



Nadine Strobl, BSc

# Modellierung und Steuerung von Photovoltaik- und Energiespeichersystemen für Hardware-in-the-Loop Test

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades  
Diplom-Ingenieurin  
Masterstudium Elektrotechnik - Energietechnik

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer:

Univ.-Prof. DDipl.-Ing. Dr.techn. Robert Schürhuber  
Ing. Dipl.-Ing. Manuel Galler, BSc

Institut für Elektrische Anlagen und Netze  
Inffeldgasse 18/1  
8010 Graz

Graz, Juni 2021





# **Modellierung und Steuerung von Photovoltaik- und Energiespeichersystemen für Hardware-in-the-Loop Test**

Eine Masterarbeit von  
**Nadine Strobl, BSc**

Betreuer  
Univ.-Prof. DDipl.-Ing. Dr.techn. Robert Schürhuber  
Ing. Dipl.-Ing. Manuel Galler, BSc

Juni 2021

Technische Universität Graz  
Institut für Elektrische Anlagen und Netze  
Inffeldgasse 18/I  
8010 Graz  
Austria

**Institutsleiter**

Univ.-Prof. DDipl.-Ing. Dr.techn. Robert Schürhuber

**Betreuer**

Univ.-Prof. DDipl.-Ing. Dr.techn. Robert Schürhuber  
Ing. Dipl.-Ing. Manuel Galler, BSc

Eine Masterarbeit von  
Nadine Strobl, BSc

Juni 2021



## Kurzfassung

Erneuerbare Energien nehmen einen immer größer werdenden Anteil der Energieträger ein, insbesondere die Anzahl an Photovoltaikanlagen und Energiespeichern nimmt stetig zu. Dies führt, vor allem durch die Volatilität der Einspeisung, zu neuen Herausforderungen an das gesamte Stromversorgungssystem. Im Rahmen dieser Masterarbeit wird sowohl für Photovoltaiksysteme als auch für Energiespeichersysteme jeweils ein Modell vorgestellt. Damit kann das Verhalten von realen PV-Modulen und Lithium-Ionen Batterien anhand ihrer Datenblatt-Parameter modelliert und simuliert werden. Beide Modelle sind komfortabel parametrierbar, erfordern keine exzessive Rechenleistung und sind echtzeitfähig, womit Hardware-in-the-Loop (HIL) Tests ermöglicht werden. Anhand dieser Modelle können in der HIL-Testumgebung Simulationen und Überprüfungen der Stabilität solcher Systeme selbst, und in weiterer Folge auch in Verbindung mit übergeordneten Netzstrukturen, durchgeführt werden. Aufgrund dieser behandelten Betrachtungen bietet diese Masterarbeit einen wesentlichen Beitrag zur zukünftigen Versorgungssicherheit von elektrischen Energienetzen.

Schlüsselwörter: Photovoltaik, Energiespeicher, Modellierung, Hardware-in-the-Loop

## Abstract

Renewable energies make up an ever-increasing share of energy sources, in particular the number of photovoltaic systems and energy storage systems is steadily increasing. This leads to new challenges for the entire power supply system, primarily due to the volatility of the feed-in. As part of this master's thesis, a model for both photovoltaic systems and energy storage systems is presented. This means that the behavior of real PV-modules and lithium-ion batteries can be modeled and simulated according to their data sheet parameters. Both models are easy to parameterize, do not require excessive computing power and are suitable for real-time simulation, which enables hardware-in-the-loop (HIL) tests. Using these models, simulations and verifications of the stability of such systems themselves, and subsequently also in connection with higher-level network structures, can be carried out in the HIL test environment. Based on this considerations, this master's thesis offers a significant contribution to the future security of supply of electrical energy networks.

Keywords: photovoltaic systems, energy storages, modeling, hardware-in-the-loop



## **Affidavit**

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

---

Ort

---

Datum

---

Unterschrift



## Danksagung

In erster Linie gilt mein Dank Herrn Univ.-Prof. DDipl.-Ing. Dr.techn. Robert Schürhuber und Herrn Ing. Dipl.-Ing. Manuel Galler, BSc für die Unterstützung und Betreuung dieser Arbeit, sowie das Vertrauen in meine Auswahl bei den Modellen und Messsetups. Ein besonderer Dank geht an Manuel Galler, da er stets Zeit für meine Anliegen und kurzfristige Besprechungen hatte.

Ein weiterer Dank gilt den Mädels und Burschen der Uni-Lerngruppe, ohne deren Hilfe das Bestehen so mancher Prüfung doppelt so schwierig und das Studentenleben nur halb so lustig gewesen wäre.

Ohne den Rückhalt meiner Familie und Freunde hätte ich dieses Studium nicht abschließen können. Besonders meinen Eltern möchte ich dafür danken, dass sie mir all das erst ermöglicht haben, und mich in all meinen Vorhaben immer unterstützen.

Ein großes Dankeschön geht an meinen Freund Paul, für die zahlreichen Diskussionen, Aufmunterungen und das Korrekturlesen dieser Arbeit.



# Abkürzungsverzeichnis

<b>Al</b>	Aluminium
<b>Cu</b>	Kupfer
<b>DOD</b>	Entladetiefe (Depth of Discharge)
<b>HIL</b>	Hardware-in-the-Loop
<b>IIR</b>	Unendliche Impulsantwort (Infinite Impulse Response)
<b>KS</b>	Kurzschluss
<b>L1</b>	Klemme der Phase 1
<b>L2</b>	Klemme der Phase 2
<b>L3</b>	Klemme der Phase 3
<b>Li</b>	Lithium
<b>LiCoO<sub>2</sub></b>	Lithium-Kobaltdioxid
<b>LL</b>	Leerlauf
<b>LVS</b>	Leistungsverstärker
<b>MPP</b>	Punkt maximaler Leistung (Maximum power point)
<b>N</b>	Klemme des Neutralleiters
<b>OCV</b>	Leerlaufspannung (Open Circuit Voltage)
<b>PHIL</b>	Power-Hardware-in-the-Loop
<b>PV</b>	Photovoltaik
<b>SOC</b>	Ladezustand (State of Charge)
<b>STC</b>	Standard Test Bedingungen (Conditions)
<b>TP</b>	Tiefpass





# Symbolverzeichnis

## Modellierung von Photovoltaiksystemen

$\alpha$	Kurvenanpassungsfaktor in V
$\alpha_{ref}$	Referenz-Kurvenanpassungsfaktor in V
$A$	Dioden-Idealitätsfaktor
$AM$	Relative air mass number
$c_0$	Bestrahlungskonstante in $W/m^2$
$E_G$	Bandlücken-Energie in eV
$FF$	Füllfaktor
$G$	Bestrahlungsstärke in $W/m^2$
$I$	Strom in A
$I_0$	Diodensättigungsstrom in A
$I_1$	Strom in Phase 1 in A
$I_2$	Strom in Phase 2 in A
$I_3$	Strom in Phase 3 in A
$I_D$	Diodenstrom in A
$I_{D1}$	Diffusionsstrom in A
$I_{D2}$	Rekombinationsstrom in A
$I_{MPP}$	Strom für maximale Ausgangsleistung in A
$I_P$	Strom durch den Parallelwiderstand in A
$I_{ph}$	Photostrom in A
$I_{S1}$	Sättigungsstrom Diode 1 in A
$I_{S2}$	Sättigungsstrom Diode 2 in A

$I_{SC}$	Kurzschlussstrom in A
$I_{SC,STC}$	Kurzschlussstrom bei Standard-Test-Bedingungen in A
$k$	Boltzmann-Konstante in Ws/K
$K_i$	Temperaturkoeffizient von $I_{SC}$ in A/K
$K_u$	Temperaturkoeffizient von $U_{OC}$ in V/K
$N_{cell}$	Anzahl PV-Zellen
$N_{par}$	Anzahl paralleler PV-Module-Stränge
$N_{ser}$	Anzahl PV-Module in Serie
$q$	Elementarladung in As
$R$	Widerstand in $\Omega$
$R_P$	Parallelwiderstand in $\Omega$
$R_{P,STC}$	Parallelwiderstand bei STC in $\Omega$
$R_{PV}$	Photovoltaikwiderstand in $\Omega$
$R_S$	Serienwiderstand in $\Omega$
$T$	Temperatur in K bzw. $^{\circ}\text{C}$
$T_K$	Temperatur in K
$T_{STC}$	Temperatur bei Standard-Test-Bedingungen in K bzw. $^{\circ}\text{C}$
$T_{STC,K}$	Temperatur bei Standard-Test-Bedingungen in K
$U$	Spannung in V
$U_1$	Spannung Phase 1 in V
$U_2$	Spannung Phase 2 in V
$U_3$	Spannung Phase 3 in V
$U_{MPP}$	Spannung für maximale Ausgangsleistung in V
$U_{OC}$	Leerlaufspannung in V
$U_{OC,STC}$	Leerlaufspannung bei Standard-Test-Bedingungen in V
$U_T$	Temperaturspannung in V

## Modellierung von Energiespeichersystemen

$\alpha$	Arrhenius Konstante des Polarisationswiderstandes
$\beta$	Arrhenius Konstante des Innenwiderstandes
$A$	exponentielle Amplitude in V
$B$	inverse exponentielle Zeitkonstante in 1/(Ah)
$C$	nominelle Entladekurven-Steilheit in V/(Ah)
$C_1$	Kapazität in F
$\frac{dE}{dT}$	reversibler Spannungs-Temperaturkoeffizient in V/K
$\frac{dQ}{dT}$	maximaler Ladungs-Temperaturkoeffizient in (Ah)/K
$E_0$	konstante Spannung in V
$i$	veränderlicher Strom in A
$i^*$	gefilterter Strom in A
$it$	integrierter Strom in As bzw. Ah
$I_1$	Strom in Phase 1 in A
$I_2$	Strom in Phase 2 in A
$I_3$	Strom in Phase 3 in A
$I_{Batt}$	Batteriestrom in A
$I_{nom}$	nomineller Entladestrom in A
$K$	Polarisationskonstante in V/(Ah) bzw. Polarisationswiderstand in $\Omega$
$N_S$	Anzahl serieller Batteriezellen
$P_{loss}$	Verlustleistung in W
$Q_{exp}$	exponentielle Kapazität/Ladung in Ah
$Q_{nom}$	Kapazität bei nominaler Spannung in Ah
$Q_{rated}$	bemessene Batteriekapazität in Ah
$R$	Widerstand in $\Omega$
$R_1$	Widerstand in $\Omega$
$R_{Int}$	Innenwiderstand in $\Omega$

$R_{Th}$	Thermischer Widerstand in °C/W
$SOC_{init}$	Anfangs-Ladezustand in %
$T$	Zelltemperatur in K
$T_{amb}$	Umgebungstemperatur in K
$T_{a,nom}$	Referenztemperatur in K
$T_{cell,init}$	Anfangs-Zelltemperatur in K
$T_r$	Batterie-Reaktionszeit in s
$T_S$	Samplezeit in s
$T_{Th}$	thermische Zeitkonstante in s
$U_1$	Spannung Phase 1 in V
$U_2$	Spannung Phase 2 in V
$U_3$	Spannung Phase 3 in V
$U_{Batt}$	Batteriespannung in V
$U_{exp}$	exponentielle Spannung in V
$U_{max}$	maximale Batteriespannung in V
$U_{nom}$	nominale Batteriespannung in V
$V_{Batt}$	Batteriespannung einer Zelle in V
$x_{0,init}$	Startwert von $it$ in As

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Kurzfassung</b>	<b>1</b>
1.1	Ziel . . . . .	1
1.2	Methode . . . . .	1
1.3	Ergebnisse . . . . .	1
1.4	Schlussfolgerungen und Ausblick . . . . .	1
<b>2</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>PHIL Setup</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Modellierung von Photovoltaiksystemen</b>	<b>7</b>
4.1	Modellvoraussetzungen . . . . .	7
4.2	Physikalischer Aufbau einer Photovoltaik-Zelle . . . . .	8
4.3	Modellauswahl . . . . .	9
4.3.1	Ideales Modell . . . . .	9
4.3.2	1-Dioden-Modell . . . . .	10
4.3.3	Vereinfachtes Modell . . . . .	11
4.3.4	2-Dioden-Modell . . . . .	12
4.3.5	Modellvergleich . . . . .	13
4.4	Charakteristika eines PV-Moduls . . . . .	13
4.4.1	Standard-Test-Conditions (STC) . . . . .	14
4.4.2	Einfluss der Einstrahlungsstärke auf das PV-Modul . . . . .	16
4.4.3	Einfluss der Temperatur auf das PV-Modul . . . . .	18
4.5	Simulink <sup>®</sup> -Modell des 1-Dioden-ESB . . . . .	19
4.5.1	Berechnung des Photostroms $I_{ph}$ . . . . .	21
4.5.2	Berechnung des Diodensättigungsstromes $I_0$ . . . . .	22
4.5.3	Berechnung des Diodenstromes $I_D$ . . . . .	23
4.6	Ermittlung der 1-Dioden-Modell-Parameter . . . . .	24
4.7	Probleme bei der Implementierung des 1-Dioden-Modells . . . . .	25
4.8	Simulink <sup>®</sup> -Modell des vereinfachten Ersatzschaltbildes . . . . .	28
4.8.1	Berechnung von $\alpha$ . . . . .	29
4.8.2	Berechnung von $\alpha_{ref}$ . . . . .	30
4.8.3	Berechnung von Photovoltaik-Widerstandes $R_{PV}$ . . . . .	30
4.8.4	Berechnung des Diodensättigungsstromes $I_0$ . . . . .	31

4.9	Ermittlung der vereinfachten Modell-Parameter . . . . .	32
4.10	Modellverifizierung . . . . .	33
4.10.1	Messungen mit Lastwiderständen . . . . .	34
4.10.2	Messungen mit PV-Wechselrichter . . . . .	40
4.11	Stromquellen-Modell . . . . .	42
4.12	Simulink®-Modell zu den Stromquellen-Messungen . . . . .	42
4.13	Verifizierung des Stromquellen-Modells . . . . .	44
4.13.1	Messungen mit Lastwiderständen . . . . .	45
4.13.2	Messungen mit Leistungsverstärker . . . . .	48
<b>5</b>	<b>Modellierung von Energiespeichersystemen</b>	<b>53</b>
5.1	Modellvoraussetzungen . . . . .	53
5.2	Physikalischer Aufbau einer Lithium-Ionen Zelle . . . . .	54
5.3	Modellauswahl . . . . .	55
5.3.1	Thevenin Modell . . . . .	55
5.3.2	modifiziertes Shepherd Modell . . . . .	56
5.4	Charakteristika einer Lithium-Ionen Batterie . . . . .	57
5.4.1	Entladevorgang . . . . .	57
5.4.2	Ladevorgang . . . . .	59
5.5	Simulink®-Modell . . . . .	61
5.5.1	Modellannahmen und Limitierungen . . . . .	61
5.5.2	Gesamtes Modell in Simulink® . . . . .	62
5.5.3	Berechnung des integrierten Stromes <i>it</i> . . . . .	63
5.5.4	Berechnung des aktuellen Ladezustandes SOC . . . . .	64
5.5.5	Thermisches Modell . . . . .	65
5.6	Ermittlung der Modell-Parameter . . . . .	69
5.7	Modellverifizierung . . . . .	72
5.7.1	Entladevorgang . . . . .	73
5.7.2	Ladevorgang . . . . .	78
<b>6</b>	<b>Conclusio</b>	<b>85</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>91</b>
	<b>Anhang</b>	<b>95</b>
B.1	Datenblatt Leistungswiderstände . . . . .	95
B.2	Datenblatt stufenlos regelbare Leistungswiderstände . . . . .	95
B.3	MATLAB®-Initialisierungsskript PV-Modell . . . . .	103
B.4	MATLAB®-Initialisierungsskript Batterie-Modell . . . . .	105

# 1 Kurzfassung

## 1.1 Ziel

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung und Implementierung von Modellen für die Echtzeitsimulation von Photovoltaiksystemen und Energiespeichersystemen. Diese sollen dazu beitragen, die Energiewende zu bewältigen, um auch zukünftig die Versorgungssicherheit gewährleisten zu können.

## 1.2 Methode

Zunächst werden die für die Simulation passenden Modelle identifiziert und in Simulink<sup>®</sup> implementiert sowie getestet. Die Konfiguration für den stabilen Betrieb am Echtzeitrechner ist ein maßgeblicher Teil der vorliegenden Untersuchungen. Anhand von Messungen im PHIL-Labor werden sowohl die Funktionsfähigkeit als auch die Genauigkeit der beiden Modelle überprüft und ermittelt.

## 1.3 Ergebnisse

Die Resultate der Messungen im Labor zeigen eine vollständige Funktionsfähigkeit und ausreichende Genauigkeit beider Modelle. Die Parametrierung ist dabei unkompliziert gestaltet und die erforderliche Rechenleistung ist gering. Die Möglichkeit der Verwendung in Untersuchungen zur Netzstabilität ist damit vollends gegeben.

## 1.4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Der Fokus lag in der grundlegenden Abbildung der realen Verhaltensweisen von PV-Anlagen und Energiespeichern, wodurch nicht alle physikalischen Prozesse bis ins Detail real-getreu modelliert werden. In den genannten Untersuchungen führte dies zu einer ausreichenden Genauigkeit. Mit detaillierteren Betrachtungen in dieser Hinsicht können die erstellten Modelle noch weiter verbessert und ihre Anwendungsmöglichkeiten erweitert werden.





## 2 Einleitung

Der Ausbau erneuerbarer Energieträger ist von essentieller Bedeutung für die Erreichung der geplanten Energie- und Klimaziele. Vor allem Photovoltaikanlagen nehmen durch ihr breitgefächertes Einsatzgebiet selbst auf kleinsten Dachflächen eine Vorreiterrolle ein. Die sich hierbei ergebenden Schwierigkeiten der Anpassung an die Lastkurven bzw. Netzanforderungen, aufgrund der volatilen Einspeisung von Photovoltaikanlagen, können durch die Integration von Energiespeichern besser bewältigt werden.

PV-Anlagen und Energiespeicher sind über leistungselektronische Komponenten, sogenannte Umrichter, mit dem Netz verbunden und stellen neue Herausforderungen an den stabilen Betrieb des Stromversorgungssystems. Dies liegt vor allem an der relativ komplexen Regelstruktur dieser Komponenten. Die korrekte Modellierung von Photovoltaik- und Energiespeichersystemen ist daher von großer Bedeutung für die Untersuchung der Stabilität solcher Systeme, und damit auch für die Stabilität des gesamten Netzes und die Aufrechterhaltung der Versorgungssicherheit.

Die Echtzeitsimulationen solcher Systeme auf Grundlage von Hardware-in-the-Loop Tests bietet die Möglichkeit die Auswirkungen von PV- und Energiespeichersystemen auf das gesamte Energiesystem zu eruieren. Dies führt dazu, dass der Wandel der Netze möglichst sicher, intelligent und kosteneffizient gestaltet werden kann.

Auf Basis dieser Erkenntnisse und der Relevanz solcher Echtzeitsimulationen werden sowohl für Photovoltaikanlagen, als auch für Energiespeicher, möglichst unkomplizierte, und dennoch realitätsnahe Modelle in Simulink<sup>®</sup> erstellt. Diese werden im Power-Hardware-in-the-Loop Labor des Instituts für Elektrische Anlagen und Netze der Technischen Universität Graz, anhand von Messungen auf ihre Funktionsfähigkeit und Genauigkeit geprüft. Die einzelnen Schritte dieses Prozesses sind in der folgenden Arbeit zusammengefasst und erläutert.



### 3 PHIL Setup

Um ein grundlegendes Verständnis darüber zu schaffen, wie die im Zuge dieser Arbeit erstellten Modelle geprüft und verwendet werden, wird in diesem Abschnitt das verwendete Setup im PHIL-Labor näher erläutert. In Abbildung 3.1 ist der verwendete Messaufbau im Power-Hardware-in-the-Loop Labor des Institutes für elektrische Anlagen und Netze schematisch dargestellt.

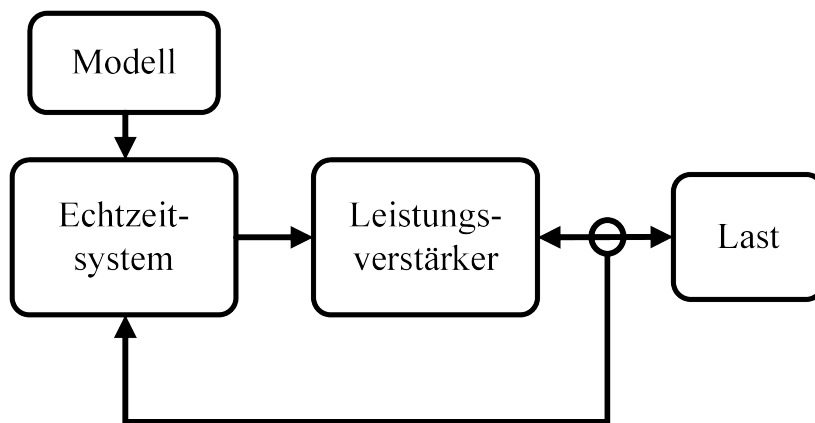


Abbildung 3.1: Schema des Messaufbaus im PHIL-Labor

Das Echtzeitsystem bzw. der Echtzeitrechner im abgebildeten Messaufbau wird durch das SCALEXIO-System von dSpace realisiert. Auf diesem wird das in Simulink® erstellte Modell eingebunden. Über den Leistungsverstärker werden die berechneten Ausgangswerte des eingebetteten Modells verstärkt und an die Last weitergegeben. Die Vorgabewerte entsprechen dabei je nach Betriebsmodus entweder den Phasenspannungen (Spannungsquellenmodus) oder den Phasenströmen (Stromquellenmodus). Wenn das Modell als Spannungsquelle realisiert wird, werden die gemessenen Ströme im Echtzeitrechner durch das Modell verarbeitet, und die darauffolgenden Ausgabewerte für den Leistungsverstärker ermittelt. Im Betrieb als Stromquelle werden die gemessenen Spannungswerte über den Echtzeitrechner an das Modell geliefert. Für sämtliche in dieser Arbeit durchgeführte Messungen beträgt die Taktfrequenz des Echtzeitsystems 10 kHz.



# 4 Modellierung von Photovoltaiksystemen

Im folgenden Kapitel wird die Vorgehensweise bei der Modellierung von Photovoltaiksystemen näher beschrieben. Der erste Abschnitt beschäftigt sich mit den Voraussetzungen, welche das zu erstellende Modell erfüllen muss. Danach wird der zugrundeliegende physikalische Aufbau von PV-Zellen erläutert. Der Prozess der Modellauswahl bzw. welches Ersatzschaltbild für die Modellbildung verwendet wird, steht im darauffolgenden Kapitel im Mittelpunkt der Untersuchungen. Im Anschluss daran werden die Charakteristiken eines PV-Moduls, der Aufbau des Modelles, sowie die Parameterfindung beschrieben. Als letzter Teil der PV-Modellierung wird die Funktionsfähigkeit und Genauigkeit des erstellten Modelles an einem Echtzeitrechner im PHIL-Labor anhand von Messungen ermittelt.

## 4.1 Modellvoraussetzungen

Die erste und zugleich wichtigste Voraussetzung für das PV-System liegt darin, dass das Modell echtzeitfähig sein muss, das heißt die Funktionsfähigkeit am dSpace Echtzeitrechner muss gegeben sein. Dadurch ergeben sich einige Begrenzungen für das Simulink<sup>®</sup>-Modell. Es ist erforderlich, dass die Modellberechnungen schrittweise erfolgen, sogenannte Algebraic loops dürfen nicht enthalten sein. Dies sind Schleifen im Modell, in denen der Ausgangswert eines Blocks zum gleichen Rechenschritt auch für den Eingang des Simulink<sup>®</sup>-Blocks erforderlich ist. Die Lösung einer solchen algebraischen Schleife ist in MATLAB<sup>®</sup>-Simulationen durch Näherungsverfahren möglich, am Echtzeitrechner jedoch nicht. In vielen Fällen können sie durch Verzögerungsblöcke (Unit delay) oder Filterblöcke gelöst werden. Dies ist in diesem Fall jedoch nicht möglich, was im Kapitel 4.7 erläutert wird. Eine weitere Voraussetzung für die Modellierung beschäftigt sich mit der Parameterfindung. Da im PHIL-Labor kein reales PV-Modul zur Verfügung steht, ist es unerlässlich, dass die Berechnung der Modellparameter ausschließlich auf den Datenblatt-Werten des PV-Moduls basiert und ohne jegliche Messungen erfolgen kann. Generell sollen das Modell und die Parametrierung möglichst unkompliziert sein und dennoch eine ausreichende Präzision beim Vergleich mit den PV-Array-Block-Daten der Simulink<sup>®</sup>-Library aufweisen.

## 4.2 Physikalischer Aufbau einer Photovoltaik-Zelle

Der Hauptbestandteil einer idealen PV-Zelle ist ein pn-Übergang [1]. In Abbildung 4.1 ist der Aufbau und das Funktionsprinzip einer typischen Silizium-Solarzelle dargestellt. Durch den Einfall von Licht wird die Energie der Photonen im Halbleiter absorbiert und freie Elektronen-Loch-Paare entstehen [1]. Das elektrische Feld in der Raumladungszone bewirkt, dass die Elektronen in die n-Schicht wandern und die Löcher in die p-Schicht der Zelle [5]. Diese Ladungstrennung wird als innerer Photoeffekt bezeichnet, und führt dazu, dass die PV-Zelle eine elektrische Stromquelle darstellt [6]. Auf die detaillierte Beschreibung der Vorgänge in der pn-Schicht, wie die Entstehung der Raumladungszone, oder die Unterschiede in den Absorptionstiefen, wird an dieser Stelle verzichtet. Nähere Informationen dazu liefern z.B. [5], [7], [8] und [9]. In Abbildung 4.1 ist auch die Antireflexbeschichtung an der Frontseite der Zelle zu sehen. Diese mindert die Reflexion des Lichtes an der Oberfläche und führt damit zu geringeren optischen Verlusten [10].

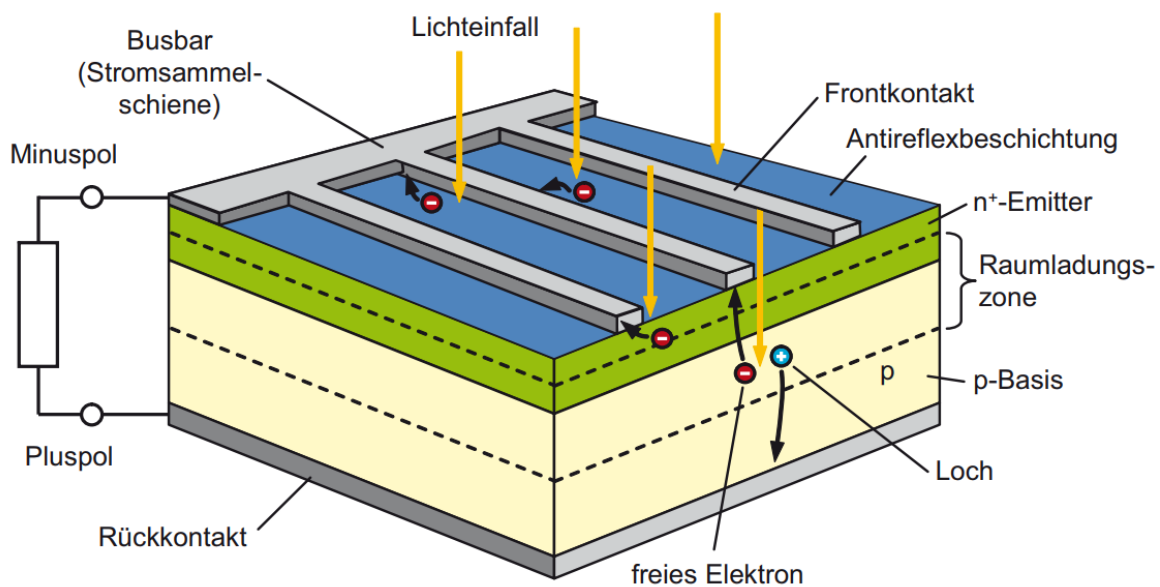


Abbildung 4.1: Aufbau einer typischen Silizium PV-Zelle [1]

## 4.3 Modellauswahl

Es gibt eine Vielzahl an elektrischen Modellen, die das Verhalten einer PV-Zelle beschreiben, welche sich in Komplexität und Genauigkeit unterscheiden. Im Folgenden werden einige dieser Ersatzschaltbilder vorgestellt, miteinander verglichen und der Prozess der Modellauswahl erläutert.

### 4.3.1 Ideales Modell

Die einfachste Möglichkeit das Verhalten einer Photovoltaik-Zelle nachzubilden, ist im Ersatzschaltbild in Abbildung 4.2 ersichtlich. Es besteht lediglich aus einer Stromquelle und einer dazu parallel-geschalteten Diode. Dieses Ersatzschaltbild basiert auf der Überlegung, dass eine unbeleuchtete Solarzelle aufgrund des pn-Überganges im Prinzip einer Diode entspricht, wohingegen eine beleuchtete PV-Zelle durch eine Stromquelle modelliert werden kann [9]. Der eingezeichnete Widerstand  $R$  beschreibt die Last oder den Verbraucher.

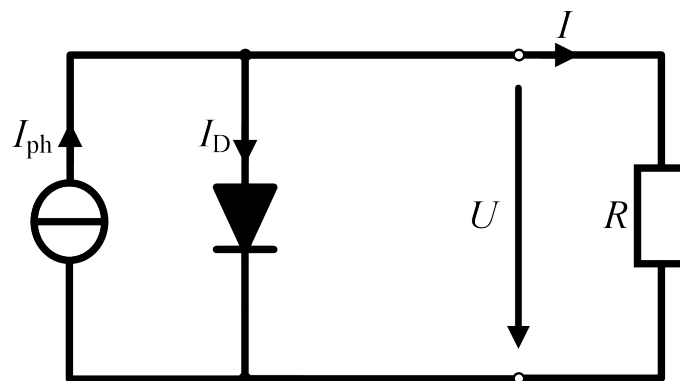


Abbildung 4.2: Ideales Ersatzschaltbild einer PV-Zelle mit einer Last  $R$

Dieses Modell kann mithilfe des Kirchhoff'schen Gesetzes durch folgende Gleichung 4.1 beschrieben werden. Der von der Stromquelle erzeugte Strom wird als Photostrom  $I_{ph}$  bezeichnet, der Strom durch die Diode als Diodenstrom  $I_D$ . Dieser kann durch die Diodegleichung von Shockley ersetzt werden, wobei hier noch der Dioden-Idealitätsfaktor  $A$  ergänzt wird. Dieser besitzt im Allgemeinen einen Wert von 1-2 und führt zu einer besseren Übereinstimmung mit realen PV-Zellen [1]. Der Parameter  $I_0$  der Shockley-Gleichung beschreibt den Sättigungsstrom und der Faktor  $U_T$  die Temperaturspannung einer Diode. Die Berechnung der Parameter  $I_{ph}$  und  $I_0$  wird im Kapitel 4.5 näher beschrieben.

$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{U}{A \cdot U_T}} - 1 \right) \quad (4.1)$$

Die Temperaturspannung  $U_T$  kann wie in Gleichung 4.2 ersichtlich, mithilfe der Boltzmannkonstante  $k = 1,3806 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Ws}}{\text{K}}$ , der Elementarladung  $q = 1,6021 \cdot 10^{-19} \text{ As}$ , und der Temperatur  $T$  in Kelvin, berechnet werden [7].

$$U_T = \frac{k \cdot T}{q} \quad (4.2)$$

### 4.3.2 1-Dioden-Modell

Eine Erweiterung des idealen Modells aus Kapitel 4.3.1, zur Berücksichtigung der elektrischen Verluste der PV-Zelle, stellt das sogenannte 1-Dioden-Ersatzschaltbild dar, welches in Abbildung 4.3 ersichtlich ist. Da dies eines der am häufigsten verwendeten Ersatzschaltbilder ist, wird es auch als Standard-Modell bezeichnet. Zusätzlich zur Stromquelle und der parallelen Diode enthält es zwei Widerstände, den Serienwiderstand  $R_S$  sowie den Parallelwiderstand  $R_P$ .  $R_S$  beschreibt hierbei die Widerstände der nicht-idealen Metallkontaktierungen zwischen den Kontakten der Zelle und dem Halbleitermaterial, und den Halbleiterwiderstand selbst [1]. Leckströme an den Kanten der Zelle und Oberflächenrekombinationsprozesse werden durch den Parallelwiderstand  $R_P$  realisiert [8] & [6].

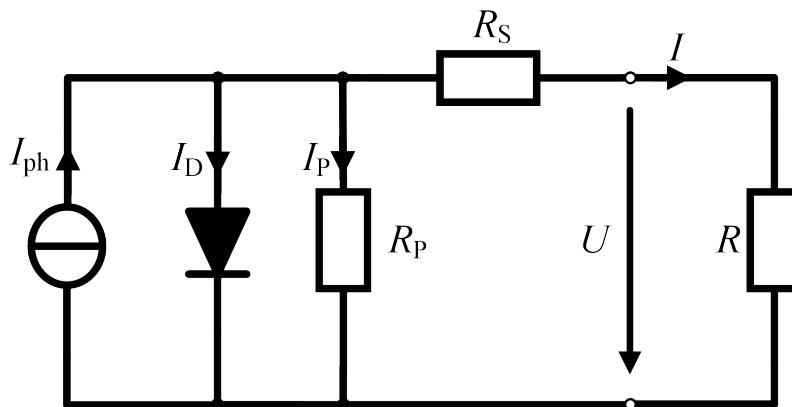


Abbildung 4.3: 1-Dioden-Ersatzschaltbild einer PV-Zelle mit einer Last  $R$

Durch die Erweiterung des Modells mit den beiden Widerständen ändert sich die Gleichung, welche den Strom der Photovoltaikzelle in Abhängigkeit der Spannung zeigt. Diese kann mithilfe des Kirchhoff'schen Gesetzes und der Shockley-Gleichung hergeleitet werden und ist in der folgenden Formel 4.3 ersichtlich.

$$I = I_{ph} - I_D - I_P = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{U + IR_S}{A \cdot U_T}} - 1 \right) - \frac{U + IR_S}{R_P} \quad (4.3)$$



### 4.3.3 Vereinfachtes Modell

Unter der Annahme, dass im 1-Dioden-Ersatzschaltbild in Kapitel 4.3.2 der Parallelwiderstand  $R_P$  im Vergleich zum Serienwiderstand  $R_S$  sehr groß ist, was vor allem bei monokristallinen Solarzellen der Fall ist, kann  $R_P$  vernachlässigt werden [11]. Dadurch entsteht das in Abbildung 4.4 dargestellte vereinfachte Ersatzschaltbild. Dies besteht nur aus einer Stromquelle, einer Diode und dem Serien- oder PV-Widerstand  $R_{PV}$ .

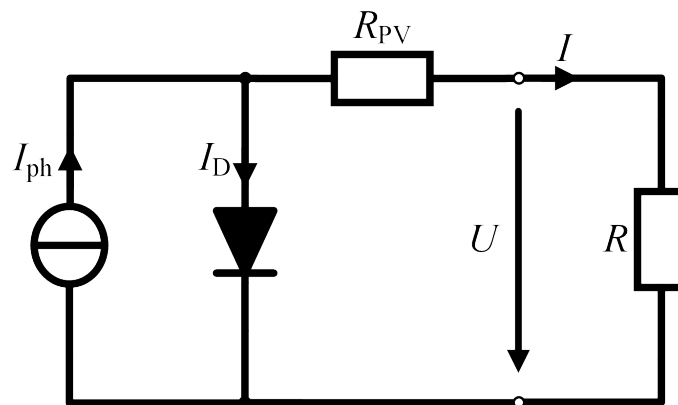


Abbildung 4.4: Vereinfachtes Ersatzschaltbild einer PV-Zelle mit einer Last  $R$

Durch die Vereinfachung des Ersatzschaltbildes aus Kapitel 4.3.2 fällt der letzte Term in Gleichung 4.3 weg, die Formel für den Strom der PV-Zelle erhält damit die in Gleichung 4.4 dargestellte Form.

$$I = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{U + IR_{PV}}{A \cdot U_T}} - 1 \right) \quad (4.4)$$

### 4.3.4 2-Dioden-Modell

Wird die Annahme des vereinfachten Modells aus Kapitel 4.3.3 nicht angewandt und berücksichtigt, dass es auch in der Raumladungszone der PV-Zelle zu Rekombinationen kommt, wird als Erweiterung zum 1-Dioden-Ersatzschaltbild eine zweite Diode parallel zur Stromquelle eingeführt, was im Ersatzschaltbild des 2-Dioden-Modells in Abbildung 4.5 resultiert [1].

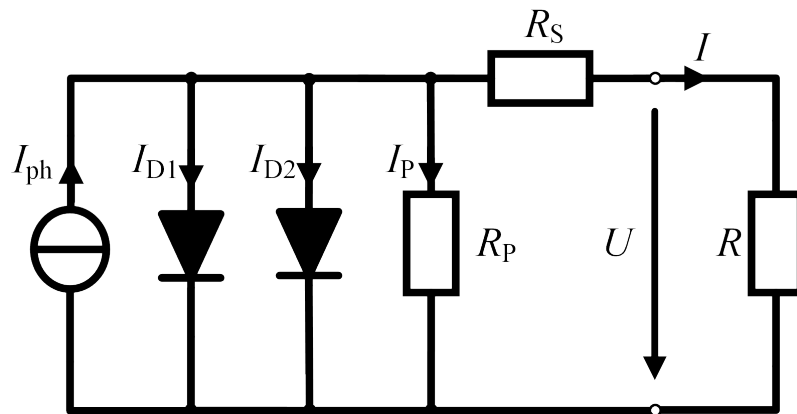


Abbildung 4.5: 2-Dioden-Ersatzschaltbild einer PV-Zelle mit einer Last  $R$

Dieses Modell kann durch Gleichung 4.5 beschrieben werden. Mithilfe der Dioden-Gleichung von Shockley können der Diffusionsstrom  $I_{D1}$  und der Rekombinationsstrom  $I_{D2}$  ersetzt werden [1]. Wie in Gleichung 4.6 ersichtlich, besitzt Diode 1 einen Idealfaktor von 1 und Diode 2 einen Idealfaktor von 2. Die Sättigungsströme der beiden Dioden sind hierbei mit  $I_{S1}$  und  $I_{S2}$  gekennzeichnet.

$$I = I_{ph} - I_{D1} - I_{D2} - I_P \quad (4.5)$$

$$I = I_{ph} - I_{S1} \left( e^{\frac{U + IR_S}{1 \cdot U_T}} - 1 \right) - I_{S2} \left( e^{\frac{U + IR_S}{2 \cdot U_T}} - 1 \right) - \frac{U + IR_S}{R_P} \quad (4.6)$$

### 4.3.5 Modellvergleich

Mit steigender Anzahl der Elemente im Ersatzschaltbild erhöht sich die Genauigkeit der Simulationen, durch die detailliertere Abbildung der physikalischen Effekte im Inneren der Zelle. Damit steigt jedoch auch der Aufwand zur Parametrierung des jeweiligen Modells. Das in Abbildung 4.2 dargestellte Ersatzschaltbild beschreibt lediglich das Verhalten einer idealen PV-Zelle und besitzt daher nur eine geringe Genauigkeit bei der Simulation von realen Photovoltaikzellen [6], weshalb es nicht zur Modellbildung in Simulink<sup>®</sup> verwendet wird. Das 2-Dioden-Modell aus Abbildung 4.5 besitzt zwar eine sehr gute Approximationsgenauigkeit [6], führt durch die komplexere Gleichung jedoch zu einem wesentlich höheren Aufwand bei der Berechnung der Parameter, vor allem da zum Auflösen der Gleichung 4.6 numerische Methoden erforderlich sind [9]. Als Kompromiss zwischen Simplizität des Ersatzschaltbildes und zugleich ausreichender Genauigkeit wird in den folgenden Kapiteln das 1-Dioden-Modell aus Kapitel 4.3.2 parametrieren und in Simulink<sup>®</sup> implementiert.

Neben den hier vorgestellten elektrischen Modellen gibt es noch eine Vielzahl an anderen Ersatzschaltbildern für Photovoltaikzellen, z.B. mit einer zweiten Stromquelle wie in [9] beschrieben. Da diese im Allgemeinen eine Mehrzahl an Elementen mit sich bringen, werden sie an dieser Stelle nicht genauer behandelt.

## 4.4 Charakteristika eines PV-Moduls

Um die Performance einzelner Photovoltaikmodule unter gleichen Bedingungen miteinander vergleichen zu können, werden häufig die sogenannten Standard-Test-Conditions (STC) verwendet [9]. Dabei handelt es sich um eine Einstrahlung von  $G = 1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ , eine Umgebungstemperatur von  $T = 25 \text{ °C}$  und das AM1,5g Spektrum [9]. AM ist dabei als Relative air mass number definiert, welche das Verhältnis der tatsächlichen optischen Dicke der Atmosphäre durch die minimale optische Dicke auf Meereshöhe beschreibt und gültig ist wenn die Sonne am Zenit steht, für Europa ist hierbei der Wert 1.5 ein guter Mittelwert [12].

### 4.4.1 Standard-Test-Conditions (STC)

Das Verhalten eines PV-Moduls wird typischerweise mithilfe von 2 Kennlinien beschrieben. Zum Einen mit der I/U Charakteristik, welche den Strom der PV-Zelle in Abhängigkeit der Spannung zeigt, und zum Anderen mit der P/U Charakteristik, die die abgegebene Leistung über die Spannung angibt. In Abbildung 4.6 sind beide Kennlinien des Modultyps 1Soltech 1STH-215-P unter Standard-Test-Conditions dargestellt. Dabei sind in der I/U Charakteristik 3 Punkte in rot gekennzeichnet. Es handelt sich hierbei um den Strom im Kurzschlussfall  $I_{SC}$  (Short-Circuit Current), die Spannung im Leerlauf  $U_{OC}$  (Open-Circuit Voltage), sowie den Arbeitspunkt, in dem die maximale Leistung abgegeben wird MPP (Maximum Power Point). Dieser ist auch in der P/U Charakteristik gekennzeichnet. In der Leistungskennlinie ist deutlich erkennbar, dass sich der MPP am Maximalwert der Kurve befindet. Im Betrieb wird dieser Arbeitspunkt mithilfe eines sogenannten Maximum-Power-Point-Trackers (MPPT) ermittelt, um den für die aktuellen Bedingungen (Einstrahlungsstärke und Temperatur) idealen Betriebspunkt zu finden.

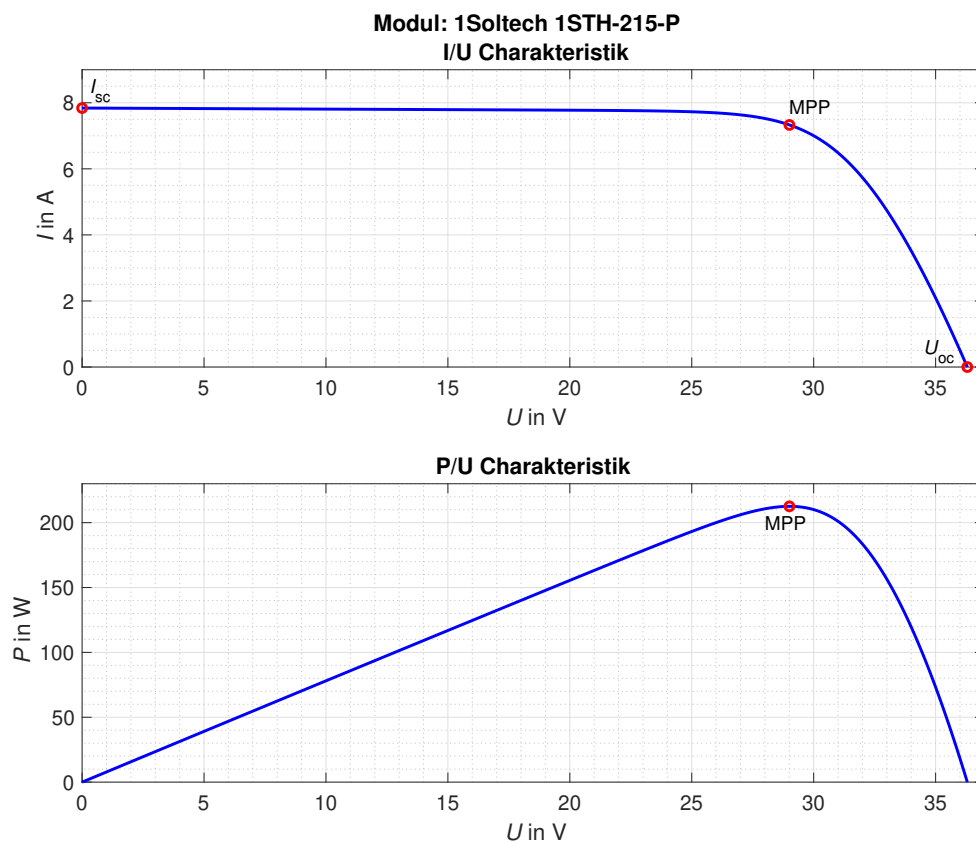


Abbildung 4.6: PV-Charakteristiken unter Standard-Test-Conditions

Die 3 zuvor erwähnten Parameter sind in den Datenblättern von PV-Zellen enthalten und sind essenziell für die Modellbildung des PV-Moduls. Dabei werden im Falle des MPP die dazugehörige Spannung  $U_{MPP}$  und der Strom  $I_{MPP}$  angegeben.

Der Wert des Kurzschlussstromes kann aus der Gleichung des Ersatzschaltbildes wie folgt ermittelt werden. Hierbei wird vereinfacht die Formel des idealen Ersatzschaltbildes 4.1 verwendet, das heißt der Einfluss der Widerstände im Ersatzschaltbild wird vernachlässigt. Wie in Gleichung 4.7 ersichtlich, entspricht der Kurzschlussstrom dem Photostrom  $I_{ph}$ .

$$I_{SC} = I(U = 0) \approx I_{ph} - I_0(e^{\frac{0}{A \cdot U_T}} - 1) = I_{ph} - I_0(e^0 - 1) = I_{ph} \quad (4.7)$$

Zur Bestimmung des Wertes bzw. der Gleichung der Leerlaufspannung, wird Gleichung 4.1 zunächst auf U umgeformt, und im Anschluss für I der Wert 0 eingesetzt, wie in nachfolgenden Berechnungen veranschaulicht.

$$U = A \cdot U_T \cdot \ln\left(\frac{I_{ph} - I}{I_0} - 1\right) \quad (4.8)$$

$$U_{OC} = U(I = 0) = A \cdot U_T \cdot \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0} - 1\right) \quad (4.9)$$

Im Falle von kleinen Strömen ist der Faktor  $\frac{I_{ph}}{I_0}$  groß im Vergleich zu 1, d.h. der Wert 1 kann vernachlässigt werden, was zu Formel 4.10 führt [1].

$$U_{OC} = A \cdot U_T \cdot \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0}\right) \quad (4.10)$$

In den Datenblättern werden die Werte der Spannung und des Stromes für maximale Ausgangsleistung bei STC-Bedingungen angegeben. Das Verhältnis der Leistung im MPP zum Produkt aus Kurzschlussstrom und Leerlaufspannung ist ein Maß für die Güte des PV-Moduls und wird als Füllfaktor FF bezeichnet [5]. Dieser besitzt immer einen Wert kleiner 1, da  $I_{MPP}$  und  $U_{MPP}$  stets kleiner als  $I_{SC}$  und  $U_{OC}$  sind.

$$FF = \frac{I_{MPP} \cdot U_{MPP}}{I_{SC} \cdot U_{OC}} \quad (4.11)$$

#### 4.4.2 Einfluss der Einstrahlungsstärke auf das PV-Modul

Der wichtigste Einflussparameter auf die Ausgangsleistung eines PV-Moduls ist die Einstrahlungsstärke  $G$ . Abbildung 4.7 zeigt die I/U- & P/U-Charakteristik des Moduls 1Soltech 1STH-215-P bei  $1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  (STC),  $500 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  und  $100 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ . In rot sind die MPPs der jeweiligen Kurven gekennzeichnet.

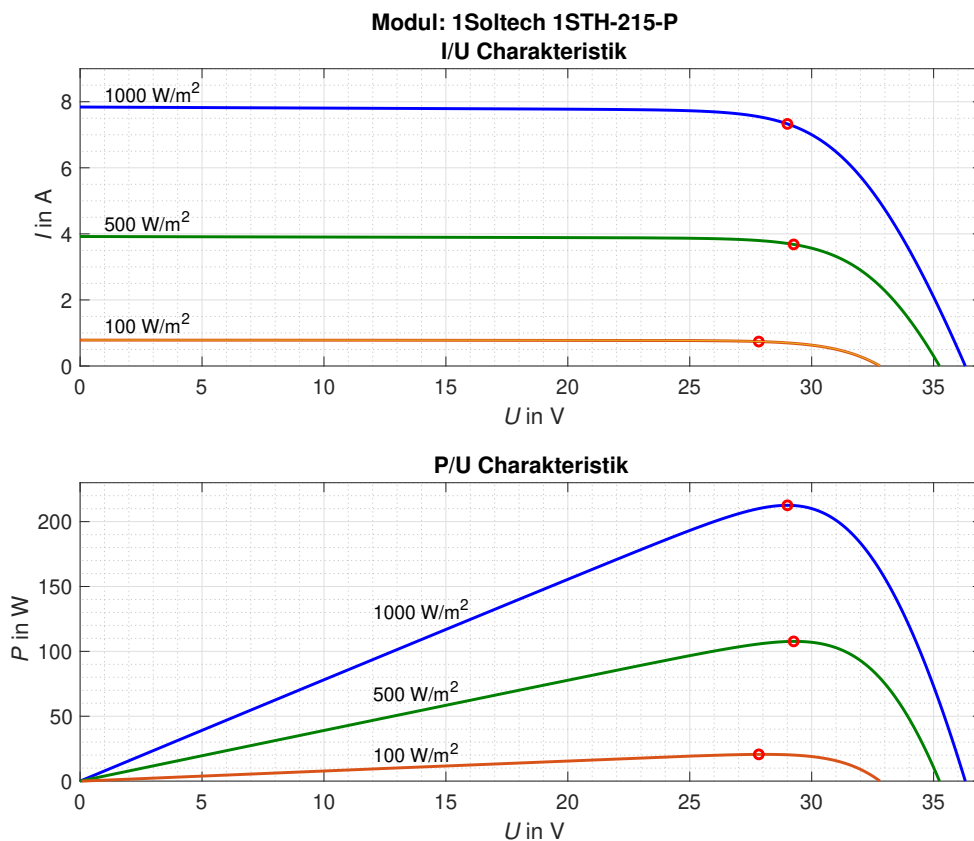


Abbildung 4.7: Einfluss der Einstrahlungsstärke auf die PV-Zellen

Es ist deutlich erkennbar, dass die Leistung mit sinkender Einstrahlungsstärke abnimmt. Dabei ändern sich sowohl der Kurzschlussstrom als auch der Wert der Leerlaufspannung, was zu den veränderten Kurvenverläufen bei unterschiedlichen Bestrahlungsstärken führt. Unter der Annahme, dass jedes Photon, das absorbiert wird, zu einem Elektronen-Loch-Paar führt, gilt die in Gleichung 4.12 beschriebene Beziehung zwischen dem Photostrom und der Bestrahlungsstärke [1].

Da der Kurzschlussstrom, wie in Formel 4.7 gezeigt, dem Photostrom entspricht, kann geschlussfolgert werden, dass der Strom im Kurzschlussfall  $I_{SC}$  direkt proportional zur Einstrahlungsstärke  $G$  ist (Gleichung 4.13). Dies ist auch in Abbildung 4.7 ersichtlich. Der Kurzschlussstrom bei  $500 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  entspricht etwa dem halben Wert des Kurzschlussstromes bei  $1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ .

$$I_{ph} = c_0 \cdot G \quad (4.12)$$

$$I_{SC} = I_{ph} = c_0 \cdot G \quad (4.13)$$

In Bezug auf die Leerlaufspannung ist erkennbar, dass diese nicht so stark durch die Einstrahlungsstärke beeinflusst wird, wie der Kurzschlussstrom. Dieser Umstand wird verdeutlicht, wenn in Gleichung 4.10 für den Kurzschlussstrom  $c_0 \cdot G$  eingesetzt wird, die Leerlaufspannung hängt somit vom natürlichen Logarithmus der Einstrahlungsstärke ab [1]:

$$U_{OC} = A \cdot U_T \cdot \ln \left( \frac{c_0 \cdot G}{I_0} \right) \quad (4.14)$$

### 4.4.3 Einfluss der Temperatur auf das PV-Modul

Ein weiterer wichtiger Einflussparameter auf die Performance des PV-Moduls ist die Umgebungstemperatur. In Abbildung 4.8 sind die I/U- und P/U-Charakteristik des Moduls 1Soltech 1STH-215-P bei 25 °C (STC), 50 °C sowie 75 °C Umgebungstemperatur dargestellt. In rot sind wiederum die jeweiligen Punkte maximaler Ausgangsleistung gekennzeichnet.

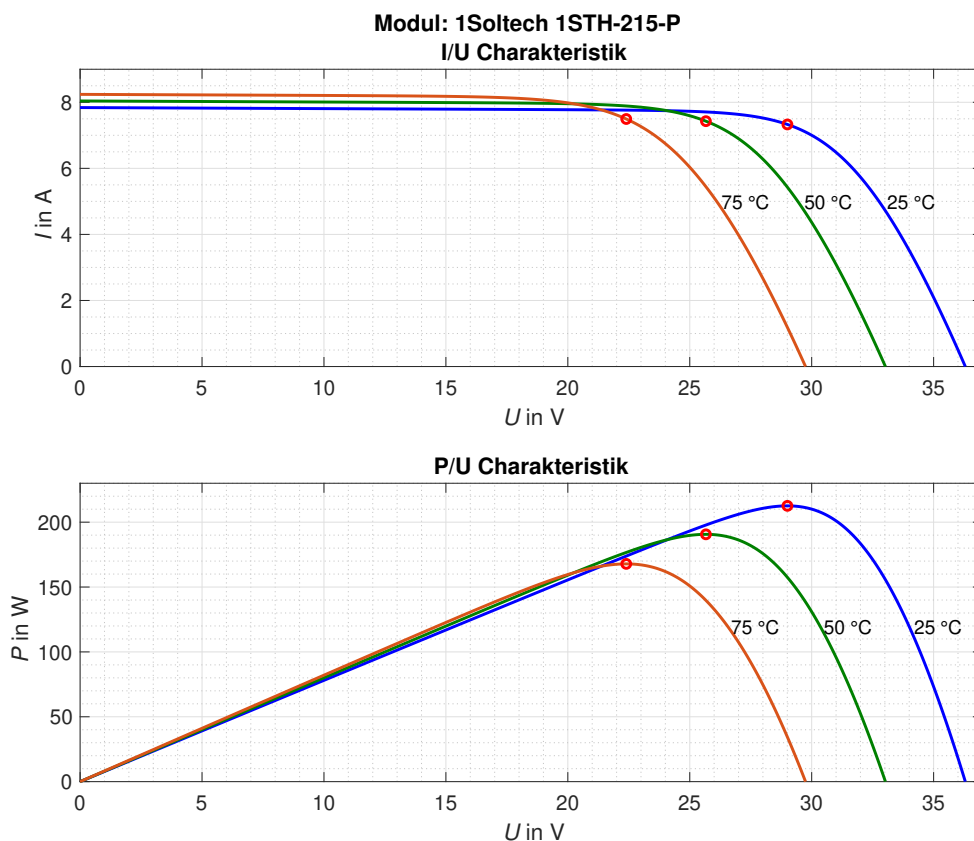


Abbildung 4.8: Einfluss der Temperatur auf die PV-Zellen

Wie in den Charakteristiken ersichtlich, nimmt die maximale Ausgangsleistung mit steigender Umgebungstemperatur ab. Dies ist auch der Grund warum PV-Anlagen im Hochsommer an heißen Tagen oft weniger elektrische Energie liefern, als an Tagen mit niedrigeren Außentemperaturen. Verglichen mit dem Einfluss der Bestrahlungsstärke, hat die Temperaturänderung einen wesentlich größeren Einfluss auf die Leerlaufspannung des Moduls, wohingegen sich der Kurzschlussstrom nur geringfügig mit der Temperatur ändert.



Die Abhängigkeit der Leerlaufspannung von der Temperatur mag auf den ersten Blick hauptsächlich durch die Steigerung der Temperaturspannung nach 4.2 gegeben sein. Tatsächlich ändern sich jedoch auch der Diodensättigungsstrom und der Photostrom mit der Temperatur, wodurch die Berechnung nicht mehr so trivial wie im Fall der Beleuchtungsstärke ist. Physikalisch kann der Effekt so beschrieben werden, dass die Eigenleitungsichte mit steigender Temperatur zunimmt, wodurch der Diodensättigungsstrom steigt [1]. Dies führt dazu, dass die Leerlaufspannung  $U_{OC}$  mit steigender Temperatur sinkt. Der Kurzschlussstrom  $I_{SC}$  hingegen wird durch die Verringerung der Bandlücke, wodurch auch Photonen mit geringerer Energie absorbiert werden, etwas erhöht [1].

## 4.5 Simulink<sup>®</sup>-Modell des 1-Dioden-ESB

Das PV-Modell wird auf Basis des 1-Dioden-Ersatzschaltbildes in Simulink<sup>®</sup> erstellt. Die Grundlage ist hierbei die in Gleichung 4.3 gezeigte Formel für den Strom der PV-Zelle. Ein PV-Array besteht aus mehreren parallelen Strängen seriell verschaltener PV-Module, welche wiederum eine Vielzahl von PV-Zellen enthalten.

Um dies etwas zu verdeutlichen hier ein kleines Gedankenexperiment: Ein Haus habe eine PV-Anlage am Dach montiert, das PV-Array. Dieses Array besteht z.B. aus 3 parallelen Strängen. In jedem dieser Stränge befinden sich 10 Module, die seriell miteinander verbunden sind, das heißt das PV-Array setzt sich aus insgesamt 30 PV-Modulen zusammen. In jedem dieser Module, die einzeln am Dach angebracht und dort verbunden werden, sind je nach Modul-Typ z.B. 60 PV-Zellen enthalten.

Die in den Modellvorstellungen in Abschnitt 4.3 gezeigten Grundformeln sind für eine Zelle gültig. Mithilfe des Parameters  $N_{cell}$  in Gleichung 4.15 wird ein Modul aus mehreren Zellen beschrieben. Um ein komplettes Array aus Modulen zu simulieren, wird die in [13] beschriebene Erweiterung der Ersatzschaltbild-Gleichung verwendet. Gleichung 4.15 zeigt die Formel des 1-Dioden-Ersatzschaltbildes für das Simulink<sup>®</sup>-Modell, wobei  $N_{ser}$  die Anzahl der seriellen Module pro Strang und  $N_{par}$  die Anzahl der parallelen Stränge des PV-Arrays beschreibt.

$$I = I_{ph}N_{par} - I_0N_{par} \left( e^{\frac{U + I \cdot R_S \frac{N_{ser}}{N_{par}}}{N_{ser} \cdot A \cdot N_{cell} \cdot U_T}} - 1 \right) - \frac{U + I \cdot R_S \frac{N_{ser}}{N_{par}}}{R_P \frac{N_{ser}}{N_{par}}} \quad (4.15)$$

Das auf Grundlage dieser Gleichung erstellte Simulink®-Modell ist in Abbildung 4.9 ersichtlich, um die Übersichtlichkeit des Modells zu erhöhen, ist der mittlere Teil der Gleichung im Block ID enthalten. Dieser beschreibt die Multiplikation von  $I_0$  mit  $N_{par}$  sowie dem Klammerausdruck der Exponentialfunktion.

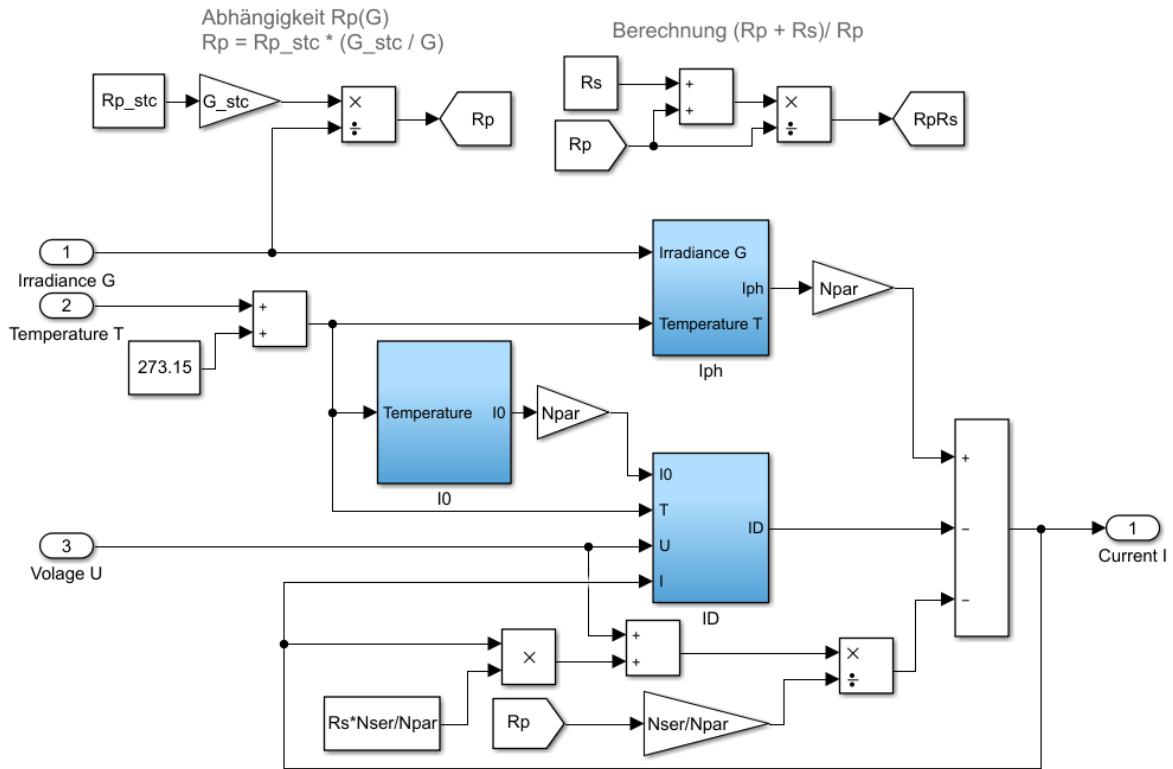


Abbildung 4.9: Simulink®-Modell des 1-Dioden-Ersatzschaltbildes

Im rechten oberen Teil des Modells ist die Berechnung des Terms  $\frac{R_p + R_s}{R_p}$  für die vereinfachte Verwendung in den Unterblöcken dargestellt. Im linken oberen Teil der Abbildung erfolgt die Berechnung des Parallelwiderstandes  $R_p$  in Abhängigkeit der Bestrahlungsstärke  $G$ . Dies geschieht mithilfe folgender Gleichung 4.16 aus [14], welche auf den Erkenntnissen von [15] und [16] basiert.

$$R_p = R_{p,STC} \left( \frac{G_{STC}}{G} \right) \quad (4.16)$$

### 4.5.1 Berechnung des Photostroms $I_{ph}$

Der Photostrom  $I_{ph}$  kann aus dem Kurzschlusspunkt der I/U-Charakteristik anhand folgender Formel berechnet werden [14]:

$$I_{ph} = (I_{SC,STC} + K_i \Delta T) \frac{G}{G_{STC}} \left( \frac{R_P + R_S}{R_P} \right) \quad (4.17)$$

Wie in Gleichung 4.17 ersichtlich, errechnet sich  $I_{ph}$  aus dem Kurzschlussstrom bei Standard-Test-Bedingungen, der Temperatur- und Bestrahlungsstärke-Änderung sowie den Werten für den Serien- und Parallelwiderstand.  $K_i$  beschreibt den Temperaturänderungskoeffizienten des Kurzschlussstromes  $I_{SC}$  in  $\frac{A}{K}$  und  $\Delta T$  den aktuellen Temperaturunterschied zu den Standard-Test-Bedingungen (25 °C) in Kelvin. Der anhand dieser Gleichung erstellte Simulink®-Block ist in Abbildung 4.10 dargestellt.

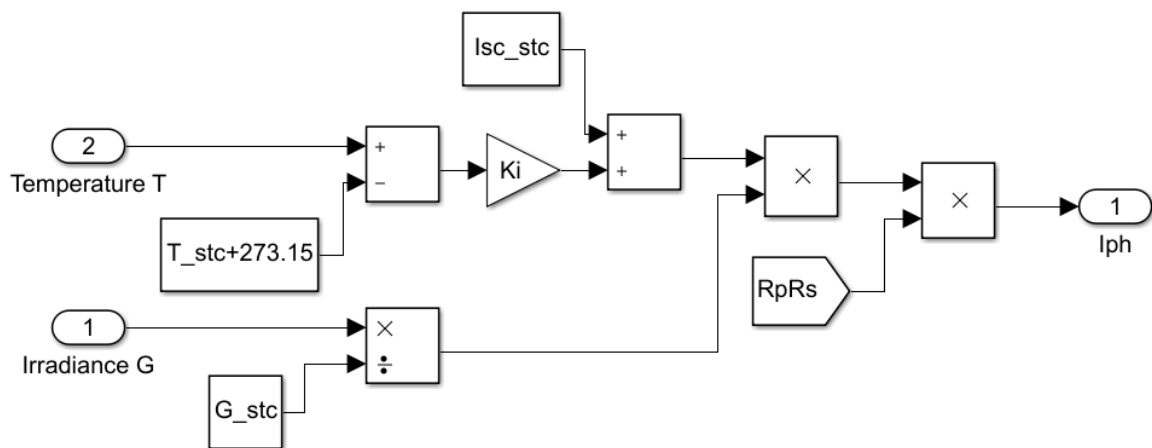


Abbildung 4.10: Simulink®-Block des Photostroms

### 4.5.2 Berechnung des Diodensättigungsstromes $I_0$

Zur Berechnung des Diodensättigungsstromes  $I_0$  aus der Leerlaufbedingung wird folgende Formel verwendet [14]:

$$I_0 = \frac{(I_{SC,STC} + K_i \Delta T) - \frac{V_{OC,STC} + K_u \Delta T}{R_P}}{\exp\left(\frac{V_{OC,STC} + K_u \Delta T}{A \cdot N_{cell} \cdot U_T}\right) - 1} \quad (4.18)$$

$I_0$  berechnet sich aus den Werten für  $I_{SC}$  und  $U_{OC}$  bei Standard-Test-Bedingungen, der Temperaturänderung in Kelvin mit den dazugehörigen Änderungskoeffizienten der Leerlaufspannung  $K_u$  und des Kurzschlussstromes  $K_i$ , sowie den Werten für den Parallelwiderstand  $R_P$ , Diodenidealitätsfaktor  $A$ , Temperaturspannung  $U_T$  und der Anzahl der PV-Zellen des Moduls  $N_{cell}$ . Der aus dieser Gleichung erstellte Simulink®-Block ist in Abbildung 4.11 dargestellt. Für die Temperaturspannung wurde die in Gleichung 4.2 gezeigte Beziehung verwendet.

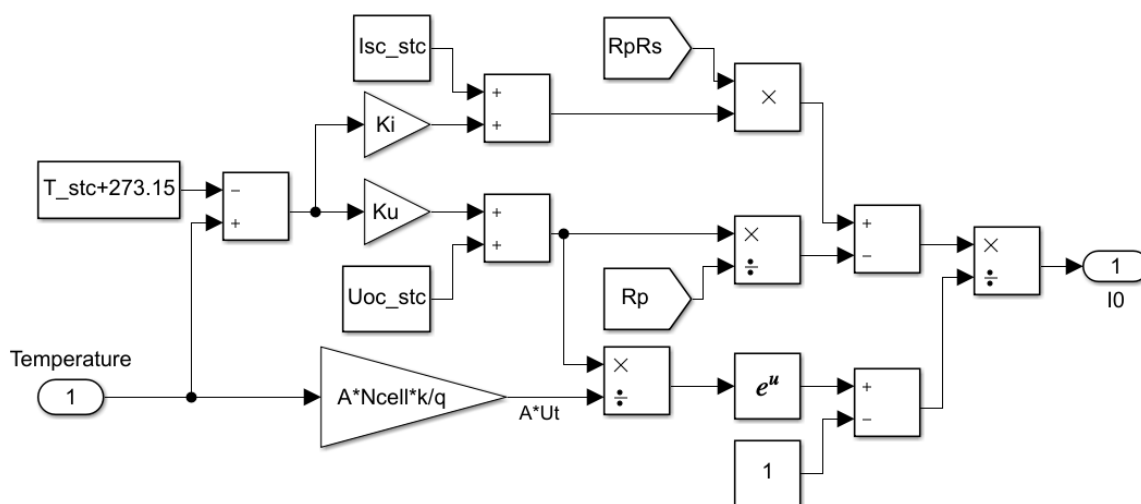


Abbildung 4.11: Simulink®-Block des Diodensättigungsstromes

### 4.5.3 Berechnung des Diodenstromes $I_D$

Der mittlere Teil der Modell-Gleichung 4.15 wird im ID-Block des Modells zusammengefasst. Dieser enthält die Multiplikation von  $I_0$  mit  $N_{par}$  sowie dem Klammersausdruck der Exponentialfunktion. Die Berechnungen in diesem Block sind in Formel 4.19 und Abbildung 4.12 dargestellt, wobei der Eingangsport I0 (Input-Nr. 1) bereits außerhalb des Blocks mit der Anzahl der Parallelstränge  $N_{par}$  multipliziert wird und die Temperaturspannung  $U_T$  wiederum durch den Term  $\frac{kT}{q}$  (Formel 4.2) ersetzt wurde.

$$I_D = I_0 N_{par} \left( e^{\frac{U + I \cdot R_S \frac{N_{ser}}{N_{par}}}{N_{ser} \cdot A \cdot N_{cell} \cdot U_T}} - 1 \right) \quad (4.19)$$

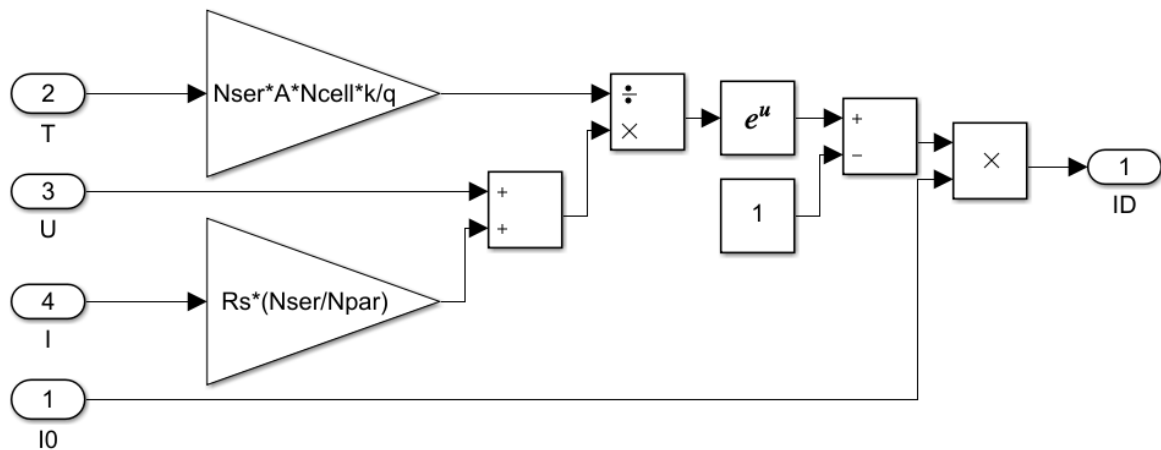


Abbildung 4.12: Simulink®-Block des Diodenstromes

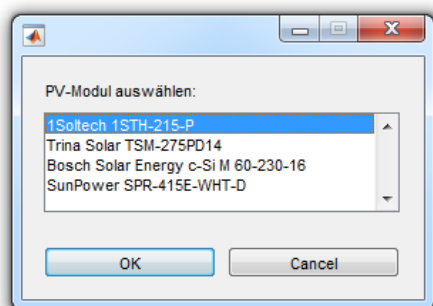
## 4.6 Ermittlung der 1-Dioden-Modell-Parameter

Die für das 1-Dioden-Modell erforderlichen Parameter der PV-Module stammen aus der Simulink® Bibliothek des PV Array Blocks, welche im NREL System Advisor Model (Jan. 2014) verfügbar sind [17]. Die relevanten Daten einiger Module wurden in Excel-Dateien gespeichert. In Tabelle 4.1 sind die Daten des Moduls 1Soltech 1STH-215-P aufgelistet.

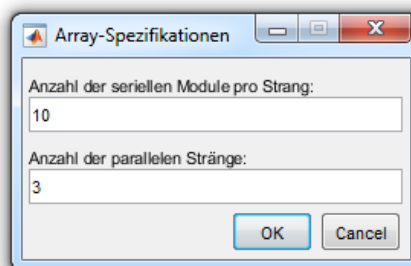
Parameter	Wert	Einheit	Beschreibung
$U_{OC,STC}$	36,30	V	STC Leerlaufspannung
$U_{MPP}$	29,00	V	Spannung im MPP
$I_{SC,STC}$	7,84	A	STC Kurzschlussstrom
$I_{MPP}$	7,35	A	Strom im MPP
$N_{cell}$	60,00	-	Anzahl Zellen pro Modul
$R_S$	0,393830	$\Omega$	Serienwiderstand
$R_{P,STC}$	313,39910	$\Omega$	Parallelwiderstand bei STC
$A$	0,981170	-	Diodenidealitätsfaktor
$K_i$	0,007997	A/°C	Temperaturkoeffizient von $I_{SC}$
$K_u$	-0,131040	V/°C	Temperaturkoeffizient von $U_{OC}$

Tabelle 4.1: Moduldaten 1Soltech 1STH-215-P

In MATLAB® wurde ein Initialisierungsskript erstellt, welches die Daten des im Zuge eines File-Dialogs (Abb. 4.13a) ausgewählten Moduls lädt. Durch eine weitere Benutzereingabe kann die Anzahl der seriellen und parallelen PV-Module für die Simulation festgelegt werden (Abb. 4.13b). Beide Dialog-Fenster aus MATLAB® sind in Abbildung 4.13 dargestellt. Das erstellte Initialisierungsskript befindet sich im Anhang (B.3).



(a) Auswahl des PV-Modultyps



(b) Auswahl der Modulanzahl

Abbildung 4.13: Dialog-Fenster in MATLAB® zur Initialisierung

## 4.7 Probleme bei der Implementierung des 1-Dioden-Modells

In Simulink<sup>®</sup> selbst sind die Simulationen des anhand der Ausführungen in Kapitel 4.5 erstellten und in Kapitel 4.6 parametrisierten Modells ohne jegliche Probleme möglich. Der Betrieb am Echtzeitrechner ist in dieser Form jedoch nicht möglich. Grund hierfür ist die direkte Rückkopplung des Stromes vom Ausgang des Modells zum Eingang, was eine algebraische Schleife darstellt. Dies soll mithilfe von Abbildung 4.14 nochmals verdeutlicht werden.

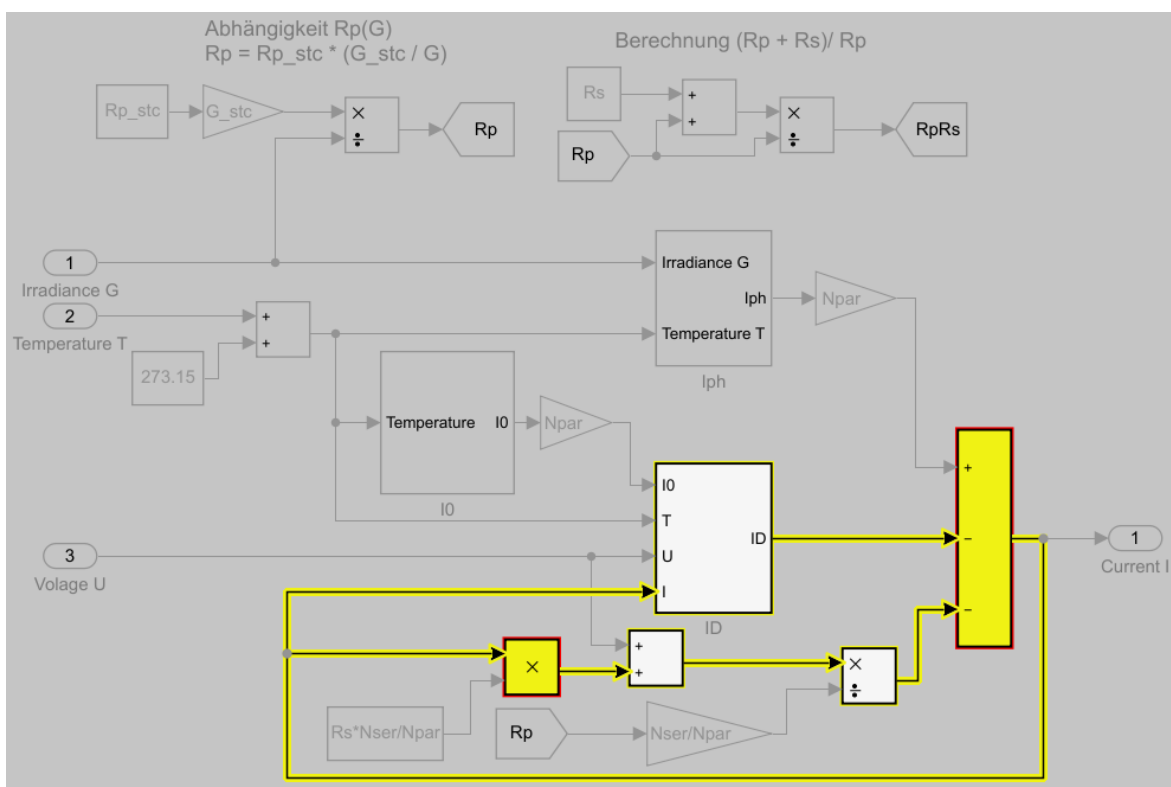


Abbildung 4.14: Algebraische Schleife des Modells

Am Echtzeitrechner werden Modelle, wie der Name schon sagt, in Echtzeit simuliert, das heißt zu jedem definierten Zeitpunkt werden die Ausgänge eines Modelles anhand ihrer Eingänge berechnet. Wie in Abbildung 4.14 in gelb verdeutlicht, ist der Ausgangsstrom zu jedem Zeitpunkt gleichzeitig ein Eingangswert für das Modell, oder anders erklärt wäre zur Berechnung des Stromes der Wert des Stromes selbst erforderlich. In Simulink<sup>®</sup> können diese algebraischen Schleifen mithilfe eines nichtlinearen „Algebraic Loop Solvers“ gelöst werden, indem durch Näherungsverfahren die Lösungen jedes Zeitschrittes ermittelt werden [18].

Für die Realisierung in Echtzeitsystemen werden diese algebraischen Schleifen häufig durch Verzögerungsblöcke oder Filter in den Rückkopplungen vermieden. Abbildung 4.15 zeigt das 1-Dioden-Modell in Simulink® mit Verzögerungsblock in der Stromrückkopplung. Da der Ausgangsstrom des vorhergehenden Berechnungsschrittes nun als Eingang des Modells dient, ist die algebraische Schleife gelöst und das Modell wird echtzeitfähig.

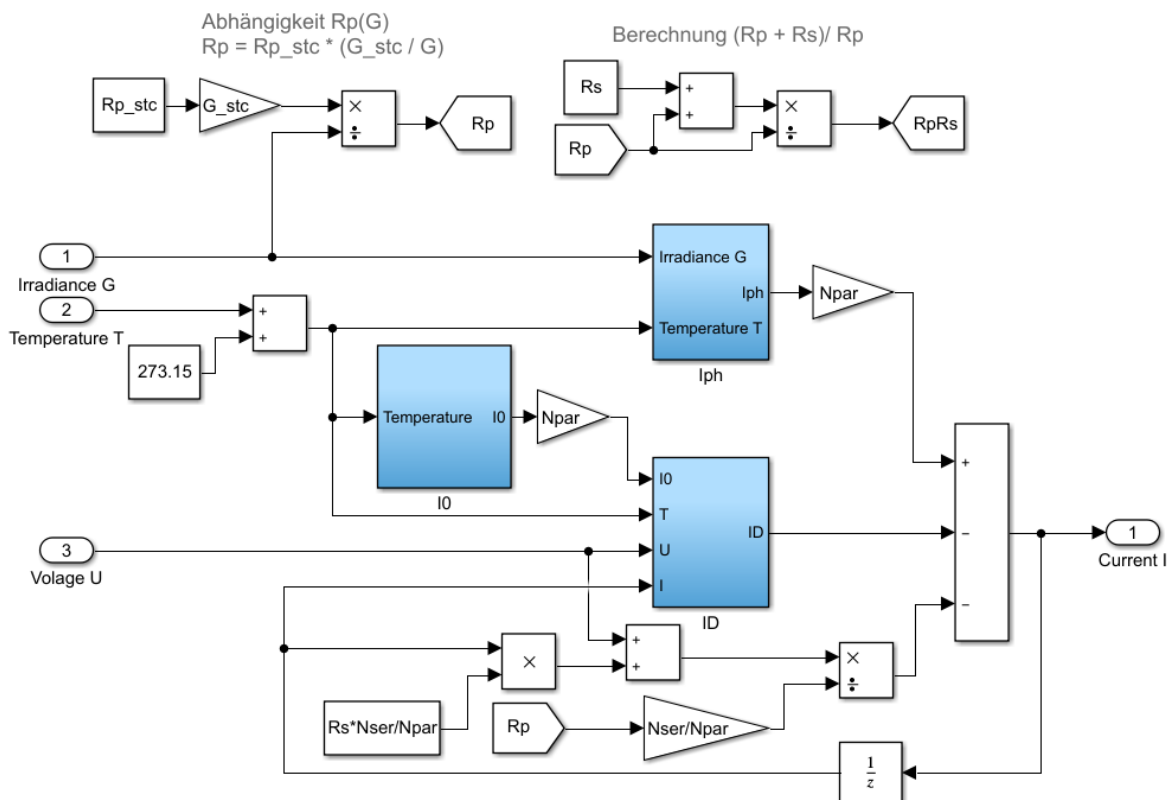


Abbildung 4.15: 1-Dioden-Modell mit Verzögerung in der Rückkopplung

Vor den Messungen und Simulationen am Echtzeitrechner wird das Modell nochmals in Simulink® getestet. Der ausgewählte Modultyp ist 1Soltech 1STH-215-P, es werden 3 parallele Stränge zu je 10 Serien-Modulen bei Standard-Test-Bedingungen ( $1000 \frac{W}{m^2}$ ,  $25^\circ C$ ) simuliert. Die I/U- und P/U-Charakteristiken dieses Versuchs sind in Abbildung 4.16 dargestellt.



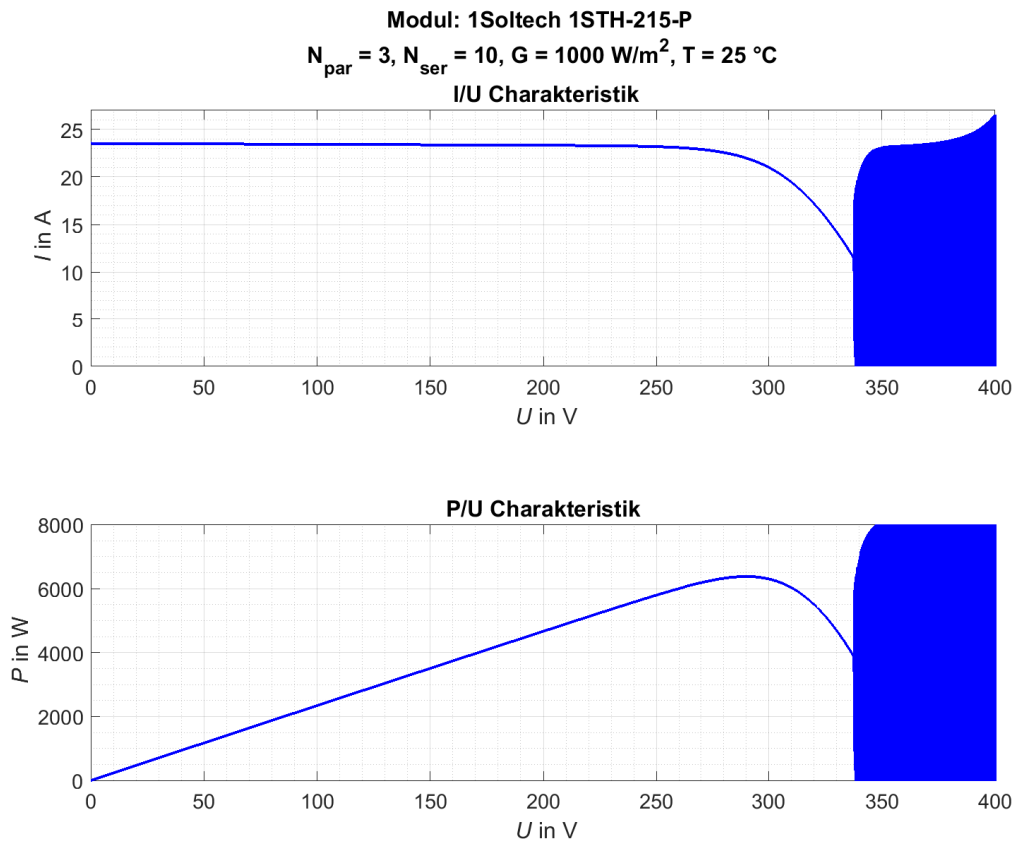


Abbildung 4.16: Instabilität durch Verzögerungsblock im Modell

Wie an den Oszillationen in Abbildung 4.16 deutlich erkennbar, führt der Einbau des Verzögerungsblockes in der Rückkopplung dazu, dass das Modell nicht mehr stabil ist. Damit kann das Problem der algebraischen Schleife gelöst werden, es entsteht jedoch ein Stabilitätsproblem. Für die Leistungsverstärker im Power-Hardware-in-the-Loop Labor der Universität ist zum Zeitpunkt der Modellerstellung nur die Lizenz für die Verwendung als Spannungsquelle verfügbar, nicht jedoch die Lizenz für eine Stromquelle. Somit können nur Modelle simuliert werden, in welchen die Spannung als Ausgangsgröße fungiert.

Für ein funktionsfähiges PV-Modell am Echtzeitrechner müssen diese Probleme gelöst werden. Zusammenfassend muss dafür gesorgt werden, dass der Ausgangsparameter des Modells in der Modellgleichung selbst nicht vorkommt, womit keine Rückkopplung erforderlich ist. Dies wird durch die Verwendung des in Kapitel 4.3.3 vorgestellten vereinfachten Modells erreicht, wobei dieses jedoch so umgeformt werden muss, dass der Strom den Eingang des Modells bildet und die Spannung des PV-Moduls den Ausgang.

## 4.8 Simulink<sup>®</sup>-Modell des vereinfachten Ersatzschaltbildes

Für die Erstellung des Simulink<sup>®</sup>-Modells des vereinfachten Ersatzschaltbildes muss die entsprechende Gleichung 4.4 so umgeformt werden, dass die Spannung der Zelle in Abhängigkeit des Stromes berechnet wird. Dabei ist zu erwähnen, dass zur Vereinfachung anstatt des Termes  $A \cdot U_T$  im Folgenden der in der Literatur häufig verwendete Parameter  $\alpha$  eingeführt wird. Dies entspricht auch der Form in [11].

$$I = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{U + IR_{PV}}{\alpha}} - 1 \right) \quad (4.20)$$

$$I_0 \left( e^{\frac{U + IR_{PV}}{\alpha}} - 1 \right) = I_{ph} - I \quad (4.21)$$

$$e^{\frac{U + IR_{PV}}{\alpha}} = \frac{I_{ph} - I}{I_0} + 1 \quad (4.22)$$

$$\frac{U + IR_{PV}}{\alpha} = \ln \left( \frac{I_{ph} - I}{I_0} + 1 \right) \quad (4.23)$$

$$U = \alpha \cdot \ln \left( \frac{I_{ph} - I}{I_0} + 1 \right) - IR_{PV} \quad (4.24)$$

Für die Simulation mehrerer PV-Module werden die Multiplikationsparameter  $N_{par}$  und  $N_{ser}$  verwendet. In Gleichung 4.15 des 1-Dioden-Modelles ist ersichtlich, dass laut [13] die Widerstände des Ersatzschaltbildes mit dem Faktor  $\frac{N_{ser}}{N_{par}}$  multipliziert werden, während der Photostrom  $I_{ph}$  sowie der Diodensättigungsstrom  $I_0$  lediglich durch die Anzahl der parallelen Stränge  $N_{par}$  beeinflusst werden. Der Nenner der Exponentialfunktion  $\alpha$  wird mit der seriellen Anzahl der Module  $N_{ser}$  multipliziert. Dadurch ergibt sich die in 4.25 dargestellte Gleichung.

$$U = N_{ser} \cdot \alpha \cdot \ln \left( \frac{N_{par} I_{ph} - I}{N_{par} I_0} + 1 \right) - IR_{PV} \frac{N_{ser}}{N_{par}} \quad (4.25)$$

Abbildung 4.17 zeigt das in Simulink<sup>®</sup> erstellte Modell. Die Sättigungsblöcke sind dabei zur Begrenzung von Strom und Spannung (unteres Limit jeweils 0) sowie zur Sicherstellung eines gültigen Wertes am Eingang der Logarithmus-Berechnung (unteres Limit 1).

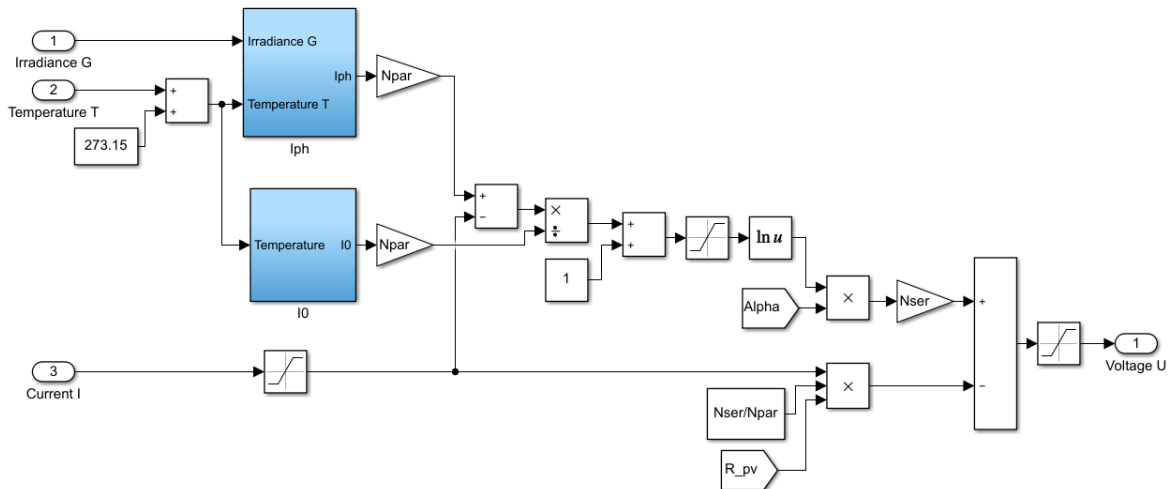


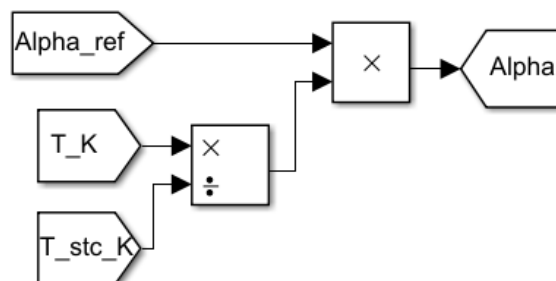
Abbildung 4.17: Simulink®-Modell des vereinfachten Ersatzschaltbildes

### 4.8.1 Berechnung von $\alpha$

Die Berechnung des Kurvenanpassungsparameters  $\alpha$  basiert auf dem Referenzparameter  $\alpha_{ref}$  sowie der Temperatur der PV-Zelle ([11] auf Basis von [19]) wie in Gleichung 4.26 und Abbildung 4.18 dargestellt.

$$\alpha = \alpha_{ref} \frac{T_K}{T_{STC,K}} \quad (4.26)$$

$T_K$  beschreibt hierbei die Zelltemperatur in Kelvin und  $T_{STC,K}$  die Temperatur bei Standard-Test-Bedingungen (25 °C) in Kelvin.

Abbildung 4.18: Simulink®-Block des Kurvenanpassungsparameters  $\alpha$

### 4.8.2 Berechnung von $\alpha_{ref}$

Der Referenzwert von  $\alpha$  kann wie in Gleichung 4.27 und Abbildung 4.19 gezeigt, berechnet werden [20]. Die in der Abbildung als  $U_{mp}$  und  $I_{mp}$  bezeichneten Parameter entsprechen den Maximum-Power-Point Werten von Spannung und Strom ( $U_{MPP}$  und  $I_{MPP}$ ).

$$\alpha_{ref} = \frac{2U_{MPP} - U_{OC,STC}}{\frac{I_{SC,STC}}{I_{SC,STC} - I_{MPP}} + \ln\left(1 - \frac{I_{MPP}}{I_{SC,STC}}\right)} \quad (4.27)$$

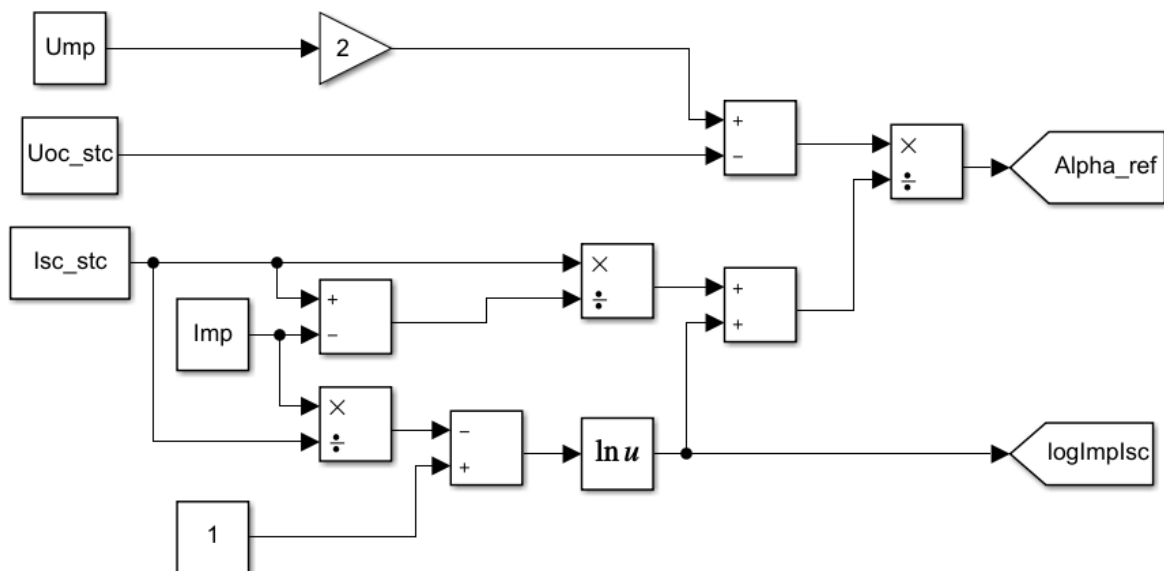


Abbildung 4.19: Simulink<sup>®</sup>-Block von  $\alpha_{ref}$

### 4.8.3 Berechnung von Photovoltaik-Widerstandes $R_{PV}$

Der oben bereits berechnete natürliche Logarithmus (Goto-Block „logImpIsc“) wird auch für die Berechnung des Photovoltaikwiderstandes  $R_{PV}$  ([20]) benötigt, Formel und Simulink<sup>®</sup>-Implementierung sind im Folgenden dargestellt.

$$R_{PV} = \frac{\alpha_{ref} \ln\left(1 - \frac{I_{MPP}}{I_{SC,STC}}\right) + U_{OC,STC} - U_{MPP}}{I_{MPP}} \quad (4.28)$$

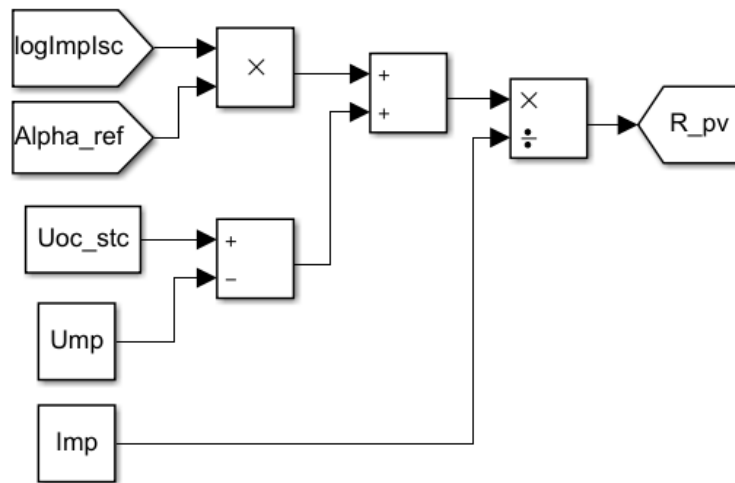


Abbildung 4.20: Simulink®-Block zur Berechnung des Photovoltaik-Widerstandes

#### 4.8.4 Berechnung des Diodensättigungsstromes $I_0$

Der Block zur Ermittlung des Photostroms  $I_{ph}$  ist analog zu jenem aus dem 1-Dioden-Modell (Kapitel 4.5.1), bei der Berechnung des Diodensättigungsstromes  $I_0$  ergeben sich jedoch Unterschiede. Die Formeln 4.29 und 4.30 basieren auf den Ausführungen in [11].

$$I_0 = I_{0,ref} \left( \frac{T_K}{T_{STC,K}} \right)^3 \exp \left[ \frac{E_G N_{cell}}{\alpha_{ref}} \left( 1 - \frac{T_{STC,K}}{T_K} \right) \right] \quad (4.29)$$

$$I_{0,ref} = I_{SC,STC} \cdot \exp \left( \frac{-U_{OC,STC}}{\alpha_{ref}} \right) \quad (4.30)$$

Der Simulink®-Ausschnitt in Abbildung 4.21 basiert auf den oben genannten Beziehungen. Dabei ist zu erwähnen, dass die Temperatur bereits außerhalb des Blocks in Kelvin umgerechnet wird, womit der Eingang 1 der Abbildung bereits der PV-Zelltemperatur in Kelvin entspricht.

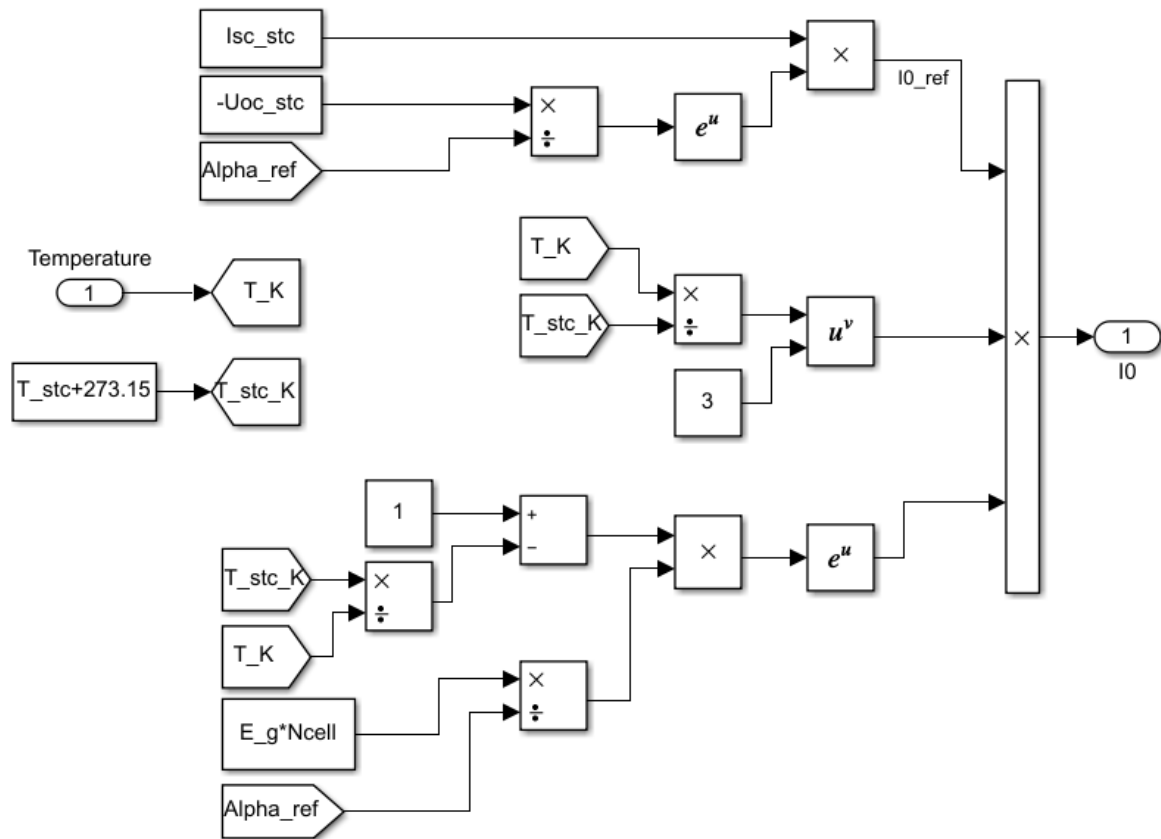


Abbildung 4.21: Diodensättigungsstrom im vereinfachten Modell

## 4.9 Ermittlung der vereinfachten Modell-Parameter

Die für das Simulink®-Modell erforderlichen Parameter werden analog, wie bereits in Kapitel 4.6 für das 1-Dioden-Ersatzschaltbild beschrieben, ermittelt. Somit können die erstellten Excel-Dateien, sowie das Initialisierungsskript in MATLAB® auch hierfür verwendet werden. Lediglich der Parameter  $E_G$  für die Berechnung des Diodensättigungsstromes muss zusätzlich definiert werden. Dieser beschreibt die Bandlücken-Energie des Materials und besitzt bei Silizium-Zellen einen Wert von  $\approx 1.17$  eV [20]. Alle übrigen Parameter werden wiederum mithilfe der Informationen aus dem Simulink® PV Array Block auf Basis der NREL System Advisor Model (Jan. 2014) Daten ([17]) ermittelt.

## 4.10 Modellverifizierung

Das in den vorhergehenden Kapiteln beschriebene Simulink<sup>®</sup>-Modell soll im PHIL-Labor des Instituts für Elektrische Anlagen und Netze auf seine Funktionsfähigkeit und Genauigkeit überprüft werden. Dafür wird das Modell am Echtzeitrechner eingespielt, einer der Leistungsverstärker des Labors fungiert somit als simuliertes Photovoltaik-Array, und gibt die durch die Eingangswerte (Einstrahlungsstärke, Temperatur und Strom) und Modellparameter definierte Spannung an den Klemmen aus.

Der verwendete Messaufbau ist in Abbildung 4.22 schematisch dargestellt. Das erstellte PV-Modell ist am Echtzeitrechner eingebunden und über Phase 1 (L1) und den Neutralleiter (N) des Leistungsverstärkers (L1) mit der Last verbunden. Im Schema wird die Last durch den Widerstand  $R$  dargestellt. Die intern gemessenen Ströme werden über den Echtzeitrechner vom Modell verarbeitet und die berechneten Spannungen wiederum ausgegeben. Im verwendeten Aufbau aus Abbildung 4.22 werden nur die Werte der Phase 1 ( $U_1$  &  $I_1$ ) verwendet, alle anderen Strom- und Spannungsgrößen werden im Echtzeitrechner terminiert.

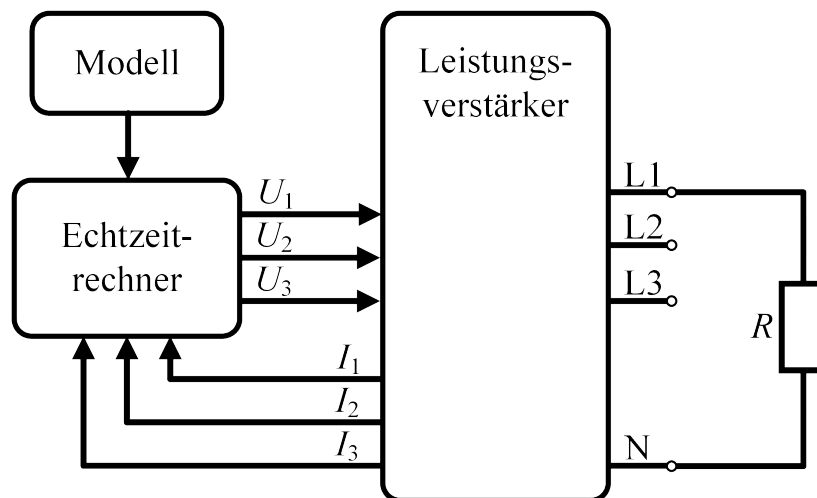


Abbildung 4.22: Schematischer Messaufbau mit  $R$  als Last

### 4.10.1 Messungen mit Lastwiderständen

Eines der Messsetups zur Verifizierung des Modelles besteht aus der Belastung des PV-Arrays mit Lastwiderständen um die I/U- sowie P/U-Kennlinien aufzunehmen. Dabei werden 2 Szenarien definiert. Zum Einen erfolgt die Simulation bei einer Bestrahlungsstärke von  $1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  und einer Temperatur von  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , dies entspricht den Standard-Test-Bedingungen. Die zweite Testreihe wird bei einer Einstrahlung von  $100 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  und  $75 \text{ }^\circ\text{C}$  durchgeführt. Diese Kombination von geringer Einstrahlung und hoher Temperatur ist im realen Betrieb zwar unüblich, entspricht jedoch einer Art Worst-Case-Szenario, da hier eine große Abweichung von den Standard-Test-Bedingungen herrscht. Somit kann angenommen werden, dass mit den beiden Test-Szenarien ein großes Spektrum der Betriebs-Möglichkeiten abgedeckt wird, und die daraus gewonnenen Erkenntnisse für das erstellte Modell allgemein gültig sind. Die Messreihen werden für den Modultyp 1Soltech 1STH-215-P bei einem parallelen Strang ( $N_{par} = 1$ ) und 4 seriellen Modulen ( $N_{ser} = 4$ ) durchgeführt.

Die aus den Messreihen erhaltenen Datensätze der I/U- und P/U-Kennlinien werden mit den Daten aus der Simulink<sup>®</sup>-Simulation des PV Array Blocks, bei gleichen Einstrahlungen und Temperaturen, verglichen um die Genauigkeit des vereinfachten Modells zu überprüfen. An dieser Stelle sei erwähnt, dass die direkte Verwendung des Simulink<sup>®</sup>-Blocks am Echtzeitrechner nicht möglich ist, da dieser eine algebraische Schleife enthält, ein Stromquellen-Modell darstellt und die Ausgänge des Blocks der Simscape-Bibliothek entstammen. Diese können nicht direkt mit den Simulink<sup>®</sup>-Blöcken des übergeordneten PHIL-Lab Modells verbunden werden, was für die Einbindung ins System jedoch erforderlich ist.

Bei der Durchführung der Messungen wird wie folgt vorgegangen. Die Modellparameter für Einstrahlung und Temperatur werden am Echtzeitrechner eingestellt. Danach wird das Modell gestartet und mit unterschiedlichen Widerstandswerten belastet, anhand derer die Werte von Strom und Spannung des Leistungsverstärkers gemessen werden. Somit wird für jeden Widerstandswert ein Punkt auf der I/U- bzw. P/U-Kennlinie ermittelt. Durch eine lineare Interpolation zwischen den gemessenen Werten kann die vermessene Kennlinie erstellt und mit den Daten aus dem PV Array-Block aus Simulink<sup>®</sup> verglichen werden.





In Tabelle 4.2 sind die eingestellten, gemessenen und berechneten Werte zur Messung unter Standard-Test-Bedingungen aufgelistet. Für die Widerstände wurden die einstellbaren Werte laut Datenblatt verwendet, welches im Anhang (B.1) ersichtlich ist. Da die beiden Lastwiderstände 1 und 3 seriell verbunden sind, ergibt sich der Wert des Gesamt-Widerstandes jeweils aus der Summe der beiden Einzelwerte. Bei Messung Nr. 1 handelt es sich um den Leerlauf, das heißt zu diesem Zeitpunkt sind beide Widerstände inaktiv und der Gesamtwiderstand ist  $\infty$ .

Im Zuge der Messungen bleibt ein Widerstandswert so lange aktiv, bis die gemessenen Werte für Spannung und Strom in einem stabilen Wertebereich liegen. Im Durchschnitt liegt dieser Zeitraum bei einigen wenigen Sekunden, wonach der nächste Widerstandswert eingestellt und aufgenommen wird. Die gemessenen Werte für Spannung und Strom werden für jeden Widerstandswert gemittelt und diese Mittelwerte in der Tabelle eingetragen. Die Leistungswerte werden aus der Multiplikation der gemittelten Werte von Strom und Spannung berechnet.

Mess- ung Nr.	Eingestellt			Gemessen		Berechnet
	Widerstand 1	Widerstand 3	Gesamt-R	U	I	P
	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	V	A	W
1	-	-	$\infty$ (LL)	144,04	0	0
2	54	54	108	141,00	1,37	192,63
3	54	27	81	139,79	1,80	251,02
4	54	0	54	137,46	2,64	363,57
5	27	18	45	136,11	3,15	428,11
6	27	9	36	133,89	3,88	519,82
7	27	0	27	130,06	5,01	652,15
8	18	6	24	127,95	5,56	710,91
9	18	3,4	21,4	125,30	6,10	763,96
10	18	0	18	119,91	6,93	830,50
11	13,5	3,9	17,4	118,04	7,12	840,08
12	13,5	3,4	16,9	116,75	7,23	844,25
13	13,5	2,7	16,2	117,08	7,21	843,98

Tabelle 4.2: Eingestellte, gemessene und berechnete Werte bei STC-Messung

Die in Tabelle 4.2 angeführten Werte für U, I und P werden zur Erstellung der I/U- und P/U-Kennlinien verwendet. Der Vergleich mit den Werten des Simulink<sup>®</sup>-eigenen PV Array-Blocks (ebenfalls bei STC-Bedingungen) ist in Abbildung 4.24 dargestellt. Dabei beschreiben die blauen Graphen die Werte aus dem PV Array-Block, und die roten x-Marker die Mittelwerte der aufgenommenen Messpunkte im PHIL-Labor. Die Linien zwischen den Messpunkten sind linear interpoliert.

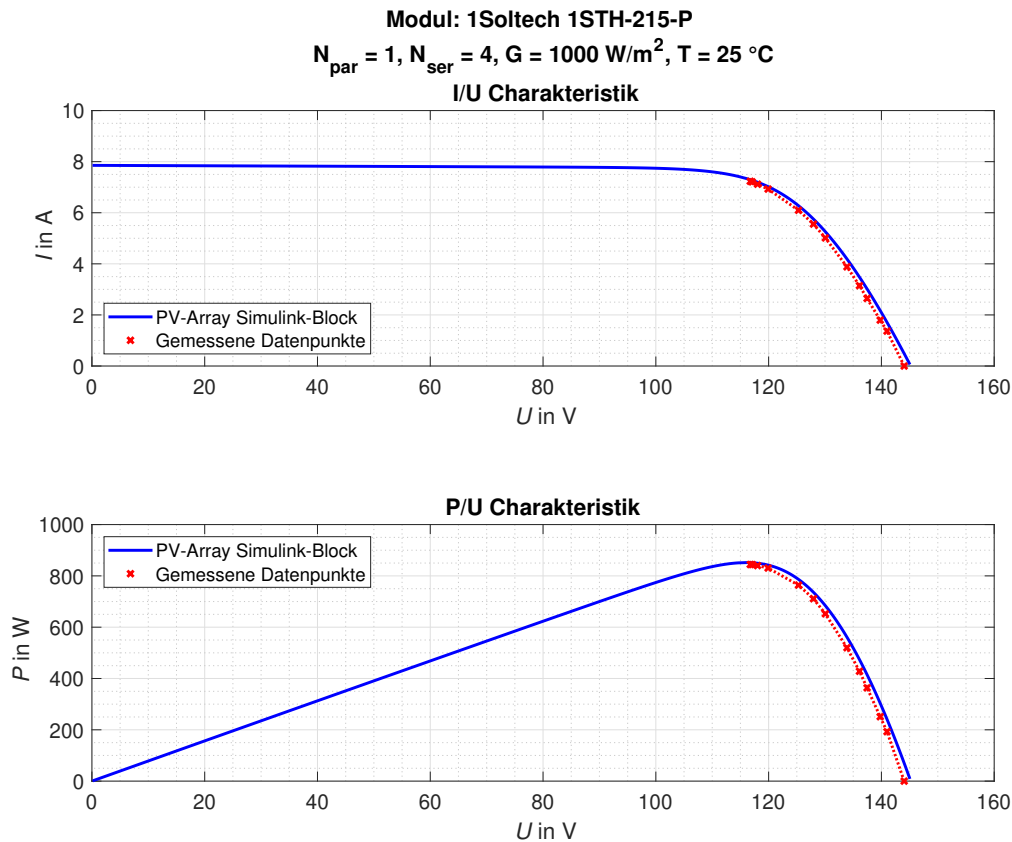


Abbildung 4.24: Messergebnisse bei Standard-Test-Bedingungen

In Abbildung 4.24 ist ersichtlich, dass sowohl die Daten der gemessenen I/U-Kennlinie als auch jene der P/U-Kennlinie sehr gut zu den Kennlinien des PV Array Blocks passen, die Genauigkeit unter Standard-Test-Bedingungen ist damit ausreichend gegeben. Die Tatsache, dass lediglich Messwerte vom Leerlaufpunkt ( $U_{OC}$ ) bis zum Punkt maximaler Ausgangsleistung (MPP) vorhanden sind, ist dadurch erklärbar, dass das Modell in diesem Bereich als Stromquelle fungieren müsste. In der I/U-Kennlinie ist erkennbar, dass sich im Bereich vom MPP bis hin zum Kurzschlusspunkt ( $I_{SC}$ ) der Strom des PV-Arrays nur geringfügig mit der Spannung ändert, was dem Verhalten einer Stromquelle gleicht. Da der verwendete Leistungsverstärker im Labor, zum Zeitpunkt der Messungen, nur im Spannungsquellenmodus betrieben werden kann, können vom Kurzschlusspunkt bis zum MPP keine Messwerte aufgenommen werden.

## Szenario 2

Als zweites Simulations-Szenario im Labor wird eine Einstrahlungsstärke von  $100 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  und eine Temperatur von  $75 \text{ }^\circ\text{C}$  verwendet. Wie bei der Messung in Standard-Test-Bedingungen werden verschiedene Widerstandswerte eingestellt, und die Spannung sowie der Strom des Modells am Leistungsverstärker gemessen. Daraus wird wiederum die Leistung berechnet um die I/U- und P/U-Kennlinie darzustellen. Abbildung 4.25 zeigt den Messaufbau im PHIL-Labor. Dabei ist zu erkennen, dass der Leistungswiderstand die Last des Leistungsverstärkers darstellt, wobei für diese Messungen ein anderer Typ Leistungswiderstand verwendet wird. Im Vergleich zu den zuletzt verwendeten Widerständen kann hier der Wert mittels Drehrad stufenlos eingestellt werden, wodurch direkt eine Punktwolke an Messwerten aufgenommen werden kann. Das hat zur Folge, dass die aufgenommenen Messwerte für die Kennlinien-Darstellung nicht mehr interpoliert werden müssen. Für die Messung bei STC-Bedingungen in Szenario 1 ist dies nicht möglich, da der geringste Widerstandswert des stufenlos einstellbaren Leistungswiderstandes über  $40 \Omega$  liegt und für die vorhergehenden Messungen auch kleinere Werte erforderlich sind. Des Weiteren wird der Schutzleiter-Anschluss des Leistungswiderstandes über die gelbe Messstrippe mit der Anschlussbox verbunden. Das Datenblatt des Leistungswiderstandes befindet sich im Anhang (B.2).

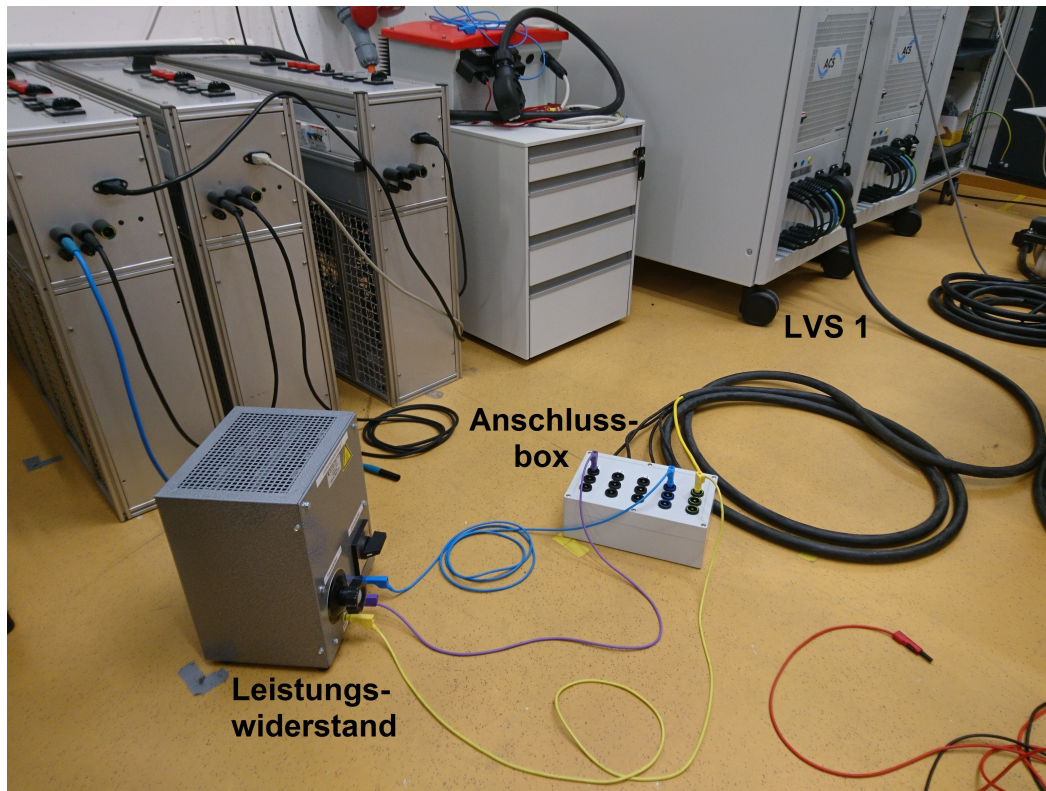


Abbildung 4.25: Messaufbau bei geringer Einstrahlung und hoher Temperatur



Abbildung 4.26 zeigt die I/U- und P/U-Kennlinien-Messergebnisse der Simulation von 4 seriellen 1Soltech 1STH-215-P Modulen bei  $100 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  und  $75 \text{ }^\circ\text{C}$ . Wie im ersten Messszenario werden die gemessenen Daten mit jenen aus dem Simulink® PV Array-Block verglichen. Die Daten des Simulink®-Blocks sind in blau dargestellt, während die gemessenen Daten aus dem Labor in rot abgebildet sind.

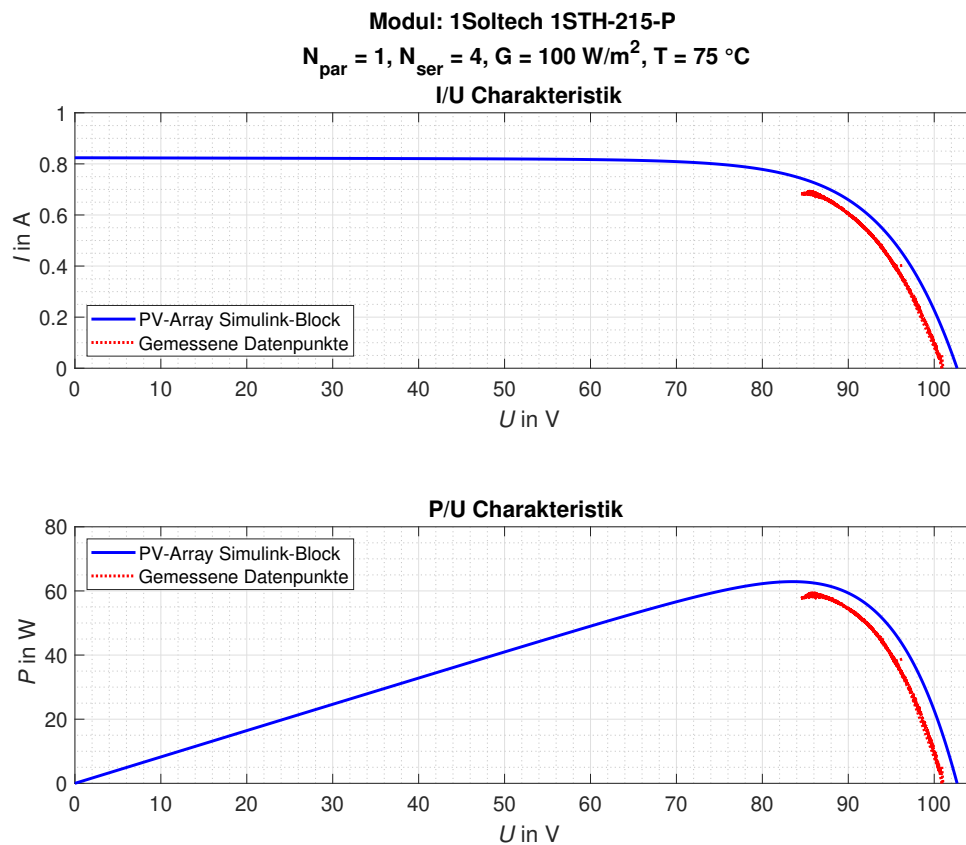


Abbildung 4.26: Messergebnisse bei geringer Einstrahlung und hoher Temperatur

Wie bereits erwähnt, liefert die Messung mit dem stufenlos regelbaren Leistungswiderstand eine Punktwolke an Messdaten, wodurch keine Interpolation zwischen den Messwerten notwendig ist. Analog zur ersten Messung ist wiederum nur die Simulation vom Leerlaufpunkt bis hin zum MPP möglich. In diesem Bereich ist erkennbar, dass die Form der Kennlinien mit den Simulink®-Daten übereinstimmt. Die Genauigkeit ist hierbei im Vergleich zu den Standard-Test-Bedingungen etwas geringer, was sich durch die Tatsache, dass die Messung im „Worst-Case-Punkt“ mit großem Unterschied zu den STCs erfolgt, erklären lässt. Hierbei sei erwähnt, dass der Simulink®-PV-Array-Block auf dem 1-Dioden-Ersatzschaltbild basiert, und somit eine exaktere Nachbildung einer realen PV-Zelle bildet, als das im Labor verwendete vereinfachte Ersatzschaltbild.

Durch die Verringerung der Einstrahlungsstärke und die Erhöhung der Temperatur sind sowohl die Werte der Leerlaufspannung  $U_{OC}$  als auch jene des Kurzschlussstromes  $I_{SC}$  deutlich geringer als bei Standard-Test-Bedingungen.

#### 4.10.2 Messungen mit PV-Wechselrichter

Zusätzlich zu den Messungen mit Leistungswiderständen, die das Modell belasten, soll auch der Betrieb an einem realen PV-Inverter erprobt werden. Der hierfür verwendete Wechselrichter, ist der im Labor vorhandene SMA SunnyBoy SB 1200 [21]. In Abbildung 4.27 ist der Aufbau der Messung schematisch dargestellt. Dabei wird das PV-Modell durch Echtzeitrechner und Leistungsverstärker 1 verkörpert (Simulation des vereinfachten Modells). Dieser ist mit dem Gleichspannungseingang des Wechselrichters verbunden. Der netzseitige Ausgang des Inverters ist mit dem zweiten Leistungsverstärker gekoppelt, mit welchem das Netz, in Form einer idealen Spannungsquelle, simuliert wird. Hier wird das bereits vorhandene Netzmodell des PHIL-Labors verwendet. An dieser Stelle sei erwähnt, dass beide Leistungsverstärker mit dem Echtzeitsystem verbunden sind und darüber angesteuert werden. Abbildung 4.27 zeigt den vereinfachten schematischen Aufbau ohne Darstellung des Echtzeitsystems. Generell soll im Zuge dieser Messung lediglich die Funktionsfähigkeit des PV-Wechselrichters in Kombination mit dem erstellten Modell sowie dem simulierten Netz überprüft werden.

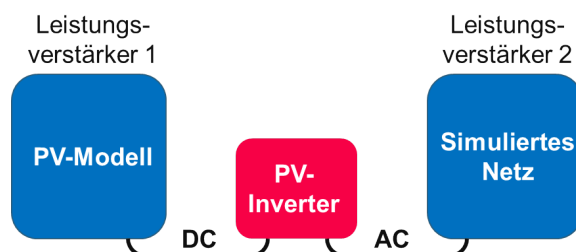


Abbildung 4.27: Schematischer Aufbau mit dem PV-Wechselrichter

In Abbildung 4.28 ist der reale Messaufbau im Labor mit dem Wechselrichter SMA SB 1200 ersichtlich. Wie im Schema beschrieben, ist Leistungsverstärker 1 (der linke LVS in Abbildung 4.28) über Anschlussbox 1 mit dem DC-Eingang des Inverters (Kombianschluss mit blauem, grünem und schwarzem Draht) verbunden. Die Ausgangsseite des Wechselrichters (violetter und blaues Kabel auf der linken Seite des PV-Wechselrichters) ist über Anschlussbox 2 mit dem rechten der beiden Leistungsverstärker im Bild (LVS 2) gekoppelt.

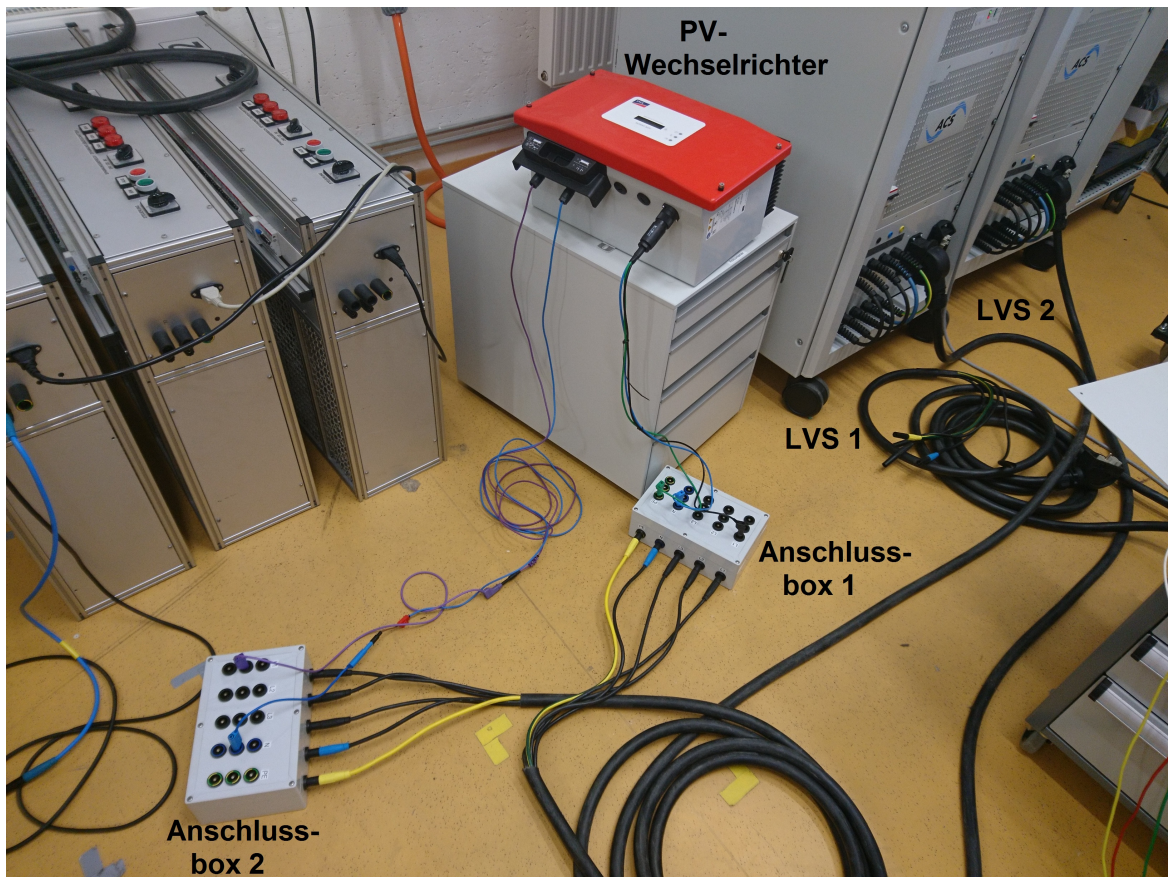


Abbildung 4.28: Messaufbau beim Versuch mit SMA SB 1200 Wechselrichter

Zu den Messergebnissen mit dem realen PV-Wechselrichter kann gesagt werden, dass dieser im Zuge der Messung selbstständig den Punkt maximaler Ausgangsleistung (Anzeige am Display: MPP-Suche) eruiert, und danach in diesem operiert. Damit kann geschlussfolgert werden, dass der Inverter das PV-Modell als reales PV-Array behandelt, womit die Funktionsfähigkeit des erstellten Modells abermals bestätigt wird.

## 4.11 Stromquellen-Modell

Gegen Ende der Untersuchungen dieser Arbeit wurde die Testversion der Stromquellen-Lizenz für die Leistungsverstärker des PHIL-Labors freigeschaltet. Dies ermöglicht weitere Messungen zur Verifizierung des Modells. Dabei können nun auch die bisher nicht simulierbaren Bereiche der I/U- und P/U-Charakteristik, in denen das Modell eine Stromquelle darstellt, vermessen und somit noch aussagekräftigere Angaben zur Modellfunktionalität getroffen werden.

## 4.12 Simulink®-Modell zu den Stromquellen-Messungen

Da die I/U-Kennlinie einer PV-Zelle am Beginn (Kurzschlusspunkt in Richtung des MPP) sehr flach ist und sich der Strom nur geringfügig mit der Spannung ändert, muss das Modell in diesem Bereich als Stromquelle fungieren. Aufgrund der Tatsache, dass der Leistungsverstärker nur als Spannungsquelle oder als Stromquelle betrieben werden kann, das heißt eine Umschaltung im Betrieb ist nicht möglich, muss das gesamte Simulink®-Modell des PV-Arrays eine Stromquelle darstellen, womit das in den vorhergehenden Kapiteln erstellte Modell abgeändert wurde.

Für die Messungen wird das bis hierhin verwendete Simulink®-Modell so umgeformt, dass der Strom den Ausgang und die Spannung den Eingang des Simulink®-Modelles bildet, das heißt das PV-Array wird durch eine Stromquelle simuliert. Das entspricht den ersten Untersuchungen zum 1-Dioden-Modell in 4.5, wobei jedoch das vereinfachte Ersatzschaltbild modelliert wird. Formel 4.31 zeigt die bereits beim vereinfachten Modell gezeigte Gleichung des Stromes der PV-Zelle in Abhängigkeit der Spannung. Gleichung 4.32 zeigt die Formel zur Simulation mehrerer PV-Module, analog zu den Erklärungen in Kapitel 4.8.

$$I = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{U+I \cdot R_{PV}}{\alpha}} - 1 \right) \quad (4.31)$$

$$I = N_{par} I_{ph} - N_{par} I_0 \left( e^{\frac{U+I \cdot R_{PV} \cdot \frac{N_{ser}}{N_{par}}}{\alpha N_{ser}}} - 1 \right) \quad (4.32)$$

Die oben gezeigte Formel wird durch das in Abbildung 4.29 dargestellte Modell simuliert. Hierbei ist zu erwähnen, dass das gesamte Modell prinzipiell jenem aus Kapitel 4.8 entspricht. Der einzige Unterschied liegt darin, dass nun die Spannung den Eingang des Modells bildet, und der Strom des PV-Arrays den Ausgang.



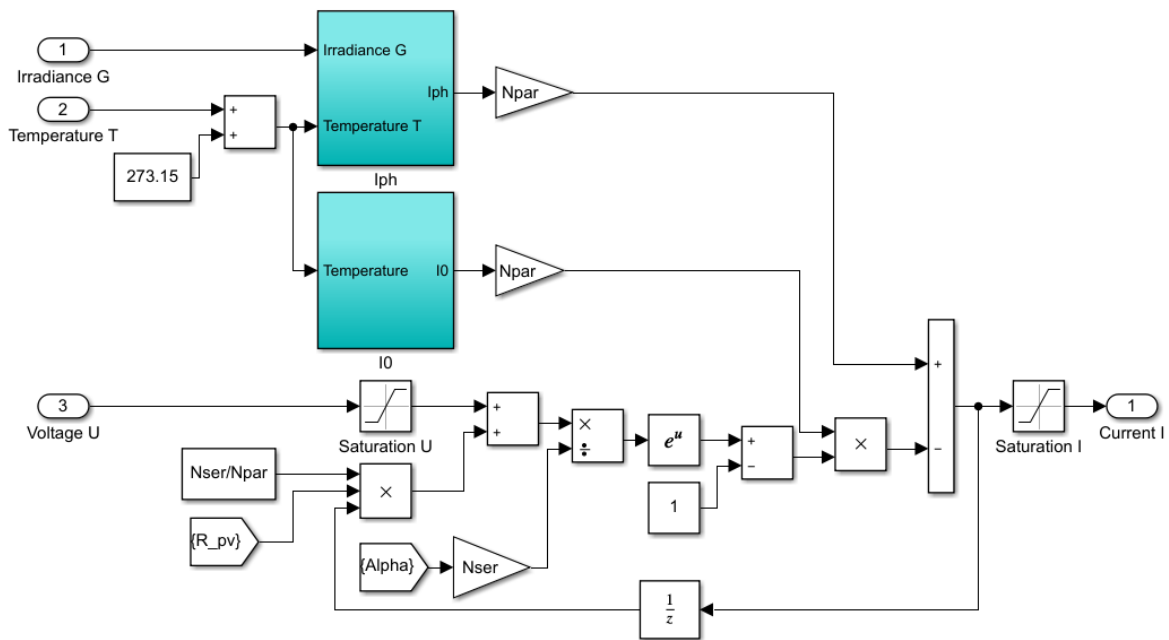


Abbildung 4.29: Simulink®-Modell für die Messungen als Stromquelle

Laut Formel 4.32 ist der Strom von sich selbst abhängig (dieser kommt sowohl auf der linken als auch der rechten Seite der Gleichung vor), was durch die Rückkopplung im Modell implementiert wird. Aufgrund dieser Rückkopplung und der Tatsache, dass Algebraische Schleifen vermieden werden müssen, da sie nicht am Echtzeitrechner ausführbar sind, wird der oben ersichtliche Verzögerungsblock eingefügt. Anhand der durchgeführten Messungen soll ermittelt werden, ob dies auch hier, wie in Kapitel 4.7, zu Oszillationen und einem instabilen Modell führt. Da für diese Untersuchungen lediglich Eingang und Ausgang des Simulink®-Modells „vertauscht“ werden, wird an dieser Stelle nicht näher auf das Modell selbst oder die Ermittlung der Modellparameter eingegangen, diese unterscheiden sich nicht von den Ausführungen zum vereinfachten Modell als Spannungsquelle.

### 4.13 Verifizierung des Stromquellen-Modells

Mit den folgenden Messungen sollen die Funktionsfähigkeit und Genauigkeit des Stromquellen-Modells ermittelt werden. Der hierbei verwendete Messaufbau ist in Abbildung 4.30 schematisch dargestellt. Der Unterschied zum Schema in Abbildung 4.22 liegt in den Ein- und Ausgangswerten des Echtzeitrechners. In diesem Fall werden die Stromwerte vorgegeben und die intern gemessenen Spannungswerte im eingebundenen Modell am Echtzeitrechner verarbeitet. Dabei werden nur die Größen der Phase 1 verwendet, die übrigen Werte werden im Echtzeitsystem terminiert. In der schematischen Abbildung 4.30 fungiert der Widerstand  $R$  als Last und ist mit den Klemmen L1 und N des Leistungsverstärkers verbunden.

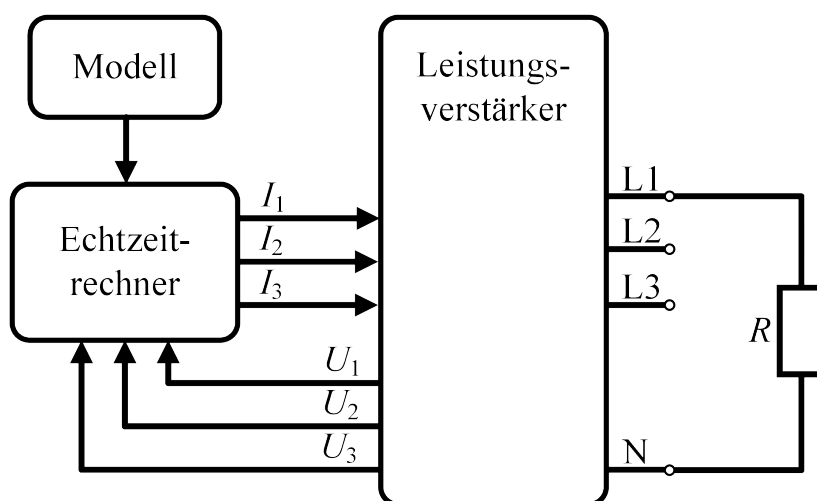


Abbildung 4.30: Schematischer Messaufbau mit Stromquellen-Modell und  $R$  als Last

Bei den folgenden Messungen wird wiederum der Modultyp 1Soltech 1STH-215-P bei einem parallelen Strang ( $N_{par} = 1$ ) und 4 seriellen Modulen ( $N_{ser} = 4$ ) simuliert, und die Ergebnisse mit jenen aus dem Simulink<sup>®</sup>-PV-Array-Block verglichen. Der entscheidende Aspekt liegt in den folgenden Fragestellungen. Können durch die Modellierung als Stromquelle die vollständigen Kennlinien vermessen werden? Kommt es durch die Verzögerung in der Rückkopplung zu Oszillationen bzw. einem instabilen Verhalten? Bestehen Unterschiede im Vergleich zum Spannungsquellen-Modell? Dies wird in den folgenden Abschnitten untersucht und eruiert.

### 4.13.1 Messungen mit Lastwiderständen

In der ersten Messreihe wird das Modell mit einem Leistungswiderstand belastet, wie in Abbildung 4.30 schematisch dargestellt. Anhand des eingestellten Widerstandswertes können der Strom und die Spannung gemessen, sowie die Kennlinien erstellt werden. Der Modellaufbau ähnelt jenem in Kapitel 4.10.1. In diesem Fall wird Leistungsverstärker 2 (LVS 2) verwendet, dort ist die Stromquellen-Funktion aktiviert, und es wird nur 1 Leistungswiderstand als Last verwendet. Abbildung 4.31 zeigt den Aufbau im Labor.



Abbildung 4.31: Messaufbau bei der Messung mit Lastwiderstand

In Tabelle 4.3 sind die eingestellten, gemessenen und berechneten Werte zur Messung unter Standard-Test-Bedingungen ( $1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ ,  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ) aufgelistet. Dabei werden die aufgenommenen Werte für Spannung und Strom gemittelt und aus der Multiplikation dieser die Leistung berechnet. Für den Widerstand werden die einstellbaren Werte laut Datenblatt verwendet, welches im Anhang (B.1) ersichtlich ist. Bei Messung Nr. 1 handelt es sich um den Leerlauf, das heißt zu diesem Zeitpunkt ist der Widerstand inaktiv und beträgt  $\infty \Omega$ . Bei Messung Nr. 29 handelt es sich um den Kurzschlussfall, das heißt zu diesem Zeitpunkt ist der Widerstand  $0 \Omega$ . Die Tatsache, dass der Strom (und damit auch die Leistung) im Leerlauf negativ ist, sowie die gemessene Spannung (und die Leistung) im Kurzschlussfall ungleich  $0 \Omega$  sind, lässt sich durch das vorhandene Rauschen und Messungenauigkeiten erklären.

Messung Nr.	Eingestellt	Gemessen		Berechnet
	Widerstand $\Omega$	U V	I A	P W
1	$\infty$ (LL)	143,41	-0,01	-1,71
2	54	137,76	2,66	366,92
3	27	129,92	4,96	644,72
4	18	118,85	6,74	801,28
5	13,5	96,87	7,35	711,89
6	10,8	76,93	7,32	563,43
7	9,0	64,53	7,41	478,38
8	7,7	55,08	7,39	407,10
9	6,8	48,73	7,44	362,72
10	6,0	43,12	7,41	319,32
11	5,4	39,19	7,46	292,18
12	4,9	35,71	7,46	266,38
13	4,5	33,05	7,49	247,64
14	4,2	30,59	7,53	230,22
15	3,9	28,50	7,53	214,52
16	3,6	26,28	7,44	195,60
17	3,4	24,82	7,46	185,08
18	3,0	22,01	7,41	163,07
19	2,6	18,97	7,36	139,59
20	2,3	16,54	7,36	121,83
21	2,0	14,87	7,37	109,53
22	1,8	13,38	7,37	98,57
23	1,6	12,38	7,40	91,62
24	1,5	11,43	7,38	84,34
25	1,4	10,57	7,33	77,56
26	1,3	9,93	7,35	72,99
27	1,2	9,26	7,36	68,15
28	1,1	8,66	7,37	63,81
29	0 (KS)	0,76	7,41	5,62

Tabelle 4.3: Eingestellte, gemessene und berechnete Werte bei STC-Messung

Die in Tabelle 4.3 angeführten Werte für  $U$ ,  $I$  und  $P$  werden zur Erstellung der  $I/U$ - und  $P/U$ -Kennlinien verwendet. Der Vergleich mit den Werten des Simulink®-Blocks PV-Array (ebenfalls bei STC-Bedingungen) ist in Abbildung 4.32 dargestellt. Dabei beschreiben die blauen Graphen die Werte aus dem Simulink®-eigenen PV-Array Block, und die roten x-Marker die aufgenommenen Messpunkte im PHIL-Labor. Die Linien zwischen den Messpunkten werden mithilfe des MATLAB®-Befehls „spline()“ interpoliert.

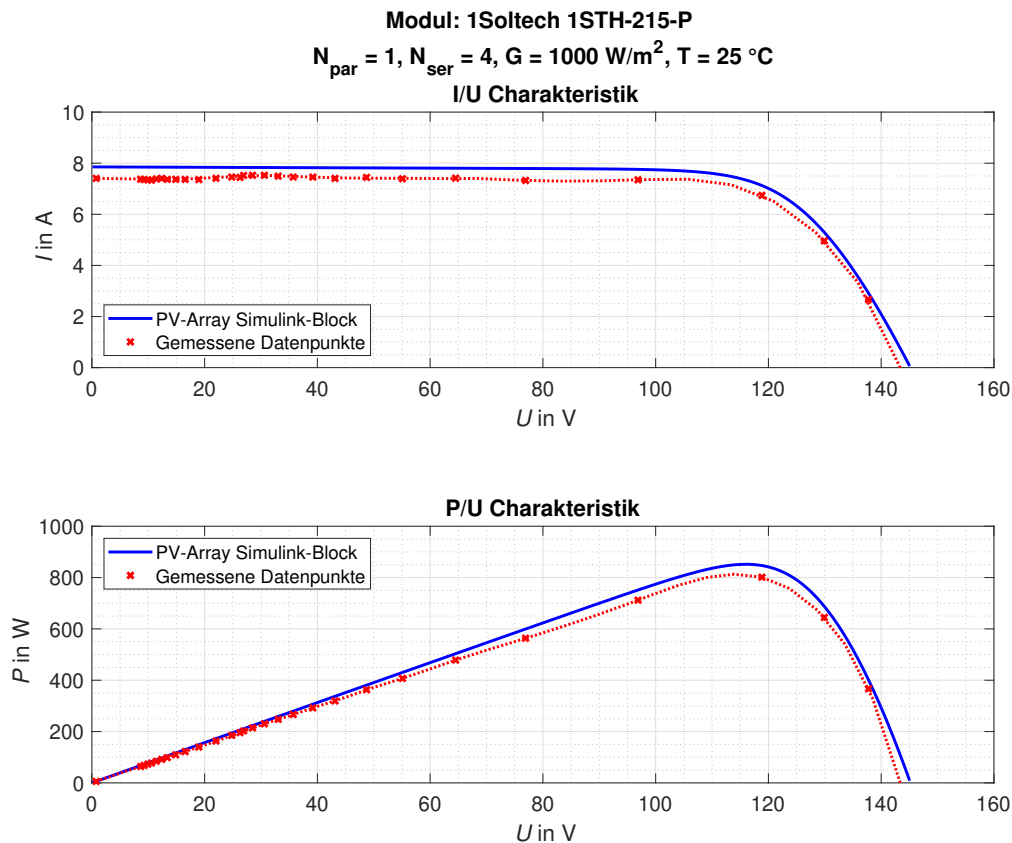


Abbildung 4.32: Messergebnisse mit Lastwiderständen bei Standard-Test-Bedingungen

Wie in den Kennlinien ersichtlich, gibt es lediglich geringe Abweichungen zwischen den gemessenen Werten und jenen des PV-Array Simulink®-Blocks, generell passen beide Verläufe sehr gut zusammen. Im Vergleich zu den Messungen mit dem Spannungsquellen-Modell (Abbildung 4.24) gelingt nun eine Messung der gesamten Kennlinie vom Leerlaufpunkt bis hin zum Kurzschlusspunkt. Im Bereich, in dem für beide Modelle Messwerte existieren, ist die Abweichung zu den Simulink®-Block Werten beim Spannungsquellen-Modell geringer. Dort sind die beiden Kurven annähernd deckungsgleich, wohingegen beim Stromquellen-Modell die Unterschiede erkennbar sind.

Da beide Modelle die gleichen Parameter besitzen und sich lediglich durch den Aufbau von Ein- und Ausgang unterscheiden, wird die Ursache der Unterschiede zum Einen durch den Verzögerungsblock in der Rückkopplung, und zum Anderen schlichtweg in Messungenauigkeiten vermutet, welche im weiteren Verlauf noch genauer beschrieben werden.

### 4.13.2 Messungen mit Leistungsverstärker

In der zweiten Messreihe wird das Modell mit der idealen Spannungsquelle des Leistungsverstärkers 1 belastet, und anhand des eingestellten Spannungswertes können der Strom und die Spannung am LVS 2 gemessen, sowie die Kennlinien erstellt, werden. Der schematische Aufbau gleicht jenem aus Abbildung 4.30, mit dem Unterschied, dass die Last durch die ideale Spannungsquelle am LVS 1 realisiert wird. Der Modellaufbau ist in Abbildung 4.33 dargestellt. Hierbei werden zwei Szenarien aufgenommen, zunächst unter Standard-Test-Bedingungen und danach bei einer Einstrahlungsstärke von  $100 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  und einer Temperatur von  $75 \text{ }^\circ\text{C}$ , eine in der Realität eher unübliche Kombination, die jedoch eine Art Worst-Case-Szenario darstellt.



Abbildung 4.33: Messaufbau bei der Messung mit beiden Leistungsverstärkern

### Szenario 1: Messung bei STC

Abbildung 4.34 zeigt die I/U- & P/U-Kennlinie der Messung bei Standard-Test-Bedingungen mit dem zweiten Leistungsverstärker (LVS 1) als Last. Die PV-Array Simulink®-Block Werte sind in blau dargestellt, während die gemessenen Daten in rot gekennzeichnet sind. Die eingestellten Werte für die Spannung von LVS 1 werden dabei zunächst in 10 V Schritten und im Bereich des MPP in kleineren Abständen erhöht, die Spannung und der Strom von LVS 2 (mit welchem das PV-Modell simuliert wird) werden dabei gemessen, gemittelt und im Anschluss in die Diagramme eingetragen. Auf eine tabellarische Auflistung der ermittelten Werte wird an dieser Stelle verzichtet, da die Werte sehr ähnlich zu jenen aus dem vorhergehenden Versuch sind, und auch aus den Kennlinien herausgelesen werden können. In den Bereichen zwischen den Messwerten wird eine lineare Interpolation durchgeführt, um die Kennlinien zu vervollständigen.

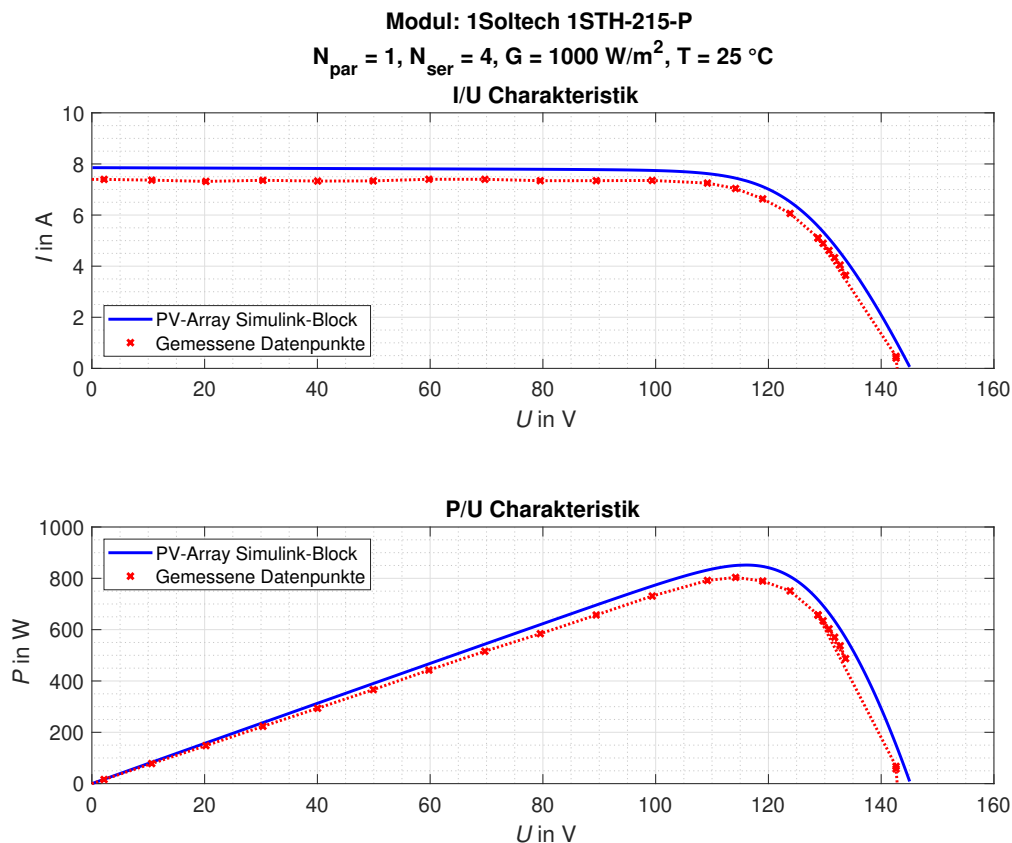


Abbildung 4.34: Messergebnisse mit idealer Spannungsquelle bei Standard-Test-Bedingungen

Die Ergebnisse dieser Messung sind vergleichbar mit jenen aus dem STC-Versuch mit Widerstandslast (Abschnitt 4.13.1), die interpolierten Kennlinien unterscheiden sich kaum. Wie bei den Messungen mit den Widerständen gibt es auch hier geringe Unterschiede zu den PV-Array Simulink®-Block Charakteristiken. Um diesen Umstand zu erklären, sind in Abbildung 4.35a & 4.35b die gemessenen Spannungen und Ströme von LVS 2 (auf welchem das PV-Modell implementiert ist) während der Simulation dargestellt.

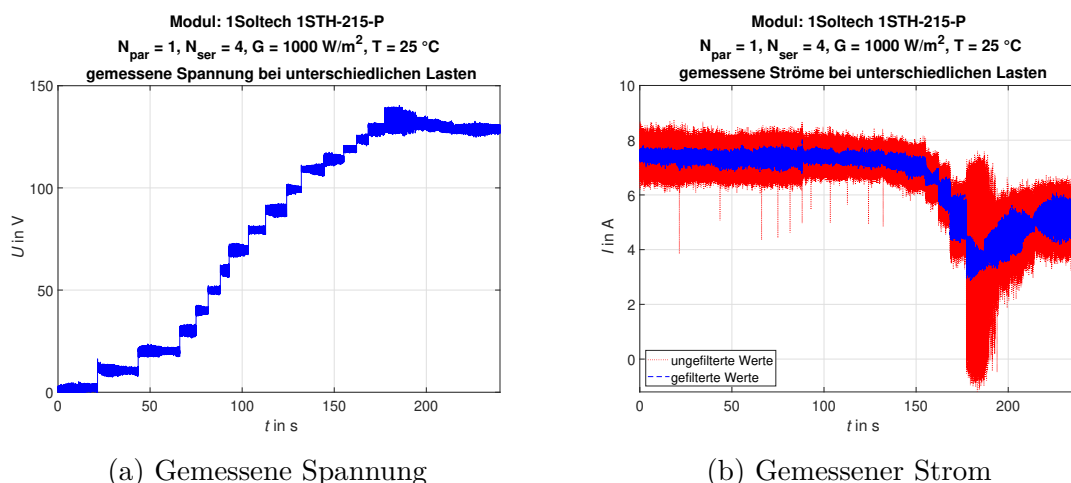


Abbildung 4.35: Gemessene Werte während der Simulation

Im Verlauf der Spannung ist ersichtlich, dass diese im Zuge der Messungen, durch die Erhöhung des eingestellten Wertes der Spannungsquelle am LVS 1, schrittweise größer wird. Dabei ist deutlich eine Oszillation der Messwerte durch das Modell selbst sowie ein Rauschen erkennbar. Vereinfacht gesagt versucht das Modell den Ausgang permanent „nachzuregulieren“ um den für den Arbeitspunkt erforderlichen Ausgangswert einzustellen. In Abbildung 4.35b sind der Rohwert des gemessenen Stromes am LVS 2 in rot, sowie der bereits gefilterte Wert (250 Hz IIR-Filter im übergeordneten PHIL-Modell) des Stromes in blau dargestellt. Der Verlauf des gefilterten Stromes weist zwar bereits eine deutliche Verringerung der Oszillationen und des Rauschens auf, diese sind jedoch auch hier noch vorhanden und deutlich erkennbar. An dieser Stelle sei erwähnt, dass diese Oszillationen in gewissem Maße auch bei den Spannungsmodell-Messungen auftreten, und es nicht möglich ist, eine Aussage darüber zu treffen, ob diese durch das Stromquellen-Modell vergrößert werden. Die Vergleiche der beiden Modelle in Simulink® liefern das Ergebnis, dass keine Unterschiede in den beiden Kennlinien zu erkennen sind. Im Zuge der Messungen ist es jedoch möglich, dass der Verzögerungsblock in der Rückkopplung eine Auswirkung auf die Schnelligkeit des Modells und damit auch auf die Messwerte hat. Die Genauigkeit der Kennlinien im Vergleich zu den Daten des PV-Array Simulink®-Blocks ist jedoch generell sehr gut und ausreichend gegeben.



## Szenario 2

Das Szenario der zweiten Messung mit dem Leistungsverstärker als Last beinhaltet die Simulation einer Einstrahlungsstärke von  $100 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  und einer Temperatur von  $75 \text{ }^\circ\text{C}$ . Die Spannung des LVS 1 (Last-LVS) wird wiederum schrittweise von 0 bis zum Leerlaufpunkt erhöht, und die Werte für Spannung und Strom von LVS 2 (PV-Modell) gemessen, sowie gemittelt. Die daraus ermittelten Werte sind in folgender Abbildung 4.36 ersichtlich. In blau sind die Daten des PV-Array Simulink® Blocks dargestellt und in rot die Werte der Messungen im PHIL-Labor. Die Kennlinie wird durch stückweise kubische Interpolation (MATLAB® Befehl „interp1()“ mit Methode 'pchip') mit Ausnahme der Ausreißer der gemessenen Werte erstellt. Für die Ermittlung der Leistungs-Kennlinie werden die Strom- und Spannungswerte multipliziert.

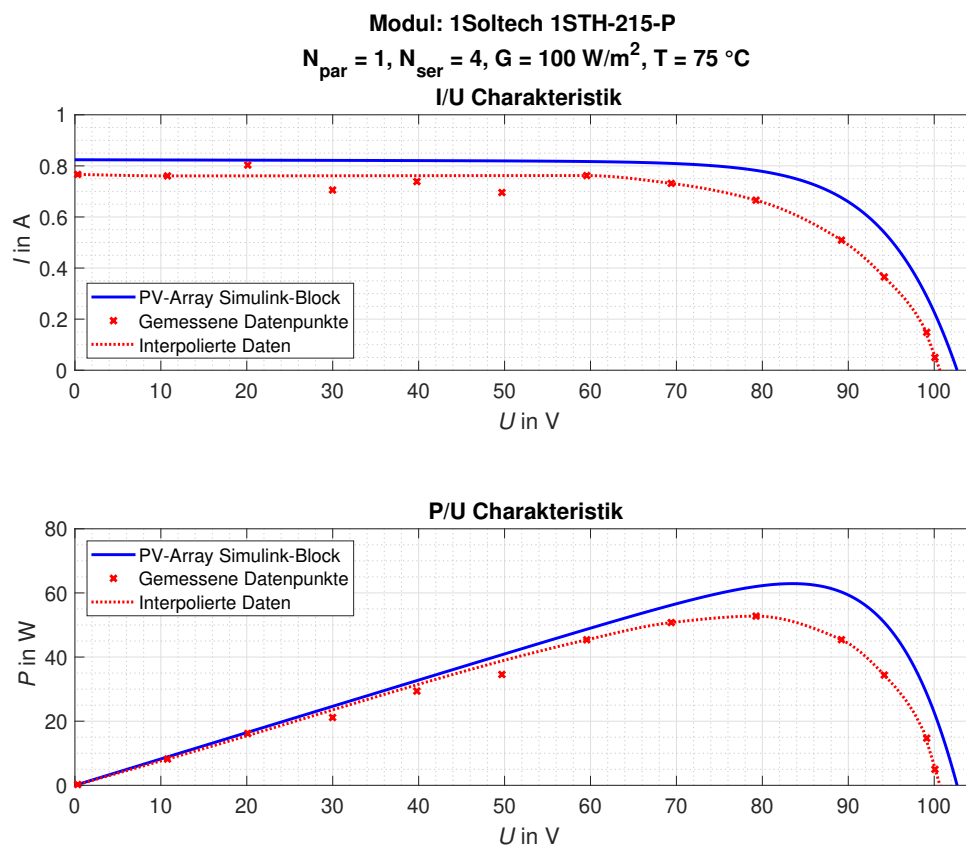
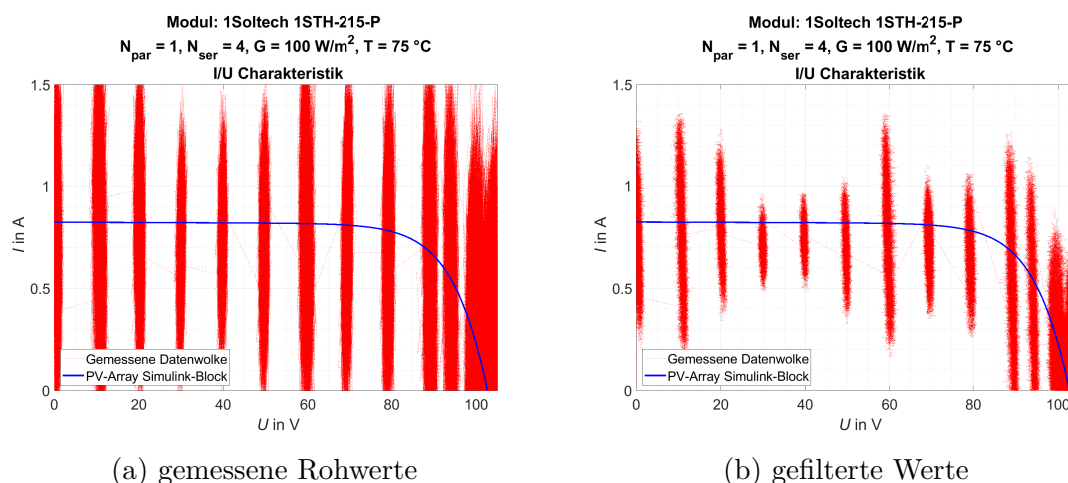


Abbildung 4.36: Messergebnisse mit Leistungsverstärker bei  $100 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  und  $75 \text{ }^\circ\text{C}$

Wie bereits bei den Messungen des Spannungsquellen-Modells gibt es auch hier größere Abweichungen im Vergleich zu den Simulink<sup>®</sup>-Block-Daten. Das liegt daran, dass die Einstrahlungsstärke sehr klein und die Temperatur sehr hoch ist, das heißt die Messbedingungen liegen sehr weit von den Standard-Test-Bedingungen entfernt, in welchen das Modell generell parametrisiert wird. Des Weiteren liegen die Stromwerte hier in einem Bereich unter 1 A, womit die vorliegenden Messungenauigkeiten und das Rauschen einen größeren Einfluss auf die Messergebnisse haben. Um dies zu verdeutlichen, sind in Abbildung 4.37 die I/U-Kennlinien mit den nicht gemittelten Messwerten dargestellt. In blau sind jeweils die PV-Array Simulink<sup>®</sup>-Block Daten ersichtlich, während die roten Punktwolken die gemessenen Daten im Labor zeigen. Die Werte in Abbildung 4.37a beschreiben die gemessenen Rohwerte, während in Abbildung 4.37b die durch den 250 Hz IIR-Filter des Stromes ermittelten Werte verwendet werden.



(a) gemessene Rohwerte

(b) gefilterte Werte

Abbildung 4.37: Messdaten der I/U-Kennlinie

Der Vergleich der Punktwolken mit den Simulink<sup>®</sup>-Daten macht die Streuung der Messwerte deutlich und zeigt, dass die Filterung eine eindeutige Verbesserung bewirkt. Dennoch sind die maximalen Abweichungen auch in Abbildung 4.37b noch signifikant. In Anbetracht dessen liefern die gemittelten Kennlinien in Abbildung 4.36 ein gutes Ergebnis im Vergleich zu den Daten des PV-Array Simulink<sup>®</sup>-Blocks.

Damit kann in Bezug auf die Messungen des Photovoltaiksystem-Modells resümiert werden, dass die Genauigkeit sowohl in Bezug auf die Simplizität des Modells, anhand der Verwendung des vereinfachten Ersatzschaltbildes, als auch aufgrund der schnellen und komfortablen Parametrierung, als ausreichend hoch einzustufen ist. Die Funktionsfähigkeit beider Aufbauvarianten (Modell als Spannungsquelle und Modell als Stromquelle) ist in jedem Fall gegeben, womit die Basis für mögliche weitere Untersuchungen gelegt ist.

# 5 Modellierung von Energiespeichersystemen

Im folgenden Kapitel wird die Vorgehensweise bei der Modellierung von Energiespeichersystemen näher beschrieben. Der erste Abschnitt beschäftigt sich mit den Modellvoraussetzungen, sowie der Entscheidung welche Art von Energiespeicher simuliert werden soll. Danach wird der zugrundeliegende physikalische Aufbau des ausgewählten Energiespeicher-Typs erläutert. Im Anschluss daran werden die Modellauswahl, der detaillierte Aufbau des Modells und die Parametrierung näher beschrieben. Die Funktionsfähigkeit und Genauigkeit des erstellten Modells werden im PHIL-Labor ermittelt, wobei die gemessenen Werte mit jenen aus den Simulationen des Simulink®-Batterie-Blocks verglichen werden. Dieser kann im Labor nicht verwendet werden, da durch den Block lediglich 1 Zelle simuliert wird und eine Verschaltung einer Vielzahl von Blöcken zu einem immensen Rechenaufwand führen würde.

## 5.1 Modellvoraussetzungen

Für die Erstellung des Energiespeicher-Modells gelten prinzipiell die gleichen Voraussetzungen wie für das Photovoltaiksystem aus Kapitel 4. Für den Einsatz im PHIL-Labor ist es unabdinglich, dass das Modell echtzeitfähig ist und damit keine algebraischen Schleifen enthält. Des Weiteren muss die Parametrierung des Modells lediglich anhand der Informationen aus dem Datenblatt möglich sein, da im PHIL-Labor kein realer Batteriespeicher vorhanden ist. Im Unterschied zum PV-Modell soll die Umgebungstemperatur bei den Simulationen nicht berücksichtigt werden. Es wird angenommen, dass sich der simulierte Batteriespeicher in einer temperierten Umgebung befindet und keinen Temperaturschwankungen ausgesetzt ist. Die Temperaturänderungen im Inneren des Speichers aufgrund der Lade- und Entladevorgänge sollen hingegen ermittelt und in der Modellbildung berücksichtigt werden.

Laut den Informationen der DOE OE Global Energy Storage Database werden in annähernd 2/3 der elektrochemischen Kraftwerke Lithium bzw. Lithium-Ionen Energiespeicher verwendet [22]. Daher wird in den folgenden Kapiteln die Modellbildung von Lithium-Ionen Batterien implementiert und verifiziert.

## 5.2 Physikalischer Aufbau einer Lithium-Ionen Zelle

Im Allgemeinen wird bei elektrochemischen Energiespeichern zwischen primären und sekundären Elementen unterschieden. Primärbatterien können lediglich einmalig entladen werden, während es sich bei Sekundärbatterien oder -akkumulatoren um Energiespeicher handelt, die wiederholt entladen und aufgeladen werden können [23]. Eine Batterie besteht hierbei aus mehreren miteinander verbundenen Zellen. Im Folgenden wird der grundsätzliche physikalische Aufbau von sekundären Lithium-Ionen Batteriezellen näher erläutert, welcher in Abbildung 5.1 ersichtlich ist. Die Erklärungen erfolgen am Beispiel einer  $\text{LiCoO}_2$ -Zelle.

Diese besteht im Grunde aus zwei Elektroden und einem ionenleitenden Elektrolyt mit einer Membran, dem sogenannten Separator, zur Verhinderung eines Kurzschlusses zwischen den beiden Elektroden [23]. Beim Entladevorgang werden die Lithium-Ionen aus der Gitterstruktur an der negativen Elektrode (Anode aus Kupfer) ausgelagert, wobei Elektronen abgegeben werden [24]. Während die Ionen durch das Elektrolyt und den Separator zur positiven Elektrode (Kathode aus Aluminium) wandern und dort in das Metallgitter eingelagert werden, fließen die Elektronen über eine äußere elektrische Verbindung zur positiven Elektrode [25]. Der Ladevorgang erfolgt genau umgekehrt, das heißt die Lithium-Ionen wandern durch das Elektrolyt von der positiven zur negativen Elektrode, die Elektronen über den äußeren Stromkreis.

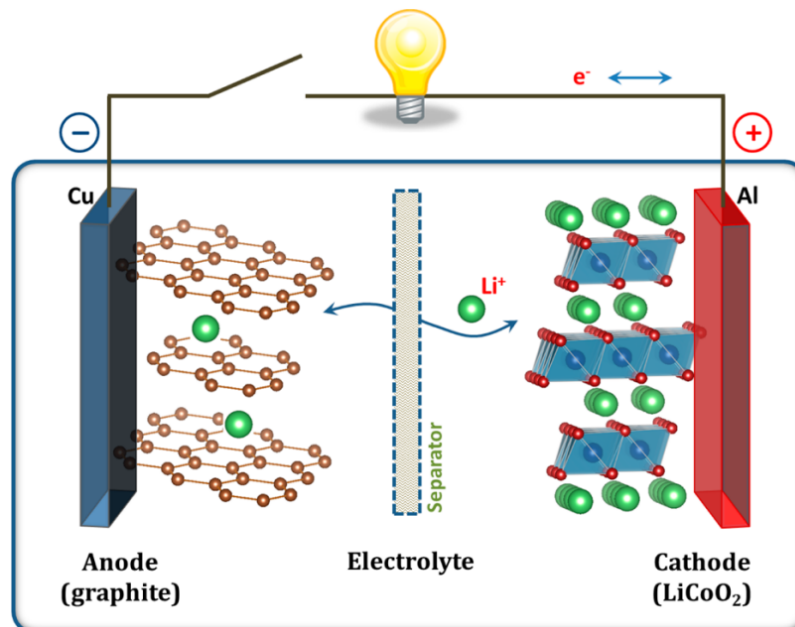


Abbildung 5.1: Physikalischer Aufbau einer Lithium-Ionen Zelle [2]

## 5.3 Modellauswahl

Es gibt eine Vielzahl verschiedener elektrischer Modelle bzw. Ersatzschaltbilder zur Simulation des Verhaltens von Lithium-Ionen Batterien. Im Folgenden werden zwei dieser Ersatzschaltbilder vorgestellt und miteinander verglichen, woraufhin das für die Simulationen im PHIL-Labor passendere der beiden implementiert wird.

### 5.3.1 Thevenin Modell

Ein einfaches Ersatzschaltbild, das häufig zur Modellierung von Batterien verwendet wird, ist das in Abbildung 5.2 dargestellte Thevenin Modell. Wie ersichtlich, besteht es aus einer Spannungsquelle ( $OCV = \text{Open Circuit Voltage}$ ), dem Innenwiderstand  $R_{Int}$ , sowie einer RC-Parallelschaltung aus  $R_1$  und  $C_1$  zur Beschreibung des grundlegenden Ladungsübertragungsverhaltens [26]. Die Batteriespannung und der Lade- bzw. Entladestrom sind mit  $U_{Batt}$  und  $I_{Batt}$  gekennzeichnet. In der Literatur werden auch modifizierte Ersatzschaltbilder dieses Modells zur Verbesserung der Genauigkeit verwendet, z.B. mit mehreren RC-Gliedern oder einer sogenannten Warburg-Impedanz, wie in [27] und [28] beschrieben.

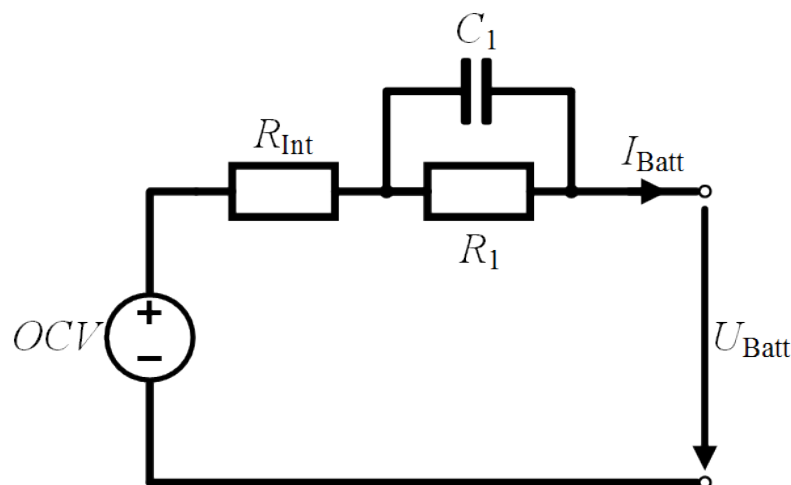


Abbildung 5.2: Thevenin Modell einer Lithium-Ionen Batterie

Generell sind zur Parameterermittlung der Ersatzschaltbildkomponenten Labormessungen mit den zu simulierenden Batterietypen erforderlich [26]. Dies ist im Falle dieser Arbeit nicht möglich. Daher können lediglich Referenzwerte von Batterietypen aus der Literatur oder generelle Richtwerte verwendet werden, beziehungsweise die Abhängigkeit des RC-Netzwerkes vom Ladezustand ( $SOC = \text{State of Charge}$ ) vernachlässigt werden [26].

### 5.3.2 modifiziertes Shepherd Modell

Eine weitere Möglichkeit zur Modellierung von Batterien bildet das von Shepherd [29] eingeführte Modell. Zur Verhinderung einer algebraischen Schleife wird das Modell so modifiziert, dass nur der Ladezustand (SOC) eine Zustandsvariable darstellt [30]. Das Ersatzschaltbild des modifizierten Shepherd-Modells ist in Abbildung 5.3 ersichtlich. Im Grunde genommen besteht dies lediglich aus einer Spannungsquelle und einem Innenwiderstand  $R_{Int}$ . Die Quintessenz des Modells liegt darin, dass abhängig vom Batteriestrom  $I_{Batt}$ , und den daraus ermittelten Werten des Tiefpass-gefilterten Stromes  $i^*$  und des integrierten Stromes  $it$ , die Spannung der Spannungsquelle geregelt wird. Die Ermittlung der korrekten Spannung erfolgt im Block  $U = f(i, i^*, it)$  des Ersatzschaltbildes.

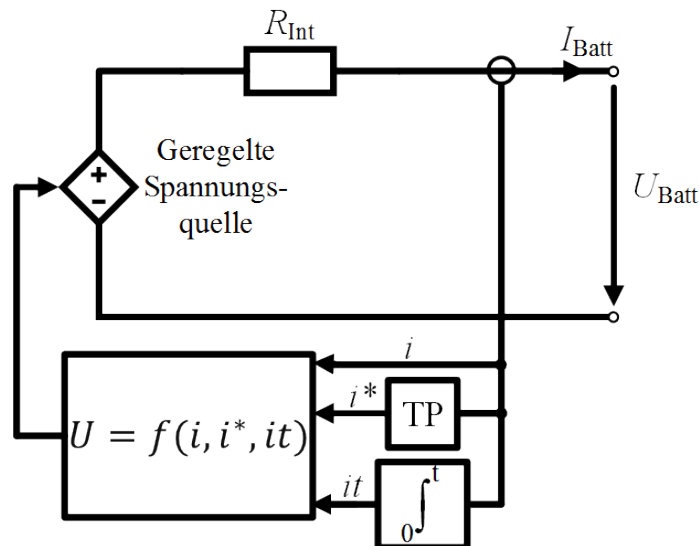


Abbildung 5.3: Modifiziertes Shepherd Modell einer Lithium-Ionen Batterie

Der Vorteil dieses Modells ist die Simplizität, sowie die Tatsache, dass die Parameter anhand des Datenblattes der Batterie ermittelt werden können. Damit sind keine Messungen oder Vernachlässigungen zur Parametrierung erforderlich. Des Weiteren erzielt es laut den Untersuchungen in [26] eine ausreichende Genauigkeit. Das zugrundeliegende Modell des Simulink®-eigenen Batterieblocks basiert ebenfalls auf den Beziehungen des Shepherd Modells, wodurch der Verifizierungsprozess des Modells, durch den Vergleich mit den Simulationen aus Simulink®, ebenfalls vereinfacht wird. Diese Argumente, sowie die notwendigen Messungen oder Vereinfachungen des Thevenin Modells, resultieren in der Entscheidung für die folgenden Untersuchungen und die Modellerstellung das modifizierte Shepherd Modell zu verwenden.

## 5.4 Charakteristika einer Lithium-Ionen Batterie

Das Verhalten einer Batterie wird durch die Entlade- und Lade-Charakteristik beschrieben, wobei die Batteriespannung  $U_{Batt}$  in Abhängigkeit der Ladung  $Q$  dargestellt wird. Im Folgenden werden die Charakteristiken einer Lithium-Ionen Batterie im Detail analysiert.

### 5.4.1 Entladevorgang

Das Entladeverhalten einer Lithium-Ionen Batteriezelle ist in Abbildung 5.4 ersichtlich. Hierbei ist der komplette Entladevorgang einer voll geladenen 7,2 V, 5,4 Ah Zelle abgebildet. Die Entladekurve, welche die Spannung der Batteriezelle in Abhängigkeit der entnommenen Ladung aus der Zelle darstellt, ist in blau dargestellt. Am Beginn des Entladevorganges fällt die Batteriespannung exponentiell ab (Exponentielle Fläche in gelb), danach ist die Abnahme beinahe linear (Nominelle Fläche) mit der Ladung  $Q$ . Ab dem Punkt nominaler Spannung (Ende der grauen Fläche) sinkt  $U_{Batt}$  rapide ab. Die nominelle Fläche gibt damit jenen Bereich unter der Entladekurve an, in dem die Abnahme der Batteriespannung annähernd linear mit der entnommenen Ladung verläuft. Die lineare Kurve wird dabei bis an den Beginn der Charakteristik verlängert. Die exponentielle Fläche beschreibt den Bereich zwischen der Entladekurve und der linearen Abnahmekurve, das heißt lediglich den exponentiellen Abfall am Beginn.

Im Falle der Entladung einer partiell geladenen Zelle ist der generelle Kurvenverlauf identisch, die korrespondierenden Werte der Batteriespannung sind jedoch etwas geringer und der Startwert der Ladung liegt nicht bei 0 Ah, sondern einem positiven Wert, je nach Ladezustand. Der letzte Teil der Kurve mit rapide abfallender Spannung ist für jeden Startwert der Entladung gleich. Der exakte Verlauf mit den Werten für  $U_{Batt}$  und  $Q$  ist für jeden Batterietyp etwas anders, prinzipiell folgt die Entlade-Charakteristik von Lithium-Ionen Zellen jedoch stets der in Abbildung 5.4 dargestellten Form.

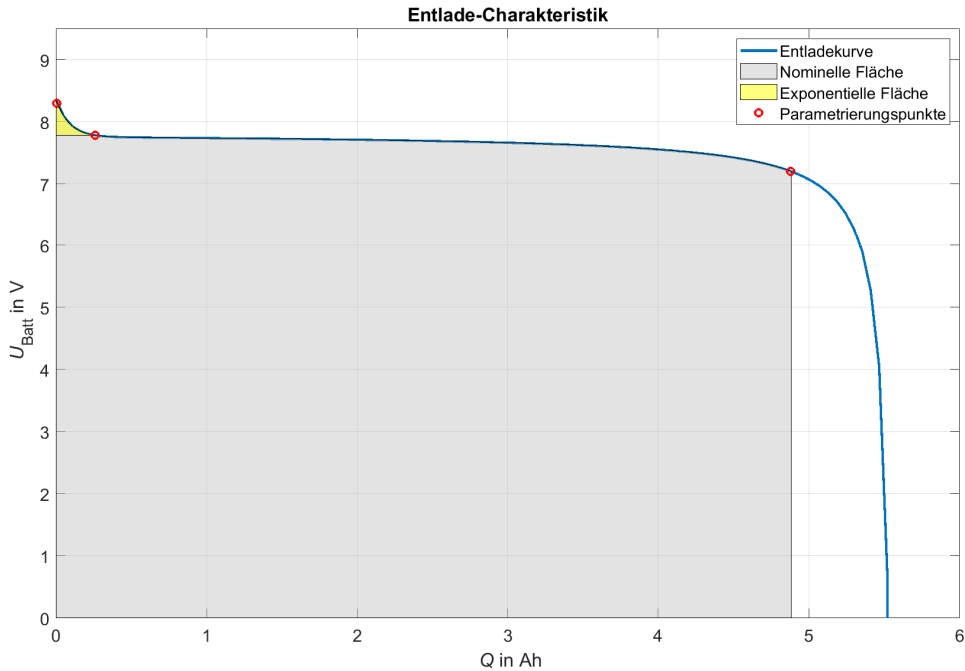


Abbildung 5.4: Entlade-Charakteristik einer Lithium-Ionen Zelle [3]

Die Modellgleichung, welche die Batteriespannung während des Entladevorganges beschreibt, ist in Formel 5.1 ersichtlich [26].

$$U_{Batt} = E_0 - K \frac{Q}{Q - it} \cdot i^* - K \frac{Q}{Q - it} \cdot it + A \cdot e^{-B \cdot it} \quad (5.1)$$

Die Werte für den Tiefpass-gefilterten Strom  $i^*$  und den integrierten Strom  $it$  werden anhand des gemessenen Batteriestroms ermittelt, während  $Q$  durch die Zelle selbst definiert ist. Die übrigen 4 Parameter  $E_0$ ,  $K$ ,  $A$  und  $B$  müssen hingegen noch ermittelt werden.

Dies kann anhand der Entlade-Charakteristik aus dem Datenblatt der Zelle erfolgen. Dabei werden 3 Punkte der Kurve benötigt, welche in Abbildung 5.4 bereits in rot gekennzeichnet sind. Es handelt sich um die maximale Spannung bei entnommener Ladung  $Q = 0$  Ah ( $U_{max}$ ), die Spannung und Ladung am Ende der exponentiellen Fläche ( $U_{exp}$  &  $Q_{exp}$ ) und die Spannung am Ende der nominellen Fläche ( $U_{nom}$ ).  $E_0$  beschreibt dabei die sogenannte konstante Spannung in V,  $K$  die Polarisationskonstante in  $\frac{V}{Ah}$  bzw. den Polarisationswiderstand in  $\Omega$ , je nachdem ob der Faktor mit  $i^*$  oder  $it$  multipliziert wird, während  $A$  die exponentielle Amplitude in V und  $B$  die inverse exponentielle Zeitkonstante in  $(Ah)^{-1}$  bezeichnet [31].



$K$  beschreibt einen Multiplikationsfaktor, der in beiden Termen der Gleichung (Multiplikation mit  $i^*$  oder  $it$ ) der selbe ist. Die unterschiedlichen Bezeichnungen und Einheiten werden verwendet um in jedem Term insgesamt auf die Einheit Volt zu kommen. Um die Lesbarkeit der Gleichung zu vereinfachen und zu verdeutlichen, dass es sich um den gleichen Faktor handelt, werden sie durch die gleiche Variable  $K$  dargestellt. Die exakte Ermittlung der Parameter ist in Kapitel 5.6 detailliert beschrieben.

## 5.4.2 Ladevorgang

Die Batteriespannung einer Lithium-Ionen Batterie in Abhängigkeit der Ladung während des Ladevorgangs ist in Abbildung 5.5 dargestellt. Dabei wird die dargestellte 7,2 V, 5,4 Ah Lithium-Ionen Batteriezelle vom entladenen Zustand vollständig aufgeladen.

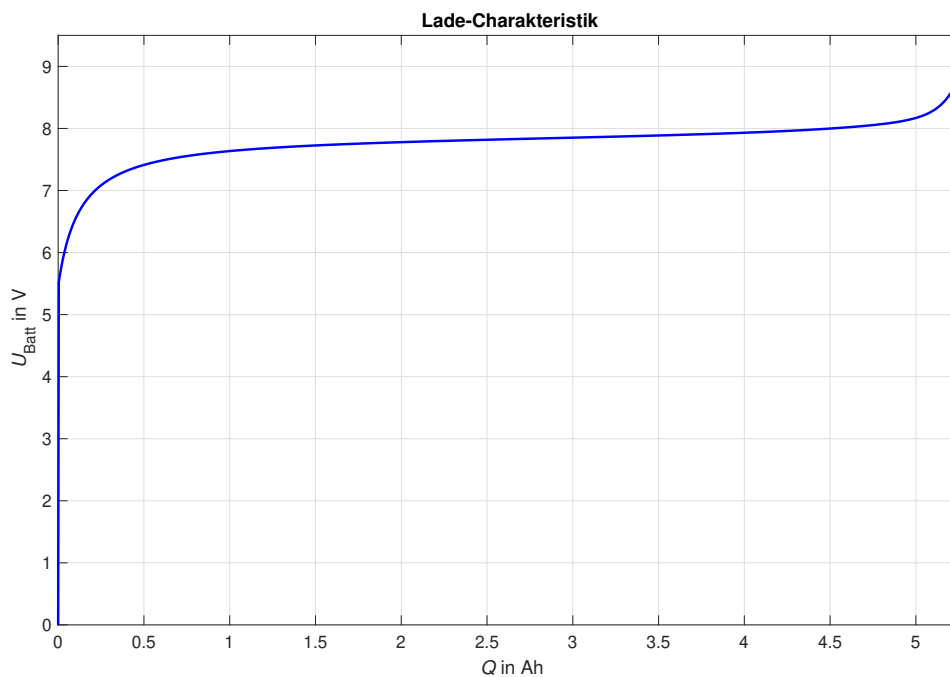


Abbildung 5.5: Lade-Charakteristik einer Lithium-Ion Zelle

Die Kurvenform ist hierbei gespiegelt zu jener der Entlade-Charakteristik und mag auf den ersten Blick identisch erscheinen, es gibt jedoch bedeutende Unterschiede. In Abbildung 5.4 beträgt der Wert der maximalen Spannung am Beginn der Kurve etwa 8,4 V, beim Ladevorgang liegt der Maximalwert am Ende der Kurve bei etwa 9 V, das heißt 0,6 V höher.

Dies liegt an der Änderung des internen Widerstandes, welcher sich aus den Widerständen des Elektrodenmaterials, Elektrolyts und anderen Verbindungen zusammensetzt [32]. Dieser Effekt wird als IR drop (Internal resistance drop) bezeichnet [32]. Des Weiteren existiert generell eine Hysterese zwischen den Entlade- und Lade-Charakteristiken. Dies kann dadurch erklärt werden, dass das Ladepotential größer ist als jenes beim Entladen, was durch die anhand des internen Widerstandes des Elektrodenmaterials entstehende Polarisierung verursacht wird ([32] auf Basis der Betrachtungen von [2]).

Da die Kurvenform jener beim Entladevorgang sehr ähnelt, gibt es auch in den dazugehörigen Gleichungen der Batteriespannung nur geringe Unterschiede. Die Formel zur Modellbildung der Lade-Charakteristik ist in Gleichung 5.2 ersichtlich [3].

$$U_{Batt} = E_0 - K \frac{Q}{it + 0,1 \cdot Q} \cdot i^* - K \frac{Q}{Q - it} \cdot it + A \cdot e^{-B \cdot it} \quad (5.2)$$

Die einzige Änderung zu Gleichung 5.1 ist der Multiplikationsfaktor des gefilterten Stromes  $i^*$ . Während dieser im Falle des Entladens der Lithium-Ionen Batterie identisch zum Multiplikationsfaktor des integrierten Stromes  $it$  ist, ist der Nenner für den Ladevorgang nun die Summe aus  $it$  und  $0,1 \cdot Q$ . Wie bei der Gleichung des Entladens bereits beschrieben, werden  $i^*$  und  $it$  anhand des gemessenen Batteriestromes ermittelt und  $Q$  ist durch die Batterieeigenschaften selbst gegeben. Die 4 fehlenden Parameter  $E_0$ ,  $K$ ,  $A$  und  $B$  müssen hierbei jedoch nicht neu bestimmt werden. Diese werden für die Entlade-Charakteristik ermittelt und sind in der Folge sowohl für die Entlade- als auch die Lade-Gleichungen der vorliegenden Lithium-Ionen Batteriezelle gültig.

## 5.5 Simulink®-Modell

Das komplette Simulink®-Modell zur Modellierung von Lithium-Ionen Batterien anhand dem auf Shepherd basierenden Ersatzschaltbild aus Abbildung 5.3 wird in den folgenden Abschnitten detailliert beschrieben. Davor stehen noch die Annahmen, welche im Zuge der Modellerstellung getroffen werden, im Mittelpunkt der Betrachtungen.

### 5.5.1 Modellannahmen und Limitierungen

Die im Anschluss aufgelisteten Annahmen und Limitierungen, die für das erstellte Modell gelten, sind den Ausführungen von Tremblay aus [30] und [31] entnommen. In beiden genannten Arbeiten wird als weitere Annahme angegeben, dass im Modell keine Temperaturabhängigkeiten simuliert werden. Diese werden anhand anderer Quellen implementiert, die im weiteren Verlauf der Modellbeschreibungen genannt werden. Hierbei sei jedoch erwähnt, dass bei den Temperaturberechnungen eine homogene Verteilung auf alle Zellen der Batterie angenommen wird, und keine Unterschiede hinsichtlich der Platzierung der Zellen im Batteriepack gemacht werden.

#### Annahmen:

- $R_{Int}$  ist beim Lade- und Entladevorgang konstant und ändert sich nicht mit dem Strom
- Der Peukert Effekt wird nicht berücksichtigt, d.h. die Kapazität der Zelle ändert sich nicht mit dem Strom
- Die Modellparameter für Lade- und Entladevorgang sind identisch
- Die Batterie hat keinen Memory Effekt
- Die Selbstentladung wird nicht berücksichtigt

#### Limitierungen:

- Die minimale Batteriespannung beträgt 0 V und die maximale  $2 \cdot E_0$
- Die minimale Ladung beträgt 0 Ah und die maximale Ladung  $Q$ , d.h. der SOC kann nicht größer als 100 % sein.

### 5.5.2 Gesamtes Modell in Simulink®

Die Modellgleichungen für den Lade- und Entladevorgang, die in Kapitel 5.4 dargestellt sind, müssen aufgrund der implementierten Temperaturabhängigkeit etwas verändert werden. Dies ist in den Formeln 5.3 und 5.4 ersichtlich [3]. Dabei wird ein weiterer Term am Ende hinzugefügt, der aus dem integrierten Strom multipliziert mit der nominellen Entladekurven-Steilheit  $C$  in  $V/(Ah)$ , besteht [3].

#### Entlade-Gleichung:

$$U_{Batt} = E_0 - K \frac{Q}{Q - it} \cdot i^* - K \frac{Q}{Q - it} \cdot it + A \cdot e^{-B \cdot it} + C \cdot it \quad (5.3)$$

#### Lade-Gleichung:

$$U_{Batt} = E_0 - K \frac{Q}{it + 0,1 \cdot Q} \cdot i^* - K \frac{Q}{Q - it} \cdot it + A \cdot e^{-B \cdot it} + C \cdot it \quad (5.4)$$

Das auf Basis des Ersatzschaltbildes in Abbildung 5.3 sowie den Gleichungen 5.3 und 5.4 erstellte Modell in Simulink®, ist in Abbildung 5.6 dargestellt. Dabei bildet der gemessene Batteriestrom den Eingang des Modells und die Batteriespannung den Ausgang.

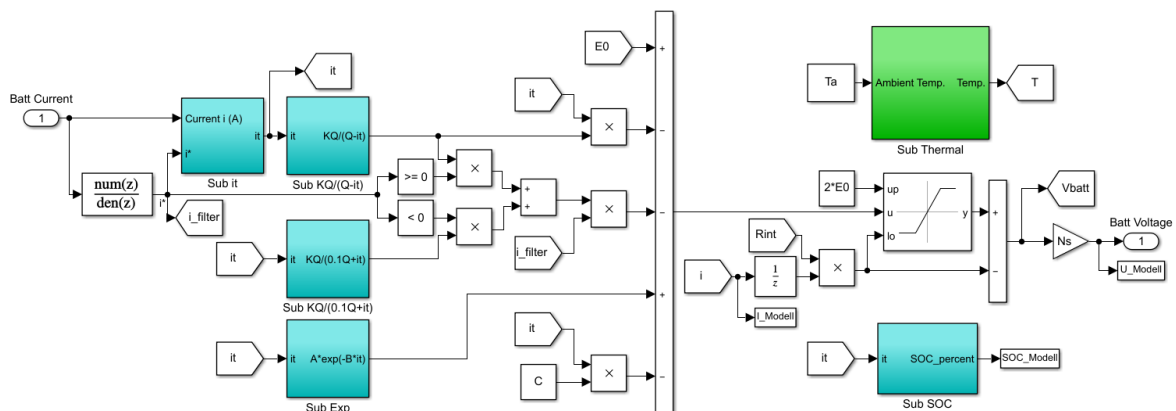


Abbildung 5.6: Simulink®-Modell der Lithium-Ionen Batterie

Die Entscheidung, ob die Batterie augenblicklich geladen oder entladen wird, erfolgt etwa in der Mitte der Abbildung mithilfe der Vergleichsblöcke, ob der gefilterte Strom  $i^*$  größer-gleich oder kleiner als Null ist. Im ersten Fall wird der Faktor  $K \frac{Q}{Q-it}$  mit  $it$  multipliziert (Entladefall, vgl. Formel 5.3). Wenn der gefilterte Strom negativ ist, wird der Faktor  $K \frac{Q}{0,1 \cdot Q + it}$  mit  $it$  multipliziert (Ladefall, vgl. Formel 5.4).

Die Übertragungsfunktion zur Ermittlung des gefilterten Stromes hängt von der Samplezeit, sowie der Batterie-Reaktionszeit ab. Die Berechnung der Parameter, anhand von [3], erfolgt im MATLAB®-Initialisierungsskript des Modells und ist im Anhang (B.4) ersichtlich. Der Verzögerungsblock des Batteriestromes, bevor dieser mit dem Innenwiderstand multipliziert wird, ist notwendig um eine algebraische Schleife zu verhindern. Ohne diesen wäre das Modell am Echtzeitrechner nicht lauffähig. In Abbildung 5.6 ist dies zwischen dem großen Subtraktionsblock der Spannung und dem Sättigungsblock dargestellt. Der letzte Block vor dem Ausgangsport der Batteriespannung bewirkt die Multiplikation mit dem Faktor  $N_S$ . Dieser ist in den Gleichungen 5.3 & 5.4 nicht enthalten, da diese lediglich das Verhalten einer Zelle beschreiben. Um ein Batteriepack mit mehreren seriell verbundenen Lithium-Ionen Zellen zu simulieren wird die Batteriespannung mit der Anzahl der seriellen Zellen  $N_S$  multipliziert.

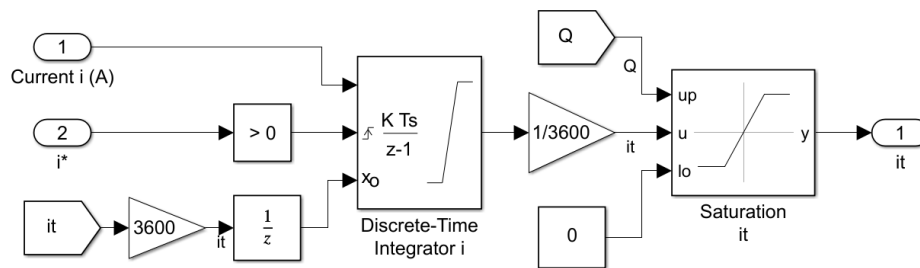
Die Blöcke der Multiplikationsfaktoren, sowie des exponentiellen Terms enthalten lediglich die in der Block-Maske ersichtlichen Berechnungen und werden an dieser Stelle nicht detailliert gezeigt. Diese sind in Abbildung 5.6 mit „Sub KQ/(Q-it)“, „Sub KQ/(0.1Q+it)“ und „Sub Exp“ gekennzeichnet. Alle weiteren Sub-Modelle beziehungsweise Sub-Blöcke werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

### 5.5.3 Berechnung des integrierten Stromes $it$

Abbildung 5.7 zeigt die Berechnung des integrierten Stromes  $it$ , das heißt der Ladung der Batterie. Diese befindet sich im Block „Sub it“ des Modells in Abbildung 5.6, und basiert auf der Berechnung in [4]. Dabei wird der gemessene Batteriestrom mittels eines diskreten Integrators aufsummiert. Der Reset erfolgt, wenn der gefilterte Strom  $i^*$  von einem negativen auf einen positiven Wert wechselt, das heißt wenn der Entladevorgang beginnt. Dies ist im zweiten Eingang (steigende Flanke) des zeitdiskreten Integrator-Blocks dargestellt. Der Startwert ( $x_0$ -Eingang des Integrators) ist generell der von Ah in As umgerechnete Wert des gefilterten Stromes. Der Verzögerungsblock ist notwendig, damit bereits im ersten Zeitpunkt der Echtzeitsimulation des Modells ein gültiger Wert ausgegeben wird. Dieser Anfangswert wird anhand Gleichung 5.5 (aus [4]) ermittelt. Er berechnet sich aus der Kapazität der Batterie in As ( $3600 \cdot Q$ ), sowie dem Ladezustand am Beginn ( $SOC_{init}$  umgerechnet von % in Absolutwert). Anders ausgedrückt beschreibt dies die bereits vor Beginn der Simulation entnommene Ladung der Lithium-Ionen Batterie.

$$x_{0,init} = \left(1 - \frac{SOC_{init}}{100}\right) \cdot 3600 \cdot Q \quad (5.5)$$

Nach der Integration wird die Ladung von As in Ah umgerechnet (Division durch 3600) und mit 0 Ah als Minimalwert und  $Q$  als Maximalwert, wie in den Limitierungen des Modells in Abschnitt 5.5.1 beschrieben, begrenzt.

Abbildung 5.7: Berechnung der Ladung  $it$ 

### 5.5.4 Berechnung des aktuellen Ladezustandes SOC

Der aktuelle Ladezustand der Batterie („Sub SOC“ im Gesamtmodell) wird wie in Abbildung 5.8 dargestellt, ermittelt. Dabei wird die während der Simulation entnommene Ladung (im Fall des Ladevorganges negativ) durch die Gesamtladung der Batterie dividiert und danach von 1 abgezogen, wodurch man die noch vorhandene Ladung erhält. Mit der Multiplikation mit 100 erfolgt die Umrechnung auf Prozent. Gleichung 5.6 zeigt die zeitkontinuierliche Formel, auf dem diese Berechnung basiert [3]. In Abbildung 5.8 bezeichnet der Eingangsport 1 den integrierten Strom  $it$ .

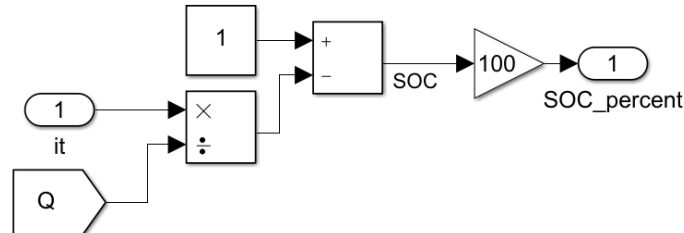


Abbildung 5.8: Ermittlung des aktuellen Ladezustandes SOC

$$SOC_{\%} = 100 \left( 1 - \frac{1}{Q} \cdot \int_0^t i(t) dt \right) \quad (5.6)$$

### 5.5.5 Thermisches Modell

Sämtliche Berechnungen zur Temperaturabhängigkeit der Lithium-Ionen Batterie werden im Folgenden Abschnitt beschrieben. Diese basieren auf den Ausführungen in [3], welche auf [33] & [34] referenzieren. Abbildung 5.9 zeigt den Inhalt des „Sub Thermal“-Blocks aus dem Gesamtmodell (Abbildung 5.6). Den Eingang des Blocks bildet die als konstant angenommene Umgebungstemperatur (Ambient Temp. bzw.  $T_{amb}$ ), während der Ausgangsparameter die Temperatur einer Zelle des Batteriepacks in Kelvin darstellt (die Berechnung der Temperatur in  $^{\circ}\text{C}$  „Tcell“ wird für die Darstellung der Ergebnisse in MATLAB® verwendet). Der Grund hierfür ist, dass am Ausgang des Batteriemodells die Werte für eine Batteriezelle hoch-skaliert werden, um mehrere seriell verbundene Zellen in einem Modell simulieren zu können. Thermisch ist es jedoch nicht zulässig die Einzeltemperatur mit der Anzahl der Zellen in Serie zu multiplizieren, um die Gesamttemperatur des Batteriepacks zu erhalten. Daher wird die Temperatur einer einzelnen Zelle berechnet, welche im Zuge der Modellverifizierung mit den Werten des Simulink®-eigenen Batterieblocks verglichen werden. Diese Vereinfachung wird getroffen, da lediglich ein prinzipielles Abbild des Temperaturverhaltens der Lithium-Ionen Batterie erstellt werden soll.

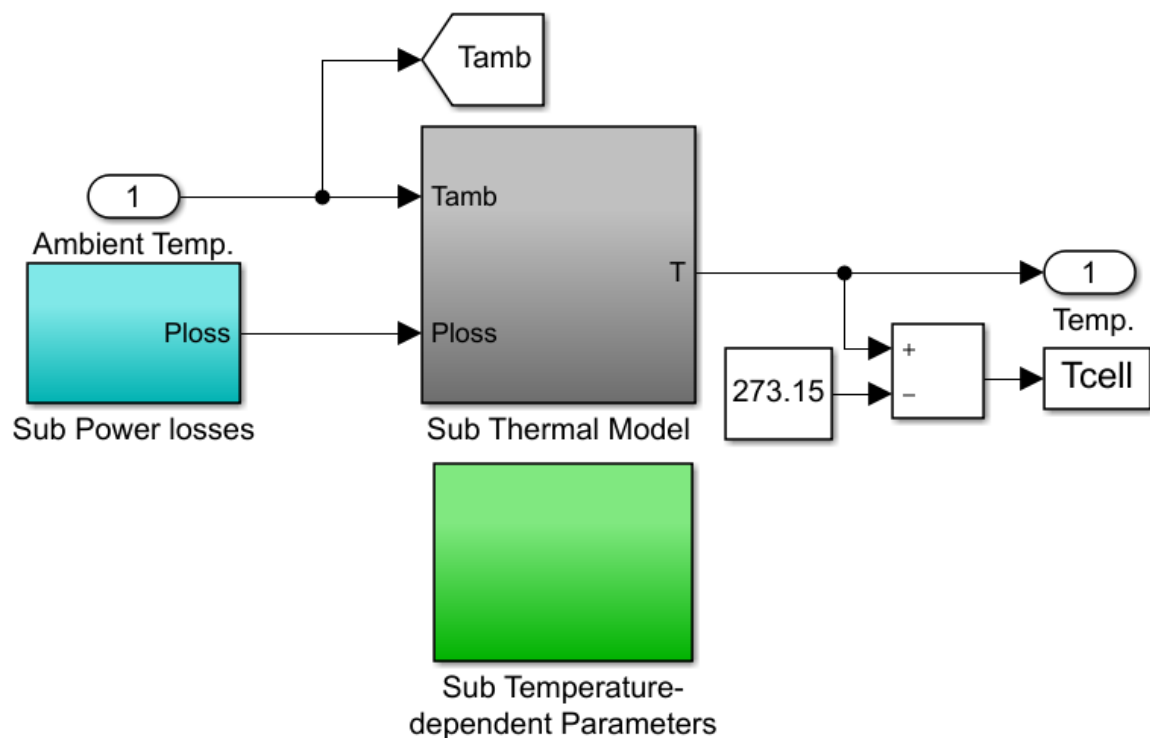


Abbildung 5.9: Thermische Modellierung der Lithium-Ionen Batterie

Der Inhalt des im thermischen Modell in Abbildung 5.9 in grün dargestellten Blocks („Sub Temperature-dependent Parameters“), welcher die Berechnung der temperaturabhängigen Parameter betrifft, ist in Abbildung 5.10 ersichtlich. Dabei werden die Parameter  $E_0$ ,  $Q$ ,  $K$ , sowie  $R_{Int}$  anhand der Umgebungstemperatur und der aktuellen Zelltemperatur ermittelt.

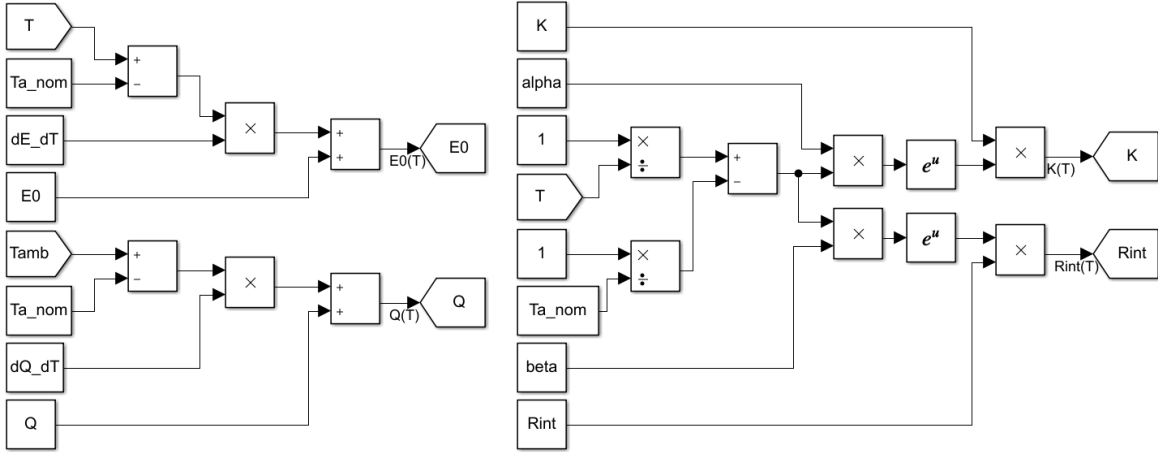


Abbildung 5.10: Ermittlung der temperaturabhängigen Parameter

Die diesen Berechnungen zugrundeliegenden Formeln sind in Gleichung 5.7 - 5.10 aufgelistet [3]. Dabei bezeichnet  $T$  die aktuell berechnete Zelltemperatur in Kelvin,  $T_{amb}$  die Umgebungstemperatur während der Simulation in Kelvin und  $T_{a,nom}$  die nominale Umgebungstemperatur bzw. Referenztemperatur in Kelvin (293,15 K = 20 °C). Die Konstanten  $E_0$ ,  $Q$ ,  $K$ , und  $R_{Int}$  bezeichnen die Parameter der Batterie ohne Berücksichtigung des Einflusses der Temperatur. Die Werte der Temperaturkoeffizienten  $\frac{dE}{dT}$  und  $\frac{dQ}{dT}$ , sowie der Arrhenius Konstanten  $\alpha$  und  $\beta$  entstammen den Informationen der Simulink® Bibliothek des Batterie-Blocks [4]. Die aktuellen temperaturabhängigen Ergebnisse dieser Berechnungen werden im übrigen Modell verwendet.

$$E_0(T) = E_0|_{T_{a,nom}} + (T - T_{a,nom}) \cdot \frac{dE}{dT} \quad (5.7)$$

$$Q(T) = Q|_{T_{a,nom}} + (T_{amb} - T_{a,nom}) \cdot \frac{dQ}{dT} \quad (5.8)$$

$$K(T) = K|_{T_{a,nom}} \cdot \exp\left(\alpha \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{a,nom}}\right)\right) \quad (5.9)$$

$$R_{Int}(T) = R_{Int}|_{T_{a,nom}} \cdot \exp\left(\alpha \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{a,nom}}\right)\right) \quad (5.10)$$



Für die Berechnung der aktuellen Temperatur ist die Ermittlung der Verlustleistung erforderlich. Dies erfolgt wie in Abbildung 5.11 dargestellt, anhand der Spannung  $E_0(T)$ , der Batteriespannung  $V_{Batt}$  einer Zelle (Ausgang des Modells vor der Multiplikation mit  $N_S$ ), dem gemessenen Batteriestrom, der Zelltemperatur sowie dem reversiblen Spannungs-Temperaturkoeffizienten  $\frac{dE}{dT}$  in  $\frac{V}{K}$ . Diese Berechnungen befinden sich im Block „Sub Power losses“ des thermischen Modells in Abbildung 5.9, dort in blau gehalten. Da die Verlustleistung sowohl beim Lade-, als auch Entladevorgang auftritt und zu einer erhöhten Zelltemperatur führt, werden die Absolutwerte des Stromes und der Spannungsdifferenz verwendet.

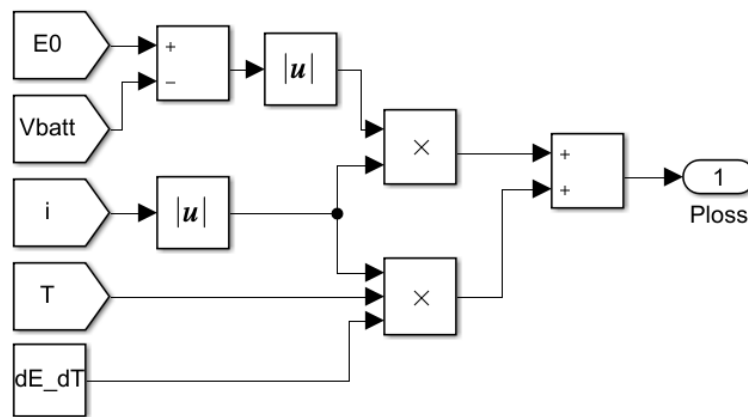


Abbildung 5.11: Ermittlung der Verlustleistung

Die in Abbildung 5.11 implementierte Formel ist in Gleichung 5.11 ersichtlich und stammt aus [3], wobei diese dort nur für den Entladevorgang dargestellt ist. Da die Parameter  $E_0(T)$ ,  $V_{Batt}$  und  $i$  in diesem Fall positiv sind, werden die Absolutbeträge in [3] nicht angegeben.

$$P_{loss} = |(E_0(T) - V_{Batt}(T))| \cdot |i| + \frac{dE}{dT} \cdot i \cdot T \quad (5.11)$$

Der abschließende graue Block „Sub Thermal Model“ im thermischen Modell beinhaltet die Ermittlung der aktuellen Zelltemperatur und ist in Abbildung 5.12 ersichtlich.

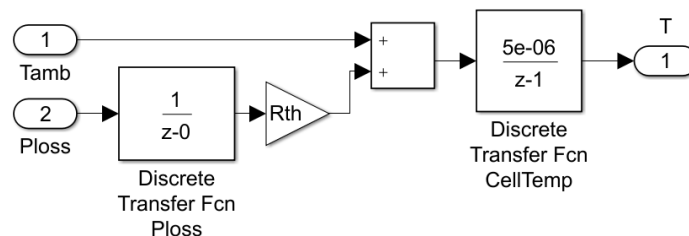
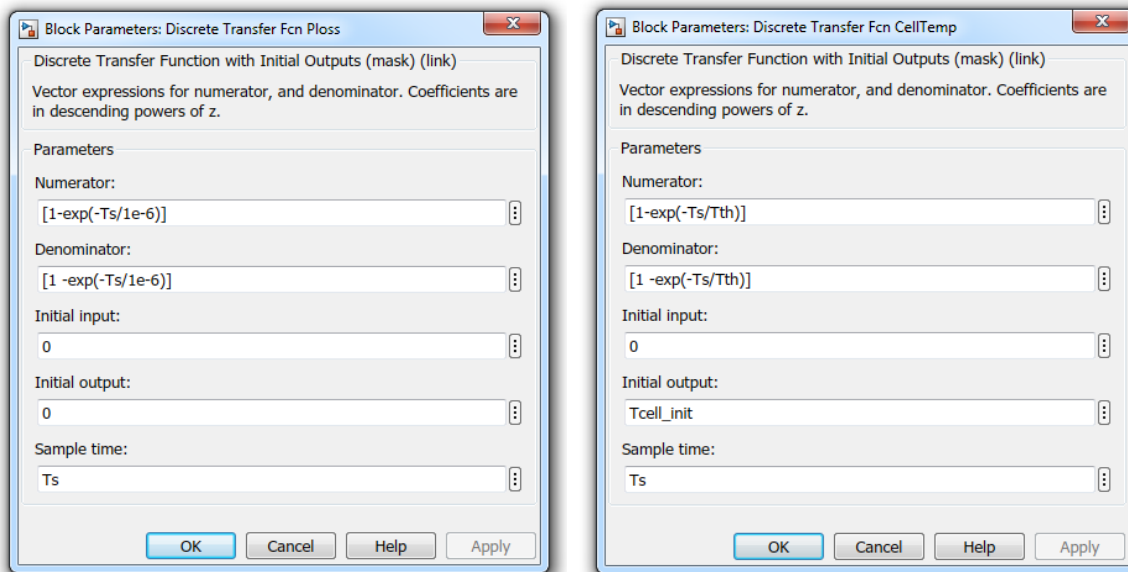


Abbildung 5.12: Ermittlung der Zelltemperatur

Die Parameter der beiden verwendeten Übertragungsfunktionen sind in Abbildung 5.13 dargestellt. Abbildung 5.13a zeigt den Block der Übertragungsfunktion der Verlustleistung („Discrete Transfer Fcn Ploss“), und Abbildung 5.13b die Parameter der Übertragungsfunktion der Temperatur am Ausgang („Discrete Transfer Fcn CellTemp“) [4]. Die hierbei verwendeten Variablen bezeichnen die Werte des thermischen Widerstandes  $R_{Th}$  in  $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ , der Samplezeit  $T_S$  in s, der thermischen Zeitkonstante der Batterie  $T_{Th}$  in s sowie der Zelltemperatur am Beginn der Simulation  $T_{cell,init}$  in Kelvin (dieser Wert entspricht der Umgebungstemperatur) [3].



(a) Übertragungsfunktion der Verlustleistung (b) Übertragungsfunktion der Zelltemperatur

Abbildung 5.13: Block-Parameter der Übertragungsfunktionen [4]

Die Implementierung in Abbildung 5.12 basiert auf der in Formel 5.12 gezeigten zeitkontinuierlichen Gleichung zur Berechnung der Temperatur in Abhängigkeit der Simulationszeit [3].

$$T(t) = \mathcal{L}^{-1} \left( \frac{P_{loss} R_{th} + T_{amb}}{1 + s \cdot T_{th}} \right) \quad (5.12)$$

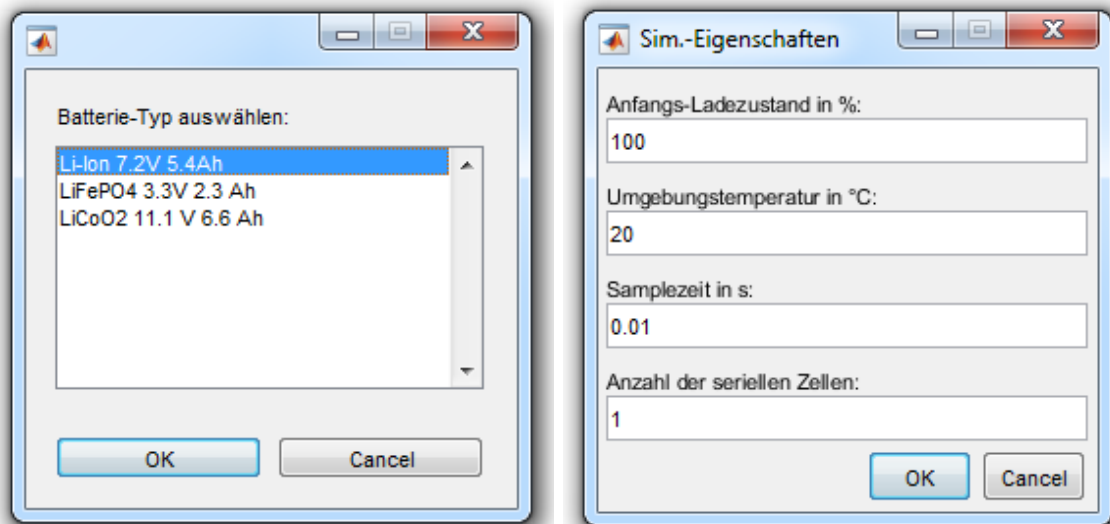
## 5.6 Ermittlung der Modell-Parameter

Die für das Ersatzschaltbild-Modell erforderlichen Parameter der Lithium-Ionen Batteriezelle stammen aus der Simulink<sup>®</sup> Bibliothek des Batterie-Blocks [3] & [4]. Hierbei sei jedoch erwähnt, dass auch jede andere Lithium-Ionen Batterie anhand der Daten des jeweiligen Datenblatts simuliert werden kann. Die in Simulink<sup>®</sup> voreingestellten Daten wurden lediglich verwendet, um den Prozess der Modellverifizierung samt Vergleich mit den Simulink<sup>®</sup>-Daten einfacher zu gestalten. Die relevanten Daten einiger Batterietypen wurden in Excel-Dateien gespeichert, um sie mittels eines in MATLAB<sup>®</sup> erstellten Skriptes dynamisch laden zu können. Tabelle 5.1 zeigt die relevanten Daten einer 7,2 V 5,4 Ah Lithium-Ionen Batteriezelle.

Parameter	Wert	Einheit	Beschreibung
$U_{nom}$	7,2	V	Nominale Batteriespannung
$Q_{rated}$	5,4	Ah	bemessene Batteriekapazität
$U_{max}$	8,3807	V	maximale Spannung
$I_{nom}$	2,3478	A	nomineller Entladestrom
$R_{Int}$	0,01333	$\Omega$	Innenwiderstand
$Q_{nom}$	4,8835	Ah	Kapazität bei nominaler Spannung
$U_{exp}$	7,7788	V	Exponentielle Spannung
$Q_{exp}$	0,2653	Ah	Exponentielle Ladung
$\alpha$	644,5801	-	Arrhenius Konstante des Pol.-widerstandes
$\beta$	1100,1086	-	Arrhenius Konst. des Innenwiderstandes
$C$	0,1253	V/(Ah)	nominelle Entladungskurven-Steilheit
$\frac{dE}{dT}$	0,0247	V/K	reversibler Spannungs-Temperaturkoeffizient
$\frac{dQ}{dT}$	0,0120	(Ah)/K	max. Ladungs-Temperaturkoeffizient
$T_r$	30	s	Batterie-Reaktionszeit
$T_{th}$	2000	s	therm. Zeitkonstante (Zelle zu Umgebung)
$R_{th}$	0,6	$^{\circ}\text{C}/\text{W}$	therm. Widerstand (Zelle zu Umgebung)

Tabelle 5.1: Daten einer 7,2 V 5,4 Ah Lithium-Ionen Batterie

Das in MATLAB® erstellte Initialisierungsskript lädt die Daten der im Zuge eines File-Dialogs (Abb. 5.14a) ausgewählten Lithium-Ionen Zelle. Durch eine weitere Benutzereingabe können der Anfangsladezustand ( $SOC_{init}$ ), die Umgebungstemperatur ( $T_{amb}$ ), die Samplezeit ( $T_S$ ), sowie die Anzahl der seriell verbundenen Batteriezellen ( $N_S$ ) für die Simulation festgelegt werden (Abb. 5.14b). Beide Dialog-Fenster aus MATLAB® sind in Abbildung 5.14 dargestellt.



(a) Auswahl des Zell-Typs

(b) Auswahl der Simulationseigenschaften

Abbildung 5.14: Dialog-Fenster in MATLAB® zur Initialisierung

Die Informationen des geladenen Excel-Files sowie die Benutzereingaben zu den Simulationseigenschaften enthalten einen Großteil der benötigten Parameter zur Simulation des Batterie-Modells. Die 4 fehlenden Parameter sind die bereits in den Entlade- und Ladegleichungen erwähnten Variablen  $E_0$ ,  $K$ ,  $A$  und  $B$ . Wie im Abschnitt 5.4.1 beschrieben, können diese aus 3 Punkten der Entladecharakteristik ermittelt werden. Die exponentielle Amplitude  $A$  wird aus der Differenz der maximalen Spannung am Beginn der Entlade-Charakteristik, sowie der Spannung am Ende des exponentiellen Verlaufs der Entladung, ermittelt (Gleichung 5.13) [30].

$$A = U_{max} - U_{exp} \quad (5.13)$$

$B$  kann unter der Annahme, dass das Ende der exponentiellen Zone (Ladung  $Q_{exp}$ ) nach 3 Zeitkonstanten erreicht wird, wie folgt berechnet werden [26]:

$$B = \frac{3}{Q_{exp}} \quad (5.14)$$

Die Polarisationskonstante bzw. der Polarisationswiderstand  $K$  kann anhand des Punktes am Ende der nominellen Fläche der Entladecharakteristik ( $U_{nom}$  &  $Q_{nom}$ ) und der maximalen Spannung am Beginn der Charakteristik ermittelt werden, wie in Gleichung 5.15 ersichtlich [30]. Dieser Parameter wird im Zuge der Messungen empirisch optimiert, um eine höhere Genauigkeit im Vergleich mit den Datensätzen des Simulink®-Battery-Blocks zu erzielen. Diese Optimierungsfaktoren sind für jeden Zelltyp unterschiedlich und im Initialisierungsskript im Anhang (B.4) ersichtlich.

$$K = \frac{(U_{max} - U_{nom} + A \cdot (e^{-B \cdot Q_{nom}} - 1)) \cdot (Q - Q_{nom})}{Q_{nom}} \quad (5.15)$$

Der Punkt maximaler Spannung  $U_{max}$  wird auch verwendet um den letzten der 4 Parameter  $E_0$  zu berechnen (Formel 5.16) [30].

$$E_0 = U_{max} + K + R_{Int} \cdot I_{nom} - A \quad (5.16)$$

Das gesamte MATLAB®-Initialisierungsskript zur Parametrierung des Batteriemodells befindet sich im Anhang (B.4). Hierbei ist anzumerken, dass neben den bereits enthaltenen auch Dateien für beliebige weitere Lithium-Ionen Zellen erstellt und über das Skript geladen werden können. Die dargestellten Zellen sollen lediglich als Beispiel dienen.

## 5.7 Modellverifizierung

Das in den vorhergehenden Kapiteln beschriebene und in Simulink® erstellte Modell soll im PHIL-Labor des Instituts für Elektrische Anlagen und Netze auf seine Funktionsfähigkeit und Genauigkeit überprüft werden. Dafür wird das Modell am Echtzeitrechner eingespielt, einer der Leistungsverstärker des Labors fungiert somit als simulierte Lithium-Ionen-Batterie.

Im Zuge der Messungen sollen zwei Messreihen aufgenommen werden. Zum Einen wird anhand eines Ohmschen Widerstandes als Last der Entladevorgang der Batterie simuliert und gemessen. Zum Anderen soll mithilfe des zweiten Leistungsverstärkers, welcher als Stromquelle fungiert, die Lade-Charakteristik der Batterie aufgenommen werden. Bei beiden Messsetups sollen die gemessenen Werte der Batteriespannung, des Batteriestroms, des Ladezustandes (SOC) sowie der Zelltemperatur mit den Daten des Simulink®-Battery-Blocks verglichen werden.

Der verwendete Messaufbau ist identisch zu jenem in Abschnitt 4.10. Zur Veranschaulichung ist dieser in Abbildung 5.15 nochmals schematisch dargestellt. Das erstellte Batterie-Modell ist am Echtzeitrechner eingebunden und über Phase 1 (L1) und den Neutralleiter (N) des Leistungsverstärkers (L1) mit der Last verbunden. Im Schema wird die Last durch den Widerstand  $R$  dargestellt. Die intern gemessenen Ströme werden über den Echtzeitrechner vom Modell verarbeitet und die berechneten Spannungen wiederum ausgegeben. Im verwendeten Aufbau aus Abbildung 5.15 werden nur die Werte der Phase 1 ( $U_1$  &  $I_1$ ) verwendet, alle anderen Strom- und Spannungsgrößen werden im Echtzeitrechner terminiert.

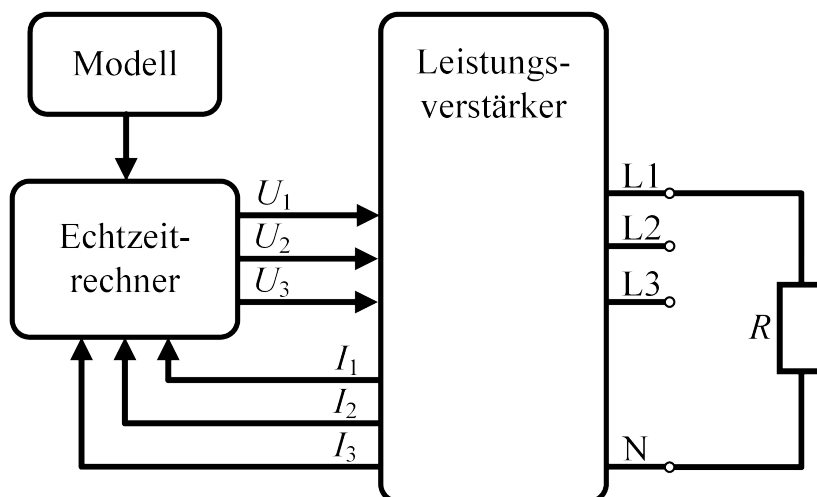


Abbildung 5.15: Schematischer Messaufbau mit  $R$  als Last

### 5.7.1 Entladevorgang

Um die Entlade-Charakteristik messtechnisch zu erfassen, wird das Modell mit einem Ohmschen Widerstand belastet. Bei der Auswahl der Zellen und des Lastwiderstandes muss darauf geachtet werden, dass der maximale Strom des Leistungsverstärkers von 20 A nicht überschritten wird. Dieser sollte jedoch möglichst hoch sein, damit der Entladevorgang nicht zu viel Zeit in Anspruch nimmt. Dabei können nur Widerstandswerte laut dem Datenblatt des Leistungswiderstandes, welches im Anhang (B.1) ersichtlich ist, verwendet werden. Die Simulation von 6 seriell verbundenen 7,2 V 5,4 Ah Lithium-Ionen Zellen ergibt eine nominelle Batteriespannung von 43,2 V ( $7,2 \text{ V} \cdot 6$ ). Mit einem Widerstandswert von  $2,6 \Omega$  liegt der Batteriestrom während des Entladevorgangs bei etwa 17 A ( $\frac{43,2 \text{ V}}{2,6 \Omega} = 16,6 \text{ A}$ ), womit die obere Grenze von 20 A eingehalten wird.

Abbildung 5.16 zeigt den Aufbau während der Messung des Entladevorganges. Wie im Bild ersichtlich, ist LVS 1 (linker LVS im Bild), mit welchem die Modellsimulation stattfindet, über die Anschlussbox mit dem Leistungswiderstand verbunden. Der schematische Aufbau gleicht jenem in Abbildung 5.15. Die Messung erfolgt mit einem Anfangs-Ladezustand von 100 %, das heißt die Batterie ist vollständig geladen und wird im Laufe der Echtzeitsimulation komplett entladen. Dabei werden die Batteriespannung, der Batteriestrom, der Ladezustand, sowie die Zelltemperatur mitgemessen. Der simulierte Aufbau beinhaltet 6 seriell verschaltene 7,2 V 5,4 Ah Zellen.



Abbildung 5.16: Messaufbau beim Entladevorgang

Die Batteriespannung während des Entladevorganges von 6 seriell verbundenen 7,2 V 5,4 Ah Lithium-Ionen Zellen bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C ist in Abbildung 5.17 ersichtlich. Die rote Kurve beschreibt die im Labor aufgenommenen und mittels MATLAB® geglätteten (Befehl „smooth()“) Messdaten, während die Daten der blauen Kurve aus der Simulation in Simulink® mit 6 Battery-Blöcken des gleichen Typs entstammen. Dabei ist anzumerken, dass die aufgenommene Batteriespannung am Ausgang des Leistungsverstärker gemessen wird.

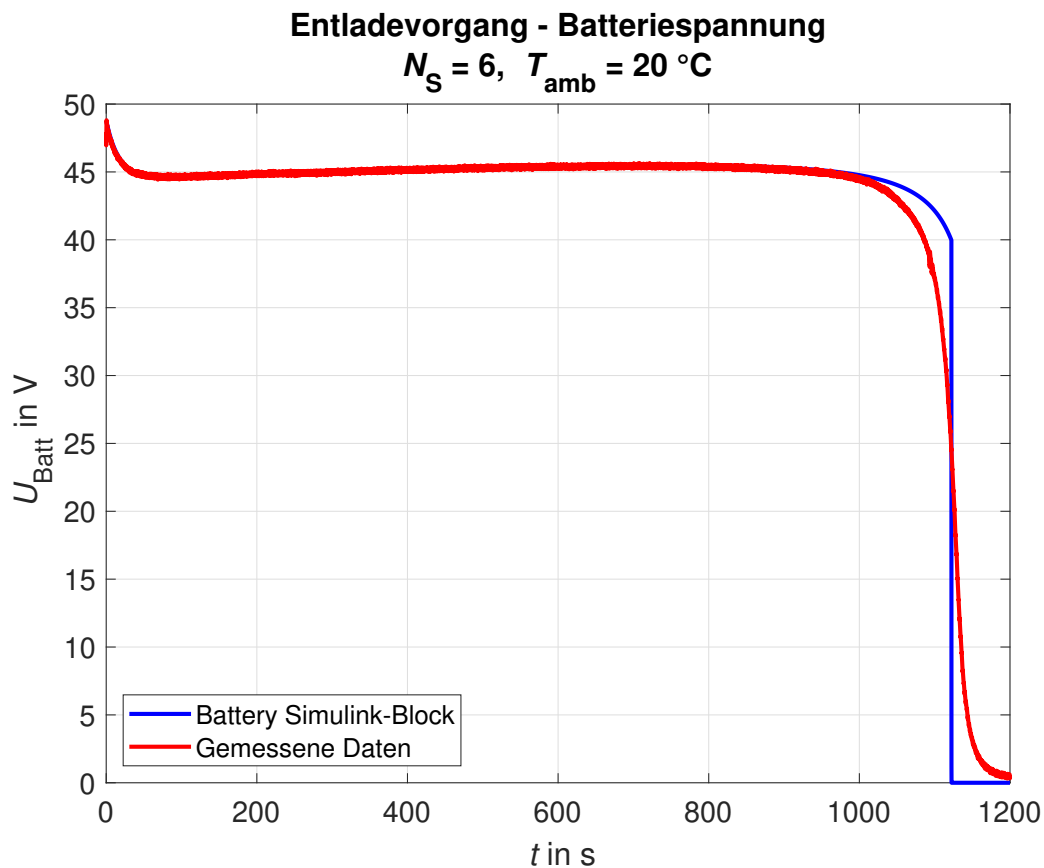


Abbildung 5.17: Batteriespannung beim Entladevorgang

Beim Vergleich der beiden Graphen ist erkennbar, dass diese bis zu einer Simulationszeit von etwa 1000 s sehr gut zusammenpassen und praktisch identisch sind. Die Abweichung der Daten im Bereich 1000 s bis 1200 s ist deutlich erkennbar, wobei diese in diesem Bereich der Entladung nicht so eine große Auswirkung hat, da hier die Batterie bereits fast komplett entladen ist. Im Zuge der Erklärungen des Ladezustandes bei Abbildung 5.19 wird dies noch genauer diskutiert.



Abbildung 5.18 zeigt den Batteriestrom bei der vollständigen Entladung der 6 Lithium-Ionen Zellen, wobei hier der bereits 250 Hz IIR-gefilterte Strom des Echtzeitrechnereinganges gemessen und geglättet wird. Die Daten der Simulink®-Battery-Blöcke sind wiederum in blau dargestellt.

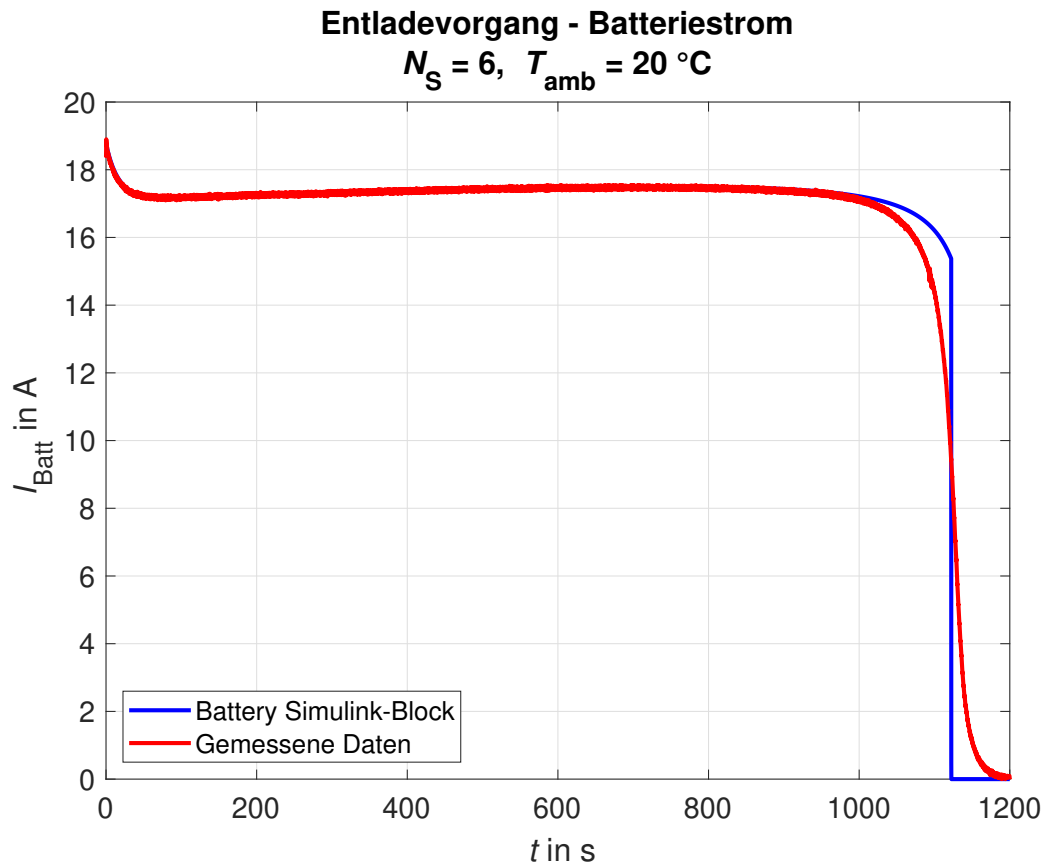


Abbildung 5.18: Batteriestrom beim Entladevorgang

Da beim Entladevorgang eine Ohmsche Last verwendet wird, ist der generelle Kurvenverlauf identisch zu jenem der Batteriespannung, die Amplituden unterscheiden sich jedoch. Es ist ersichtlich, dass mit der gewählten Konfiguration das Stromlimit von 20 A eingehalten wird. Die Unterschiede der zwei Kurven sind, wie bei der Batteriespannung, bis zu einer Simulationszeit von etwa 1000 s sehr gering, danach ist die Abweichung der gemessenen Werte zu den Simulink®-Block Daten etwas größer, bis die Batteriezellen vollständig entladen sind.

Der aktuelle Ladezustand (SOC) in % im Zuge der vollständigen Entladung des simulierten Batteriepacks ist in Abbildung 5.19 dargestellt. Die rote Kurve stammt aus den Messungen des erstellten Modells, während der blaue Graph die Daten der Battery-Blöcke in Simulink® widerspiegelt.

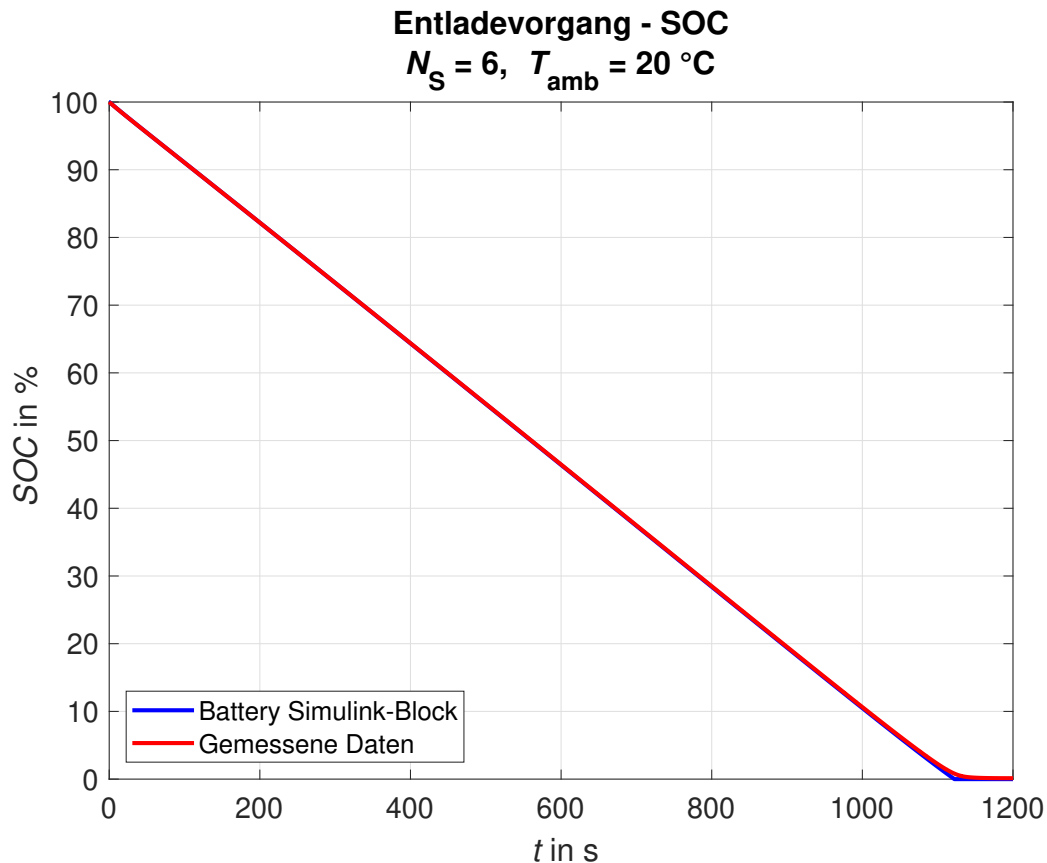


Abbildung 5.19: Ladezustand beim Entladevorgang

Die im Labor ermittelten Daten des Ladezustandes sind beinahe identisch zu jenen der Simulink®-Battery-Blöcke. Aufgrund der konstanten Last in Form des Ohmschen Widerstandes erfolgt die Entladung der Zellen gleichmäßig, erkennbar an der konstanten Steigung des SOC-Verlaufs. Wie in den Verläufen der Batteriespannung und des Batteriestroms ersichtlich, ist die Genauigkeit des erstellten Modells ab einer Simulationszeit von ca. 1000 s etwas geringer. Abbildung 5.19 zeigt, dass der Ladezustand bei 1000 s bei etwa 10 % liegt.

Die Untersuchungen des VDE in [35] zeigen, dass durch die Beschränkung des SOC's sowie der Entladetiefe (DOD = Depth of Discharge) auf beispielsweise 70 % SOC und 80 % DOD wesentlich mehr Ladezyklen mit der gleichen Zelle erreicht werden können, als ohne diese Beschränkungen. Das heißt, dass die Lebensdauer einer Lithium-Ionen Batterie verlängert werden kann, wenn diese zum Beispiel nur in einem Ladezustandsbereich von 20 - 80 % betrieben wird. Da die Messergebnisse in diesem Bereich der Simulation fast identisch zu den Simulink®-Battery-Block Daten sind, und die Abweichung erst ab einem SOC unter 10 % signifikant ist, wird die Genauigkeit des Modells während des Entladevorganges als ausreichend definiert. Zur genaueren Erläuterung der Entladetiefe DOD, ist die Berechnung dieser in Gleichung 5.17 dargestellt.

$$DOD = 100\% - SOC \quad (5.17)$$

Der Verlauf der internen Temperatur einer Zelle des Batteriepacks während des Entladevorganges ist in Abbildung 5.20 ersichtlich. Dabei sind die gemessenen Werte in rot, und die vom Simulink®-eigenen Battery-Block erhaltenen Werte in blau, dargestellt.

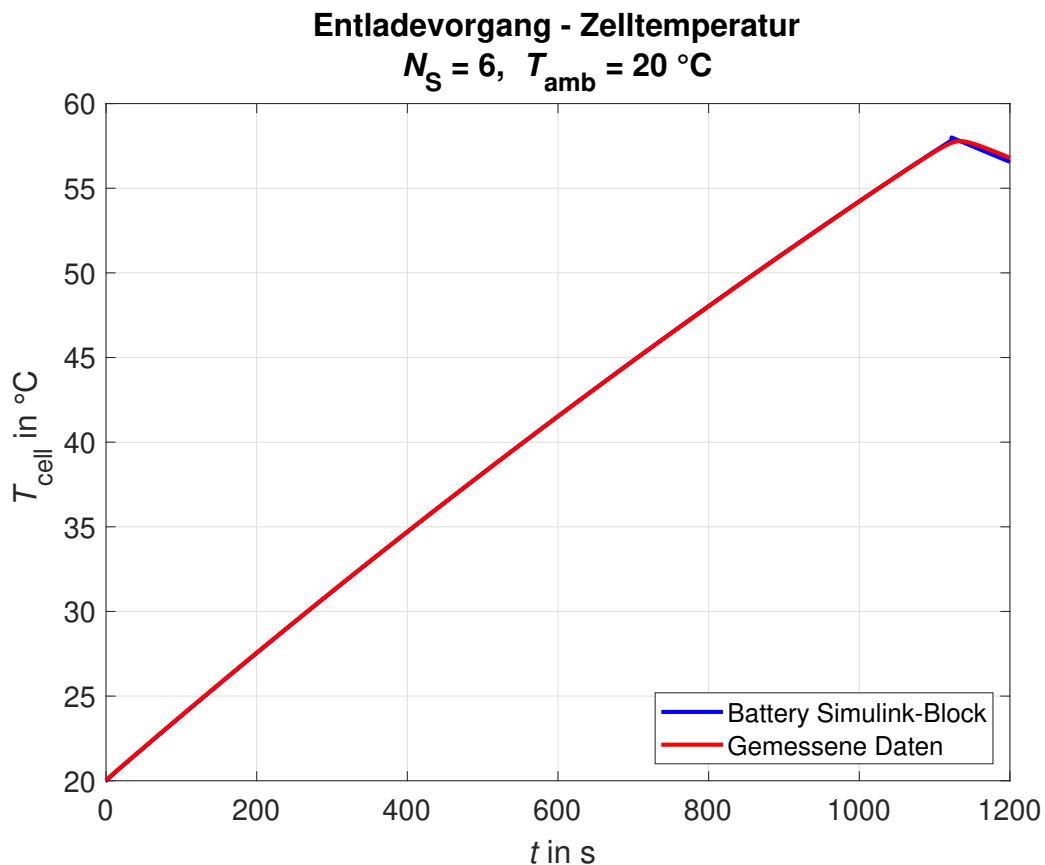


Abbildung 5.20: Zelltemperatur beim Entladevorgang

Wie bereits im Abschnitt 5.5.5 erwähnt, soll lediglich eine prinzipielle Simulation der Zelltemperatur erfolgen. Hierbei wird die interne Temperatur einer Zelle simuliert und angenommen, dass die Temperaturverteilung im gesamten Batteriepack homogen ist und sich die einzelnen Zellen thermisch nicht beeinflussen. Unter diesen Annahmen erfolgt der Vergleich der Temperatur einer Zelle des erstellten Batterie-Modells mit jener des Battery-Simulink<sup>®</sup>-Blocks. In der Abbildung ist zu erkennen, dass die Temperatur bei 20 °C startet, dies entspricht dem Wert der Umgebungstemperatur. Im Laufe des Entladevorganges steigt Zelltemperatur an, bis die Batterie vollständig entladen ist. Der Maximalwert liegt bei ca. 57 °C. Nach Abschluss des Entladevorganges beginnt die Abkühlungsphase und die Temperatur sinkt wiederum. Die beiden Verläufe sind praktisch während des gesamten Entladevorganges deckungsgleich, erst nachdem das Entladen abgeschlossen ist, und die Abkühlungsphase beginnt, ist ein kleiner Unterschied zu erkennen. Diese Umstand bestätigt die Genauigkeit des thermischen Modells während des Entladevorgangs.

### 5.7.2 Ladevorgang

Im Zuge der zweiten Messreihe zur Modellverifizierung soll der Ladevorgang simuliert werden. Um die Lade-Charakteristik messtechnisch zu erfassen, lädt der zweite Leistungsverstärker des Labors (Betrieb als Stromquelle) die Batterie mit konstantem Strom auf. Anstelle des Widerstandes, wie im Schema in Abbildung 5.15, fungiert nun die Stromquelle des zweiten Leistungsverstärkers als Last. Bei diesem Messaufbau wird die gleiche Batterie-Konfiguration wie beim Entladevorgang verwendet (6 serielle 7,2 V 5,4 Ah Lithium-Ionen Zellen). Der Ladestrom wird dabei auf den maximalen Wert des Leistungsverstärkers von 20 A eingestellt, damit der Ladevorgang nicht zu viel Zeit in Anspruch nimmt. Generell sei an dieser Stelle erwähnt, dass die Messung des Ladens direkt im Anschluss der Entlade-Messung stattfand, womit die Anfangs-Zelltemperatur nicht der Umgebungstemperatur von 20 °C entspricht. Dies wird bei den Erklärungen zur Zell-Temperatur nochmals genauer erläutert.

Abbildung 5.21 zeigt den Messaufbau während der Simulation des Ladevorganges. Wie im Bild ersichtlich, ist Leistungsverstärker 1 (LVS 1), mit welchem die Modellsimulation stattfindet, mit Leistungsverstärker 2 (LVS 2), welcher die Stromquelle darstellt, verbunden. Die Simulation erfolgt mit einem Anfangs-Ladezustand von 0 %, das heißt die Batterie ist entladen und wird im Laufe der Simulation vollständig geladen. Dabei werden die Batteriespannung, der Batteriestrom, der Ladezustand, sowie die Zelltemperatur mitgemessen. Der für die Versuche simulierte Batterieaufbau beinhaltet 6 seriell verbundene 7,2 V 5,4 Ah Lithium-Ionen Zellen.



Abbildung 5.21: Messaufbau beim Ladevorgang

Der Messaufbau ist ähnlich zu jenem bei den Messungen der PV-Module im Stromquellen-Modell (Abschnitt 4.11). Daher muss auch hier, aufgrund von Messungenauigkeiten und Rauschen, mit einer etwas größeren Abweichung zu den Simulink®-Block Werten gerechnet werden. Dieser These soll in den folgenden Ausführungen überprüft werden.

In Abbildung 5.22 ist die Batteriespannung während des Ladevorganges ersichtlich. Dabei beschreibt die rote Kurve die im Labor aufgenommenen und geglätteten Messdaten, während die Daten der blauen Kurve aus der Simulation in Simulink® mit 6 Battery-Blöcken des gleichen Typs entstammen. Hier ist anzumerken, dass die aufgenommene Batteriespannung am Ausgang des Leistungsverstärker gemessen wird.

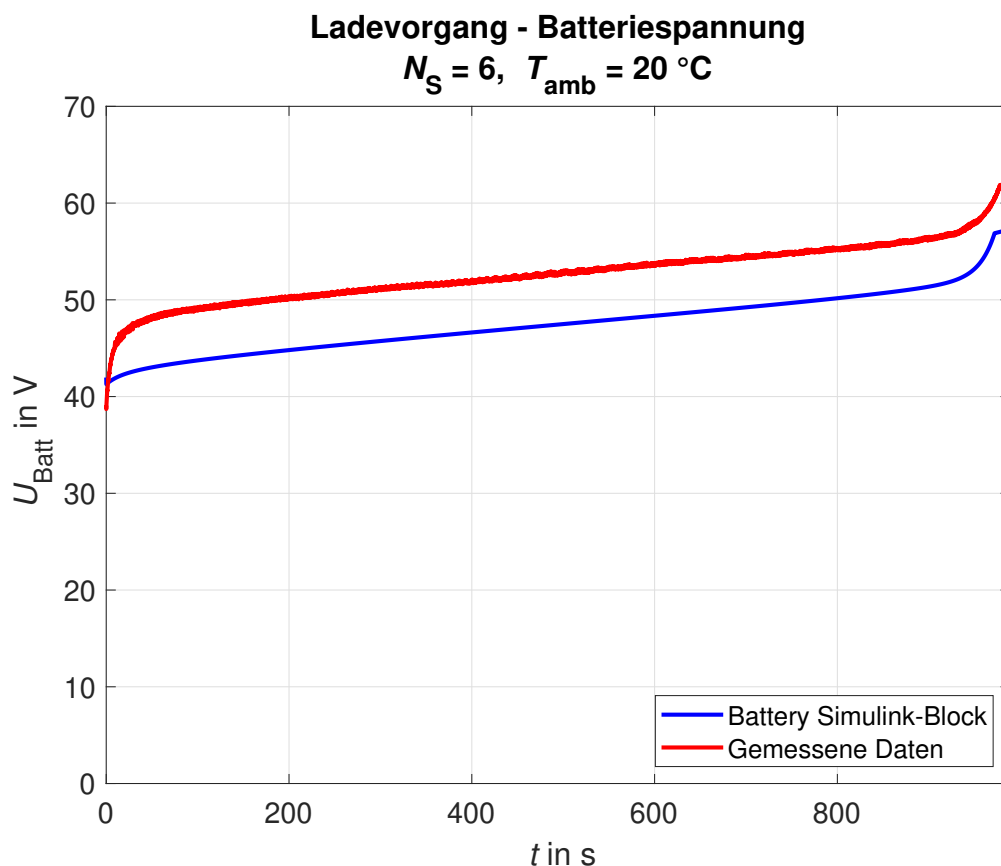


Abbildung 5.22: Batteriespannung beim Ladevorgang

Wie in obiger Abbildung ersichtlich, sind die Unterschiede zwischen den im Labor aufgenommenen Daten und jenen aus dem Simulink® Battery-Block beim Ladevorgang deutlich zu erkennen. Dabei besitzen beide Graphen den gleichen Verlauf, im Fall der gemessenen Batteriespannung ist jedoch eine Art Offset vorhanden, wodurch diese während der Simulation um etwa 4 V höher ist als die Simulink® Battery-Block Spannung. Dieser Unterschied kann dadurch erklärt werden, dass die Messung bei einer Zelltemperatur von etwa 56 °C, und nicht bei der Umgebungstemperatur von 20 °C, gestartet wird. Der Modell-Parameter  $E_0$  wird anhand der aktuellen Zelltemperatur berechnet (vgl. Formel 5.7), daher ergibt sich hier bereits am Beginn ein höherer Wert. Im Fall des Simulink®-Battery-Blocks wird zwar ebenfalls eine Zell-Starttemperatur von 56 °C eingestellt, die Batteriespannung liegt hier jedoch im gleichen Wertebereich wie bei einer Starttemperatur von 20 °C. Hier stellt sich die Frage, welche der beiden Graphen näher am tatsächlichen Verhalten einer Batteriezelle liegt, vor allem da in der Dokumentation des Battery-Blocks ([3]) für den Ladevorgang eine Modell-Genauigkeit von 5 % angegeben ist und die Differenz der Spannungen in der Abbildung bei durchschnittlich 8 % liegt. Dies könnte Gegenstand weiterer Untersuchungen sein.

Abbildung 5.23 zeigt den Batteriestrom bei der vollständigen Aufladung der 6 Lithium-Ionen Zellen, wobei hier der bereits gefilterte Eingangsstrom des Leistungsverstärkers 1 (jener mit dem Modell) gemessen und geglättet wird. Die Daten der Simulink®-Battery-Blöcke sind wiederum in blau dargestellt. Aufgrund des Ladevorganges sind die Werte der abgebildeten Ströme negativ.

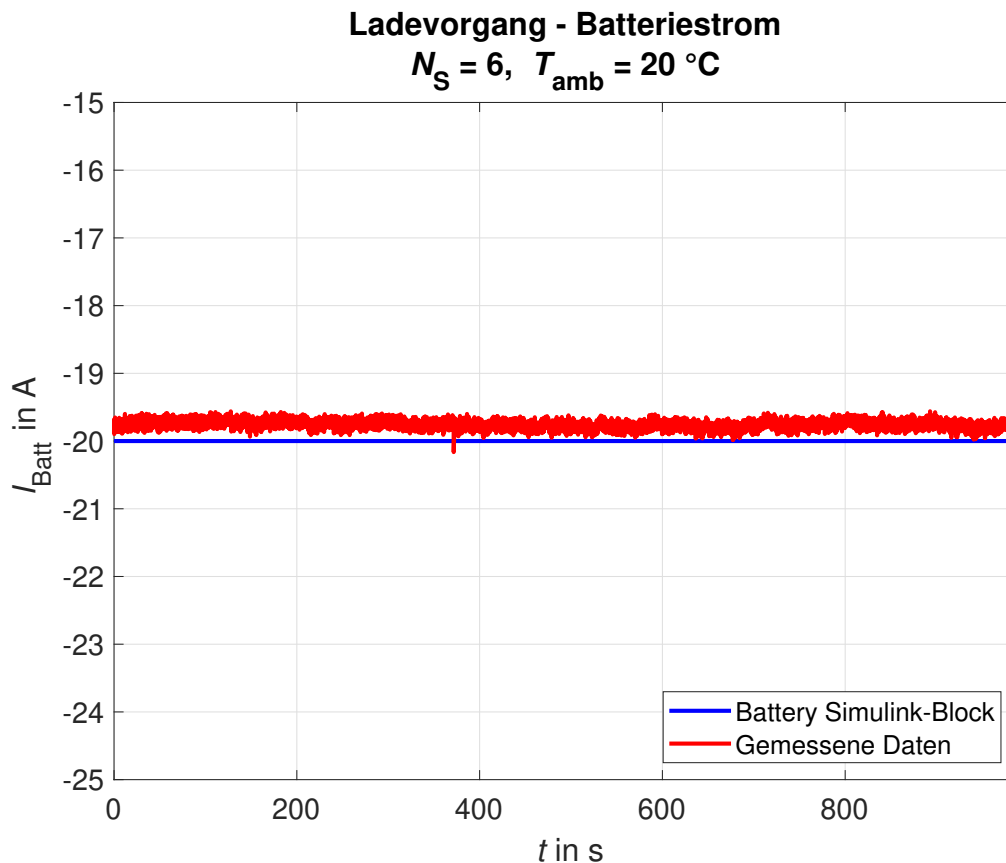


Abbildung 5.23: Batteriestrom beim Ladevorgang

Anhand der Verläufe ist erkennbar, dass die Batteriezellen mit einem konstanten Strom geladen werden. In den in rot dargestellten gemessenen Daten sind trotz Verwendung der IIR-gefilterten Werte und anschließender Glättung in MATLAB®, noch Oszillationen und Rauschen erkennbar. Des Weiteren liegt der Batteriestrom hier etwas unter den eingestellten 20 A. Dies könnte ebenfalls einen Einfluss auf die Abweichungen der Batteriespannung in Abbildung 5.22 haben.

Der aktuelle Ladezustand (SOC) in % im Zuge der vollständigen Ladung des simulierten Batteriepacks ist in Abbildung 5.24 dargestellt, die rote Kurve stammt aus den Messungen des erstellten Modells während der blaue Graph die Daten der Battery-Blöcke in Simulink® widerspiegelt.

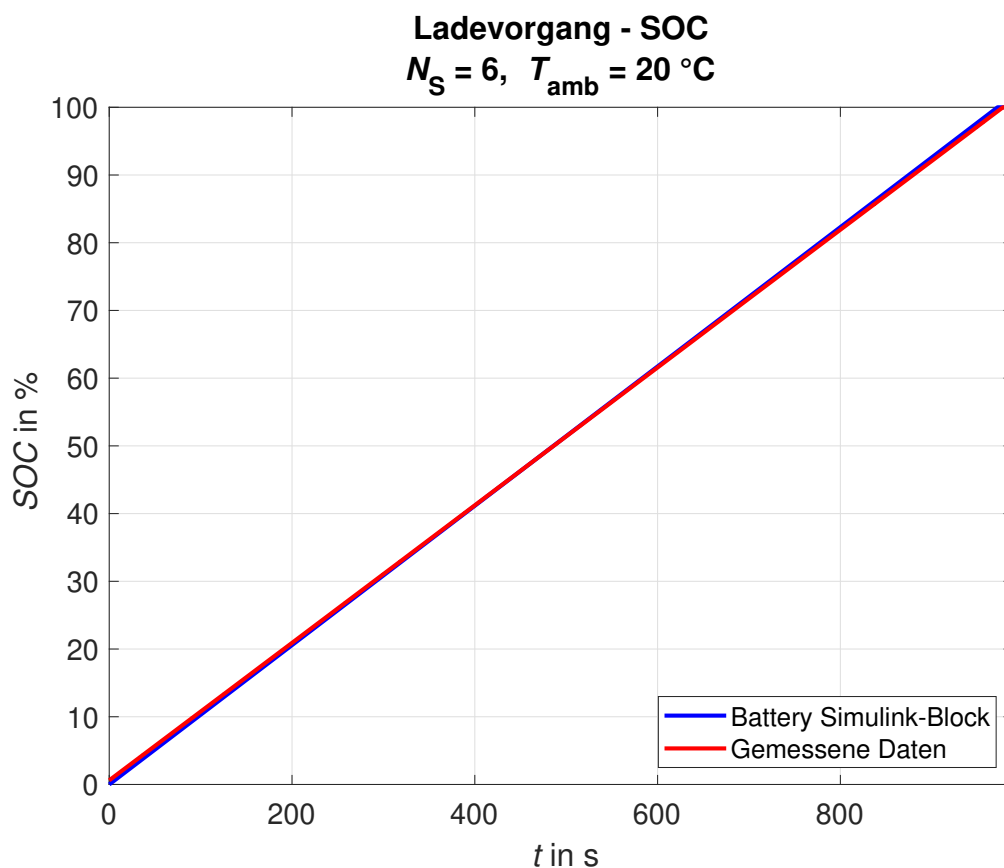


Abbildung 5.24: Ladezustand beim Entladevorgang

Die im Labor ermittelten Daten des Ladezustandes sind beinahe identisch zu jenen der Simulink®-Battery-Blöcke. Es sind nur geringe Abweichungen erkennbar. Aufgrund des konstanten Stromes erfolgt die Aufladung der Zellen gleichmäßig, erkennbar an der konstanten Steigung des SOC-Verlaufs.

Der Verlauf der internen Temperatur einer Zelle des Batteriepacks während des Ladevorganges ist in Abbildung 5.25 ersichtlich. Dabei sind die gemessenen Werte in rot, und die vom Simulink®-eigenen Battery-Block erhaltenen Werte in blau, dargestellt.



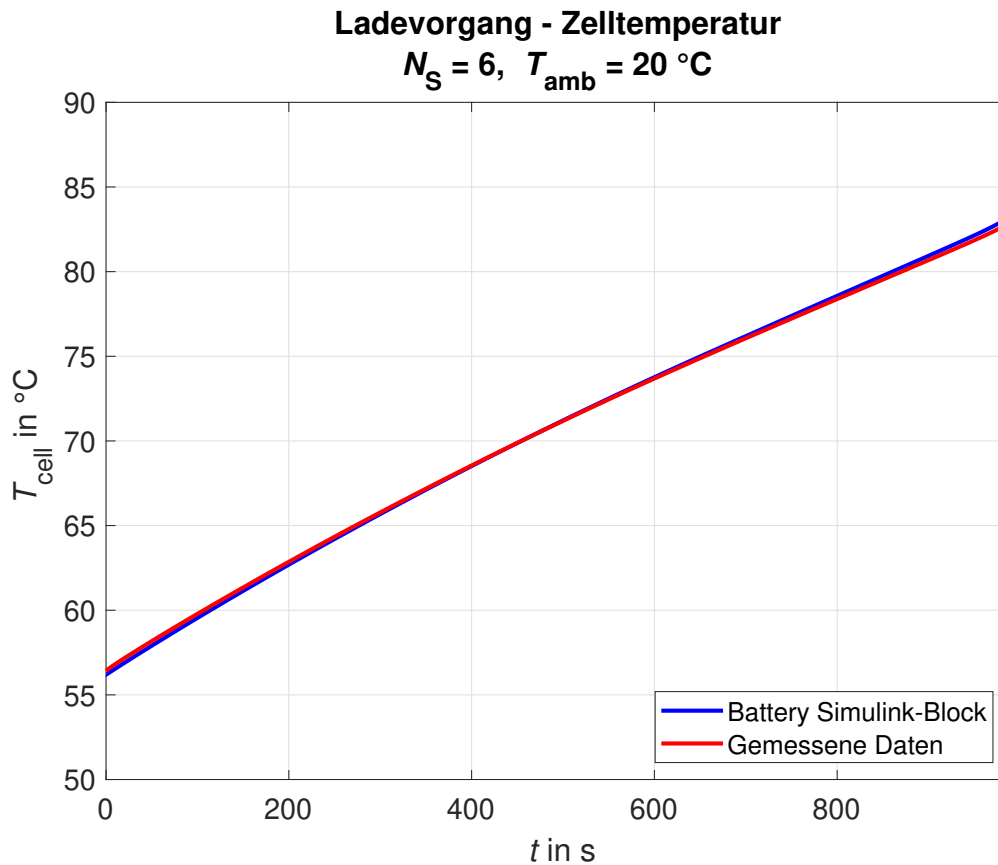


Abbildung 5.25: Zelltemperatur beim Ladevorgang

Der Startwert der simulierten Zelltemperatur liegt beim Ladevorgang bei etwa 56 °C. Der Grund dafür ist, dass direkt vor der Simulation der Aufladung, der Entladevorgang mittels Ohmscher Last aufgenommen wurde. Im Zuge dessen steigt die Temperatur von 20 °C auf maximal 57 °C und beginnt nach der vollständigen Entladung wieder zu sinken. Dies ist in Abbildung 5.20 ersichtlich. Des Weiteren ist erkennbar, dass die Temperatur während der Aufladung auf etwa 83 °C steigt. Die beiden Verläufe sind sehr ähnlich, wobei lediglich ganz am Beginn und Ende der Simulation eine nennenswerte Abweichung auftritt. In [35] werden für den Normalbetrieb von Lithium-Ionen Batterien ideale Außentemperaturen von 10 - 25 °C und ideale Betriebstemperaturen von 20 - 40 °C angegeben. Werden Batterien außerhalb dieser Temperaturbereiche betrieben, kann dies Auswirkungen auf die Lebensdauer haben [35]. Dies führt zu der Erkenntnis, dass die Zelltemperaturen im Falle der vorliegenden Untersuchungen, vor allem im Ladefall, zu hoch sind. Hierbei muss jedoch nochmals erwähnt werden, dass nur eine grobe und vereinfachte Simulation der Zelltemperatur durchgeführt wird, bei einer genaueren Modellierung könnten sich die ermittelten Werte unterscheiden und vielleicht sogar im idealen Bereich liegen.



## 6 Conclusio

Die steigende Anzahl an PV- und Energiespeichersystemen im Versorgungsnetz führt, aufgrund ihrer Anbindung über leistungselektronische Komponenten, zu neuen Herausforderungen in der Sicherstellung der Versorgungssicherheit des Netzes. Daher sind korrekte Modelle von Photovoltaik- und Energiespeichersystemen erforderlich, um die Stabilität sowohl solcher Systeme selbst, als auch in Verbindung mit dem Stromnetz untersuchen zu können.

In dieser Arbeit werden daher zwei Modelle in Simulink<sup>®</sup> erstellt, wobei eines auf dem vereinfachten Ersatzschaltbild einer PV-Zelle basiert, und das andere auf dem modifizierten Shepherd Ersatzschaltbild einer sekundären, das heißt wiederaufladbaren, Batterie. Bei der Simulation der Energiespeicher stehen Lithium-Ionen Batterien im Mittelpunkt der Betrachtungen, da diese in einem Großteil der derzeit vorhandenen elektro-chemischen Kraftwerke eingesetzt werden.

Bei den Untersuchungen zur Modellierung von PV-Modulen mussten einige Herausforderungen, vor allem in Bezug auf die Echtzeitfähigkeit der Modelle und die Umsetzbarkeit am Leistungsverstärker, bewältigt werden. Im Zuge dieser Arbeit wurden 2 Modelle erstellt deren Funktionsfähigkeit am Echtzeitrechner bestätigt wurde. Die Erkenntnis hierbei ist, dass mit dem vereinfachten Ersatzschaltbild als Stromquelle das Verhalten von PV-Zellen und -Modulen ausreichend realitätsnah und stabil simuliert werden kann.

Wie die Vergleiche mit den Daten aus dem Simulink<sup>®</sup>-eigenen PV-Array Block zeigen, ist die Genauigkeit bei Standard-Test-Bedingungen ( $1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ , 25 °C) sehr hoch, mit sinkenden Einstrahlungsstärken und steigenden Temperaturen werden die Abweichungen etwas größer. Dies liegt zum Einen am Modell selbst, welches bei Standard-Test-Bedingungen parametrisiert wird, zum Anderen führen auch Messungenauigkeiten und Rauschen zu den Unterschieden der Ergebnisse. An dieser Stelle sei nochmals erwähnt, dass die Simulation des Simulink<sup>®</sup>-eigenen PV-Array Blocks am Echtzeitrechner aufgrund der inkludierten Algebraischen Schleife und den Simscape-Ausgängen nicht möglich ist. Um die Parameterfindung noch einfacher zu gestalten wurde ein MATLAB<sup>®</sup>-Initialisierungsskript erstellt, in welchem der gewünschte Modultyp sowie die Simulationsparameter ausgewählt werden können.

Generell kann aus den Ergebnissen der Untersuchungen zur Modellierung von Photovoltaiksystemen geschlussfolgert werden, dass die Modelle (sowohl in der Form als Spannungsquelle als auch als Stromquelle) funktionsfähig sind, und dabei eine ausreichende Genauigkeit besitzen, vor allem in Anbetracht der simplen Parametrierung. In der Simulation selbst können die Werte der Einstrahlungsstärke und Umgebungstemperatur direkt verändert werden, womit auch Simulationen von beliebigen Szenarien (z.B. Sonnenaufgang im Sommer oder Winter) ermöglicht werden. Mit den erstellten Modellen sind damit auch eine Vielzahl an weiteren Untersuchungen möglich. Aufgrund des einfachen Aufbaus sind in weiterer Folge auch Verbesserungen in Bezug auf die realitätsgetreue Modellierung, durch die Berücksichtigung weiterer physikalischer Effekte in der Zelle selbst, möglich.

Die Modellierung der Lithium-Ionen-Batterie gestaltete sich in Bezug auf die Echtzeitfähigkeit des Modells etwas einfacher, da das modifizierte Ersatzschaltbild von Shepherd keine direkten Rückkopplungen und damit keine Algebraischen Schleifen enthält. Die Schwierigkeit lag hier vor allem in der Erstellung eines korrekten, wenn auch vereinfachten, thermischen Modells mit dem Einfluss der Temperatur auf die Batterie-Parameter. Um die Berechnung und Zuweisung der Parameter für verschiedene Batterietypen einfacher zu gestalten wurde ein MATLAB<sup>®</sup>-Initialisierungsskript erstellt, in welchem die gewünschte Lithium-Ionen Zelle sowie die Simulationsparameter ausgewählt werden können.

An den Ergebnissen der Simulation des Entladevorganges ist erkennbar, dass die Abweichungen zu den Daten der Simulink<sup>®</sup>-eigenen Battery-Blöcke sehr gering sind, womit das Modell eine sehr hohe Genauigkeit aufweist. Beim Ladevorgang sind im Verlauf der Batteriespannung Unterschiede erkennbar, die sowohl durch die erhöhte Starttemperatur als auch die Abweichung des Ladestroms vom eingestellten Wert verursacht werden könnten. Die allgemeine Funktionsfähigkeit des Modells sowohl beim Laden als auch beim Entladen ist definitiv gegeben, wobei auch hier durch den möglichst unkomplizierten Aufbau des Modells selbst, weitere Untersuchungen zur Verbesserung der Genauigkeit möglich sind.

Die im Zuge dieser Arbeit erstellten Modelle können somit für weitere Power-Hardware-in-the-Loop Tests verwendet werden, um die Stabilität des Stromversorgungssystems in Verbindung mit Photovoltaik- und Energiespeichersystemen zu eruieren.

# Abbildungsverzeichnis

3.1	Schema des Messaufbaus im PHIL-Labor . . . . .	5
4.1	Aufbau einer typischen Silizium PV-Zelle [1] . . . . .	8
4.2	Ideales Ersatzschaltbild einer PV-Zelle mit einer Last $R$ . . . . .	9
4.3	1-Dioden-Ersatzschaltbild einer PV-Zelle mit einer Last $R$ . . . . .	10
4.4	Vereinfachtes Ersatzschaltbild einer PV-Zelle mit einer Last $R$ . . . . .	11
4.5	2-Dioden-Ersatzschaltbild einer PV-Zelle mit einer Last $R$ . . . . .	12
4.6	PV-Charakteristiken unter Standard-Test-Conditions . . . . .	14
4.7	Einfluss der Einstrahlungsstärke auf die PV-Zellen . . . . .	16
4.8	Einfluss der Temperatur auf die PV-Zellen . . . . .	18
4.9	Simulink <sup>®</sup> -Modell des 1-Dioden-Ersatzschaltbildes . . . . .	20
4.10	Simulink <sup>®</sup> -Block des Photostroms . . . . .	21
4.11	Simulink <sup>®</sup> -Block des Diodensättigungsstromes . . . . .	22
4.12	Simulink <sup>®</sup> -Block des Diodenstromes . . . . .	23
4.13	Dialog-Fenster in MATLAB <sup>®</sup> zur Initialisierung . . . . .	24
4.14	Algebraische Schleife des Modells . . . . .	25
4.15	1-Dioden-Modell mit Verzögerung in der Rückkopplung . . . . .	26
4.16	Instabilität durch Verzögerungsblock im Modell . . . . .	27
4.17	Simulink <sup>®</sup> -Modell des vereinfachten Ersatzschaltbildes . . . . .	29
4.18	Simulink <sup>®</sup> -Block des Kurvenanpassungsparameters $\alpha$ . . . . .	29
4.19	Simulink <sup>®</sup> -Block von $\alpha_{ref}$ . . . . .	30
4.20	Simulink <sup>®</sup> -Block zur Berechnung des Photovoltaik-Widerstandes . . . . .	31
4.21	Diodensättigungsstrom im vereinfachten Modell . . . . .	32
4.22	Schematischer Messaufbau mit $R$ als Last . . . . .	33
4.23	Messaufbau bei STC-Messung . . . . .	35
4.24	Messergebnisse bei Standard-Test-Bedingungen . . . . .	37
4.25	Messaufbau bei geringer Einstrahlung und hoher Temperatur . . . . .	38
4.26	Messergebnisse bei geringer Einstrahlung und hoher Temperatur . . . . .	39
4.27	Schematischer Aufbau mit dem PV-Wechselrichter . . . . .	40
4.28	Messaufbau beim Versuch mit SMA SB 1200 Wechselrichter . . . . .	41
4.29	Simulink <sup>®</sup> -Modell für die Messungen als Stromquelle . . . . .	43
4.30	Schematischer Messaufbau mit Stromquellen-Modell und $R$ als Last . . . . .	44
4.31	Messaufbau bei der Messung mit Lastwiderstand . . . . .	45
4.32	Messergebnisse mit Lastwiderständen bei Standard-Test-Bedingungen . . . . .	47

4.33	Messaufbau bei der Messung mit beiden Leistungsverstärkern . . . . .	48
4.34	Messergebnisse mit idealer Spannungsquelle bei Standard-Test-Bedingungen	49
4.35	Gemessene Werte während der Simulation . . . . .	50
4.36	Messergebnisse mit Leistungsverstärker bei $100 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ und $75 \text{ }^\circ\text{C}$ . . . . .	51
4.37	Messdaten der I/U-Kennlinie . . . . .	52
5.1	Physikalischer Aufbau einer Lithium-Ionen Zelle [2] . . . . .	54
5.2	Thevenin Modell einer Lithium-Ionen Batterie . . . . .	55
5.3	Modifiziertes Shepherd Modell einer Lithium-Ionen Batterie . . . . .	56
5.4	Entlade-Charakteristik einer Lithium-Ionen Zelle [3] . . . . .	58
5.5	Lade-Charakteristik einer Lithium-Ion Zelle . . . . .	59
5.6	Simulink <sup>®</sup> -Modell der Lithium-Ionen Batterie . . . . .	62
5.7	Berechnung der Ladung <i>it</i> . . . . .	64
5.8	Ermittlung des aktuellen Ladezustandes SOC . . . . .	64
5.9	Thermische Modellierung der Lithium-Ionen Batterie . . . . .	65
5.10	Ermittlung der temperaturabhängigen Parameter . . . . .	66
5.11	Ermittlung der Verlustleistung . . . . .	67
5.12	Ermittlung der Zelltemperatur . . . . .	67
5.13	Block-Parameter der Übertragungsfunktionen [4] . . . . .	68
5.14	Dialog-Fenster in MATLAB <sup>®</sup> zur Initialisierung . . . . .	70
5.15	Schematischer Messaufbau mit <i>R</i> als Last . . . . .	72
5.16	Messaufbau beim Entladevorgang . . . . .	73
5.17	Batteriespannung beim Entladevorgang . . . . .	74
5.18	Batteriestrom beim Entladevorgang . . . . .	75
5.19	Ladezustand beim Entladevorgang . . . . .	76
5.20	Zelltemperatur beim Entladevorgang . . . . .	77
5.21	Messaufbau beim Ladevorgang . . . . .	79
5.22	Batteriespannung beim Ladevorgang . . . . .	80
5.23	Batteriestrom beim Ladevorgang . . . . .	81
5.24	Ladezustand beim Entladevorgang . . . . .	82
5.25	Zelltemperatur beim Ladevorgang . . . . .	83

# Tabellenverzeichnis

4.1	Moduldaten 1Soltech 1STH-215-P . . . . .	24
4.2	Eingestellte, gemessene und berechnete Werte bei STC-Messung . . . .	36
4.3	Eingestellte, gemessene und berechnete Werte bei STC-Messung . . . .	46
5.1	Daten einer 7,2 V 5,4 Ah Lithium-Ionen Batterie . . . . .	69





# Literaturverzeichnis

- [1] Konrad Mertens. *Photovoltaik: Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis*, volume 5. Carl Hanser Verlag München, 2020.
- [2] John B. Goodenough and Kyu-Sung Park. The Li-Ion Rechargeable Battery: A Perspective. *Journal of the American Chemical Society*, 135(4):1167–1176, 2013. PMID: 23294028.
- [3] The MathWorks Inc. Battery: Generic battery model Documentaion. <https://de.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/battery.html>. (abgerufen am 27. April 2021).
- [4] The MathWorks Inc. Battery: Generic battery model.
- [5] Holger Watter. *Nachhaltige Energiesysteme: Grundlagen, Systemtechnik und Anwendungsbeispiele aus der Praxis*, volume 1. Vieweg + Teubner Verlag, 2009.
- [6] Andreas Wagner. *Photovoltaik Engineering*, volume 2. Springer Verlag, 2006.
- [7] Thomas Schabbach Viktor Wesselak. *Regenerative Energietechnik*. Springer Verlag, 2009.
- [8] Valentin Crastan. *Elektrische Energieversorgung 2: Energiewirtschaft und Klimaschutz, Elektrizitätswirtschaft, Liberalisierung, Kraftwerktechnik und alternative Stromversorgung, chemische Energiespeicherung*, volume 3. Springer Verlag, 2012.
- [9] Volker Quaschnig. *Regenerative Energiesysteme: Technologie - Berechnung - Simulation*, volume 7. Carl Hanser Verlag München, 2011.
- [10] Photovoltaik Solarstrom. Antireflexschicht. <https://photovoltaiksolarstrom.com/photovoltaiklexikon/antireflexschicht/>. (abgerufen am 12. April 2021).
- [11] Øystein Ulleberg. *Stand-alone power systems for the future: Optimal design, operation & control of solar-hydrogen energy systems*. Ph. d. dissertation, Norwegian University of Science and Technology, 1998.
- [12] Heinrich Häberlin. *Photovoltaics: System, Design and Practice*. John Wiley & Sons, Ltd Verlag, 2012.

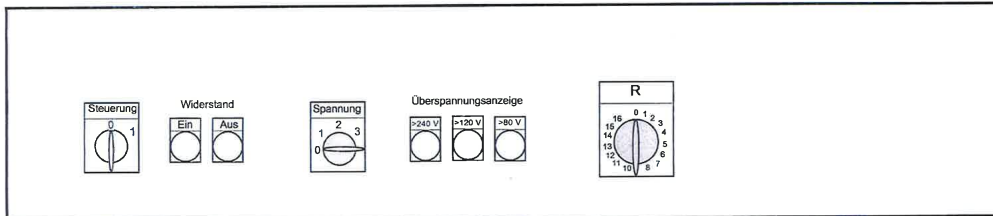
- 
- [13] M. G. Villalva, J. R. Gazoli, and E. R. Filho. Modeling and circuit-based simulation of photovoltaic arrays. *Brazilian Journal of Power Electronics*, Vol. 14(No. 1):p. 35–45, February 2009. ISSN 1414-8862.
- [14] Diego Torres Lobera. *Modeling and Analysis of the Operation of PV Power Generators under Varying Atmospheric Conditions*. Ph. d. dissertation, Tampere University of Technology, 2014.
- [15] Dieter K. Schroder. *Semiconductor Material and Device Characterization*, volume 3. John Wiley & Sons, Ltd Verlag, 2006.
- [16] W. De Soto, S. A. Klein, and W. A. Beckman. Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance. *Solar Energy*, 80:p. 78–88, 2006.
- [17] The MathWorks Inc. PV Array model.
- [18] MathWorks. Algebraic Loop Concepts. <https://de.mathworks.com/help/simulink/ug/algebraic-loops.html>. (abgerufen am 15. April 2021).
- [19] Timothy U. Townsend. A method for estimating the long-term performance of direct-coupled photovoltaic systems. Master’s thesis, University of Wisconsin - Madison, 1989.
- [20] Krismadinata, Nasrudin Abd. Rahim, Hew Wooi Ping, and Jeyraj Selvaraj. Photovoltaic module modeling using simulink/matlab. *Procedia Environmental Sciences*, 17:p. 537–546, 2013.
- [21] Phototec. SMA SB 1200 Installationsanleitung. [http://www.phototec.at/fileadmin/user\\_upload/dateien/wechselrichter/sma/Sunny\\_Boy\\_mit\\_Trafo\\_\\_1\\_3-4\\_0\\_DC\\_/Anleitungen\\_SB1200-SB1700.pdf](http://www.phototec.at/fileadmin/user_upload/dateien/wechselrichter/sma/Sunny_Boy_mit_Trafo__1_3-4_0_DC_/Anleitungen_SB1200-SB1700.pdf). (abgerufen am 21. April 2021).
- [22] U.S. Department of Energy. DOE OE Global Energy Storage Database: Global Energy Storage Database Projects (11-17-2020). <https://www.sandia.gov/ess-ssl/global-energy-storage-database-home/>. (abgerufen am 22. April 2021).
- [23] Ingo Stadler Michael Sterner. *Energiespeicher*. Springer Vieweg, 2014.
- [24] Martin Doppelbauer. *Grundlagen der Elektromobilität*. Springer Vieweg, 2020.
- [25] Reiner Korthauer Hrsg. *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*. Springer Vieweg, 2013.
- [26] Hartmut Hinz. Comparison of Lithium-Ion Battery Models for Simulating Storage Systems in Distributed Power Generation. *Inventions*, 4(3):41, 2019. <https://doi.org/10.3390/inventions4030041>.

- 
- [27] Bernhard Schweighofer, Klaus M. Raab, and Georg Brasseur. Modeling of High Power Automotive Batteries by the Use of an Automated Test System. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 52(4):1087–1091, 2003.
- [28] Bernhard Schweighofer, Hannes Wegleiter, Manes Recheis, and Paul Fulmek. Fast and Accurate Battery Model applicable for EV and HEV Simulation. *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, 2012.
- [29] C. M. Shepherd. Design of Primary and Secondary Cells. *Journal of Electrochemical Society*, 112(7):657–664, 1965.
- [30] Olivier Trembley, Louis-A. Dessaint, and Abdel-illah Dekkiche. A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2007.
- [31] Olivier Trembley and Louis-A. Dessaint. Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications. *World Electric Vehicle Journal*, 3:289–298, 2009.
- [32] Chaofeng Liu, Zachary G. Neale, and Guozhong Cao. Understanding electrochemical potentials of cathode materials in rechargeable batteries. *Materials Today*, 19(2):109–123, 2016.
- [33] L.H. Saw, K. Somasundaram, Y. Ye, and A.A.O. Tay. Electro-thermal analysis of Lithium Iron Phosphate battery for electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 249:231–238, 2014.
- [34] Cong Zhu, Xinghu Li, Lingjun Song, and Liming Xiang. Development of a theoretically based thermal model for lithium ion battery pack. *Journal of Power Sources*, 223:155–164, 2013.
- [35] VDE Verband der Elektrotechnik. Kompendium: Lithium-Ionen-Batterien. <https://www.dke.de/resource/blob/933404/3d80f2d93602ef58c6e28ade9be093cf/kompendium-li-ionen-batterien-data.pdf>, Juli 2015. (abgerufen am 02. Mai 2021).



# Anhang

## B.1 Datenblatt Leistungswiderstände



Spannungsbereich:  
 1 U < 240 V  
 2 U < 120 V  
 3 U < 80 V

### Lastwiderstand

maximal 16 kW bei U = 240 V  
 maximal 8 kW bei U = 120 V  
 maximal 5 kW bei U = 80 V

Steuerspannung 230 V

Stufe	Spannungsbereich U < 240 V		Spannungsbereich U < 120 V		Spannungsbereich U < 80 V	
	R [Ω]	I <sub>max</sub> [A]	R [Ω]	I <sub>max</sub> [A]	R [Ω]	I <sub>max</sub> [A]
1	64.0	4.4	27.0	4.4	18.0	4.4
2	27.0	8.9	13.5	8.9	9.0	8.9
3	18.0	13.3	9.0	13.3	6.0	13.3
4	13.5	17.8	6.8	17.8	4.5	17.8
5	10.8	22.2	5.4	22.2	3.6	22.2
6	9.0	26.7	4.5	26.7	3.0	26.7
7	7.7	31.1	3.9	31.1	2.6	31.1
8	6.8	35.6	3.4	35.6	2.3	35.6
9	6.0	40.0	3.0	40.0	2.0	40.0
10	5.4	44.4	2.7	44.4	1.8	44.4
11	4.9	48.9	2.5	48.9	1.6	48.9
12	4.5	53.3	2.3	53.3	1.5	53.3
13	4.2	57.8	2.1	57.8	1.4	57.8
14	3.9	62.2	1.9	62.2	1.3	62.2
15	3.6	66.7	1.8	66.7	1.2	66.7
16	3.4	71.1	1.7	71.1	1.1	71.1

## B.2 Datenblatt stufenlos regelbare Leistungswiderstände



Institut für Elektrische Anlagen und Netze

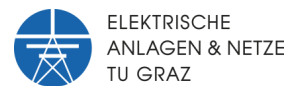


# Datenblatt Leistungswiderstände

Editor: Sabrina Koffler



Datenblatt Leistungswiderstände



## Allgemeines

Es handelt sich um die Widerstandstypen „Rusa GmbH – Wien; Nr.: 18-062W – 24933“

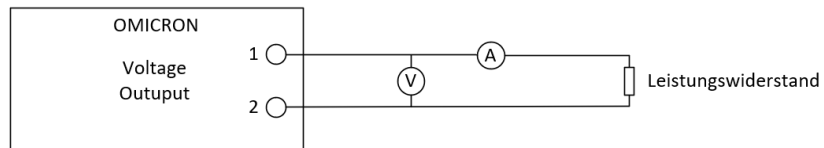
Nennwerte: 1200 Watt, 230 VAC, 50 Hz, 5,2 A



Abbildung 1: Frontansicht des Leistungswiderstandes

Abbildung 1 zeigt die Frontansicht des Leistungswiderstandes. An der Buchse „PE“ wird die Erdung angeschlossen. Die Buchsen „1“ und „2“ sind die eigentlichen Anschlüsse des Leistungswiderstandes. Beim Grobsteller sind die Hauptstufen des Leistungswiderstandes einzustellen (1 bis 6) und beim Feinsteller die Unterstufen (0 bis 100 Prozent). In den Diagrammen bedeutet hiermit der Wert auf der x Achse „x.yy“ Grobstufe x und Feinstufe yy % (z.B. 1.75 – Grobstufe 1 und Feinstufe 75 %).

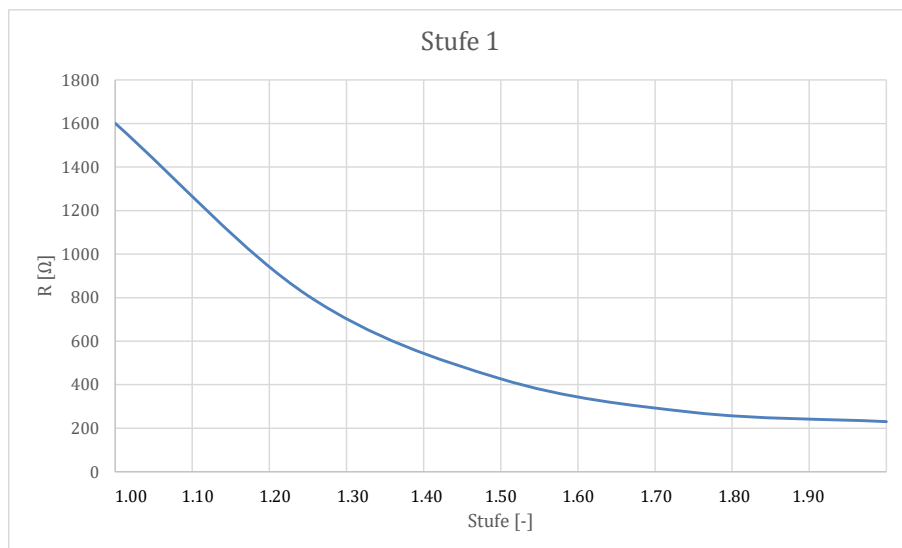
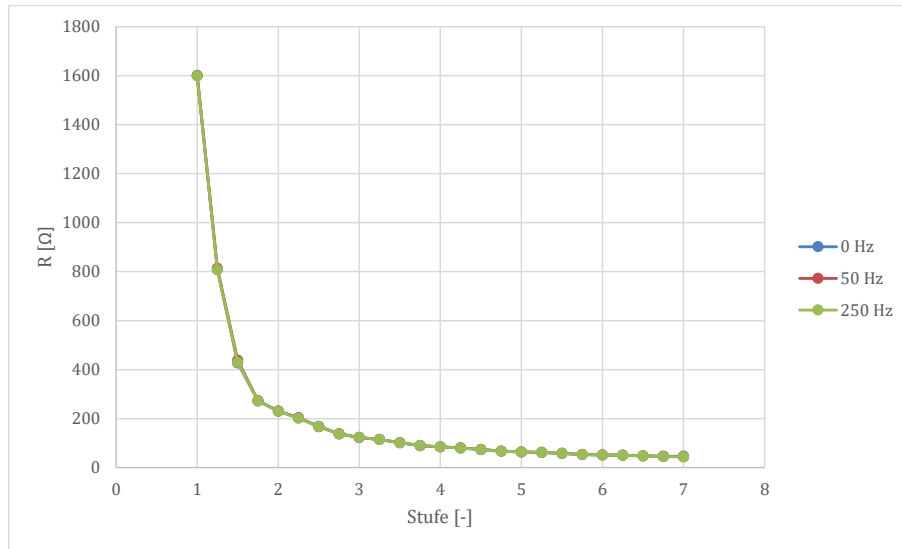
Datenblatt Leistungswiderstände

**Messsetup:**

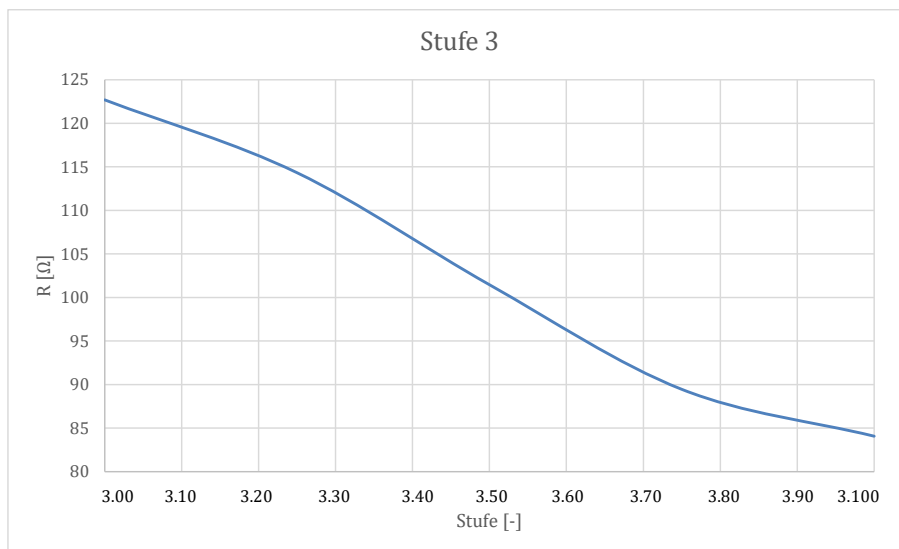
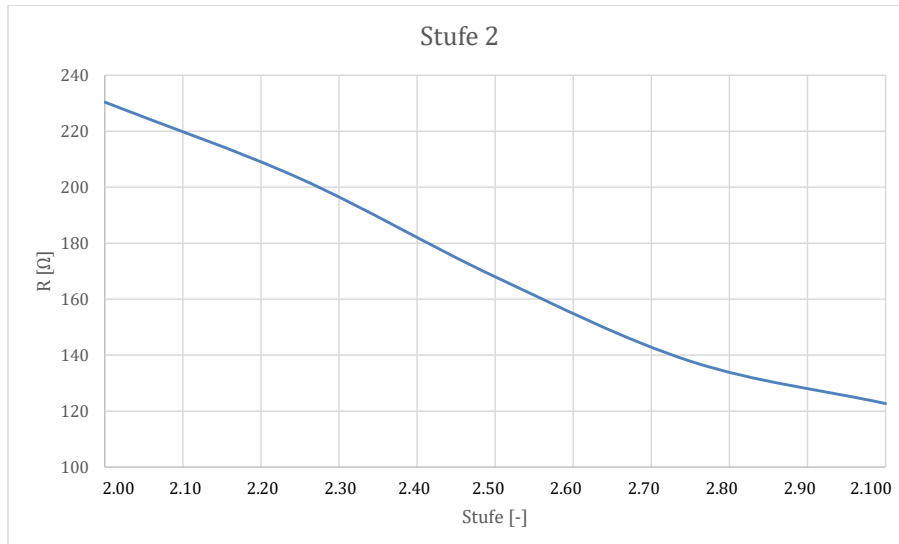
Es wurde stromrichtig gemessen. Im ersten Diagramm ist der Widerstandswert über alle Stufen zu sehen. Dabei wurden alle Messwerte bei Gleichspannung sowie bei einer sinusförmigen Spannung von 50 Hz und 250 Hz aufgenommen. Hier ist ersichtlich, dass dies für den Widerstandswert nur einen marginalen Unterschied macht. In allen weiteren Diagrammen ist jeweils der Widerstand einer Grobsteller-Stufe mit Variation der Feinsteller-Stufe zu sehen.

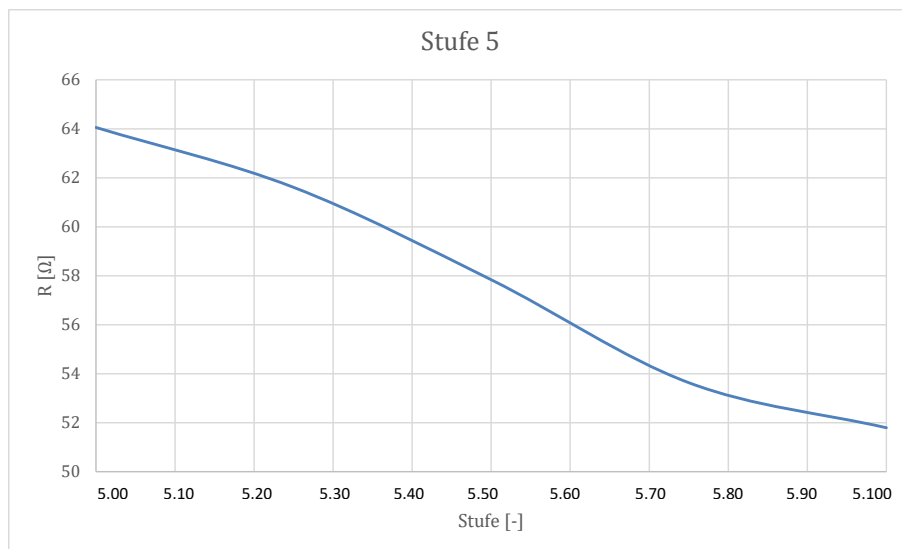
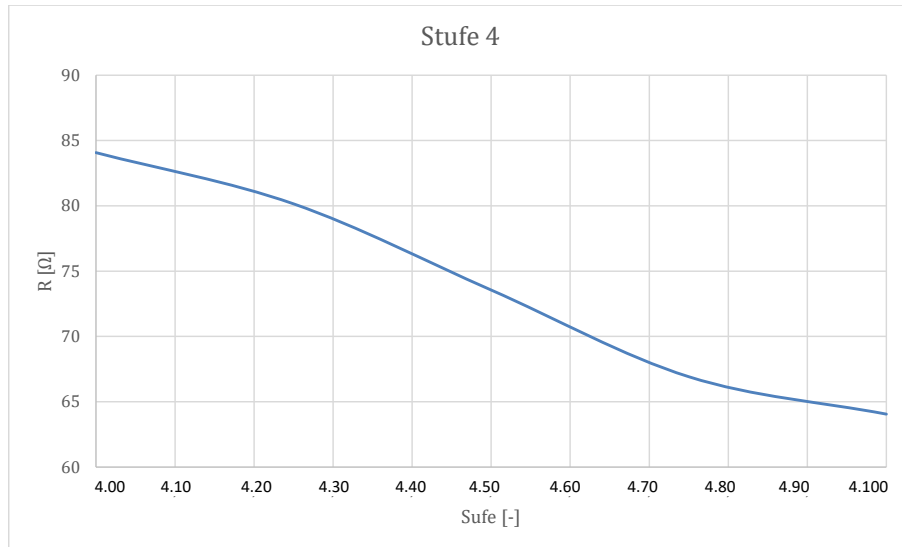


### Diagramme

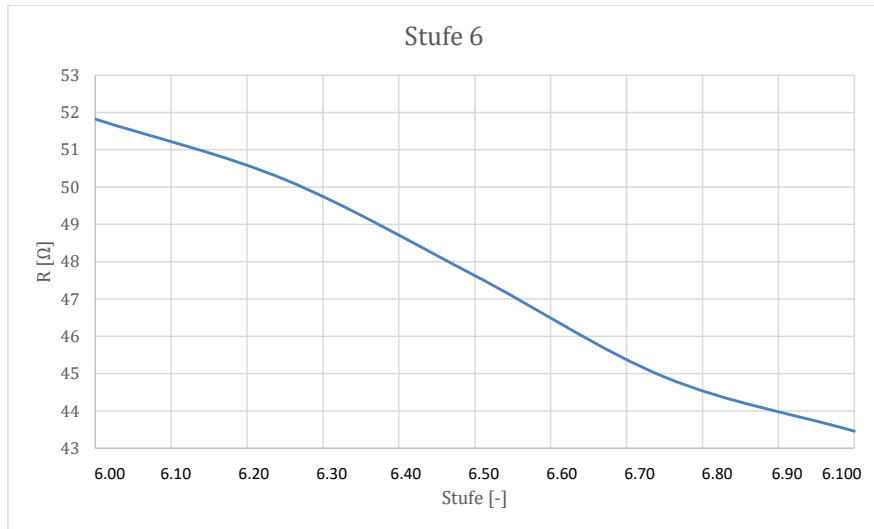


## Datenblatt Leistungswiderstände





## Datenblatt Leistungswiderstände



## B.3 MATLAB®-Initialisierungsskript PV-Modell

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Initialisierungsskript für das Photovoltaik-Modell
%
%Autor: Nadine Strobl
%Version: V2
%Datum: 09.10.2020
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Dialog zur Auswahl des Modultyps
%-----
FileList = {'1Soltech 1STH-215-P', 'Trina Solar TSM-275PD14',...
            'Bosch Solar Energy c-Si M 60-230-16',...
            'SunPower SPR-415E-WHT-D'};
            %Namensliste der auswählbaren Module
[selection,v] = listdlg('PromptString','PV-Modul auswählen:',...
                       'SelectionMode','single','ListSize',[250,70],...
                       'ListString',FileList); %List-Dialog erstellen

%Kontrolle, ob gültiges Modul ausgewählt wurde
%-----
if v == 0
    error('Kein gültiges PV-Modul ausgewählt!'); %Error ausgeben und
                                                %Skript abbrechen
end

%Modul-Daten entsprechend der Auswahl laden
%-----
switch selection
    case 1
        ModuleData = readtable('PV-Module_ModulDaten\Soltech.xls')
        ModuleName = '1Soltech 1STH-215-P';
    case 2
        ModuleData = readtable('PV-Module_ModulDaten\Trina.xls')
        ModuleName = 'Trina';
    case 3
        ModuleData = readtable('PV-Module_ModulDaten\Bosch.xls')
        ModuleName = 'Bosch';
    case 4

```

```

ModuleData = readtable('PV-Module_ModulDaten\Sunpower.xls')
ModuleName = 'Sunpower';

end

%Initialisierungswerte setzen
%-----
Uoc_stc = ModuleData{1,2};      %Leerlaufspannung bei STC
Ump = ModuleData{2,2};         %Spannung im MPP
Isc_stc = ModuleData{3,2};     %Kurzschlussstrom bei STC
Imp = ModuleData{4,2};         %Strom im MPP
Ncell = ModuleData{5,2};       %Zellanzahl pro Modul
Rs = ModuleData{6,2};          %Serienwiderstand
Rp_stc = ModuleData{7,2};      %Parallelwiderstand bei STC
A = ModuleData{8,2};           %Dioden-Idealitätsfaktor
Ki = ModuleData{9,2};          %A/°C Temperaturkoeff. von Isc
Ku = ModuleData{10,2};         %V/°C Temperaturkoeff. von Uoc
T_stc = 25;                    %°C Temperatur bei STC
G_stc = 1000;                  %W/m^2 Einstrahlungsstärke bei STC
k = 1.3806503e-23;             %Boltzmann-Konstante
q = 1.60217646e-19;           %Elementarladung
E_g = 1.17;                    %Bandlückenenergie, Si: typ. 1.17 eV
Nser = ModuleData{11,2};       %Serielle Module per String
Npar = ModuleData{12,2};       %Parallele Strings des Arrays

%Anzahl der PV-Module auswählen
%-----
prompt = {'Anzahl der seriellen Module pro Strang:',...
          'Anzahl der parallelen Stränge:'};
dlgtitle = 'Array-Spezifikationen'; %Dialogtitel
dims = [1 40]; %Dimension des Dialogfensters
definput = {num2str(Nser),num2str(Npar)}; %Default-Eingabewerte
answer = inputdlg(prompt,dlgtitle,dims,definput); %Dialog erstellen
                                                %und Eingaben speichern

%Modulparameter setzen
%-----
Nser = str2num(answer{1}); %serielle Anzahl an Modulen
Npar = str2num(answer{2}); %parallele Anzahl der Strings

```

## B.4 MATLAB®-Initialisierungsskript Batterie-Modell

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Initialisierungsskript für Lithium-Ionen Batterie-Modell
%
%Autor: Nadine Strobl
%Version: V5
%Datum: 29.04.2021
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%% Batterie-Eingangs-Parameter
%
%Dialog zur Auswahl des Batterietyps
%
FileList = {'Li-Ion 7.2V 5.4Ah', 'LiFeP04 3.3V 2.3 Ah', ...
            'LiCo02 11.1 V 6.6 Ah'};
            %Namensliste der wählbaren Batterien
[selection,v] = listdlg('PromptString', 'Batterie-Typ auswählen:', ...
                       'SelectionMode', 'single', 'ListSize', [220,125], ...
                       'ListString', FileList); %List-Dialog erstellen

%Kontrolle, ob gültige Batterie ausgewählt wurde
%
if v == 0
    error('Keine gültige Batterie ausgewählt!'); %Error ausgeben und
                                                %Skript abbrechen
end

%Batterie-Daten entsprechend Auswahl laden
%
switch selection
    case 1
        BatteryData = readtable('Battery-Data\LiIon_7V_5Ah.xls')
        BatteryName = '7.2V 5.4Ah';
    case 2
        BatteryData = readtable('Battery-Data\LiFeP04.xls')
        BatteryName = '3.3 V 2.3Ah';
    case 3
        BatteryData = readtable('Battery-Data\LiCo02.xls')
        BatteryName = '11.1 V 6.6Ah';

```

end

%Initialisierungswerte setzen

---

```

%
U_nom = BatteryData{1,2};      %nominale Batteriespannung in V
Q_def = BatteryData{2,2};     %bemessene Batteriekapazität in Ah
U_full = BatteryData{3,2};    %maximale Spannung in V
I_nom = BatteryData{4,2};     %nomineller Entladestrom in A
Rint_def = BatteryData{5,2};  %Innenwiderstand in Ohm
Q_nom = BatteryData{6,2};     %Kapazität bei nominaler Spg in Ah
U_exp = BatteryData{7,2};     %Exponentielle Spannung in V
Q_exp = BatteryData{8,2};     %Exponentielle Ladung in Ah
alpha = BatteryData{9,2};     %Arrhenius Konst. Pol.-widerstand
beta = BatteryData{10,2};     %Arrhenius Konst. Innenwiderstand
C = BatteryData{11,2};        %nominelle Entladungskurven-Steilheit
dE_dT = BatteryData{12,2};    %reversibler Spgs-Temp.koeff. in V/K
dQ_dT = BatteryData{13,2};    %max. Ladungs-Temp.koeff. in Ah/K
Tr = BatteryData{14,2};       %Batterie-Reaktionszeit in s
Rth = BatteryData{16,2};      %therm. Widerstand in °C/W
Tth = BatteryData{17,2};      %therm. Zeitkonstante in s
Diff_heatloss = BatteryData{18,2}; %Differenzverlustleistung in W
Ta_nom = BatteryData{19,2} + 273.15; %nominale Umgebungstemp. in K

```

%%Auswahl: Anfangs-SOC, Umgebungstemperatur, Anzahl serieller Zellen

---

```

%
prompt = {'Anfangs-Ladezustand in %:',...
         'Umgebungstemperatur in °C:',...
         'Samplezeit in s:',...
         'Anzahl der seriellen Zellen:'};
dlgtitle = 'Sim.-Eigenschaften'; %Dialogtitel
dims = [1 40]; %Dimension des Dialogfensters
%Default-Eingabewerte
definput = {num2str(100),num2str(20), num2str(1e-2),num2str(1)};
answer = inputdlg(prompt,dlgtitle,dims,definput); %Dialog erstellen
                                                %und Eingaben speichern

```

%Eingabeparameter setzen

---

```

%
SOC_init = str2num(answer{1}); %Anfangs-Ladezustand in %
Ta = str2num(answer{2}) + 273.15; %Umgebungstemp. in K
Tcell_init = Ta; %Anfangs-Zelltemp. in K
Ts = str2num(answer{3}); %Sample time in s

```



```
Ns = str2num(answer{4});           %serielle Batterieanzahl

%Fehlende Parameter aus Datenblattwerten berechnen
%-----
A = U_full - U_exp %V
B = 3/Q_exp %Ah^-1
K_def =(U_full-U_nom+A*(exp(-B*Q_nom)-1))*(Q_def-Q_nom)/Q_nom; %V/Ah

%Empirisch ermittelte Korrekturfaktoren für K für die 3 vorhandenen
%Batterietypen
%-----
switch selection
    case 1
        K = K_def / 22; %Temp.–Simulation aktiviert
        %K = abs(K_def *0.55);%Temp.–Simulation deaktiviert

    case 2
        K = K_def / 3.8;

    case 3
        K = K_def /10;
end

E0_def = U_full + K + Rint_def*I_nom- A; %V
E0 = E0_def;
Rint = Rint_def;
Q = Q_def;

%Berechnung der Parameter des diskreten Stromfilters
%-----
transf = tf(1, [Tr/3, 1]);
discr_filter = c2d(transf, Ts, 'matched');
```