



Hochschule für Technik  
und Wirtschaft Berlin

*University of Applied Sciences*

# Buck Converter: Moderne Methoden der Regelungstechnik (VA1)

**Name:**

Sebastian Richter

Aaron Zielstorff

**Matrikelnummer:**

572906

567183

**Fachbereich:** FB1

**Studiengang:** M. Elektrotechnik

**Fachsemester:** 2. FS

**Fach:** VA1 Moderne Methoden der Regelungstechnik

**Dozent:** Prof. Dr.-Ing. Horst Schulte

**Abgabe am:** 25. Juli 2022

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung in die Regelaufgabe</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Modellierung des Buck-Converters</b>	<b>7</b>
2.1	Ströme . . . . .	7
2.2	Induktivitäten und Kapazitäten . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Zustandsraumdarstellung</b>	<b>10</b>
3.1	Nichtlinear . . . . .	10
3.2	Linear . . . . .	11
3.2.1	Ruhelagen . . . . .	11
3.2.2	Linearisierungsvorschrift . . . . .	12
3.2.3	Zustandsraummodell . . . . .	12
3.2.4	Überprüfung der Steuerbarkeit . . . . .	13
<b>4</b>	<b>Vergleich beider Systeme</b>	<b>15</b>
<b>5</b>	<b>Zustandsreglerentwurf</b>	<b>18</b>
5.1	Einfache Zustandsrückführung . . . . .	18
5.2	Referenzwertvorsteuerung . . . . .	18
5.3	I-Regelung . . . . .	18
<b>6</b>	<b>Reglervalidierung</b>	<b>19</b>
6.1	Validierung des linearen Modells . . . . .	19
6.1.1	Zustandsregler mit Ackermann-Formel . . . . .	19
6.1.2	Zustandsregler mit Vorsteuerung . . . . .	19
6.1.3	Zustandsregler mit I-Regelung . . . . .	19
6.1.4	Vergleich des Reglerverhaltens . . . . .	19
6.2	Validierung des nichtlinearen Modells . . . . .	19
6.2.1	Zustandsregler mit Ackermann-Formel . . . . .	19
6.2.2	Zustandsregler mit Vorsteuerung . . . . .	19
6.2.3	Zustandsregler mit I-Regelung . . . . .	19
6.2.4	Vergleich des Reglerverhaltens . . . . .	19
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>20</b>

## Abbildungsverzeichnis

1	Skizze der Regelaufgabe . . . . .	6
2	Übersicht der Simulationsstruktur . . . . .	15
3	Nichtlineare Strecke . . . . .	15
4	Lineare Strecke . . . . .	16
5	Vergleich der Spannungen $v_{PV}$ . . . . .	16
6	Vergleich der Ströme $i_L$ . . . . .	17

## Tabellenverzeichnis

1	Modellparameter des Buck Converters . . . . .	5
---	---	---

# 1 Einführung in die Regelaufgabe

Photovoltaikanlagen enthalten viele Tausend einzelne Photovoltaikzellen. Jede einzelne wandelt einfallende Sonnenstrahlung (direkt und indirekt) in elektrischen Strom um. Unter Vernachlässigung von Verlusten in Kabeln, Wandlerverlusten und Leistungsfehlanspassungen ist die erzeugte Leistung von PV-Systemen die Anzahl aller enthaltenen Zellen multipliziert mit der Leistung einer einzelnen Zelle. Über diese Annahme ist es möglich das das mathematische Modell der gesamten PV-Anlage für die Systemanalyse abzuleiten.

Die Grundeinheiten einer PV-Anlage sind die PV-Module oder auch Solarzellen. Ein Standard-PV-Modul besteht aus 48 bis 73 in Reihe geschalteten Zellen, die in einen Rahmen montiert sind. PV-Anlagen werden in der Regel durch Reihen- und Parallelschaltungen von Modulen zusammengesetzt. Solarmodule werden in Reihe geschaltet (sog. „Strings“), um die Ausgangsspannung zu erhöhen. Parallel geschaltete Strings bilden ein „Array“, in dem die Leistungskapazität von Tausenden bis Millionen Watt aufgebaut werden kann.

Das mathematische Modell des PV-Generators ergibt sich aus der Zusammenfassung aller PV-Module, die durch das Modell einer einzelnen Zelle beschrieben werden, wobei Strom und Spannung in geeigneter Weise multipliziert werden. Dazu wird die Einzelzelle durch ein Ersatzschaltbild modelliert, das aus einer einstrahlungsabhängigen Stromquelle, einem Modell der Diode  $D$  und Shunt-Widerstand  $R_h$  besteht, wie in Abbildung 1 (links) dargestellt. Die Einstrahlung  $S$  mit der physikalischen Einheit  $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  bezieht sich auf die direkte (normal zum PV-Zellenfeld) und die indirekte Einstrahlung.

Um die Spannung von PV-Anlagen zu regeln, werden Gleichspannungswandler eingesetzt. Die Ausgangsspannung des Wandlers kann eingestellt werden und unterscheidet sich von der Eingangsspannung. Eine grundlegende Gleichspannungswandlerschaltung ist der so genannte Buck Converter (Tiefsetzsteller), welcher ebenfalls in Abbildung 1 (rechts) dargestellt ist. Die Pulsweitenmodulation (PWM) ermöglicht die Steuerung und Regelung der gesamten Ausgangsspannung. Die PWM stellt ein Rechtecksignal bereit, welches zwischen 0 und 1 schaltet. Typische Schaltfrequenzen liegen zwischen  $f_{\text{SW}} = 1 \text{ kHz} \dots 1 \text{ MHz}$ . Im Falle der konkreten Anlage beträgt die Schaltfrequenz  $f_{\text{SW}} = 50 \text{ kHz}$ . In der Praxis werden z. B. MOSFET's als Schalter eingesetzt. Die Ausgangsspannung hinter dem MOSFET (siehe ebenfalls Abbildung 1 (mittig)) wechselt somit zwischen Null und der Ausgangsspannung des Wandlers  $v_{\text{DC}}$ . Das Tastverhältnis (Duty Cycle)  $d$  beschreibt die Zeitverhältnisse des Rechtecksignals, also somit wann der Schalter (MOSFET) in Position 0 bzw. 1 ist. Der Duty Cycle lässt sich wie folgt berechnen:

$$d = \frac{v_{\text{DC}}}{v_{\text{PV}}} \quad \text{bzw.} \quad d = \frac{i_{\text{PV}}}{i_{\text{DC}}} \quad (1)$$

Nachfolgend findet sich die Darstellung der Modellparameter/Konstanten zur Modellierung des Buck Converters (siehe Tabelle 1).

Symbol	Parameter	Wert
Standard Testbedingungen (STC)		
$T_{c,STC}$	PV Zelltemperatur bei STC	298 K
$S_{STC}$	Bestrahlung bei STC	$1000 \frac{W}{m^2}$
$v_{T,STC}$	Thermische Spannung der p-n Sperrschicht bei STC	$25.7 \cdot 10^{-3} V$
$i_{ph,sc,STC}$	Kurzschlussstrom des Diodenmodells bei STC	9.272 A
$v_{oc,STC}$	Leerlaufspannung bei STC	0.644 V
Maximaler Leistungspunkt (MPP)		
$i_{PV,MPP}$	Gesamtstrom des PV Parks beim MPP	2902.13 A
$v_{PV,MPP}$	Gesamtspannung des PV Parks beim MPP	1049.13 V
$P_{MPP}$	Gesamtleistung des PV Parks beim MPP	30447.11 W
Weitere Parameter		
$R_h$	Shunt-Widerstand im Einzeldiodenmodell	$10.196 \Omega$
$v_{DC}$	Ausgangsspannung	900 V
$N_{cell,p}$	Anzahl paralleler Zellen pro Modul	1
$N_{cell,s}$	Anzahl serieller Zellen pro Modul	72
$N_{mod,p}$	Anzahl paralleler Module pro Anlage	336
$N_{mod,s}$	Anzahl serieller Module pro Anlage	27
$N_p$	Anzahl paralleler Zellen pro Anlage	336
$N_s$	Anzahl serieller Zellen pro Anlage	1944
$k$	Boltzmann Konstante	$1.381 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$
$q$	Elementarladung	$1.602 \cdot 10^{-19} C$
$A_n$	Dioden-Idealitätsfaktor im Einzeldiodenmodell	1.374
$\alpha_T$	Temperaturkoeffizient des PV-Stroms	$0.06 \cdot 10^{-2}$
$\beta_T$	Temperaturkoeffizient der PV-Spannung	$-0.36 \cdot 10^{-2}$

Tab. 1: Modellparameter des Buck Converters

Ziel der Regelung soll es sein die Ausgangsspannung  $v_{DC}$  konstant zu halten bei 900 V. Die einzelnen PV-Zellen wurden im Vorhinein messtechnisch analysiert für verschiedene Bestrahlungen und Temperaturen. Die nachfolgende Modellierung erfolgt zunächst für eine konstante Bestrahlung mit  $S = 1000 \frac{W}{m^2}$  bei einer konstanten Zelltemperatur von  $T_c = 298 K$

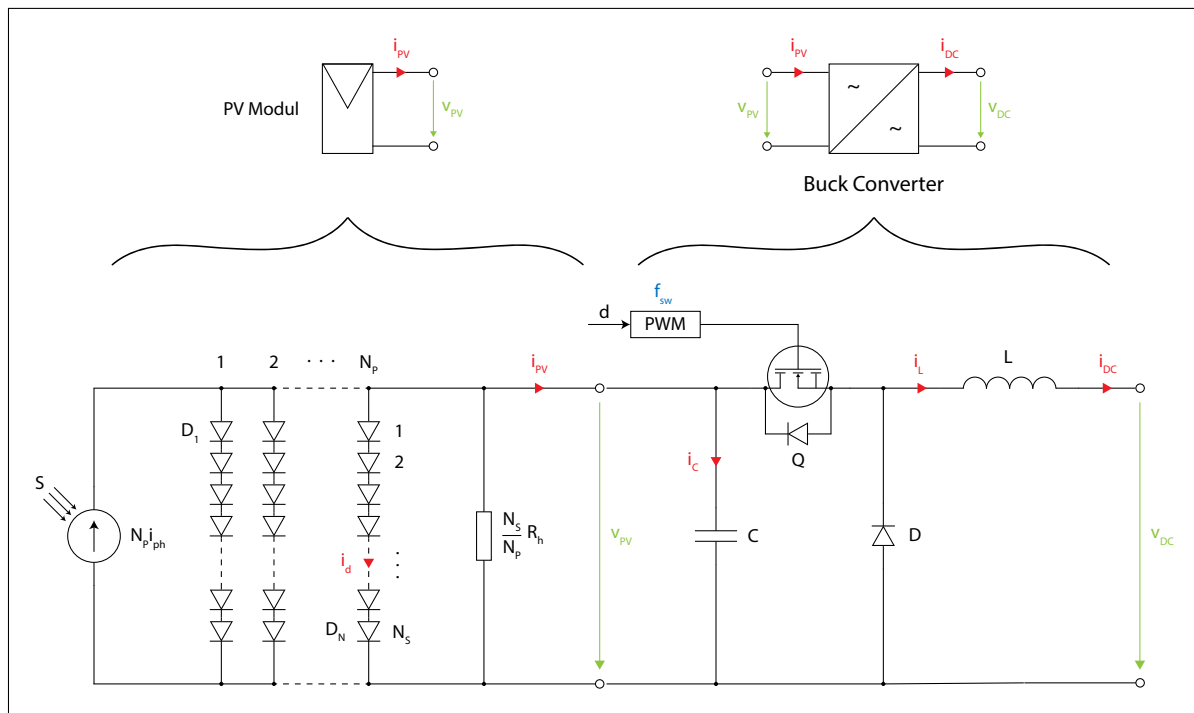


Abb. 1: Übersichtsschaltbild des Buck Converters als zu regelndes System inklusive Photovoltaik Anlage

## 2 Modellierung des Buck-Converters

### 2.1 Ströme

Zur Modellierung des Ausgangsstroms einer PV-Anlage sind Kenntnisse über die einzelnen Anlagenströme notwendig. Zur ersten Betrachtung werden die Ströme einer Zelle dargelegt.

Gesamtstrom einer Zelle:

$$i_{pv,z}(v_{pv,z}, S, T_c) = i_{ph}(S, T_c) - i_d(v_{pv,z}, S, T_c) - \frac{v_{pv,z}}{R_h} \quad (2)$$

mit:

Strom  $i_{ph}$  aufgrund äußerer Bestrahlung:

$$i_{ph}(S, T_c) = \frac{S}{S_{STC}} \cdot i_{ph,sc,STC} \cdot (1 + \alpha_T \cdot (T_c - T_{c,STC}))$$

Sättigungsstrom  $i_s$  des Dioden-Diffusionseffekts:

$$i_s(S, T_c) = \frac{i_{ph}(S, T_c) - \frac{v_{oc}(T_c)}{R_h}}{e^{\frac{v_{oc}(T_c)}{A_n \cdot v_{T,STC}}} - 1}$$

Diodenstrom  $i_d$ :

$$i_d(v_{pv,z}, S, T_c) = i_s(S, T_c) \cdot \left( e^{\frac{v_{pv,z}}{A_n \cdot v_{T,STC}}} - 1 \right)$$

Thermische Leerlaufspannung  $v_{oc}$ :

$$v_{oc}(T_c) = v_{oc,STC} \cdot (1 + \beta_T \cdot (T_c - T_{c,STC}))$$

Durch das Einsetzen der vorangegangenen Gleichungen in Gleichung 2 folgt für den Strom einer Zelle:

$$i_{pv,z}(v_{pv,z}, S, T_c) = i_{ph}(S, T_c) - i_s(S, T_c) \cdot \left( e^{\frac{v_{pv,z}}{A_n \cdot v_{T,STC}}} - 1 \right) - \frac{v_{pv,z}}{R_h} \quad (3)$$

Um Stromgleichungen für eine PV-Anlage bestehend aus mehreren Modulen zu motivieren,

werden die Anzahl der seriellen und parallelen Zellen pro Modul mit der Anzahl der seriellen und parallelen Module multipliziert. Folgender Zusammenhang gilt:

Berechnung der Gesamtzahl serieller ( $N_s$ ) und paralleler ( $N_p$ ) Zellen pro PV-Anlage:

$$N_s = N_{\text{cell},s} \cdot N_{\text{mod},s}$$

$$N_p = N_{\text{cell},p} \cdot N_{\text{mod},p}$$

Aus der Erkenntnis der vorangegangenen zwei Gleichungen resultiert für Strom und Spannung der PV-Anlage:

Strom und Spannung der PV-Anlage:

$$i_{\text{pv}} = N_p \cdot i_{\text{pv},z}$$

$$v_{\text{pv}} = N_s \cdot v_{\text{pv},z}$$

Durch das Einfügen der Zusammenhänge in Gleichung 3 resultiert der Gesamtstrom der PV-Anlage zu:

Gesamtstrom der PV-Anlage:

$$i_{\text{pv}}(v_{\text{pv}}, S, T_c) = N_p \cdot i_{\text{ph}}(S, T_c) - N_p \cdot i_s(S, T_c) \cdot \left( e^{\frac{v_{\text{pv}}}{N_s \cdot A_n \cdot v_{T, \text{STC}}}} - 1 \right) - \frac{N_p \cdot v_{\text{pv}}}{N_s \cdot R_h} \quad (4)$$

Die Parameter  $S$  (Eingangsstrahlung),  $T_c$  (Temperatur der Zellen) und  $v_{\text{pv}}$  (PV-Spannung) werden im späteren Verlauf spezifiziert und zur Berechnung herangezogen.

## 2.2 Induktivitäten und Kapazitäten

Zur Auslegung der Induktivitäten und Kapazitäten des Buck-Converters am MPP werden der Duty Cycle ( $d$ ), die Schaltfrequenz ( $f_{\text{sw}}$ ), der Strom ( $i_{\text{PV}, \text{MPP}}$ ) und die Spannung ( $v_{\text{PV}, \text{MPP}}$ ) als bekannt vorausgesetzt. Im ersten Schritt werden die maximal zulässigen Strom- und Spannungsschwankungen an den Bauteilen berechnet. Dabei wird eine Schwankung von  $\pm 0.5\%$  zugelassen.



Strom- und Spannungsschwankungen an den Bauteilen:

$$\Delta i_L = 0.005 \cdot i_{PV,MPP}$$

$$\Delta v_{PV} = 0.005 \cdot v_{PV,MPP}$$

Zur Berechnung der Induktivität (L) und der Kapazität (C) werden die Gleichung 5 und Gleichung 6 angewendet.

Berechnung von L und C:

$$L = \frac{v_{DC} \cdot (1 - d)}{\Delta i_L \cdot f_{sw}} \quad (5)$$

$$C = \frac{i_{PV,MPP} \cdot (1 - d)}{\Delta v_{PV} \cdot f_{sw}} \quad (6)$$

Die für die Simulation angesetzten Bauteilgrößen resultieren zu:

Berechnung der Bauteilgrößen:

$$\underline{\underline{L}} = \frac{900V \cdot (1 - 0.8579)}{0.005 \cdot 2902.13A \cdot 5kHz} \approx \underline{\underline{1.76mH}} \quad (7)$$

$$\underline{\underline{C}} = \frac{2902.13A \cdot (1 - 0.8579)}{0.005 \cdot 1049.13V \cdot 5kHz} \approx \underline{\underline{15.7mF}} \quad (8)$$

### 3 Zustandsraumdarstellung

Um das Verhalten mittels mathematischer Beziehungen zu veranschaulichen, wird die Zustandsraumdarstellung verwendet. Folgende messbaren Ein- und Ausgänge werden festgelegt:

Systemeingänge:

$$\underline{u} = d$$

Systemzustände:

$$\underline{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{PV} \\ i_L \end{bmatrix} \quad (9)$$

Die Ausgänge des Systems gleichen den beiden Zuständen.

Systemausgänge:

$$\underline{y} = \begin{bmatrix} v_{PV} \\ i_L \end{bmatrix}$$

#### 3.1 Nichtlinear

Die nachstehend gezeigten Zustandsänderungsgleichungen des Mittelwertmodells werden für weitere Betrachtungen als bekannt vorausgesetzt und deren Herleitung als korrekt angenommen.

Mittelwertmodell:

$$\dot{x}_1 = \frac{1}{C} \cdot i_{pv}(x_1, S, T_c) - \frac{1}{C} \cdot x_2 \cdot d$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{L} \cdot x_1 \cdot d - \frac{1}{L} \cdot v_{DC}$$

mit:

$$L = 1.76mH; \quad C = 15.7mF; \quad d = 0.8579; \quad v_{DC} = 900V; \quad S = 800 \frac{W}{m^2}; \quad T_c = 290K$$

## 3.2 Linear

### 3.2.1 Ruhelagen

Die Ruhelagen des Systems werden ermittelt, indem das Mittelwertmodell aus Unterabschnitt 3.1 gleich Null gesetzt wird und anschließend die Auflösung nach den Zuständen  $x_1$  und  $x_2$  erfolgt.

Vorgabe:

$$\dot{x}_1^* = \dot{x}_1(x_1^*, x_2^*) \stackrel{!}{=} 0$$

$$\dot{x}_2^* = \dot{x}_2(x_1^*, x_2^*) \stackrel{!}{=} 0$$

Bestimmung von  $\dot{x}_1^*$ :

$$0 = \frac{1}{L} \cdot x_1^* \cdot d - \frac{1}{L} \cdot v_{\text{DC}}$$

$$\frac{1}{L} \cdot v_{\text{DC}} = \frac{1}{L} \cdot x_1^* \cdot d$$

$$x_1^* = \frac{v_{\text{DC}}}{d} \quad (10)$$

Bestimmung von  $\dot{x}_2^*$ :

$$0 = \frac{1}{C} \cdot i_{\text{pv}}(x_1^*, S, T_c) - \frac{1}{C} \cdot x_2^* \cdot d$$

$$\frac{1}{C} \cdot x_2^* \cdot d = \frac{1}{C} \cdot i_{\text{pv}}(x_1^*, S, T_c)$$

$$x_2^* = \frac{i_{\text{pv}}(x_1^*, S, T_c)}{d} \quad (11)$$

Die spezifischen Ruhelagen aufgrund der vorgegebenen Parameter resultieren zu:

Ruhelagen des Systems:

$$\begin{aligned}\underline{x}_1^* &= \frac{900V}{0.8579} \approx \underline{\underline{1049.13V}} \\ \underline{x}_2^* &= \frac{i_{pv}(1049.13V, 800 \frac{W}{m^2}, 290K)}{0.8579} \approx \underline{\underline{2782.28A}} \\ \underline{x}^* &= \begin{bmatrix} x_1^* \\ x_2^* \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 1049.13V \\ 2782.28A \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (12)$$

### 3.2.2 Linearisierungsvorschrift

Die Vorschrift zur Linearisierung ist in Gleichung 13 hinterlegt.

Linearisierungsvorschrift nach Taylor:

$$\begin{aligned}\dot{\underline{x}}^* + \Delta \dot{\underline{x}} &= \underline{f}(\underline{x}^* + \Delta \underline{x}, \underline{u}^* + \Delta \underline{u}) \\ &= \underline{f}(\underline{x}^*, \underline{u}^*) + \left[ \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \right]_{(\underline{x}^*, \underline{u}^*)} \cdot \Delta \underline{x} + \left[ \frac{\partial f_i}{\partial u_j} \right]_{(\underline{x}^*, \underline{u}^*)} \cdot \Delta \underline{u} + R(\Delta \underline{x}^2, \Delta \underline{u}^2)\end{aligned}\quad (13)$$

Durch die Annahme über das Verhalten der nichtlinearen Restglieder folgt die Struktur der Linearisierung aus Gleichung 14.

Zusammengefasste Struktur:

$$\begin{aligned}\Delta \dot{\underline{x}} &= \left[ \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \right]_{(\underline{x}^*, \underline{u}^*)} \cdot \Delta \underline{x} + \left[ \frac{\partial f_i}{\partial u_j} \right]_{(\underline{x}^*, \underline{u}^*)} \cdot \Delta \underline{u} \\ \Delta \underline{y} &= \left[ \frac{\partial h_i}{\partial x_j} \right]_{(\underline{x}^*, \underline{u}^*)} \cdot \Delta \underline{x} + \left[ \frac{\partial h_i}{\partial u_j} \right]_{(\underline{x}^*, \underline{u}^*)} \cdot \Delta \underline{u}\end{aligned}\quad (14)$$

### 3.2.3 Zustandsraummodell

Durch die Anwendung der Linearisierungsvorschrift aus Gleichung 14 auf das Mittelwertmodell aus Unterabschnitt 3.1 resultiert das linearisierte Zustandsraummodell zu:

Grundstruktur des linearisierten Zustandsraummodells:

$$\Delta \dot{\underline{x}} = \begin{bmatrix} \frac{1}{C} \cdot \frac{\partial i_{pv}(x_1, S, T_c)}{\partial x_1} \Big|_{x_1^*} & -\frac{1}{C} \cdot u^* \\ \frac{1}{L} \cdot u^* & 0 \end{bmatrix} \cdot \Delta \underline{x} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{C} \cdot x_2^* \\ \frac{1}{L} \cdot x_1^* \end{bmatrix} \cdot \Delta \underline{u} \quad (15)$$

$$\Delta \underline{y} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \Delta \underline{x} + \underline{0} \cdot \Delta \underline{u}$$

mit:

$$\Delta \underline{x} = \underline{x} - \underline{x}_c$$

$$\Delta \underline{u} = \Delta \underline{d} = \underline{d}_{\text{dyn}} - \underline{d}$$

Die Terme  $\underline{x}_c$  und  $\underline{d}$  gleichen den Ruhelagen aus Gleichung 12 und  $d = 0.8579$ . Das vollständige lineare Zustandsraummodell ist in Gleichung 16 dargestellt und folgt durch die Berechnungen der einzelnen Terme aus Gleichung 15.

Linearisiertes Zustandsraummodell:

$$\Delta \dot{\underline{x}} = \begin{bmatrix} -71.2554 & -54.5419 \\ 486.5101 & 0 \end{bmatrix} \cdot \Delta \underline{x} + \begin{bmatrix} -1.769 \cdot 10^5 \\ 5.9499 \cdot 10^5 \end{bmatrix} \cdot \Delta \underline{u} \quad (16)$$

$$\Delta \underline{y} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \Delta \underline{x} + \underline{0} \cdot \Delta \underline{u}$$

### 3.2.4 Überprüfung der Steuerbarkeit

Zur Überprüfung der Steuerbarkeit wird im ersten Schritt die Steuerbarkeitsmatrix  $Q_s$  nach der Vorschrift aus Gleichung 17 berechnet. Im Anschluss erfolgt die Berechnung der Determinante (quadratische Matrix) oder des Rangs (nichtquadratische Matrix).

Vorschrift:

$$\underline{Q}_s = \left( \underline{B} \quad \underline{A} \cdot \underline{B} \quad \dots \quad \underline{A}^{(n-1)} \cdot \underline{B} \right) \quad (17)$$

Steuerbarkeitsmatrix  $\underline{Q}_s$ :

$$\underline{Q}_s = \begin{bmatrix} -0.0177 \cdot 10^7 & -1.9847 \cdot 10^7 \\ 0.0595 \cdot 10^7 & -8.6062 \cdot 10^7 \end{bmatrix} \quad (18)$$

Die Matrix ist quadratisch, somit ist die Determinante maßgebend und muss ungleich Null sein.

Determinante von  $\underline{Q}_s$ :

$$\underline{\underline{det(\underline{Q}_s)}} = \underline{\underline{2.7033 \cdot 10^{13}}}$$

Das System ist steuerbar, da gilt:  $det(\underline{Q}_s) \neq 0$ .

## 4 Vergleich beider Systeme

In Abbildung 2 ist die Übersicht der notwendigen Simulationsstruktur dargestellt. Aus der Übersicht geht hervor, dass beide Systeme unterschiedliche Eingänge besitzen und somit ein direkter Vergleich ohne entsprechende Berücksichtigung der Linearisierungsvorschriften unmöglich ist. Das linearisierte Modell verwendet als Eingang im Gegensatz zum nichtlinearen Modell eine Differenz  $\Delta d$ . Dies folgt aus Gleichung 16. Die Variable  $d_{\text{dyn}}$  sei gleich der Konstante  $d$ . Die Strukturen des nichtlinearen und des linearen Modells sind zur Information in Abbildung 4 und Abbildung 3 visualisiert.

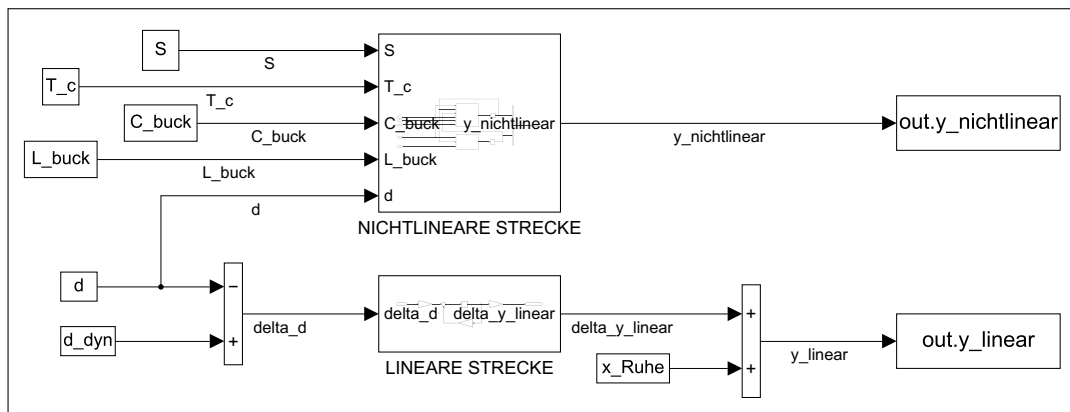


Abb. 2: Übersicht der Simulationsstruktur

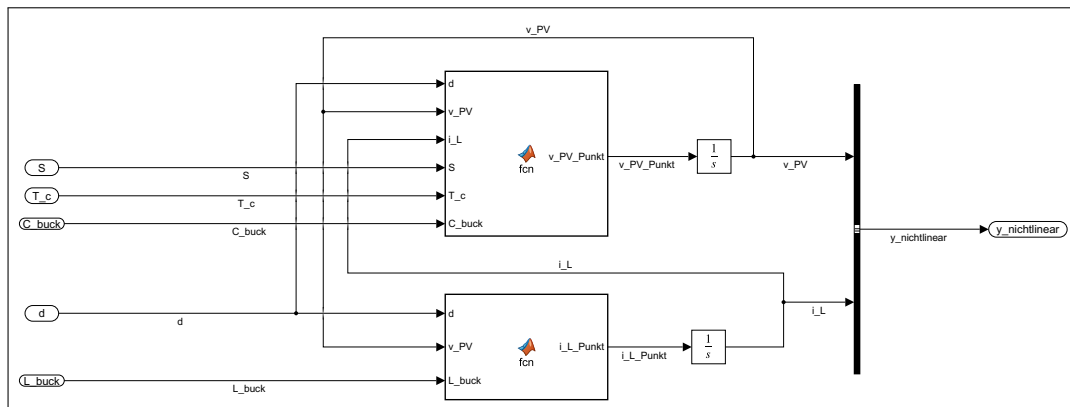


Abb. 3: Nichtlineare Strecke

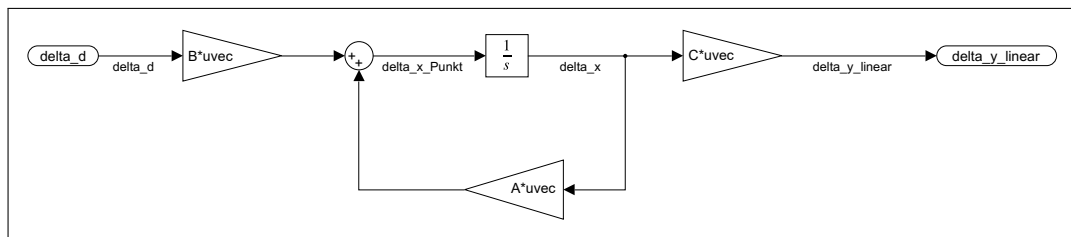
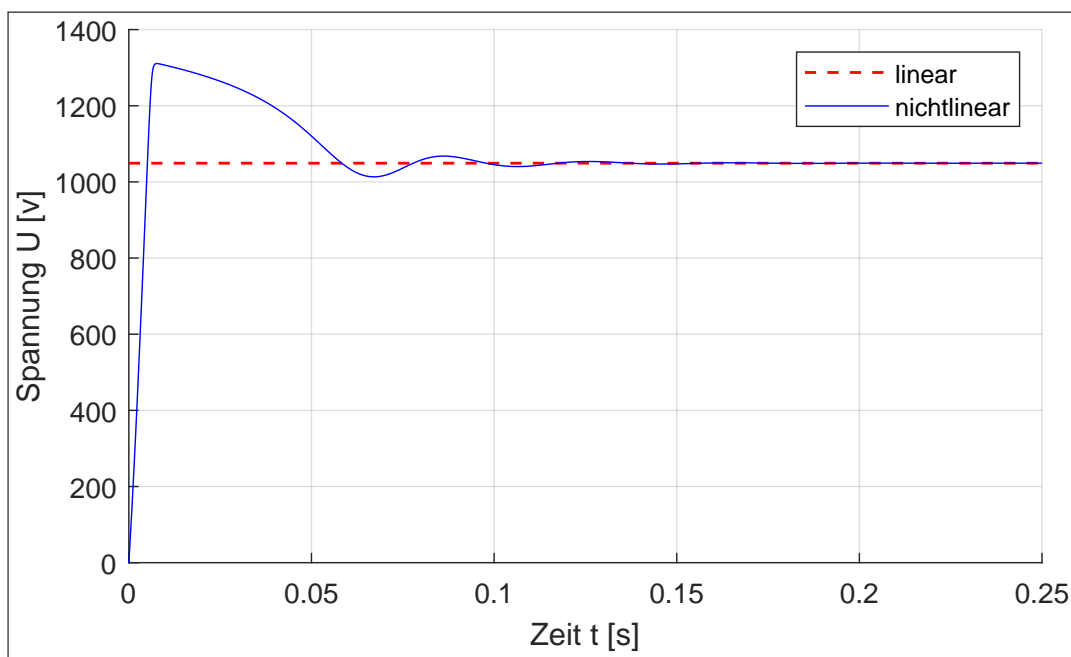
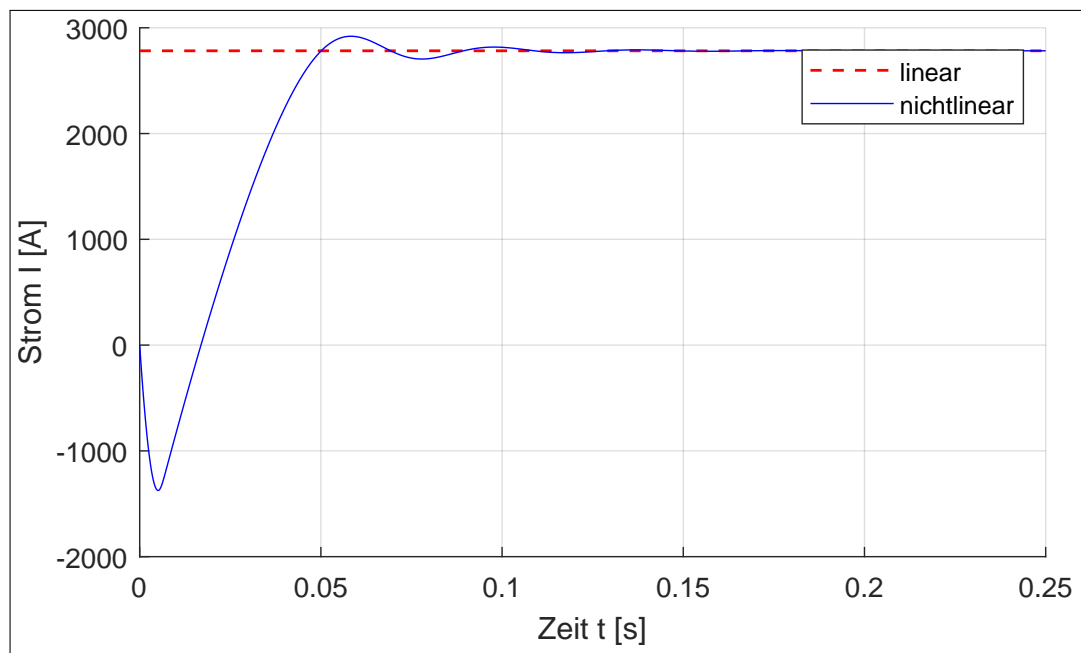


Abb. 4: Lineare Strecke

Um das lineare mit dem nichtlinearen Modell zu vergleichen, werden gemäß Unterunterabschnitt 3.2.3 zu den Zuständen  $\Delta \underline{x}$  die Ruhelagen  $\underline{x}^*$  aus Gleichung 12 addiert. Aus der Abbildung 5 und Abbildung 6 geht hervor, dass das nichtlineare System aufgrund der Nichtlinearität zu schwingen anfängt, jedoch nach ca. 0.15s erwartungsgemäß in die Ruhelagen, d.h. in den MPP, pendelt. Die implementierten Systeme weisen für kleine Abweichungen von der Ruhelagen mit steigender Zeit  $t$  selbiges Verhalten auf.

Abb. 5: Vergleich der Spannungen  $v_{PV}$



Abb. 6: Vergleich der Ströme  $i_L$

## **5 Zustandsreglerentwurf**

### **5.1 Einfache Zustandsrückführung**

### **5.2 Referenzwertvorsteuerung**

### **5.3 I-Regelung**

## **6 Reglervalidierung**

### **6.1 Validierung des linearen Modells**

#### **6.1.1 Zustandsregler mit Ackermann-Formel**

#### **6.1.2 Zustandsregler mit Vorsteuerung**

#### **6.1.3 Zustandsregler mit I-Regelung**

#### **6.1.4 Vergleich des Reglerverhaltens**

### **6.2 Validierung des nichtlinearen Modells**

#### **6.2.1 Zustandsregler mit Ackermann-Formel**

#### **6.2.2 Zustandsregler mit Vorsteuerung**

#### **6.2.3 Zustandsregler mit I-Regelung**

#### **6.2.4 Vergleich des Reglerverhaltens**

## Literaturverzeichnis

- [1] HTW-Logo auf dem Deckblatt  
[https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Logo\\_HTW\\_Berlin.svg](https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Logo_HTW_Berlin.svg)  
Stand: 17.08.2018 um 14:49 Uhr
- [2] HTW-Logo in der Kopfzeile  
<http://tonkollektiv-htw.de/>  
Stand: 17.08.2018 um 14:53 Uhr
- [3] Skript Moderne Methoden der Regelungstechnik  
Prof. Dr.-Ing. Horst Schulte
- [4] Anleitung Linearisierung eines zeitinvarianten,  
nichtlinearen Zustandmodells  
Prof. Dr.-Ing. Heide Brandstädter
- [5] Regelungs- und Steuerungstechnik: Polstellenverteilung  
Prof. Dr.-Ing. M. Buss
- [6] Beobachtbarkeit und Beobachter für lineare Kontrollsysteme  
Judith Schmidt, Universität Bayreuth