

Max Blatter

dipl. El.-Ing. ETH / Energie-Ing. NDS FH

Büttenbergstrasse 3

CH-2504 Biel/Bienne



TE<sup>4</sup>      Technologie-Entwicklung für Erneuerbare Elektrische Energie

## ***Netzeinspeisung elektrischer Energie aus dezentralen, leistungsvariablen Quellen über einen Gleichspannungs-Bus***

### **Zusammenfassung**

Mit einer Schweizer **Patentanmeldung** wurde ein neues Konzept zum Power Conditioning für Fotovoltaikanlagen und andere leistungsvariable Generatoren vorgeschlagen, das auf einem herstellerübergreifend standardisierten Gleichspannungs-Bus basiert.

Die Patentanmeldung wurde am 31. März 09 unter der Nr. CH 516/09 und dem Titel

"Regelungskonzept für die Netzeinspeisung elektrischer Energie  
aus dezentralen, leistungsvariablen Quellen über einen Gleichspannungs-Bus"

registriert.

In der ausführlichen **Dokumentation** dazu werden in **Teil 1** die Grundlagen des Konzepts erläutert und die Anwendung für Fotovoltaikanlagen wie auch die Erweiterung auf drehzahlvariable Turbinen diskutiert. Es wird aufgezeigt, welche neuen Produktpaletten auf dieser Basis entwickelt werden können.

In **Teil 2** der Dokumentation wird die Grundstruktur eines Gleichstromstellers gezeigt, der für die Energieeinspeisung von einem Fotovoltaikstrang auf den Gleichspannungs-Bus geeignet ist. Weiter werden die in diesem Zusammenhang stehenden Spezifikationen des Gleichspannungs-Busses zur Diskussion gestellt.

**Teil 3** der Dokumentation zeigt die Grundstruktur eines Wechselrichters, der für die Energieeinspeisung vom Gleichspannungs-Bus ins Netz geeignet ist. Auch da werden die in diesem Zusammenhang stehenden Spezifikationen des Gleichspannungs-Busses diskutiert.

Sollte das Patent erteilt werden, werde ich den interessierten Herstellern von PV-Wechselrichtern kostengünstige **nicht-exklusive Lizenzen** anbieten. In jedem Fall werde ich das Verfahren in der Fachszene bekannt machen (erstmalig an der Poster-Session der 8. Nationalen Photovoltaik-Tagung, 4./5. Februar 2010 in Winterthur, Schweiz). Für die Erarbeitung eines herstellerübergreifenden DC-Bus-Standards stehen meine Dienste als **neutraler Experte** auf Honorarbasis zur Verfügung.

Max Blatter, dipl. El.-Ing. ETH

Fassung vom 23.11.09

# Regelungskonzept für die Netzeinspeisung elektrischer Energie aus dezentralen, leistungsvariablen Quellen über einen Gleichspannungs-Bus

## Beschreibung

Die Erfindung betrifft die Einspeisung elektrischer Energie aus dezentralen, leistungsvariablen Quellen ins öffentliche Elektrizitätsnetz. Diese Quellen können insbesondere Stromerzeuger sein, die aus erneuerbaren Ressourcen betrieben werden, wie Fotovoltaik-Generatoren, Windturbinen, Wasserturbinen und dergleichen. Das Besondere der Erfindung ist, dass die Einspeisung über einen Gleichspannungs-Bus erfolgt, wobei ein Regelungskonzept nach Patentanspruch 1 angewendet wird.

Im Folgenden wird die Erfindung am Beispiel der Fotovoltaik beschrieben. Die Ausführungen lassen sich sinngemäß auf die anderen der oben genannten Stromerzeuger übertragen.

Nach heutigem Stand der Technik wird die Energie des Fotovoltaik-Generators durch einen oder mehrere Wechselrichter unmittelbar ins Wechselstromnetz eingespeist. Dabei wird entweder ein einziger so genannter Zentralwechselrichter verwendet, oder der Fotovoltaik-Generator wird in mehrere Stränge mit je einem Strangwechselrichter aufgeteilt. Nachteil des Zentralwechselrichters ist, dass alle Teile des Fotovoltaik-Generators im gleichen Arbeitspunkt betrieben werden, was zu nicht optimaler Leistungsausnutzung führen kann. Nachteil der Strangwechselrichter ist dagegen, dass jeder davon eine komplette Regelungseinrichtung für die Netzeinspeisung enthalten muss, was die Gesamtanlage verteuert.

Diese Nachteile werden durch eine ebenfalls bekannte Lösung vermieden. Bei dieser ist der Wechselrichter intern aus mehreren Gleichspannungswandlern (DC/DC-Wandlern), einem Gleichspannungs-Bus (DC-Bus) und einem eigentlichen Wechselrichter aufgebaut. Das ermöglicht die unabhängige Arbeitspunktregelung mehrerer Fotovoltaik-Stränge, ohne dass die Regelungseinrichtung zur Netzeinspeisung mehrfach vorhanden wäre. Dabei handelt es sich aber um ein Kompaktgerät, dessen Komponenten für den Anwender nicht einzeln zugänglich und somit auch nicht frei kombinierbar sind.

Aufgabe der Erfindung ist es, im Sinne der zuletzt genannten Lösung die Arbeitspunktregelung der Fotovoltaik-Stränge von der eigentlichen Netzeinspeisung getrennt durchzuführen. Dabei sollen aber die einzelnen Komponenten auch physisch getrennt sein und auf einfache Art so standardisiert werden können, dass ihre herstellerunabhängige Kompatibilität gesichert ist.

Die Aufgabe wird durch das Verfahren nach Patentanspruch 1 gelöst.

Der Vorteil des Verfahrens liegt in der Flexibilität der danach aufgebauten Anlagen, wobei gleichzeitig maximale Leistungsausnutzung der Fotovoltaik-Generatoren und minimierter Geräteaufwand gegeben ist.

Fig. 1 zeigt als Beispiel das Prinzipschema einer Fotovoltaikanlage, die nach dem genannten Verfahren arbeitet. Mehrere Fotovoltaik-Stränge 1 sind über je einen Gleichspannungswandler 2 auf einen Gleichspannungs-Bus 3 geschaltet. An diesen ist wiederum ein Wechselrichter 4 mit vorgeschaltetem Speicherkondensator 4a angeschlossen, der die elektrische Energie ins Netz 5 einspeist.

Fig. 2 erläutert das Regelungskonzept der Gleichspannungswandler, die den Fotovoltaik-Strängen zugeordnet sind. Innerhalb des punktiert gezeichneten Regelbereichs wird nach bekanntem Stand der Technik der Arbeitspunkt mit maximaler Strangleistung  $P_{St}$  gesucht. Solange die Bus-Gleichspannung  $U_{DC}$  den Nennwert  $U_{DC,N}$  nicht überschreitet, kann die Leistung maximal die Nennleistung  $P_{St,N}$  des Wandlers erreichen. Übersteigt  $U_{DC}$  aber den Nennwert  $U_{DC,N}$ , so wird die Leistung  $P_{St}$  zunehmend begrenzt, bis sie bei einem festgelegten höheren Spannungsniveau  $U_{DC,M}$  den Wert Null annimmt. Steigt die Bus-Gleichspannung  $U_{DC}$  auf noch höhere Werte, so bleibt die Leistung  $P_{St}$  bei Null.

Fig. 3 zeigt das Regelverhalten des Wechselrichters. Solange die Bus-Gleichspannung  $U_{DC}$  unterhalb des Nennwertes  $U_{DC,N}$  liegt, bleibt die ans Netz abgegebene Wechselstromleistung  $P_{Netz}$  bei Null. Beim Erreichen der Nennspannung  $U_{DC,N}$  wird die Leistung so geregelt, dass die Spannung  $U_{DC}$  konstant auf dem Wert  $U_{DC,N}$  bleibt. Wenn die abgegebene Leistung den Nennwert  $P_{Netz,N}$  erreicht hat und die Fotovoltaik-Stränge insgesamt mehr Leistung liefern könnten, steigt die Bus-Gleichspannung  $U_{DC}$  über den Nennwert  $U_{DC,N}$  an. Die Leistung bleibt dann auf den Nennwert  $P_{Netz,N}$  begrenzt.

Um die Komponenten herstellerunabhängig kompatibel zu machen, müssen wichtige statische und dynamische Parameterwerte des Verfahrens standardisiert

werden. Insbesondere sind mindestens folgende Parameter im Standard zu definieren:

- a) der Wert und die Toleranzen der Spannungsniveaus  $U_{DC,N}$  und  $U_{DC,M}$ ,
- b) die Größe des Speicherkondensators in Abhängigkeit der Nennleistung, für welche der Wechselrichter ausgelegt ist,
- c) die dynamischen Eigenschaften (Ausregelzeiten u. dgl.) der Regelungseinrichtungen der Gleichspannungswandler und des Wechselrichters.

## Patentansprüche

1. Verfahren zur Regelung einer Anlage zur Einspeisung elektrischer Energie aus leistungsvariablen Quellen ins Elektrizitätsnetz, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein oder mehrere Gleichspannungswandler und ein Wechselrichter an einen gemeinsamen Gleichspannungs-Bus geschaltet sind, diese Komponenten den aktuellen Wert der Bus-Gleichspannung detektieren und dadurch ihre jeweiligen Regelfunktionen autonom ausführen.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Gleichspannungswandler bis zu einem bestimmten Wert der Bus-Gleichspannung eine Regelung auf maximale Leistung bewirken, und dass über diesem Spannungswert eine Leistungsbegrenzung einsetzt.
3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die vom Wechselrichter ans Netz abgegebene Leistung im Bereich von Null bis zum Nennwert so geregelt wird, dass die Bus-Gleichspannung konstant bleibt.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die maßgebenden Werte der Bus-Gleichspannung so standardisiert sind, dass eine herstellerunabhängige Kompatibilität der Komponenten erreicht wird.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Regeldynamik so standardisiert ist, dass eine herstellerunabhängige Kompatibilität der Komponenten erreicht wird.
6. Gleichspannungswandler, dadurch gekennzeichnet, dass er eine Regeleinrichtung enthält, die zur Anwendung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 5 geeignet ist.
7. Wechselrichter, dadurch gekennzeichnet, dass er eine Regeleinrichtung enthält, die zur Anwendung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 5 geeignet ist.

## **Zusammenfassung**

Das Verfahren dient der Einspeisung elektrischer Energie aus leistungsvariablen Quellen ins Elektrizitätsnetz. Es verwendet als zentrales Element einen Gleichspannungs-Bus. Die daran angeschlossenen Komponenten detektieren dessen Spannung und führen darauf basierend ihre Regelfunktionen autonom aus.

(Fig. 1)

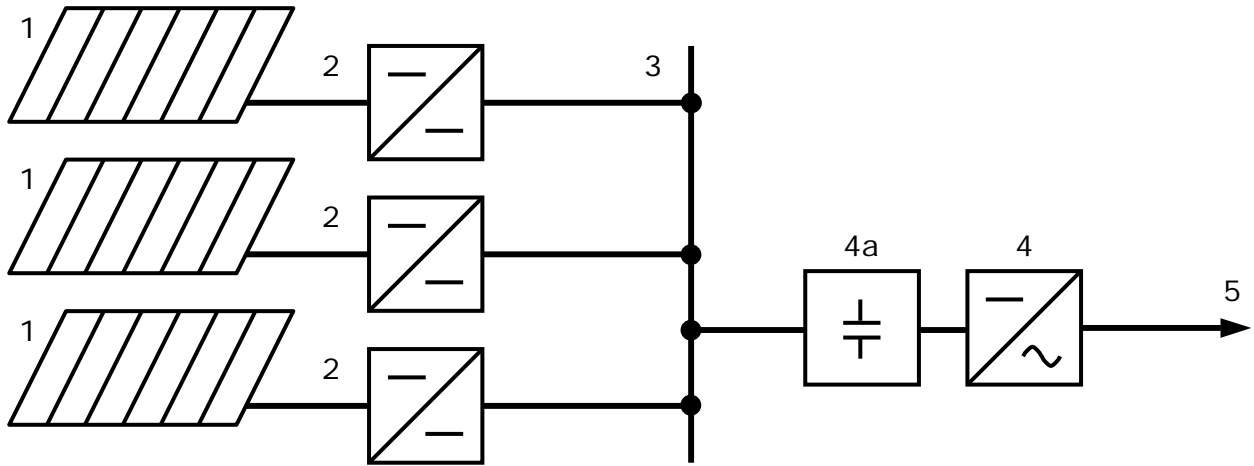


Fig. 1

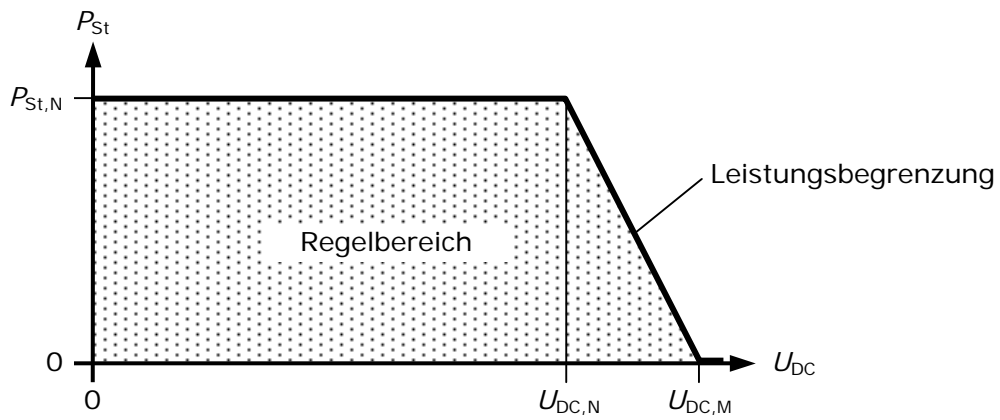


Fig. 2

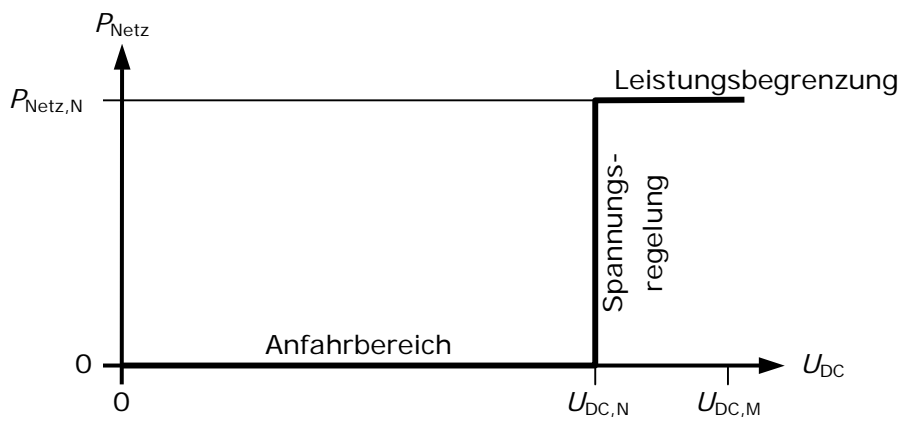


Fig. 3

**Max Blatter**

dipl. El.-Ing. ETH / Energie-Ing. NDS FH

Büttenbergstrasse 3

CH-2504 Biel/Bienne



**TE<sup>4</sup>      Technologie-Entwicklung für Erneuerbare Elektrische Energie**

# Netzeinspeisung elektrischer Energie aus dezentralen, leistungsvariablen Quellen über einen Gleichspannungs-Bus

Teil 1: Gesamtkonzept für Fotovoltaikanlagen sowie  
kleinere drehzahlvariable Wasser- und Windturbinen

Max Blatter, dipl. El.-Ing. ETH  
Neufassung vom 07.05.09  
letztmals überarbeitet am 23.11.09

## ***Inhalt***

1.	Ausgangslage .....	3
2.	Trennung von Arbeitspunktregelung und Netzeinspeisung .....	3
3.	Betriebskonzept des Gleichspannungs-Busses .....	5
4.	Vergleich der Power-Conditioning-Konzepte .....	8
5.	Vorgeschlagene Entwicklung neuer Produktpaletten .....	9
6.	Referenzpublikationen .....	10
1.	Anhang: Generatorseitige Arbeitspunktregelung .....	11

## ***Zusammenfassung***

Mit einer Schweizer Patentanmeldung [1] wurde ein neues Konzept zum Power Conditioning für Fotovoltaikanlagen und andere leistungsvariable Generatoren vorgeschlagen, das auf einem herstellerübergreifend standardisierten Gleichspannungs-Bus basiert. In der vorliegenden Dokumentation werden die Grundlagen des Konzepts erläutert und die Anwendung für Fotovoltaikanlagen wie auch die Erweiterung auf drehzahlvariable Turbinen diskutiert. Es wird aufgezeigt, welche neuen Produktpaletten auf dieser Basis entwickelt werden können.

## ***1. Ausgangslage***

Die meisten erneuerbaren Energieressourcen sind durch relativ kleine Leistungs-Flussdichten charakterisiert, erstrecken sich aber auf große Gebiete. Das legt es nahe, zu ihrer Nutzung modular aufgebaute Systeme einzusetzen: Einzelne Energieerzeuger-Einheiten, deren Mindestgröße durch Wirtschaftlichkeitsüberlegungen bestimmt ist, werden entsprechend dem verfügbaren Platz und der gewünschten Leistung zu Gesamtanlagen zusammengebaut, die fast beliebig groß sein können.

Dieses Vorgehen hat sich insbesondere bei Fotovoltaikanlagen bestens bewährt. Dabei haben sich Einheiten ("Stränge") in der Größenordnung eines Kilowatt durchgesetzt. Das nötige Power Conditioning (elektrische Anpassung der von den Fotovoltaiksträngen gelieferten Energie an das Netz) wird entweder pro Strang einzeln über so genannte Strangwechselrichter vorgenommen, oder aber die Stränge werden in Parallelschaltung zusammengefasst und die Wechselrichtung in einem gemeinsamen Zentralwechselrichter durchgeführt.

Das Power Conditioning muss zwei Aufgaben erfüllen:

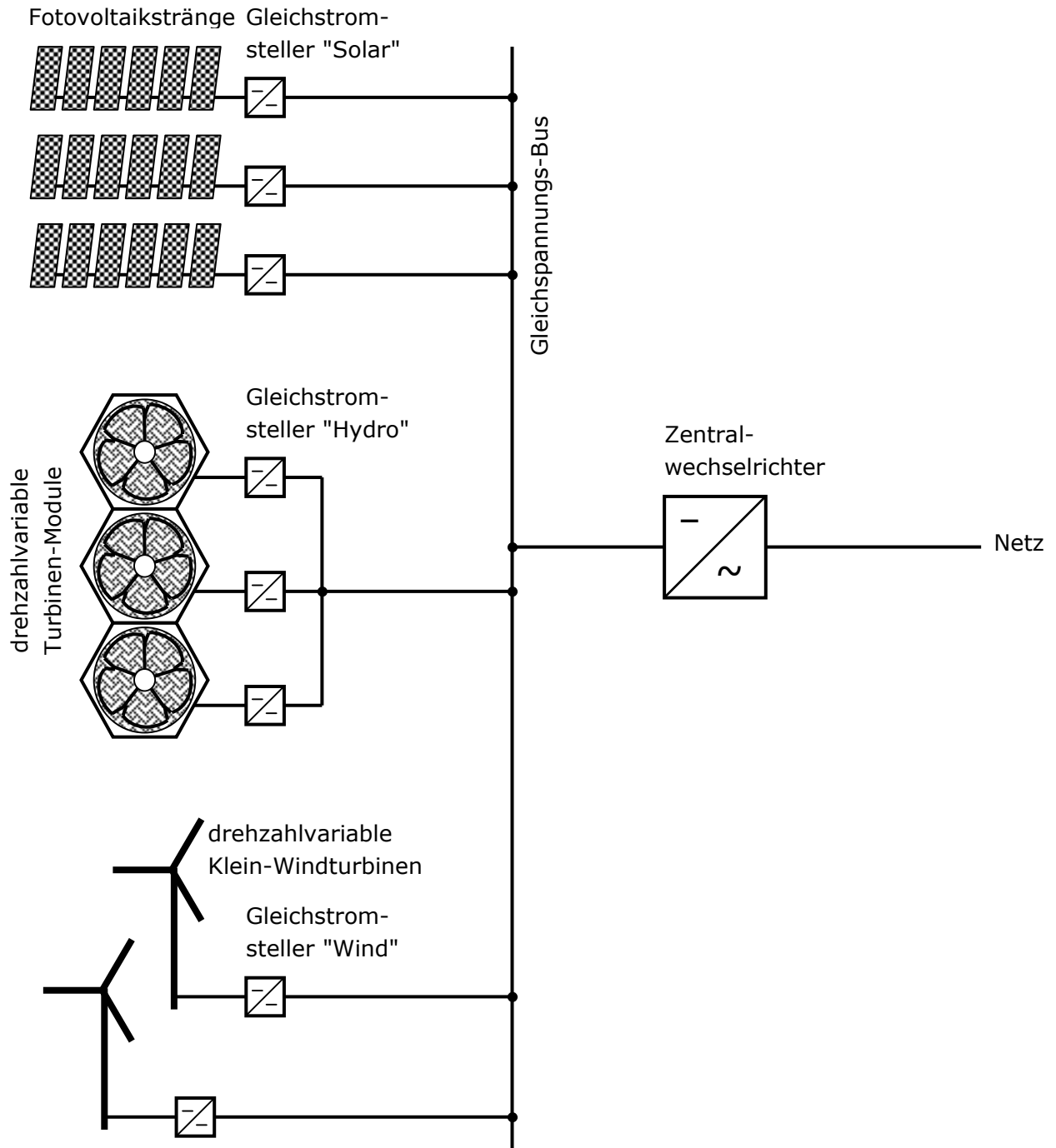
- ◆ das Gewährleisten der maximalen Leistungsabgabe der Fotovoltaikstränge (Arbeitspunktregelung, Maximum Power Point Tracking MPPT),
- ◆ die Einspeisung eines netzsynchronen und den Erfordernissen der Netzbetreiber entsprechenden Wechselstroms ins öffentliche Elektrizitätsnetz.

Bei der ersten Aufgabe ist eine individuelle Arbeitspunktregelung für jeden Strang wünschenswert (Strangwechselrichter), während für die zweite Aufgabe ein gemeinsamer Zentralwechselrichter effizienter ist. Dieser Sachverhalt würde es nahelegen, die beiden Funktionen voneinander zu trennen.

## ***2. Trennung von Arbeitspunktregelung und Netzeinspeisung***

Bei größeren Anlagen kann es in der Tat vorteilhaft sein, in einem ersten Schritt die Arbeitspunktregelung durch je einen individuellen Gleichstromsteller pro Strang vorzunehmen. Deren Ausgänge werden auf einen Gleichspannungs-Bus geschaltet, von dem aus dann durch einen Zentralwechselrichter die netzsynchrone Wechselrichtung vorgenommen wird.

Wenn die Nennspannung dieses Gleichspannungs-Busses standardisiert wird, ergibt sich der Vorteil, dass auch andere Elektrizitätserzeuger (wie modulare Wasserturbinen oder Klein-Windturbinen) integriert werden können. Figur 1 zeigt das Gesamtkonzept eines solchen Systems.



**Figur 1:**  
**Gesamtkonzept einer Anlage für die modulare Elektrizitätsproduktion**

Die Gleichstromsteller können also speziell auf die jeweilige Anwendung im Fotovoltaik-, Hydro- oder Windbereich hin angepasst und dimensioniert werden, ohne dass dabei jedes Mal die Funktion der Netzeinspeisung und die damit verbundenen Vorschriften der Netzbetreiber mit berücksichtigt werden muss. Dies übernimmt erst der hinter den Gleichspannungs-Bus geschaltete Zentralwechselrichter, der seinerseits wiederum unabhängig von der Charakteristik der Energieerzeuger ist.

### 3. Betriebskonzept des Gleichspannungs-Busses

Wie in Abschnitt 2 ausgeführt und in Figur 1 dargestellt, sind generatorseitig im Allgemeinen mehrere Gleichstromsteller auf den Gleichspannungs-Bus geschaltet, während netzseitig ein Zentralwechselrichter die Leistung ans Elektrizitätsnetz weitergibt. Im Normalfall arbeiten die Gleichstromsteller als Arbeitspunktregler. Der Wechselrichter muss dem Gleichspannungs-Bus genau diejenige Leistung entnehmen, die in der Summe generatorseitig geliefert wird. Wie findet er den richtigen Arbeitspunkt?

Weitere Betriebszustände entstehen beim Anfahren der Anlage, ferner dann, wenn generatorseitig mehr Leistung zur Verfügung steht als der Wechselrichter verarbeiten kann. Wie beherrscht man diese Betriebszustände?

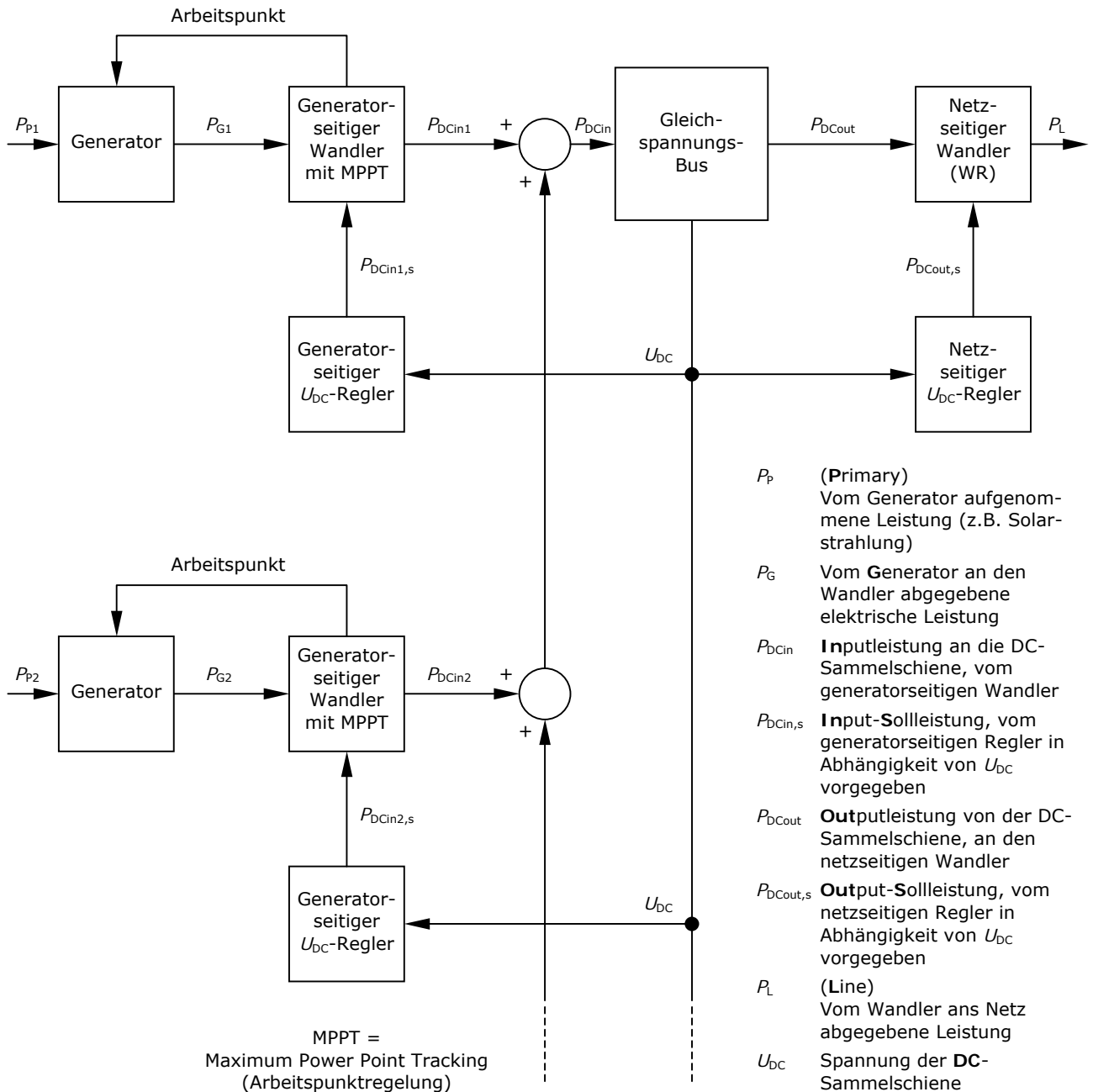
Die Forderungen nach Stabilität, Robustheit, herstellerübergreifende Kompatibilität und einfachem Systemaufbau sind mit einem digitalen Bus-System und einer zentralen Regelung kaum zu erfüllen. Die Information über die verschiedenen Betriebszustände soll vielmehr von jeder beteiligten Komponente autonom erkannt werden, und zwar anhand des aktuellen Spannungsniveaus des Gleichspannungs-Busses. Figur 2 zeigt die entsprechend definierten Bereiche.



- |   |   |
|---|---|
| <p><b>1</b> Anfahrbetrieb:<br/>Gleichstromsteller mit aktivierter Arbeitspunktregelung,<br/>Wechselrichter auf Leistung Null.</p>   | <p><math>U_{DC,L}</math> Untere Betriebsspannung (<b>L</b>ow)<br/><math>U_{DC,H}</math> Obere Betriebsspannung (<b>H</b>igh)<br/><math>U_{DC,B+}</math> Grenzwert für Überspannung<br/>(positive <b>B</b>emessungsspannung)</p> |
| <p><b>2</b> Normalbetrieb:<br/>Gleichstromsteller mit aktivierter Arbeitspunktregelung,<br/>Wechselrichterleistung auf konstante Bus-Gleichspannung <math>U_{DC,L}</math> geregelt.</p>           | <p><math>U_{DC,B-}</math> Grenzwert für Rückwärtsspannung<br/>(negative <b>B</b>emessungsspannung)</p>  |
| <p><b>3</b> Begrenzungsbetrieb:<br/>Gleichstromsteller abhängig von <math>U_{DC}</math> heruntergeregelt (bis auf Null bei <math>U_{DC,H}</math>),<br/>Wechselrichter auf maximaler Leistung.</p> |   |
| <p><b>0</b> Nur im Störfall auftretende Betriebszustände</p>  |   |

**Figur 2:**  
**Definition der Betriebszustände und Spannungspegel**

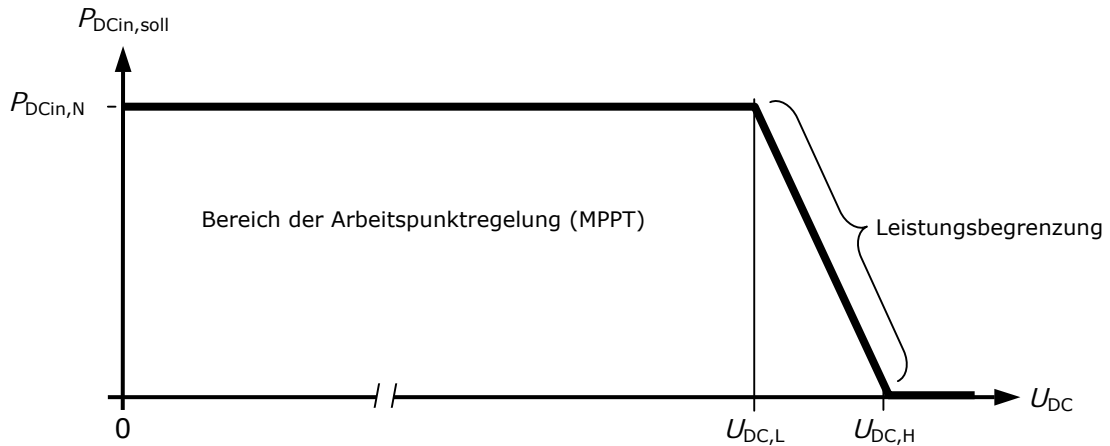
In Figur 3 ist das Regelkonzept als Signalflussdiagramm dargestellt. Sowohl die gleichstromseitigen Wandler (Gleichstromsteller) wie auch der Wechselrichter sind mit einem Regler ausgestattet, der den Wandler in Abhängigkeit von  $U_{DC}$  so steuert, dass die erwähnten Betriebsbereiche eingehalten werden. Dies geschieht durch geeignet gewählte Reglerkennlinien, die in Figur 4 und Figur 5 erläutert werden.



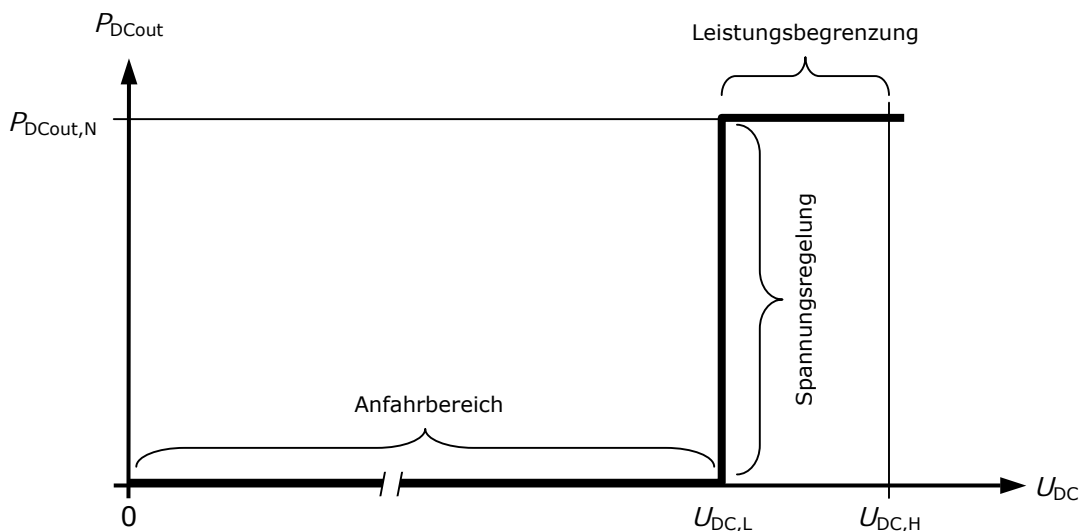
**Figur 3:**  
**Signalflussdiagramm für die Regelstruktur der DC-Sammelschiene mit den generatorseitig vorgeschalteten und netzseitig nachgeschalteten Wandlern**

Konkrete Vorschläge für die Standardisierung der Spannungspegel und der übrigen Parameter des Gleichspannungs-Busses werden in [2] und [3] präsentiert.

Figur 4 zeigt die Kennlinie des gleichstromseitigen Reglers. Im Bereich  $0 \leq U_{DC} \leq U_{DC,L}$  ist die Steuerung des Gleichstromstellers dem Arbeitspunktregler überlassen. Erst wenn  $U_{DC}$  den Wert  $U_{DC,L}$  übersteigt, beginnt eine Leistungsbegrenzung einzusetzen: Die Leistung wird mit zunehmendem Wert von  $U_{DC}$  linear reduziert, bis sie bei  $U_{DC} = U_{DC,H}$  den Wert Null erreicht. Auf diese Weise kann  $U_{DC}$  die obere Betriebsspannung  $U_{DC,H}$  nicht übersteigen.



**Figur 4:**  
Leistungsbegrenzung der Gleichstromsteller  
in Funktion der Gleichspannungs-Bus-Spannung

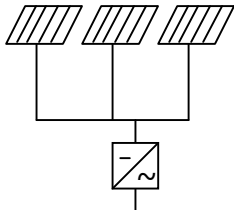
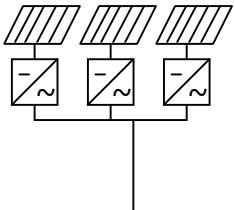
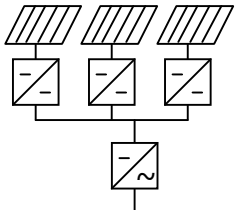


**Figur 5:**  
Spannungsregelung und Leistungsbegrenzung  
des Zentralwechselrichters

In Figur 5 ist die Kennlinie des wechselstromseitigen Reglers dargestellt. Im Spannungsbereich  $0 \leq U_{DC} \leq U_{DC,L}$  wird die Leistung des Wechselrichters auf Null gesetzt. Sobald  $U_{DC}$  den Wert  $U_{DC,L}$  erreicht, wird sie so geregelt, dass  $U_{DC} = U_{DC,L}$  konstant bleibt. Bei  $U_{DC} \geq U_{DC,L}$  wird die Leistung auf den Nennwert begrenzt.

## 4. Vergleich der Power-Conditioning-Konzepte

Es ist nicht so, dass das Konzept des Gleichspannungs-Busses die andern Power-Conditioning-Konzepte (Stränge direkt auf den Zentralwechselrichter geführt oder Strangwechselrichter) völlig ersetzen würde. Jedes Konzept hat seine Vor- und Nachteile, und es wird für jedes einen optimalen Einsatzbereich geben – siehe Tabelle 1.

Variante	1	2	3
	 <p>Parallelschaltung der Stränge mit Zentralwechselrichter</p>	 <p>Strangwechselrichter</p>	 <p>Strang-Gleichstromsteller, Gleichspannungs-Bus und Zentralwechselrichter</p>
<b>Vorteile</b>	kostengünstigste Variante	strangspezifische Arbeitspunktregelung bei Teilbeschattung, somit optimaler Wirkungsgrad  Kein Totalausfall bei Defekt eines Wechselrichters oder eines Fotovoltaikstrangs	strangspezifische Arbeitspunktregelung bei Teilbeschattung, somit optimaler Wirkungsgrad  Kein Totalausfall bei Defekt eines Fotovoltaikstrangs  Optimales Kosten-Nutzen-Verhältnis bei größeren Anlagen
<b>Nachteile</b>	keine strangspezifische Arbeitspunktregelung bei Teilbeschattung, somit Beeinträchtigung des Wirkungsgrades  Totalausfall bei Defekt des Wechselrichters  Unter Umständen Totalausfall bei Defekt eines Fotovoltaikstrangs	Bei großer Anzahl Stränge nicht kostenoptimal, da jeder Strangwechselrichter seine eigene Netzeinspeiseregulierung hat	Totalausfall bei Defekt des Wechselrichters

**Tabelle 1:**  
Charakterisierung der verschiedenen Varianten  
des Power Conditioning bei Fotovoltaikanlagen

## ***5. Vorgeschlagene Entwicklung neuer Produktpaletten***

### **Gleichstromsteller**

Es sind Gleichstromsteller mit Arbeitspunktregelung so weiterzuentwickeln, dass sie für die Einspeisung auf den standardisierten Gleichspannungs-Bus geeignet sind. Ein Grundkonzept dafür wird in [2] vorgestellt.

Die neuen Produktpaletten sollen folgende Bereiche abdecken:

- ◆ kurzfristig: Strang-Gleichstromsteller für die Fotovoltaik
- ◆ mittelfristig: Gleichstromsteller für drehzahlvariable Klein-Windturbinen, die mit einem Gleichstromgenerator oder einem Drehstromgenerator mit Gleichrichter ausgerüstet sind
- ◆ langfristig: Modul-Gleichstromsteller für modulare Wasserturbinen

### **Wechselrichter**

Es sind Wechselrichter für die Einspeisung ab dem standardisierten Gleichspannungs-Bus ins Netz zu entwickeln. Dabei dürfte es möglich sein, bestehende Konzepte von Zentralwechselrichtern mit bescheidenem Aufwand zu adaptieren. Ein Grundkonzept wird in [3] vorgestellt.

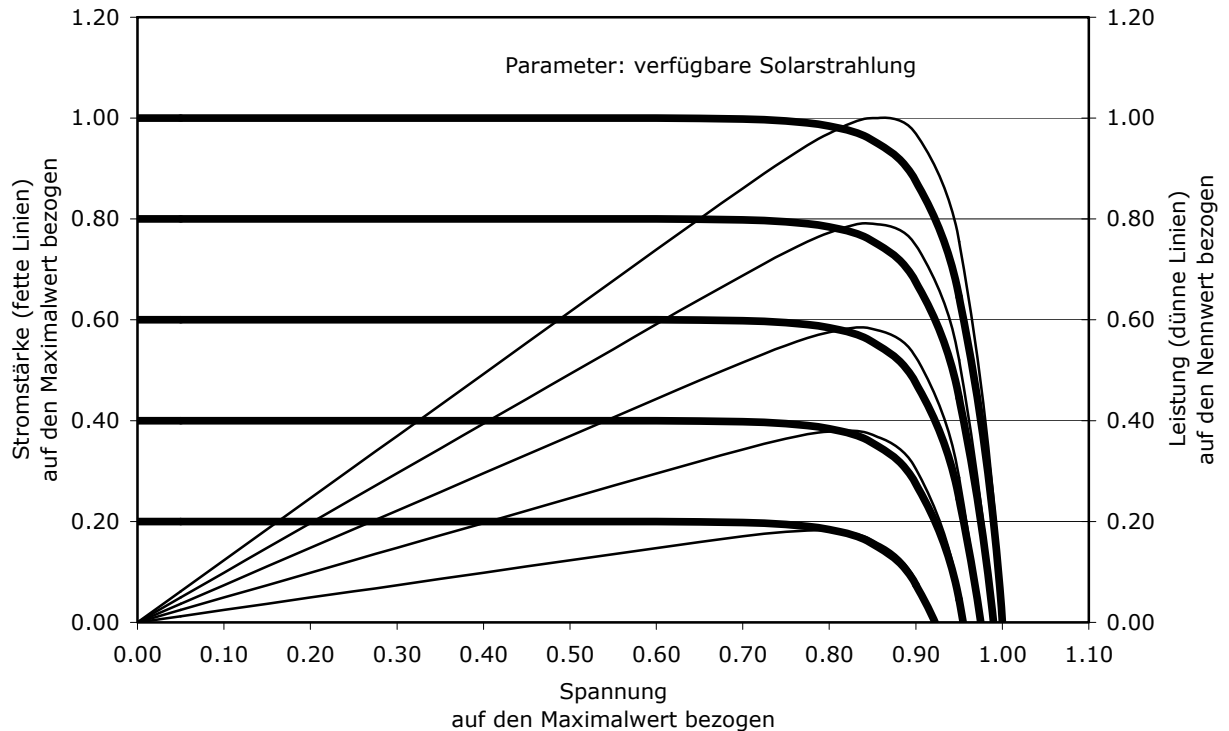
## 6. *Referenzpublikationen*

- [1] Patentanmeldung Nr. 00516/09, "Gleichspannungs-Bus"  
Eidgenössisches Institut für Geistiges Eigentum, 31.03.2009  
Titel:  
Regelungskonzept für die Netzeinspeisung elektrischer Energie aus dezentralen, leistungsvariablen Quellen über einen Gleichspannungs-Bus.
- [2] Max Blatter:  
Netzeinspeisung elektrischer Energie aus dezentralen, leistungsvariablen Quellen über einen Gleichspannungs-Bus  
Teil 2: Konzept eines Gleichstromstellers mit Arbeitspunktregelung und Regelung für Gleichspannungs-Bus  
Max Blatter, dipl. El.-Ing. ETH, Biel/Bienne, 2009
- [3] Max Blatter:  
Netzeinspeisung elektrischer Energie aus dezentralen, leistungsvariablen Quellen über einen Gleichspannungs-Bus  
Teil 3: Konzept eines Wechselrichters mit Netzeinspeiseregulation und Regelung für Gleichspannungs-Bus  
Max Blatter, dipl. El.-Ing. ETH, Biel/Bienne, 2009

## 1. Anhang: Generatorseitige Arbeitspunktregelung

Fotovoltaikzellen, -panels und -stränge weisen bekanntlich eine charakteristische Strom-Spannungs-Kennlinie auf, bei der die Leistung (als das Produkt beider Größen) irgendwo im Bereich zwischen Kurzschluss- und Leerlaufpunkt ein Maximum aufweist.

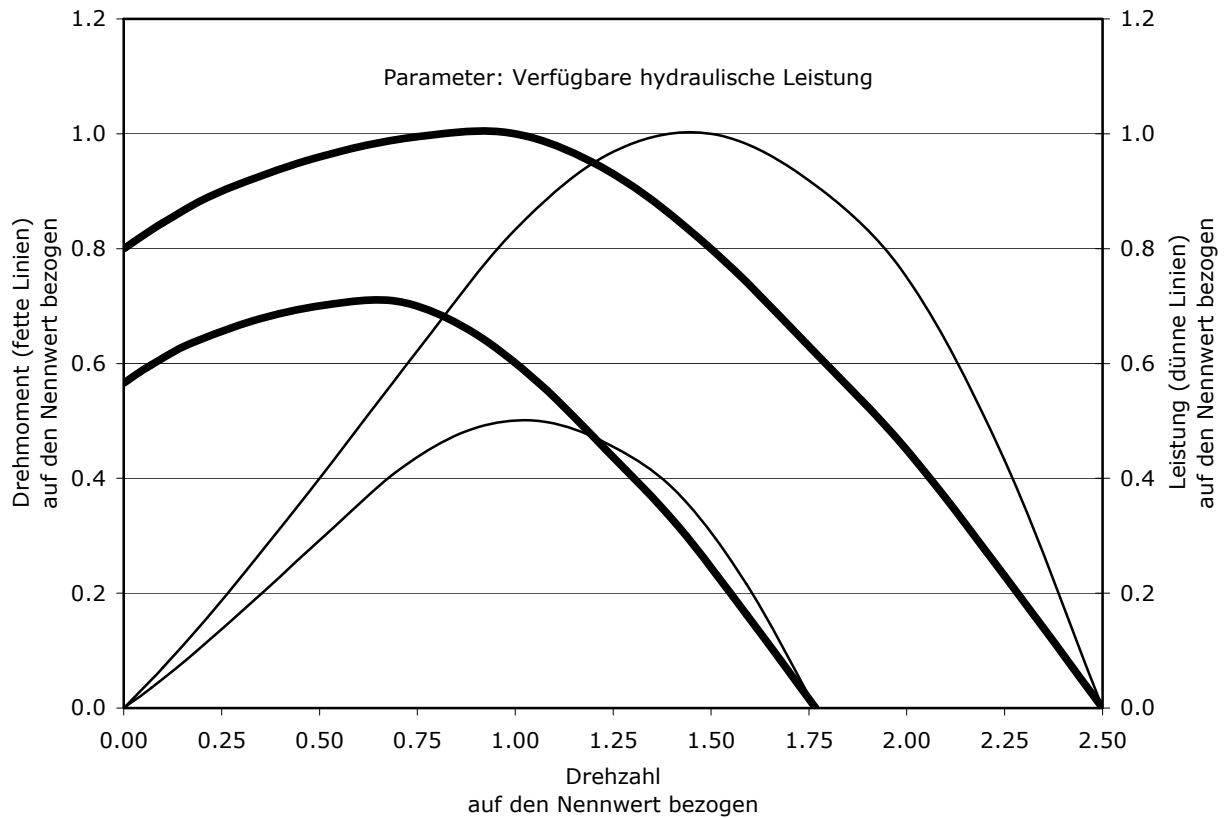
Figur 6 veranschaulicht diesen Sachverhalt.



**Figur 6:**  
Spannungs-Strom- und Spannungs-Leistungs-Kennlinienfeld  
bei einem typischen Fotovoltaik-Strang

Es ist die Aufgabe des Arbeitspunktreglers, selbsttätig denjenigen Arbeitspunkt einzustellen, bei dem die Leistung maximal wird.

Eine ganz ähnliche Situation liegt bei drehzahlvariablen Turbinen vor, seien es Wasser- oder Windturbinen: Hier tritt an die Stelle der Strom-Spannungs-Kennlinie die Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie. Auch da weist die Leistung zwischen Stillstands- und Leerlaufpunkt ein Maximum auf, wenn auch die Kennlinie im Einzelnen anders verläuft als bei einem Fotovoltaikstrang (Figur 7).



**Figur 7:**  
**Drehzahl-Drehmoment- und Drehzahl-Leistungs-Kennlinienfeld**  
**bei einer typischen drehzahlvariablen Turbine**  
 (im Beispiel: Kaplan-Wasserturbine mit nicht verstellbaren Schaufeln)

Durch den Generator transformiert sich die Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie in eine Strom-Spannungs-Kennlinie, deren Verlauf dem ursprünglichen verwandt ist.

Auch hier stellt sich die Aufgabe der Arbeitspunktregelung, analog zum Fotovoltaikstrang. Sie kann grundsätzlich mit den gleichen Verfahren gelöst werden, die aus dem Power Conditioning für Fotovoltaikanlagen bekannt sind. In [2] wird ein Verfahren beschrieben, das sich dafür besonders eignet.

In der Entwicklung von Power-Conditioning-Produkten für Fotovoltaikanlagen einerseits und für drehzahlvariable Turbinen andererseits liegt also ein großes Synergie-Potenzial.

**Max Blatter**

dipl. El.-Ing. ETH / Energie-Ing. NDS FH

Büttenbergstrasse 3

CH-2504 Biel/Bienne



TE<sup>4</sup>

Technologie-Entwicklung für Erneuerbare Elektrische Energie

# Netzeinspeisung elektrischer Energie aus dezentralen, leistungsvariablen Quellen über einen Gleichspannungs-Bus

Teil 2: Konzept eines Gleichstromstellers  
mit Arbeitspunktregelung  
und Regelung für Gleichspannungs-Bus

Max Blatter, dipl. El.-Ing. ETH  
erstellt am 01.04.09  
letztmals überarbeitet am 20.12.09

## ***Inhalt***

1.	Einleitung .....	3
2.	Struktur des Gleichstromstellers.....	3
2.1	Überblick .....	3
2.2	Leistungskomponenten .....	4
2.2.1	Gleichstromsteller mit Steuersatz.....	4
2.2.2	Messwandler .....	6
2.3	Reglerkomponenten.....	6
2.3.1	Arbeitspunktregler .....	6
2.3.2	Maximalstrombegrenzung .....	8
3.	Standard für den Betrieb des Gleichspannungs-Busses .....	11
3.1	Spannungsbereiche .....	11
3.2	Dynamisches Verhalten .....	12
3.2.1	Arbeitspunktregelung .....	12
3.2.2	Maximalstromregelung .....	12
3.3	Potenzial gegen Erde .....	12
3.4	Elektromagnetische Verträglichkeit .....	12
4.	Referenzpublikationen .....	13

## ***Zusammenfassung***

Mit einer Schweizer Patentanmeldung [1] wurde ein neues Konzept zum Power Conditioning für Fotovoltaikanlagen und andere leistungsvariable Generatoren vorgeschlagen, das auf einem herstellerübergreifend standardisierten Gleichspannungs-Bus basiert. In der vorliegenden Dokumentation wird die Grundstruktur eines Gleichstromstellers gezeigt, der für die Energieeinspeisung von einem Fotovoltaikstrang auf den Gleichspannungs-Bus geeignet ist. Weiter werden die in diesem Zusammenhang stehenden Spezifikationen des Gleichspannungs-Busses zur Diskussion gestellt.

## 1. *Einleitung*

In [2] wurde, ausgehend vom üblichen Power Conditioning für Fotovoltaik-Anlagen, ein innovatives Konzept vorgestellt. Dabei sind die Funktion der Arbeitspunktregelung (Maximum Power Point Tracking) und diejenige der Netzeinspeisung auf zwei separate Geräte aufgeteilt. Dazwischen ist ein standardisierter Gleichspannungs-Bus vorgesehen. – Die wesentlichen Teile des Konzepts liegen auch als schweizerische Patentanmeldung vor [1].

Wesentliches Merkmal des Konzepts ist es, dass sowohl die generatorseitigen wie auch der netzseitige Wandler als je völlig autonome Geräte arbeiten. Die Information über den Gesamtzustand des Systems beziehen sie dabei aus dem Spannungspegel des Gleichspannungs-Busses.

Im vorliegenden Teil der Dokumentation wird die Grundstruktur eines generatorseitigen Wandlers vorgestellt, der als Gleichstromsteller mit Arbeitspunktregelung konzipiert ist und gleichzeitig die durch den Gleichspannungs-Bus geforderten Regelfunktionen erfüllt.

## 2. *Struktur des Gleichstromstellers*

### 2.1 *Überblick*

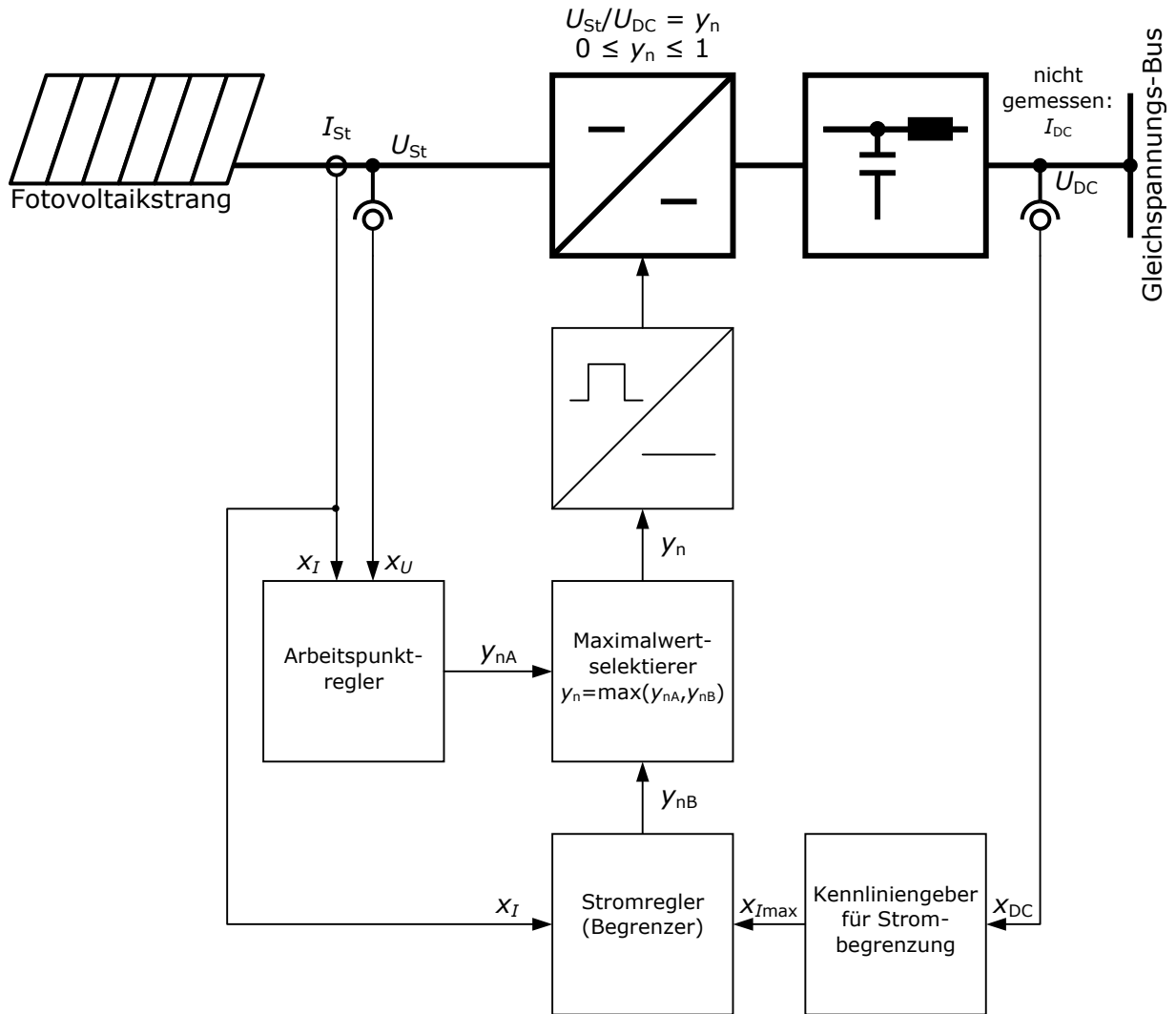
Figur 1 zeigt die Gesamtstruktur des Gleichstromstellers, wobei der Leistungsteil fett dargestellt ist, die Teile der Regelung und Steuerung mager. – Im Folgenden wird die allgemeine Funktion beschrieben, bevor in den nächsten Abschnitten die einzelnen Komponenten im Fokus stehen.

Als Generator ist beispielhaft ein Fotovoltaikstrang eingezeichnet; das gleiche Konzept ist aber auch für andere leistungsvariable Gleichspannungsquellen einsetzbar. Der Ausgang des nachgeschalteten Gleichstromstellers ist auf den standardisierten Gleichspannungs-Bus geführt. Das Verhältnis von Eingangs- zu Ausgangsspannung  $U_{St}/U_{DC}$  liegt zwischen 0 und 1, das heißt es handelt sich um einen so genannten Aufwärtssteller. Entsprechend kann die Spannung  $U_{St}$  des Generators im Bereich  $0 \leq U_{St} \leq U_{DC}$  liegen.

Geregelt wird der Gleichstromsteller zum einen durch den Arbeitspunktregler. Dessen Eingangsgrößen sind  $x_I$  und  $x_U$ , die den Generatorstrom  $I_{St}$  und die Generatorspannung  $U_{St}$  repräsentieren. Der Regler beeinflusst das Übersetzungsverhältnis  $y_{nA}$  so, dass der Generator im Punkt maximaler Leistung betrieben wird.

Zum andern existiert eine Strombegrenzung, die in Abhängigkeit des Spannungspegels  $U_{DC}$  respektive der Messgröße  $x_{DC}$  einen Maximalwert  $x_{I_{max}}$  für den Generatorstrom vorgibt. Ein Regler erhöht dann das Übersetzungsverhältnis  $y_{nB}$ , so dass sich der Arbeitspunkt des Generators vom Punkt maximaler Leistung weg in Richtung des Leerlaufpunkts bewegt. Dies so lange, bis der Maximalwert des Generatorstroms eingehalten wird.

Der Steuersatz setzt die von den Reglern gelieferte Stellgröße  $y_n$  in die für den Leistungsteil des Gleichstromstellers benötigten Steuerimpulse um.



Figur 1: Gesamtstruktur

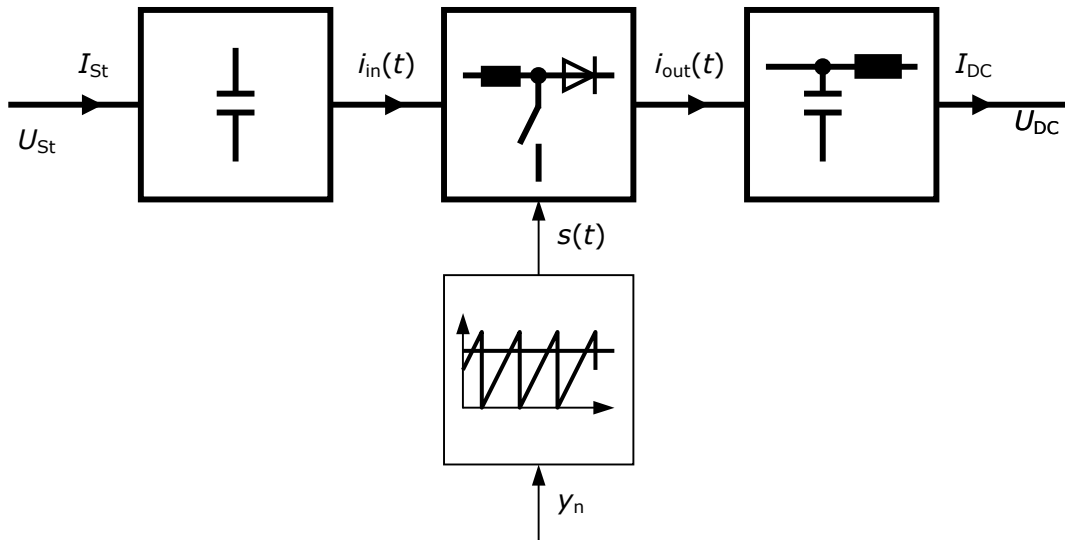
## 2.2 Leistungskomponenten

### 2.2.1 Gleichstromsteller mit Steuersatz

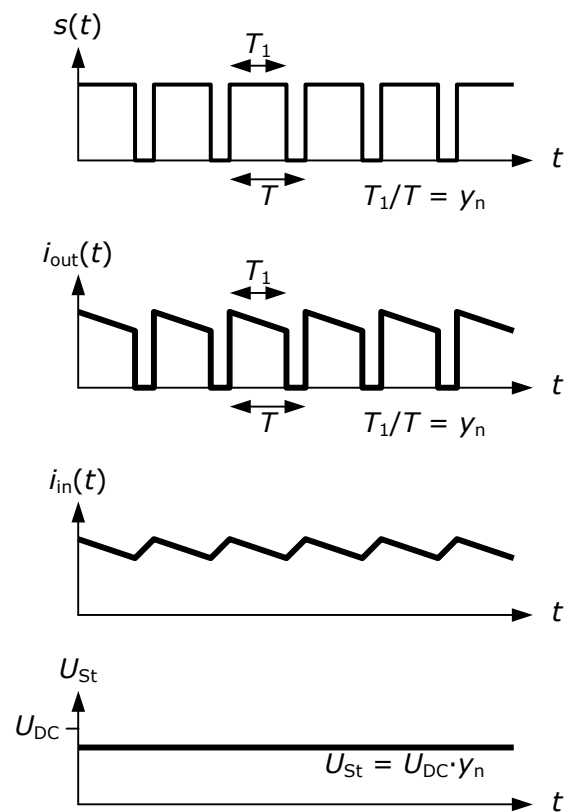
Figur 2 zeigt den Leistungsteil des Gleichstromstellers samt Steuersatz im Strukturbild. Es handelt sich um einen Aufwärtssteller; demgemäß liegt die Ausgangsspannung höher als die Eingangsspannung.

Der Steuersatz liefert durch den Vergleich der Stellgröße  $y_n$  mit einer Sägezahnspannung ein Schaltsignal  $s(t)$ , dessen Tastverhältnis  $T_1/T$  gleich  $y_n$  ist. Die Ein- und Ausgangsspannungen und -ströme des Gleichstromstellers nehmen dadurch die in Figur 3 gezeigten Formen an.

Da die Spannung  $U_{DC}$  des Gleichspannungs-Busses vorgegeben ist, wird die Eingangsspannung  $U_{St}$  und somit der Arbeitspunkt des Fotovoltaikgenerators durch das Tastverhältnis respektive die Stellgröße  $y_n$  bestimmt.



Figur 2: Struktur des Aufwärts-Gleichstromstellers



Figur 3: Idealisierte Strom- und Spannungsverläufe am Aufwärts-Gleichstromsteller

## 2.2.2 Messwandler

Zum Leistungsteil gehören auch die Messwandler, die den Reglern die benötigten Messgrößen liefern. Im vorliegenden Fall sind für die Eingangsspannung  $U_{St}$ , den Eingangsstrom  $I_{St}$  und die Bus-Gleichspannung  $U_{DC}$  Messwandler vorzusehen, welche die gemessenen Werte in die Größen  $x_U$ ,  $x_I$  und  $x_{DC}$  umsetzen.

## 2.3 Reglerkomponenten

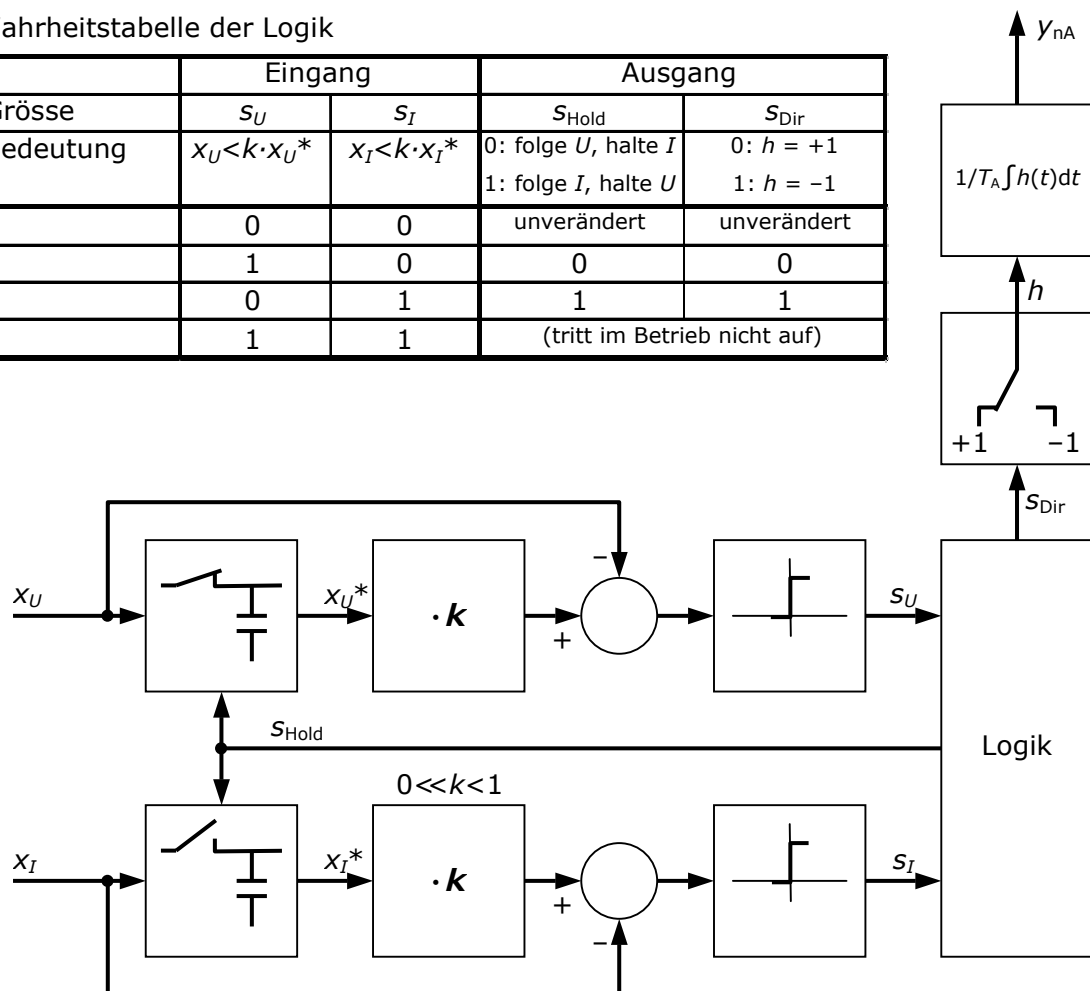
### 2.3.1 Arbeitspunktregler

Wichtigste Regelfunktion ist die Arbeitspunktregelung, welche die Aufgabe hat, den Arbeitspunkt des Fotovoltaikgenerators stets im Punkt maximaler Leistung zu halten.

Für diese Aufgabe, die in der Theorie der Regelungstechnik als (eindimensionale) Extremwertregelung bekannt ist, sind viele verschiedene Verfahren entwickelt worden. Eines davon ist das Kennlinienverfahren nach Böhringer [4], das im Folgenden anhand von Figur 4 und Figur 5 beschrieben wird.

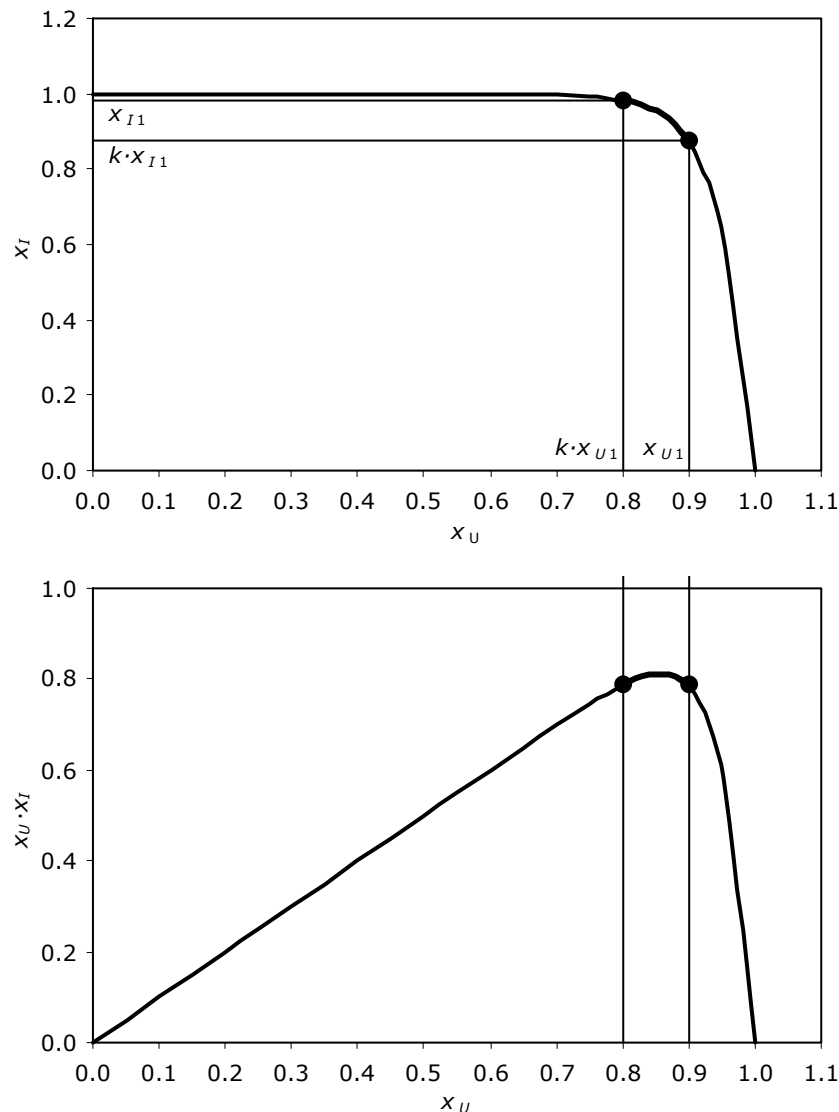
Wahrheitstabelle der Logik

Grösse	Eingang		Ausgang	
	$s_U$	$s_I$	$s_{Hold}$	$s_{Dir}$
Bedeutung	$x_U < k \cdot x_U^*$	$x_I < k \cdot x_I^*$	0: folge $U$ , halte $I$ 1: folge $I$ , halte $U$	0: $h = +1$ 1: $h = -1$
	0	0	unverändert	unverändert
	1	0	0	0
	0	1	1	1
	1	1	(tritt im Betrieb nicht auf)	



Figur 4: Struktur des nach Böhringers Verfahren arbeitenden Arbeitspunktreglers

Wie bei den meisten üblichen Verfahren wird der Arbeitspunkt in einer kleinen Pendelbewegung aktiv hin- und her bewegt. Beim Verfahren nach Böhlinger werden die Umschaltunkte der Pendelbewegung wie folgt bestimmt: Immer wenn die Bewegung in Richtung höherer Spannung umschaltet, wird der aktuelle Messwert  $x_{I1}$  des Stromes abgespeichert. Sobald der Strom den (kleineren) Wert  $k \cdot x_{I1}$  erreicht hat, wird die Bewegung in Richtung tieferer Spannung umgeschaltet. Dabei wird der aktuelle Messwert  $x_{U1}$  der Spannung abgespeichert. Sobald diese den (kleineren) Wert  $k \cdot x_{U1}$  erreicht hat, erfolgt die erneute Umschaltung und der Zyklus beginnt von vorne.



**Figur 5: Funktionsweise des Kennlinienverfahrens nach Böhlinger**

In der Praxis wird man den Bereich der Pendelbewegung zusätzlich einschränken (beispielsweise durch Vorgabe von Minimalwerten  $x_{Imin}$  und  $x_{Umin}$ ), um ein Hängenbleiben im Leerlauf- oder Kurzschlusspunkt zu vermeiden.

Wie Böhlinger mathematisch gezeigt hat, umfasst der Grenzyklus (wenn die Kennlinie gewisse Voraussetzungen erfüllt) denjenigen Arbeitspunkt, an dem das Produkt  $x_U \cdot x_I$  ein Maximum aufweist. Der für Strom und Spannung gemeinsame Faktor  $k$  ( $0 < k < 1$ ) bestimmt das Verhalten der Regelung im Hinblick auf einen Kompromiss zwischen Genauigkeit und Robustheit: So wird die Regelung umso genauer (und die Pendelbewegung des Arbeitspunktes umso kleiner), je

näher  $k$  bei 1 liegt. Allerdings wächst dann auch die Gefahr, dass der Regler an einem allfällig vorhandenen Nebenmaximum hängen bleibt oder dass er infolge von Messungenauigkeiten instabil wird. – Ein Wert von  $k \approx 0,95$  hat sich als günstiger Kompromiss erwiesen.

Ein weiterer wesentlicher Parameter des Reglers ist die Steilheit des Rampengenerators, der die Stellgröße  $y_{nA}$  liefert, das heißt die Übertragungskonstante  $1/T_A$  des entsprechenden Integrators. Sie bestimmt die Geschwindigkeit des Such- und Pendelvorgangs und sollte so gewählt werden, dass der Regler den witterungsbedingten Arbeitspunktverschiebungen des Fotovoltaikgenerators folgen kann, die bei dynamischen Veränderungen des Wolkenbildes in Zeitskalen deutlich unter einer Minute erfolgen. – Andererseits muss der Regler langsamer sein als die Regelung der Bus-Gleichspannung durch den nachgeschalteten Wechselrichter. Auf diesen Aspekt wird in Abschnitt 3.2 eingegangen.

Die speziellen Vorzüge des Verfahrens nach Böhringer sind:

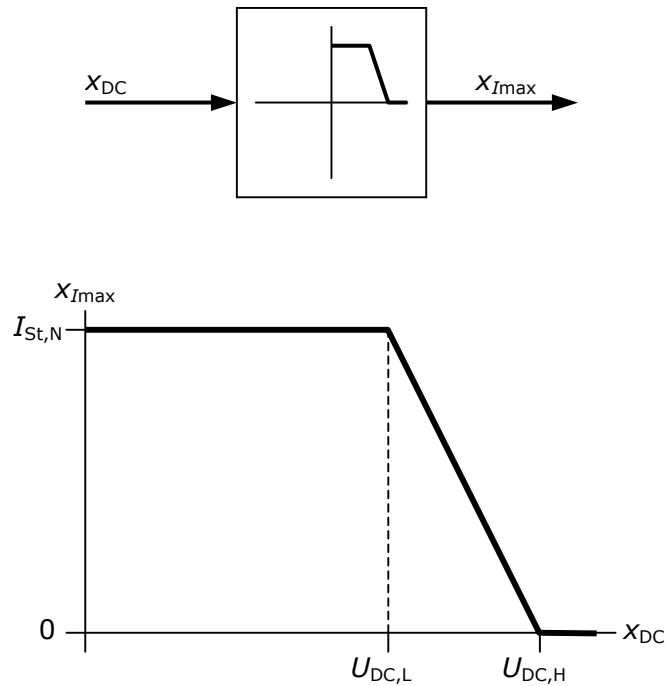
- ◆ Gute Robustheit (bei geeigneter Wahl des Faktors  $k$ );  
so ist es grundsätzlich auch für die nicht monotone Kennlinie einer drehzahlvariablen Turbine [2] ohne Weiteres geeignet.
- ◆ Einfache Implementierbarkeit auf verschiedenste Art:
  - Analoge Regelelektronik
  - Digitale Regelelektronik
  - Software

### 2.3.2 Maximalstrombegrenzung

Wenn die Bus-Gleichspannung  $U_{DC}$  ansteigt, ist dies ein Zeichen dafür, dass die insgesamt auf den Bus eingespeiste Leistung die Maximalleistung des nachgeschalteten Wechselrichters überschritten hat. In diesem Fall greift eine Stromregelung, die letztlich das Tastverhältnis des Gleichstromstellers erhöht, so dass sich der Arbeitspunkt des Fotovoltaikgenerators vom Punkt maximaler Leistung weg zum Leerlaufpunkt hin bewegt.

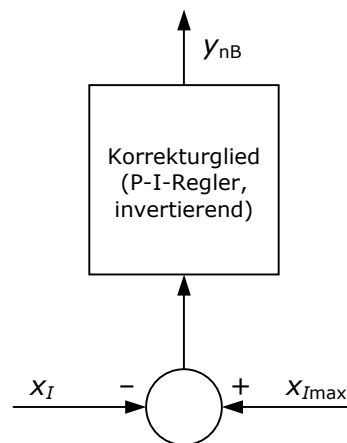
#### 2.3.2.1 Kennliniengeber

Diesem Zweck dient zunächst der in Figur 6 gezeigte Kennliniengeber, der den Sollwert des maximalen Generatorstroms vorgibt, also die Größe  $x_{I_{max}}$ . Er bestimmt diesen in Abhängigkeit der Bus-Gleichspannung  $U_{DC}$ , respektive der Messgröße  $x_{DC}$ , wie folgt: Solange  $U_{DC}$  höchstens gleich der festgelegten unteren Betriebsspannung  $U_{DC,L}$  ist, bleibt  $x_{I_{max}}$  konstant auf dem Wert, der dem Nennwert  $I_{St,N}$  des Generatorstroms entspricht. Übersteigt  $U_{DC}$  den Wert  $U_{DC,L}$ , so wird  $x_{I_{max}}$  linear reduziert, bis es bei  $U_{DC} = U_{DC,H}$  den Wert Null erreicht.



**Figur 6: Funktionsweise des Kennliniengabers für die Strombegrenzung**

### 2.3.2.2 Stromregler



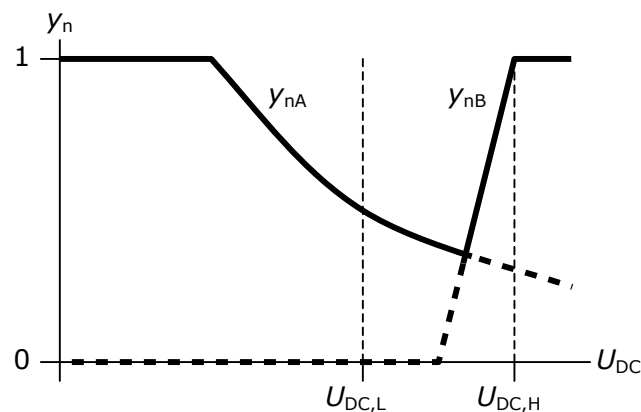
**Figur 7: Detailstruktur des Stromreglers**

Der Stromregler (Figur 7) beeinflusst das Tastverhältnis des Gleichstromstellers über die Stellgröße  $y_{nB}$  so, dass der Maximalwert  $x_{I_{max}}$  eingehalten wird. Weil eine Verminderung des Generatorstroms durch eine Erhöhung der Stellgröße erreicht wird, muss das Korrekturglied des Reglers invertierend sein. – Sein Frequenzgang ist nach den bekannten Theorien der Regelungstechnik im Hinblick auf Stabilität und Einstellzeit der Regelung zu dimensionieren. Letztere muss einerseits groß sein gegenüber der Taktperiode  $T$  des Gleichstromstellers, damit der Regler nicht auf den taktfrequenten Rippel des Eingangstroms  $i_{St}(t)$  reagiert. Andererseits muss die Einstellzeit kurz genug sein, um die Bus-Gleichspannung  $U_{DC}$  auch bei dynamischen Veränderungen im zulässigen Bereich zu halten. Darauf wird in Abschnitt 3.2 eingegangen.

Bei der Auslegung des Regelkreises geht die Nichtlinearität der  $U$ - $I$ -Kennlinie des Fotovoltaikgenerators in die Berechnung ein. Das bedeutet, dass die Parameter des Regelkreises stark vom aktuellen Arbeitspunkt abhängen. Unter Umständen ist eine nichtlineare Regelung erforderlich, welche bei negativer Regeldifferenz ( $x_I > x_{I_{\max}}$ ) unverzögert eingreift, während sie für Regeldifferenzen nahe Null nach den üblichen Stabilitätskriterien ausgelegt ist.

### 2.3.2.3 Maximalwertselektierer

Wie man im Gesamtstrukturbild Figur 1 (S. 4) erkennt, wählt ein nachgeschalteter Maximalwertselektierer die jeweils größere der beiden Stellgrößen  $y_{nA}$  und  $y_{nB}$  aus. Dadurch behält der Arbeitspunktregler die Kontrolle (Stellgröße  $y_{nA}$ ), solange  $x_I < x_{I_{\max}}$  bleibt. Erst wenn  $x_I \geq x_{I_{\max}}$  wird, greift über die Stellgröße  $y_{nB}$  die Strombegrenzung ein.



**Figur 8: Zur Funktionsweise des Maximalwertselektierers**

Die Kurven zeigen den qualitativen Verlauf von  $y_{nA}$  und  $y_{nB}$  in Abhängigkeit von  $U_{DC}$ . Im Detail hängt dieser vom Betriebspunkt des Fotovoltaikgenerators ab.

### 3. Standard für den Betrieb des Gleichspannungs-Busses

Bei den folgenden Ausführungen handelt es sich um eine Diskussionsgrundlage zuhanden der Hersteller, die auf dem Gebiet des Power Conditioning für Fotovoltaikanlagen tätig sind.

#### 3.1 Spannungsbereiche



- |   |  |
|---|--|
| <p><b>1</b> Anfahrbetrieb<br/> <math>0 \leq I_{St} \leq I_{St,N}</math><br/>         durch den Arbeitspunktregler bestimmt</p> <p><b>2</b> Normalbetrieb<br/> <math>0 \leq I_{St} \leq I_{St,N}</math><br/>         durch den Arbeitspunktregler bestimmt</p> <p><b>3</b> Begrenzungsbetrieb<br/>         Bei <math>U_{DC} = U_{DC,L}</math>: <math>0 \leq I_{St} \leq I_{St,N}</math><br/>         Bei <math>U_{DC} = U_{DC,H}</math>: <math>I_{St} = 0</math><br/>         allgemein: <math>0 \leq I_{St} \leq I_{St,N} \cdot [1 - (U_{DC} - U_{DC,L}) / (U_{DC,H} - U_{DC,L})]</math></p> <p><b>0</b> Nur im Störfall auftretende Betriebszustände</p> | <p><math>U_{DC,L}</math> Untere Betriebsspannung (<b>Low</b>)</p> <p><math>U_{DC,H}</math> Obere Betriebsspannung (<b>High</b>)</p> <p><math>U_{DC,B+}</math> Grenzwert für Überspannung<br/>(positive <b>Bemessungsspannung</b>)</p> <p><math>U_{DC,B-}</math> Grenzwert für Rückwärtsspannung<br/>(negative <b>Bemessungsspannung</b>)</p> |
|---|--|

**Figur 9: Betriebsbereiche in Abhängigkeit der Spannungspegel des Gleichspannungs-Busses**

Es werden folgende Spannungspegel zur Diskussion gestellt:

- |   |  |
|---|--|
| <p><math>U_{DC,L} = 400 \text{ V}</math></p> <p><math>U_{DC,H} = 440 \text{ V}</math></p> <p><math>U_{DC,B+} = 462 \text{ V}</math></p> <p><math>U_{DC,B-} = -22 \text{ V}</math></p> | <p>Dies liegt um gut 13 % respektive 46 V über dem Scheitelwert einer 250 V-Wechselspannung, was für die Auslegung des nachgeschalteten Wechselrichters Vorteile bringt.</p> <p>Dies entspricht einem für Gleichspannungen üblichen Nennspannungswert.</p> <p>Die positive Bemessungsspannung liegt 5 % über der oberen Betriebsspannung. Diese Spannung muss der Gleichstromsteller dauernd aushalten, wobei er keine Energie in den Gleichspannungs-Bus einspeisen darf. Anschließend muss er wieder selbsttätig in den Normalbetrieb übergehen. Beim Überschreiten des Wertes muss er selbsttätig vom Gleichspannungs-Bus getrennt werden und darf erst nach manuellem Eingriff wieder starten.</p> <p>Die negative Bemessungsspannung beträgt 5 % der oberen Betriebsspannung. Diese Spannung muss der Gleichstromsteller dauernd aushalten und anschließend wieder selbsttätig in den Normalbetrieb übergehen. Beim Unterschreiten des Wertes muss er selbsttätig vom Gleichspannungs-Bus getrennt werden und darf erst nach manuellem Eingriff wieder starten.</p> |
|---|--|

## 3.2 *Dynamisches Verhalten*

### 3.2.1 *Arbeitspunktregelung*

Die Arbeitspunktregelung soll nicht zu rasche Änderungen im Ausgangsstrom  $I_{DC}$  verursachen, damit keine unerwünschten Interferenzen mit der Netzfrequenz und mit der Regelung des nachgeschalteten Wechselrichters auftreten. Es werden folgende Anforderungen vorgeschlagen:

- ◆ Beim Starten oder Wiedereinschalten nach einer Störung soll der Arbeitspunktregler von  $y_n = 0$ , das heißt vom Kurzschlusspunkt aus, anlaufen. (Begründung: So wird der Ausgangsstrom  $I_{DC}$  sanft hochgefahren; beim Anfahren mit  $y_n = 1$  und noch spannungslosem Gleichspannungs-Bus würde  $I_{DC}$  abrupt gleich dem Kurzschlussstrom  $I_{St}$  des Fotovoltaikgenerators.)
- ◆ Der Arbeitspunktregler soll den gesamten Suchbereich von  $y_n = 0$  bis  $y_n = 1$  und umgekehrt nicht schneller als in je 10 s durchlaufen.
- ◆ Bei Arbeitspunktreglern, die eine Pendelbewegung um den Punkt maximaler Leistung ausführen, soll deren Periode mindestens 100 ms betragen.

### 3.2.2 *Maximalstromregelung*

Wie in Abschnitt 2.3.2 dargelegt, greift die Maximalstromregelung dann ein, wenn der nachgeschaltete Wechselrichter die eingespeiste Leistung nicht mehr abführen kann. Dann muss sie schnell genug sein, um die Bus-Gleichspannung im zulässigen Bereich zu halten. Dabei darf die am Eingang des Wechselrichters vorgesehene Kapazität berücksichtigt werden.

Dies führt zu folgender Forderung:

- ◆ Die Maximalstromregelung soll für den Fall ausgelegt sein, dass anfänglich 120 % der Nennleistung in den Gleichspannungs-Bus eingespeist, aber nur 100 % abgeführt werden. Die Bus-Gleichspannung darf dann bis zum Zurückregeln um höchstens 10 V ansteigen, wobei mit einer Parallelkapazität von 1000  $\mu\text{F}$  pro kW Nennleistung gerechnet werden darf. Daraus resultiert eine geforderte Ansprechzeit in der Größenordnung von 4 ms.

Wie in Abschnitt 2.3.2.2 angedeutet, kann es sein, dass Schnelligkeit und Stabilität nur mit einer nichtlinearen Regelung gleichermaßen gewährleistet werden können.

## 3.3 *Potenzial gegen Erde*

Das Konzept sieht vor, dass der negative Pol des Gleichspannungs-Busses auf Erdpotenzial liegt. Dies wird durch den Wechselrichter gewährleistet, in welchem der entsprechende Anschluss entweder mit dem PE- oder PEN-Leiter des Netzes oder mit einem separaten Potenzialausgleichsleiter durchverbunden ist [3]. Infolgedessen darf im Leistungsteil des Gleichstromstellers keine Erdverbindung bestehen. Das Gleiche gilt für den Fotovoltaikgenerator, außer der Gleichstromsteller weise eine galvanische Trennung auf.

## 3.4 *Elektromagnetische Verträglichkeit*

Die vom Gleichstromsteller in die Leitungen des Gleichspannungs-Busses eingespeisten hochfrequenten Störströme dürfen die nach europäischer Norm EN61000-6-3 zulässigen Grenzwerte nicht überschreiten [5].

## 4. Referenzpublikationen

- [1] Patentanmeldung Nr. 00516/09, "Gleichspannungs-Bus"  
Eidgenössisches Institut für Geistiges Eigentum, 31.03.2009  
Titel:  
Regelungskonzept für die Netzeinspeisung elektrischer Energie aus dezentralen, leistungsvariablen Quellen über einen Gleichspannungs-Bus.
- [2] Max Blatter:  
Netzeinspeisung elektrischer Energie aus dezentralen, leistungsvariablen Quellen über einen Gleichspannungs-Bus  
Teil 1: Gesamtkonzept für PV-Anlagen sowie kleinere drehzahlvariable Wasser- und Windturbinen  
Max Blatter, dipl. El.-Ing. ETH, Biel/Bienne, 2009
- [3] Max Blatter:  
Netzeinspeisung elektrischer Energie aus dezentralen, leistungsvariablen Quellen über einen Gleichspannungs-Bus  
Teil 3: Konzept eines Wechselrichters mit Netzeinspeiseregulation und Regelung für Gleichspannungs-Bus  
Max Blatter, dipl. El.-Ing. ETH, Biel/Bienne, 2009
- [4] A. Böhringer:  
Die selbsttätige Einstellung der Extremwerte von Funktionen der Form  $z=g(x^2 \cdot y)$  nach einem Kennlinienverfahren  
In: Regelungstechnik, Jg.17 (1969), Heft 12
- [5] Europäische Norm EN61000-6-3+A11 (2004):  
Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV). Teil 6-3: Fachgrundnormen – Fachgrundnorm Störaussendung – Wohnbereich, Geschäfts- und Gewerbebereiche sowie Kleinbetriebe.  
Zitiert in: Heinrich Häberlin, Photovoltaik. AZ Verlag und VDE Verlag 2007

**Max Blatter**

dipl. El.-Ing. ETH / Energie-Ing. NDS FH

Büttenbergstrasse 3

CH-2504 Biel/Bienne



TE<sup>4</sup>

Technologie-Entwicklung für Erneuerbare Elektrische Energie

# Netzeinspeisung elektrischer Energie aus dezentralen, leistungsvariablen Quellen über einen Gleichspannungs-Bus

Teil 3: Konzept eines Wechselrichters  
mit Netzeinspeiseregung  
und Regelung für Gleichspannungs-Bus

Max Blatter, dipl. El.-Ing. ETH  
erstellt am 01.04.09  
letztmals überarbeitet am 21.12.09

## ***Inhalt***

1.	Einleitung .....	3
2.	Struktur des Wechselrichters .....	3
2.1	Überblick .....	3
2.2	Leistungskomponenten .....	5
2.2.1	Wechselrichter mit Steuersatz, Eingangskapazität und Ausgangsinduktivität.....	5
2.2.2	Messwandler .....	7
2.3	Reglerkomponenten.....	7
2.3.1	Netzsynchrisator .....	7
2.3.2	Leistungsregler.....	7
2.3.3	Einspeisestromregler .....	8
3.	Standard für den Betrieb des Gleichspannungs-Busses .....	9
3.1	Spannungsbereiche .....	9
3.2	Dynamisches Verhalten .....	10
3.2.1	Parallelkapazität zum Gleichspannungs-Bus.....	10
3.2.2	Leistungsregler.....	10
3.3	Potenzial gegen Erde .....	10
3.4	Elektromagnetische Verträglichkeit .....	10
4.	Referenzpublikationen .....	11

## ***Zusammenfassung***

Mit einer Schweizer Patentanmeldung [1] wurde ein neues Konzept zum Power Conditioning für Fotovoltaikanlagen und andere leistungvariable Generatoren vorgeschlagen, das auf einem herstellerübergreifend standardisierten Gleichspannungs-Bus basiert. In der vorliegenden Dokumentation wird die Grundstruktur eines Wechselrichters gezeigt, der für die Energieeinspeisung vom Gleichspannungs-Bus ins Netz geeignet ist. Weiter werden die in diesem Zusammenhang stehenden Spezifikationen des Gleichspannungs-Busses zur Diskussion gestellt.

## 1. *Einleitung*

In [2] wurde, ausgehend vom üblichen Power Conditioning für Fotovoltaik-Anlagen, ein innovatives Konzept vorgestellt. Dabei sind die Funktion der Arbeitspunktregelung (Maximum Power Point Tracking) und diejenige der Netzeinspeisung auf zwei separate Geräte aufgeteilt. Dazwischen ist ein standardisierter Gleichspannungs-Bus vorgesehen. – Die wesentlichen Teile des Konzepts liegen auch als schweizerische Patentanmeldung vor [1].

Wesentliches Merkmal des Konzepts ist es, dass sowohl die generatorseitigen wie auch der netzseitige Wandler als je völlig autonome Geräte arbeiten. Die Information über den Gesamtzustand des Systems beziehen sie dabei aus dem Spannungspegel des Gleichspannungs-Busses.

Im vorliegenden Teil der Dokumentation wird die Grundstruktur eines netzseitigen Wandlers vorgestellt, der als Wechselrichter mit Netzsynchronisation konzipiert ist und gleichzeitig die durch den Gleichspannungs-Bus geforderten Regelfunktionen erfüllt.

## 2. *Struktur des Wechselrichters*

### 2.1 *Überblick*

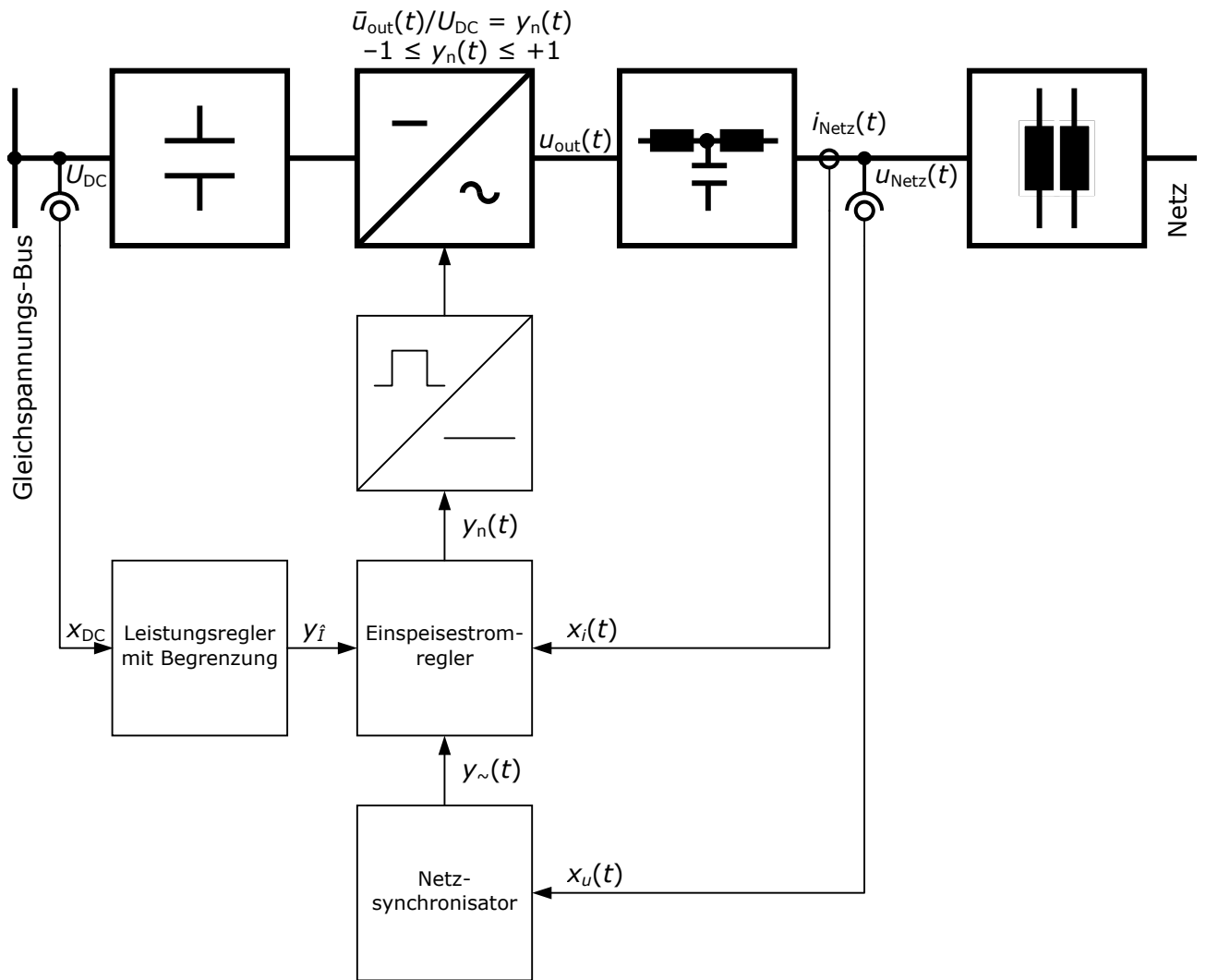
Figur 1 zeigt die Gesamtstruktur des Wechselrichters, wobei der Leistungsteil fett dargestellt ist, die Teile der Regelung und Steuerung mager. – Im Folgenden wird die allgemeine Funktion beschrieben, bevor in den nächsten Abschnitten die einzelnen Komponenten im Fokus stehen.

Die Eingangsseite des Wechselrichters ist, parallel zu einer Speicherkapazität, auf den Gleichspannungs-Bus mit der Spannung  $U_{DC}$  geschaltet. Ausgangsseitig liefert der Wechselrichter eine zeitlich variable Spannung  $u_{out}(t)$ , deren Mittelwert dem Tastverhältnis des Wechselrichters entsprechend im Bereich  $-U_{DC} \leq \bar{u}_{out}(t) \leq U_{DC}$  liegt. Über ein induktives Filter wird die Verbindung mit dem Netz hergestellt.

Ein Stromregler beeinflusst das Tastverhältnis des Wechselrichters so, dass sich der gewünschte Verlauf des eingespeisten Netzstromes  $i_{Netz}(t)$  ergibt. Dazu wird zunächst über einen Netzsynchronisator aus der Netzspannung  $u_{Netz}(t)$  respektive der Messgröße  $x_u(t)$  ein Signal  $y_{\sim}(t)$  erzeugt. Dieses gibt die Kurvenform des Soll-Stroms vor. Dessen Amplitude  $y_{\hat{}}$  wird über den Leistungsregler gewonnen. Dieser regelt die ans Netz abgegebene Leistung so, dass die Bus-Gleichspannung  $U_{DC}$  respektive die Messgröße  $x_{DC}$  konstant bleibt, solange dies möglich ist. Bei der maximal möglichen Leistung des Wechselrichters erfolgt dann eine Begrenzung.

Der Soll-Strom ist also durch  $y_{\hat{}} \cdot y_{\sim}(t)$  gegeben. Durch Vergleich mit der Messgröße  $x_i(t)$  wird  $y_n(t)$  so geregelt, dass der Soll-Stromverlauf eingehalten wird.

Der Steuersatz setzt die von den Reglern gelieferte Stellgröße  $y_n(t)$  in die für den Leistungsteil des Wechselrichters benötigten Steuerimpulse um.



Figur 1: Gesamtstruktur

## 2.2 Leistungskomponenten

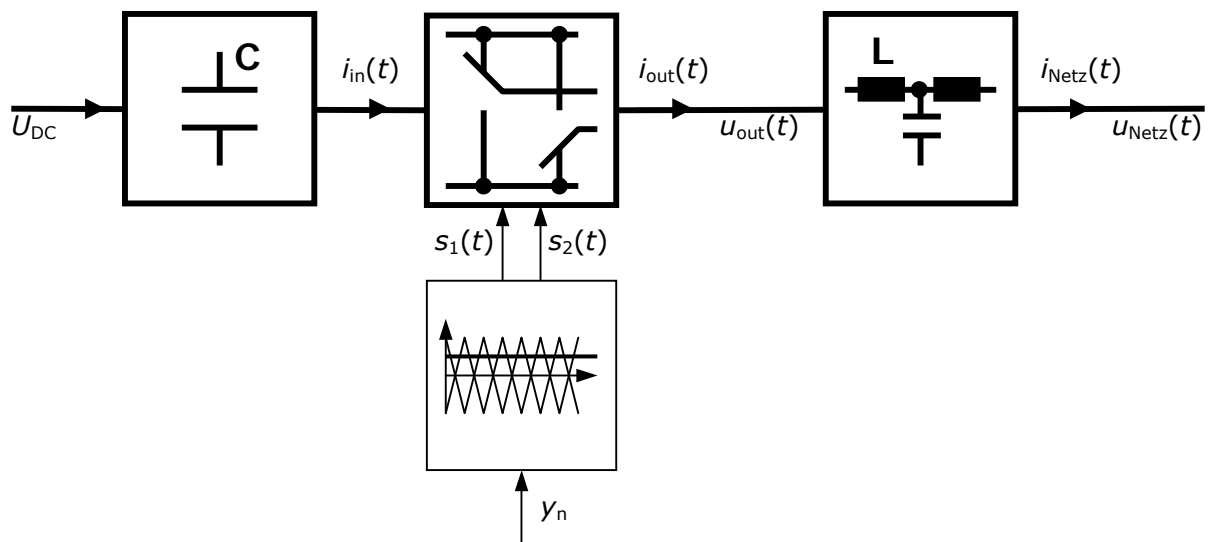
### 2.2.1 Wechselrichter mit Steuersatz,

#### *Eingangskapazität und Ausgangsinduktivität*

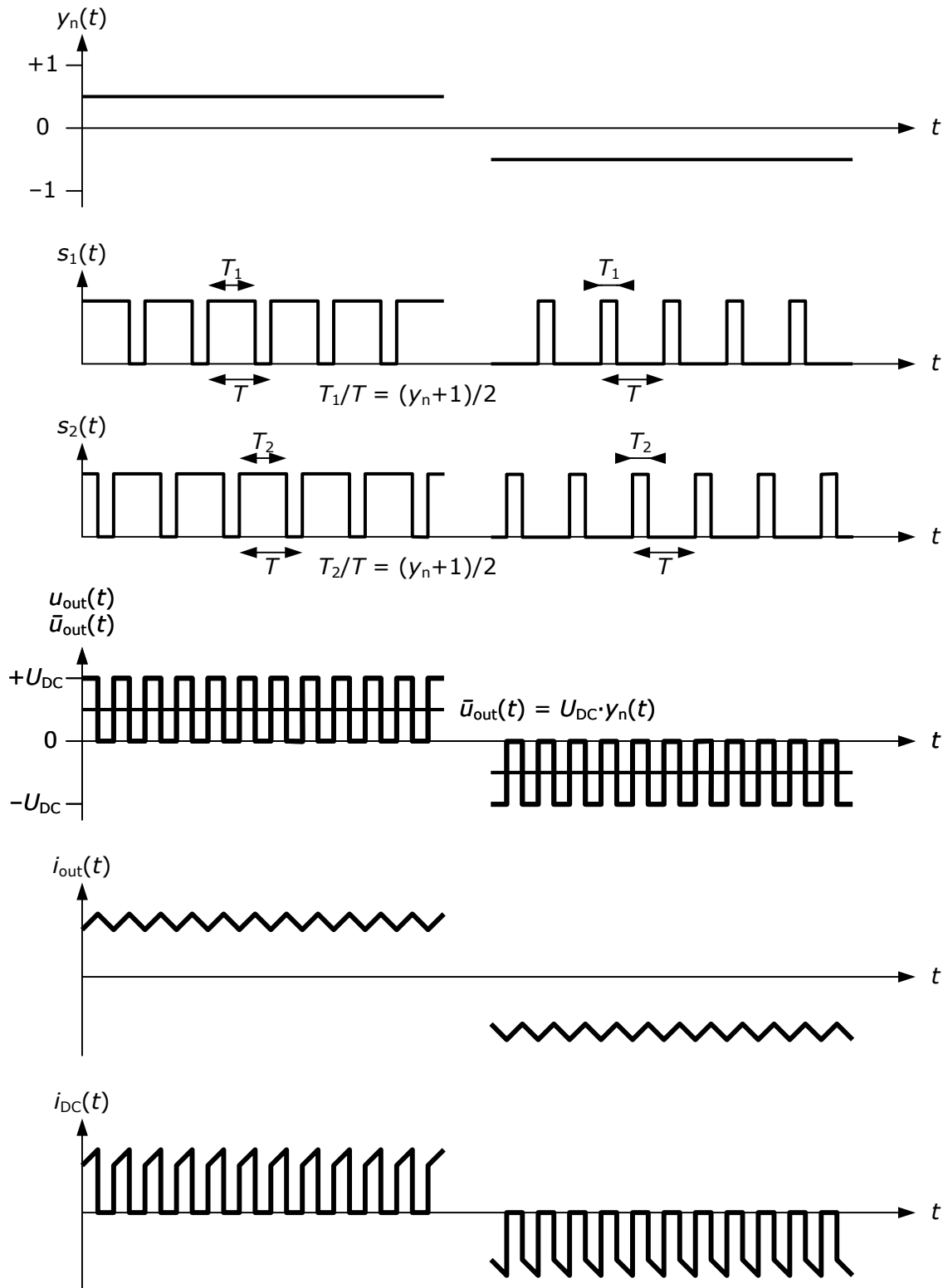
Figur 2 zeigt den Leistungsteil des Wechselrichters samt Steuersatz im Strukturbild. Es handelt sich um eine pulsbreitenmodulierte Brückenschaltung.

Der Steuersatz liefert durch den Vergleich der Stellgröße  $y_n$  mit zwei gegeneinander versetzten Dreiecksspannungen zwei Schaltsignale  $s_1(t)$  und  $s_2(t)$ , welche die beiden Brückenhälften ansteuern. Es ergeben sich die in Figur 3 gezeigten Strom- und Spannungsverläufe, wobei in der linken Hälfte der Figur der Fall  $y_n = +0,5$ , in der rechten Hälfte der Fall  $y_n = -0,5$  dargestellt ist.

Die über die Taktperiode  $T$  gemittelte Ausgangsspannung  $\bar{u}_{out}(t)$  folgt der Stellgröße  $y_n$ ; somit kann eine sinusförmige Kurvenform erreicht werden.



**Figur 2: Struktur des pulsbreitenmodulierten Brücken-Wechselrichters**



**Figur 3: Idealisierte Strom- und Spannungsverläufe am pulsbreitenmodulierten Brücken-Wechselrichter**

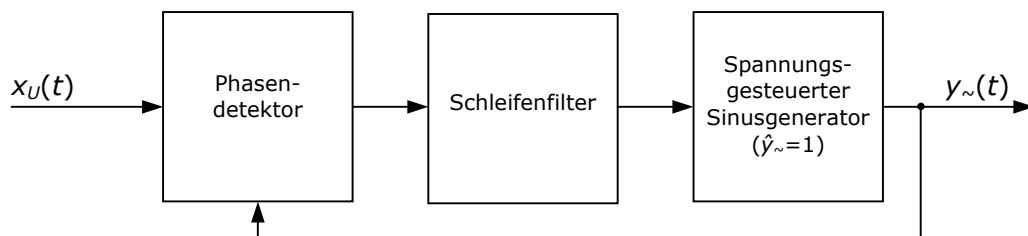
## 2.2.2 Messwandler

Zum Leistungsteil gehören auch die Messwandler, die den Reglern die benötigten Messgrößen liefern. Im vorliegenden Fall sind für die Netzspannung  $u_{\text{Netz}}(t)$ , den Netzstrom  $i_{\text{Netz}}(t)$  und die Bus-Gleichspannung  $U_{\text{DC}}$  Messwandler vorzusehen, welche die gemessenen Werte in die Größen  $x_u(t)$ ,  $x_i(t)$  und  $x_{\text{DC}}$  umsetzen.

## 2.3 Reglerkomponenten

### 2.3.1 Netzsynchronisator

Der Netzsynchronisator hat die Aufgabe, die Kurvenform und Phasenlage des Soll-Netzstroms vorzugeben. Dies geschieht am zweckmäßigsten mit einem Phasenregelkreis (PLL), wie er in Figur 4 dargestellt ist.



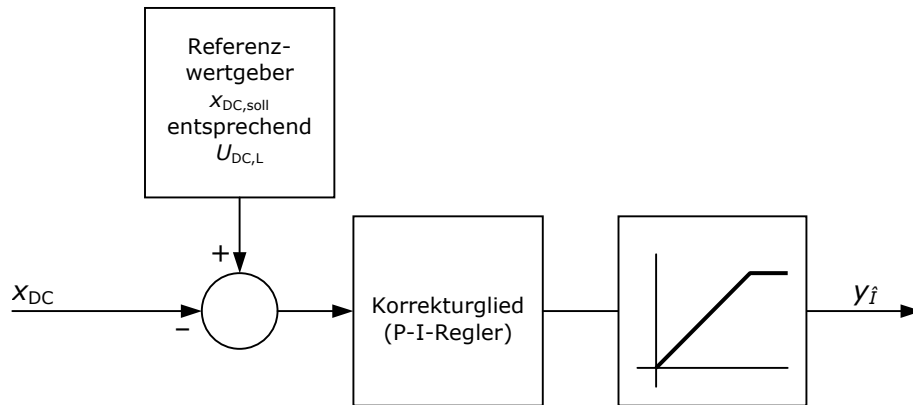
**Figur 4: Strukturbeispiel eines Netzsynchronisators auf der Basis eines Phasenregelkreises (Phase-Locked Loop PLL)**

Dabei wird durch einen spannungsgesteuerten Sinusgenerator eine Sinusgröße  $y_{\sim}(t)$  mit der Amplitude  $\hat{y}_{\sim}=1$  erzeugt, deren Frequenz innerhalb der Bandbreite der Netzfrequenz variiert werden kann. Ein Phasendetektor vergleicht  $y_{\sim}(t)$  mit der Messgröße für die Netzspannung,  $x_u(t)$ . Er liefert ein Signal, das ein Maß für die Phasendifferenz zwischen den beiden Größen ist. Über ein Schleifenfilter wird die Frequenz des Sinusgenerators so beeinflusst, dass die Phasendifferenz auf Null geregelt wird. – Phasendetektor und Schleifenfilter müssen nach den bekannten Theorien der Phasenregelkreise so entworfen und dimensioniert werden, dass der Synchronisator bei der gegebenen Netzfrequenz korrekt einrastet und im Tritt bleibt.

In der Praxis wird man aus dem Phasenregelkreis auch eine Information über den Zustand des Elektrizitätsnetzes ableiten. Dadurch kann beispielsweise der Wechselrichter vom Netz getrennt werden, wenn eine Synchronisation infolge einer Netzstörung nicht möglich ist. Dies ist dann Bestandteil der in den einschlägigen Normen und von den Elektrizitätswerken geforderten Sicherheitsmaßnahmen, wobei in der Regel allerdings noch zusätzliche Überwachungseinrichtungen nötig sind.

### 2.3.2 Leistungsregler

Zusätzlich zur Kurvenform  $y_{\sim}(t)$  muss die Amplitude  $y_i$  des Soll-Netzstroms bestimmt werden. Dies geschieht durch den Leistungsregler, dessen Strukturbild in Figur 5 gezeigt wird.

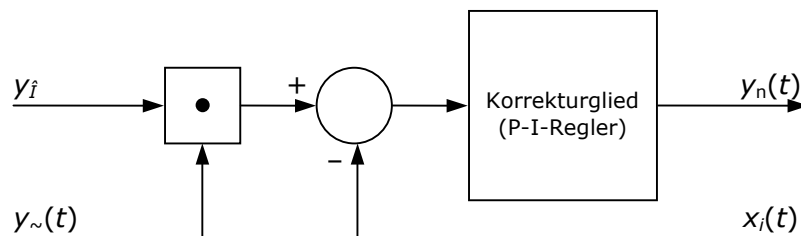


**Figur 5: Struktur des Leistungsreglers**

Dabei wird die Messgröße  $x_{DC}$  mit einem konstanten Referenzwert verglichen, welcher der festgelegten unteren Betriebsspannung  $U_{DC,L}$  des Gleichspannungs-Busses entspricht. – Der Frequenzgang des Korrekturglieds ist nach den bekannten Theorien der Regelungstechnik im Hinblick auf Stabilität und Einstellzeit der Regelung zu dimensionieren. Letztere muss einerseits groß sein gegenüber der Netzspannungsperiode  $T_{Netz}$ , denn eine schnellere Änderung der Größe  $y_i$  würde lediglich zu Verzerrungen der Netzstrom-Kurvenform führen. Andererseits muss die Einstellzeit kurz genug sein, um die Bus-Gleichspannung  $U_{DC}$  auch bei dynamischen Veränderungen genügend konstant zu halten. Darauf wird in Abschnitt 3.2 eingegangen. – Nach dem Ausgang des Korrekturglieds wird die Stellgröße  $y_i$  auf einen definierten Wert entsprechend der Netzstromamplitude bei Nennleistung begrenzt.

### 2.3.3 Einspeisestromregler

Im Einspeisestromregler (Figur 6) wird nun zunächst die Multiplikation  $y_i \cdot y_{\sim}(t)$  durchgeführt. Das Resultat entspricht dem Sollverlauf des Netzstroms. Durch Vergleich mit dem Istwert  $x_i(t)$  wird über das Korrekturglied des Reglers die Stellgröße  $y_n(t)$  gewonnen.



**Figur 6: Struktur des Einspeisestromreglers**

Der Frequenzgang des Korrekturglieds ist nach den bekannten Theorien der Regelungstechnik im Hinblick auf Stabilität und Einstellzeit der Regelung zu dimensionieren. Letztere muss einerseits groß sein gegenüber der Taktperiode  $T$  des Wechselrichters, damit der Regler nicht auf den taktfrequenten Rippel des Netzstroms reagiert. Andererseits muss die Einstellzeit kurz sein gegenüber der Netzspannungsperiode  $T_{Netz}$ , um den Netzstrom  $i_{Netz}(t)$  genügend genau dem sinusförmigen Sollverlauf nachführen zu können.

### 3. Standard für den Betrieb des Gleichspannungs-Busses

Bei den folgenden Ausführungen handelt es sich um eine Diskussionsgrundlage zuhanden der Hersteller, die auf dem Gebiet des Power Conditioning für Fotovoltaikanlagen tätig sind.

#### 3.1 Spannungsbereiche



- |  |  |
|--|--|
| <p><b>1</b> Anfahrbetrieb<br/> <math>y_i = 0</math><br/>           Leistung Null</p>   | <p><math>U_{DC,L}</math> Untere Betriebsspannung (<b>Low</b>)<br/> <math>U_{DC,H}</math> Obere Betriebsspannung (<b>High</b>)</p>  |
| <p><b>2</b> Normalbetrieb<br/> <math>0 \leq y_i \leq 1</math><br/>           geregelt auf <math>U_{DC} = U_{DC,L}</math></p> | <p><math>U_{DC,B+}</math> Grenzwert für Überspannung<br/>           (positive <b>Bemessungsspannung</b>)<br/> <math>U_{DC,B-}</math> Grenzwert für Rückwärtsspannung<br/>           (negative <b>Bemessungsspannung</b>)</p> |
| <p><b>3</b> Begrenzungsbetrieb<br/> <math>y_i = 1</math><br/>           Maximalleistung</p>                                  |  |
| <p><b>0</b> Nur im Störfall auftretende<br/>           Betriebszustände</p>  |  |

**Figur 7: Betriebsbereiche in Abhängigkeit der Spannungspegel des Gleichspannungs-Busses**

Es werden folgende Spannungspegel zur Diskussion gestellt:

- |   |  |
|---|--|
| <p><math>U_{DC,L} = 400 \text{ V}</math></p>  | <p>Diese Spannung ist im stationären Normalbetrieb durch die Leistungsregelung des Wechselrichters innerhalb eines Toleranzbandes von +2,5% / -0 % zu halten.</p>  |
| <p><math>U_{DC,H} = 440 \text{ V}</math></p>  | <p>Dies entspricht einem für Gleichspannungen üblichen Nennspannungswert. Diese Spannung muss der Wechselrichter dauernd verarbeiten können.</p>   |
| <p><math>U_{DC,B+} = 462 \text{ V}</math></p> | <p>Die positive Bemessungsspannung liegt 5 % über der oberen Betriebsspannung. Bei diesem Spannungswert muss der Wechselstromsteller noch mindestens 10 Minuten korrekt arbeiten. Danach darf er ausschalten, muss aber die Spannung dauernd aushalten und anschließend wieder selbsttätig in den Normalbetrieb übergehen.<br/>           Beim Überschreiten muss er sich selbsttätig vom Netz trennen und darf erst nach manuellem Eingriff wieder starten.</p> |
| <p><math>U_{DC,B-} = -22 \text{ V}</math></p> | <p>Die negative Bemessungsspannung beträgt 5 % der oberen Betriebsspannung. Diese Spannung muss der Wechselrichter dauernd aushalten.<br/>           Beim Unterschreiten dieses Spannungsniveaus muss er sich selbsttätig vom Netz trennen und darf erst nach manuellem Eingriff wieder starten.</p>   |

## 3.2 *Dynamisches Verhalten*

### 3.2.1 *Parallelkapazität zum Gleichspannungs-Bus*

Als Bestandteil des Wechselrichters ist eine Parallelkapazität vorgesehen, welche eine Leistungsdifferenz zwischen Eingangs- und Ausgangsseite während einiger Netzperioden abpuffern soll. Des weiteren glättet sie den Rippel mit der doppelten Netzfrequenz, der bei einphasigen Wechselrichtern auf dem Gleichspannungs-Bus entsteht.

Es wird folgende Spezifikation vorgeschlagen:

- ◆ Auf die Nennleistung  $P$  bezogen ist eine Kapazität von  $C/P = 1000 \mu\text{F}/\text{kW}$  (+20 % / -0 %) vorzusehen.

(Mit dem Eingangswiderstand des Wechselrichters im Nennbetrieb,  $R = U_{\text{DC}}^2/P$ , ergibt sich so eine Zeitkonstante von  $R \cdot C = 160 \text{ ms}$ .)

### 3.2.2 *Leistungsregler*

Der Leistungsregler muss den Änderungen der auf den Gleichspannungs-Bus eingespeisten Leistung so rasch folgen können, dass die Spannungsänderungen über der Parallelkapazität den Betrieb nicht beeinträchtigen.

Es wird folgende Spezifikation vorgeschlagen:

- ◆ Bei einer sprunghaften Änderung der auf den Gleichspannungs-Bus eingespeisten Leistung von 100 % auf 80 % der Nennleistung darf die Bus-Gleichspannung zu keiner Zeit mehr als 10 % unter den Wert  $U_{\text{DC,L}}$  absinken.
- ◆ Die Ausregelzeit darf nicht mehr als 200 ms betragen.

## 3.3 *Potenzial gegen Erde*

Das Konzept sieht vor, dass der negative Pol des Gleichspannungs-Busses auf Erdpotenzial liegt. Dazu muss der entsprechende Anschluss im Wechselrichter entweder mit dem PE- oder PEN-Leiter des Netzes (falls ein solcher vorhanden ist) oder mit einem separaten Potenzialausgleichsleiter durchverbunden sein.

## 3.4 *Elektromagnetische Verträglichkeit*

Die vom Wechselrichter in die Leitungen des Gleichspannungs-Busses eingespeisten hochfrequenten Störströme dürfen die nach europäischer Norm EN61000-6-3 zulässigen Grenzwerte nicht überschreiten [4].

## 4. Referenzpublikationen

- [1] Patentanmeldung Nr. 00516/09, "Gleichspannungs-Bus"  
Eidgenössisches Institut für Geistiges Eigentum, 31.03.2009  
Titel:  
Regelungskonzept für die Netzeinspeisung elektrischer Energie aus dezentralen, leistungsvariablen Quellen über einen Gleichspannungs-Bus.
- [2] Max Blatter:  
Netzeinspeisung elektrischer Energie aus dezentralen, leistungsvariablen Quellen über einen Gleichspannungs-Bus  
Teil 1: Gesamtkonzept für PV-Anlagen sowie kleinere drehzahlvariable Wasser- und Windturbinen  
Max Blatter, dipl. El.-Ing. ETH, Biel/Bienne, 2009
- [3] Max Blatter:  
Netzeinspeisung elektrischer Energie aus dezentralen, leistungsvariablen Quellen über einen Gleichspannungs-Bus  
Teil 2: Konzept eines Gleichstromstellers mit Arbeitspunktregelung und Regelung für Gleichspannungs-Bus  
Max Blatter, dipl. El.-Ing. ETH, Biel/Bienne, 2009
- [4] Europäische Norm EN61000-6-3+A11 (2004):  
Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV). Teil 6-3: Fachgrundnormen – Fachgrundnorm Störaussendung – Wohnbereich, Geschäfts- und Gewerbebereiche sowie Kleinbetriebe.  
Zitiert in: Heinrich Häberlin, Photovoltaik. AZ Verlag und VDE Verlag 2007