

# Bachelorthesis

Thomas Markmann

Simulation einer Photovoltaikanlage  
in einer neuen Entwicklungsumgebung

Thomas Markmann

Simulation einer Photovoltaikanlage  
in einer neuen Entwicklungsumgebung

Bachelorthesis eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung  
im Studiengang Informations- und Elektrotechnik  
am Department Informations- und Elektrotechnik  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer : Prof. Dr. -Ing. Michael Röther  
Zweitgutachter : Prof. Dr. -Ing. Annabella Rauscher Scheibe

Abgegeben am : 18.05.2011

## **Kurzfassung**

### **Thema der Bachelorthesis**

Simulation einer Photovoltaikanlage in einer neuen Entwicklungsumgebung

### **Stichworte**

Regenerative Energien, Photovoltaik, Simulation, PORTUNUS

### **Kurzzusammenfassung**

Im Rahmen dieser Bachelorthesis wird die Simulation einer Photovoltaikanlage mit Hilfe der Simulationssoftware PORTUNUS beschrieben.  
Es werden die technischen Hintergründe der Einzelkomponenten erläutert und ein Weg aufgezeigt, diese in PORTUNUS umzusetzen.

## **Abstract**

### **Title of the paper**

Simulation of a photovoltaic system in a new development environment

### **Keywords**

Renewable energies, Photovoltaic, Simulation, PORTUNUS

### **Abstract**

As part of this bachelor thesis is the simulation of a photovoltaic system described by the simulation software PORTUNUS.  
It explains the technical background of the individual components and identified a way to implement it in PORTUNUS.

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all jenen meinen Dank ausdrücken die mich motiviert, gefördert und ermutigt haben, mein Studium zu beginnen, durchzuhalten und mit dieser Arbeit hoffentlich auch erfolgreich abzuschließen.

Herrn Prof. Micheal Röther, der durch seine Vorlesung mein Interesse an regenerativen Energien geweckt hat und mir in allen Fragen, die sich mir im Rahmen dieser Arbeit gestellt haben, stets zur Seite stand.

Frau Prof. Annabella Rauscher-Scheibe, die mir durch Ihre freundliche, kompetente und professionelle Art und Weise gezeigt hat, dass Vorlesungen nicht nur informativ und lehrreich sind, sondern auch Spaß machen können.

Meinen Kommilitonen, Alexander Hoops, Tobias Michaelsen und Dirk Tenzer, mit denen ich 4 Jahre zusammen gelernt, geschwitzt und gelacht habe.

Und zu guter Letzt, meiner Frau Simone, die stets an mich glaubte, all meine Launen ertrug, mir mit diesem Studium meinen Herzenswunsch erfüllte, mir immer wieder Kraft gab und dazu den enormen Kostenaufwand alleine bewältigte.

All diese Menschen haben zum Erstellen und Gelingen dieser Arbeit beigetragen und verdienen meinen besonderen Respekt und Dank.

## Einleitung

Im Rahmen dieser Bachelorthesis soll mit Hilfe einer neuen Simulationssoftware eine Photovoltaikanlage simuliert werden.

Neben der Betrachtung der mathematischen Grundlagen, die in der Photovoltaik ihre Anwendung finden, beschäftigt sich diese Arbeit auch mit der Umsetzung und Implementierung eben jener Grundlagen in diese neue Entwicklungsumgebung.

Jede Komponente einer Solaranlage wird dabei mit Hilfe seines mathematischen Modells beschrieben, simuliert und anschließend dokumentiert.

Auf diese Weise wird, wenn auch nur zum kleinen Teil, ein Einblick in die Software gewährt.

Damit sollen Möglichkeiten, aber auch Grenzen aufgezeigt werden, die diese Entwicklungsumgebung zu bieten hat.

Da die Qualität einer Simulation stets gleichen, mathematischen Algorithmen folgt, spielen Benutzerfreundlichkeit und Darstellung der Simulationsergebnisse eine entscheidende Rolle in der Bewertung von Simulationsprogrammen.

Da eine Vielzahl von diesen Programmen auf dem Markt verfügbar sind, ist es unerlässlich sich einen Überblick zu verschaffen, welches dieser Programme dem Anwender gerecht werden.

Generelles Ziel einer jeden Simulation ist es, Auswirkungen auf theoretische, zum Teil sehr komplexe Systeme sichtbar zu machen, bevor diese in der Realität ihre Anwendung finden.

Nur so können im Vorfeld Schwachstellen aufgedeckt und Kosten vermieden werden.

Der Umfang der benötigten Simulationssoftware hängt zum einem von der Art der Anwendung ab, zum anderen aber von der Leistungsfähigkeit des jeweiligen Programms.

In dieser Arbeit geht es nicht darum, eine Beurteilung der Simulationssoftware PORTUNUS vorzunehmen, sondern lediglich einen Weg aufzuzeigen, wie sich eine Photovoltaikanlage in PORTUNUS umsetzen lässt.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 : Ersatzschaltbild einer Solarzelle.....	10
Abbildung 2 : U-I-Kennlinie einer Solarzelle.....	11
Abbildung 3 : Gespiegelte I-U Kennlinie einer Solarzelle mit allen signifikanten Punkten .....	11
Abbildung 4 : Herstellerdatenblatt SUNPOWER 220 Modul(Auszug).....	15
Abbildung 5 : Darstellung des Desktops der PORTUNUS Simulationssoftware .....	19
Abbildung 6 : Erstellen eines Modells in PORTUNUS.....	20
Abbildung 7 : Desktop des Subsheet-Editors .....	20
Abbildung 8 : Modell einer Zelle im Subsheet-Editor .....	21
Abbildung 9 : Konfiguration der Modellparameter (Stromquelle) .....	22
Abbildung 10 : Konfiguration der Modellparameter (Halbleiter).....	22
Abbildung 11 : Modell des komplett Moduls SUNPOWER 220 im Subsheet-Editor .....	23
Abbildung 12 : Simulationsaufbau eines Moduls von Typ SUNPOWER 220 .....	24
Abbildung 13 : Darstellung der Variablendefinition in PORTUNUS.....	24
Abbildung 14 : Konfiguration der Parametervariation (Auswahl der zu verändernden Zelle) .....	26
Abbildung 15 : Konfiguration der Parametervariation (Auswahl des zu verändernden Parameters))..	26
Abbildung 16 : Die Parametervariation im Überblick .....	26
Abbildung 17 : Konfiguration des Anzeigeelements zur Darstellung des Stroms und der Leistung.....	27
Abbildung 18 : Konfiguration des Signal Analyzers .....	28
Abbildung 19 : Desktop einer kompletten Simulation.....	29
Abbildung 20 : U-I-Kennlinie eines SUNPOWER 220 Moduls (Farblich aufgearbeitet) .....	30
Abbildung 21 : Darstellung des Serienwiderstandes einer Solarzelle.....	33
Abbildung 22 : Zelle mit temperaturabhängigem Serienwiderstand .....	34
Abbildung 23 : Simulationsergebnis des optimierten Solarmoduls SUNPOWER 220.....	34
Abbildung 24 : Simulation des STC / NOCT Betriebs.....	36
Abbildung 25 : Simulation einer Abschattung.....	37
Abbildung 26 : Simulation einer Abschattung mit Bypass-Dioden .....	39
Abbildung 27 : Simulationsbeispiel einer Reihenschaltung mit Abschattung.....	41
Abbildung 28 : Simulationsbeispiel einer Parallelschaltung mit Abschattung .....	43
Abbildung 29 : Simulation einer 3,3 MW Solaranlage .....	44
Abbildung 30 : Darstellung eines Hochsetzsteller kurz HSS .....	46
Abbildung 31 : Modelle des Hochsetzstellers .....	49
Abbildung 32 : Zustandsgraphen-Modell des Suchschwingverfahrens .....	51
Abbildung 33 : Konfiguration von State 1 .....	51
Abbildung 34 : Konfiguration von Transition 1 und 2 .....	52
Abbildung 35 : Konfiguration von State 2 .....	53
Abbildung 36 : Simulationsergebnis des MPP-Trackings .....	54
Abbildung 37 : Zustandsgraphen-Modell.....	55
Abbildung 38 : Simulation einer 660W Solaranlage mit Bestrahlungsstärkenänderung.....	56
Abbildung 39 : Wechselrichterbrücke.....	57
Abbildung 40 : PWM Signalerzeugung in PORTUNUS.....	58
Abbildung 41 : Darstellung der Ausgangsspannung des Wechselrichters mit entsprechendem Spektrum .....	59
Abbildung 42 : Wechselrichter der PORTUNUS-Bibliothek.....	60

Abbildung 43 : Konfiguration des Single Phase Inverter.....	60
Abbildung 44 : Modell des in der Simulation verwendeten Wechselrichters.....	61
Abbildung 45 : Simulation eines Wechselrichters in Verbindung mit einem SUNPOWER 220 Modul..	62
Abbildung 46 : Simulationsdesktop der Regelung eines Wechselrichters über Amplitudenveränderung der Sollfrequenz.....	63

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 : Datenblatt Informationen .....	31
Tabelle 2 : Simulationsergebnisse der Portunus Software und Datenblattsollwerte mit $R_S = 10\text{m}\Omega$ ...	31
Tabelle 3 : Prozentuale Abweichungen der Simulation zu den Herstellerangaben .....	31
Tabelle 4 : Simulationsergebnisse der Portunus Software und Datenblattsollwerte mit $R_S = 7.1\text{m}\Omega$ ...	32
Tabelle 5 : Prozentuale Abweichungen der Simulation zu den Herstellerangaben .....	32
Tabelle 6 : Simulationsergebnisse des optimierten Solarmoduls SUNPOWER 220.....	35
Tabelle 7 : Prozentuale Abweichungen der Simulation zu den Herstellerangaben .....	35
Tabelle 8 : Simulationsergebnis des STC / NOCT Betriebs .....	36
Tabelle 9 : Darstellung der Simulationsergebnisse einer Abschattung .....	38
Tabelle 10 : Prozentuale Abweichungen.....	38
Tabelle 11 : Simulationsergebnisse der Bypass-Dioden.....	40
Tabelle 12 : Prozentuale Abweichungen.....	40
Tabelle 13 : Darstellung der Ausgangsleistung einer Reihenschaltung bei Abschattung eines Moduls um 20% .....	42
Tabelle 14 : Darstellung der Ausgangsleistung einer Parallelschaltung bei Abschattung eines Moduls um 20% .....	43
Tabelle 15 : Simulationsergebnisse der Abschattung eines von 15 Modulen um 20% .....	45
Tabelle 16 : Prozentuale Abweichungen.....	45
Tabelle 17 : Aktionen-Typen eines Zustandsgraphen.....	50
Tabelle 18 : Simulationsergebnisse der Regelung eines Wechselrichters .....	63

## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	6
Tabellenverzeichnis .....	7
1. Die Solarzelle in der Theorie.....	10
1.1. Ein-Dioden Modell .....	10
2. Abhängigkeit von Bestrahlungsstärke und Temperatur .....	13
2.1 Bestrahlungsstärke.....	13
2.2 Temperaturabhängigkeit.....	13
2.3 Umsetzung der Simulationsparameter .....	14
3. Parameter für das Ersatzschaltbild .....	16
3.1 Photostrom $I_{PH}$ .....	16
3.2 Leerlaufspannung $U_{OC}$ .....	16
3.3 Verlustwiderstände .....	17
4. Simulation in PORTUNUS .....	18
4.1 Über Portunus.....	18
4.2 Der Desktop .....	19
4.3 Umsetzung des Ersatzschaltbilds in PORTUNUS.....	19
4.3.1 Erstellen eines Modells in PORTUNUS am Beispiel der Solarzelle .....	19
4.3.2 Das Modell in der Simulation .....	23
4.3.3 Konfiguration der Simulation .....	24
4.3.4 Parametervariation.....	25
4.4 Darstellungsoption der Simulationsergebnisse .....	27
4.4.1 Grafische und tabellarische Darstellung.....	27
4.5 Simulationsergebnisse.....	29
4.5.1 Messwerte vergleich.....	30
4.5.2 Das optimierte Solarmodul .....	33
5. Simulationsbeispiele in PORTUNUS .....	36
5.1 STC / NOCT Betrieb .....	36
5.2 Abschattung bei Solaranlagen .....	37
5.3 Bypass-Dioden .....	39
5.4 Reihen- und Parallelschaltung von Solarmodulen .....	41
5.4.1 Reihenschaltung .....	41
5.4.2 Parallelschaltung .....	43
5.4.3 Kombinationsschaltung .....	44



6. Leistungsoptimierung.....	46
6.1 Der Hochsetzsteller .....	46
6.2 MPP Tracking .....	48
6.2.1 Suchschwingverfahren mit Leistungsmessung .....	48
6.3 Der Hochsetzsteller in PORTUNUS.....	49
6.4 MPP-Tracking in PORTUNUS.....	50
6.4.1 Simulation des Solarmoduls SUNPOWER 220 mit MPP-Tracking .....	54
6.4.2 Simulation einer 660W Solaranlage mit MPP-Tracking.....	55
7. Der Wechselrichter .....	57
7.1 Funktionsweise eines Wechselrichters .....	57
7.1.2 Die PWM Ansteuerung .....	58
7.1.3 Der Ausgangs-Filter .....	59
7.2 Der Wechselrichter in PORTUNUS .....	60
7.3 Simulation des Wechselrichters.....	62
7.3.1 Regelung der Ausgangsleistung.....	62
8. Verluste und Wirkungsgrad.....	64
9. Fazit .....	65

## 1. Die Solarzelle in der Theorie

### 1.1. Ein-Dioden Modell

Zur besseren Vorstellung der Funktionsweise einer Solarzelle wird diese in ein Ersatzschaltbild transformiert.

Eine Stromquelle, dessen Stromstärke u.a. abhängig von der Bestrahlungsstärke ist, kommt ebenso zum Einsatz, wie eine Diode, die durch das Shockley-Modell<sup>1</sup> beschrieben wird.

Desweiteren müssen jene, in der Solarzelle entstehende Verluste dargestellt werden, die durch Kristallfehler, Dotierungsmöglichkeiten und andere Defekte beeinflusst werden. Dieser Widerstand wird im ESB als  $R_p$  dargestellt. Da sich dieser Widerstand für die Leckströme verantwortlich zeigt, muss er möglichst groß sein.

Ebenso müssen der Widerstand der Zuleitung, der Kontakte und der des Halbleitermaterials Berücksichtigung finden, welche sehr klein gehalten werden sollten, um die Spannungsfälle so gering wie eben möglich zu halten. Im ESB als  $R_s$  abgebildet (Abb.1).

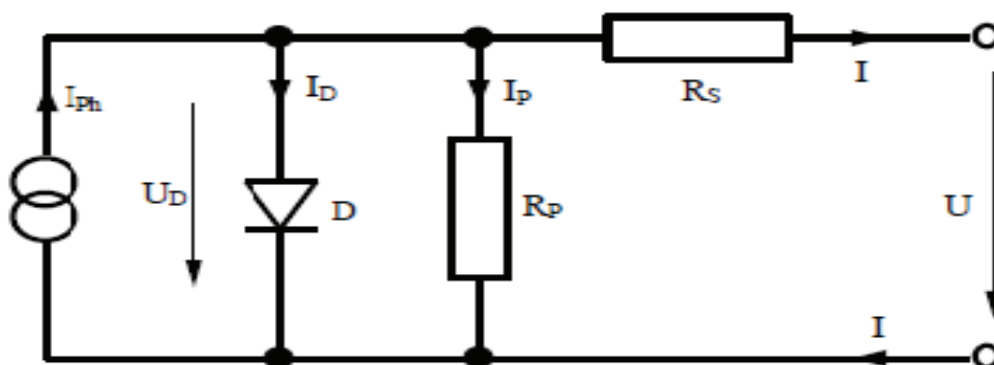


Abbildung 1 : Ersatzschaltbild einer Solarzelle

Wird nun die Solarzelle abgedunkelt, wird der Strom  $I_{ph}$  zu Null. Das ESB entspricht jetzt dem einer unbestrahlten Solarzelle, und wirkt dann als Verbraucher. Legt man nun an den Ausgangsklemmen eine externe Spannungsquelle, so fließt je nach Polarität ein Strom durch die Schaltung in Durchlassrichtung der Diode oder aber in Sperrrichtung. Steigert man diese Spannung in Durchlassrichtung von Null ausgehend, so erhält man die Durchlasskennlinie oder die Sperrkennlinie. Diese entstehende Kennlinie wird auch Dunkelkennlinie genannt. Sie entspricht, unter Vernachlässigung der Verluste, genau der Kennlinie einer Diode, die durch die Shockley-Gleichung beschrieben wird[1].

<sup>1</sup>(Shockley – Modell : Vernachlässigung der Rekombination in der Raumladungszone und der dadurch entstehenden Energie)

In Abb. 2 erkennt man, dass die Kennlinie der beleuchteten Solarzelle die gleiche Form hat wie die der unbeleuchteten Zelle, sie ist einfach um den Photostrom  $I_{PH}$  in die negative Richtung verschoben, da dieser in umgekehrter Richtung zum Diodenstrom fließt. Der Verbraucher hat sich in einen Generator verwandelt.

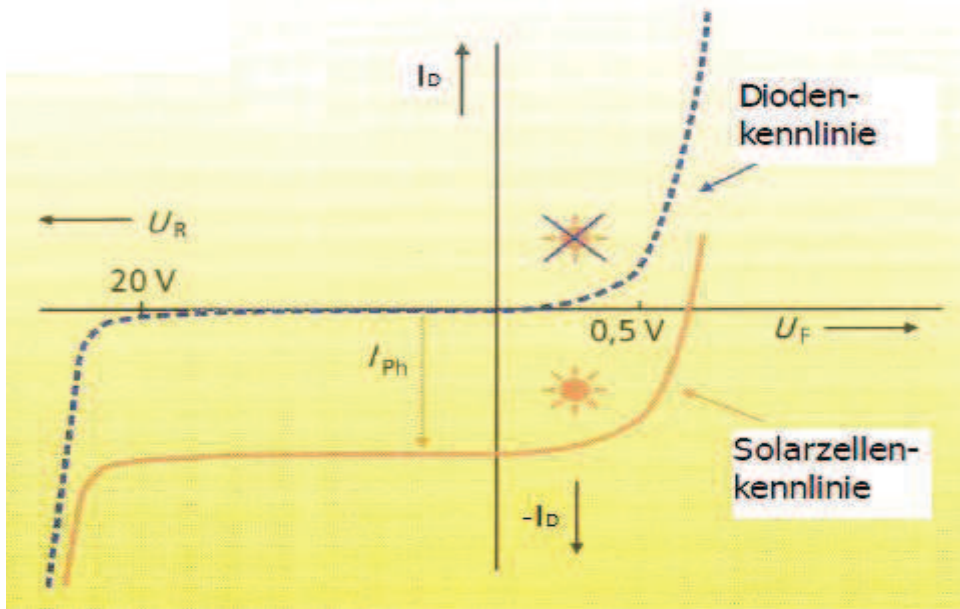


Abbildung 2 : I-U-Kennlinie einer Solarzelle

Da diese Art der Darstellung im Allgemeinen unüblich ist, wird die Vier-Quadranten-Darstellung bevorzugt. Durch einfaches spiegeln an der Spannungsachse wird die Hellkennlinie in den ersten Quadranten der IU-Ebene transferiert, und liegt dadurch im sogenannten Generatorbetrieb (Abb.3).

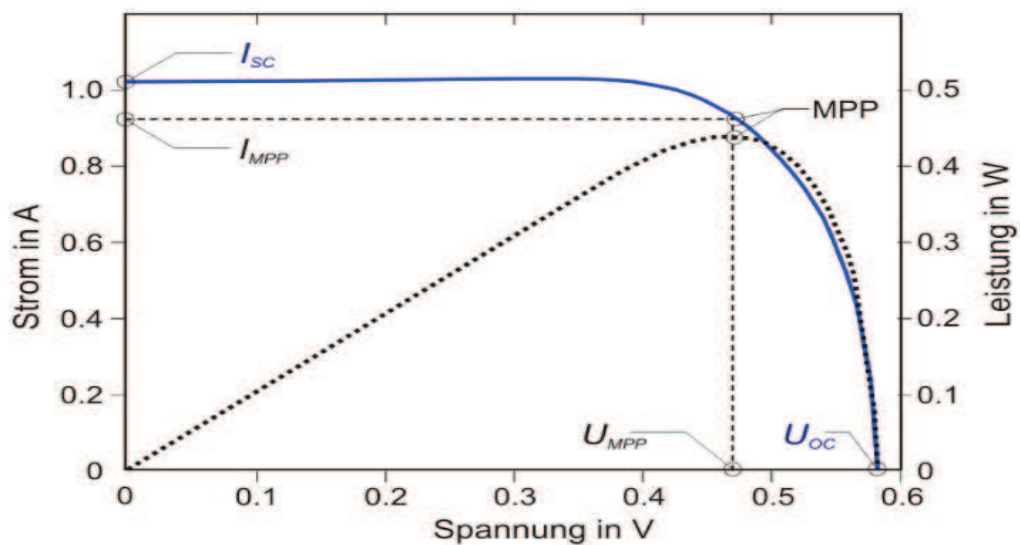


Abbildung 3 : Gespiegelte I-U Kennlinie einer Solarzelle mit allen signifikanten Punkten

Aus dieser IU-Kennlinie können dann diverse Parameter abgelesen werden, die die Solarzelle in den meisten Merkmalen beschreibt.

Eine weitere relevante Größe ist der sogenannte MPP (Maximum Power Point).

Er stellt den Punkt der maximal möglichen Leistung der Solarzelle dar.

Der von der Solarzelle an den Verbraucher (in Abb.1 nicht abgebildet) abgegebene Strom  $I$  ist, gemäß dem ersten Kirchhoff'schen Gesetz, also gleich dem Photostrom  $I_{PH}$  abzüglich des Stroms durch die Diode  $I_D$  und  $I_p$  (Der Strom über  $R_p$  findet allerdings keine weitere Berücksichtigung, da dieser im  $\mu A$ -Bereich angesiedelt ist und so eine vernachlässigbar kleine Größe darstellt).

$$I = I_{PH} - I_D = I_{PH} - I_S * \left( e^{\frac{U_D}{n * U_T}} - 1 \right) \quad (1.1.1)$$

$I_{PH}$ =Photostrom

$I_D$ =Diodenstrom

$I_S$ =Sättigungsperrstrom der Diode

$U_D$ =Diodenspannung

$U_T$ =Temperaturspannung (25.60mV)

$n$ =Diodenfaktor oder Emissionsfaktor (dient der Auspassung, in der Regel mit dem Wert 1 definiert)

$U_{OC}$ =Ausgangsspannung entspricht der Spannung  $U$  in Abb.1, in Datenblättern auch  $V_{OC}$

Die Ausgangsspannung  $U_{OC}$  und die Spannung  $U_D$ , die intern an der Diode abfällt, unterscheiden sich lediglich um den Spannungsabfall am Serienwiderstand  $R_S$

$$U_D = U_{OC} + R_S * I \quad (1.1.2)$$

Für den Kurzschlussstrom  $I_{SC}$  (short circuit) folgt aus  $U_D \approx U_{OC} = 0$

$$I_{SC} \approx I_{PH} \quad (1.1.3)$$

Die Leerspannung aus  $I=0$  (für große Werte von  $R_p$ ) ist als

$$U_{OC} = n * U_T * \ln \left( 1 + \frac{I_{PH}}{I_S} \right) \quad (1.1.4)$$

definiert.

## 2.Abhängigkeit von Bestrahlungsstärke und Temperatur

### 2.1 Bestrahlungsstärke

Der Kurzschlussstrom  $I_{SC}$  und die einfallende Strahlungsleistung  $E/m^2$  sind wie bei einer Fotodiode mit einander verknüpft über

$$I_{SC}(E) \sim I_{PH}(E) \quad (2.1.1)$$

die Leerlaufspannung  $U_{OC}$  hingegen mit

$$U_{OC}(E) \sim n * U_T * \ln\left(1 + \frac{I_{SC}(E)}{I_S}\right) \quad (2.1.2)$$

welches mit

$$U_{OC}(E) \sim \ln(E) \quad (2.1.3)$$

gleichzusetzen ist.

Während der Kurzschlussstrom mit steigender Bestrahlungsstärke also zunimmt, verringert sich die Leerlaufspannung  $U_{OC}$ .

### 2.2 Temperaturabhängigkeit

Die Kennlinie der Solarzelle ist temperaturabhängig.

Der Strom  $I_{PH}$  der als proportional  $I_{SC}$  gilt, nimmt mit steigender Temperatur zu.

Der Grund dafür liegt zum einen in der Abnahme der Energielücke durch Materialveränderung (dehnen bzw. stauchen), wo durch auch länger wellige Photonen Elektronen-Loch Paare erzeugen und somit zum Strom in der Zelle beitragen können.

Da die Ladungsträgerdiffusion auf Grund der Wärmebewegung bei höheren Temperaturen bevorzugt abläuft, steigt  $I_{SC}$  mit der Temperatur geringfügig an.

Diese Zunahme wird als Temperaturkoeffizient  $\alpha_I$  bezeichnet und liegt in einer Größenordnung von ca.  $5 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ .

Die Größe der Leerlaufspannung  $U_{OC}$  nimmt, im Gegensatz zum Kurzschlussstrom  $I_{SC}$ , mit steigender Temperatur ab.

Das liegt darin begründet, dass der Sättigungssperrstroms  $I_S$  und die Temperaturspannung  $U_T$  einer Temperaturabhängigkeit unterliegen.

Bei einer durchschnittlichen Änderung von  $-1.5 \text{ mV/K}$  und der für Silizium-Solarzellen typischen Leerlaufspannung von ca.  $600 \text{ mV}$  ergibt sich für  $U_{OC}$  ein Temperaturkoeffizient  $\alpha_U$  der Größenordnung  $-2.5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ .

Da dieser betragsmäßig wesentlich größer ist, als der Temperaturkoeffizient  $\alpha$  des Kurzschlussstroms, nimmt die Ausgangsleistung und der damit verbundene Wirkungsgrad der Solarzelle mit zunehmender Temperatur ab[6].

Die Verhältnismäßigkeit des Stroms  $I_{SC}$  und der Spannung  $U_{OC}$  lässt sich wie folgt definieren

$$I_{SC}(\vartheta) = I_{SC}(\vartheta_{25}) * (1 + \alpha_I(\vartheta - \vartheta_{25})) \quad (2.2.1)$$

$$U_{OC}(\vartheta) = U(\vartheta_{25}) * (1 + \alpha_U(\vartheta - \vartheta_{25})) \quad (2.2.2)$$

Zusammengefasst wirken sich Bestrahlungsstärke und Temperaturänderung wie folgt aus

$$U_{OC}(E, \vartheta) = U_{OC}(\vartheta_{25}) * \frac{\ln(E)}{\ln(E_{1000})} * (1 + \alpha_U * (\vartheta - \vartheta_{25})) \quad (2.2.3)$$

$$I_{SC}(E, \vartheta) = I_{SC}(\vartheta_{25}) * \frac{E}{E_{1000}} * (1 + \alpha_I * (\vartheta - \vartheta_{25})) \quad (2.2.4)$$

## 2.3 Umsetzung der Simulationsparameter

Ziel der Simulation soll es unter anderem sein, die äußeren (Änderung der Bestrahlungsstärke und der Temperatur), sowie die inneren (Verluste durch Kontakte und andere Defekte) Einflüsse sichtbar zu machen.

Aus der Realität kennt man den Einfluss der Bestrahlungsstärke ( $E$ ) auf die Ausgangsleistung eines Solarmoduls. Über Veränderungen durch Temperaturschwankungen ist hingegen weniger bekannt. Die Datenblätter der Hersteller geben aber darüber Aufschluss, in wie weit Strom und Spannung von diesen Faktoren abhängen.

Diese Parameter gilt es so in eine Simulation zu implementieren, dass die Simulationsergebnisse mit den Datenblattangaben übereinstimmen.

Betrachtet man zum Beispiel die elektrischen Daten des SunPower Solarmoduls Typ 220 (Abb.4):

Elektrische Eigenschaften		
Bei Standardbedingungen (STC): Einstrahlungsleistung 1000W/m <sup>2</sup> , AM 1,5, Zelltemperatur von 25° C		
Nennleistung (+5/-3%)	P <sub>nom</sub>	220 W
Wirkungsgrad	η	17,7 %
Spannung im MPP	U <sub>mpp</sub>	41,0 V
Strom im MPP	I <sub>mpp</sub>	5,37 A
Leerlaufspannung	U <sub>oc</sub>	46,6 V
Kurzschlussstrom	I <sub>sc</sub>	5,75 A
Maxi. Systemspannung	IEC	1000 V
Temperaturkoeffizienten	Leistung (P)	-0,38% / K
	Spannung (U <sub>oc</sub> )	-132,5mV / K
	Strom (I <sub>sc</sub> )	3,5mA / K
NOCT		46° C +/-2° C
Maxi. Sicherung bei Reihenschaltung		20 A
Max. Rückstrom (bei 3-Modulsträngen)	I <sub>r</sub>	14,4 A
Elektrische Eigenschaften		
Bei typischer Betriebstemperatur (NOCT): Einstrahlungsleistung 800W/m <sup>2</sup> , 20° C, Wind 1 m/s		
Nennleistung	P <sub>nom</sub>	163 W
Spannung im MPP	U <sub>mpp</sub>	37,8 V
Strom im MPP	I <sub>mpp</sub>	4,32 A
Leerlaufspannung	U <sub>oc</sub>	45,5 V
Kurzschlussstrom	I <sub>sc</sub>	4,66 A
Mechanisch		
Solarzellen	72 monokristalline SunPower-Rückseitenkontakt-Solarzellen	
Frontglas	Hochtransparentes gehärtetes Glas	
Anschlussdose	Schutzklasse IP-65 mit 3 Bypass-Dioden 32 x 155 x 128 (mm)	

Abbildung 4 : Herstellerdatenblatt SUNPOWER 220 Modul (Auszug)

so finden sich die u.a. die Temperaturkoeffizienten  $\alpha_I$  und  $\alpha_U$ ,  $I_{sc}(\vartheta_{25}$  bei  $E=1000$ ) und  $U_{oc}(\vartheta_{25}$  bei  $E=1000$ ).

## 3.Parameter für das Ersatzschaltbild

### 3.1 Photostrom $I_{PH}$

Der Photostrom  $I_{PH}$  der proportional zum Kurzschlussstrom  $I_{SC}$  ist, wird im Ersatzschaltbild von einer Stromquelle geliefert (Abb.1).

Wie Gleichung 2.2.4 beweist, steht dieser in Abhängigkeit mit der Bestrahlungsstärke  $E$  und der Temperatur  $\vartheta$ .

Da das Datenblatt des Herstellers Aufschluss über  $I_{SC}(\vartheta_{25})$  bei  $E=1000$  und den Temperaturkoeffizienten  $\alpha_I$  gibt, kann der Photostrom, der in der Simulation über den Quellenstrom  $I_{TR}$  definiert ist, dargestellt werden als

$$I_{TR} = E * \frac{I_{SC}(\vartheta_{25})}{1000} * (1 + \alpha_I * (Tmp - 25)) \quad (3.1.1)$$

wobei die Variablen  $Tmp$  und  $E$  die aktuelle Temperatur bzw. die aktuelle Bestrahlungsstärke darstellen.

### 3.2 Leerlaufspannung $U_{OC}$

Wie auch bei dem Photostrom, ist die Größe der Leerlaufspannung abhängig von  $E$  und  $\vartheta$ .

Auch hier liefert das Datenblatt wichtige Aussagen über den Temperaturkoeffizienten  $\alpha_U$ .

Die Gleichung 2.2.3 lässt diesen Zusammenhang erkennen.

Zudem zeigt Gleichung 1.1.2, dass der Spannungsabfall an der Diode ( $U_D$ ) proportional zur Leerlaufspannung  $U_{OC}$  ist, wenn  $R_S$  unberücksichtigt bleibt.

Es ist also eine Einflussnahme auf die signifikanten Diodenparameter nötig, die für den Spannungsabfall  $U_D$  und damit die Leerlaufspannung  $U_{OC}$  verantwortlich sind.

In erster Linie sind das der Sättigungssperrstrom  $I_S$  und die Temperaturspannung  $U_T$ .

Da  $U_T$  eine bekannte Größe darstellt ( $25,69mV$ ), wird diese mit dem Temperaturkoeffizienten  $\alpha_U$  aus dem Datenblatt wie folgt verknüpft

$$U_T(\vartheta) = U_T(\vartheta_{25}) * (1 + \alpha_U * (Tmp - 25)) \quad (3.2.2)$$

Der Sättigungssperrstrom  $I_S$  kann, da zur Vereinfachung  $I_{SC} \sim I_{PH}$  (Gleichung 2.1.1) gesetzt wurde, und durch auflösen der Gleichung 1.1.1 nach  $I_S$  bestimmt werden mit

$$I_S(\vartheta) = \frac{I_{SC}(\vartheta)}{e^{\frac{U_{OC}(\vartheta)}{U_T(\vartheta)}} - 1} \quad (3.2.3)$$

Da  $I_{SC}(\vartheta)$ , wie in Gleichung 2.2.1 zuerkennen, bereits mit dem Temperaturkoeffizienten  $\alpha_I$  in Verbindung steht, kann die Gleichung 3.2.3 direkt in die Simulation implementiert werden (siehe dazu Abbildung 10 Seite 22).



### 3.3 Verlustwiderstände

Die genaue Berechnung der Widerstände  $R_p$  und  $R_s$  für die Simulation, ist nur über die Kennlinien der Solarzelle möglich.

Es gilt

$$R_s = \frac{\Delta U}{\Delta I} \text{ an der Stelle } U_{OC} \quad (3.3.1)$$

$$R_p = \frac{\Delta U}{\Delta I} - R_s \text{ an der Stelle } I_{SC} \quad (3.3.2)$$

Diese Kennlinien, die dem Datenblatt des Herstellers beigelegt sind, lassen eine exakte Auswertung aufgrund mangelnder Qualität nicht zu.

Die Widerstände  $R_p$  und  $R_s$  werden aus diesem Grund zunächst nur bedingt berücksichtigt.

$R_p$  wird als  $> 10k\Omega$  angenommen, um die Leckströme so gering wie möglich zu halten.

Für  $R_s$  ist ein Wert von ca.  $10m\Omega$  realistisch, da er lediglich Kontakt- und Materialverluste darstellt.

## 4.Simulation in PORTUNUS

### 4.1 Über Portunus

PORTUNUS ist ein Simulationsprogramm für die Analyse technischer Systeme mit Schwerpunkt Mechatronik. Es können Simulationen im Zeit- und Frequenzbereich, sowie Berechnungen des Arbeitspunktes (OP) und des eingeschwungenen Zustandes (DC) durchgeführt werden.

Zur Modellierung unterschiedlicher Systeme können Netzwerke, Blockdiagramme und Zustandsgraphen grafisch definiert werden.

PORTUNUS bietet die Möglichkeit, benutzerdefinierte Modelle in so genannten Sub-Sheets zu erstellen.

Zur Untersuchung der Auswirkungen von Parametervariationen ist es möglich, automatisiert mehrere Simulationen eines Modells zu starten.

Interaktive Elemente erlauben in PORTUNUS die Modifikation von Modellen während eines Simulationslaufes. Eine zeitliche Skalierung des Simulationsablaufes kann vorgegeben werden.

Die Ergebnisse der Berechnungen können direkt nach Excel, Origin oder Matlab® übertragen werden oder in Dateien (Matlab- bzw. csv-Format) gespeichert werden[2].

## 4.2 Der Desktop

Die Abbildung 5 zeigt den Desktop der PORTUNUS-Software.

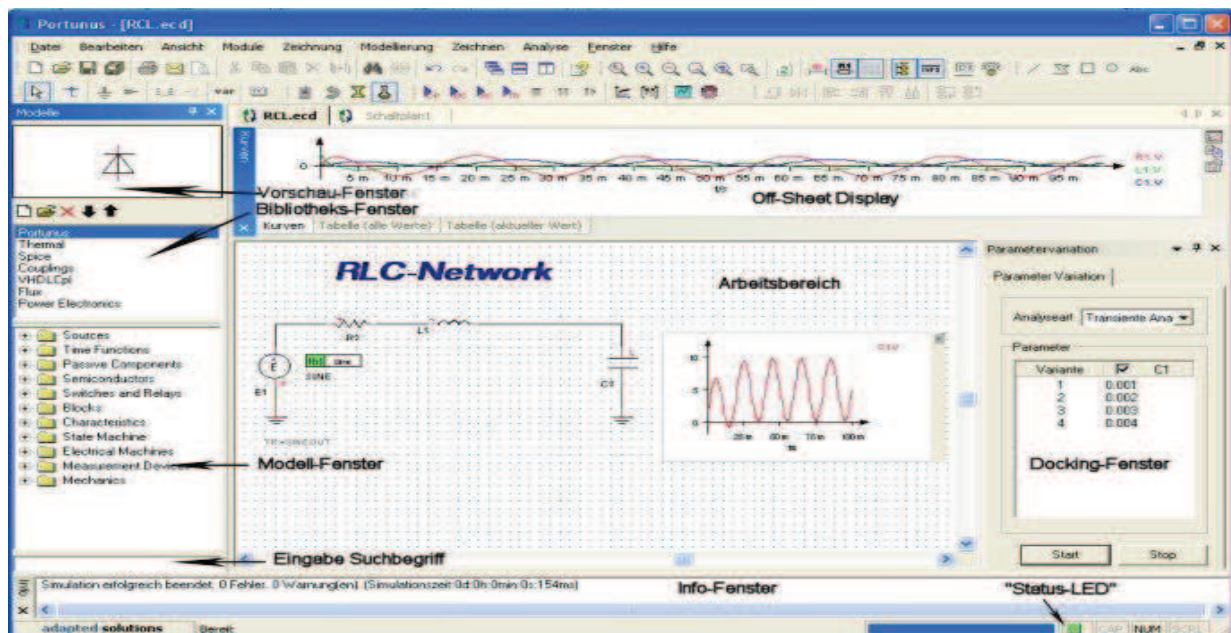


Abbildung 5 : Darstellung des Desktops der PORTUNUS Simulationssoftware

Detaillierte Informationen darüber findet man in der PORTUNUS-Hilfe.

## 4.3 Umsetzung des Ersatzschaltbilds in PORTUNUS

Das in Abb.1 gezeigte ESB lässt sich schnell und einfach in PORTUNUS umsetzen.

Da es das Ziel ist, ein komplettes Solarmodul zu simulieren, welches wiederum aus bis zu 72 Einzelzellen besteht, ist es sinnvoll sich ein Modell anzulegen, damit dieses dann beliebig oft verwendet werden kann.

### 4.3.1 Erstellen eines Modells in PORTUNUS am Beispiel der Solarzelle

Der erste Schritt ist das Erstellen einer eigenen Bibliothek, um selbst erstellte Modelle überhaupt ablegen zu können.

Durch "rechts-Klick → Hinzufügen" in der Bibliotheks-Vorschau, lässt sich eine eigene Bibliothek kreieren.

Ein weiterer „rechts Klick“ im Modell-Fenster ermöglicht dann das Erzeugen eines sogenannten Subsheets (Abb.6).

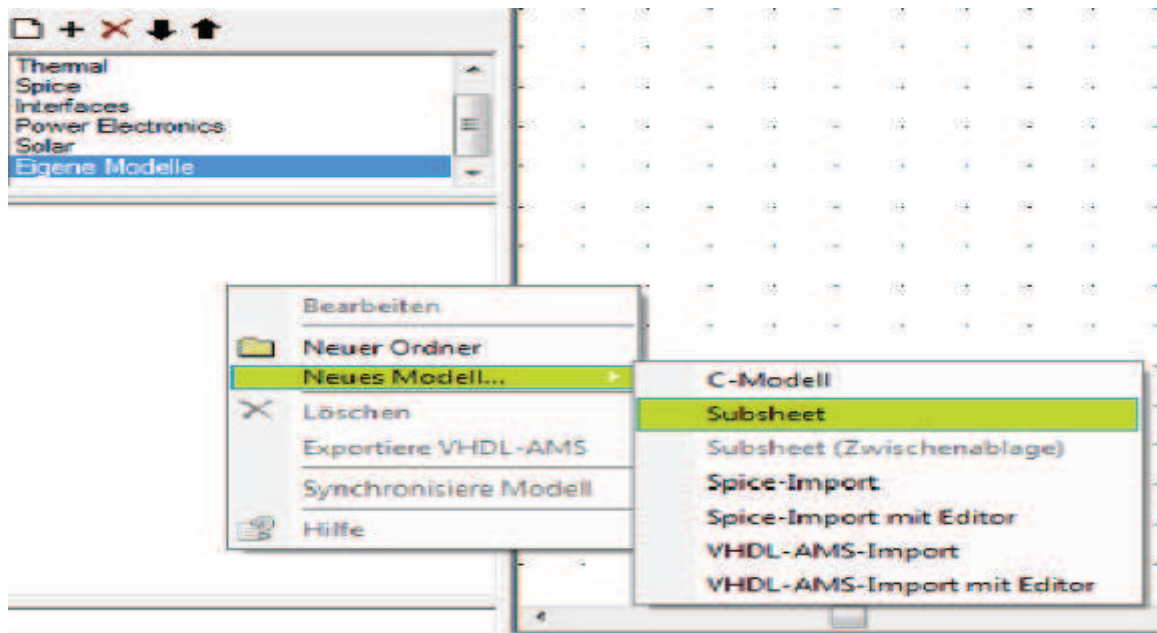


Abbildung 6 : Erstellen eines Modells in PORTUNUS

Die Eigenschaften dieses Subsheets (Funktion, Symbol, Schnittstellen) können durch den Aufruf „rechts Klick → Bearbeiten“ geändert werden (Abb. 7).

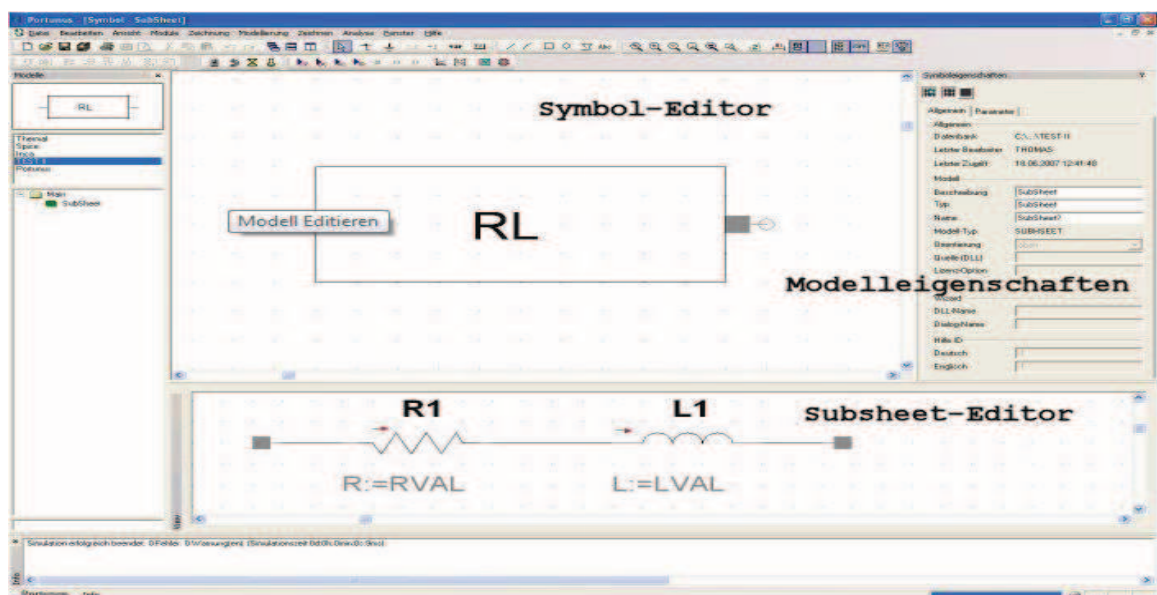


Abbildung 7 : Desktop des Subsheet-Editors

Über den „Symbol-Editor“ können Pins und grafische Elemente (Form und Größe) des Symbols editiert werden.

Der sogenannte „Subsheet-Editor“ dient zur Implementierung der eigentlichen Funktion des Modells. In diesem Fall also dem Ersatzschaltung (Abb.1 ) der Solarzelle.

Über die „Modelleigenschaften“ werden u.a. der Modell-Name und die Modell-Parameter konfiguriert.

Die hier definierten Parameter beschreiben im wesentlichen das Modell und seine Eigenschaften. Wichtig hierbei ist das Setzen eines sogenannten Defaultwertes, der jeder Zeit von „außen“ geändert werden kann (siehe dazu „Variablendefinition“ in Kapitel 4.3.3).

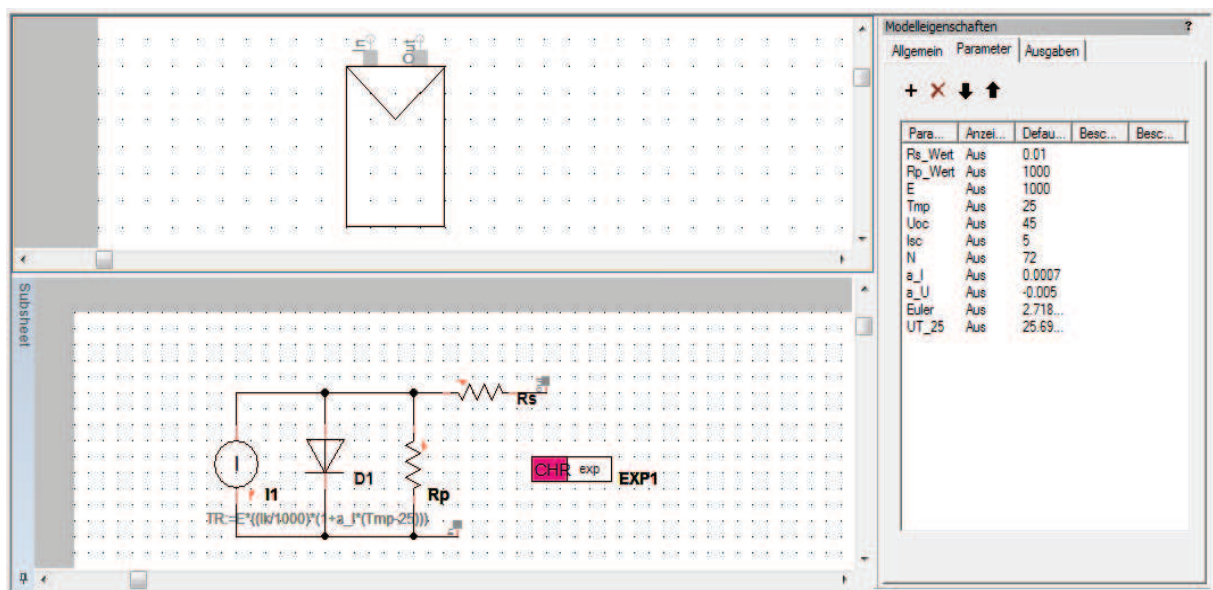


Abbildung 8 : Modell einer Zelle im Subsheet-Editor

Abb. 8 zeigt das im ersten Kapitel erläuterte Ein-Dioden-Modell der Solarzelle.

In den Modelleigenschaften erkennt man alle für die Simulation benötigten und aus den Herstellerdatenblättern bekannten Kenngrößen ( $V_{OC}$ ,  $I_{SC}$ ,  $\alpha_I$ ,  $\alpha_U$ ).

Da die Hersteller die Leerlaufspannung für ein komplettes Modul angeben, in der Simulation aber eine einzelne Zelle simuliert wird, ist der Parameter  $N$ , der die Anzahl der Einzelzellen darstellt wichtig, welcher ebenfalls im Datenblatt zu finden ist.

Die in Kapitel 3 definierten Parameter für die Stromquelle  $I_1$ , die den Photostrom liefert, und die Diode  $D_1$ , die sich für die Leerlaufspannung  $U_{OC}$  verantwortlich zeigt, können auf Grund des PORTUNUS Modells einer Diode, direkt implementiert werden.

Das ist möglich, da PORTUNUS die Strom- Spannungsverläufe eines Halbleiters durch Kennlinien beschreibt.

Diese beinhalten definierte Abhängigkeiten, die zur Definition des benötigten Verhaltens beitragen. Im Fall des gewählten Dioden-Modells ist das die Charakteristik der Exponentialfunktion, die in Abb.8 mit EXP1 gekennzeichnet ist.

Implementierung der *Gleichung 3.1.1* (Abb.9) zur Photostrom-Simulation, und *Gleichungen 3.2.2* und *3.2.3* (Abb.10) in die Charakteristik EXP1 des PORTUNUS Dioden-Modells, die sich wiederum für die Leerlaufspannung  $U_{OC}$  verantwortlich zeigt.

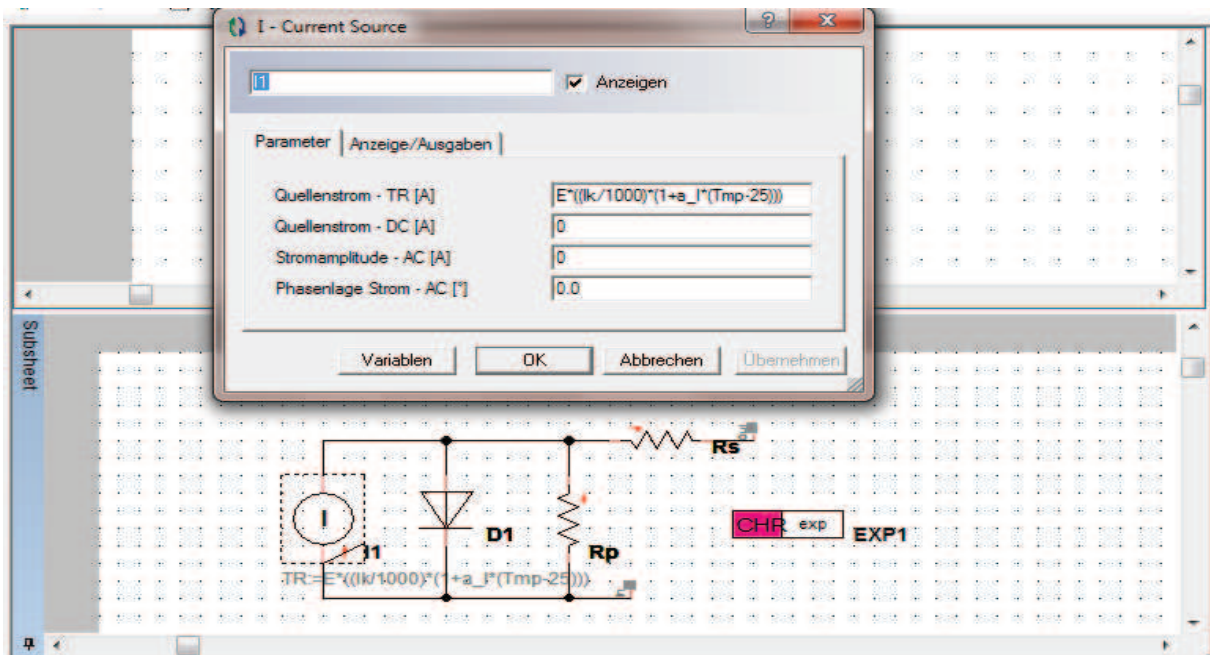


Abbildung 9 : Konfiguration der Modellparameter (Stromquelle)

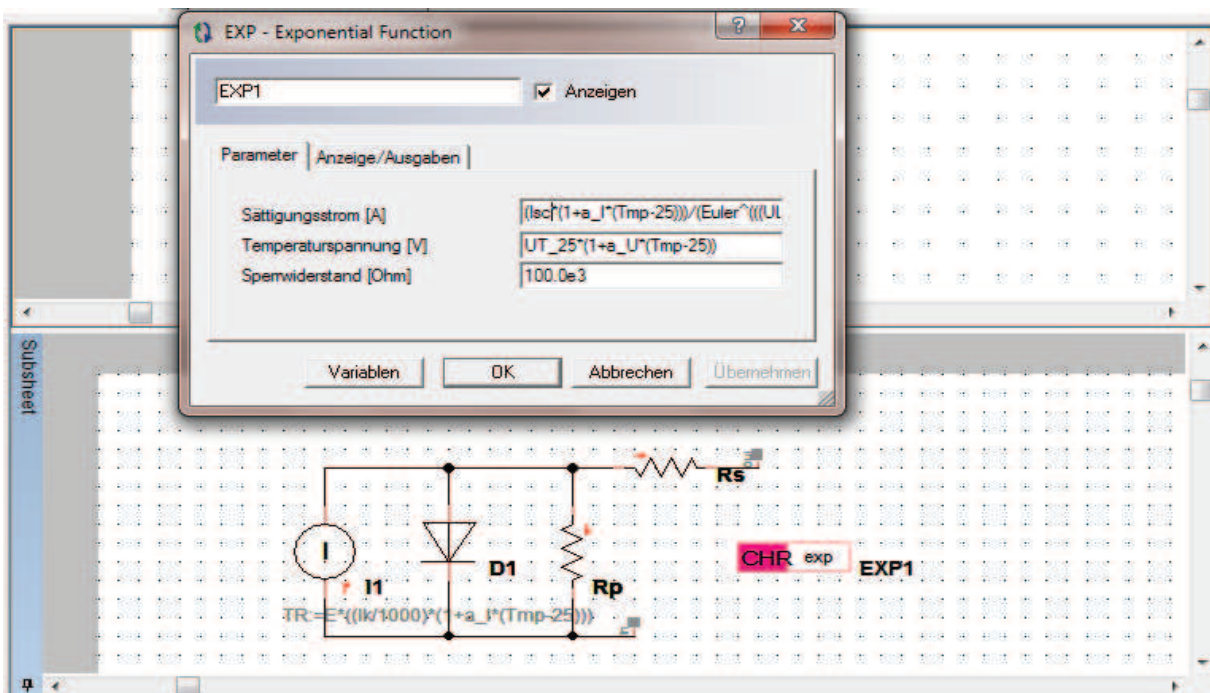


Abbildung 10 : Konfiguration der Modellparameter (Halbleiter)

Da die Simulation eines kompletten Solarmoduls, ein in Reihenschalten von bis zu 72 Einzelzellen voraussetzt, ist es auch möglich, mehrere Einzelzellen in einem Model zusammenzufassen (Abb.11).

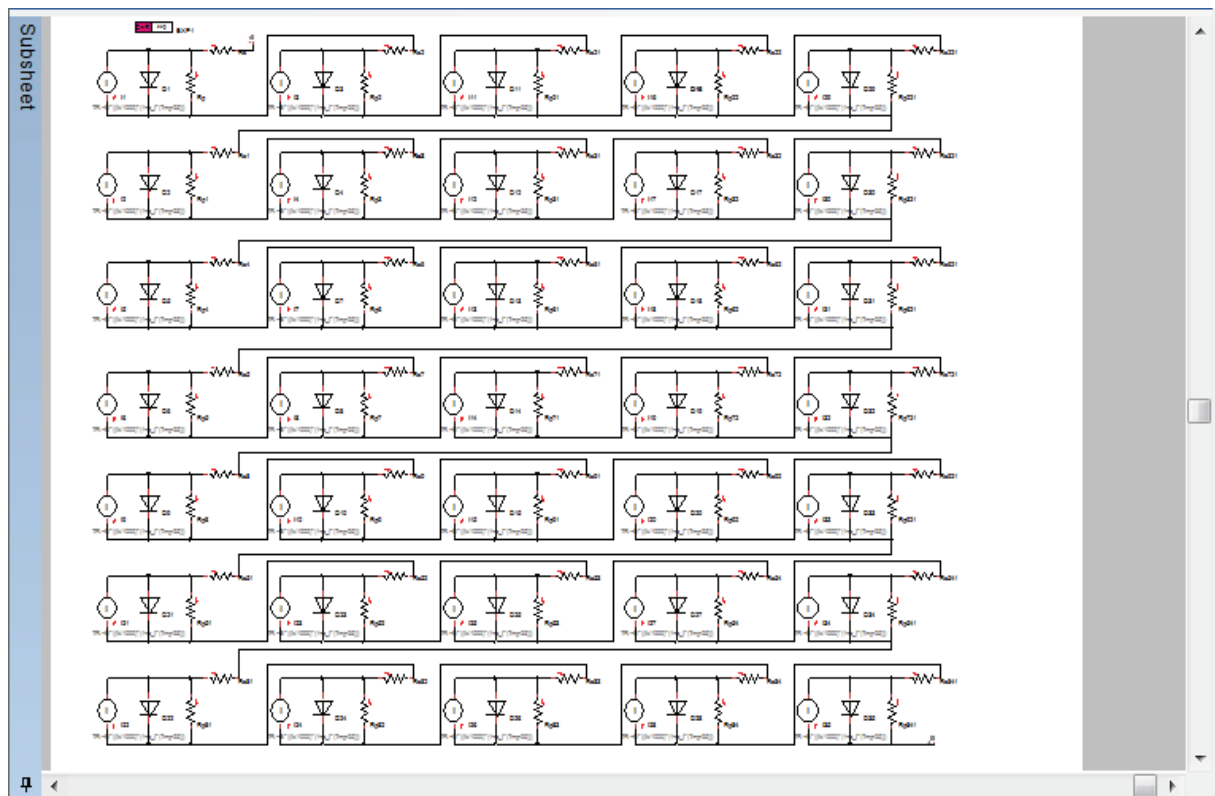


Abbildung 11 : Modell des komplett Moduls SUNPOWER 220 im Subsheet-Editor

Die Charakteristik der einzelnen Dioden kann der Einfachheit halber zusammen gefasst werden. Desweiteren vereinfacht so ein Modell die Simulation eines kompletten Moduls enorm.

#### 4.3.2 Das Modell in der Simulation

Sobald die passenden Modelle der Solarzellen erstellt sind, kann damit begonnen werden, das zu simulierende Solarmodul zu verschalten.

Im folgenden Fall handelt es sich um ein SunPower Modul vom Typ 220 (Datenblattauszug Abb. 4 und Anhang).

Das Modell mit dem Namen: *SP\_35* beinhaltet 35 Einzelzellen, das Modell *SP\_1* eine Einzelzelle. Die Nummerierung der Modelle geschieht fortlaufend, was den steigenden Index *SP\_11* bzw. *SP\_351* erklärt.

Da die Gesamtzahl der Zellen mit 72 beziffert ist (Herstellerangabe lt. Datenblatt) wird sich folgendem Gesamtmodell bedient:

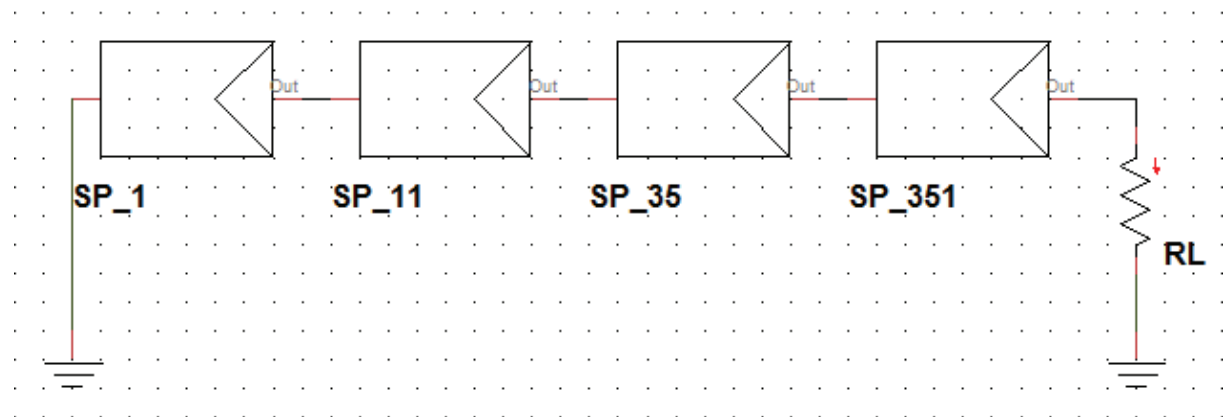


Abbildung 12 : Simulationsaufbau eines Moduls von Typ SUNPOWER 220

### 4.3.3 Konfiguration der Simulation

Das Ziel der Simulation eines Solarmoduls liegt darin, alle äußeren und inneren Einflüsse anhand von Graphen und Zahlen sichtbar zu machen.

Die Auswirkungen von Temperaturveränderungen, Abschattung- und Bestrahlungsstärkenschwankungen spielen für den optimalen Betrieb von Solarmodulen eine große Rolle.

Im Rahmen der Simulation muss also auf diese wesentlichen Parameter Einfluss genommen werden. Hierzu dient zunächst die sogenannte „Variablendefinition“ (Abb.13).

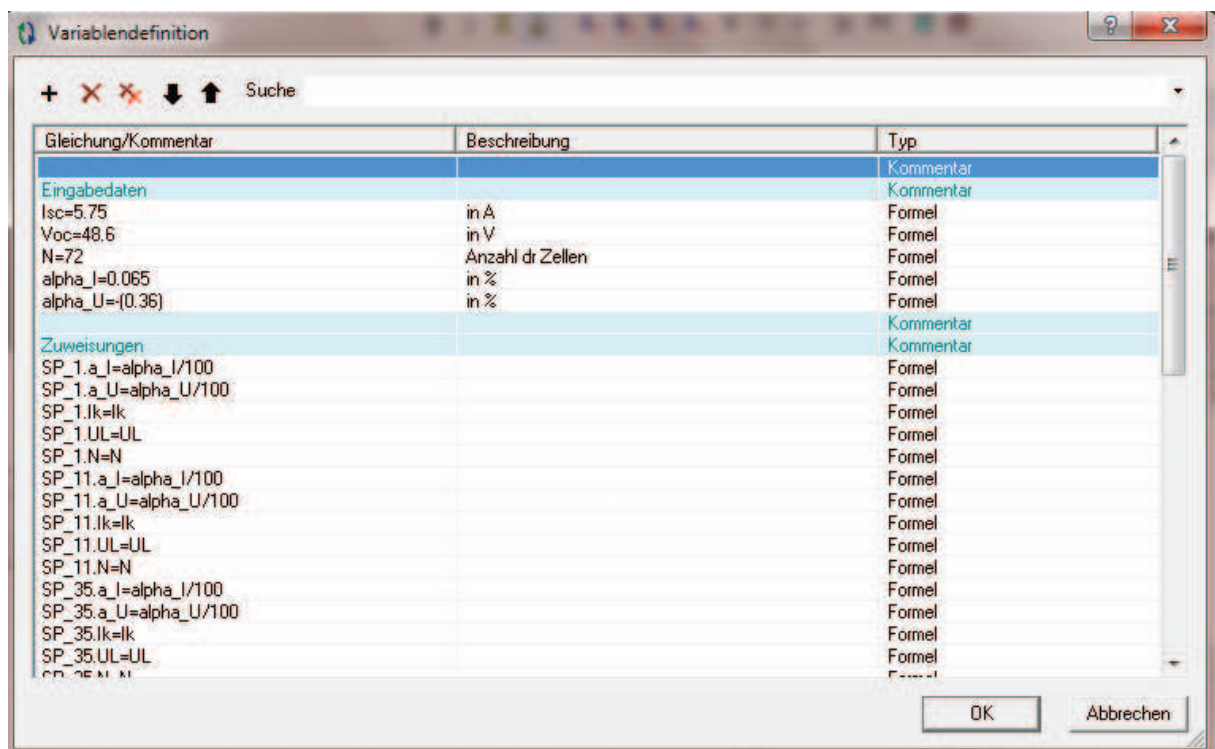


Abbildung 13 : Darstellung der Variablendefinition in PORTUNUS



Wie in Kapitel 4.3.1 bereits erwähnt, sind jedem Modellparameter Defaultwerte zugewiesen. Vor Beginn der eigentlichen Simulation ist es unerlässlich, die Eingabedaten aus dem Datenblatt des Herstellers in die „*Variablendefinition*“ zu übertragen, da die Simulation sonst auf diese Defaultwerte zugreifen würde.

Anschließend müssen die Eingabewerte den jeweiligen Modellen zugewiesen werden, da nur so das überschreiben der Defaultwerte sichergestellt werden kann.

Dieser Schritt kann, je nach Anzahl der verwendeten Modelle, viel Zeit beanspruchen, ist aber notwendig, da die Berechnung von u.a.  $U_{OC}$ ,  $I_{SC}$  innerhalb der Modelle realisiert wird.

Auf diese Weise kann mit nur einem Modell, eine große Anzahl von verschiedenen Solarmodulen simuliert werden.

Wählt man die Defaultwerte so, dass sie den Herstellerangaben eines bestimmten Typs entsprechen, wie z.B. das Modell SUNPOWER 220, kann auf die Eingabe der Herstellerdaten und auf die Zuweisung in der „*Variablendefinition*“ verzichtet werden.

Die in der „*Variablendefinition*“ verwendeten Werte bleiben stets einen kompletten Simulationszyklus aktiv, d.h. ein Zugriff auf die laufende Simulation ist nicht möglich.

PORTUNUS bietet aber die Option der „*Parametervariation*“.

Diese erlaubt es dem Benutzer, ein oder mehrere Variablen nach Ablauf des Simulationszyklus zu verändern, ohne manuell auf die „*Variablendefinition*“ zugreifen zu müssen.

Grundsätzlich muss jede in der Simulation verwendete Variable in der „*Variablendefinition*“ initialisiert werden.

Dies gilt besonders für Hilfsvariablen, die u.a. für Zustandsgraphen benötigt werden.

#### 4.3.4 Parametervariation

In Simulationen soll u.a. das generelle Verhalten und die Funktion von Schaltungen erprobt werden.

Durch Veränderung diverser Parameter können Zustände und Auswirkungen sichtbar gemacht.

Ein besonderes Augenmerk gilt hierbei den Abweichungen vom Normzustand.

Um diese Werte zu ermitteln, bedient man sich der „*Parametervariation*“.

Eine Simulation im Zeitbereich, die sogenannte Transiente Analyse, arbeitet grundsätzlich über ein vom Benutzer definiertes Zeitfenster (*TEND*).

Während dieser Zeit wird über eine vorbestimmte Simulationsschrittweite (*HMIN*, *HMAX*) jeder einzelne Parameter, unter Verwendung der Informationen aus der „*Variablendefinition*“, abgearbeitet.

Verknüpft man z.B. den Wert des Lastwiderstand  $R_L$  (Abb.12) mit der Variablen  $t$ , so verändert dieser mit jedem Simulationsschritt sein Wert, die vordefinierten Parameter bleiben aber stets gleich.

Der Spannungsverlauf an  $R_L$  kann dann grafisch oder tabellarisch dargestellt werden.

Die Verwendung der „*Parametervariation*“ verhindert das Überschreiben dieser grafischen/tabellarischen Darstellung und ermöglicht es, mehrere Kurven zeitgleich abzubilden.

Der Simulationszyklus wird also mehrfach durchlaufen, die „*Variablendefinition*“ bleibt dabei allerdings unangetastet, da die Änderung der Parameter durch die „*Parametervariation*“ erfolgt.

Die folgenden Bilder zeigen die „*Parametervariation*“ für das Modell *SP\_1* (Einzelzelle), für die Änderung der Bestrahlungsstärke *E* (Abb. 14 bis 16).

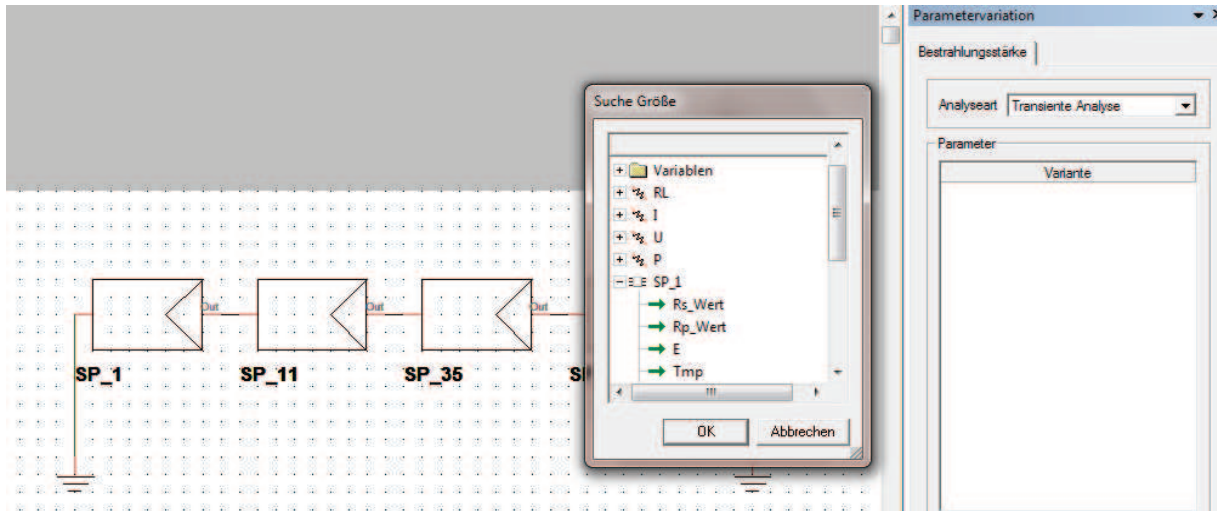


Abbildung 14 : Konfiguration der Parametervariation (Auswahl der zu verändernden Zelle)

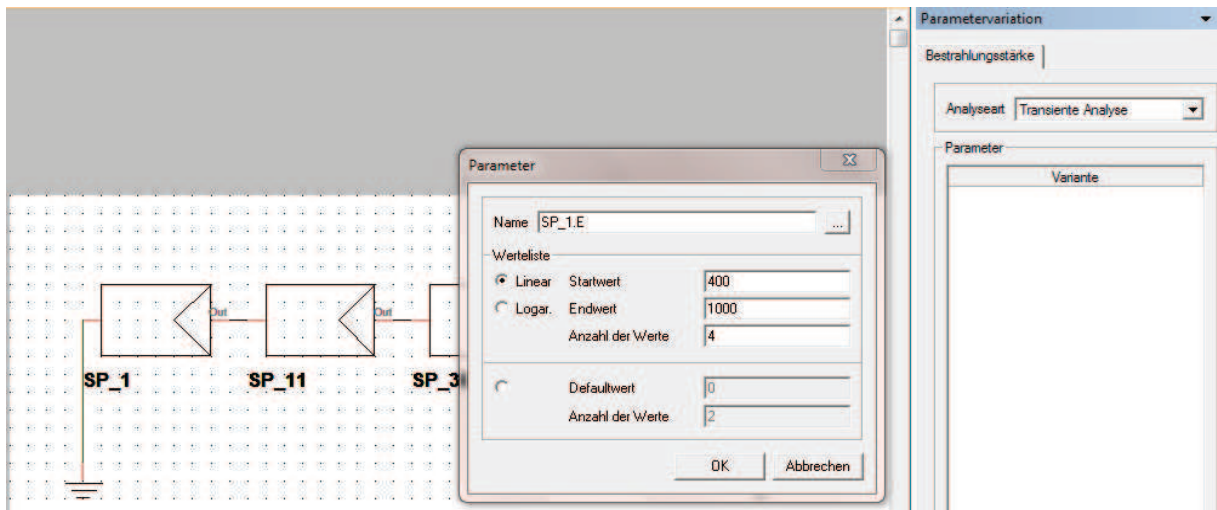


Abbildung 15 : Konfiguration der Parametervariation (Auswahl des zu verändernden Parameters)

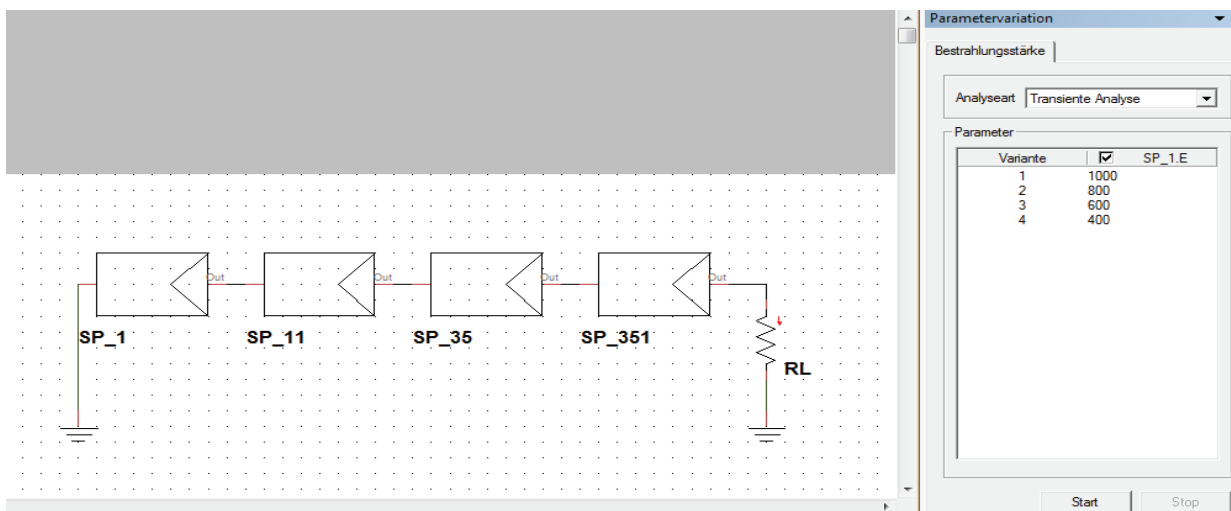


Abbildung 16 : Die Parametervariation im Überblick

Durch betätigen des Startknopfes in Abb.16, wird der erste von 4 Simulationszyklen gestartet und dabei die Variable  $E$  vom Modell  $SP\_1$  auf den Wert 1000 gesetzt.

Ist die Simulationszeit  $TEND$  abgelaufen, startet automatisch Variante 2 mit  $E=800$ .

Wie auch bei der Zuweisung der *Eingabedaten* in Abb.12, so müssen auch hier für jedes Modell die zu verändernden Parameter manuell eingegeben werden.

Auch das kann, je nach Anzahl der verwendeten Modelle, einige Zeit in Anspruch nehmen.

## 4.4 Darstellungsoption der Simulationsergebnisse

Die wohl relevanteste Charakteristik eines Solarmoduls ist die sogenannte IU-Kennlinie.

Sie gibt Aussagen darüber, in wie weit die Ausgangsleistung von der Bestrahlungsstärke und der Temperatur abhängig ist.

Durch das in Abb.1 erstellte Ersatzschaltbild sind diese Informationen, nach Berücksichtigung der Eckdaten des Herstellers, auch mit einer Simulation möglich.

Es gilt aber zu beachten, dass es sich bei der Simulation lediglich um eine relativ genaue Approximation handelt und selbst die Hersteller mit einen Toleranzbereich von  $\pm 5\%$  arbeiten.

Die Simulationssoftware PORTUNUS bietet zwei Möglichkeiten in der Darstellung von Messwerten, nämlich die der Grafischen und der Tabellarischen.

Da im Fall eines Solarmoduls sowohl die IU-Kennlinie, als auch Spannungsendwerte eine entscheidende Rolle spielen, kommen beide Darstellungen zum Einsatz.

### 4.4.1 Grafische und tabellarische Darstellung

Über den Menüpunkt „Anzeigenelement hinzufügen“ wird ein grafisches Element in den Arbeitsbereich implementiert.

Durch „rechts-Klick  $\rightarrow$  Eigenschaft“ kann das Anzeigenfeld konfiguriert werden (Abb.17).

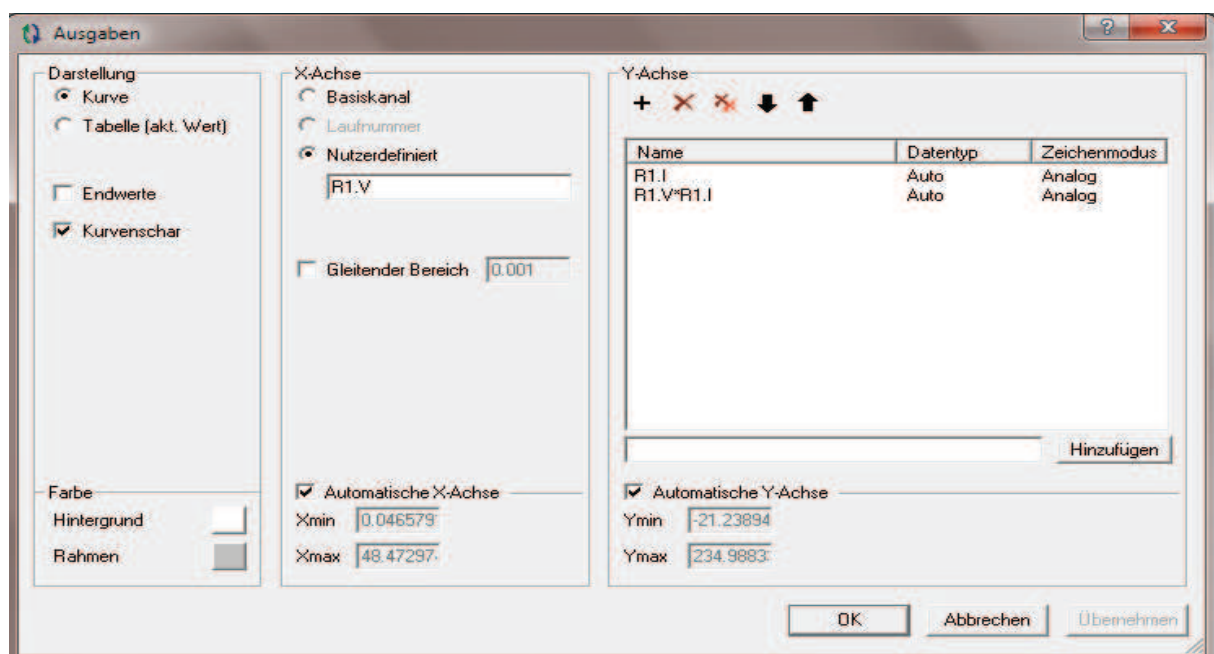


Abbildung 17 : Konfiguration des Anzeigeelements zur Darstellung des Stroms und der Leistung

Optionen wie Kurve, Tabelle, X-Achsen und Y-Achsen Parameter können entsprechend dem Modell gewählt werden.

Es bietet so die Möglichkeit, Kurvenverläufe, als auch tabellarische Ansichten darzustellen.

Gilt es Endwerte, wie  $I_{SC}$  oder  $U_{OC}$ , detailliert anzuzeigen, muss man sich eines weiteren Hilfsmittels bedienen.

In der PORTUNUS Bibliothek „*Measurement Devices*“ befindet sich der sogenannte *Signal Analyzer* (Abb.18).

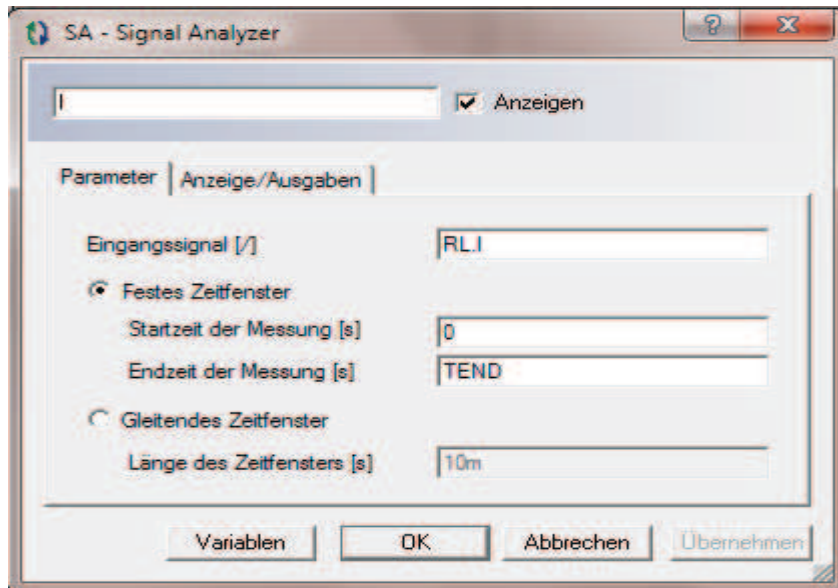


Abbildung 18 : Konfiguration des Signal Analyzers

Dieser ermöglicht die Analyse eines Eingangssignals, und stellt eine Auswahl von Anzeigeparametern zur Verfügung.

Minimum, Maximum, Effektiv- oder Mittelwert eines Signals können so über ein weiteres Anzeigenelement ausgegeben werden.

Alle in der Simulation verwendeten Modellparameter sind als Eingangssignal denkbar und können untereinander mit logischen Funktionen verknüpft werden, um z. B. Leistungsinformationen auszuwerten.

## 4.5 Simulationsergebnisse

Sind Modelle, Anzeigen- und Analyseelemente implementiert, die Parametervariation konfiguriert, kann die Simulation gestartet werden.

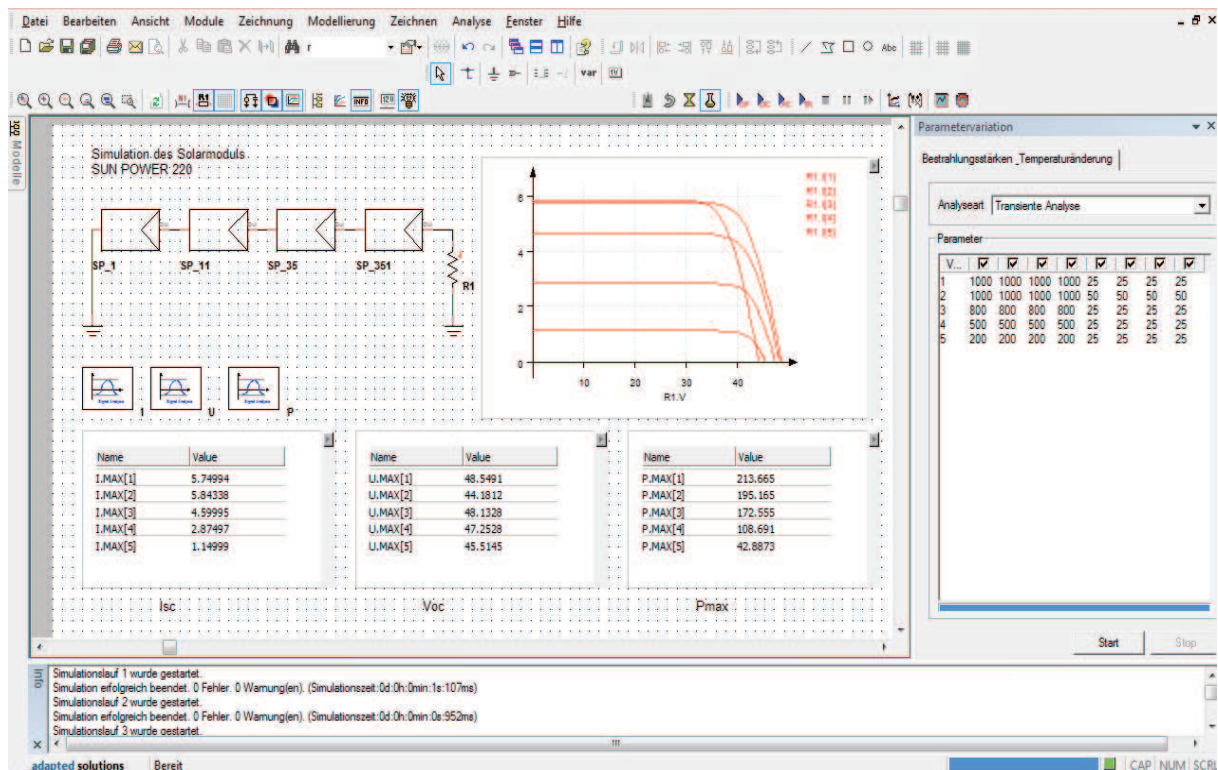


Abbildung 19 : Desktop einer kompletten Simulation

Abbildung 19 zeigt den PORTUNUS-Desktop nach Ablauf der Simulation eines SUNPOWER Solarmoduls von Typ 220.mit Hilfe der Parametervariation.

Die Bestrahlungsstärke für alle Modelle des Solarmoduls wurde schrittweise verändert, desweiteren wurde die Temperatur bei  $E=1000$  für  $25^\circ$  und  $50^\circ$  simuliert.

Die drei unteren Anzeigeelemente zeigen den Kurzschlussstrom  $I_{SC}$ , die Leerlaufspannung  $U_{OC}$  und die Leistung im MPP (Maximal Power Point)  $P_{MAX}$ .

In späteren Verlauf dieser Arbeit wird das SUNPOWER 220 Modul in nur einem Modell, bestehend aus 72 Zellen simuliert.

Die Defaultwerte sind dabei so gewählt, dass sie den Datenblattangaben entsprechen, d.h. auf eine Konfiguration über die „Variablendefinition“ kann verzichtet werden.

Allerdings können bei diesem Modell Auswirkungen auf einzelne Zellen keine Berücksichtigung finden.

### 4.5.1 Messwerte vergleich

Das mit Windows Paint farblich aufgearbeitete Simulationsergebnis der PORTUNUS Software (Abb.20) bietet in der grafischen Darstellung alle signifikanten Größen, die aus den Herstellerangaben gewonnen werden konnten.

Aussagen über Kurzschlussstrom und Leerlaufspannung sind bis auf einige *mV* möglich.

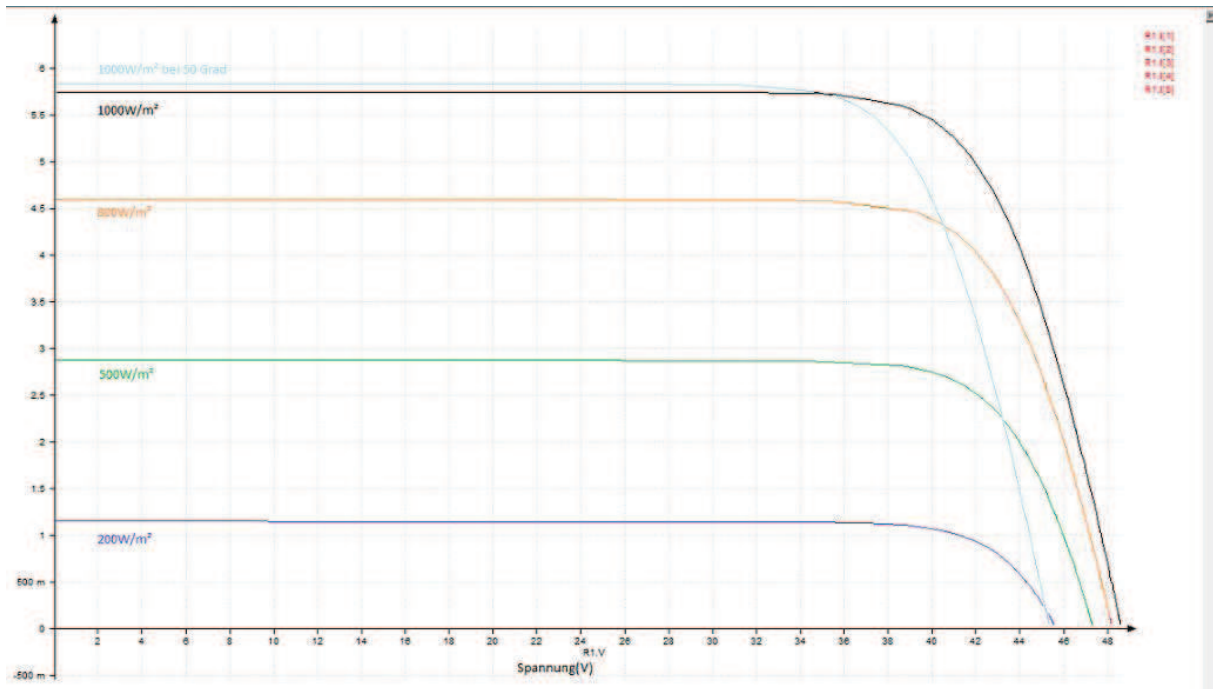


Abbildung 20 : U-I-Kennlinie eines SUNPOWER 220 Moduls (Farblich aufgearbeitet)

Vergleicht man aber die Datenblattangaben (Tabelle 1) mit den Spannungsendwerten  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$  bzw.  $U_{oc}$  und  $P_{MPP}$  aus der Simulation, so fällt auf, dass im Bereich der Leistung die Abweichungen mit der Temperatur zum Teil stark variieren (Tabelle 2).

Aus Datenblatt:						
$\alpha_P$ in %/K	$\alpha_I$ in mA/K	$\alpha_U$ in mV/K	$V_{oc}$ in V	$I_{sc}$ in A	$P_{mpp}$ in W	Toleranz in %
-0,38	0,0035	-0,1325	48,6	5,75	220	5 bis -3

Tabelle 1 : Datenblatt Informationen

Wertet man die einzelnen Temperaturkoeffizienten aus, so ergeben sich folgende Sollwerte:

		Simulation:			Sollwert lt. Datenblatt:		
$\vartheta$ in °C	$E$ in W/m <sup>2</sup>	$V_{oc}$ in V	$I_{sc}$ in A	$P$ in W	$V_{oc}$ in V	$I_{sc}$ in A	$P$ in W
25	1000	48,549	5,749	<b>213,665</b>	48,600	5,750	<b>220,000</b>
50	1000	45,273	5,837	<b>200,471</b>	45,288	5,838	<b>199,100</b>

Tabelle 2 : Simulationsergebnisse der Portunus Software und Datenblattsollwerte mit  $R_s = 10\text{m}\Omega$

Das entspricht folgender prozentualer Abweichung:

Abweichung in %		
$\vartheta$ in °C	25	50
$V_{oc}$	-0,105	-0,032
$I_{sc}$	-0,017	-0,009
$P_{mpp}$	-2,880	0,689

Tabelle 3 : Prozentuale Abweichungen der Simulation zu den Herstellerangaben

Die Ursache für diese Abweichungen ist in erster Linie der Einfluss des Serienwiderstandes  $R_s$  auf die Ausgangsleistung  $P_{MAX}$  (siehe dazu auch Kapitel 4.5.2).

Da der Wert des Widerstands in der Simulation lediglich angenommen wird (siehe Kapitel 3.3), er in der Realität aber abhängig von Temperatur, Material und Stromfluss ist, sind genauere Angaben über die Leistung schwer möglich.

Der Serienwiderstand  $R_s$  muss also im Vorfeld der Simulation an die Ausgangsleistung angepasst werden, um die minimalsten Abweichungen zu erreichen.

Für die Werte aus Tabelle 2 wurde  $R_s$  mit  $10m\Omega$  zugrunde gelegt.

Durch die "Parametervariation" oder durch einfaches Ausprobieren ist man aber in der Lage, den Wert von  $R_s$  so zu ermitteln, dass bei **STC** (Standard Test Conditions) die Ausgangsleistung laut Datenblatt genau eingestellt wird.

Ändert man den Wert des Serienwiderstandes  $R_s$  von  $10m\Omega$  auf  $7,1m\Omega$  ergeben sich folgende Messwerte:

		Simulation:			Sollwert lt. Datenblatt:		
$\vartheta$ in °C	$E$ in W/m <sup>2</sup>	$V_{oc}$ in V	$I_{sc}$ in A	$P$ in W	$V_{oc}$ in V	$I_{sc}$ in A	$P$ in W
25	1000	48,559	5,749	<b>219,949</b>	48,600	5,750	<b>220,000</b>
50	1000	45,282	5,837	<b>206,808</b>	45,288	5,838	<b>199,100</b>

Tabelle 4 : Simulationsergebnisse der Portunus Software und Datenblattsollwerte mit  $R_s = 7.1m\Omega$

Abweichung in %		
$\vartheta$ in °C	25	50
$V_{oc}$	-0,084	-0,012
$I_{sc}$	-0,017	-0,009
$P_{mpp}$	-0,023	3,871

Tabelle 5 : Prozentuale Abweichungen der Simulation zu den Herstellerangaben

Da der Toleranzbereich des Solarmoduls SUNPOWER 220 lt. Herstellerangaben mit -3% bis +5% angegeben ist, und die Abweichungen der Simulationsergebnisse genau diesen Bereich umfassen, ist die gewählte Größe von  $R_s = 7.1m\Omega$  als optimal einzustufen.

Um in allen Temperaturbereichen nahezu exakte Werte zu erzielen, wäre es notwendig den Serienwiderstand in der Simulation mit einem Temperaturkoeffizienten zu versehen.



### 4.5.2 Das optimierte Solarmodul

Das in diesem Kapitel vorgestellte, optimierte Solarmodul bleibt in allen folgenden Simulationen unberücksichtigt, es dient lediglich dazu, Mittel und Wege aufzuzeigen, die die Simulationssoftware zur Verfügung stellt.

Wie in Kapitel 4.5.1 beschrieben, sind Ausgangsleistung und der Verlust am Serienwiderstand  $R_5$  eng miteinander verknüpft.

Abbildung 21 gibt Aufschluss darüber, wie sich dieser Widerstand genau zusammensetzt und warum dieser stark den äußeren und inneren Einflüssen unterliegt.

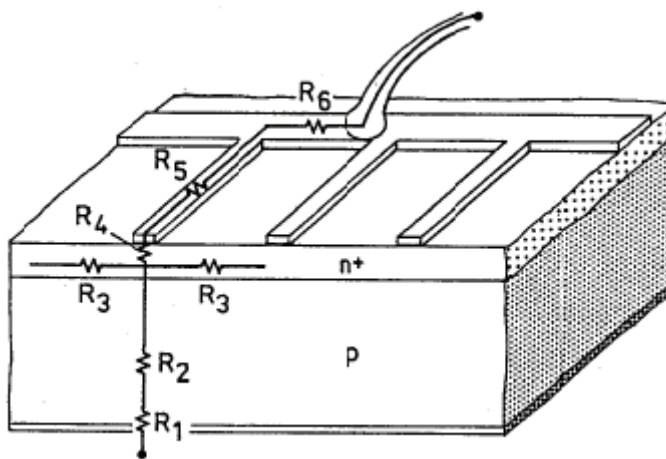


Abbildung 21 : Darstellung des Serienwiderstandes einer Solarzelle

$R_5$  besteht im Wesentlichen aus den ohmschen Widerständen der Metallkontakte ( $R_5$ ,  $R_6$ ) und deren Zuleitungen, aus den Kontaktwiderständen ( $R_1$ ,  $R_4$ ) der Metall-Halbleiterkontakte und den ohmschen Widerständen des Halbleitermaterials ( $R_2$ ,  $R_3$ ) in Emitter und Basis[3].

Da sich bei wechselnden Temperaturen die Materialeigenschaften ändern, ist der Wert des Serienwiderstandes nie als konstant einzustufen.

Für die Simulation bedeutet das, dass ein Temperaturkoeffizient gefunden werden muss, der die Verluste an  $R_5$  so verändert, dass die Ausgangsleistung stets den Herstellerangaben entspricht.

Die Software PORTUNUS bietet dafür in der Bibliothek „*Thermal→Electrical Models*“ einen temperaturabhängigen Widerstand an, der mit Hilfe eines Temperaturkoeffizienten angepasst und optimiert werden kann.

Der exakte Wert dieses Koeffizienten kann wieder über die „*Parametervariation*“ ermittelt werden.

Abbildung 22 zeigt eine von 72 Zellen des optimierten Solarmoduls SUNPOWER 220.

Der Widerstand  $R_S$  wird einfach durch den temperaturabhängigen Widerstand  $R_{elth}$  ersetzt und der ermittelte Temperaturkoeffizient  $TK$  implementiert.

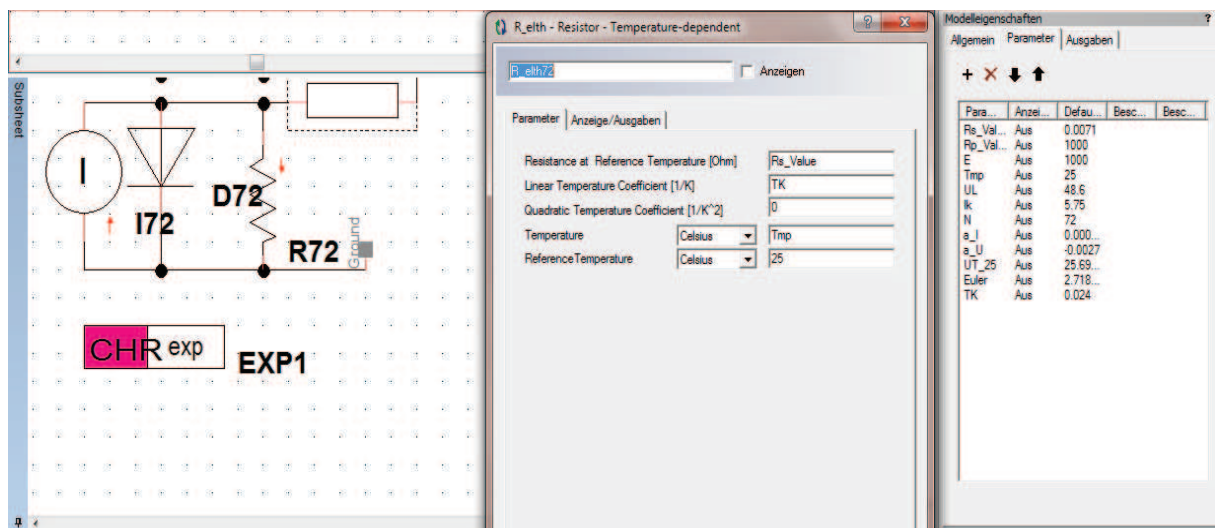


Abbildung 22 : Zelle mit temperaturabhängigem Serienwiderstand

Abbildung 23 zeigt das Simulationsergebnis des optimierten Solarmoduls.

Als Grund- und Vergleichsvorlage dient der im Datenblatt ausgewiesene STC / NOCT Betrieb, der in Kapitel 5 noch näher erläutert wird.

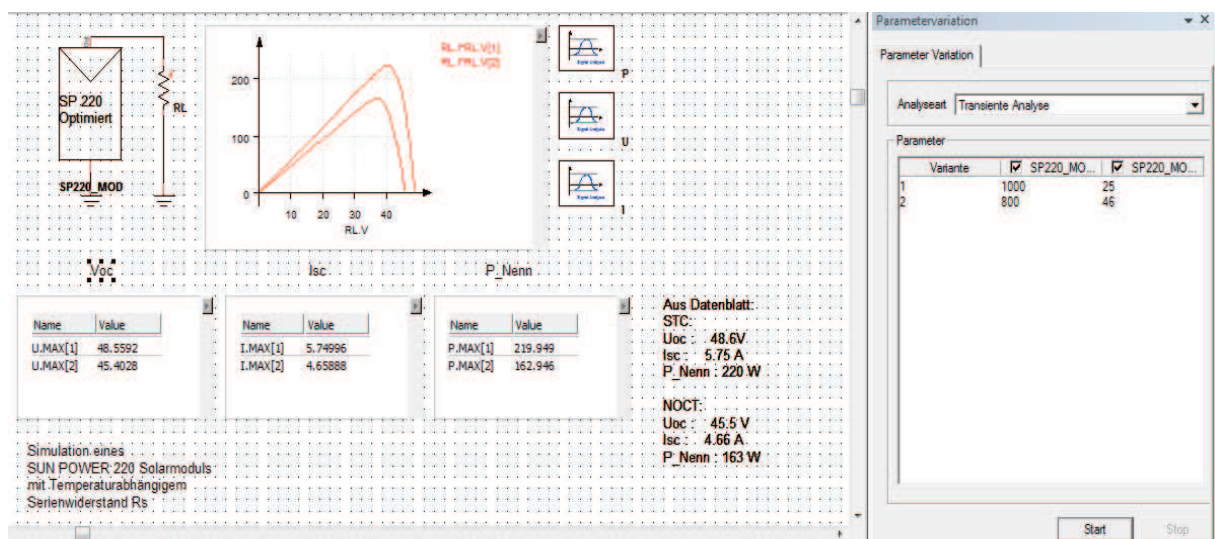


Abbildung 23 : Simulationsergebnis des optimierten Solarmoduls SUNPOWER 220

Bei detaillierter Betrachtung der Simulationsergebnisse, in Tabelle 6 dargestellt, erkennt man deutlich, dass die Abweichungen in Abhängigkeit der Temperatur im Bereich der Leistung kleiner 0,1% betragen und damit nahezu vernachlässigt werden können (Tabelle 7).

	Simulation:			Sollwert lt.Datenblatt:		
	<i>Voc in V</i>	<i>Isc in A</i>	<i>P in W</i>	<i>Voc in V</i>	<i>Isc in A</i>	<i>P in W</i>
STC	48,559	5,749	<b>219,949</b>	48,6	5,75	<b>220</b>
NOCT	45,402	4,658	<b>162,946</b>	45,4	4,66	<b>163</b>

Tabelle 6 : Simulationsergebnisse des optimierten Solarmoduls SUNPOWER 220

Abweichung in %	Betrieb	
	STC	NOCT
<i>Voc</i>	-0,084	-0,012
<i>Isc</i>	-0,017	-0,009
<i>Pmpp</i>	<b>-0,023</b>	<b>-0,033</b>

Tabelle 7 : Prozentuale Abweichungen der Simulation zu den Herstellerangaben

Diese Simulation soll zeigen, dass unter Berücksichtigung wirklich aller Parameter, ein Simulationsergebnis möglich ist, dass allen äußeren und inneren Einflüssen gerecht wird. Da aber in der Realität niemals von einem 100% linearen Einfluss der Temperatur auf Materialeigenschaften auszugehen ist, bleibt immer noch ein Restrisiko der Ungenauigkeit.

Aus diesem Grund beziehen sich alle Simulationen dieser Arbeit auf einen nicht temperaturabhängigen Serienwiderstand  $R_S$ .

## 5. Simulationsbeispiele in PORTUNUS

### 5.1 STC / NOCT Betrieb

Die Hersteller von Solarmodulen weisen in ihren Datenblättern stets Kenngrößen für zwei unterschiedliche Messverfahren aus.

Während bei STC (Standard Test Conditions) eine Bestrahlungsstärke von  $E=1000\text{W/m}^2$  bei einer Temperatur von 25 Grad Celsius zugrunde gelegt wird, kommen bei dem sogenannten NOCT-Betrieb (Normal Operation Cell Temperature) eine Bestrahlungsstärke von  $E=800\text{W/m}^2$  und eine Temperatur von ca. 40 bis 50 Grad Celsius zu tragen.

Das entspricht einem in der Praxis typischen Betriebszustand.

In der folgenden Simulation sind die Parameter für STC mit  $E=1000$ ,  $\vartheta=25$  und für NOCT mit  $E=800$ ,  $\vartheta=46$  definiert.

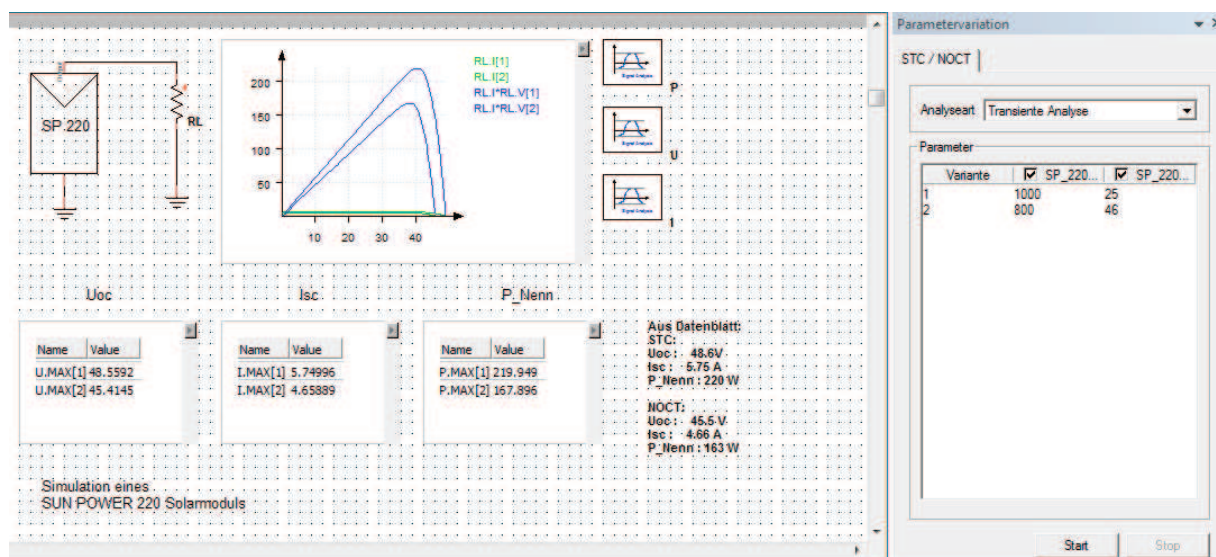


Abbildung 24 : Simulation des STC / NOCT Betriebs

Abbildung 25 zeigt die Simulation eines kompletten Solarmoduls vom Typ SUNPOWER 220 in den Betriebsarten STC / NOCT.

In Tabelle 8 lassen sich die Simulationsergebnisse erkennen. Auf eine Darstellung der prozentualen Abweichung zu den Herstellerangaben wird bewusst verzichtet.

	Simulation:			Sollwert lt.Datenblatt:		
	Voc in V	Isc in A	P in W	Voc in V	Isc in A	Pmpp in W
STC	48,559	5,749	<b>219,949</b>	48,6	5,75	<b>220</b>
NOCT	45,414	4,658	<b>167,896</b>	45,4	4,66	<b>163</b>

Tabelle 8 : Simulationsergebnis des STC / NOCT Betriebs

## 5.2 Abschattung bei Solaranlagen

Da ein komplettes Solarmodul aus der Reihenschaltung von 72 Einzelzellen besteht (SUNPOWER 220) und laut dem ersten Kirchhoff'schen Gesetz in eben dieser, die Summe der zufließenden Ströme gleich der Summe der abfließenden Ströme ist, hat eine Einflussnahme auf den Strom nur einer einzelnen Zelle massive Auswirkung auf die Ausgangsleistung des gesamten Moduls.

Reduziert man also die Bestrahlungsstärke nur einer Zelle um 20%, so sinkt proportional der Photostrom  $I_{PH}$  (siehe Gleichung 2.1.1).

Da sich die Änderung der Leerlaufspannung dieser einen Zelle kaum auf die Gesamtausgangsspannung auswirkt (siehe Gleichung 2.1.3), hat die Änderung des Photostroms den größten Einfluss auf die Ausgangsleistung.

Desweiteren wirkt sich die abgeschattete Zelle als Verbraucher für alle übrigen aus, da der Innenwiderstand der Zelle mit dem Grad der Abschattung steigt und ihre IU-Kennlinie in den Sperrbereich rutscht.

Die Temperatur in der Zelle nimmt also zu (Hot-Spot Effekt) und kann so erheblichen Schaden in dem kompletten Modul verursachen.

In Folgendem werden die Auswirkungen der Abschattung einer einzelnen Zelle eines SUNPOWER Moduls Typ 220 simuliert.

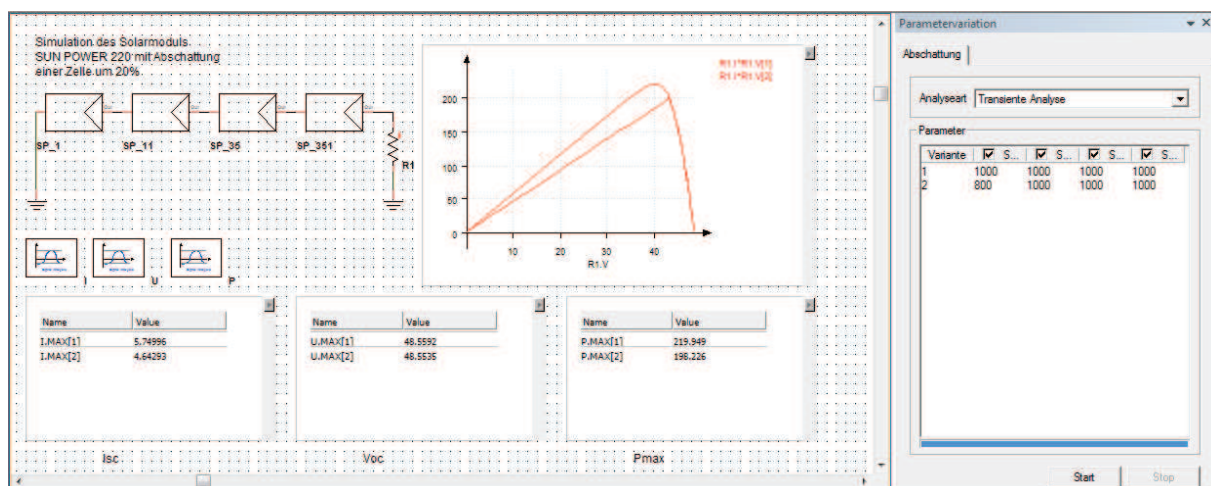


Abbildung 25 : Simulation einer Abschattung

Da in der Simulation die Einflussnahme auf den Parameter einer einzelnen Zelle notwendig ist, findet nicht das Modell des Kompletmoduls seine Anwendung, sondern eine Reihenschaltung von entweder 72 Einzelzellen oder, wie in Abbildung 25 zu erkennen, eine Reihenschaltung von zwei Modellen mit je 35 Zellen und zwei mit je einer Zelle.

Nur so erreicht man die im Datenblatt angegebene Gesamtzellenzahl von 72.

Mit Hilfe der „Parametervariation“ wird dann die Bestrahlungsstärke  $E$  von  $1000\text{W/m}^2$  auf  $800\text{W/m}^2$  für das Modell einer Einzelzelle reduziert, um damit eine Abschattung von 20% zu simulieren.

Das Simulationsergebnis zeigt den massiven Leistungsverlust des Solarmoduls.

Die Messwerte in Tabelle 9 und 10 beweisen ebenso, dass sich das Verhältnis zwischen Bestrahlungsstärke  $E$  und Kurzschlussstrom  $I_{sc}$  nahezu proportional verhält.

Das Verhältnis zur Leistung hingegen lässt sich nur über ein komplexeres Nährungsverfahren ermitteln.

$E$ in $W/m^2$	$V_{oc}$ in $V$	$I_{sc}$ in $A$	$P_{mpp}$ in $W$
1000	48,595	5,749	<b>219,949</b>
800	48,590	4,643	<b>198,226</b>

Tabelle 9 : Darstellung der Simulationsergebnisse einer Abschattung

Abweichung in %	1000	800
$E$ in $W/m^2$	1000	800
$V_{oc}$	0,000	-0,010
$I_{sc}$	0,000	-19,240
$P_{mpp}$	0,000	-9,876

Tabelle 10 : Prozentuale Abweichungen

Die Simulation verdeutlicht die Auswirkungen von Abschattungen bei Solaranlagen.

Kombiniert man die erstellten Modelle der Einzelzellen und die der Modul-Modelle, so ist man in der Lage, selbst Abschattungen einzelner Zellen bei komplexen Solaranlagen zu simulieren und deren Auswirkungen sichtbar zu machen.

Desweiteren besteht auch dabei noch die Möglichkeit, Einfluss auf alle übrigen Parameter, wie die Temperatur  $\vartheta$  und den Serienwiderstand  $R_s$  zu nehmen.

Für die Praxis bedeutet so eine Simulation, dass Ertragsverluste schon im Vorfeld berechnet werden können, falls der gewählte Standort einer Solaranlage von zeitweiliger Abschattung betroffen ist.

### 5.3 Bypass-Dioden

Um den in Kapitel 5.2 erläuterten Leistungseinbruch bei Abschattung entgegen zu wirken, und die dadurch verbundene Ertragsminderung so gering wie möglich zu halten, werden in der Praxis die sogenannten Bypass-Dioden verwendet.

Diese werden, je nach Solarmodultyp, über eine bestimmte Anzahl von Zellen geschaltet und dienen lediglich dazu, den Strom an der abgeschatteten Zelle vorbei, bzw. den beschatteten Bereich kurz zuschließen.

Den Einsatz dieser Bypass-Dioden zeigt die Simulation in Abbildung 26.

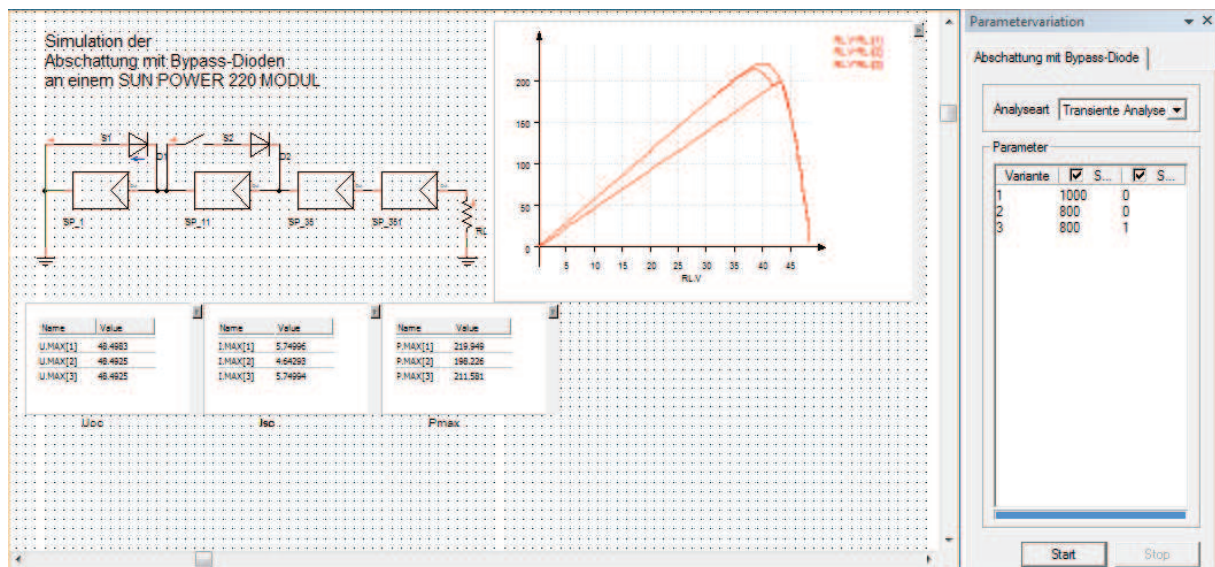


Abbildung 26 : Simulation einer Abschattung mit Bypass-Dioden

Über die „Parametervariation“ wird, wie in Abbildung 25, die Bestrahlungsstärke einer Zelle um 20% reduziert.

Die Anzahl der Durchläufe wird, im Gegensatz zu Kapitel 5.2, um eins erhöht, um die Aktivierung der Bypass-Dioden  $D1$  und  $D2$  (wobei  $D2$  in diesem Simulationsteil keinerlei Berücksichtigung findet) zu ermöglichen.

Der zweite von drei Simulationsdurchläufen dient lediglich der Darstellung der regulären Abschattung, d.h. Schalter  $S1$  ist dabei geöffnet, so dass die Diode  $D1$  keinerlei Wirkung zeigt. Erst beim dritten Durchlauf der Simulation, wenn  $S1$  geschlossen ist, wirkt  $D1$  und schließt die abgeschattete Zelle praktisch kurz.

Beim Betrachten der Messwerte in Tabelle 11 und 12 erkennt man, dass der Leistungsverlust von fast 10% auf grade mal 4% gefallen ist.

Desweiteren ist auch eine Zerstörung durch den sogenannten Hot-Spot-Effekt ausgeschlossen.

	<i>E in W/m<sup>2</sup></i>	<i>Voc in V</i>	<i>Isc in A</i>	<i>Pmpp in W</i>
	1000	48,595	5,749	<b>219,949</b>
ohne Bypass	800	48,590	4,643	<b>198,226</b>
mit Bypass	800	48,590	5,749	<b>211,581</b>

**Tabelle 11 : Simulationsergebnisse der Bypass-Dioden**

		ohne Bypass	mit Bypass
<i>Abweichung in %</i>			
<i>E in W/m<sup>2</sup></i>	1000	800	800,000
<i>Voc</i>	0,000	-0,010	-0,010
<i>Isc</i>	0,000	-19,240	0,000
<i>Pmpp in W</i>	0,000	<b>-9,876</b>	<b>-3,805</b>

**Tabelle 12 : Prozentuale Abweichungen**

In der Praxis werden Bypass-Dioden in jedem Solarmodul eingesetzt, doch wird aus Kostengründen auf die Absicherung jeder einzelnen Zelle meist verzichtet.

In der Regel werden zwischen 6 bis 16 Zellen mit einer Bypass-Diode versehen.

Diese Zahl variiert je nach Hersteller und Qualitätskriterium.

Auch hier kann die Simulation helfen, Qualitätsrichtlinien eines Herstellers zu bestimmen oder eben diese einzuhalten.

Die in PORTUNUS erstellten Modelle der Solarmodule verzichten allerdings bewusst auf diese Bypass-Dioden, da bei diesen Modellen eine Teilabschattung und so eine Einflussnahme auf einzelne Zellen nicht möglich sind.



## 5.4 Reihen- und Parallelschaltung von Solarmodulen

Betrachtet man größere Solaranlagen, mit Ausgangsleistung von mehreren KW Leistung, und bedenkt die Tatsache, dass Solarmodule immer aus bis zu 72 in Reihe geschalteten Solarzellen bestehen, würde laut dem zweiten Kirchhoff'schen Gesetz, die Summe aller Teilspannungen gleich der Gesamtspannung sein.

Schaltet man also  $n$  Solarmodule in Reihe, um größere Leistungen zu gewinnen, so würde die Ausgangsspannung auf  $n \cdot U_{OC}$  steigen, der Kurzschlussstrom  $I_{SC}$  aber stets gleich bleiben (Konstante Bestrahlungsstärke ohne Abschattung vorausgesetzt).

Wie in Kapitel 5.2 und 5.3 zu erkennen ist, sind reine Reihenschaltungen zudem extrem abschattungsanfällig, was zu erheblichen Ertragsminderungen führen kann.

Ebenso ist das reine Parallelschalten einzelner Solarmodule, wegen der sich dadurch ergebenden geringen Ausgangsspannung unüblich ( $U_1 = U_2 = \dots = U_N$ ).

Die Notwendigkeit der Kombination von Reihen- und Parallelschaltungen soll durch die folgenden Simulationsbeispiele belegt werden.

### 5.4.1 Reihenschaltung

Abbildung 27 stellt die Simulation einer Reihenschaltung von fünf SUNPOWER 220 Modulen dar. Während im ersten Simulationszyklus die Bestrahlungsstärke bei allen Modulen gleich ist, wird im zweiten bzw. dritten Durchlauf eine Abschattung von 50% für eines dieser Module mit und ohne Bypass-Diode simuliert.

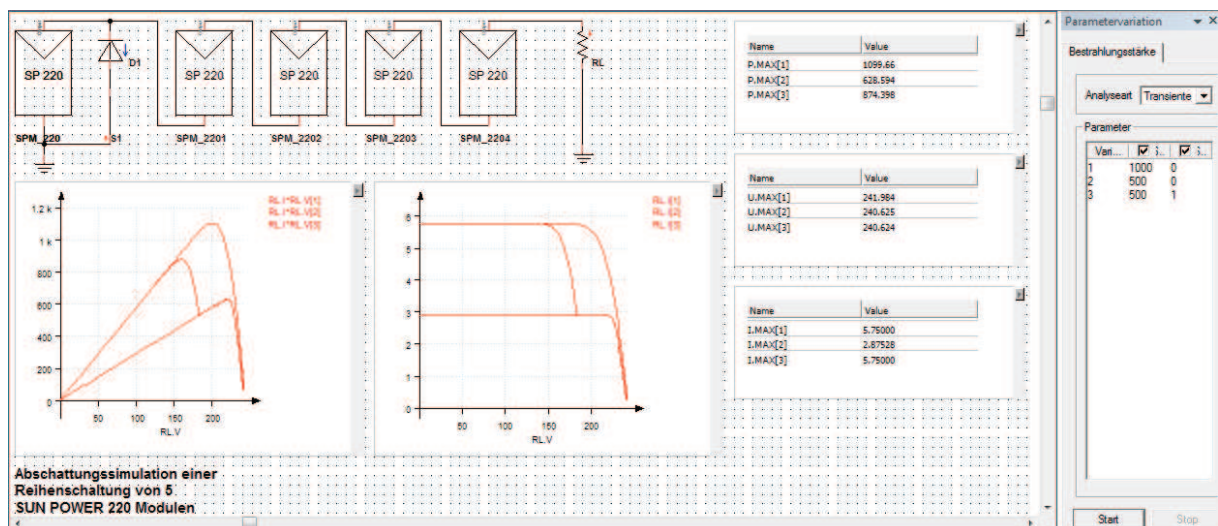


Abbildung 27 : Simulationsbeispiel einer Reihenschaltung mit Abschattung

Tabelle 13 zeigt die Änderung der Ausgangsleistung in Abhängigkeit der Bestrahlungsstärke.

Reihenschaltung	ohne Bypass	mit Bypass
E in W/m <sup>2</sup>	<i>P<sub>mpp</sub> in W</i>	<i>P<sub>mpp</sub> in W</i>
1000	1099,66	1099,66
500	628,594	874,389
Abweichung in %	<b>-42,84</b>	<b>-20,49</b>

Tabelle 13 : Darstellung der Ausgangsleistung einer Reihenschaltung bei Abschattung eines Moduls um 50%

Durch den Einsatz der Bypass-Dioden kann die Ertragsminderung von ca. 40% auf 20% reduziert werden.

Bedenkt man allerdings, dass lediglich eins der fünf verwendeten Module teilabgeschattet ist, so ist eine Leistungseinbuße von 20% in der Realität nicht ansatzweise akzeptabel.

### 5.4.2 Parallelschaltung

Das Simulationsbeispiel in Abbildung 28, die Parallelschaltung von fünf SUNPOWER 220 Modulen, wird wie schon die Reihenschaltung, den gleichen äußeren Einflüssen unterworfen. Dabei kann natürlich auf den Einsatz von Bypass-Dioden verzichtet werden.

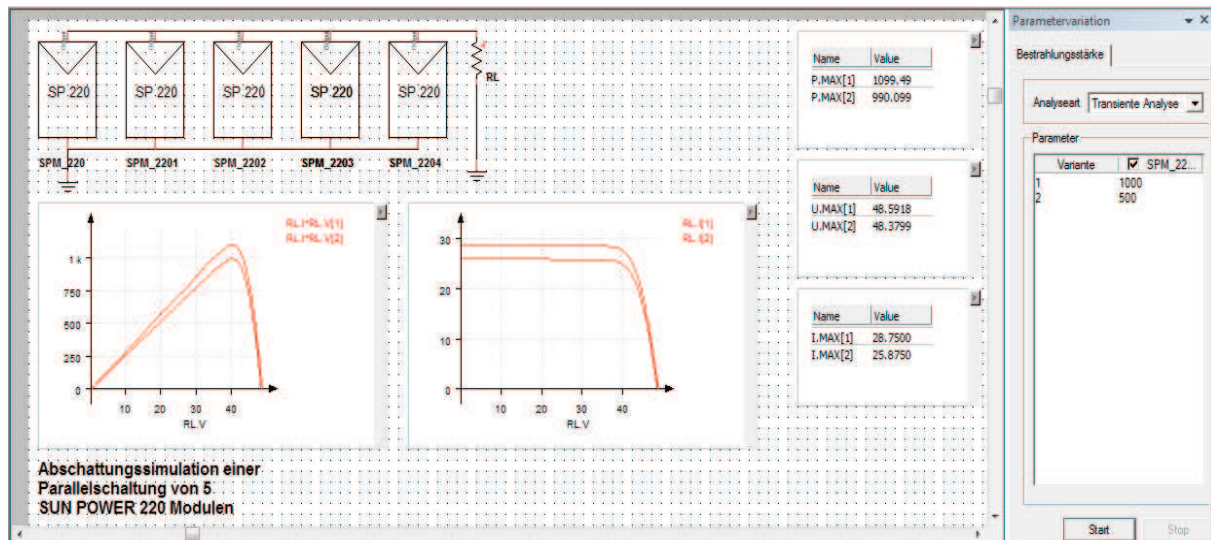


Abbildung 28 : Simulationsbeispiel einer Parallelschaltung mit Abschattung

Die Ergebnisse der Simulation werden anhand der Ausgangsleistung in Tabelle 14 abgebildet.

Parallelschaltung	
E in W/m <sup>2</sup>	<i>P<sub>mpp</sub></i> in W
1000	1099,66
500	990,099
Abweichung in %	<b>-9,96</b>

Tabelle 14 : Darstellung der Ausgangsleistung einer Parallelschaltung bei Abschattung eines Moduls um 50%

Vergleicht man die prozentualen Abweichungen der Ausgangsleistung aus den Tabellen 13 und 14, wird die Notwendigkeit einer Kombination aus Reihen- und Parallelschaltung schnell klar.

Um Ertragsverluste so gering wie eben möglich zu halten, ist es also unerlässlich, Kombinationsschaltungen zu verwenden.

Eine Möglichkeit der Kombination wird in Kapitel 5.4.3 erläutert.

### 5.4.3 Kombinationschaltung

In der Praxis finden aus denen in Kapitel 5.4 erläuterten Gründen Solaranlagen ihren Einsatz, die stets aus einer Kombination von in reihe- und parallelgeschalteten Modulen bestehen.

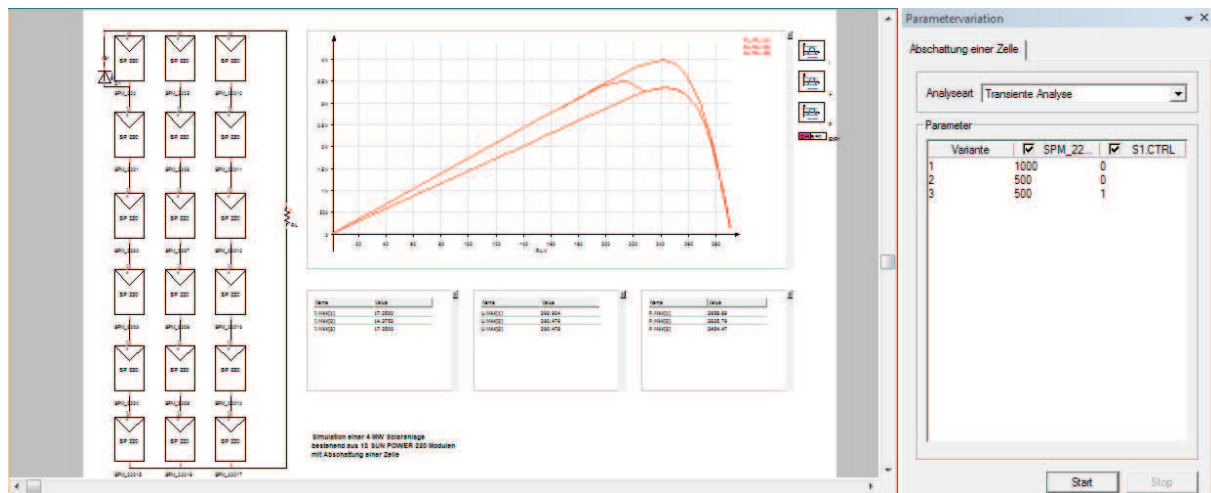


Abbildung 29 : Simulation einer 4 MW Solaranlage

Abbildung 29 stellt die Simulation einer praxisnahen Solaranlage dar.

Während die sechs in Reihe geschalteten SUNPOWER Module sich für die Ausgangsspannung von  $6 \cdot 48,6\text{V} = 291,6\text{V}$  (im Leerlauf) verantwortlich zeigen, liefert die Parallelschaltung der 3 Stränge den Strom von  $3 \cdot 5,75\text{A} = 17,25\text{A}$  (im Kurzschluss).

Auch hier finden erneut Bypass-Dioden ihre Anwendung, die in der Realität allerdings die Zellen der Module absichert, und nicht wie in dieser Simulation dargestellt, die kompletten Module selbst.

Schattet man nun eins dieser Module um 50% ab, d.h. Reduzierung der Bestrahlungsstärke  $E$  von  $1000\text{W/m}^2$  auf  $500\text{W/m}^2$ , ergeben sich die Messwerte in Tabelle 15 und 16.

Die Ergebnisse dieser Simulation, in Verbindung mit Tabelle 13 verdeutlichen den Sinn der Kombination von Reihen- und Parallelschaltung der Module einer Solaranlage.

	$E$ in $\text{W/m}^2$	$V_{oc}$ in $\text{V}$	$I_{sc}$ in $\text{A}$	$P_{mpp}$ in $\text{W}$
	1000	290,904	17,250	<b>3958,980</b>
ohne Bypass	500	290,479	14,375	<b>3335,790</b>
mit Bypass	500	290,478	17,25	<b>3464,470</b>

Tabelle 15 : Simulationsergebnisse der Abschattung eines von 18 Modulen um 50%

		ohne Bypass	mit Bypass
Abweichung in %			
$E$ in $\text{W/m}^2$	1000	500	500
$V_{oc}$	0,000	-0,146	-0,146
$I_{sc}$	0,000	<b>-16,667</b>	0,000
$P_{mpp}$	0,000	<b>-15,741</b>	<b>-12,491</b>

Tabelle 16 : Prozentuale Abweichungen

Da der Gesamtstrom  $I$ , der definiert ist über

$$I = \sum_{i=1}^n I_i \quad (5.1.1)$$

in dieser Kombination von den drei Parallelsträngen geliefert wird, die Bestrahlungsstärkenänderung von -50% sich aber nur auf einen der Stränge auswirkt, verringert sich der Gesamtstrom ohne Berücksichtigung der Bypass-Diode um den Faktor

$$-50\% * \frac{1}{3} = -16.667\%$$

Da wie in Kapitel 2 beschrieben, die Stromänderung den größten Teil der Ausgangsleistungsänderung ausmacht, kann durch eine Erhöhung der Parallelstränge die Leistungsminderung zusätzlich reduziert werden.

Der Vorteil der sogenannten Strings, also die Reihenschaltung mehrerer Module und der damit verbundenen, höheren Ausgangsspannung, wird in Kapitel 7 näher erläutert.

## 6. Leistungsoptimierung

Damit einem Solarmodul die maximale Leistung entnommen werden kann, muss das Produkt der entnommenen Spannung und das des entnommenen Stroms maximal sein.

Das ist aber nur dann möglich, wenn das Modul mit dem optimalen Lastwiderstand beschaltet wird. Da Spannung und Strom, aufgrund häufig ändernder Umgebungsbedingungen (Bestrahlungsstärke und Temperatur) sich im Punkt maximaler Leistung niemals konstant verhalten, ändert sich auch der Wert des optimalen Lastwiderstandes.

Es wird also ein Stellglied benötigt, welches die Aufgabe hat, für das Solarmodul den optimalen Lastwiderstand zu bilden und so, die dem Modul entnommene Leistung, an den Verbraucher weiter zu geben.

In der Praxis wird dieser variable Lastwiderstand durch einen sogenannten Gleichspannungswandler gebildet.

Bei diesen Gleichspannungswandlern hat die Ausgangsspannung einen anderen Wert als die Eingangsspannung[4].

Im Folgenden wird dazu ein Hochsetzsteller, auch Boost-Converter genannt, verwendet.

### 6.1 Der Hochsetzsteller

Abbildung 30 zeigt die wesentlichen Elemente eines Hochsetzstellers.

Wie der Name „Hochsetzsteller“ schon verrät, ist die Ausgangsspannung  $U_A$  stets größer als die Eingangsspannung  $U_E$ .

Die Höhe der Ausgangsspannung wird durch die Schaltphasen (Ein, Aus) des Schalters  $S$  gesteuert.

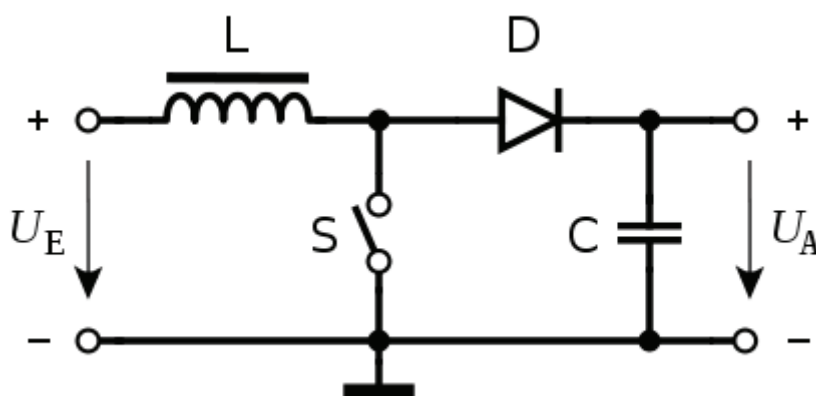


Abbildung 30 : Darstellung eines Hochsetzsteller kurz HSS

Das Verhältnis zwischen  $U_E$  und  $U_A$  wird also durch das Tastverhältnis  $a$ , welches wie folgt berechnet wird

$$a = \frac{t_{ein}}{T} \quad (6.1.1)$$

bestimmt.

$t_{ein}$ =Einschaltzeit

$T$ =Periodendauer

Ist der Schalter  $S$  geschlossen fällt die gesamte Spannung  $U_E$  an der Induktivität  $L$  ab,

$$u_E = u_L = L * \frac{di_L}{dt} \quad (6.1.2)$$

und der Strom in der Spule steigt linear an ( $I_E = I_L$ ).

Die Energie im Magnetfeld der Induktivität nimmt also zu und wird gespeichert.

Öffnet sich  $S$ , versucht die Spule den Strom  $I_L$  aufrecht zu erhalten.

Die Spannung an der Sekundärseite der Spule nimmt dadurch rasch zu, und erreicht schnell einen Wert, der größer ist als die Spannung am Kondensator ( $U_A = U_C$ ).

Dadurch wird die Diode  $D$  leitend und der Strom  $I_L$ , der im ersten Moment unvermindert weiter fließt, lädt den Kondensator auf eine Spannung größer  $U_E$  auf.

Allerdings nur so lange, bis das Magnetfeld die darin gespeicherte Energie an den Kondensator und die Last abgegeben hat.

Durch diese Addition der Spannung  $U_E$  mit  $U_C$  ist es möglich, höhere Ausgangsspannungen als die Eingangsspannung zu erzielen.

Die Ausgangsspannung  $U_A$  steht also mit dem Tastverhältnis  $a$  und der Eingangsspannung  $U_E$  in folgendem Zusammenhang

$$U_A = U_E * \frac{1}{1-a} \quad (6.1.3)$$

Grundsätzliches sollte bei der Anwendung von Hochsetzstellern beachtet werden:

1. Weil kein abschaltbares Bauelement im Kurzschlussweg ist, ist dieser nicht kurzschlussfest.
2. Im nicht geregelten Betrieb, d.h. bei Ansteuerung mit einem festen Tastverhältnis, ist der Hochsetzsteller nicht leerlauffest. Mit jedem Takt wird Energie von der Induktivität auf den Ausgangskondensator gepumpt. Im Leerlauf steigt die Ausgangsspannung daher kontinuierlich an, bis Bauelemente zerstört werden.

## 6.2 MPP Tracking

Wie in Kapitel 6 erwähnt, ist der MPP (Maximum Power Point) der Betriebspunkt eines Solarmoduls, bei dem die maximale Leistung an den Verbraucher abgegeben werden kann.

Für den Hochsetzsteller bedeutet das, dass seine Eingangsimpedanz die dafür benötigte, optimierte Last darstellt.

Um diese variable Last zu realisieren, muss das Tastverhältnis  $a$  so verändert werden, dass die Leistung am Verbraucher stets maximal ist.

Die Abhängigkeit der Eingangsimpedanz  $R_{Im}$  zum Tastverhältnis ist definiert mit

$$a \approx 1 \triangleq R_{Im} \approx 0 \quad (6.2.1)$$

bzw.

$$a \approx 0 \triangleq R_{Im} \approx \infty \quad (6.2.2)$$

Das bedeutet, dass in Abhängigkeit eines Verbrauchers  $R_V$ , das Solarmodul im Leerlauf oder im Kurzschluss betrieben werden kann.

Um also den optimalen Betriebspunkt eines Solarmoduls zu finden, muss stets die gesamte I-U-Kennlinie durchlaufen werden, da nur so sichergestellt werden kann, dass das absolute Leistungsmaximum erreicht ist.

Verringert sich plötzlich die Ausgangsleistung des Moduls, durch z.B. äußere Einflüsse, ist es unerlässlich, dass Tastverhältnis  $a$  des Hochsetzstellers auf 0 zurück zu setzen, damit die Eingangsimpedanz auf den optimalen Wert (absolutes Leistungsmaximum am Verbraucher) angepasst werden kann.

### 6.2.1 Suchschwingverfahren mit Leistungsmessung

Ein Verfahren zur Ermittlung des MPP ist das sogenannte Suchschwingverfahren mit Leistungsmessung.

Dabei wird, bei  $a=0$ , die Leistung am Verbraucher gemessen und in einer Variablen  $P1$  gespeichert. Das Tastverhältnis  $a$  wird um einen Betrag  $\Delta a$  vergrößert und erneut eine Leistungsmessung durchgeführt.

Auch diese wird in einer Variablen  $P2$  hinterlegt. Ist die Leistung  $P2$  dann größer als die Leistung  $P1$ , muss das Tastverhältnis  $a$  wieder um den Betrag  $\Delta a$  erhöht werden.

Dies geschieht solange bis  $P1$  größer als  $P2$  ist, d.h. der Punkt des absoluten Leistungsmaximums ist erreicht. Ab diesem Moment wird  $a$  um  $\Delta a$  verringert, das Leistungsverhältnis zwischen  $P1$  und  $P2$  kippt, und  $\Delta a$  wird wieder erhöht. Das System schwingt.



### 6.3 Der Hochsetzsteller in PORTUNUS

Die PORTUNUS Bibliothek „Power Electronics“ → „DC/DC“ bietet zwei unterschiedliche Modelle von Boost Convertern an.

Während bei dem Modell „Booster Circuit“ die PWM-Control noch zusätzlich implementiert und konfiguriert werden muss, bietet das Modell „Booster Unit“ eine „All in One“ Lösung an, bei der mit „rechts Klick → Eigenschaften“ auf das Modell, alle benötigten Parameter direkt konfigurierbar sind. Kenngrößen der Halbleiterelemente, Taktfrequenz und Tastverhältnis sind frei wählbar.

Um den Hochsetzsteller aus Abbildung 30 zu realisieren, muss lediglich der Kondensator am Ausgang in die Schaltung implementiert werden.

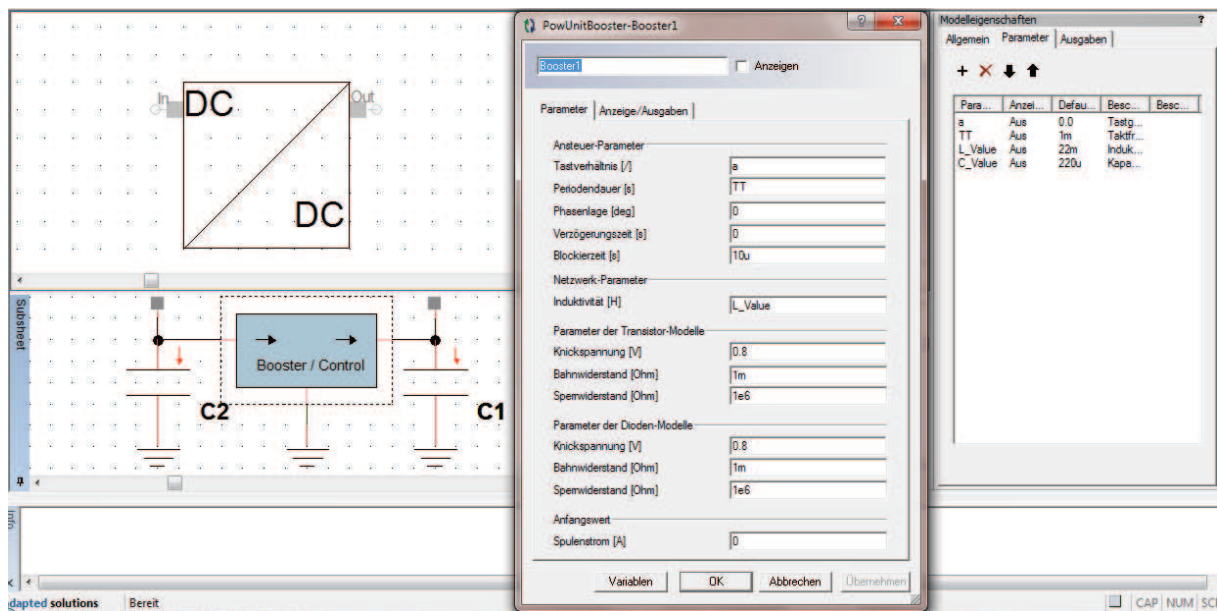


Abbildung 31 : Modelle des Hochsetzstellers

Abbildung 31 zeigt das erstellte Modell eines Hochsetzstellers mit Hilfe der „Booster Unit“.

Die zusätzlichen Kondensatoren C1 und C2 dienen zur Glättung der Ausgangsspannung (C1) und dem zwischenspeichern der Eingangsenergie (C2).

Desweiteren werden die realen Verluste der Halbleiter in diesem Modell berücksichtigt, was den Wirkungsgrad zwar senkt, aber so eine realistische Simulation ermöglicht.

Da die Induktivität der Spule definiert ist mit

$$L \geq \frac{U_E * T_{Takt}}{8 * I_{Last\_min}} \quad (6.3.1)$$

sich die Eingangsspannung  $U_E$  von Simulation zu Simulation allerdings verändert, muss der Wert der verwendeten Induktivität stets an die jeweilige Simulation angepasst werden.

Betrachtet man die Definition der Ausgangskapazität  $C_1$

$$C_1 \geq \frac{U_E * T_{Takt}^2}{32 * L * \Delta U_{Ass}} \quad (6.3.2)$$

erkennt man auch dabei, dass Größen wie  $\Delta U_{Ass}$  (Welligkeit der Ausgangsspannung) entweder nicht bekannt sind, oder bei wie der Berechnung der Induktivität  $L$ , abhängig sind von der jeweiligen Simulation.

## 6.4 MPP-Tracking in PORTUNUS

Um das in Kapitel 6.2.1 beschriebene Suchschwingverfahren in PORTUNUS zu ermöglichen, bedient man sich der sogenannten Zustandsgraphen.

Das Zustandsgraph-Modul bietet die Möglichkeit, ereignisorientierte Systeme zu modellieren. Ein Zustandsgraph besteht immer aus Zuständen und Übergängen. Jedem Zustand muss ein Übergang folgen und umgekehrt. Sie können benutzt werden, um Variablenwerte oder Eingabeparameter der Modelle zu modifizieren.

In jedem Zustand können Aktionen der nachfolgend aufgeführten Typen verwendet werden:

Aktion	Beschreibung	Beispiel
STEP	Angegebene Gleichung wird bei jedem Simulationsschritt aufgerufen, solange der Zustand aktiviert ist. Aktion wird nicht während einer DC- oder OP-Analyse durchgeführt!	$a = 325 * \sin(314 * t)$
SET	Angegebene Gleichung wird einmal nach der Aktivierung des Zustandes aufgerufen.	Enable = 0 E1.DC = 300 P=R1.I*R1.V
DELAY	Zurückstellung einer Variablen auf FALSE und Start eines Timers. Nach Ablauf des Timers wird die Variable wieder auf TRUE gesetzt. Aktion wird nicht während einer DC- oder OP-Analyse durchgeführt!	a##10m

Tabelle 17 : Aktionen-Typen eines Zustandsgraphen

Die "STEP" und "SET" - Aktionen sollten genutzt werden, um einer Variablen oder einem Parameter Werte zuzuweisen. Dafür sind alle im Anhang aufgeführten Operatoren verfügbar.

Das Argument der DELAY-Anweisung (Verzögerungszeit) kann eine beliebige Zahl oder Ausdruck sein. Negative Zahlen werden ignoriert und die Variable wird im nächsten Schritt auf TRUE gesetzt.

Die Übergänge verbinden Zustände.

Ein aktivierter Zustand wird inaktiv, wenn der folgende Übergang ausgeführt und damit der Nachfolgerzustand aktiviert wird.

Ist ein Zustand mit 2 nachfolgenden Übergängen verbunden, wird der Übergang mit der höheren Priorität (niedrigerer Zahlenwert) zuerst ausgewertet. Wurden für beide Übergänge gleiche Prioritäten angegeben, wird zunächst der Übergang, der zuerst in die Simulationsbeschreibung eingetragen wurde, ausgewertet[2].

In der PORTUNUS Bibliothek „*State Machine*“ sind die Zustände (State) und Übergänge (Transition) hinterlegt.

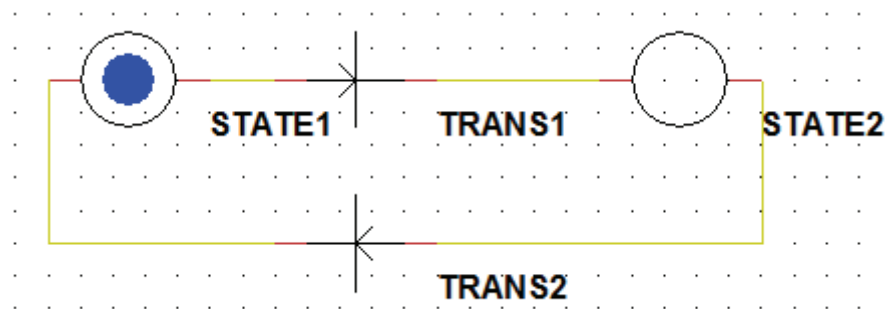


Abbildung 32 : Zustandsgraphen-Modell des Suchschwingverfahrens

Abbildung 32 zeigt die Realisierung eines Suchschwingverfahrens mit Hilfe von Zuständen und Übergängen.

Die Funktionsweise und der Ablauf gleichen im Grunde denen eines Petri-Netzes.

Die folgenden Abbildungen erläutern die genaue Funktion und erklären den detaillierten Ablauf.

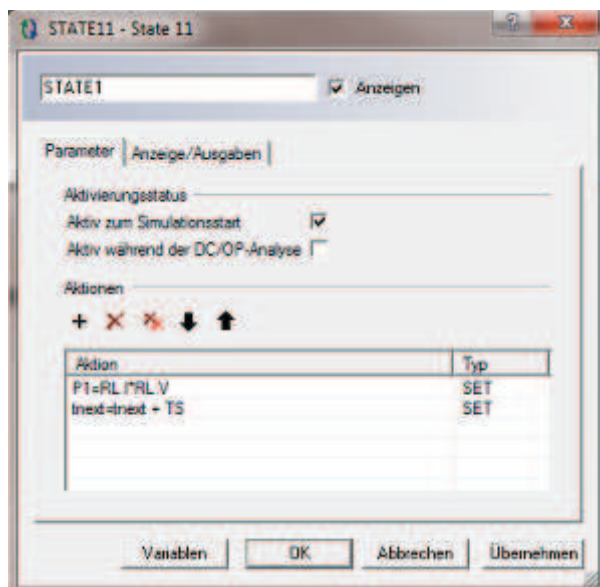


Abbildung 33 : Konfiguration von State 1

Da der wesentliche Bestandteil des Suchschwingverfahrens der Vergleich zweier Leistungen ist, wird in *State 1* (Abbildung 33) über die Formel  $RL.I * RL.V$  die aktuelle Leistung am Verbraucher gemessen und in der Variablen  $P1$  gespeichert.

Damit evtl. Änderungen bei der zweiten Leistungsmessung vom Programm wirklich wahr genommen werden, muss die Zeit zwischen diesen Messungen einige Millisekunden betragen.

Aus dem Grund wird mit zwei Hilfsvariablen,  $t_{next}$  und  $TS$ , gearbeitet.

Mit der in Kapitel 4.2.3.3 erläuterten „*Parametervariation*“ werden die Variablen  $t_{next}$  und  $TS$  definiert und initialisiert.

Die Variable  $TS$  stellt dabei die Abtastzeit zwischen den einzelnen States dar,  $t_{next}$  hingegen addiert die Summe all dieser Abtastzeiten.

Betrachtet man die Übergangsbedingung von *Transition 1* wird klar, wozu die Summe der Abtastzeit  $TS$  benötigt wird.

Da der Übergang bzw. die Bedingung für den Übergang an die Echtzeit  $t$  geknüpft sind (Abbildung 34) bedeutet das, dass mit Erreichen einer gewählten Zeitschwelle, die in der Variablen  $t_{next}$  gespeichert ist, die Transitions-Übergangsbedingung erfüllt ist und dadurch der folgende State aktiviert wird.

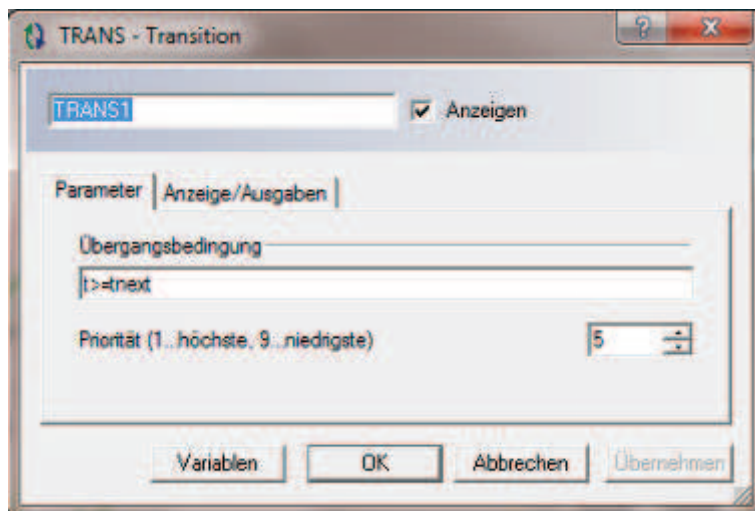


Abbildung 34 : Konfiguration von Transition 1 und 2

Da vor Beginn der Simulation die benötigte, optimale Schrittweite  $TS$  nicht bekannt ist, sondern lediglich durch die Simulationsschrittweite  $HMAX$  eingegrenzt werden kann, sind einige Testläufe für ein optimales Ergebnis unerlässlich.

Im Fall der Simulation „*SP\_220\_MPP\_V1*“, (SUNPOWER 220 Modul mit HSS + MPP Tracking) bedeutet das, dass bei gewählten Simulationsschrittweiten von  $HMIN=10\mu s$ ,  $HMAX=100\mu s$ , ein optimaler Wert  $TS$  bei ca. 5ms liegt.

So wird sichergestellt, dass zwischen den beiden Leistungsmessungen ein angemessener Zeitraum verwendet wird.

Ein weiterer entscheidender Punkt zur Ermittlung des absoluten Leistungsmaximums, ist das stetige ändern des Tastverhältnisse  $a$ .

Dies geschieht über die in Abbildung 35 implementierte IF-Schleife in *State 2*.

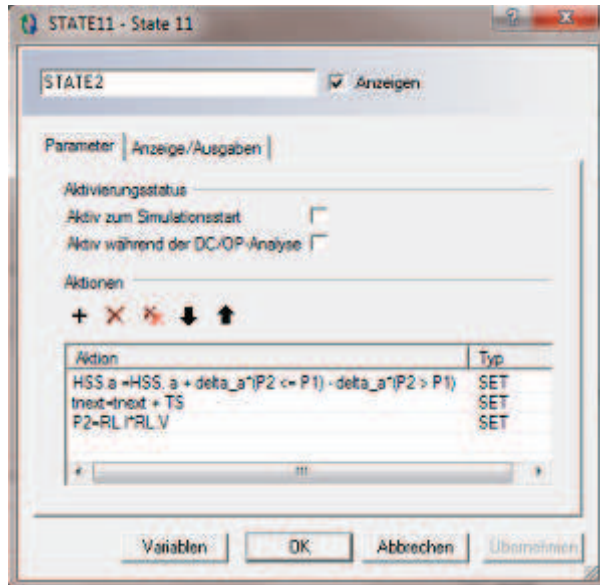


Abbildung 35 : Konfiguration von State 2

Durch den Befehl

$$HSS.a = HSS.a + \dots$$

wird dem Parameter  $a$  des Modells *HSS* ein neuer Wert zugewiesen.

Dieser neue Wert entspricht dem Defaultwert, der um einen durch den Benutzer in der „Variablendefinition“ festgelegten Faktor  $\Delta a$  erweitert wird.

Ob dieser Faktor positiv oder negativ ist, wird über die Befehlsstruktur

$$\dots + \Delta a * (P2 \leq P1) - \Delta a * (P2 > P1)$$

definiert.

Betrachtet man den ersten Teil dieser Struktur

$$(\dots + \Delta a * (P2 \leq P1) \dots)$$

erkennt man den Vergleich zweier Variablen.

Da der abgelaufene *State 1* die Variable  $P1$  mit einem Leistungswert beschrieben hat,

$P2$  in der „Variablendefinition“ mit Null initialisiert wurde (siehe Kapitel 4.3.2.3), gilt für den Ausdruck „ $P2 \leq P1$ “ das Statement „TRUE“.

Anders ausgedrückt heißt das für die Struktur

$$HSS.a = HSS.a + \Delta a * (1) - \Delta a * (0)$$

Das Tastverhältnis  $a$  wird also um  $\Delta a$  erhöht, was eine Leistungsänderung am Verbraucher zur Folge hat. Diese Leistung wird dann in der Variablen  $P2$  gespeichert.

Der folgende Übergang (*Transition 2*), der gleich mit *Transition 1* ist, verzögert erneut, und aktiviert dann *State 1*.

Ein geschlossenes System ist entstanden.

### 6.4.1 Simulation des Solarmoduls SUNPOWER 220 mit MPP-Tracking

Abbildung 36 zeigt die Simulation eines SUNPOWER 220 Solarmoduls in Verbindung eines Hochsetzstellers mit MPP-Tracking.

Zur Anzeige des Tastverhältnisses, der Leistung am Verbraucher und der aktuellen Bestrahlungsstärke kommen die sogenannten „Steuerelemente“ zum Einsatz.

Diese können Wahlweise, über analoge oder digitale Anzeigen, alle in der Simulation verwendeten Parameter darstellen.

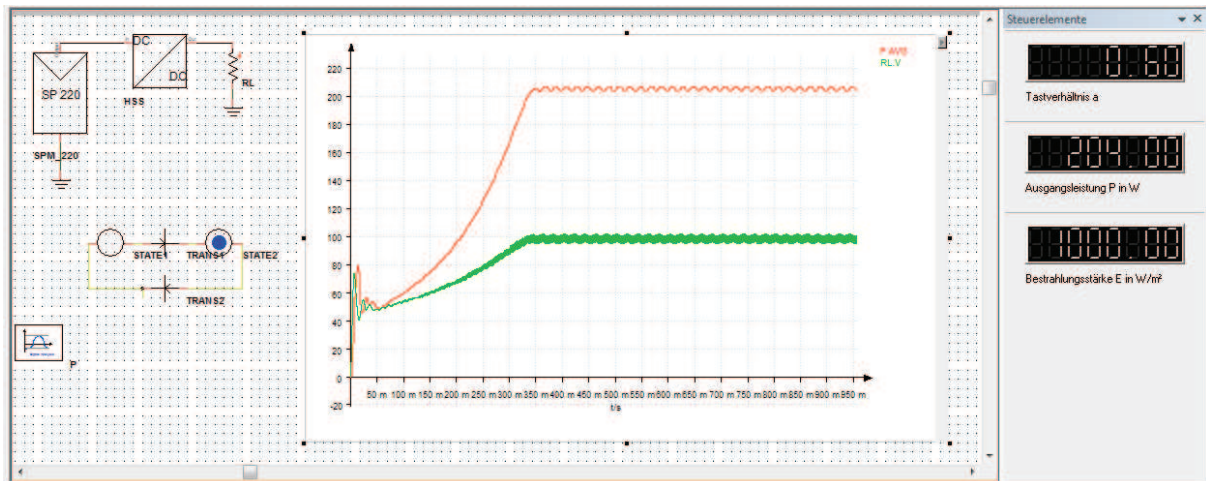


Abbildung 36 : Simulationsergebnis des MPP-Trackings

Betrachtet man den Kurvenverlauf in Abbildung 36, erkennt man an der roten Kurve die stetig steigende Leistung an Verbraucher  $R_L$ .

Die Steigung dieser Kurve wird durch das vom Benutzer gewählte und in Kapitel 6.4 erwähnte  $\Delta a$  bestimmt. In diesem Fall beträgt  $\Delta a=0.02$ .

Auch hierbei ist es wichtig, einen sinnvollen Wert für  $\Delta a$  zu verwenden, da sonst die Simulationsdauer zu lang werden würde, und die graphische Darstellung an Übersichtlichkeit verliert. Die in grün dargestellte Ausgangsspannung ist ebenfalls eng mit dem sich ändernden Tastverhältnis  $a$  verknüpft.

Ab einem Wert von  $a=0.6$  tritt keine Erhöhung der Ausgangsleistung mehr auf, die Simulation bewegt sich also ab Erreichen dieses absoluten Leistungsmaximums stetig zwischen  $a=0.6-0.02$  und  $a=0.58+0.02$  hin und her.

Um die graphische Darstellung der Leistung aussagefähig abzubilden, wird mit Hilfe eines *Signal Analyzers* (Kapitel 4.4.1) der Mittelwert über einen Zeitraum von 10ms ermittelt und anschließend dargestellt.

### 6.4.2 Simulation einer 660W Solaranlage mit MPP-Tracking

Der Nutzen eines MPP-Trackingverfahrens, also das Anpassen des Verbrauchers an das Solarmodul, wird besonders bei Bestrahlungsstärkenänderungen gut sichtbar.

Um diese Veränderungen in einer Simulation zu zeigen, bedient man sich erneut den Zustandsgraphen, da die Bestrahlungsstärkenänderung während des Simulationszyklus passieren muss.

Im Folgendem soll eine Simulation betrachtet werden, bei der die Bestrahlungsstärke von  $E=800\text{W}/\text{m}^2$  auf  $1000\text{W}/\text{m}^2$  steigt, und anschließend wieder auf  $800\text{W}/\text{m}^2$  fällt.

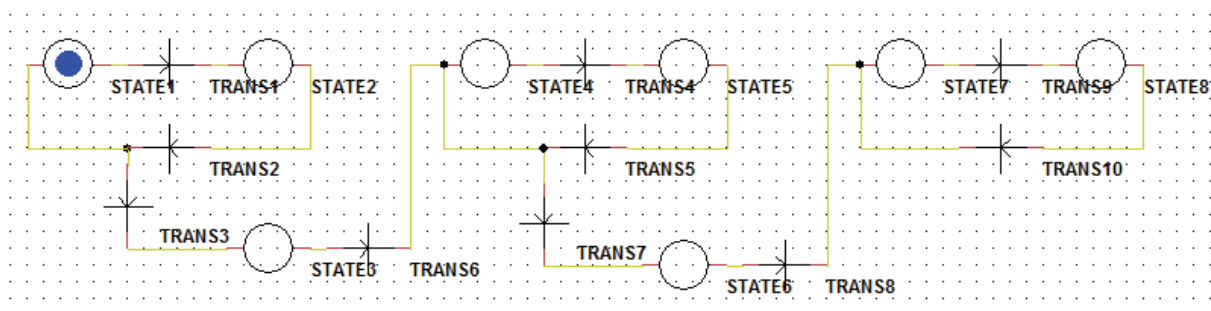


Abbildung 37 : Zustandsgraphen-Modell

Abbildung 37 zeigt eine Gesamtübersicht aller in dieser Simulation verwendeten Zustandsgraphen. Da eine Änderung von  $800\text{W}/\text{m}^2$  auf  $1000\text{W}/\text{m}^2$  und von  $1000\text{W}/\text{m}^2$  auf  $800\text{W}/\text{m}^2$  erzwungen werden soll, ist dafür je ein State mit zwei Transitionen notwendig.

Zur vereinfachten Darstellung ist die Simulationszeit so gewählt, dass sich alle 0.5s eine Änderung einstellt.

Das bedeutet, der Simulationsparameter TEND wird auf 1.5s gesetzt und die Übergangsbedingungen der Transitionen 3,6,7 und 8 mit  $t \geq TEND \cdot (1/3)$  bzw.  $t \geq TEND \cdot (2/3)$  konfiguriert.

Für die Änderung der Bestrahlungsstärke  $E$  der jeweiligen Modelle, zeigen sich State 3 und State 6 verantwortlich.

Durch die Befehlsstruktur

`SPM_220.E=1000` bzw. `SPM_220.E=800`

wird über den Modellnamen und dem aus der Java-Programmierung bekannten Punktoperator auf die Bestrahlungsstärke  $E$  zugegriffen.

Abbildung 38 stellt die gesamte Simulation mit graphischer Darstellung der Leistung (rot) und der Ausgangsspannung (grün) dar.

Zur Anzeige des Tastverhältnisses, der aktuellen Leistung und der momentanen Bestrahlungsstärke dienen erneut die *Steuerelemente*.

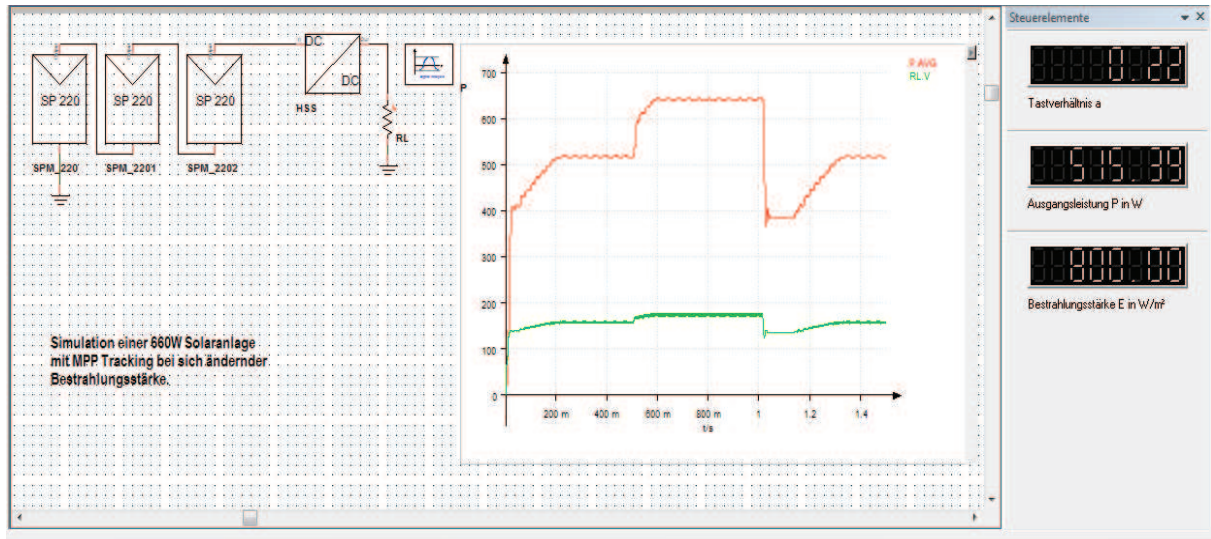


Abbildung 38 : Simulation einer 660W Solaranlage mit Bestrahlungsstärkenänderung

Da mit steigender Ausgangsleistung des Solarmoduls auch das absolute Leistungsmaximum zunimmt, kann auf das in Kapitel 6.2 erwähnte, durchlaufen der gesamten I-U-Kennlinie verzichtet werden. Sinkt hingegen die Modulleistung, kann das Leistungsmaximum nur durch zurücksetzen des Tastverhältnisses und dem dadurch verbundenen durchlaufen der gesamten I-U-Kennlinie wieder gefunden werden.

Dieses Zurücksetzen wird ebenfalls durch die in Abbildung 35 dargestellten Zustandsgraphen realisiert.



## 7. Der Wechselrichter

Einen weiteren entscheidenden Punkt einer kompletten Solaranlage stellt der Wechselrichter dar. Egal ob die gewonnene Solarenergie direkt genutzt, oder ins Netz der Energieversorger gespeist werden soll, muss diese in Form von Wechselspannung vorliegen.

Hierzu dient der sogenannte Wechselrichter.

### 7.1 Funktionsweise eines Wechselrichters

Um zu verstehen wie ein Wechselrichter arbeitet, hilft die Betrachtung der Abbildung 39.

Die Spannung  $U_d$  stellt die vom Solarmodul bereitgestellte Gleichspannung dar, die Spannung  $u_L$  repräsentiert hingegen die gewonnene Wechselspannung.

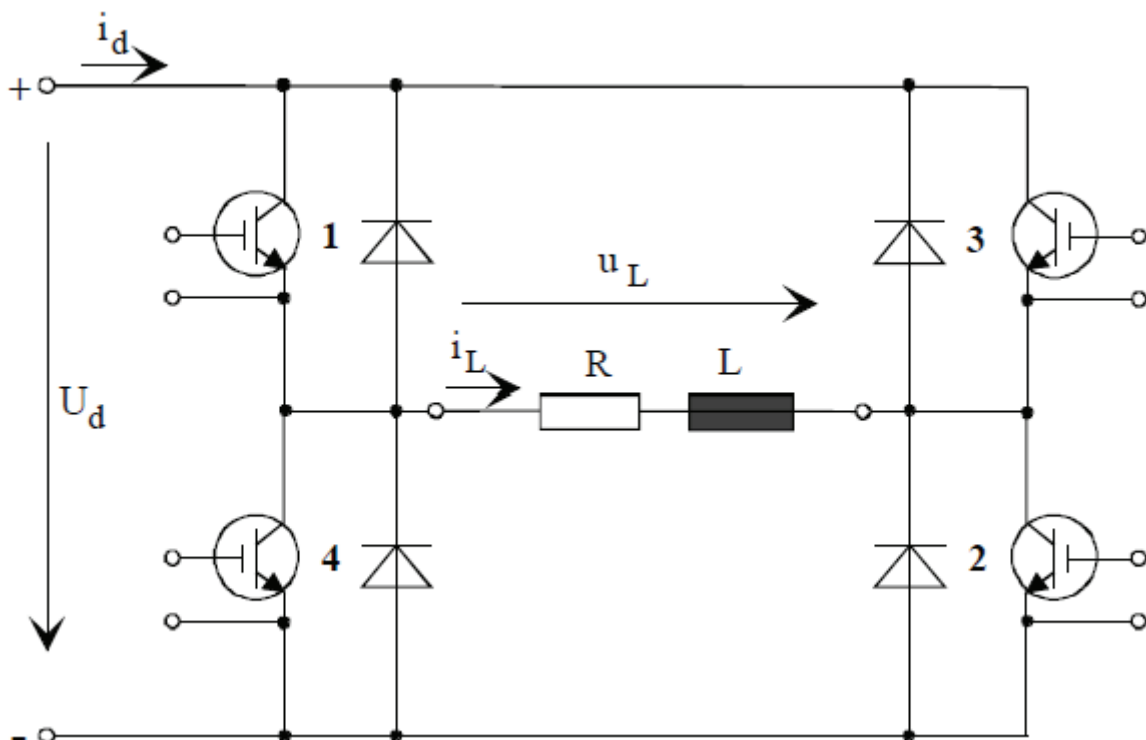


Abbildung 39 : Wechselrichterbrücke

Durch gegenphasiges Schalten der Brückenarme 1-2 und 3-4 wird an der Last eine rechteckförmige Spannung eingeprägt. Die Stromform durch die Last hängt von deren Impedanz ab.

Der Scheitelwert der Wechselspannung hängt in erster Linie von der Eingangsspannung  $U_d$  ab.

Die Frequenz hingegen steht in Abhängigkeit mit der Ansteuerung der Brückenarme.

Durch induktive Last hat der Strom nach dem Umschalten der Spannung einen exponentiellen ansteigenden bzw. einen abfallenden Verlauf. Daher sind für die Zeit nach der Spannungsumkehr Dioden notwendig, die den Strom solange führen, bis auch dieser seine Richtung umgekehrt hat.

### 7.1.2 Die PWM Ansteuerung

Die Pulsweitenmodulation (PWM) respektive Pulslängenmodulation ist eine Modulationsart, bei der eine technische Größe (z.B. elektrischer Strom) zwischen zwei Werten wechselt. Dabei wird bei konstanter Frequenz das Tastverhältnis des Signales moduliert, also die Breite eines Impulses. Der englische Begriff für das Verfahren lautet pulse-width modulation (PWM), was wohl einen prägenden Einfluss auf den deutschen Namen hatte.

Ein PWM-Signal wird allgemein über einen Tiefpass demoduliert. Die resultierende demodulierte technische Größe entspricht dem arithmetischen Mittelwert und damit der mittleren Höhe der Fläche unter der modulierten Größe, mathematisch bestimmt aus dem Integral über eine ganze Zahl von Perioden, geteilt durch die Dauer der Integration[5].

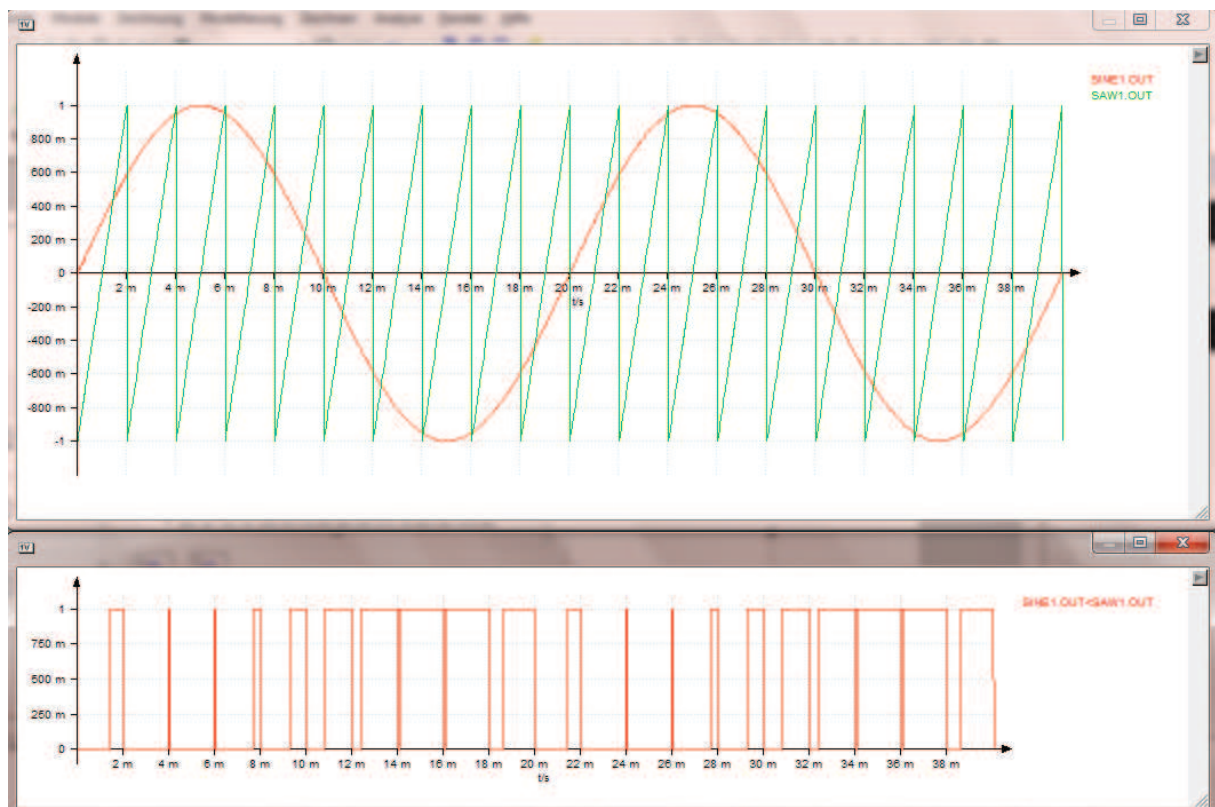


Abbildung 40 : PWM Signalerzeugung in PORTUNUS

Die Erzeugung des benötigten PWM Signals lässt sich in PORTUNUS sehr einfach realisieren. In die Bibliothek „Portunus → Time Function“ finden sich die benötigten Sinus- und Sägezahngeneratoren.

Definiert man für die Ansteuerung der Brückenzeige die Ausgangssignale der beiden Generatoren wie folgt

$$T1=T2=SINE1.OUT < SAW1.OUT$$

bzw. für den gegenphasigen Brückenweig

$$T3=T4=SINE1.OUT > SAW1.OUT$$

so erhält man eine Spannung aus Pulsen mit sinusförmig variierender Breite (Abbildung 40).

### 7.1.3 Der Ausgangs-Filter

Da der Wechselrichter als Ausgangsspannung eine sinusförmige Wechselspannung anstrebt, das Ergebnis aber, wie in Abbildung 41 dargestellt, dem nur bedingt nahe kommt, ist das Einsetzen eines Tiefpasses unerlässlich.

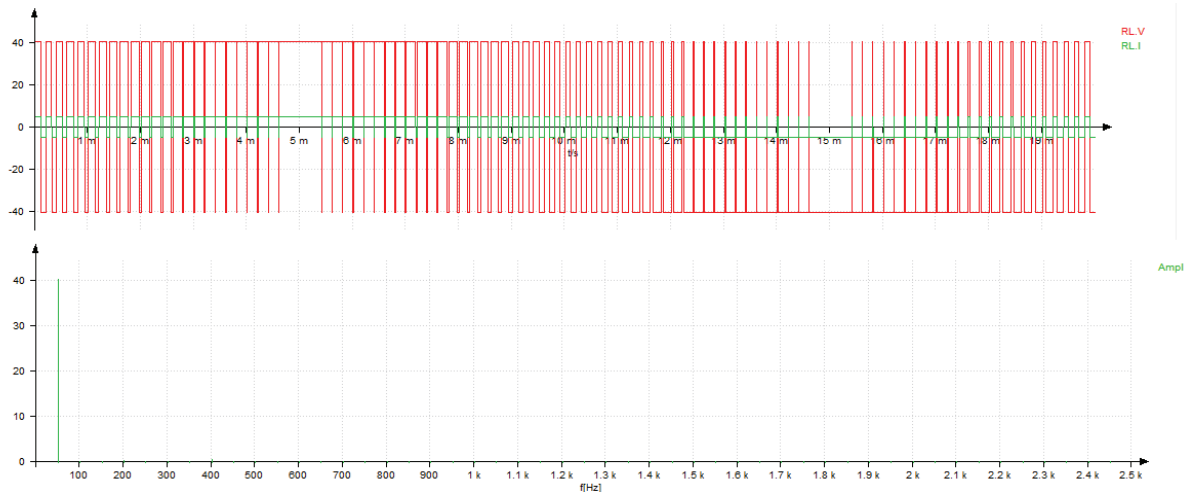


Abbildung 41 : Darstellung der Ausgangsspannung des Wechselrichters mit entsprechendem Spektrum ( $f_{\text{sägezahn}}=5\text{Khz}$ )

Die beste Wahl für diesen Filter stellte eine Kombination aus Spule  $L$  und Kondensator  $C$  dar. Detaillierte Berechnungsgrundlagen für das Filterdesign sind in der entsprechenden Fachliteratur zu finden und nicht Teil dieser Arbeit.

Es sei aber bemerkt, dass im Rahmen der durchgeführten Simulationen, die Größe der Induktivität und die dadurch entstehenden Verluste an der Spule eine entscheidende Rolle für das Simulationsergebnis spielen.

Desweiteren ist die Wahl des Ausgangsfilters stark abhängig von der jeweiligen Last bzw. der Größe des durch die Last fließenden Stroms.

Für die Simulation bedeutet das, dass die Kenngrößen des Ausgangstiefpasses (Induktivität  $L$  und Kapazität  $C$ ) an die jeweilige Simulationsumgebung angepasst werden muss.

Gleiches gilt selbstverständlich auch für die Wahl der Frequenz der sägezahnförmigen Vergleichsspannung, die immer ein Vielfaches der angestrebten Ausgangsfrequenz betragen sollte.

## 7.2 Der Wechselrichter in PORTUNUS

In der Bibliothek „Power Electronic  $\rightarrow$  AC/DC“ befindet sich der sogenannte Single Phase Inverter. Dieser stellt einen vollwertigen Wechselrichter dar (Abbildung 42).

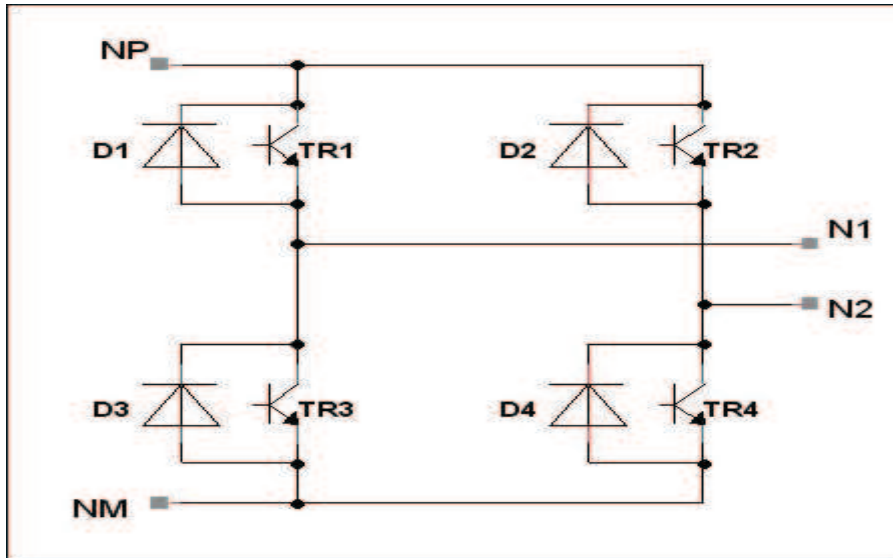


Abbildung 42 : Wechselrichter der PORTUNUS-Bibliothek

Die in Abbildung 43 dargestellte Konfiguration des Wechselrichters, wird wie in Kapitel 7.1.2 beschrieben realisiert.

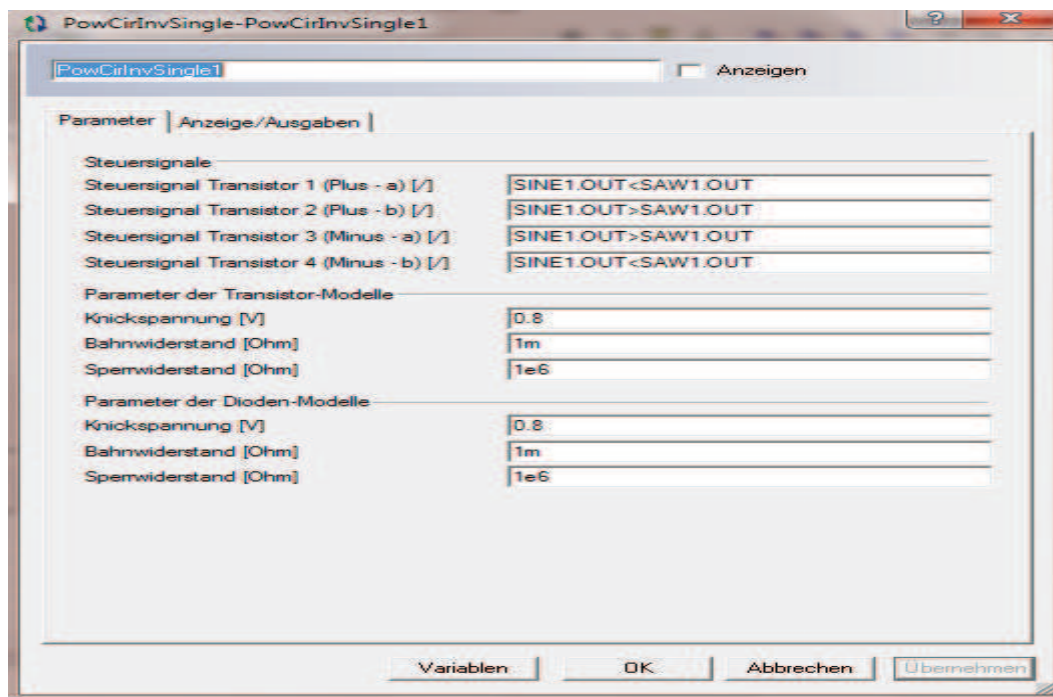


Abbildung 43 : Konfiguration des Single Phase Inverter

Wie schon bei dem Hochsetzsteller, wird auch der Wechselrichter mit Hilfe des Kapitels 4.3.1 in ein Modell transferiert (Abbildung 44).

So kann später, durch einfaches „*drag and drop*“, der Wechselrichter in eine Simulation implementiert werden.

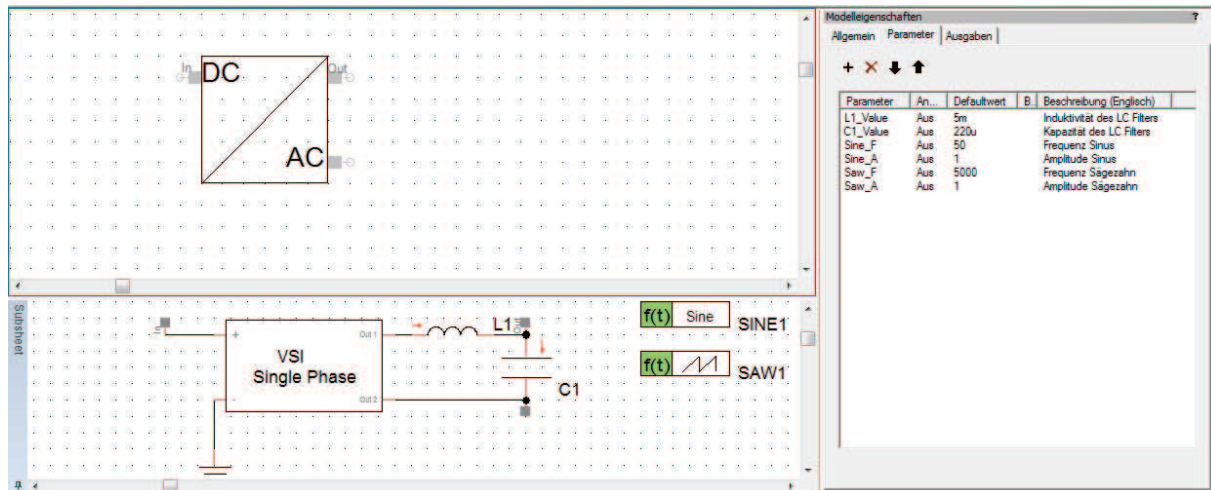


Abbildung 44 : Modell des in der Simulation verwendeten Wechselrichters

Entscheidend für dieses Modell sind u.a. die beiden Generatoren SINE1, also der Sinus als Sollfrequenz der Ausgangsspannung, und SAW1, ein Sägezahn der als Vergleichsfrequenz dient. Die relevanten Parameter, wie z.B. Induktivität und Kapazität des Ausgangsfilters oder die Frequenz der ausgangsseitigen Wechselspannung, können über die „*Variablendefinition*“ angepasst werden. Alternativ kann mit „*rechts Klick →Eigenschaften*“ auf das Modell, direkt auf die Parameter zugegriffen werden. Zur Optimierung der jeweiligen Parameter kann die in Kapitel 4.3.4 erläuterte „*Parametervariation*“ verwendet werden.

### 7.3 Simulation des Wechselrichters

Abbildung 45 zeigt den Simulationsaufbau eines SUNPOWER 220 Moduls in Verbindung mit einem Wechselrichter an ohmscher Last.

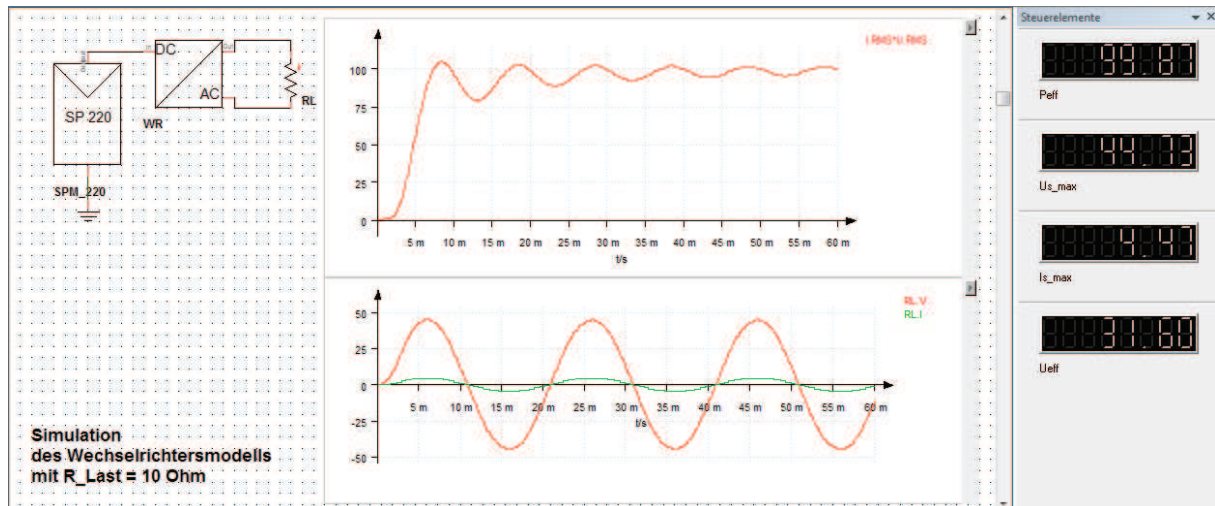


Abbildung 45 : Simulation eines Wechselrichters in Verbindung mit einem SUNPOWER 220 Modul

Über die „Steuerelemente“, rechts im Bild, werden der Effektivwert der Leistung  $P_{eff}$ , der Scheitelwert der Ausgangsspannung  $\hat{u}_L$ , der Scheitelwert des Ausgangsstroms  $\hat{i}_L$  und der Effektivwert der Ausgangsspannung  $U_{eff}$  dargestellt.

Dies geschieht über den in Kapitel 4.4.1 erwähnten „Signal Analyzer“.

Die Frequenz der Ausgangsspannung folgt der Sinusgeneratorfrequenz des Wechselrichters (50 Hz).

Als Sägezahnvergleichsfrequenz wurde 5kHz gewählt.

Da die Größe der vom Solarmodul abgegebenen Leistung in dieser Simulation lediglich durch den Lastwiderstand  $R_L = 10\Omega$  beeinflusst wird, sind weitere Simulationen wenig sinnvoll.

#### 7.3.1 Regelung der Ausgangsleistung

Wie schon bei dem Hochsetzsteller aus Kapitel 6.1 besteht auch bei einem Wechselrichter die Möglichkeit, Einfluss auf die Größe der Ausgangsleistung bzw. des Ausgangsstroms zu nehmen. Das geschieht über eine Veränderung des Tastverhältnisse des PWM-Signals (Abbildung 40, unten). Abbildung 46 stellt eine Simulation der Regelung der Ausgangsleistung bei konstanter Zwischenkreisspannung dar.

Auf eine Berücksichtigung des MPP wird allerdings verzichtet.

Durch Veränderung der Amplitude der im Wechselrichter eingprägten Sollfrequenz, verändert sich das Tastverhältnis des PWM Signal, mit welchem die Brückenweige angesteuert werden. Eine konstante Amplitude der Sägezahnvergleichsfrequenz wird selbstverständlich vorausgesetzt. Diese Änderung der Ansteuerung spiegelt sich dann direkt im Ausgangssignal wieder.

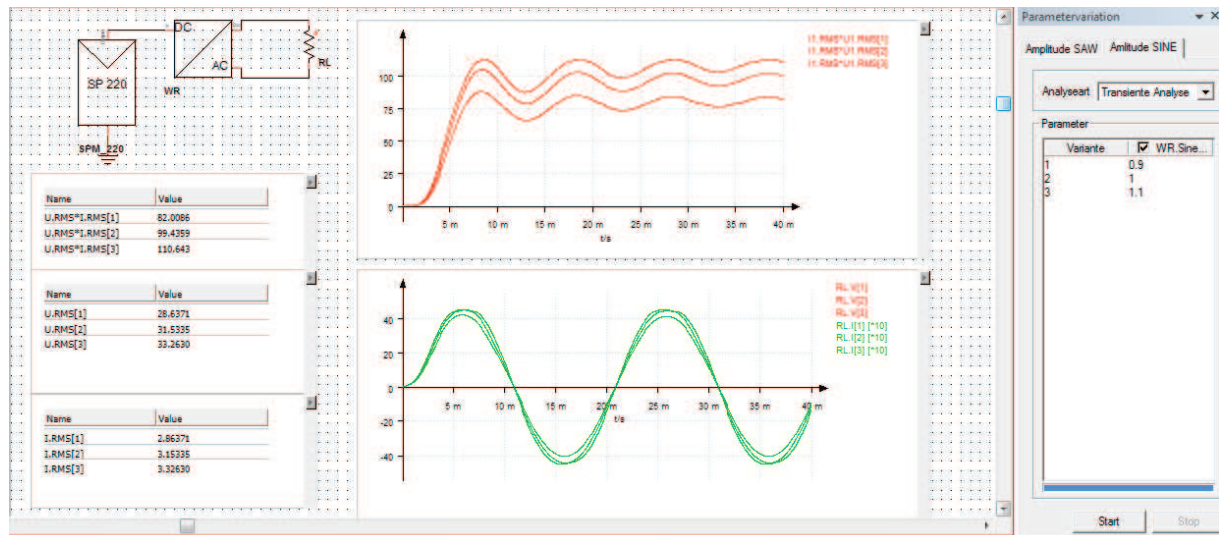


Abbildung 46 : Simulationsdesktop der Regelung eines Wechselrichters über Amplitudenveränderung der Sollfrequenz

Sinusamplitude	$I_{eff}$ in A	$U_{eff}$ in V	$P_{eff}$ in W
0,9	2,867	28,637	82,008
1,0	3,153	31,534	99,436
1,1	3,326	33,263	110,642

Tabelle 18 : Simulationsergebnisse der Regelung eines Wechselrichters

Die in Tabelle 18 dargestellten Simulationsergebnisse zeigen den Zusammenhang zwischen der Amplitudenänderung der Sollfrequenz und der Ausgangsleistung.

Um also die maximal mögliche Leistung am Ausgang eines Wechselrichters zu erzielen, muss mit Hilfe des Hochsetzsteller die PV-Generatorspannung stets bei  $U_{MPP}$  gehalten, und durch Veränderung des Tastverhältnisses im Wechselrichter selbst, der Strom in die entsprechende Last eingpräg werden.

Für den Fall, dass die gewonnene Leistung ins Netz gespeist wird, ist es sinnvoll die in Kapitel 5, Seite 44 erwähnten Strings (Reihenschaltung einzelner Module) so zu wählen, dass der Schwankungsbereich der MPP Spannung, dem Eingangsspannungsbereich des Wechselrichters entspricht.

## 8. Verluste und Wirkungsgrad

In nahezu jedem, in diesen Simulationen verwendeten Halbleitern, treten u.a. durch Bahn- und Sperrwiderstände Verluste auf, die zur Verminderung des Wirkungsgrads führen.

Die Größe dieser Widerstände ist vom Benutzer frei wählbar.

Ebenso besteht die Möglichkeit, Einfluss auf die Höhe der Durchlassspannung zu nehmen, was sich ebenfalls im Wirkungsgrad niederschlägt.

Bei der Verwendung von Halbleitermodellen in PORTUNUS sind all diese Parameter auf einen Defaultwert gesetzt.

So ist die Höhe der Durchlassspannung, die in dieser Entwicklungsumgebung als Knickspannung bezeichnet wird, stets  $0.8V$ .

Sperrwiderstände sind immer mit  $1 M\Omega$  definiert, Bahnwiderstände mit  $1 m\Omega$ .

Da es nicht Teil dieser Arbeit ist, Wirkungsgrade besonders hoch bzw. Verluste in den Halbleitern möglichst gering zu halten, werden in allen Simulationsbeispielen die Defaultwerte verwendet und auf eine Betrachtung der Wirkungsgrade verzichtet.



## 9. Fazit

Die Aufgabe, eine Photovoltaikanlage mit all ihren Komponenten so realistisch wie möglich zu simulieren, konnte gut gelöst werden.

Die Simulationsergebnisse entsprachen stets den Erwartungswerten aus den theoretischen, mathematischen Modellbetrachtungen.

Mit Hilfe der umfangreichen PORTUNUS Bibliotheken, die sowohl zum generieren von Systemen, als auch zu deren Analyse nahezu jeden Bereich abdecken, war es stets möglich, alle für die Aufgabe benötigten Schaltungskomponenten zu realisieren.

Dank des umfangreichen Handbuches, in der jedes Modell in seinen Details beschrieben wird, waren auch schon mit recht geringen Einarbeitungszeiten komplexere Simulationen möglich.

Da das Programm eine interaktive Parameteränderung während einer laufenden Simulation gestattet, sind die dadurch entstehenden Auswirkungen auf das Verhalten der Schaltung sofort in den grafischen Darstellungen, sowie in numerischen Anzeigen zu beobachten.

Leider liegt in diesen grafischen Darstellungen auch der einzig wirkliche Schwachpunkt dieses Simulationstools.

Weder die Abszissen-, noch die Ordinatenachse des in der Darstellung verwendeten kartesischen Koordinatensystems, können umbenannt oder durch eine zweite ersetzt werden.

Dadurch kann bei den sogenannten Multisimulationen die Übersichtlichkeit schnell verloren gehen. (Lt. Hersteller Adapted Solutions wird diese Art der „einachsigen Darstellung“ ab Programmversion 4.2 der Vergangenheit angehören)

Durch die Vielzahl der numerischen Anzeigenelemente besteht aber stets die Möglichkeit, sich alle relevanten Informationen in tabellarischer Form darstellen zu lassen.

Zusätzlich können diese Daten dann anderen Programmen wie Matlab oder Excel zugänglich gemacht werden.

Die Firma Adapted Solutions bietet mit der Simulationssoftware PORTUNUS V4.1 eine Entwicklungsumgebung an, die sowohl den Ansprüchen erfahrener Ingenieure, als auch Studenten gerecht wird.

## Literaturverzeichnis

[1] Vorbereitungsskript E6 RE Prof. Dr. – Ing. Michael Röther

[2] PORTUNUS Hilfe

[3] *Link vom 05.03.2011* : [http://www.ub.uni-konstanz.de/kops/volltexte/2003/1121/pdf/Thermographiemessungen\\_an\\_Solarzellen.pdf](http://www.ub.uni-konstanz.de/kops/volltexte/2003/1121/pdf/Thermographiemessungen_an_Solarzellen.pdf)

[4] *Link vom 07.03.2011* : <http://www.dgs.de/fileadmin/sonnenenergie/SE-1988-1/04-MPP-Tracking.pdf>

[5] *Link vom 24.03.2001* : <http://de.wikipedia.org/wiki/Pulsweitenmodulation>

[6] Elektronische Bauelemente 2. Auflage, Michael Reisch, ISBN 3-540-34014-9

## Anhang

Die folgenden Anhänge befinden sich am Ende dieser Bachelorthesis bzw. in digitaler Form auf der beigelegten CD:

[1] Datenblatt SUNPOWER E18 / 220 Solarmodul

[2] Simulationsdateien<sup>1</sup>:

SP\_220\_V1 : Simulation eines Solarmoduls(Einzelzellen) mit Abschattung und Temperaturänderung

SP\_220\_OP\_V1 : Simulation eines optimierten Solarmoduls(gesamt Modell) im STC/NOCT Betrieb

SP\_220\_Bypass\_V1 : Simulation eines Solarmoduls(Einzelzellen) bei Abschattung mit bzw. ohne Bypass-Dioden

SP\_220\_Para\_Abs : Simulation einer Parallelschaltung von fünf Solarmodulen bei Abschattung

SP\_220\_Reihe\_Abs : Simulation einer Reihenschaltung von fünf Solarmodulen bei Abschattung

SP\_4MW\_RP : Simulation einer Großsolaranlage mit Reihen- und Parallelschaltung aus 18 Solarmodulen mit einer gesamt Leistung von 4MW

SP\_220\_MPP\_V1 : Simulation eines Solarmoduls mit Hochsetzsteller und Mpp-Tracking

SP\_660KW\_MPP : Simulation einer Kleinsolaranlage(660kW Leistung) mit Mpp Tracking bei Veränderung der Bestrahlungsstärke

SP\_220\_WR\_V1 : Simulation eines Solarmoduls mit Wechselrichter

SP\_220\_WR\_V2 : Simulation eines Solarmoduls mit Wechselrichter in Verbindung mit der Parametervariation

<sup>1</sup>Alle Simulationsdateien sind **ausschließlich** mit der Vollversion der PORTUNUS Software 4.1 oder höher lauffähig.

## Versicherung über die Selbstständigkeit

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit in Sinne der Prüfungsordnung nach §16(5) ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Seiten habe ich unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

---

Ort, Datum

---

Unterschrift

### VORTEILE

#### Höchster Wirkungsgrad

SunPower® Solarmodule sind die effizientesten Photovoltaikmodule welche derzeit auf dem Markt erhältlich sind.

#### Attraktives Design

Einzigartiges Design bietet die Kombination eines hohen Wirkungsgrads mit einem schlichten, schwarzen Erscheinungsbild welches sich optisch, elegant an das Dach angleicht.

#### Geringere Installationskosten

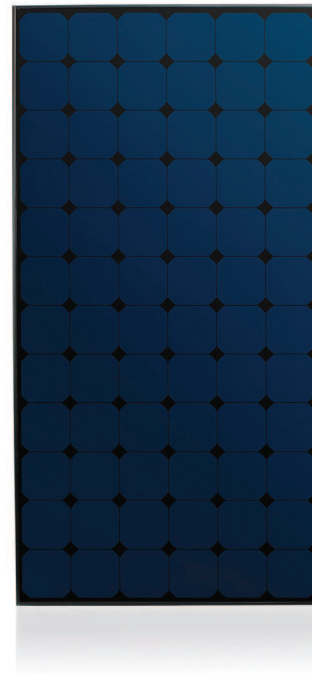
Mehr Leistung pro Modul heißt auch weniger Module pro Anlage. Sie sparen Zeit und Geld.

#### Zuverlässige und stabile Konstruktion

Dank bewährter Materialien, gehärtetem Frontglas und einem robusten eloxierten Rahmen kann das Modul in verschiedensten Montagekonfigurationen zuverlässig betrieben werden.

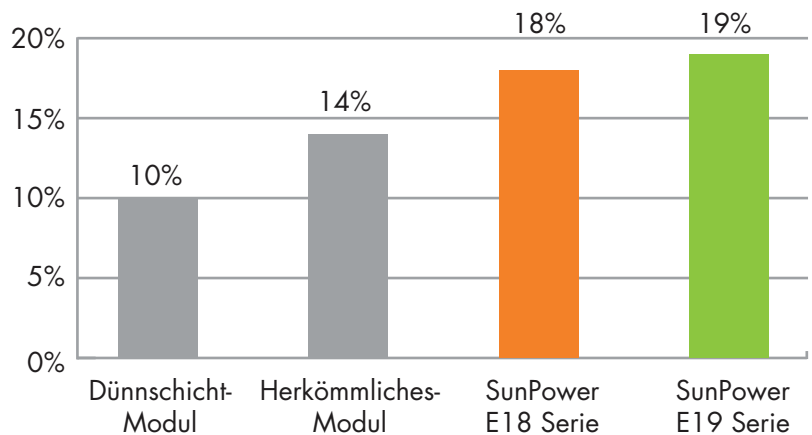


SPR-220-BLK-I



**Das SunPower® Solarmodul 220 zeigt eine revolutionäre Kombination aus hohem Wirkungsgrad und attraktivem, schlichten Design.** Dank seiner 72 Solarzellen mit innovativer Rückseitenkontakt-Technologie und einer schwarzen Rückseitenfolie bietet das SunPower 220 Modul auf elegante Weise einen Modulwirkungsgrad von 17,7%. Das Modul verfügt über einen niedrigen Spannungs-Temperaturkoeffizienten und ein außergewöhnliches Teillastverhalten bei schwacher Lichteinstrahlung und bietet so eine hervorragende Energieausbeute pro Watt enleistung.

Der Vorteil des hohen Wirkungsgrads von SunPower



## Elektrische Eigenschaften

Bei Standardtestbedingungen [STC]: Einstrahlungsleistung 1000W/m<sup>2</sup>, AM 1,5, Zelltemperatur von 25° C.

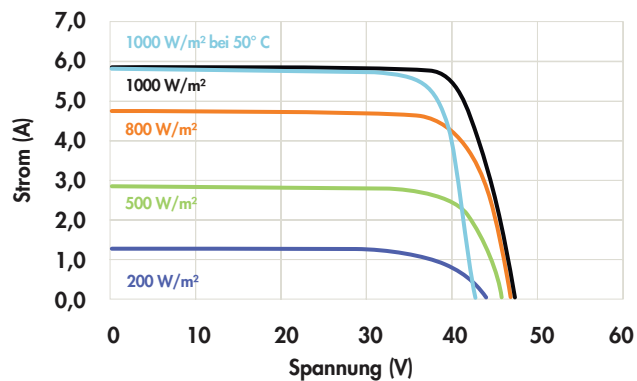
Nennleistung (+5/-3%)	P <sub>nom</sub>	220 W
Wirkungsgrad	η	17,7 %
Spannung im MPP	U <sub>mpp</sub>	41,0 V
Strom im MPP	I <sub>mpp</sub>	5,37 A
Leerlaufspannung	U <sub>oc</sub>	48,6 V
Kurzschlussstrom	I <sub>sc</sub>	5,75 A
Max. Systemspannung	IEC	1000 V
Temperaturkoeffizienten	Leistung (P)	-0,38% / K
	Spannung (U <sub>oc</sub> )	-132,5mV / K
	Strom (I <sub>sc</sub> )	3,5mA / K
NOCT		46° C +/-2° C
Max. Sicherung bei Reihenschaltung		20 A
Max. Rückstrom (bei 3-Modulsträngen)	I <sub>r</sub>	14,4 A

## Elektrische Eigenschaften

Bei typischer Betriebstemperatur (NOCT): Einstrahlungsleistung 800W/m<sup>2</sup>, 20° C, Wind 1 m/s

Nennleistung	P <sub>nom</sub>	163 W
Spannung im MPP	U <sub>mpp</sub>	37,8 V
Strom im MPP	I <sub>mpp</sub>	4,32 A
Leerlaufspannung	U <sub>oc</sub>	45,5 V
Kurzschlussstrom	I <sub>sc</sub>	4,66 A

## I/U-Kennlinie



Spannungs-/Stromkennzahlen in Abhängigkeit von Strahlungsstärke und Temperatur des Moduls.

## Geprüfte Betriebsbedingungen

Temperatur	-40° C bis +85° C
Max. Belastbarkeit	550kg/m <sup>2</sup> (5400 Pa) auf der Vorderseite (z.B. Schnee) 245kg/m <sup>2</sup> (2400 Pa) auf Vorder- und Rückseite (z.B. Wind)
Schlagfestigkeit	Hagel – 25 mm bei 23 m/s

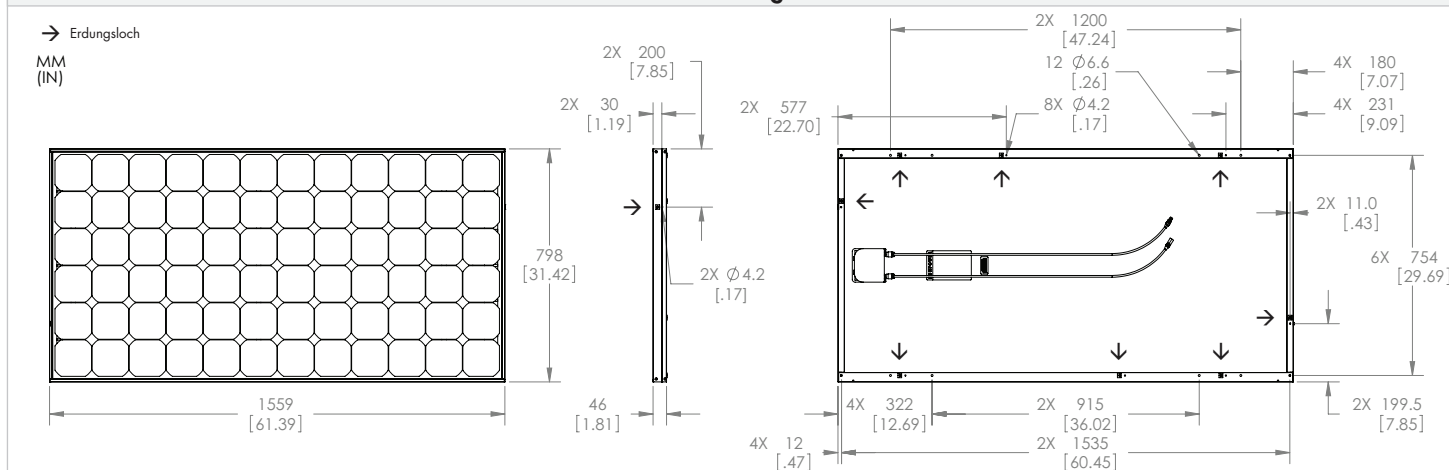
## Garantien und Zertifizierungen

Garantien	25 Jahre Leistungsgarantie 10 Jahre Produktgarantie
Zertifizierungen	IEC 61215 Ed. 2, IEC 61730 (SCII)

## Mechanische Daten

Solarzellen	72 monokristalline SunPower-Rückseitenkontakt-Solarzellen	Anschlusskabel	1000 mm langes Kabel/MultiContact-Stecker (MC4)
Frontglas	Hochtransparentes gehärtetes Glas	Rahmen	Eloxierte Aluminiumlegierung (schwarz) Typ 6063
Anschlussdose	Schutzklasse IP-65 mit 3 Bypass-Dioden 32 x 155 x 128 (mm)	Gewicht	15,0 kg

## Abmessungen



**ACHTUNG: VOR BETRIEB DES PRODUKTS BITTE DIE SICHERHEITS- UND INSTALLATIONSHINWEISE BEACHTEN.**  
Weitere Informationen finden Sie unter: [www.sunpower.de](http://www.sunpower.de)