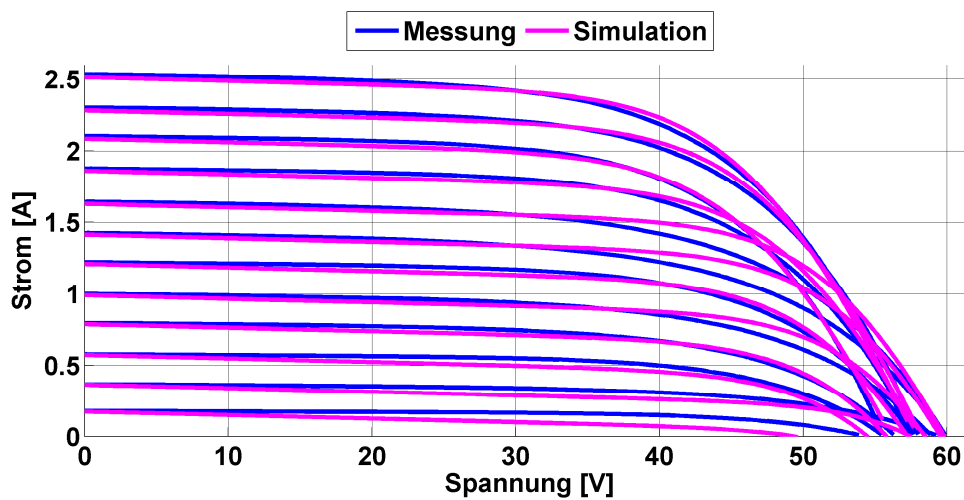


Abbildung 8.3.8: Simulation von 12 I/U-Kennlinien eines mikroamorphen Moduls über einen weiten Bestrahlungsstärkebereich mit dem Zweidiodenmodell. Die Parameter des Modells sind auf der Grundlage der Kennlinien aus Abbildung 8.2.7 gefittet worden.

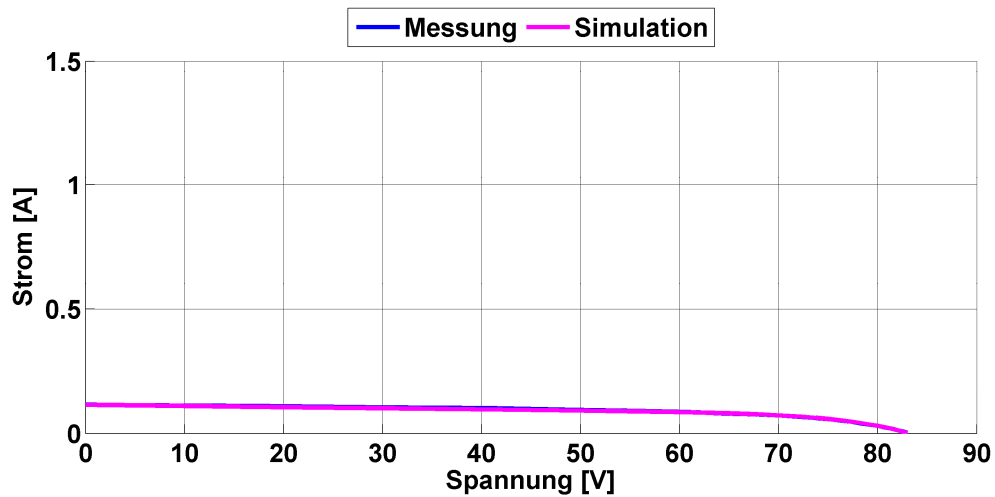


Abbildung 8.3.9: Simulation einer I/U-Kennlinie eines CdTe-Moduls bei einer Bestrahlungsstärke von ca. 100 W/m<sup>2</sup> mit dem Zweidiodenmodell. Die Parameter des Modells wurden nur auf diese Kennlinie gefittet.

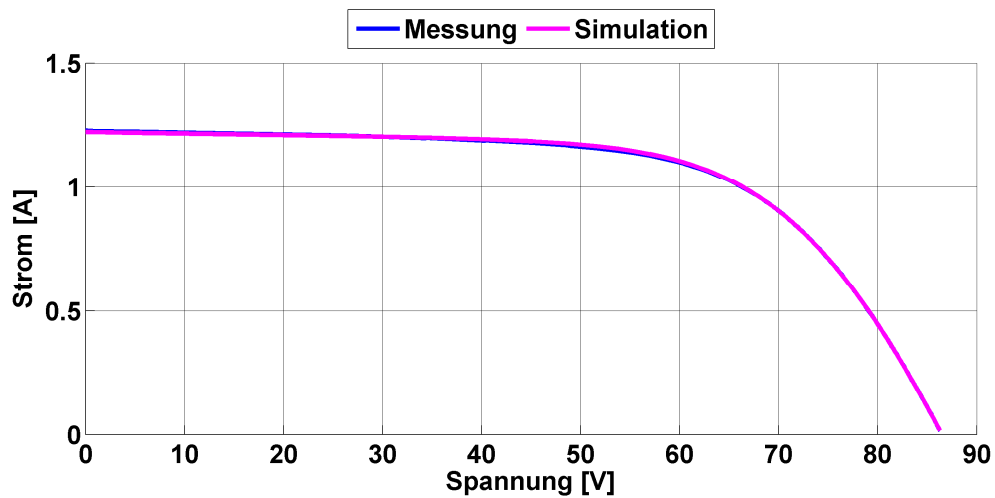


Abbildung 8.3.10: Simulation einer I/U-Kennlinie eines CdTe-Moduls bei einer Bestrahlungsstärke von ca. 1000 W/m<sup>2</sup> mit dem Zweidiodenmodell. Die Parameter des Modells wurden nur auf diese Kennlinie gefittet.

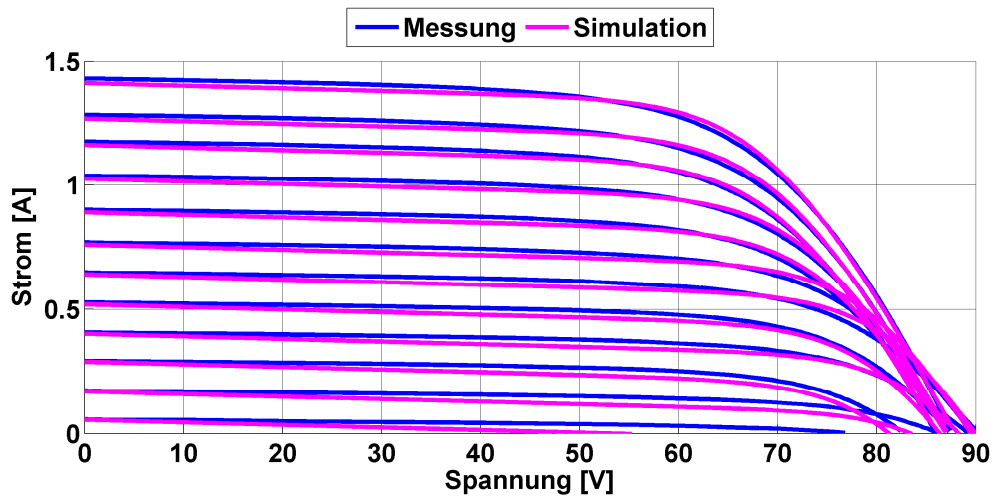


Abbildung 8.3.11: Simulation von 12 I/U-Kennlinien eines CdTe-Moduls über einen weiten Bestrahlungsstärkebereich mit dem Zweidiodenmodell. Die Parameter des Modells wurden auf diese Kennlinien gefittet.

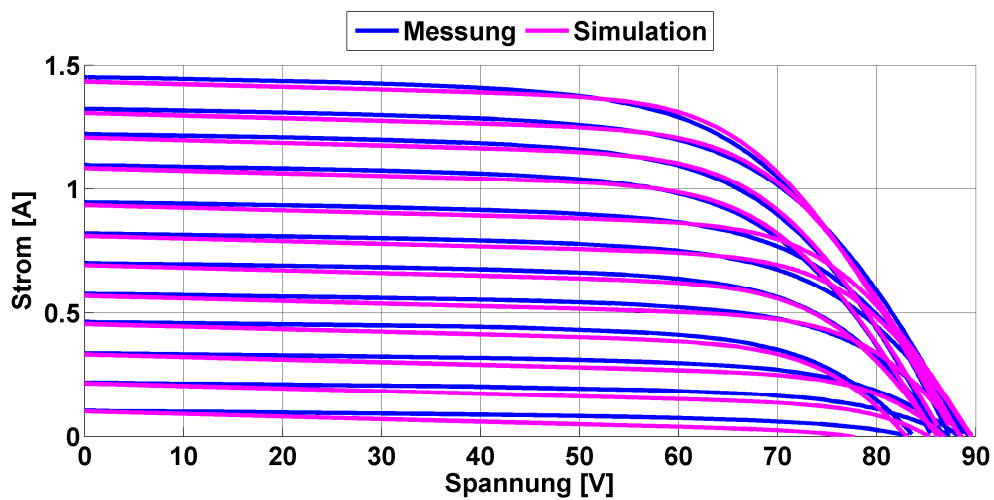


Abbildung 8.3.12: Simulation von 12 I/U-Kennlinien eines CdTe-Moduls über einen weiten Bestrahlungsstärkebereich mit dem Zweidiodenmodell. Die Parameter des Modells sind auf der Grundlage der Kennlinien aus Abbildung 8.2.11 gefittet worden.

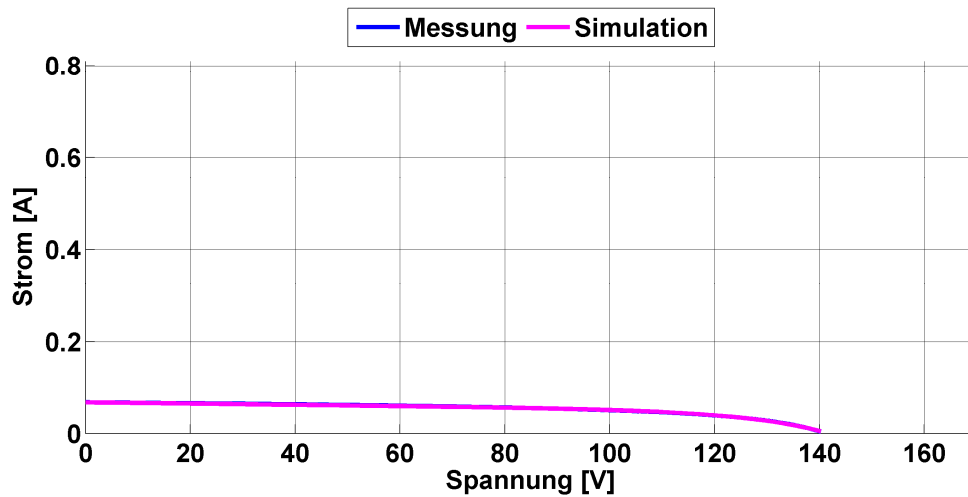


Abbildung 8.3.13: Simulation einer I/U-Kennlinie eines CIS-Moduls bei einer Bestrahlungsstärke von ca. 100 W/m<sup>2</sup> mit dem Zweidiodenmodell. Die Parameter des Modells wurden nur auf diese Kennlinie gefittet.

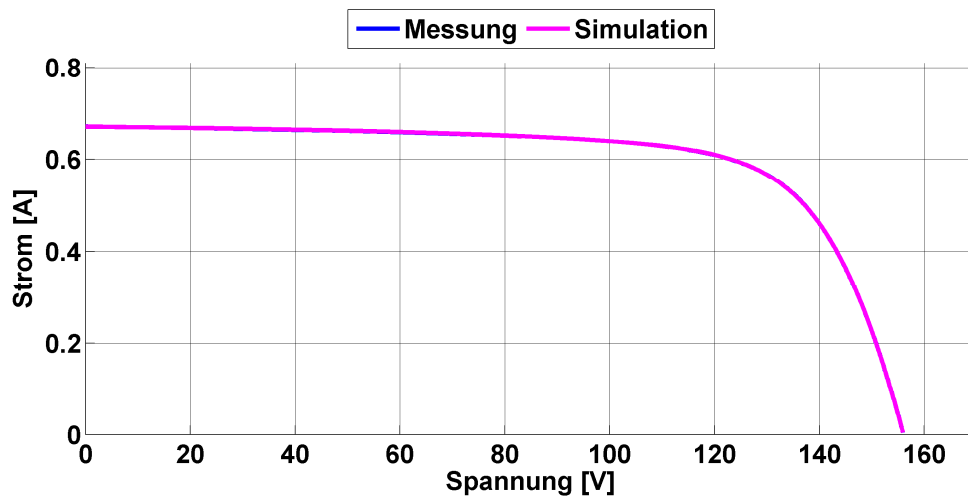


Abbildung 8.3.14: Simulation einer I/U-Kennlinie eines CIS-Moduls bei einer Bestrahlungsstärke von ca. 1000 W/m<sup>2</sup> mit dem Zweidiodenmodell. Die Parameter des Modells wurden nur auf diese Kennlinie gefittet.

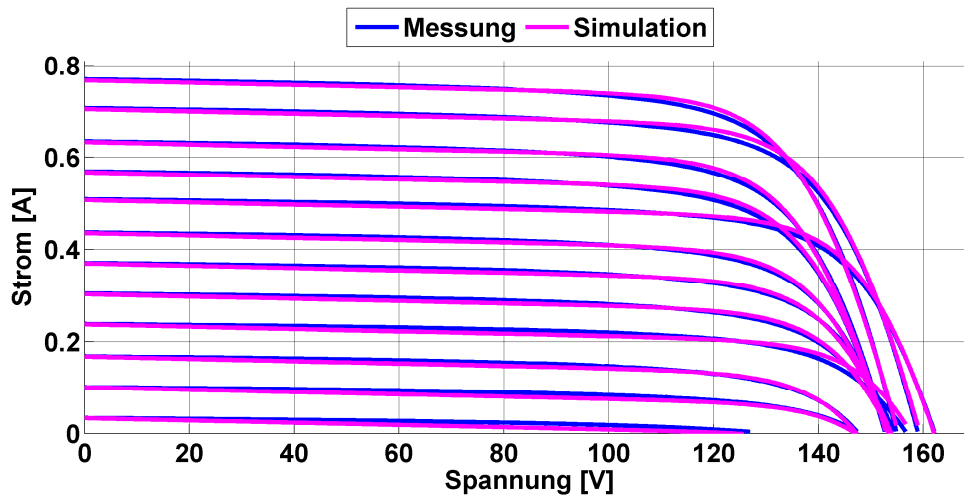


Abbildung 8.3.15: Simulation von 12 I/U-Kennlinien eines CIS-Moduls über einen weiten Bestrahlungsstärkebereich mit dem Zweidiodenmodell. Die Parameter des Modells wurden auf diese Kennlinien gefittet.

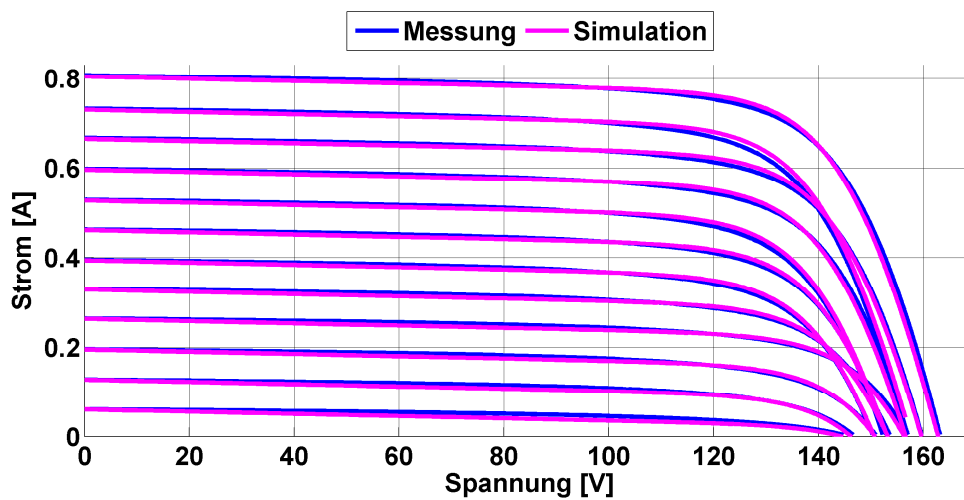


Abbildung 8.3.16: Simulation von 12 I/U-Kennlinien eines CIS-Moduls über einen weiten Bestrahlungsstärkebereich mit dem Zweidiodenmodell. Die Parameter des Modells sind auf der Grundlage der Kennlinien aus Abbildung 8.2.15 gefittet worden.

---

**LITERATURVERZEICHNIS**

- [Abd-04] M. AbdulHadi, A. M. Al-Ibrahim, G. S. Virk, "*Neuro-Fuzzy-Based Solar Cell Model*", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 19, No. 3, Pages 619-624, 2004
- [Amo-00] A. Al-Amoudi, L. Zhang, "*Application of radial basis function networks for solar-array modelling and maximum power-point prediction*", IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution, 2000
- [Bah-04] A.B.G. Bahgat, N.H. Helwa, G.E. Ahamd, E.T. El Shenawy, "*Estimation of the maximum power and normal operating power of a photovoltaic module by neural networks*", Renewable Energy 29, Pages 443-457, 2004
- [Bal-05] M. Balzani, A. Reatti, "*Neural Network Based Model of a PV Array for the Optimum Performance of PV System*", Research in Microelectronics and Electronics, Volume 2, Pages 123-126, 2005
- [Ben-03] C. Bendel, M. Ries, A. Wagner, "*Der Einfluss der spektral bewerteten Bestrahlungsstärkemessung auf die Energieertragsprognose – garantierte Energieerträge*", 18. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 2003
- [Bey-02] H. G. Beyer, R. Gottschalg, F. Jakobides, S. Bofinger, D. G. Infield, "*Identifikation und Anwendung eines Modells der Strom/Spannungs Kennlinie von Solarmodulen aus amorphem Silizium*", 22<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Mailand, 2007
- [Bey-03] H. G. Beyer, R. Gottschalg, T. R. Betts, D. G. Infield, "*Modellierung der Abhängigkeit des Kurzschlussstroms von a-Si Modulen von der meteorologischen Situation*", 18. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 2003
- [Bey-04a] H.G. Beyer, E. Lorenz, J. Bethke, A. Drews, D. Heinemann, G. Heilscher, S. Bofinger, "*Identification of a general model for the MPP performance of PV-modules for the application in a procedure for the performance check of grid connected systems*", 19<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Paris, France, 2004



- 
- [Bey-04b] H.G. Beyer, G. Heilscher, S. Bofinger, *"A robust model for the MPP performance of different types of PV-modules applied for the performance check of grid connected systems"*, EUROSUN 2004 (ISES Europe Solar Congress), Freiburg, Germany, 2004
- [Bey-07] H. G. Beyer, R. Gottschalg, G. Friesen, *"Modelling IV characteristics of CdTe Modules"*, 22<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Milano, Italy, 2007
- [Bey-08] H. G. Beyer, R. Gottschalg, G. Friesen, *"Modellierung der I/V-Charakteristiken von CdTe-Modulen"*, 23. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 2008
- [BMU-09] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), *"Erneuerbare Energien in Zahlen – nationale und internationale Entwicklung"*, Broschüre, 2009
- [Boor-78] C. de Boor, *"A Practical Guide to Splines"*, Springer-Verlag, 1978
- [Che-06] M. Chegaar, G. Azzouzi, P. Mialhe, *"Simple parameter extraction method for illuminated solar cells"*, Solid-State Electronics 50, Pages 1234-1237, 2006
- [DIN-05] DIN EN ISO/IEC 17025:2005-08 (D), *"Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien"*, 2005
- [DIN-07] DIN EN ISO/IEC 17025 Berichtigung 2:2007-05, *"Berichtigungen zu DIN EN ISO/IEC 17025:2005-08"*, 2007
- [DIN-08] DIN EN 60904-3 (VDE 0126-4-3):2009-02, *"Messgrundsätze für terrestrische photovoltaische (PV) Einrichtungen mit Angaben über die spektrale Strahlungsverteilung"*, 2008
- [Doll-09] J. Doll, M. Wolf, M. Zehner, R. Haas, B. Schwartz, P. Funtan, P. Papendorf, *"Modellierung des Betriebsverhaltens eines mikroamorphen Moduls"*, 24. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 2009
- [EEG-09] Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) 2009, *"Gesetz zur Neuregelung des Rechts der Erneuerbaren Energien im Strombereich und zur Änderung damit zusammenhängender Vorschriften"*, Bundesgesetzblatt Jahrgang 2008 Teil I Nr. 49, ausgegeben zu Bonn am 31. Oktober 2008

- [Eli-09] S. Elies, M. Hermle, B. Burger, *"Neue mathematische Modelle für Solarzellenkennlinien"*, 24. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 2009
- [EuPD-10] F. Hodiamont, E. Benz, N. Kowski, R. Mund, S. Reccia, *"Potential of Building-Integrated PV 2010 – Exclusive Edition for Survey Participants"*, EuPD Research, 2010
- [Fri-80] F. N. Fritsch, R. E. Carlson, *"Monotone Piecewise Cubic Interpolation"*, SIAM Journal on Numerical Analysis, Vol. 17 (Issue 2), pp. 238-246, 1980
- [Geb-99] Gebrauchsmuster Nr. 299 09.648 vom 27.05.1999, *"Strahlungssensor und Gehäuse zu dessen Herstellung"*
- [Geb-04] Gebrauchsmuster Nr. 20 2004 001 246 vom 27.01.2004, *"Bestrahlungsstärkemessvorrichtung"*
- [Ges-99] Geschmacksmuster Nr. 49905182 vom 27.05.1999, *"Strahlungssensor"*
- [Glo-07] T. Glotzbach, C. Bendel, J. Kirchhof, S. Ritter, B. Schulz, *"Untersuchungen von Bestrahlungsstärkesensoren"*, 22. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 2007
- [Glo-08] T. Glotzbach, C. Bendel, B. Schulz, M. Zehner, C. Vodermayr, G. Wotruba, M. Mayer, *"Round-Robin-Test mit Bestrahlungsstärkesensoren"*, 23. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 2008
- [Glo-09] T. Glotzbach, J. Kirchhof, *"Novel measuring system for long term evaluation of photovoltaic modules"*, 24<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, 2009
- [Glo-10] Thomas Glotzbach, *"Neuartiges Simulationsmodell für I/U-Kennlinien dünnschichtiger Photovoltaik-Technologien"*, 25. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 2010
- [Got-01] R. Gottschalg, R. Rütger, T. R. Betts, D. G. Infield, M. J. Kearney, *"Environmental effects on the performance of an amorphous silicon PV System"*, 17<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Glasgow, 2001
- [Got-03] R. Gottschalg, B. Elsworth, D. G. Infield., *"Investigation of the back contact of CdTe solar cells"*, Proc. Of the ISES Solar World Congress, Göteborg, Schweden, 2003

- [Got-04] R. Gottschalg, T. R. Betts, D. G. Infield, M. J. Kearney, *"On the importance of considering the incident spectrum when measuring the outdoor performance of amorphous silicon photovoltaic devices"*, Journal - Measurement Science and Technology, Issue - Volume 15, Number 2, 2004
- [Gra-05] P.O. Grabitz, U. Rau, J.H. Werner, *"A multi-diode model for spatially inhomogeneous solar cells"*, Thin Solid Films 487, Pages 14-18, 2005
- [Hao-05] M. Haouari-Merbah, M. Belhamel, I. Tobias, J.M. Ruiz, *"Extraction and analysis of solar cell parameters from the illuminated current-voltage curve"*, Solar Energy Materials & Solar Cells 87, Pages 225-233, 2005
- [Har-95] S. Hartberger, *"Seminar: Einführung in die Theorie der neuronalen Netze – Radial-Basis-Function-Netze"*, Seminarunterlagen Sommersemester 1995, Universität Münster, 1995
- [Häb-07] H. Häberlin, *"Photovoltaik – Strom aus Sonnenlicht für Verbundnetz und Inselanlagen"*, AZ Verlag, 2007
- [Her-01] D. Herrmann, *"Effektiv Programmieren in C und C++: Eine aktuelle Einführung mit Beispielen aus Mathematik, Naturwissenschaften und Technik"*, 5. Auflage, Vieweg Verlagsgesellschaft, 2001
- [Hub-95] J. Hubin, A. V. Shah, *"Effect of the recombination function on the collection in a p-i-n solar cell"*, Philosophical Magazine Part B, Volume 72, Issue 6, 1995, pages 589 - 599
- [IEC-05] ISO/IEC 17025:2005-05 (E), *"General requirements for the competence of testing and calibration laboratories"*, 2005
- [IEC-06] ISO/IEC 17025 Technical Corrigendum 1:2006-08, *"General requirements for the competence of testing and calibration laboratories; Technical Corrigendum 1"*, 2006
- [IEC-08] IEC 60904-3:2008, *"Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data"*, 2008
- [IKS-09] IKS Photovoltaik, *"Solarstrahlungssensor ISET Sensor – Qualitätsmesstechnik für den Massenmarkt"*, Produktbeschreibung, 2009

- 
- [ISET-06] ISET e.V. - Institut für Solare Energieversorgungstechnik, hwp - hullmann, willkomm & partner, *"Multifunktionale Photovoltaik – Photovoltaik in der Gebäudehülle"*, Broschüre gefördert durch das BMU - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2006
- [ISET-08] S. Bofinger, M. Braun, T. Degner, C. Enßlin, T. Glotzbach, K. Rohrig, Y.-M. Saint-Drenan, T. Erge, A. Kröger-Vodde, M. Thoma, R. Cerny, *"Rolle der Solarstromerzeugung in zukünftigen Energieversorgungsstrukturen – Welche Wertigkeit hat Solarstrom? –"*, Forschungsvorhaben Nr. 03MAP0075, Abschlussbericht der Studie, ISET e.V., Förderer Projektträger Jülich (PtJ) und das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Mai 2008
- [ISO-08] ISO/BIPM Leitfaden *"Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement"*, 2008
- [IWES-10] Fraunhofer IWES, *"Kalibrierschein 10-047-141860 zum ISET-mpp meter mit der QS-Nr. 141860 (Qualitätssicherungsnummer)"*, 2010
- [Kar-06] E. Karatepe, M. Boztepe, M. Colak, *"Neural network based solar cell model"*, Energy Conversion and Management Volume 47, Issues 9-10, Pages 1159-1178, 2006
- [Kar-07] E. Karatepe, M. Boztepe, M. Colak, *"Development of a suitable model for characterizing photovoltaic arrays with shaded solar cells"*, Solar Energy 81, 977-992, 2007
- [Kim-10] W. Kim, W. Choi, *"A novel parameter extraction method for the one-diode solar cell model"*, Solar Energy 84, Pages 1008-1019, 2010
- [Kip-09a] Kipp & Zonen *"Pyranometers - For the accurate Measurement of Solar Irradiance"*, Brochure, 2009
- [Kip-09b] Kipp & Zonen *"Instruction Manual - CMA series (Albedometer), CMP series (Pyranometer)"*, Manual, 2009
- [Kir-10] J. Kirchhof, B. Schulz, *"Dokumentation ISET-mpp meter – Messunsicherheiten bei Modulmessungen"*, Internes Papier Fraunhofer IWES, 2010

- [Mar-04] B. Marion, J. del Cueto, B. Sekulic, " *Modeling Current-Voltage Curves Using Bilinear Interpolation* ", National Renewable Energy Laboratory (NREL), World Renewable Energy Congress VIII and Expo, Denver, Colorado, 2004
- [Mat-09] The MathWorks Inc., " *Help of Matlab R2009b* ", 2009
- [Maz-06] B. Mazhari, " *An improved solar cell circuit model for organic solar cells* ", Solar Energy Materials & Solar Cells 90, Pages 1021-1033, 2006
- [McC-98] B.E. McCandless, J.E. Phillips, J. Titus, " *Characterizing Contacts to P-Type CdTe in CdS/CdTe Solar Cells* ", 15<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Wien, 1998
- [Mer-98] J. Merten, J. M. Asensi, C. Voz, A. V. Shah, R. Platz, J. Andreu, " *Improved equivalent circuit and analytical model for amorphous silicon solar cells and modules* " IEEE Transactions on Electron Devices, Volume 45, Issue 2, 1998, 423 - 429
- [Mis-09] S. Misara, C. Bendel, P. Funtan, T. Glotzbach, N. Henze, " *Untersuchungen zur Entwicklung von Fertigungs-, Prüf- sowie Einbaumethoden von multifunktional nutzbaren Photovoltaik-Bauelementen/Baugruppen in der Gebäudetechnik – MULTIELEMENT* ", 24. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 2009
- [Mul-09a] C. Bendel, P. Funtan, T. Glotzbach, N. Henze, S. Misara, " *MULTIELEMENT: PV-Bauelemente in der Gebäudetechnik* ", Fact-Sheet zum Projekt MULTIELEMENT, ISET e.V., 2009
- [Mul-09b] C. Bendel, P. Funtan, T. Glotzbach, N. Henze, S. Misara, " *MULTIELEMENT: PV Elements in Building Services Engineering* ", Fact-Sheet to the Project MULTIELEMENT, ISET e.V., 2009
- [Mul-10] Internetseite des Projektes MULTIELEMENT, " *Untersuchungen zur Entwicklung von Fertigungs-, Prüf- sowie Einbaumethoden von multifunktional nutzbaren Photovoltaik-Bauelementen/Baugruppen in der Gebäudetechnik – MULTIELEMENT* ", [www.pv-multielement.de](http://www.pv-multielement.de), 04.12.2009, 20:15
- [Nie-97] A. Niemegeers, M. Burgelman, " *Effects of the Au/CdTe Back Contact on IV and CV Characteristics of Au/CdTe/CdS/TCO Solar Cells* ", Journal of Applied Physics 81, 2881-2886, 1997

- [Ohn-89] K. Ohniwa, T. Fujimaki, S. Eda, "*Dynamic equivalent circuit of photovoltaic solar cell module*", Electrical Engineering in Japan, Band 109, Heft 5, 1989
- [Pat-06] Patentanmeldung Nr. DE 10 2006 055 642 vom 22.11.2006, "*Verfahren und Vorrichtung zur Ermittlung von Messwerten, die für die solare Bestrahlungsstärke am Ort eines PV-Generators charakteristisch sind*"
- [Pat-09] Patentanmeldung Nr. 10 2009 039 707.8 vom 16.07.2009, "*Verfahren und Vorrichtung zur Ermittlung der Kennlinien von photovoltaischen Bauelementen*"
- [Pat-10] J. C. Patra, "*Neural network-based model for dual-junction solar cells*", Progress in Photovoltaics: Research and Applications, John Wiley & Sons Ltd., DOI: 10.1002/pip.985, 2010
- [Pho-09] Photon Profi Dezember 2009 – Schwerpunkt Einstrahlungssensoren "*Jeder misst, wie er kann*", 2009
- [PtJ-10] PtJ-Forschungsjahrbuch 2009, P. Funtan, T. Glotzbach, N. Henze, S. Misara, M. Roos, "*Untersuchungen zur Entwicklung von Fertigungs-, Prüf- sowie Einbaumethoden von multifunktional nutzbaren Photovoltaik-Bauelementen/Baugruppen in der Gebäudetechnik – MULTIELEMENT*", Förderprogramm des BMU zu Forschung und Entwicklung im Bereich Photovoltaik, FKZ: 0325067, 2010
- [PVT-10] Internetseite des IWES Outdoor-Testfeldes für Photovoltaik in Kassel, [www.pvtestlab.de](http://www.pvtestlab.de), 09.01.2010, 10:00
- [Qua-96] V. Quaschnig, "*Simulation der Abschattungsverluste bei solarelektrischen Systemen*", Dissertation, Verlag Dr. Köster Berlin, 1996
- [Qua-00] V. Quaschnig, "*Systemtechnik einer klimaverträglichen Elektrizitätsversorgung in Deutschland für das 21. Jahrhundert*", Fortschritt-Berichte VDI Reihe 6 (Energietechnik) Nr. 437, VDI Verlag, 2000
- [Qua-06] V. Quaschnig, "*Regenerative Energiesysteme*", Carl Hanser Verlag München Wien, 4. neu bearbeitete und erweiterte Auflage, 2006
- [Rey-08] G. Daniel Rey, K. F. Wender, "*Neuronale Netze – Eine Einführung in die Grundlagen, Anwendungen und Datenauswertung*", Huber Verlag, 1. Auflage, Buch zur Website [www.neuronaalesnetz.de](http://www.neuronaalesnetz.de) [Rey-10], 2008

- 
- [Rey-10] G. Daniel Rey, K. F. Wender, "*Neuronale Netze – Eine Einführung*", Druckversion der Internetseite [www.neuronalesnetz.de](http://www.neuronalesnetz.de), 30.01.2010, 14:30
- [Rum-86] D. E. Rumelhart, J. L. McClelland, "*Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition*", Volume 1: Foundations, The MIT Press, 1986
- [Sche-97] A. Scherer, "*Neuronale Netze – Grundlagen und Anwendungen*", Vieweg Verlag, 1997
- [Schm-10] Michael Schmidt, Marianne Hartung, Eva Bernal, Omar Stern, Mark Lynass, Marcus Zettl, Toby Ferenczi, Yarú Mendez, Oliver Mayer, "*A Purely Measurement-Based Model for IV Curves of PV Modules*", 25. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 2010
- [Schr-04] E. Schrüfer, "*Elektrische Messtechnik*", Carl Hanser Verlag München Wien, 8. neu bearbeitete Auflage, 2004
- [Schu-91] J. Schumacher, "*Digitale Simulation regenerativer elektrischer Energieversorgungssysteme*", Dissertation, 1991
- [Schu-01] J. Schumacher, "*Zum Stand der Simulationen von PV-Systemen*", 2001
- [Schu-07] J. Schumacher, U. Eicker, D. Pietruschka, "*Analytisch eindeutige Berechnung der Parameter des Eindiodenmodells aus Datenblattangaben*", 22. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffels-  
stein, 2007
- [SCS-06] Ch. Gueymard, "*SMARTS - Simple Model of Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine (Version 2.9.5)*", Solar Consulting Service (SCS) with support from National Renewable Energy Laboratory (NREL), Distributed Energy Resources Center and Florida Solar Energy Center (FSEC), 2006
- [SNL-04] D. L. King, W. E. Boyson, J. A. Kratochvil (Sandia National Laboratories), "*Photovoltaic Array Performance Model*", 2004
- [Sto-95] G. Stollwerck, J. Sites, "*Analysis of CdTe Back Contact Barriers*", 13<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Nizza, Frankreich, 1995

- [Sya-09] Syafaruddin, T. Hiyama, E. Karatepe, "*Feasibility of Artificial Neural Network for Maximum Power Point Estimation of Non Crystalline-Si Photovoltaic Modules*", ISAP '09, 15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems, Curitiba, Pages 1-6, 2009
- [Tie-99] U. Tietze, C. Schenk, "*Halbleiter-Schaltungstechnik*", Springer Verlag, 11. völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage, 1999
- [Vil-09] M. Gradella Villalva, J. Rafael Gazoli, E. Ruppert Filho, "*Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays*", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 24, Issue 5, Pages 1198-1208, May 2009
- [Waf-09] E. Waffenschmidt, "*Die Rolle der Photovoltaik bei einer 100-Prozent Versorgung Deutschlands mit Erneuerbaren Energien*", 24. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 2009
- [Wag-95] A. Wagner, "*Technisch-wirtschaftliche Bewertung photovoltaischer Stromversorgungssysteme*", Dissertation an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Halle, 1995
- [Wag-06] A. Wagner, "*Photovoltaik Engineering*", Springer Verlag, 2. bearbeitete Auflage, 2006
- [Wolf-77] M. Wolf, G. T. Noel, R. J. Stirn, "*Investigation of the Double Exponential in the Current-Voltage Characteristics of Silicon Solar Cells*", IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. ED-24, No. 4, pp. 419 - 428, 1977
- [Zar-08] Luis E. Zárate, Lauro de Vilhena B. Machado Neto, Daniel Alencar Soares, Fabricio R. Bittencout, "*Artificial Neural Networks Applied for Representation of Curves Current-Voltage of Photovoltaic Modules*", 6th IEEE International Conference on Industrial Informatics, 2008
- [Zeh-09] M. Zehner, R. Haselhuhn, "*Präzision statt Lotterie*", Sonne, Wind & Wärme, Ausgabe 4/2009, Seite 126-137, 2009
- [Zell-03] A. Zell, "*Simulation neuronaler Netze*", Oldenbourg Verlag München Wien, 4. unveränderter Nachdruck, 2003
- [Zha-05] L. Zhang, Y. F. Bai, "*Genetic algorithm-trained radial basis function neural networks for modelling photovoltaic panels*", Engineering Applications of Artificial Intelligence archive, Volume 18 , Issue 7, Pages 833-844, 2005



## LISTE DER EIGENEN VERÖFFENTLICHUNGEN

- [21] Thomas Glotzbach, Björn Schulz, Stefan Grünsteidl, Maurice Mayer, Christian Vodermaier, Gerald Wotruba, *"Evaluation Of Calibrated Solar Cells And Pyranometers Regarding The Effective Irradiance Detected By PV Modules"*, 25<sup>th</sup> European PV Solar Energy Conference and Exhibition, Valencia, Spain, 06.-10.09.2010
- [20] Thomas Glotzbach, Siwanand Misara, Björn Schulz, P. Biswas, *"Weak-Light Irradiation On BIPV-Applications – Results Of The Project MULTIELEMENT"*, 25<sup>th</sup> European PV Solar Energy Conference and Exhibition, Valencia, Spain, 06.-10.09.2010
- [19] Peter Funtan, Thomas Glotzbach, Norbert Henze, Siwanand Misara, Maria Roos, *"Das Projekt MULTIELEMENT"*, PtJ-Forschungsjahrbuch Erneuerbare Energien 2009, Projektträger Jülich (PtJ), Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Juli 2010
- [18] Thomas Glotzbach, *"Neuartiges Simulationsmodell für I/U-Kennlinien dünn-schichtiger Photovoltaik-Technologien"*, 25. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 03.-05. März 2010
- [17] Thomas Glotzbach, Björn Schulz, Maurice Mayer, Christian Vodermaier, Gerald Wotruba, *"Messergebnisse und Analysen nach zwei Jahren Round-Robin-Test mit Einstrahlungssensoren"*, 25. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 03.-05. März 2010
- [16] Peter Funtan, Thomas Glotzbach, Norbert Henze, Siwanand Misara, *"Multifunktionale photovoltaische Bauteile – Ergebnisse aus dem Projekt MULTIELEMENT"*, 2. Anwenderforum "Gebäudeintegrierte Photovoltaik", Bad Staffelstein, 02.03.2010
- [15] Thomas Glotzbach, Jörg Kirchhof, *"Novel Measuring System for Long Term Evaluation of Photovoltaic Modules"*, 24<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, 21.-25.09.2009
- [14] Mike Zehner, Peter Fritze, Michael Schlatterer, Thomas Glotzbach, Björn Schulz, Christian Vodermaier, Maurice Mayer, Gerald Wotruba, *"One Year Round Robin Testing Of Irradiation Sensors Measurement Results And Analyses"*, 24<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, 21.-25.09.2009
- [13] Christian Bendel, Peter Funtan, Thomas Glotzbach, Norbert Henze, Siwanand Misara, *"Das Projekt MULTIELEMENT"*, PtJ-Forschungsjahrbuch Erneuerbare Energien 2008, Projektträger Jülich (PtJ), Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Juni 2009
- [12] Peter Funtan, Thomas Glotzbach, Norbert Henze, Siwanand Misara, *"MULTIELEMENT: Untersuchungen zur Entwicklung von Fertigungs-, Prüf- sowie Einbaumethoden von multifunktional nutzbaren Photovoltaik Bauelementen/Baugruppen in der Gebäudetechnik"*, 24. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 04.-06.03.2009

- 
- [11] Stefan Bofinger, Martin Braun, Thomas Degner, Thomas Glotzbach, Yves-Marie Saint-Drenan, *"Value of PV energy in Germany"*, Photovoltaics International, 2<sup>nd</sup> Edition, Fourth Quarter 2008, Pages 126 - 131, November/December 2008
  - [10] Christian Bendel, Peter Funtan, Thomas Glotzbach, Jörg Kirchhof, Gerald Klein, *"Ergebnisse aus dem Projekt OPTINOS – Defizite und Unsicherheiten bei Prüfprozeduren von Photovoltaik-Wechselrichtern"*, 13. Kasseler Symposium Energie-Systemtechnik, Kassel, 18./19.09.2008
  - [9] Thomas Glotzbach, Björn Schulz, Mike Zehner, Peter Fritze, Michael Schlatterer, Christian Vodermaier, Gerald Wotruba, Maurice Mayer, *"Round-Robin-Test of irradiance sensors"*, 23<sup>rd</sup> European PV Solar Energy Conference and Exhibition, Valencia, Spain, 01.-05.09.2008
  - [8] Stefan Bofinger, Martin Braun, Thomas Degner, Thomas Glotzbach, Yves-Marie Saint-Drenan, *"Value of PV Energy in Germany – Benefit from the Substitution of Conventional Power Plants and Local Power Generation"*, 23<sup>rd</sup> European PV Solar Energy Conference and Exhibition, Valencia, Spain, 01.-05.09.2008
  - [7] Christian Bendel, Peter Funtan, Thomas Glotzbach, Jörg Kirchhof, Gerald Klein, *"Results of the OPTINOS Project – Deficits and unsureness in test procedures of photovoltaic inverters"*, 23<sup>rd</sup> European PV Solar Energy Conference and Exhibition, Valencia, Spain, 01.-05.09.2008
  - [6] Stefan Bofinger, Martin Braun, Thomas Glotzbach, Yves-Marie Saint-Drenan, *"Determination of Distributed PV Generation and Investigation of its Impacts on the Power System"*, 23<sup>rd</sup> European PV Solar Energy Conference and Exhibition, Valencia, Spain, 01.-05.09.2008
  - [5] Stefan Bofinger, Martin Braun, Thomas Degner, Cornel Enßlin, Thomas Glotzbach, Kurt Rohrig, Yves-Marie Saint-Drenan, Thomas Erge, Anselm Kröger-Vodde, Malte Thoma, Ralph Cerny, *"Rolle der Solarstromerzeugung in zukünftigen Energieversorgungsstrukturen – Welche Wertigkeit hat Solarstrom? –"*, Forschungsvorhaben Nr. 03MAP0075, Abschlussbericht der Studie, ISET e.V., Förderer Projektträger Jülich (PtJ) und das Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Mai 2008
  - [4] Christian Bendel, Thomas Glotzbach, Björn Schulz, Mike Zehner, Christian Vodermaier, Gerald Wotruba, Maurice Mayer, *"Round-Robin-Test mit Bestrahlungsstärkesensoren"*, 23. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 05.-07.03.2008
  - [3] Christian Bendel, Peter Funtan, Thomas Glotzbach, Jörg Kirchhof, Gerald Klein, *"Ergebnisse aus dem Projekt OPTINOS – Defizite und Unsicherheiten bei Prüfprozeduren von Photovoltaik-Stromrichtern"*, 23. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 05.-07.03.2008
  - [2] Martin Braun, Thomas Degner, Thomas Glotzbach, Yves-Marie Saint-Drenan, *"Wertigkeit von PV-Strom: Nutzen durch Substitution des konventionellen Kraftwerkparks und verbrauchsnahe Erzeugung"*, 23. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 05.-07.03.2008

- [1] Christian Bendel, Thomas Glotzbach, Jörg Kirchhof, Stefan Ritter, Björn Schulz, *"Untersuchung von Bestrahlungsstärkesensoren"*, 22. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 07.-09.03.2007

## NOMENKLATUR

### Lateinische Zeichen

$a$	Parameter
$a$	Aktivitätslevel des sendenden Neurons
$a$	Ausgang eines KNN
$a_{Mess}$	Gemessene Größe als Vorgabemuster für den Ausgang eines KNN
$AM$	AirMass
$\mathbf{a}$	Vektor der Aktivitätslevel von sendenden Neuronen
$b$	Absolutglied einer linearen Funktion
$b$	Bias eines künstlichen Neurons
$\mathbf{b}$	Vektor der Bias von künstlichen Neuronen
$b_1$	Parameter
$b_2$	Parameter
$b_3$	Parameter
$c_0$	Koeffizient des Photostroms $I_{ph} \left[ \frac{m^2}{V} \right]$
$c_s$	Koeffizient des Sättigungsstroms $I_s$
$c_{s_1}$	Koeffizient des Sättigungsstroms $I_{s_1} \left[ \frac{A}{K^3} \right]$
$c_{s_2}$	Koeffizient des Sättigungsstroms $I_{s_2} \left[ \frac{A}{K^{5/2}} \right]$
$C$	Parameter
$C_0$	Parameter
$C_1$	Parameter
$d_i$	Dicke der intrinsischen Schicht
$D$	Diode
$E_g$	Bandabstand $[eV]$
$f$	Übertragungsfunktion eines künstlichen Neurons
$\mathbf{f}$	Vektor von Übertragungsfunktionen von künstlichen Neuronen
$F$	Fehlerfunktion
$F_D$	Relativer Diffusanteil
$F_{I_{MPP},\%}$	Relativer Fehler zwischen gemessenem und simuliertem MPP-Strom [%]

---

$F_{P_{MPP},\%}$	Relativer Fehler zwischen gemessener und simulierter MPP-Leistung [%]
$F_{U_{MPP},\%}$	Relativer Fehler zwischen gemessener und simulierter MPP-Spannung [%]
$G$	Globalstrahlung $\left[ \frac{W}{m^2} \right]$
$G_{Diff}$	Diffuse Bestrahlungsstärke $\left[ \frac{W}{m^2} \right]$
$G_{eff}$	Effektive Bestrahlungsstärke $\left[ \frac{W}{m^2} \right]$
$G_t$	Bestrahlungsstärke auf Modulebene $\left[ \frac{W}{m^2} \right]$
$G_{t,i}$	Bestrahlungsstärke auf Modulebene $\left[ \frac{W}{m^2} \right]$ zum Zeitpunkt $i$
$G_{Zelle}$	Bestrahlungsstärke gemessen mit einem Bestrahlungsstärkesensor auf Basis einer PV-Zelle $\left[ \frac{W}{m^2} \right]$
$i$	Index
$i$	Zeitpunkt der Messung
$\mathbf{iw}$	Gewichtungsfaktorvektor welcher mit dem Eingang von mehrschichtigen künstlichen neuronalen Netzen verbunden ist
$I$	Stromstärke [A]
$I_0$	Diodensättigungsstrom [A]
$I_D$	Diodenstrom [A]
$I_{D_1}$	Diodenstrom der 1. Diode [A]
$I_{D_2}$	Diodenstrom der 2. Diode [A]
$I_{Fehler}$	Fehlerhafter Strom [A]
$I_{Fehler,\%}$	Relativer fehlerhafter Strom [%]
$I_i$	Berechneter Strom im Iterationsschritt $i$ [A]
$I_{i+1}$	Berechneter Strom im Iterationsschritt $i + 1$ [A]
$I_K$	Kurzschlussstrom [A]
$I_{K_{STC}}$	Kurzschlussstrom unter Standard-Test-Bedingungen (STC) [A]
$I_{max}$	Maximaler Messstrom des ISET- <i>mpp meter</i> [A]

---

$I_{Mess}$	Gemessener Modulstrom [A]
$I_{MPP}$	Strom im Maximum Power Point [A]
$I_P$	Strom durch den Parallelwiderstand [A]
$I_{Ph}$	Photostrom [A]
$I'_{Ph}$	Photostromparameter (einstrahlungs- und temperaturabhängig)
$I_S$	Diodensättigungsstrom [A]
$I_{S_1}$	Diodensättigungsstrom der 1. Diode [A]
$I_{S_2}$	Diodensättigungsstrom der 2. Diode [A]
$I_{Sim}$	Simulierter Modulstrom [A]
<b>IW</b>	Gewichtungsfaktormatrix, welche mit dem Eingang von mehrschichtigen künstlichen neuronalen Netzen verbunden ist
$j$	Index
$k$	Boltzmann-Konstante $1,380658 \cdot 10^{-23} JK^{-1}$
$k$	Index
$k_1$	Konstant 1 der Approximationsfunktion zur Berechnung von $M$
$k_2$	Konstant 2 der Approximationsfunktion zur Berechnung von $M$
$k_3$	Konstant 3 der Approximationsfunktion zur Berechnung von $M$
$k_4$	Konstant 4 der Approximationsfunktion zur Berechnung von $M$
$lw$	Gewichtungsfaktorskalar, welcher nicht mit dem Eingang von mehrschichtigen künstlichen neuronalen Netzen verbunden ist (Hidden-Layer und/oder Ausgangsschicht)
<b>lw</b>	Gewichtungsfaktorvektor, welcher nicht mit dem Eingang von mehrschichtigen künstlichen neuronalen Netzen verbunden ist (Hidden-Layer und/oder Ausgangsschicht)
<b>LW</b>	Gewichtungsfaktormatrix, welche nicht mit dem Eingang von mehrschichtigen künstlichen neuronalen Netzen verbunden ist (Hidden-Layer und/oder Ausgangsschicht)
$m$	Diodenfaktor
$m$	Steigung einer linearen Funktion
$M$	Steigung der I/U-Kennlinien, wenn $I = 0$ [ $\Omega$ ]
$m_1$	Diodenfaktor der 1. Diode
$m_2$	Diodenfaktor der 2. Diode
$n$	Anzahl der Messpunkte der I/U-Kennlinie
$n$	Eingang der Übertragungsfunktion eines künstlichen Neurons

$p$	Eingang eines künstlichen Neurons bzw. künstlichen neuronalen Netzes
$\mathbf{p}$	Eingangsvektor eines künstlichen Neurons bzw. künstlichen neuronalen Netzes
$P_1$	1. ausgewählter Punkt einer Funktionsgleichung oder eines Diagramms
$P_2$	2. ausgewählter Punkt einer Funktionsgleichung oder eines Diagramms
$P_3$	3. ausgewählter Punkt einer Funktionsgleichung oder eines Diagramms
$P_4$	4. ausgewählter Punkt einer Funktionsgleichung oder eines Diagramms
$P_{MPP_{Mess}}$	Punkt maximaler Leistung (gemessen) [W]
$P_{MPP_{Sim}}$	Punkt maximaler Leistung (simuliert) [W]
$q$	Elementarladung $1,60217733 \cdot 10^{-19} \text{ As}$
$r$	Radius einer Radial-Basis-Funktion (RBF)
$R$	Anzahl der Elemente des Eingangsvektors eines künstlichen Neurons bzw. künstlichen neuronalen Netzes
$R_p$	Parallelwiderstand [ $\Omega$ ]
$R_{pV}$	Photovoltaik-Widerstand [ $\Omega$ ]
$R_s$	Serienwiderstand [ $\Omega$ ]
$RMSE_{\%}$	Relativer mittlerer quadratischer Fehler [%]
$S$	Anzahl der Neuronen innerhalb eines Layer
$S$	Spektrale Bestrahlungsstärke $\left[ \frac{W}{m^2 nm} \right]$
$SE$	Spektrale Empfindlichkeit von Bestrahlungsstärkesensoren $\left[ \frac{Vm^2}{W} \right]$
$T$	Absolute Temperatur [K]
$T_{Mod}$	Modultemperatur [ $^{\circ}C$ ]
$T_{Zelle}$	Zelltemperatur [ $^{\circ}C$ ]
$T_{Zelle,i}$	Zelltemperatur [ $^{\circ}C$ ]
$T_{Umg}$	Umgebungstemperatur [ $^{\circ}C$ ]
$U$	Spannung [V]
$U_0$	Leerlaufspannung [V]
$U_D$	Diodenspannung [V]
$U_{Ds}$	Diodenspannung an serieller Diode [V]
$U_{fb}$	Flatband-Spannung [V]

---

$U_{Kal}$	Kalibrierwert eines Bestrahlungsstärkesensors [V]
$U_{MPP}$	Spannung im Maximum Power Point [V]
$U_T$	Temperaturspannung [V]
$w$	Gewichtungsfaktor eines künstlichen Neurons
$\mathbf{w}$	Gewichtungsfaktorvektor von künstlichen Neuronen
$\mathbf{W}$	Gewichtungsfaktormatrix von künstlichen Neuronen
$x$	Variable eines Polynoms
$\mathbf{X}$	Eingangsvariable
$y$	Funktionswert eines Polynoms
$Y$	Ausgangsvariable

### Griechische Zeichen

$\varepsilon$	Untere Schranke der Abbruchbedingung der Iteration
$\phi$	Radial-Basis-Funktion (RBF)
$\Phi$	Radial-Basis-Funktionen-Matrix (RBF-Matrix)
$\lambda$	Wellenlänge [nm]
$\mu$	Ladungsträgermobilität
$\Theta$	Einfallswinkel auf die geneigte Ebene [°]
$\tau$	Ladungsträgerlebensdauer
$\eta$	Faktor der Lernrate (auch Lernfaktor oder Schrittweite genannt)
$\psi$	Anzahl an Ausgangsmuster (Trainingsmuster) $\psi = 1, 2, \dots, n$ , $n \in \mathbb{N}$



## BILDUNGSGANG

Name:	Thomas Glotzbach
Geburtsdatum:	01.05.1973
Mittlere Reife:	08/1987 – 07/1989 Berufsfachschule Fachrichtung Elektrotechnik Konrad-Zuse-Schule Hilders
Berufsausbildung:	09/1989 – 01/1992 Firma Herzau & Schmitt Ausbildung zum Elektromaschinenbauer
Beruf:	02/1992 – 02/1995 Firma Herzau & Schmitt Elektromaschinenbauer, Schaltschrankmonteur  09/1995 – 06/1997 Firma Gottschild Automatisierungstechnik Schaltschrankmonteur
Fachhochschulreife:	09/1997 – 06/1998 Fachoberschule, Fachrichtung Elektrotechnik Ferdinand-Braun-Schule Fulda
Studium:	09/1998 – 08/2003 Studium an der Fachhochschule Fulda Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik Studienschwerpunkt: Automation und Robotik
Praxissemester:	09/2001 – 02/2002 Firma Volkswagen AG Wolfsburg Erstellung einer Modellbibliothek für Getriebe unter Matlab / Simulink
Diplom I:	02/2003 – 05/2003 Firma EDAG (Engineering + Design AG) Fulda Entwicklung einer MOST-Übertragungsstrecke mit Demonstrations- aufbau
Aufbaustudium:	10/2003 – 09/2005 Aufbaustudium an der Universität Kassel Fachbereich Elektrotechnik / Informatik, Studiengang: Elektrotechnik Studienschwerpunkt: Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik
Studentische Hilfskraft:	11/2004 – 01/2005 Studentische Hilfskraft an der Universität Kassel Fachgebiet Regelungs- und Automatisierungstechnik Aufbau, Inbetriebnahme und Modellbildung einer Temperaturstrecke
Diplom II:	04/2005 – 09/2005 Universität Kassel Fachgebiet Regelungs- und Automatisierungstechnik Modellbildung und Auslegung einer Temperaturregelung mit Hei- zungs- und Kühlungsfunktion unter Verwendung von Matlab / Simulink
Wissenschaftliche Tätigkeit:	09/2005 – 08/2009 wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für Solare Energieversorgungstechnik e.V. (ISET e.V.), Bereich Anlagentechnik und Leistungselektronik, Gruppe Anlagen- und Messtechnik  seit 08/2009 wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (Fraunhofer IWES), Bereich Anlagentechnik und Netzintegration, Gruppe Anlagen- und Mess- technik

Schriftenreihe **Erneuerbare Energien und Energieeffizienz**  
**Renewable Energies and Energy Efficiency**

Herausgegeben von / Edited by  
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schmid, Universität Kassel

<http://www.upress.uni-kassel.de/>

---

- Band 1:** The Influence of Modelling Accuracy on the Determination of Wind Power Capacity Effects and Balancing Needs (2007), ISBN 978-3-89958-248-2  
Cornel Ensslin
- Band 2:** The Way to Competitiveness of PV – An Experience Curve and Break-even Analysis (2006), ISBN 978-3-89958-241-3  
Martin Staffhorst
- Band 3** Smart Electricity Networks based on large integration of Renewable Sources and Distributed Generation (2007), ISBN 978-3-89958-257-4  
Manuel Sánchez Jiménez
- Band 4** Large-scale integration of wind power in the Russian power supply: analysis, issues, strategy (2007), ISBN 978-3-89958-339-7  
Alexander Badelin
- Band 5** Lastmanagement – Nutzung der thermischen Kapazität von Gebäuden als nichtelektrischer Energiespeicher in elektrischen Versorgungsnetzen (2008), ISBN 978-3-89958-356-4  
Aleksandra Saša Bukvic-Schäfer
- Band 6** Mini-Grid System for Rural Electrification in the Great Mekong Sub Regional Countries (2008), ISBN 978-3-89958-364-9  
Tawatchai Suwannakum
- Band 7** Energiemanagement in der Niederspannungsversorgung mittels dezentraler Entscheidung - Konzept, Algorithmen, Kommunikation und Simulation (2008), ISBN 978-3-89958-390-8  
David Nestle
- Band 8** Development and Modelling of a Thermophotovoltaic System (2008), ISBN 978-3-89958-375-5  
Giovanni Mattarolo
- Band 9** Energiekonditionierung in Niederspannungsnetzen unter besonderer Berücksichtigung der Integration verteilter Energieerzeuger in schwachen Netzausläufern (2008), ISBN 978-3-89958-377-9  
Jörg Jahn

- Band 10** Provision of Ancillary Services by Distributed Generators. Technological and Economic Perspective (2009), ISBN 978-3-89958-638-1  
Martin Braun
- Band 11** Optimum Utilization of Renewable Energy for Electrification of Small Islands in Developing Countries (2009), ISBN 978-3-89958-694-7  
Indradip Mitra
- Band 12** Regelung und Optimierung eines Brennstoffzellensystems für die Hausenergieversorgung (2009), ISBN 978-3-89958-696-1  
Björn Eide
- Band 13** Netzschutz für elektrische Energieversorgungssysteme mit hohem Anteil dezentraler Stromerzeugungsanlagen (2009), ISBN 978-3-89958-778-4  
Andrey Shustov
- Band 14** Bioenergy and renewable power methane in integrated 100% renewable energy systems. Limiting global warming by transforming energy systems (2010), ISBN 978-3-89958-798-2  
Sternner, Michael
- Band 15** Role of Grids for Electricity and Water Supply with Decreasing Costs for Photovoltaics (2010), ISBN 978-3-89958-958-0  
Bhandari, Ramchandra
- Band 16** Betrieb eines übergeordneten dezentral entscheidenden Energiemanagements im elektrischen Verteilnetz (2010), ISBN 978-3-86219-008-9  
Ringelstein, Jan
- Band 17** Grid and Market Integration of Large-Scale Wind Farms using Advanced Wind Power Forecasting: Technical and Energy Economic Aspects (2011), ISBN 978-3-86219-030-0  
Cali, Ümit

Eine wichtige elektrisch/physikalische Eigenschaft von PV-Zellen und Modulen ist die Strom/Spannungskennlinie (I/U-Kennlinie), bei welcher der Stromverlauf in Abhängigkeit der Spannung aufgetragen wird. Grundsätzlich ist die Form dieser Kennlinie abhängig von der verwendeten Technologie der Zelle. Weiteren Einfluss haben z. B. die Bestrahlungsstärke der Sonne, die Zusammensetzung der spektralen Anteile des Sonnenlichts und die Zelltemperatur. Eine mathematisch/physikalische Nachbildung dieser PV-Zellen bzw. Module kann mit verschiedenen Simulationsmodellen erfolgen, wie z. B. dem Ein- und Zweidiodenmodell. Mit diesen Modellen lassen sich jedoch nicht alle PV-Technologien modellieren. In dieser Arbeit wurde ein neues Modell entwickelt, welches ein künstliches neuronales Netz verwendet. Mit den Messdaten eines Kennlinienmessgerätes, dem am IWES entwickelten ISET-*mpp meter*, welches auch Teil der Arbeit war, wird das neuronale Netz trainiert. In dieser Arbeit werden somit einerseits eine neue Messtechnik zur Messung von I/U-Kennlinien präsentiert und beschrieben und andererseits ein neues Simulationsmodell zur mathematischen Nachbildung photovoltaischer Zellen und Module vorgestellt. Diese beiden Komponenten werden zusammen für ein Verfahren und eine Vorrichtung verwendet, welche die Parameter für das neue Simulationsmodell quasi automatisiert bestimmt.