



Bedienungsanleitung zum Programm PV-Teach 3.0



1. Installation

Das Programm PV-Teach läuft unter der Software *LabVIEW*. Sollten Sie auf Ihrem PC bereits *LabVIEW* 2013 oder höher (als Entwicklungsumgebung oder die Runtime-Engine) installiert haben, laden Sie bitte nur die Datei „*PVTeach_Installer_without_Runtime*“ herunter und führen die „*setup.exe*“ aus.

In allen anderen Fällen laden Sie bitte die Datei „*PV-Teach_Installer_Complete*“ herunter. Nach dem Aufruf der „*setup.exe*“ werden alle benötigte Komponenten sowie das Programm *PV-Teach* auf Ihrem Rechner installiert.

Um das Programm einfach zu finden wird eine Verknüpfung auf Ihrem Desktop erstellt.

Beim Aufruf des Programms sollte folgende Oberfläche erscheinen:

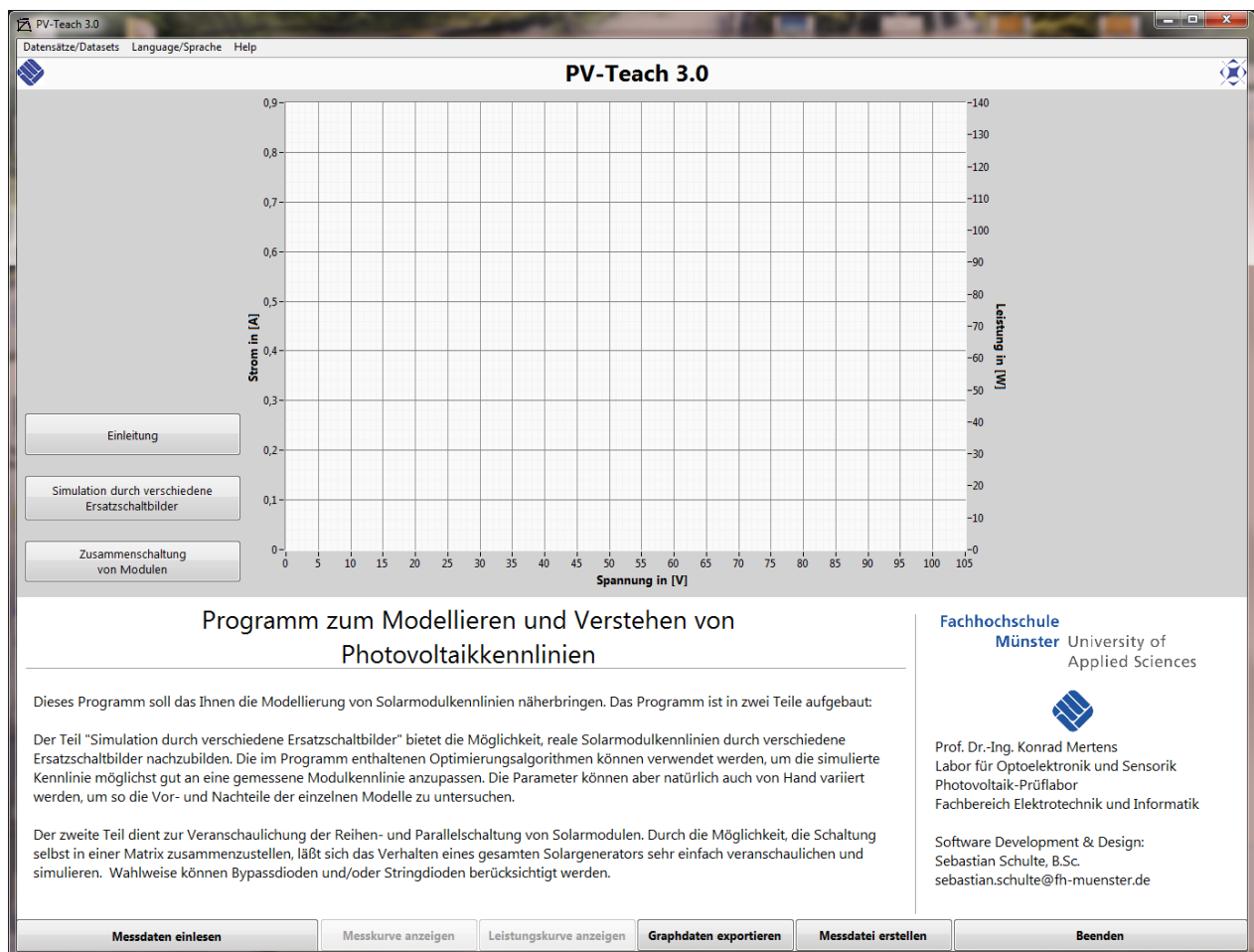


Bild 1: Ansicht des PV-Teach-Startbildschirms



2. Motivation und Ziel dieses Programms

Die Modellierung der Kennlinien von Solarzellen und Solarmodulen mit Hilfe von Ersatzschaltbildern ist eine übliche und bewährte Methode. Daher spielt ihre Vermittlung auch in der Lehre eine wichtige Rolle. Meistens bleibt es allerdings bei der reinen Betrachtung der Kennliniengleichungen und der Aufzählung der Vor- und Nachteile der einzelnen Ersatzschaltbilder. Hier ist es von Vorteil, ein Simulationstool zur Verfügung zu haben, das die **Möglichkeiten der einzelnen Ersatzschaltbilder** herausstellt. Wünschenswert ist z.B. das Einlesen von realen Modulkennlinien und eine anschließende Approximation mittels verschiedener Ersatzschaltbilder, um deren **Approximationsgüte** direkt vergleichen zu können.

Ein weiteres wichtiges Thema in Praxis und Lehre der Photovoltaik sind die Auswirkungen von **Mismatching** und Teilverschattung von PV-Anlagen. Auch hier ist die Verwendung eines Simulationstools hilfreich, da die sich ergebende Gesamtleistung nur schwer abzuschätzen ist. Außerdem ist die resultierende Leistungskennlinie von besonderem Interesse, um das Verhalten des MPP-Trackers des Wechselrichters vorhersagen zu können.

Diese Anforderungen erfüllt das an der Fachhochschule Münster entwickelte Freeware-Programm *PV-Teach*. Es ermöglicht eine **Simulation von Modulkennlinien** durch verschiedene Ersatzschaltbilder. Hierzu können gemessene Kennlinien von Solarmodulen eingelesen werden. Deren Verlauf wird dann mit den verschiedenen Ersatzschaltbildern möglichst genau nachgebildet. Darüber hinaus erlaubt *PV-Teach* die **Simulation von Strings**, die aus unterschiedlichen Modulen bestehen. Außerdem lassen sich mehrere Module oder Strings parallelschalten, um so die **Kennlinie des gesamten Solargenerators** darstellen zu können. Hierbei lässt sich auch zeigen, welche Auswirkungen **Bypassdioden** und **Stringdioden** auf die Gesamtleistung haben.

3. Kurzbedienungsanleitung

3.1 Programmteil „Simulation für verschiedene Ersatzschaltbilder“

In diesem Programmteil können Sie Solarkennlinien durch verschiedene Ersatzschaltbilder nachbilden (siehe Bild 2).

- Um die verschiedenen **Ersatzschaltbilder** zu **sehen**, fahren Sie mit der Maus über die Bereiche rechts vom weißen Rechteck „Gewähltes Ersatzschaltbild“
- Laden Sie eine gemessene Modulkennlinie mit dem Button „**Messdaten einlesen**“; z.B. das Modul Solarworld SW-165
- Durch Drücken des obersten rotweißen Kreuzes („**Kennlinie anzeigen**“) unterhalb des Blocks „Vereinfachtes Modell“ wird die Kennlinie des „Vereinfachten Ersatzschaltbildes“ dargestellt.
- Durch Drücken des untersten rotweißen Kreuzes („**Optimale Anpassung**“) unterhalb des Blocks „Vereinfachtes Modell“ werden die Parameter so verändert, dass gemessene und simulierte Kennlinie möglichst gut übereinstimmen.



- Probieren Sie das Ganze auch mit den **weiteren Ersatzschaltbildern**. Je mehr Parameter die einzelnen Modelle bieten, desto bessere Approximationsgüten werden im Allgemeinen erreicht.
- **Variieren** Sie probeweise die jeweiligen **Parameter von Hand** und sehen Sie sich das Ergebnis an. Schaffen Sie es, bessere Approximationsgüten als der Computer zu erreichen?
- Hinweis: Das Zwei-Dioden-Modell bietet drei verschiedene Methoden zur automatischen Parameteroptimierung. Im Fall der beiden **Leven-Marquard-Optimierungsalgorithmen (LMA)** kann die **Rechenzeit** bei schlecht gewählten Startwerten **sehr lang** werden oder es kann sogar zum Absturz des Programmes kommen.
- In Bild 2 ist zu sehen, wie unterschiedlich gut das „Vereinfachte Modell“ und das „Ein-Dioden-Modell“ die Messkurve nachbilden können. Im ersten Fall (hellgrüne Kurve) liegt die **Approximationsgüte** lediglich bei 93,33 %; im zweiten Fall (dunkelgrüne Kurve) dagegen immerhin bei 99,57 %.

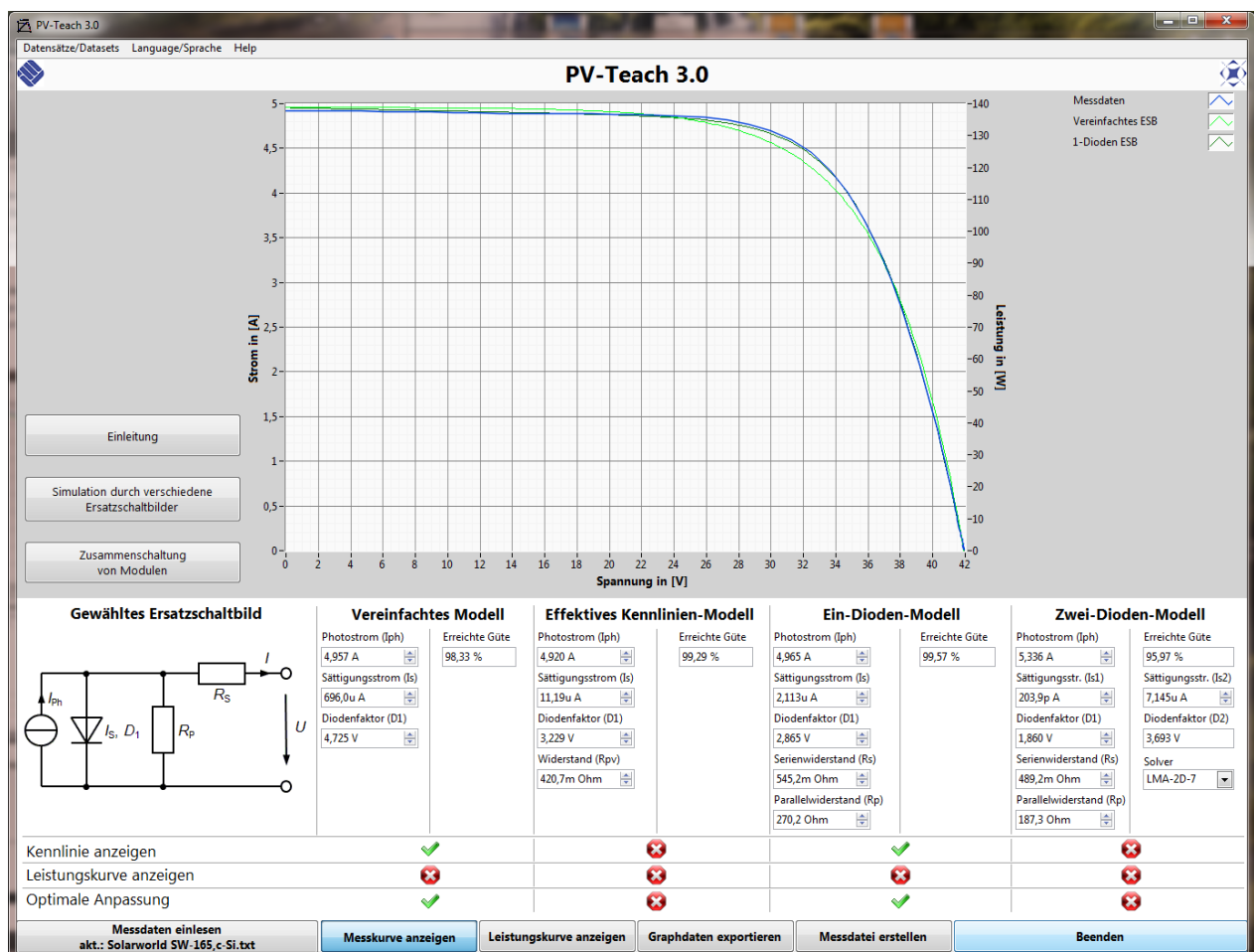


Bild 2: Ansicht des Programmteils „Simulation durch verschiedene Ersatzschaltbilder“



3.2 Programmteil „Zusammenschaltung von Modulen“

In diesem Programmteil können Sie unterschiedliche Solarmodule miteinander verschalten und die resultierenden Gesamtkennlinien darstellen (siehe Bild 3).

a) Simulation mit vorhandenen Messdateien

- Laden Sie eine gemessene Modulkennlinie mit dem Button „**Messdaten einlesen**“; z.B. das Modul Solarworld SW-165.
- Durch Drücken des Buttons „**Messdaten-Modul einfügen**“ übernehmen Sie die Daten in Modultyp A. Die Kennlinie von Modultyp A wird daraufhin angezeigt.
- Durch Variieren der **Modulanzahl** von Modultyp A wird festgelegt, wie viele Module dieses Typs in Reihe geschaltet werden sollen. Gleichzeitig können Sie über den „**Verschattungslevel**“ die Stärke der Modulverschattung definieren.
- Standardmäßig wird von einer **Bypassdiode** pro Modul ausgegangen. Diese kann aktiviert oder deaktiviert werden. Falls das Modul mehrere Bypassdioden enthält, kann wiederum festgelegt werden, wie viele dieser Bypassdioden im Fall von **Verschattung** betroffen sind.
- Tipp: Die **Autoskalierung der Diagrammachsen** kann **deaktiviert** werden. Durch Rechtsklick auf die jeweilige Achse finden Sie die Ausschaltmöglichkeit. Möchten Sie die **Skalierung von Hand** einstellen, machen Sie bitte einen Doppelklick auf die höchste Zahl der Achsenskalierung und geben den gewünschten Wert ein.
- Neben Modultyp A können zwei **weitere Modultypen B und C** definiert werden. Hierzu laden Sie eine neue Messkurve ein und übernehmen die Daten für die Modultypen.
- Die definierten Modultypen A, B und C lassen sich nun **beliebig miteinander verschalten**. Dazu klicken Sie unter „Gesamtschaltungskonfiguration“ auf die schwarzen Kreuze. Es können nur die Modultypen verschaltet werden, die auch zuvor definiert wurden.
- Durch Klicken auf den Bereich neben dem Text „**String Diode**“ lassen sich wahlweise Stringdioden in die einzelnen Strings einfügen.

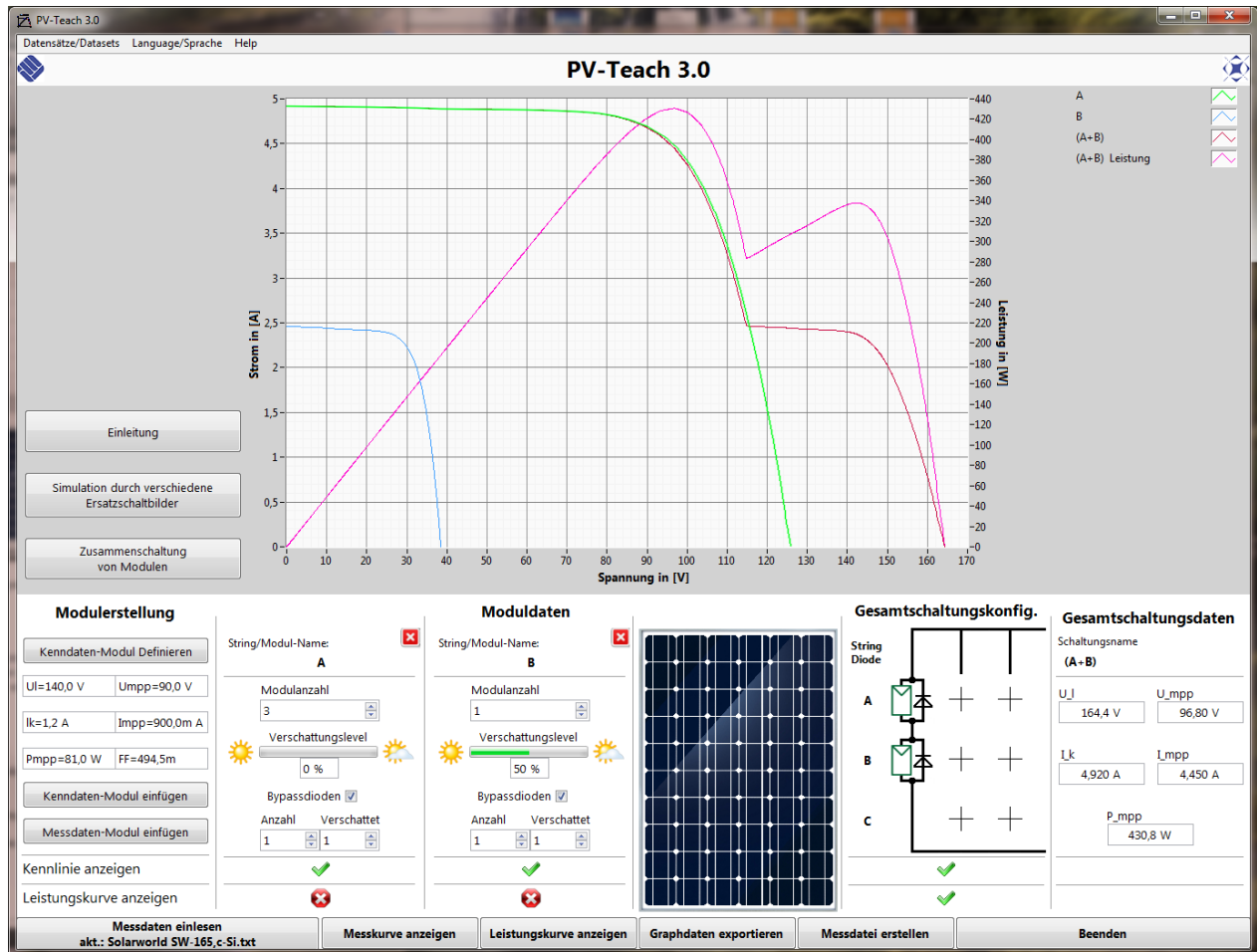


Bild 3: Ansicht des Programmteils „Zusammenschaltung von Modulen“

Beispiel: Teilverschatteter String

Als Beispiel soll im Folgenden ein teilverschatteter String simuliert werden. Wir nehmen an, ein String besteht aus 4 Modulen des Typs Solarworld SW-165, von denen eines durch Verschattung nur mit halber Sonneneinstrahlung (500 W/qm) beschienen wird. Die Vorgehensweise ist wie folgt:

1. Ausführen der ersten drei Punkte der oberen Liste. Für **Modultyp A** sollten **3 Module** eingestellt werden
2. Einfügen eines weiteren **Modultyps B**. Für dieses Modul wird anschließend der **Verschattungslevel auf 50 %** eingestellt (siehe Bild 3).
3. **Reihenschaltung** von Modultyp A und B in der Gesamtschaltungskonfiguration
4. Anzeigen der **Gesamtkennlinie** durch Klicken auf das rotweiße Kreuz unter der Gesamtschaltungskonfiguration
5. Stellen Sie zusätzlich die **Leistungskennlinie** der Gesamtschaltung dar. Deutlich erkennbar sind die zwei MPP-Punkte.



6. Variieren Sie nun den **Verschattungslevel** von Modultyp B. Schön sichtbar verschiebt sich der rechte **MPP-Punkt**.
7. **Deaktivieren** Sie die **Bypassdiode** von Modultyp B. Die Kennlinien verändern sich vollständig, da Modul B nun den maximalen Stringstrom vorgibt. Die MPP-Leistung sinkt drastisch ab.
8. Nun ist es z.B. möglich, einen weiteren **unverschatteten String** parallel zum ersten String zu schalten. Hierzu werden die Moduldaten für Modultyp C übernommen. Stellen Sie 4 in Reihe geschaltete Module des Typs C ein und schalten Sie diesen String in der Gesamtschaltungskonfiguration parallel zum schon bestehenden String.
9. Nun kann wiederum beobachtet werden, wie sich das **Ein- und Ausschalten der Bypassdiode** von Modul B auf die **Gesamtleistungskurve** auswirkt. Variieren Sie wiederum den Verschattungsgrad von Modul B, um die MPP-Veränderungen zu beobachten.

b) Simulation mit Angaben aus Moduldatenblättern

Neben der Möglichkeit, Messkurven von Solarmodulen zu verwenden, können auch Datenblattangaben von konkreten Solarmodulen zur Simulation verwendet werden.

Dazu drückt man anstelle des Buttons „Messdaten-Modul einfügen“ den Button „**Kenndaten-Modul einfügen**“. Es öffnet sich ein Popup-Fenster, in dem die Daten (Leerlaufspannung, Kurzschlussstrom, MPP-Spannung und MPP-Strom) eingegeben werden können (siehe Bild 4a). Durch Drücken des Buttons „**Modul definieren**“ wird das Popup-Fenster geschlossen und die Daten werden auf das Hauptblatt übernommen. Durch Drücken des Buttons „**Kenndaten-Modul einfügen**“ kann die erstellte Kurve dann für die Modultypen A, B oder C verwendet werden.

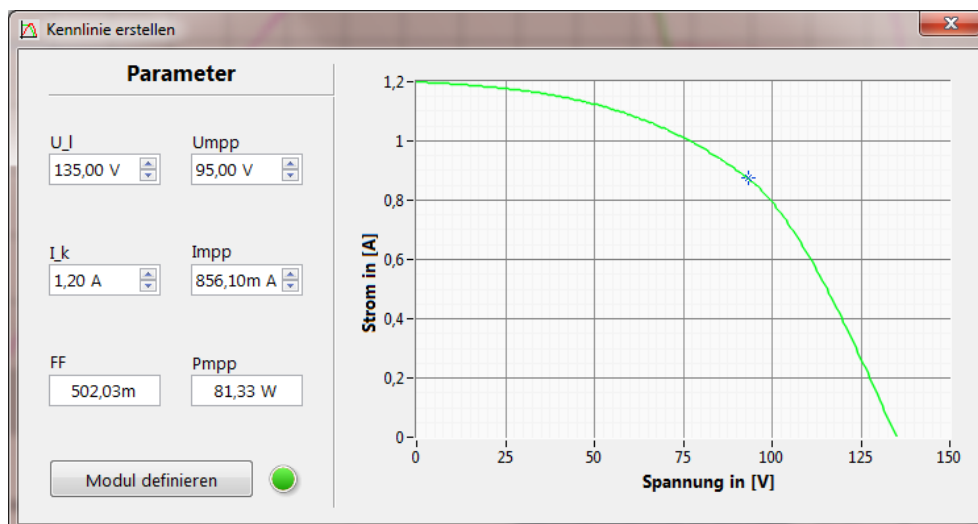


Bild 4a: Erfolgreiche Definition einer Modulkurve anhand von Datenblattangaben

Bei unphysikalischen oder unpassenden Datenwerten ist die Erstellung einer Modulkennlinie nicht möglich. Dies zeigt der rote Punkt neben dem Button „Modul definieren“ in Bild 4b. In diesem Fall



müssen die Parameter variiert werden, bis sich eine „erlaubte“ Kennlinie ergibt und der Punkt die Farbe grün angenommen hat (siehe Bild 4a).

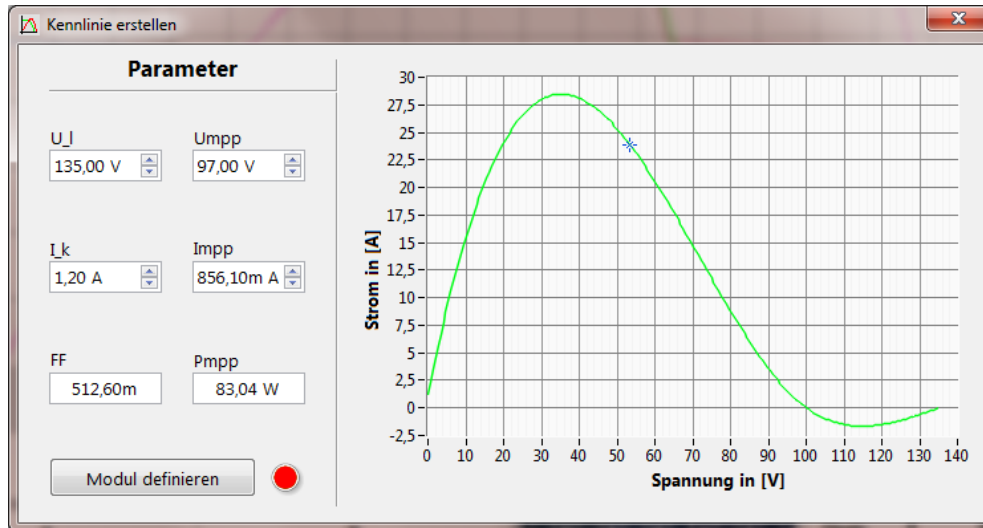


Bild 4b: Erfolgreiche Definition einer Modulkurve anhand von Datenblattangaben

Um die Kenndaten der Module nicht immer wieder neu eingeben zu müssen, ist es auch möglich, aus den Kenndaten eine „simulierte Messdatei“ zu generieren. Hierzu drücken Sie unten auf den Button „Messdatei erstellen“. Es öffnet sich ein ähnliches Fenster wie in Bild 4a, nun aber mit der Möglichkeit, eine Datei abzuspeichern, die die Modulkennlinie als Array enthält. Zunächst wählen Sie den Pfad aus, geben einen Dateinamen ein und drücken den Button „OK“. Anschließend drücken Sie dann den Button „Modul speichern“, um die Datei auch wirklich zu speichern.

Die erstellte Datei lässt sich dann wiederum als Messdatei einlesen und so verwenden, wie unter Abschnitt a) *Simulation mit vorhandenen Messdateien* beschrieben.

3.3 Konfigurationsdateien

Nach der Simulation eines speziellen Solargenerators möchten Sie ggf. alle Einstellungen in einer Konfigurationsdatei abspeichern. Dies erfolgt mit dem Menüpunkt „Konfigurationsdatei“ in der oberen linken Ecke des Programmfensters. Sie können die aktuelle Konfiguration in einer neuen Datei (z.B. „projekt_1.PVCFG“) abspeichern. Nach einem Neustart des Programms wird zunächst immer die Datei „standard.PVCFG“ geladen. Anschließend können die dann ihre gewünschte Konfigurationsdatei laden.

Wir wünschen Ihnen viel Spaß und neue Erkenntnisse mit dem Programm PV-Teach!

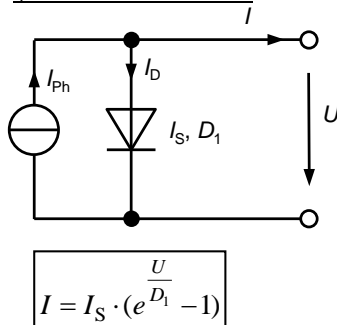


4. Wissenswertes zum technischen Hintergrund

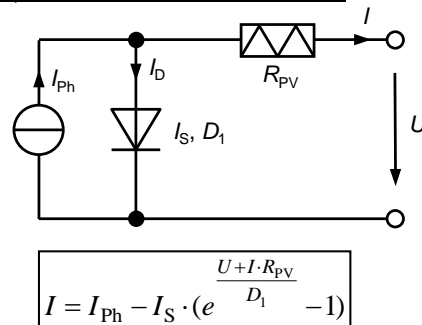
4.1 Ersatzschaltbilder von Solarmodulen

Hier sollen noch kurz die üblichen Ersatzschaltbilder (ESB), welche zur Simulation von Solarzellen und Solarmodulen verwendet werden, beschrieben und erklärt werden:

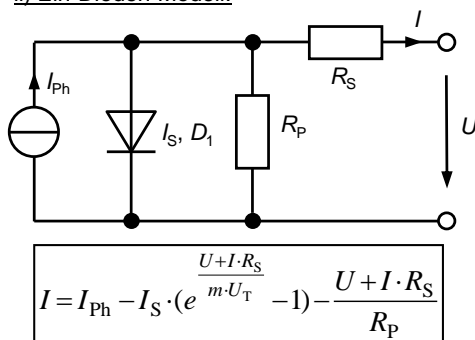
i) Vereinfachtes Modell:



iii) Modell der effektiven Kennlinie:



ii) Ein-Dioden-Modell:



iv) Zwei-Dioden-Modell:

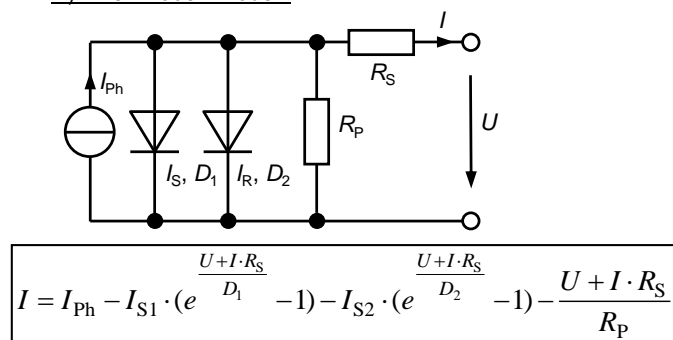


Bild 5: Gegenüberstellung verschiedener Ersatzschaltbilder

i) Vereinfachtes Modell:

Im Fall des vereinfachten Modells stehen lediglich die drei Parameter Photostrom I_{ph} , Sättigungsstrom I_s und der Diodenfaktor D_1 zur Anpassung an die Messkurve zur Verfügung. Der Diodenfaktor wurde hier so definiert, dass er das Produkt aus Idealitätsfaktor m , Temperaturspannung U_T und Anzahl der Solarzellen pro Modul N zusammenfasst:

$$D_1 = m \cdot U_T \cdot N \quad (1)$$

ii) Modell der effektiven Kennlinie:

Bei diesem ESB wird ein zusätzlicher Serienwiderstand R_{pV} verwendet. Zur besseren Approximation an reale Messkurven sind auch negative Werte für seinen „Widerstand“ zugelassen [Wag06].

iii) Ein-Dioden-Modell:



Das Ein-Dioden-Modell ist das am weitesten verbreitete Ersatzschaltbild, da es meist gute Approximationsqualitäten aufweist. Erreicht wird dies neben dem Serienwiderstand R_S durch den zusätzlichen Parallelwiderstand R_P .

iv) Zwei-Dioden-Modell:

Das Ein-Dioden-Modell berücksichtigt nicht den Rekombinationsstrom einer Solarzelle. Daher verwendet das Zwei-Dioden-Modell eine zweite Diode, die durch I_{s2} und D_2 beschrieben wird. D_2 beträgt üblicherweise das Doppelte des Diodenfaktors D_1 der ersten Diode.

4.2 Programmtechnische Realisierung

Da das vereinfachte, das Ein-Dioden- und das Zwei-Dioden-Modell analytisch nicht lösbar sind, muss ein **Iterationsalgorithmus** angewendet werden. Hierzu wurde die Ersatzschaltbild-Gleichung als Nullstellenproblem definiert, welches dann mit dem **Newton-Raphson-Verfahren** gelöst wurde (siehe z.B. [Pap07]).

Weiterhin stellt die automatische Anpassung der Ersatzschaltbildparameter an die eingelezene Messkurve eine programmtechnische Herausforderung dar. Hier wurden für das Zwei-Dioden-Modell **zwei Methoden implementiert**, die wahlweise verwendet werden können [Ste11].

Das **Prinzip nach Hovinen** verwendet eine **analytische Methode** [Hov94]. Die Gleichungen des Ersatzschaltbilds werden dabei so umgestellt, dass alle restlichen Parameter in Abhängigkeit des Serienwiderstands R_S ausgedrückt werden können. Zur Optimierung werden lediglich die beiden Diodenparameter D_1 und D_2 vorgegeben und dann R_S so lange variiert, bis sich ein Approximationsoptimum mit der Messkurve ergibt. Aus den Werten von D_1 , D_2 und R_S lassen sich dann nach einer länglichen Formel alle anderen Ersatzschaltbildelemente berechnen.

Eine Alternative stellt der **Levenberg-Marquardt-Algorithmus** dar [Lou05]. Es handelt sich um ein **Optimierungsverfahren**, das ein **iteratives Fitting** an die Messkurve durchführt. Hierzu werden alle sieben Parameter des Ersatzschaltbildes durchvariiert. Kritisch ist die Wahl der Startparameter, da das Verfahren nicht in jedem Fall konvergiert. Ein guter Ansatz besteht darin, die Parameter zunächst mit der Hovinen-Methode zu errechnen und diese dann als Startwerte für die Levenberg-Marquardt-Iteration zu verwenden.

Ein konkretes Beispiel zum Vergleich der beiden Verfahren findet sich weiter unten.

Das Programm *PV-Teach* wurde unter *LabVIEW* 2013 realisiert. Um eine hohe Performance zu erreichen, wurden die Berechnungsverfahren nach Newton-Raphson, Hovinen und der Levenberg-Marquardt in *MathScript* implementiert. *MathScript* ist eine *MATLAB*-ähnliche Sprache, die in *LabVIEW* eingebunden werden kann.

4.3 Die Methoden nach Hovinen und Levenberg-Marquardt im konkreten Vergleich

Die Methode nach Hovinen eignet sich sehr gut für „normale, fast ideale“ Modulkurven. Ein Beispiel ist in Bild 6 dargestellt. Der simulierte Verlauf liegt praktisch exakt auf der gemessenen Kurve. Als mittlere Abweichung ergibt sich ein Wert von 0,6327 %.



In der Realität sehen Modulkurven allerdings oftmals anders aus. So weisen die einzelnen verbauten Zellen häufig unterschiedliche Kurzschlussströme auf. Dies führt zu einem leicht stufigen Verlauf des Stromes im unteren Spannungsbereich. Relativ extrem zeigt dies Bild 7.

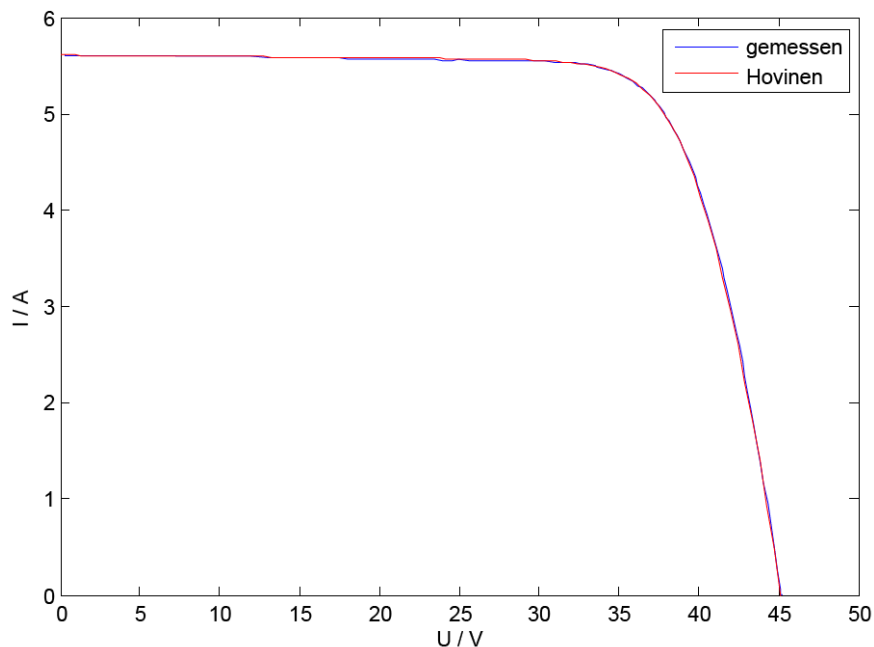


Bild 6: Gemessene und simulierte Kurve eines „schönen Moduls“. Die Methode nach Hovinen bildet die Messkurve praktisch exakt nach.

Beide Simulationsverfahren können die tatsächliche Kurve nicht optimal nachbilden. Im Fall des **Hovinen-Modells** werden Kurzschluss-, Leerlauf- und MPP-Punkt optimal getroffen. In den meisten anderen Bereichen liegt die Kurve allerdings deutlich neben den Messwerten. Als **Abweichung** zur Messkurve ergibt sich ein Wert von **5,7161 %**.

Auch der Levenberg-Marquardt-Algorithmus (LMA) kann die Stromstufe nicht nachvollziehen. Allerdings wird hier der Kurzschlussstrom niedriger eingestellt, so dass im mittleren Spannungsbereich der Kennlinie eine geringere Abweichung von der Messkurve ergibt. Auch der steile Abfall der Messkurve oberhalb des MPPs wird relativ gut nachgebildet. Dies liegt daran, dass der Algorithmus alle 7 Parameter des Ersatzschaltbilds variieren kann. Im Gegensatz dazu werden bei der Hovinen-Methode nur die beiden Diodenfaktoren verändert. Im Fall des Ansatzes $D_2 = 2 \times D_1$ wird sogar faktisch nur ein Parameter variiert.

Als Ergebnis beträgt die Abweichung beim **Levenberg-Marquardt-Algorithmus** lediglich **2,1935 %**.

Welches Verfahren tatsächlich das „bessere“ ist, kann nicht ohne weiteres entschieden werden. Das Hovinen-Verfahren ist aufgrund der analytischen Berechnung sehr robust und liefert schnell die optimierte Lösung. Der Levenberg-Marquardt-Algorithmus kann höhere Approximationsgüten erreichen, ist aber auf gute Startwerte und eine hohe Messpunktzahl angewiesen. Ansonsten ergibt sich ggf. keine Konvergenz bei der Iteration.



Hinzu kommt, dass die LMA-Lösung aus Bild 6 in der Praxis nicht zwangsläufig das brauchbarere Ergebnis bietet. So wird hier z.B. ein deutlich zu niedriger Kurzschlussstrom ermittelt, was für viele Anwendungen ein echter Nachteil wäre.

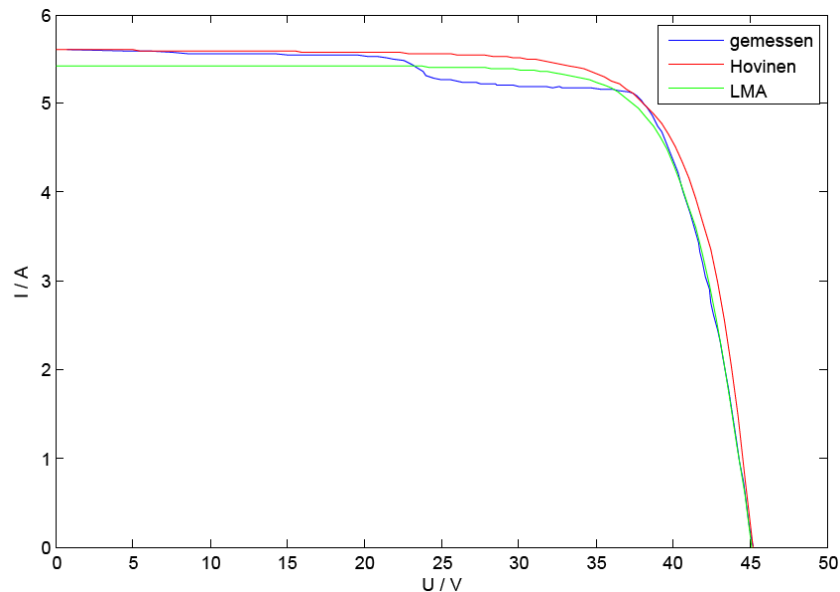


Bild 7: Gemessene und simulierte Kurve eines „schlimmen Moduls“. Die beiden Simulationsverfahren zeigen deutlich unterschiedliche Ergebnisse. Der Levenberg-Marquardt-Algorithmus (LMA) erzielt insgesamt eine bessere Approximation.

5. Fazit

Mit dem Programm *PV-Teach* steht ein einfach und intuitiv bedienbares Simulationstool für PV-Kennlinien zur Verfügung. Es zeigt interaktiv die Möglichkeiten der verschiedenen Ersatzschaltbilder auf. Darüber hinaus macht es die verschiedenen Effekte bei der Serien- und Parallelschaltung von Solarmodulen deutlich. So kann es neben dem Einsatz in der Lehre auch dem Praktiker eine Hilfestellung sein.

Das Programm *PV-Teach* steht auf der Website www.lehrbuch-photovoltaik.de als kostenloser Download zur Verfügung.



6. Literatur

- [Hov94] Hovinen, Anssi: Fitting of the Solar Cell IV-curve to the Two Diode Model. Physica Scripta, Vol. T54, 1994
- [Lou05] Lourakis, Manolis I. A.: A Brief Description of the Levenberg-Marquardt Algorithm Implemented by levmar, Foundation for Research and Technology, Institute of Computer Science, Heraklion, Griechenland, 11. Februar 2005
- [Pap07] Papula, Lothar: Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler – Band 1, Vieweg, 2007
- [Ste11] Stegemann, Thomas: Ersatzschaltbildmodellierung von Solarmodulen: Optimierung der FIT-Parameter“, Seminararbeit, Fachhochschule Münster, Fachbereich Elektrotechnik und Informatik, 2011
- [Wag06] Wagner, A.: Photovoltaik Engineering – Handbuch, Entwicklung und Anwendung, Springer, 2006

7. Versionshistorie

- PV-Teach 1.0 Erste einfache Programmversion
- PV-Teach 2.0 Neuprogrammierung der gesamten Software, um eine ansprechende Oberfläche und eine einfachere Bedienbarkeit zu erreichen.
- PV-Teach 2.5 Implementierung weiterer Features (Simulation von mehreren Bypassdioden pro Modul etc.)
- PV-Teach 3.0 Implementierung weiterer Features:
- Zweisprachigkeit Deutsch/Englisch
 - Erstellung von Messdateien aus Solarmodul-Datenblattangaben
 - Möglichkeit das Fenster zu skalieren
 - Überarbeitetes Design
 - Behebung einiger Bugs im Programm
 - Bei einem Neustart von PV-Teach bleibt die letzte Modul-Konfiguration bestehen
 - Es können aktuelle Konfigurationen exportiert und importiert werden