

# Photovoltaikwechselrichter als Technologietreiber in der Leistungselektronik



Institut für Automatisierungstechnik  
Labor für Leistungselektronik und Elektrische Antriebe  
Prof. Dr.-Ing. Chr. Dick



## Vorstellung

- Studium Elektro- und Informationstechnik an der RWTH Aachen, Auslandsstudium an der NTNU Trondheim an Multilevel-Konvertern (Dipl.-Ing.)
- Promotion an der RWTH Aachen am Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe „Multi-Resonant Converters as Photovoltaic Module-Integrated Maximum Power Point Tracker“ (Dr.-Ing.)
- 2 Jahre Oberingenieur am gleichen Institut - Leitung der Arbeitsgruppe Leistungselektronik
- SMA Solar Technology AG: Leitung der Abteilung Vorentwicklung für Solarwechselrichter in der Leistungsklasse bis 20 kW
- Seit Mitte 2011: Professur mit dem Lehrgebiet „Leistungselektronik und Elektrische Antriebe“ an der FH Köln



C. Dick



## Agenda

PV-WR als Technologietreiber in der LE

- Einführung PV-Wechselrichter
- Besondere Anforderungen an PV-Wechselrichter mit Lösungen
  - Ableitströme
- Halbleiterbauelemente
  - Si vs. SiC

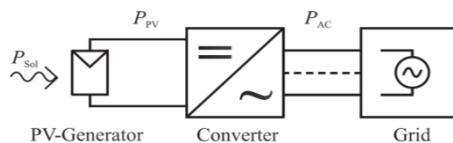
*Idee:* Ich möchte aufzeigen, welche technologischen Schwerpunkte in den letzten Jahren durch und mit der Photovoltaik vorangetrieben wurden.

Konsequenzen für andere Applikationen werden aufgezeigt.



## Einführung: PV-Wechselrichter

- Photovoltaik (PV) - Systeme:



$$\eta_{\text{sys}} = \eta_{\text{PVgen}} \cdot \eta_{\text{conv}}$$

[Source: Dts. cDie]

- Wesentliche Designgröße: Konverterleistung / PV-Fläche pro Konverter

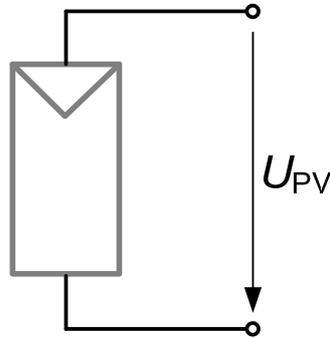
- Große Einheiten sind anfällig gegenüber Fehlanpassungen (s.u.)
  - Nicht gleichzeitig alle Zellen im Punkt maximaler Leistung (MPP)
  - Auswirkung in  $\eta_{\text{PVgen}}$



[Source: DPA]



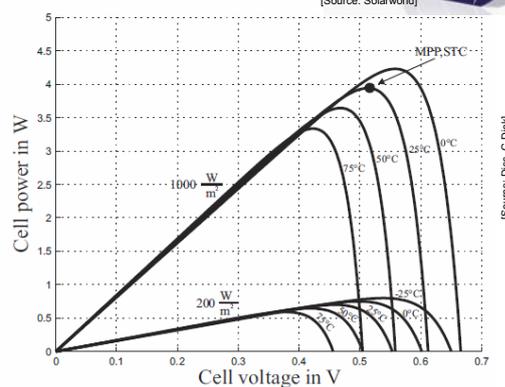
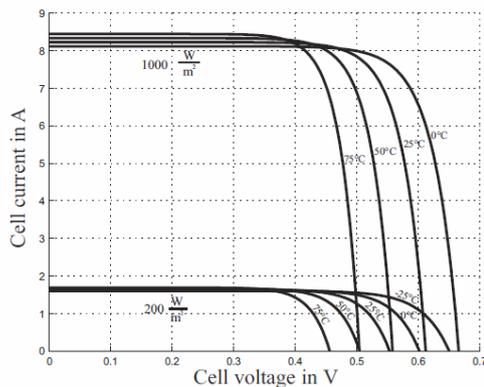
- Eingang des PV-Wechselrichters: Der PV-Generator



- Das Symbol steht sowohl für Zellen, Module, Strings von Modulen und Arrays von Modulen



- Charakteristik einer 6"-PV-Zelle:



- In Abhängig von Einstrahlung und Temperatur existiert ein Punkt maximaler Leistung (Maximum Power Point, MPP)



## Einführung: PV-Wechselrichter

### ➤ Charakteristik eines PV-Moduls:

- Serienverschaltung von vielen Zellen inkl. Bypass-Dioden
- Die grundsätzliche  $U-I$  Charakteristik skaliert mit der Spannung
- In Abhängig von Einstrahlung und Temperatur existiert ein Punkt maximaler Leistung Maximum Power Point, MPP)

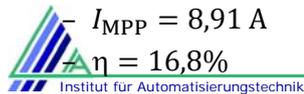


### ➤ Beispiel Yingli Solar Modul:

Panda 60Cell Serie, 275 W

Bei Standard Test Bedingungen ( $1000 \frac{W}{m^2}$ ,  $25^\circ C$ ):

- $U_{MPP} = 30,9 V$        $U_{oc} = 38,8 V$
- $I_{MPP} = 8,91 A$        $I_{sc} = 9,47 A$



$\eta = 16,8\%$

Institut für Automatisierungstechnik

Prof. Dr.-Ing. Chr. Dick, 19.09.2014/7

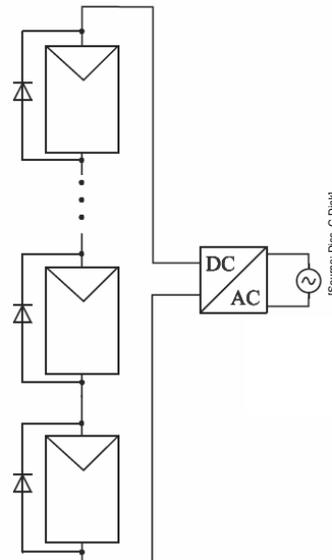
## Einführung: PV-Wechselrichter

### ➤ Charakteristik eines PV-Strings:

- Serienverschaltung von Modulen (typische kleine Hausdachanlage)
- Beispiel: 14 der o.g. Module bei Standard Test Bedingungen ( $1000 \frac{W}{m^2}$ ,  $25^\circ C$ ):

- $U_{MPP} = 432,6 V$        $U_{oc} = 543,2 V$
- $I_{MPP} = 8,91 A$        $I_{sc} = 9,47 A$
- $P_{MPP} = 3,85 kW$

- In Abhängig von Einstrahlung und Temperatur existiert ein Punkt maximaler Leistung Maximum Power Point, MPP)



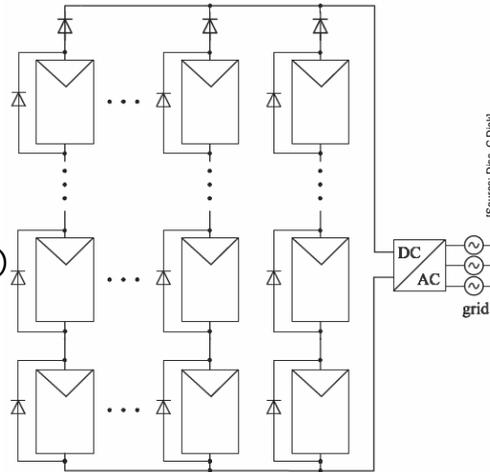
## Einführung: PV-Wechselrichter

### ➤ Solarfelder:

- Mehrere Strings werden parallel geschaltet
- In Abhängig von Einstrahlung und Temperatur existiert ein Punkt maximaler Leistung Maximum Power Point, MPP)



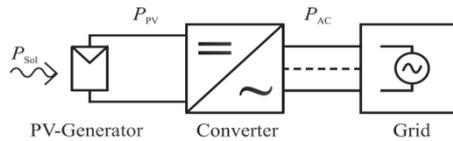
[Source: <http://nature2000.tripod.com>]



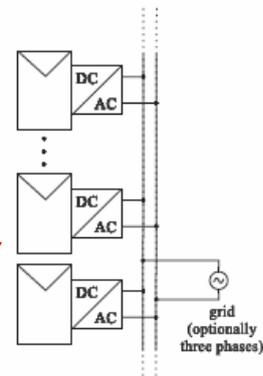
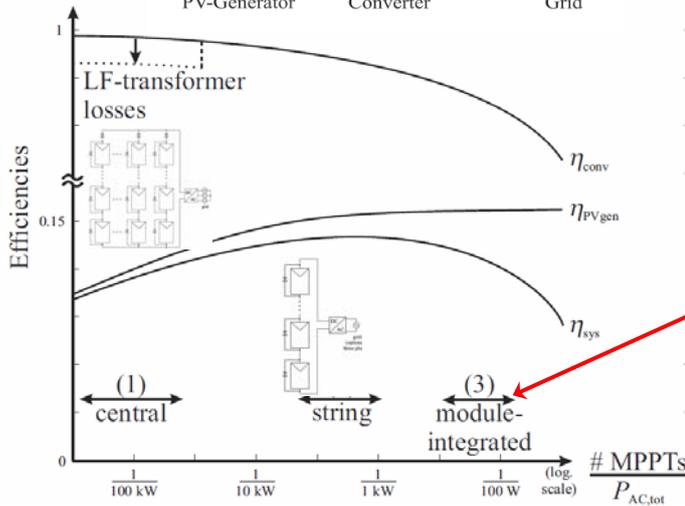
[Source: Diss. C. Dick]

Prof. Dr.-Ing. Chr. Dick, 19.09.2014/9

## Einführung: PV-Wechselrichter



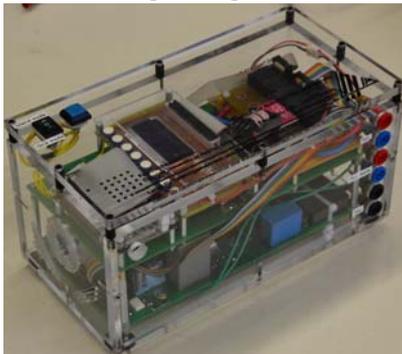
$$\eta_{\text{sys}} = \eta_{\text{PVgen}} \cdot \eta_{\text{conv}}$$



[Source: Diss. C. Dick]

Prof. Dr.-Ing. Chr. Dick, 19.09.2014/10

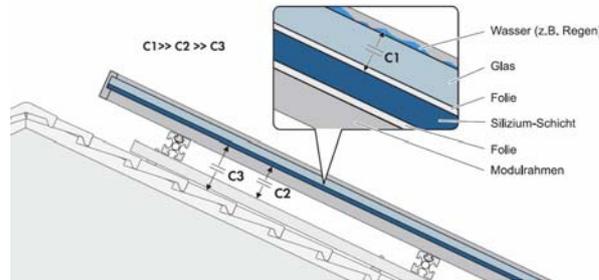
- Wird verstärkt in den USA nachgefragt
- An der FH wurde im Rahmen eines Studierenden Wettbewerbs ein zweistufiger 500W Wechselrichter aufgebaut
  - Galvanisch trennender Resonanzwandler
  - Netzwechselrichter mit neuer Modulationsstrategie
  - Regelung mittels FPGA



- Eingangsspannungsbereich PV-WR:
  - $U_{oc,0^{\circ}C} \approx 2 \cdot U_{MPP,100^{\circ}C}$
  - Für einen PV-Generator variiert  $U_{PV}$  im Bereich 1:2
  - Gewöhnliche Wechselrichter bedienen unterschiedliche PV-Generatorvariationen
    - In Datenblättern wird bei String Geräten oft eine Variation von  $U_{PV}$  von 1:5 gefunden
- Ein Frequenzumrichter für elektrische Antriebe bedient i.d.R. **einen** angepassten Maschinentyp

## Einführung: PV-Wechselrichter

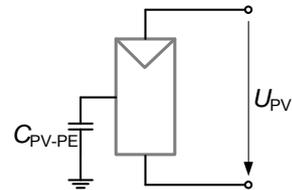
- Ein PV-Generator weist eine elektrische Kapazität gegen PE auf



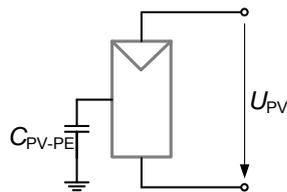
[ Sources: Upper Figure and Data: [1] ]

- $C_{PV-PE} = C_1 + C_2 + C_3$

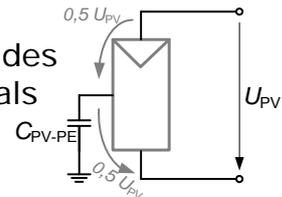
- Pro kW installierter DC-Leistung gilt
  - Für gängige kristalline Si-Module  
 $C_{PV-PE} = 60 \dots 110 \text{ nF}$
  - Für ein Dünnschicht Modul (Bsp. CdTe)  
 $C_{PV-PE} = 100 \dots 160 \text{ nF}$



## Einführung: PV-Wechselrichter



Freie  
Festlegung des  
DC-Potenzials



- Im Vergleich zu Frequenzumrichtern für Antriebe liegen extreme parasitäre Kapazitäten vor
  - Bei Antrieben analoger Effekt:  
Alterungserscheinungen durch Lagerströme, s.u.
- Im Gegensatz zu Frequenzumrichtern werden topologische Maßnahmen notwendig

## Ausgang des PV-Wechselrichters: Das Nieder-/ Mittelspannungsnetz

- Eine Vielzahl von Netzanschlussnormen / Anwenderegeln sind zu beachten, (u.a. DIN VDE 0126-1-1, Eigenerzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz)
  - Maximale Total Harmonic Distortion
  - Einhaltung von EMV-Normen ab 150kHz
  - Maximale Ableitströme (RCD/FI Schutzschalter)
  - Ggf. fernsteuerbare Blindleistungseinstellung
  - Leistungsabregelung bei erhöhter Netzfrequenz
  - Ggf. Low Voltage Ride-Through Capability



## Im Gegensatz zu Frequenzumrichtern bei industriellen Antriebsanwendungen haben PV Wechselrichter

- Erhöhte Anforderungen an ein Gehäuse (IP Schutzklassen)
- Erweitere Spannungsbereiche zu bedienen
- Hohe PV-Generatorkapazitäten im System
- Erhöhte Anforderungen an Spannungs- und Stromformen auf der AC-Seite
  - Filter
  - Regelungstechnik
  - Steuerung, auch aus der Ferne



## Agenda

### PV-WR als Technologietreiber in der LE

- Einführung PV-Wechselrichter
- Besondere Anforderungen an PV-Wechselrichter mit Lösungen
  - Ableitströme
- Halbleiterbauelemente
  - Si vs. SiC

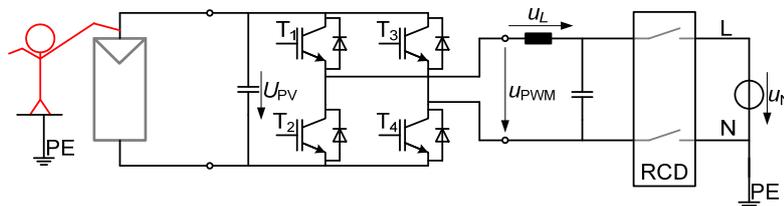
*Idee:* Ich möchte aufzeigen, welche technologischen Schwerpunkte in den letzten Jahren durch und mit der Photovoltaik vorangetrieben wurden.

Konsequenzen für andere Applikationen werden aufgezeigt.



## Besondere Anforderungen: Ableitströme

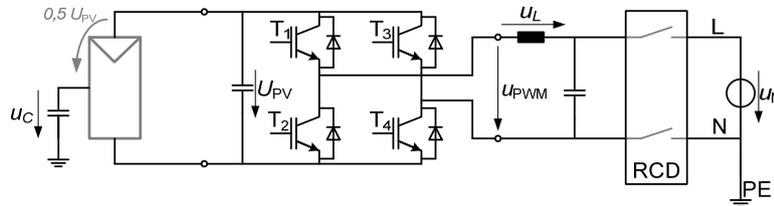
- Einphasiger einfacher netzgekoppelter Konverter mit H-Bücke



- RCD (Residual Current Device / allstromsensitiver FI-Schutz)
  - Schutz gegen **Fehlerströme**
  - Ab 30mA sind Körperströme lebensbedrohlich
  - Der RCD trennt die Anlage dann vom Netz



- Einphasiger einfacher netzgekoppelter Konverter mit H-Brücke

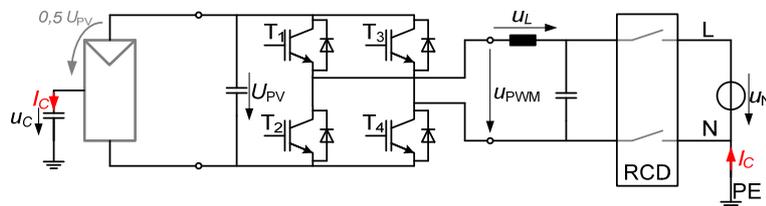


- Im Normalbetrieb ohne Fehlerstrom:

- Modulation mit Schaltfrequenz
- $u_C$  variiert mit Schaltfrequenz

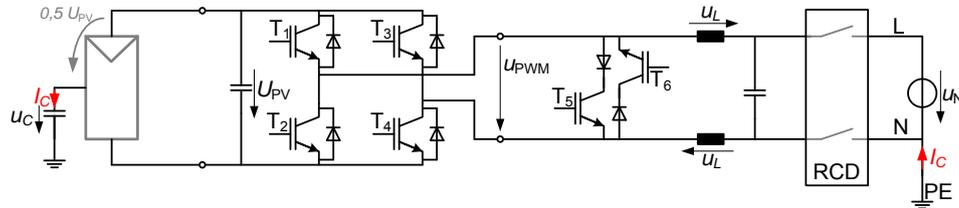
Aktive Schalter	$U_{PWM}$	$u_L$	$u_C$
T1 & T4	$U_{PV}$	$U_{PV} - u_N$	$0,5 U_{PV}$
T2 & T3	$-U_{PV}$	$-U_{PV} - u_N$	$-0,5 U_{PV}$
T1 & T3	0 V	$-u_N$	$-0,5 U_{PV}$
T2 & T4	0 V	$-u_N$	$0,5 U_{PV}$

- DC-Anteil auf  $u_C$  macht kein Problem
- HF-AC Anteil: Fourieranalyse bei Schaltfrequenz  $f_s$ 
  - $f_s I_C = 2\pi f_s \cdot C_{PV-PE} \cdot f_s U_C$
  - Enormer Anteil bei hohen Frequenzen, z.B.  $f_s = 16 \text{ kHz}$
  - Ein Ableitstrom  $I_C$  ist die Folge



- **Problem:** RCD kann nicht zwischen Ableitstrom und Fehlerstrom unterscheiden

➤ Heric-Topologie (Erfinden im Fraunhofer ISE)



Aktive Schalter	$U_{PWM}$	$u_L$	$u_C$
T1 & T4	$U_{PV}$	$0,5(U_{PV} - u_N)$	$0,5 u_N$
T2 & T3	$-U_{PV}$	$-0,5(U_{PV} + u_N)$	$0,5 u_N$
T5 oder T6	$0 V$	$-0,5 u_N$	$0,5 u_N$

Im Freilauf teilt sich  $U_{PV}$  hälftig auf T1/T2 bzw. T3/T4 auf



➤ Heric-Topologie (Erfinden im Fraunhofer ISE)

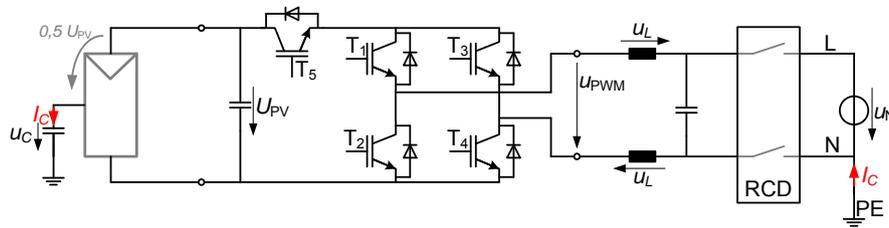
- $I_C = 2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot C_{PV-PE} \cdot \frac{1}{2} U_N$
- Tolerierbare Ableitströme



[ Source: Presseinformation 17/11 vom 26. Mai 2011 Fraunhofer ISE ]



➤ H5-Topologie (SMA Solar Technology AG)



Aktive Schalter	$U_{PWM}$	$u_L$	$u_C$
T1 & T4 & T5	$U_{PV}$	$0,5(U_{PV} - u_N)$	$0,5 u_N$
T2 & T3 & T5	$-U_{PV}$	$-0,5(U_{PV} + u_N)$	$0,5 u_N$
T1 & T3	0 V	$-0,5 u_N$	$0,5 u_N$

Freilauf nur hier;  
 $U_{PV}$  teilt sich hälftig  
auf T5/T2 bzw.  
T5/T4 auf



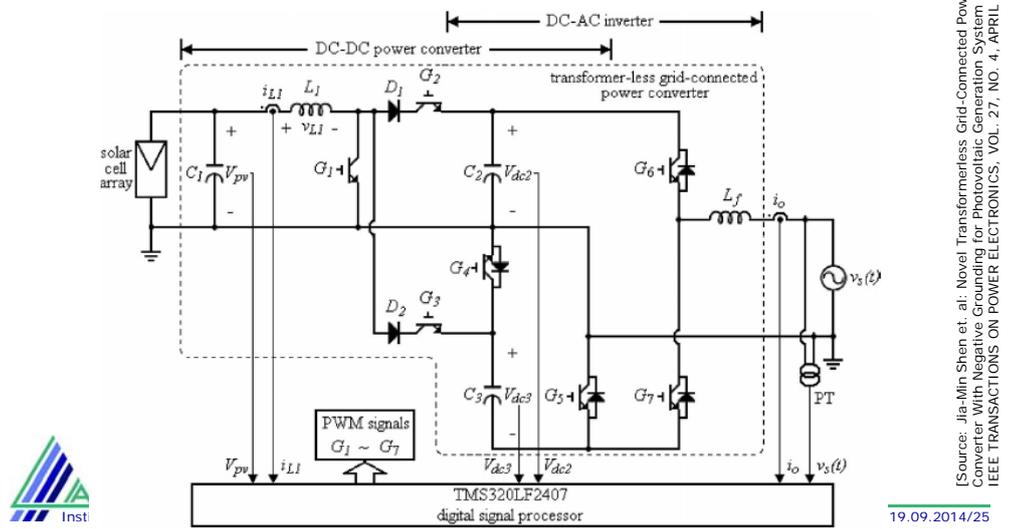
➤ H5-Topologie (SMA Solar Technology AG)

- $I_C = 2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot C_{PV-PE} \cdot \frac{1}{2} U_N$
- Tolerierbare Ableitströme



## Ableitströme: Topologische Maßnahmen zur Gewährleistung von Sicherheit

- Immer neue topologische Ansätze, hier aus 2012 für Dünnschicht-PV:



## Ableitströme: Filterung

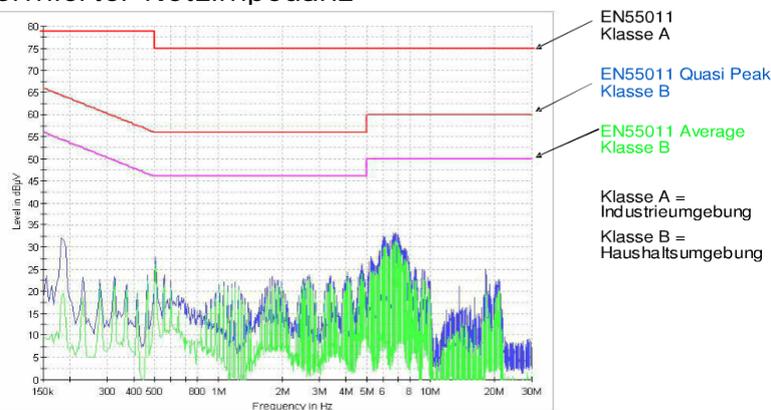
- Weitere Ableitströme treten nach wie vor auf, sowohl in PV als auch Frequenzumrichtern, ...
- Insbesondere an der Netzschnittstelle sind EMV-Normen einzuhalten, Bsp:
  - EN 61000-6-3: Störaussendung für Wohnbereich, Geschäfts- und Gewerbebereiche sowie Kleinbetriebe (Fachgrundnorm)
  - EN 61000-6-4: Störaussendung für Industriebereiche (Fachgrundnorm)
  - EN50160 (bis 2kHz)
  - EN55011-22 (150kHz bis 30MHz)



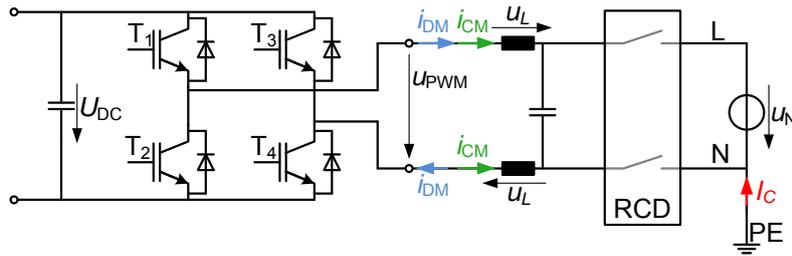
- Im Wesentlichen werden zwei Frequenzbereiche unterschieden
  - 0...2 kHz
    - In diesem Frequenzbereich können Wechselrichter i.d.R. mit Ihrer Möglichkeit im Rahmen der Regelung die Oberschwingungen beeinflussen
  - 150 kHz...30 MHz
    - Rein passive Filterung, Regelbandbreiten > 150 kHz existieren bislang nicht
- Dazwischen existieren –heute- keine Normen, Schaltfrequenzen der Umrichter werden i.d.R. hierhin gelegt
  - Im Kontext von Smart Grids und Power Line Communication (PLC) könnte dies kritisch werden



- Das Störaussendungsspektrum von Konvertern weist auch oberhalb der Schaltfrequenz deutlichen Spektralanteil auf
  - Frequenzabhängiger maximaler Spannungsabfall an normierter Netzimpedanz



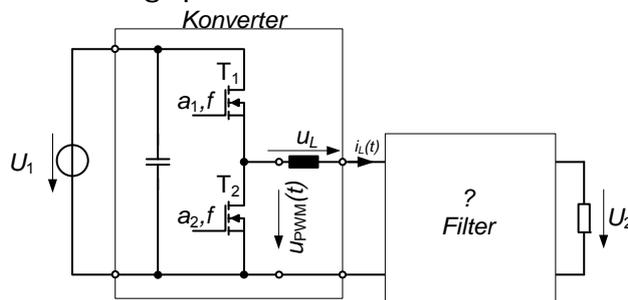
- Es wird unterschieden zwischen
  - Differential Mode ( $I_C = 0A$ )
  - Common Mode ( $I_C > 0A$ ), Strom fließt gleichsinnig durch die netzseitigen Induktivitäten, stellt einen Ableitstrom dar



– Beide Anteile müssen entsprechende Normen erfüllen



- Diese Grundspektren werden schwieriger zu dämpfen bei immer größeren  $\frac{d u_{PWM}}{dt}$ , verursacht durch Einsatz von Wide-Bandgap Devices

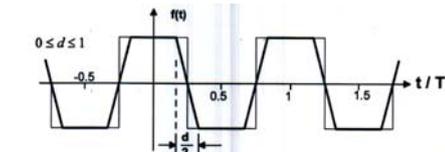
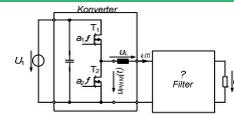


- Folgebild: Spektrum von  $u_{PWM}$  für Tastgrad  $a=0,5$



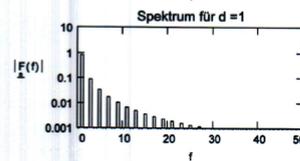
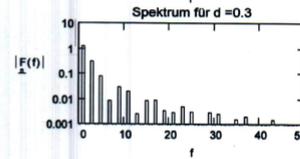
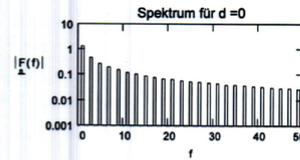
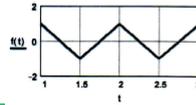
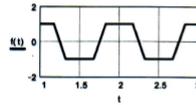
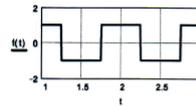
## Ableitströme: CM-Filterung – am Beispiel einer Halbbrücke

➤ Spektrum von  $u_{\text{PWM}}$  für Tastgrad  $a=0,5$



$$\hat{F}_n = (1 - (-1)^n) \cdot \text{si}\left(\frac{\pi}{2} \cdot n\right) \cdot \text{si}\left(\frac{\pi}{2} \cdot n \cdot d\right) \quad n = 1, 2, 3, 4, 5, \dots$$

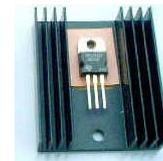
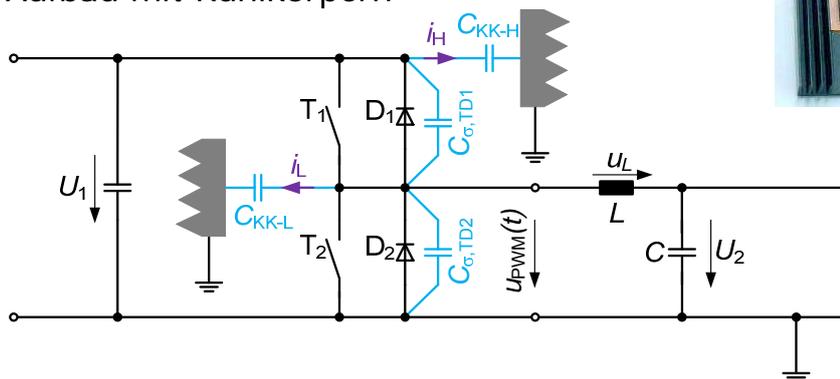
$$\text{si}(x) = \frac{\sin(x)}{x}$$



[Source: Unterlagen zur Vorlesung Prof. H.vdBroeck]  
Institut für Automatisierungstechnik

## Ableitströme: CM-Filterung – am Beispiel einer Halbbrücke

➤ Aufbau mit Kühlkörpern



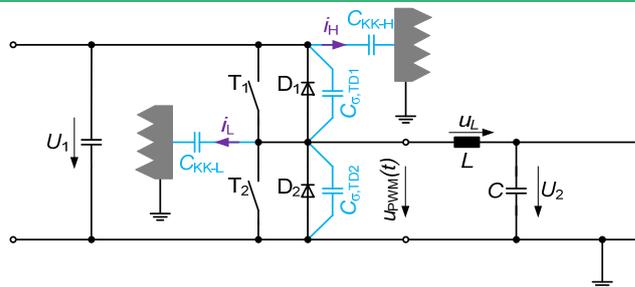
- $i_L$  hat einen ausgeprägten Common-Mode Anteil zur Folge, fließt als HF-Strom über PE zurück in die Schaltung
- Bei ruhigem Potenzial des Zwischenkreises gilt  $i_H = 0A$



Institut für Automatisierungstechnik

Prof. Dr.-Ing. Chr. Dick, 19.09.2014/32

## Ableitströme: CM-Filterung – am Beispiel einer Halbbrücke

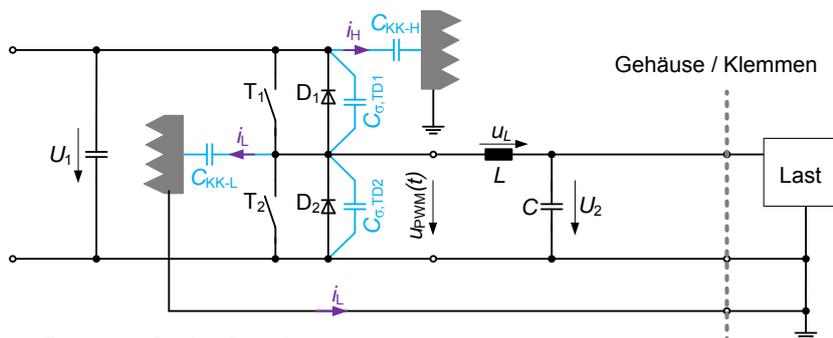


- Bei idealem Wandler dieser Art werden Frequenzen  $> 150\text{kHz}$  durch das  $LC$ -Filter gedämpft sein, ABER:
    - Bei hohen Frequenzen gibt es kapazitives Übersprechen über die Windungskapazitäten der Induktivität
    - Bei Hohen Frequenzen wirken Zuleitungen zur Kapazität induktiv
- ⇒ Der Filtereffekt ist eingeschränkt / geht verloren



## Ableitströme: CM-Filterung – am Beispiel einer Halbbrücke

- Common Mode Filter

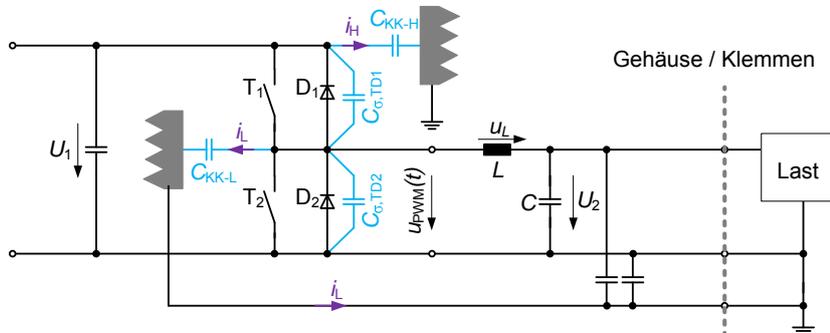


- Strompfade für  $i_L$ 
  - Geräteextern - kritisch
- Ansatz: Strom nicht über die Last und PE fließen lassen, sondern diese HF-Störung Geräteintern mit Y-Kondensatoren kurzschließen



## Ableitströme: CM-Filterung – am Beispiel einer Halbbrücke

### Common Mode Filter



- Auch die Last (Beispiel netzgekoppelter WR) speist Ströme in den CM-Kondensator
  - Maximalwerte für den CM – Kondensator !

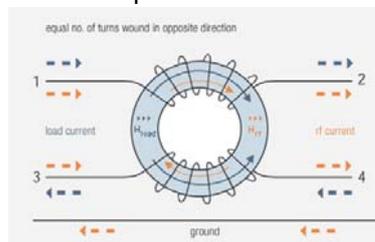


- 2. Ansatz: Setze dem HF-CM Strom eine Induktivität in Serie

## Ableitströme: CM-Filterung – am Beispiel einer Halbbrücke

### Common-Mode Drossel

- Differential Mode Ströme kompensieren sich
  - Kein DM-Feldaufbau, keine Induktivität für DM
  - „Stromkompensierte Drossel“



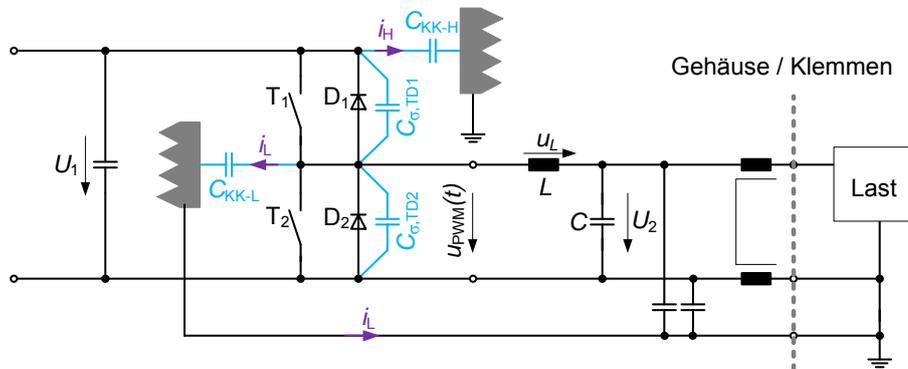
### CM Spannungen sehen eine Induktivität, die den CM-Strom hemmt

- CM-Ströme klein, quasi keine Sättigungsprobleme
- Materialien mit maximalen  $\mu$  können verbaut werden



## Ableitströme: CM-Filterung – am Beispiel einer Halbbrücke

- Aufbau mit CM-Drossel, funktioniert auch dreiphasig



## Ableitströme: Filterung

- Die klassische Filterung
  - Hat Anwendung z.B: bei Frequenzumrichtern
  - Hat Anwendung in der PV
  - Wäre sehr groß und teuer, würden die großen Anteile an Ableitströmen nicht durch topologische Maßnahmen abgestellt werden
- Zwei neue innovative Topologien wurden vorgestellt, Alternativen:
  - Varianten mit galvanischer Trennung (LF- oder HF-Trafo)
  - Varianten, bei denen N bis an den PV-Generator geführt wird, also  $U_C = \text{const}$  ;  $I_C = 0 \text{ A}$

## Agenda

### PV-WR als Technologietreiber in der LE

- Einführung PV-Wechselrichter
- Besondere Anforderungen an PV-Wechselrichter mit Lösungen
  - Ableitströme
- Halbleiterbauelemente
  - Si vs. SiC

*Idee:* Ich möchte aufzeigen, welche technologischen Schwerpunkte in den letzten Jahren durch und mit der Photovoltaik vorangetrieben wurden.

Konsequenzen für andere Applikationen werden aufgezeigt.

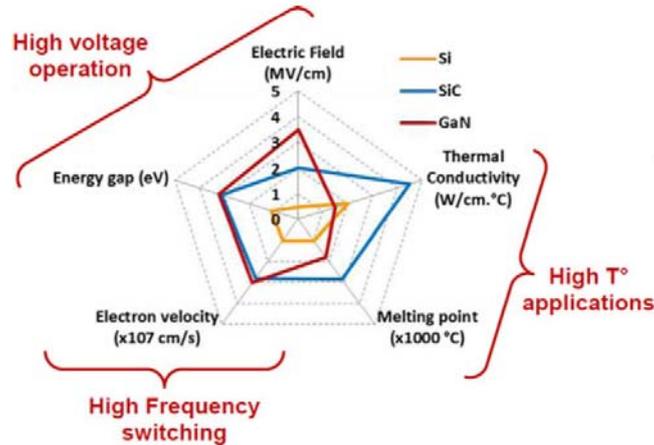


## Halbleiterbauelemente Si vs. SiC

- Die klassisch eingesetzten Leistungshalbleiter nutzen Silizium als Basismaterial
- Durch hohes Interesse seitens der PV-Industrie forschen Halbleiterhersteller an Siliziumcarbid als Basismaterial, welches grundsätzlich kostenintensiver ist
  - Die Motivation dazu ist nicht die reine Wirkungsgradsteigerung
  - sondern vordergründig die Systemkostensenkung (s.u.)



➤ Materialeigenschaften



[Source: P.Roussel, „SiC Market and industry update“, presented at Int. SiC Power Electron. App. Workshop, Krista, Sweden, 2011]

Spezifischer Widerstand als Figure of Merit

$$R_{on,sp} = \frac{4V_B^2}{\epsilon\mu_n E_c^3} \quad \text{in} \quad m\Omega cm^2$$

- In der Applikation sind die Ströme vorgegeben
- Eine Reduktion des Widerstandes
  - Steigert die Effizienz
  - Reduziert die abzuführende Wärme
- $E_{c,SiC} \approx (8 - 9) E_{c,Si}$  zeigt des signifikanten Vorteil von SiC Bauelementen (Heute 4H-SiC, hexagonale Kristallstruktur)
  - In Bezug auf die Leitfähigkeit und die Durchbruchfeldstärke können unipolare SiC MOSFETs bipolare IGBTs ersetzen



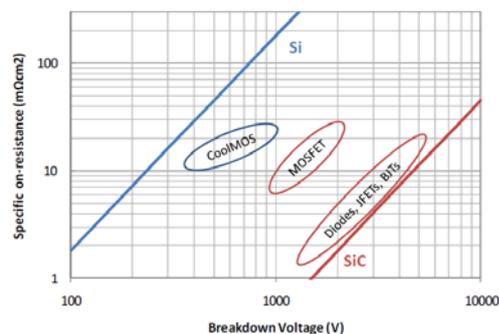
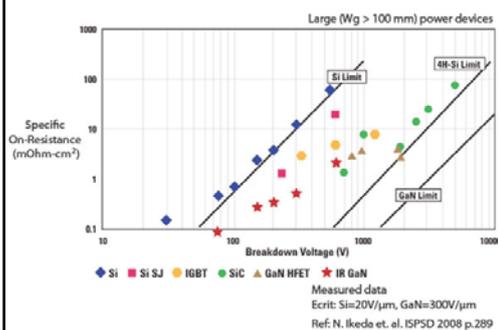
## Spezifischer Widerstand als Figure of Merit

$$R_{\text{on,sp}} = \frac{4V_B^2}{\epsilon\mu_n E_c^3} \quad \text{in} \quad \text{m}\Omega\text{cm}^2$$

- Elektronenbeweglichkeit
    - Switching performance von SiC ist besser, insbesondere von unipolaren MOSFETs
    - Erlaubt höhere Schaltfrequenzen
    - Reduziert die Größe von kostenintensiven Magnetischen Komponenten
  
  - Thermische Leitfähigkeit
    - SiC ermöglicht höhere Temperaturen und höhere Leistungsdichten
- Einfachere Thermische Pfade gegen die Umgebung



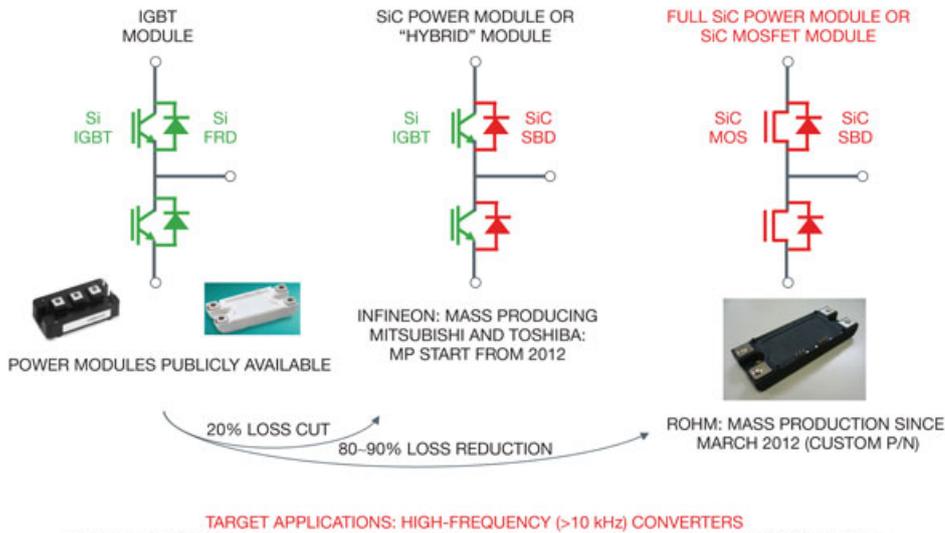
## Demonstration von Leistungshalbleitern



[Source: Östling et.al: SiC power devices – present status, applications and future perspective; 23 Intl. Symp. On Power Sem. Dev. & IC's, San Diego, CA]



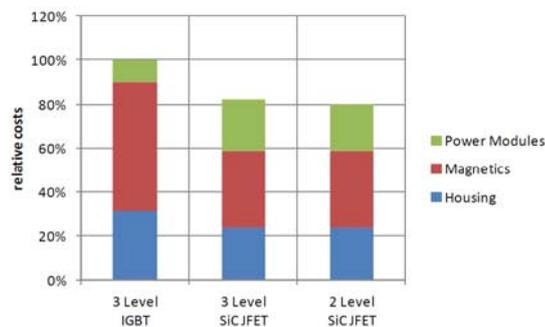
## Kombinierte Nutzung unterschiedlicher Bauteilkombinationen



Source: <http://www.edn.com/design/power-management/4409627/3/Si-vs-GaN-vs-SiC-Which-process-and-supplier-are-best-for-my-power-design>

## Ableitströme: zusätzliche Filtermaßnahmen

### ➤ Studie von Infineon Technologies AG für PV-Konverter



[Source: Schwarzer et.al: System benefits for Solar inverters using SiC Semiconductor modules; PCIM Europe 2014, 22.05.2014, Nuremberg, Germany]

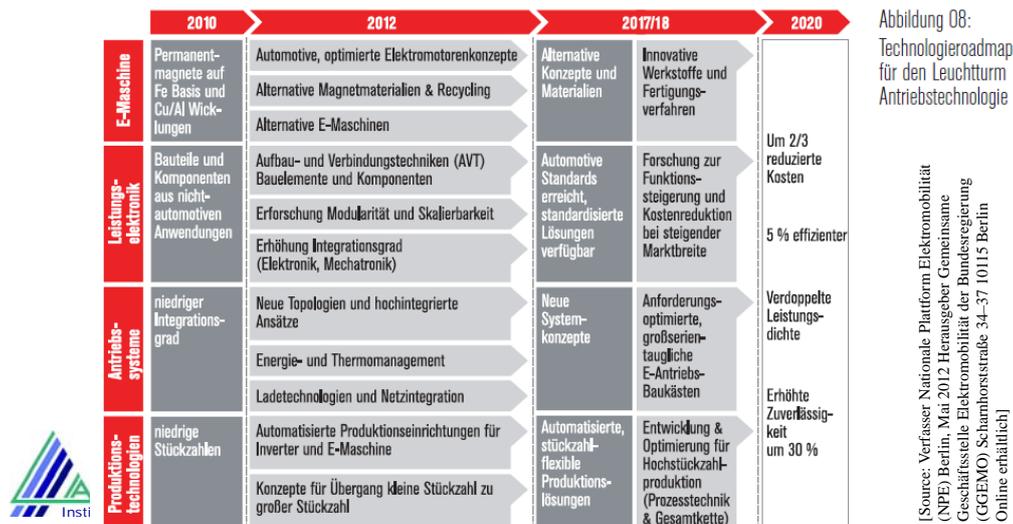
## Konsequenzen für z.B. die Elektromobilität

- Durch den Einsatz von SiC lässt sich die Leistungsdichte erhöhen!
  - Bauraum ist kritisch
- Intelligente topologische Behandlung/Vermeidung von Common Mode Strömen
  - Hohe Anforderungen bei KFZ-Elektronik bzgl. Störaussendungen
  - Vermeidung transient springenden Spannungen zwischen Batteriepack und Karosserie, insbesondere beim Laden.



## Konsequenzen für z.B. die Elektromobilität

- Aus dem dritten Fortschrittsbericht der Nationalen Plattform Elektromobilität



## Agenda

### PV-WR als Technologietreiber in der LE

- Einführung PV-Wechselrichter
- Besondere Anforderungen an PV-Wechselrichter mit Lösungen
  - Ableitströme
- Halbleiterbauelemente
  - Si vs. SiC

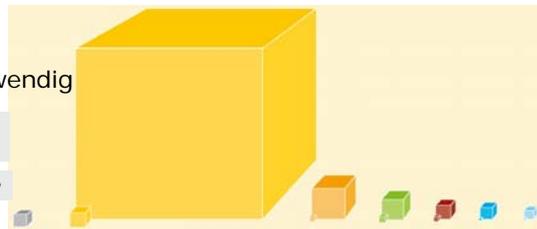
*Idee:* Ich möchte aufzeigen, welche technologischen Schwerpunkte in den letzten Jahren durch und mit der Photovoltaik vorangetrieben wurden.

Konsequenzen für andere Applikationen werden aufgezeigt.



## Zum Schluss zur Erinnerung:

- 2 Möglichkeiten der langfristigen Energieversorgung
  - Fossil, (Nuklear)
    - Für einige 100 Jahre, letztendlich begrenzt, Rohstoffkosten ↑ [BGR]
  - Erneuerbare
    - im Wesentlichen Solar
    - Speichertechnologie und
    - Netzautomatisierung notwendig



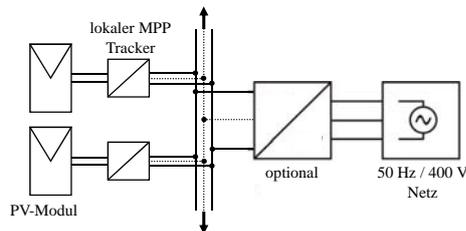
- Weltweiter Verbrauch wird signifikant steigen [IEA]
- [IPCC]: "There is very high confidence that the net effect of human activities since 1750 has been one of warming"



⇒ Die Energiewende (Fossil → Erneuerbar) ist *notwendig* !

## Zum Schluss zur Erinnerung:

- Situation in Deutschland – Photovoltaik:
  - 2% Fläche der BRD für Stromerzeugung notwendig
  - 38% der Stromerzeugung kann mit PV gedeckt werden [Enquete Kommission]
    - Berücksichtigung nur von geeigneten Dach- und Fassadenflächen
    - Flächenpotenzial signifikant durch andere versiegelte und nicht versiegelte Flächen steigerbar
- Thema: *PV-Systeme mit lokalen MPP Trackern*
  - Schattentolerante Systeme: Vervielfachung des Flächenpotenzials, insbesondere an Fassaden



Vielen Dank für die Aufmerksamkeit



Ich stehe auch gerne nach der Veranstaltung für Fragen zur Verfügung :  
0221 8275-2262  
christian.dick@fh-koeln.de  
<http://www.f07.fh-koeln.de/einrichtungen/automatisierungstechnik/labore/lea/>

## Weitere Quellen

- [1] SMA Solar Technology AG: Technische Information „Kapazitive Ableitströme“ Hinweise zur Auslegung von transformatorlosen Wechselrichtern Sunny Boy, Sunny Mini Central, Sunny Tripower, *files.sma.de/dl/7418/Ableitstrom-T1-de-25.pdf* Download 16.09.2014
- [2] SMA Solar Technology AG, *files.sma.de/dl/3491/TECHH5-11\_AD4106.pdf*, Download 17.09.2014

