

**Flexible Eingangsbereiche über AC (230 V) oder DC (28 V)  
auf Hochspannung transformiert überträgt 3,3 KW über 3,3  
km mit Wandlung am Ziel auf AC (230 V) oder DC (28 V)**

*Zu Land,*



*Zu Wasser,*



*In der Luft*



Ein Vortrag von Ralph Klein, Leitung FuE

## Themen-Übersicht

### Schaltnetzteile Tag Würzburg 18.10.2023

- Vorstellung der Firma SYKO
- Wofür kann man ein System (Master-Supply-Unit und Remote-Supply-Unit) zur Energieübertragung über weite Strecken einsetzen?
- Welches sind die Schlüsselemente eines solchen Systems?
- Was sind Hybrid-Kabel und wie leistungsfähig sind sie?
- Welche Anforderungen gibt es hinsichtlich der Benutzersicherheit?
- Hohe Anforderungen an die Systeme (rugged design): Harsche Umweltbedingungen wie hohe und niedrige Temperaturen, Nässe, Schock und Vibrationen, extreme Anforderungen an die EMV

SYKO entwickelt, modifiziert und produziert Leistungselektronik seit seiner Gründung durch Dipl. Ing. Reinhard Kalfhaus im Jahre 1973.

Ausgangsleistung späte 70er und frühe 80er Jahre:

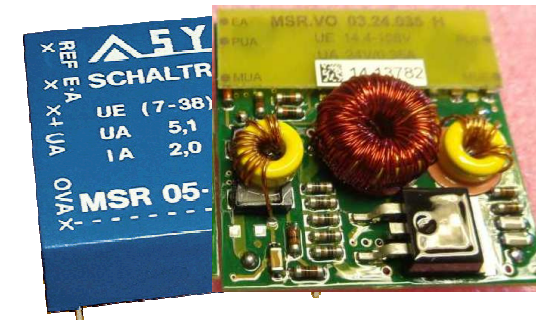
Wenige Watt bis zu **100 Watt** (Komponentengeschäft)

90er bis 2000er Jahre: bis zu **1 kW**

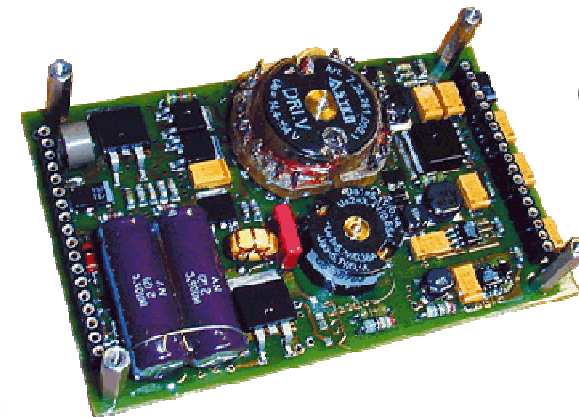
Ausgangsleistung Heute:

Bis zu **20 kW** und umfasst alle Arten von DC-DC, AC-DC, AC-AC und DC-AC-Wandlern.

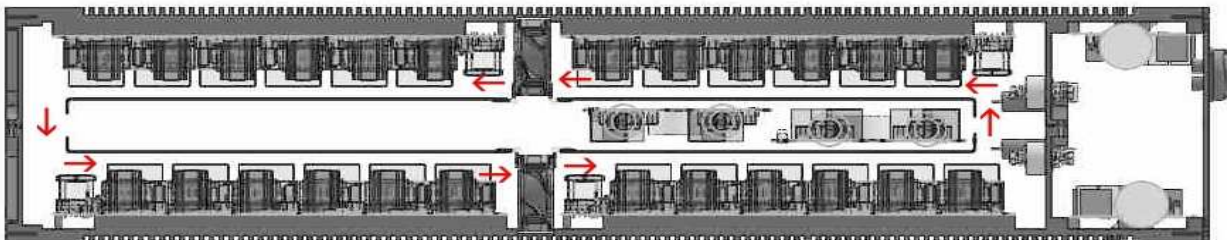
(Systemkomponenten mit hoher Funktionalität)



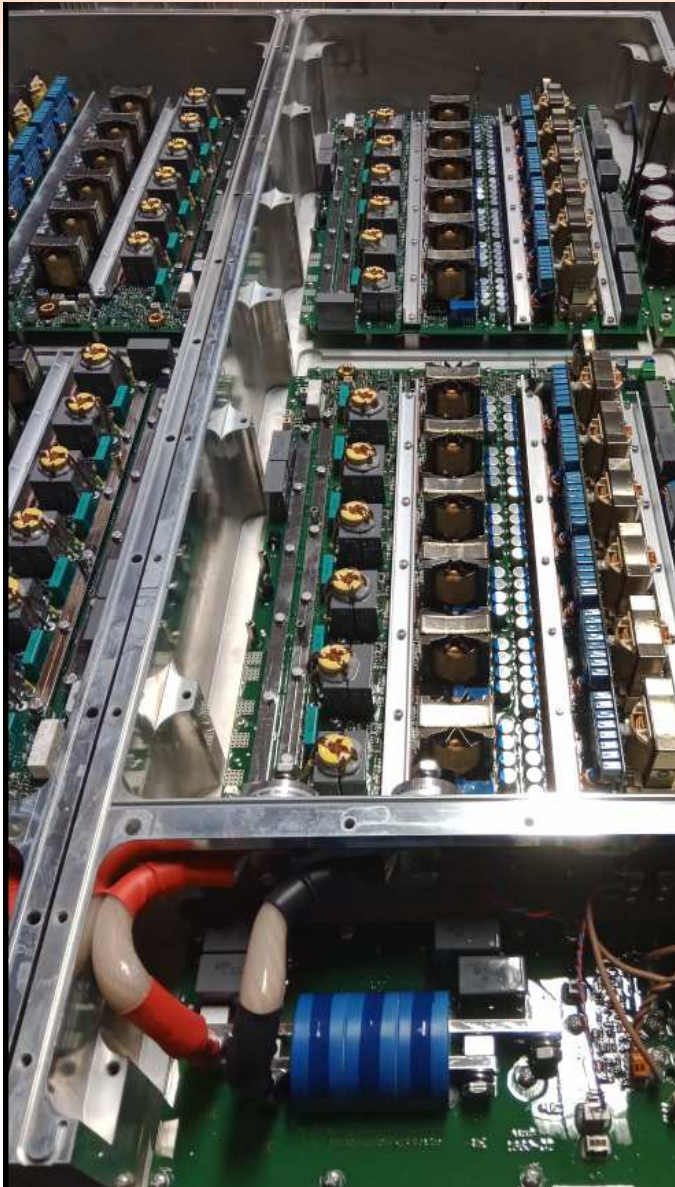
10 Watt



6 Watt



20 kW Multi-String-Topologie am  
28V Bordnetz



Beispiel 20kW Stringtopologie:

Innenleben Master und Remote-Stufe

Beide Hälften sind nebeneinanderliegend ausgeklappt

Man sieht die 4x6 Stufen-Kaskade zur Aufbereitung von 1000A Eingangstrom mit einer Peak-Leistung von 20kW

- SYKO ist heute in der Lage, Ein- und Ausgangsströme bis  $>1200\text{A}$  effizient und EMV-konform zu verarbeiten.
- SYKO baut potential-gebundene und -getrennte Leistungselektronik mit  $UE = 18\text{V}-36\text{V}$  (dynamisch ab  $10\text{V}$ ) oder  $400\text{V} - 1270\text{V}$  und bis  $2500\text{VAC}/5000\text{VDC}$  mit einer Ausgangsleistung von  $>20\text{ kW}$  (System-Komponenten) und  $>36\text{kW}$  (system-kaskadiert) und arbeitet an der UIC-Spannung  $1000\text{V}/16,67\text{Hz}$ ,  $1500\text{V}/50\text{Hz}$ ,  $1500\text{VDC}$  und  $3000\text{VDC}$ .
- SYKO baut Leistungselektronik mit Eingangsspannungen bis zu  $5200\text{V}$  im aktiven Zustand und  $14\text{kV}$  Transienten-Festigkeit (UIC-Markt)
- SYKO erreicht die  $20\text{ kW}$  ausschließlich mit SMD-Halbleitern
- Die Entwärmung der Halbleiter erfolgt über das Kupfer im PCB auf das Aluminium-Gehäuse
- SYKO hat das Topologie-Wissen um z.B. hohe Leistung über km-lange kabelgeführte Strecken zu transportieren.
- $(3.3\text{kW}/3.3\text{km}) P=10\text{kW}*\text{km}/\text{l}$  bei gegebenen Querschnitt
- Die SYKO Designs basieren ausschließlich auf Leiterplatten-Konstruktionen
- SYKO verpackt bis zu IP68-Gehäuse bzw. Container



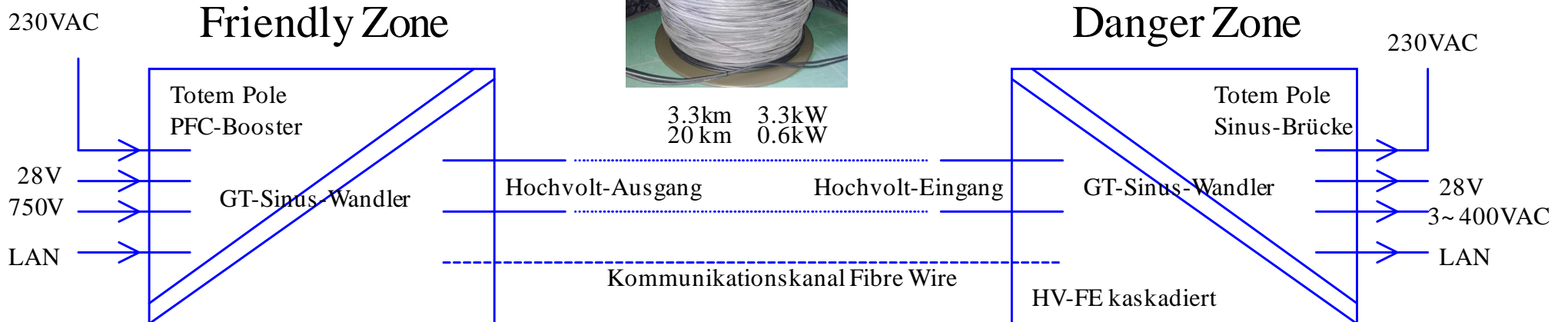
## **Wofür kann man ein System (Master-Supply-Unit und Remote-Supply-Unit) zur Energieübertragung über weite Strecken einsetzen?**

- Versorgung mobiler Aufklärungs- und Überwachungssysteme. Nach Einrichtung muss kein Personal mehr vor Ort sein.
- Schutz und Überwachung sensibler Objekte durch Fernaufklärung
- Vermeidung von typischen Signaturen (EMV, Geräuschemissionen) die eine Lokalisierung der Remote-Stelle erleichtern würden.
- Richtfunkstation (Für Steuerung und Überwachung kann das Personal in sicherem Abstand abseits der Richtfunkstation operieren).
- Versorgung von schwierig zugänglichen und entfernten Örtlichkeiten mit Energie, wie z.B. Höhlen, wo ein Generator nicht nutzbar ist (z.B. wegen Emissionen, Lärm und fehlender Treibstoffversorgung).
- Versorgung von Offshore-Anlagen mit Energie und Kommunikation (z.B. Gas-/Öl-Förderanlagen in der Tiefsee bis 4 km Tiefe und 40km Entfernung, vormals mit AC und heute mit DC).
- Vielfältige Einsatzmöglichkeiten auch im zivilen Katastrophenschutz
- Versorgung und Bedienung optischer Systeme und Roboter in nicht begehbaren Bereichen

Master-Einheit



Remote-Einheit



## Welches sind die Schlüsselemente eines solchen Systems?

### Die Master-Einheit....

- wird von einem vorhandenen Netz gespeist. Dies kann beispielsweise eine Batteriespannung 28V sein, 230VAC oder auch 750V-Fahrdrahtspannung.
- bekommt je nach Art der Versorgungsspannung eine passende Topologie zur Spannungsaufbereitung. Das sind z.B. PFC-Booster mit  $PF > 99\%$  (Totem Pole) oder eine Buck bzw. Boost-Stufe und letztendlich immer eine Übertrager-Stufe zur galvanischen sicheren Trennung von Hochvolt- und Niedervoltseite.
- muss eine Spannung über mehrere Kilometer übertragen. Dazu muss diese Spannung verlustarm transportiert werden. Dies ist nur über eine Transformierung auf eine Hochvoltspannung möglich.
- muss, um die Sicherheit des Bedienpersonals zu gewährleisten, stets eine Isolationsüberwachung durchführen und bei Verlust der Verbindung zu Remote-Einheit sofort die Hochvoltspannung abschalten und aktiv den Ausgang und das Kabel entladen.
- muss über ein spezielles Hand-Shake-Verfahren die Remote-Unit zuerst mit einer Niedervoltspannung versorgen, damit diese nach einem positiven Selbsttest die Hochvoltspannung anfordern kann. So wird vermieden, dass am nicht aufgesteckten Ende des Hybrid-Kabels eine HV-Spannung anliegen kann.



## Auf das Kabel kommt es an!

Das Kabel muss verschiedene Anforderungen erfüllen:

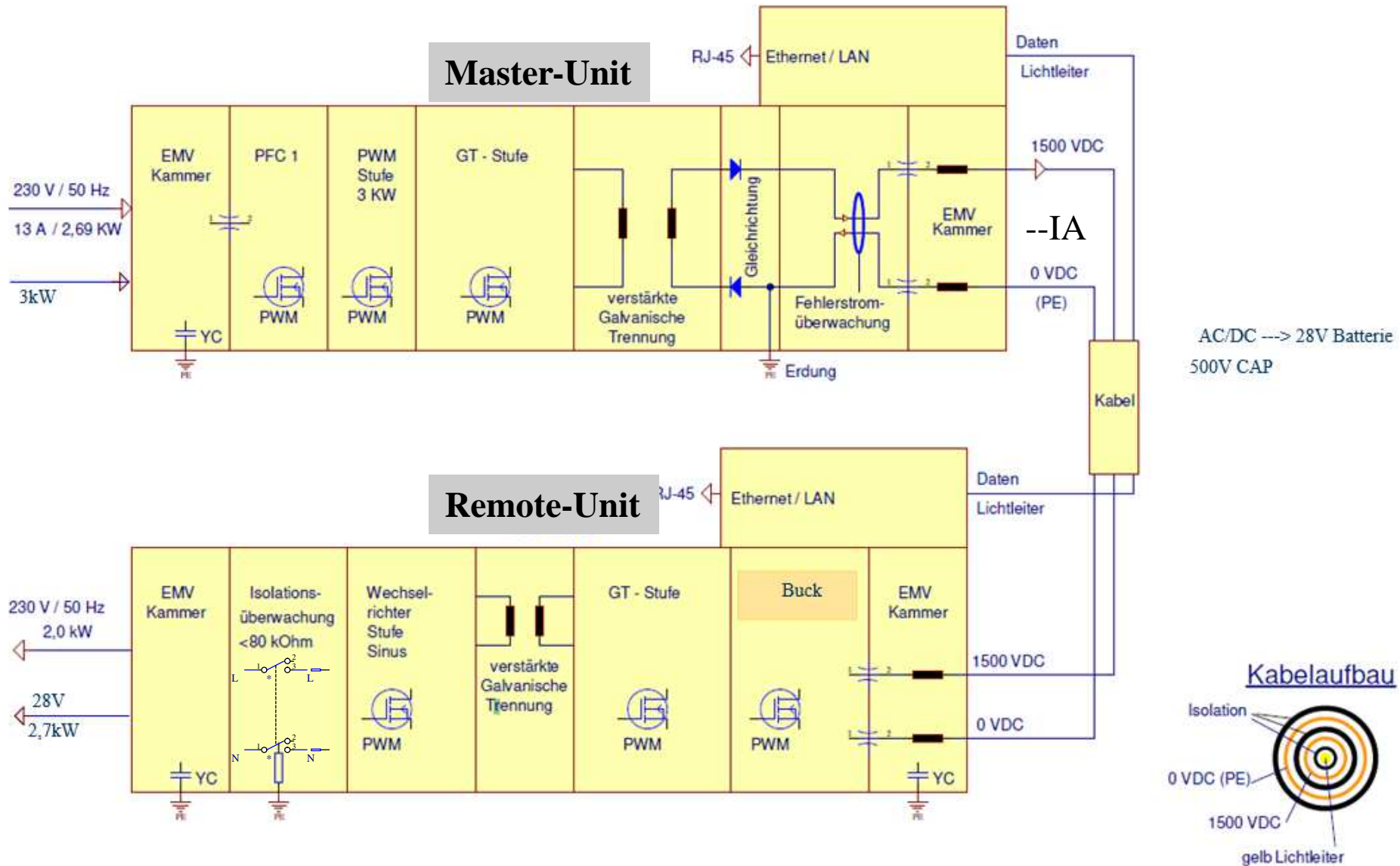
- Robustheit, es darf z.B. nicht durch ein darüber fahrendes Schwerlast-Fahrzeug zerstört werden.
- Es darf nicht durch ein Nagetier (auch wenn es sehr lange Zeit hat) zerstört werden.
- Es muss einen Masse-Schirm und eine hohe Isolationsfestigkeit zur innenliegenden Hochvoltleitung besitzen.
- Es muss zusätzlich eine Kommunikation zwischen Master- und Remote-Netzteil ermöglichen. Dies wird realisiert mit einem innenliegenden geschützten Glasfaserkabel.
- Es muss so leicht und dünn sein, dass auf eine tragbare Kabelrolle 1 Kilometer oder mehr Platz haben.



SYKO selbst ist **nicht** Hersteller oder Know-How-Träger von solchen Hybrid-Kabeln!  
Hersteller ist Fa. Solifos, Schweiz)

## Die Remote-Einheit...

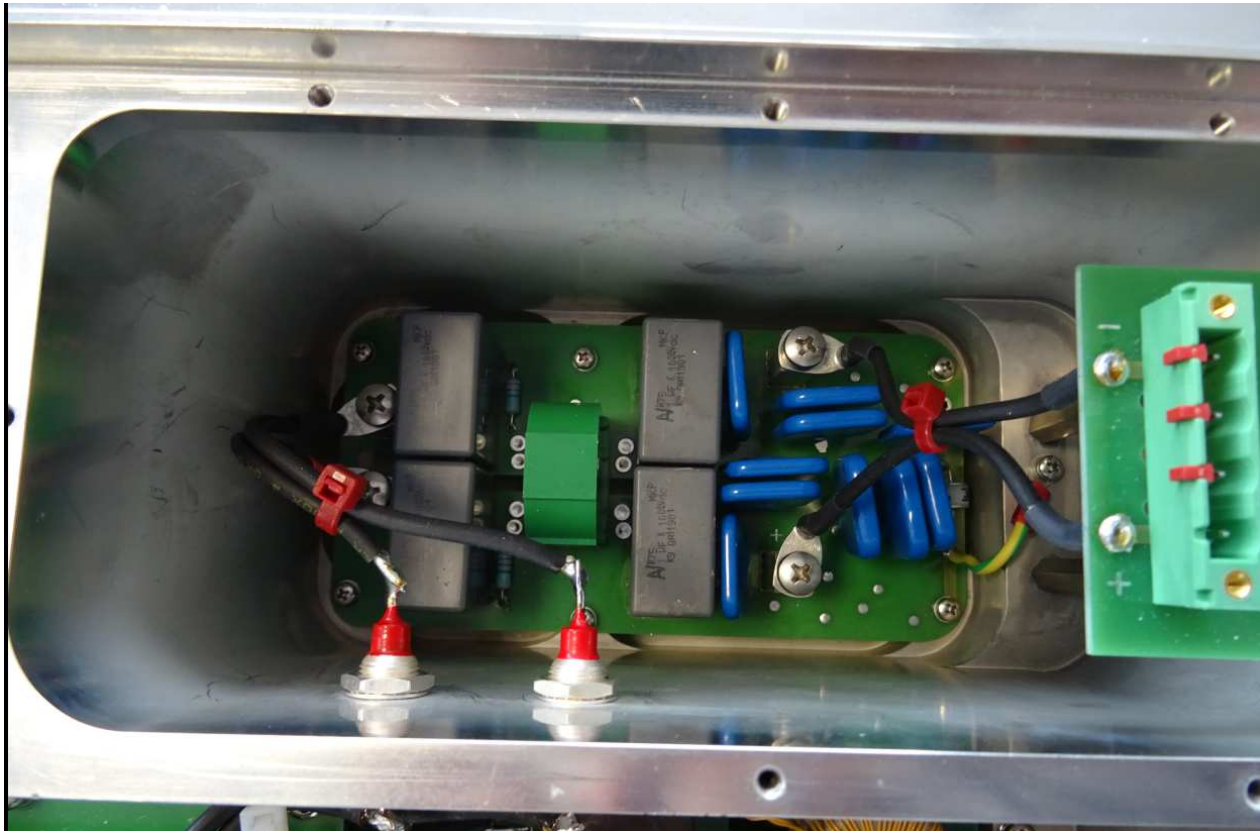
- wird gespeist von der zugeführten Hochvoltspannung
- muss auch mit einer Niedervoltspannung, die über die Hochvolt-Leitung kommt, seine Logik- und Kommunikationsstufen betreiben und nach einem erfolgreichen Selbsttest die Freigabe an die Master-Einheit zur Hochvolt-Transformation geben.
- wandelt die Hochvoltspannung in eine galvanisch sicher getrennte sekundäre Zwischenkreisspannung von 400V um. Dazu benutzt sie zwei in Reihenschaltung kaskadierte 1200V-Buck-Stufen.
- wandelt den ZK von 400V über eine Totem-Pole-Stufe auf einen synthetischen Sinus mit 230VAC um.
- und dessen 230VAC-Ausgang wird intern von einem TÜV-zertifizierten Isolationswächter überwacht und über einen 2-poligen Trennschalter im Gefahrenfall getrennt.
- erfüllt alle Normen hinsichtlich Personensicherheit, EMV und darüber hinaus spezielle einsatzabhängige Spezial-Normen.



## Erweiterte Anforderungen an solche Systeme

- Besondere Robustheit (rugged design) des gesamten Systems gegen harsche Umweltbedingungen
- Das System muss einen Sturz von der Ladefläche eines LKW schadlos überstehen
- Das System muss zyklische Wärme/Kälte (steile  $dT/dt$ -Kurve) störungsfrei und schadlos überstehen.
- Robuste wasserdichte Gehäuse und Spezialstecker für Energieleitungen und Kommunikationsleitungen.
- Robustheit gegen Blitzschlag. Durch den Einsatz von Blitzstromtragfähigen Kombi-Ableitern  $>40kA$  (Gasentladungsröhren und Klemmung der Phase-Phase-Spannung durch VDRs) wird ein Maximum an Ausfallsicherheit erreicht.
- Extrem niedrige Störemissionen. Erreicht wird dies mit HF-abgedichteten EMV-Kammern mit Durchführungskondensatoren.

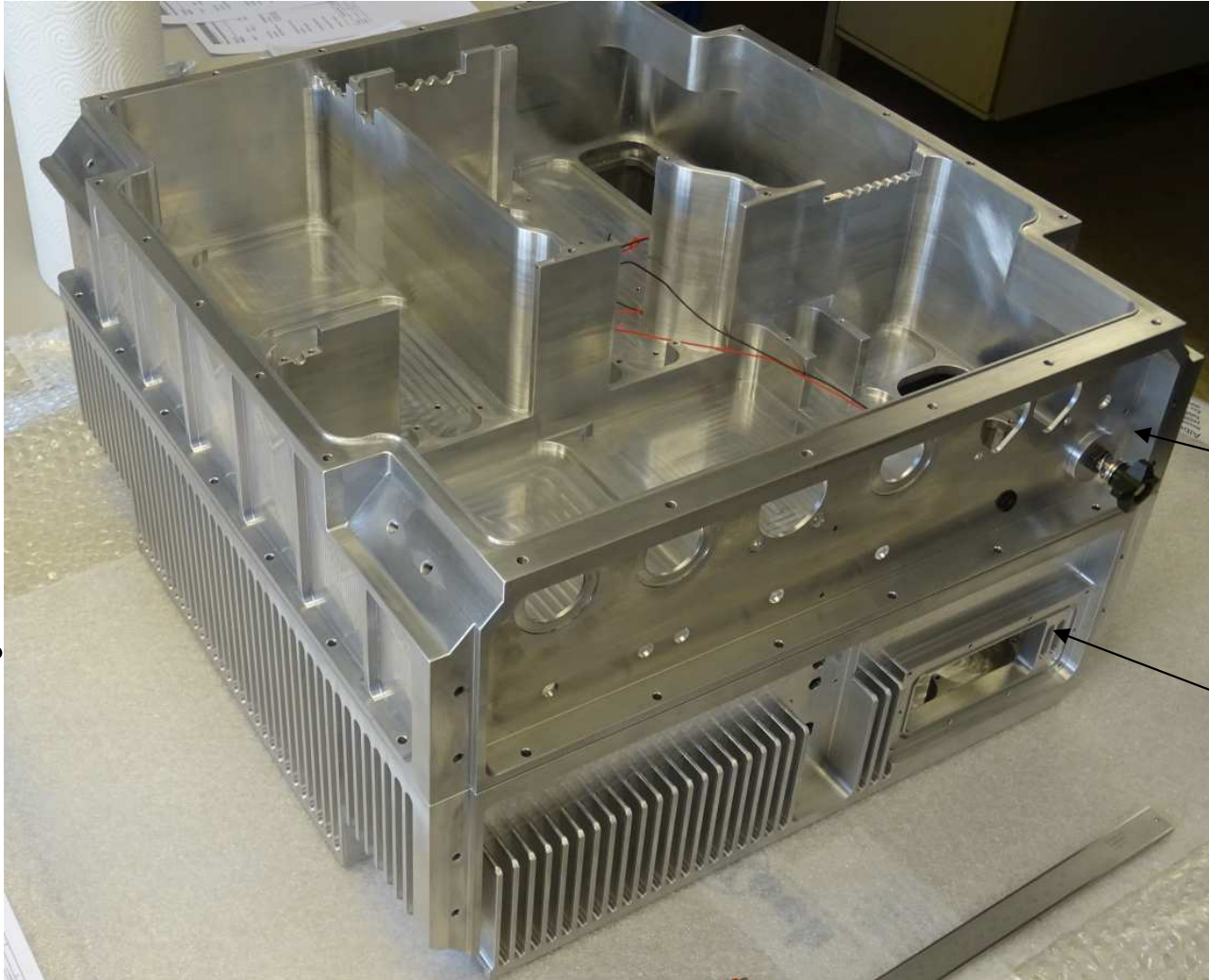
## Erweiterte Anforderungen an solche Systeme



- Blick in eine HF-dichte EMV-Kammer (hier der HV-Ausgang)



## Erweiterte Anforderungen an solche Systeme



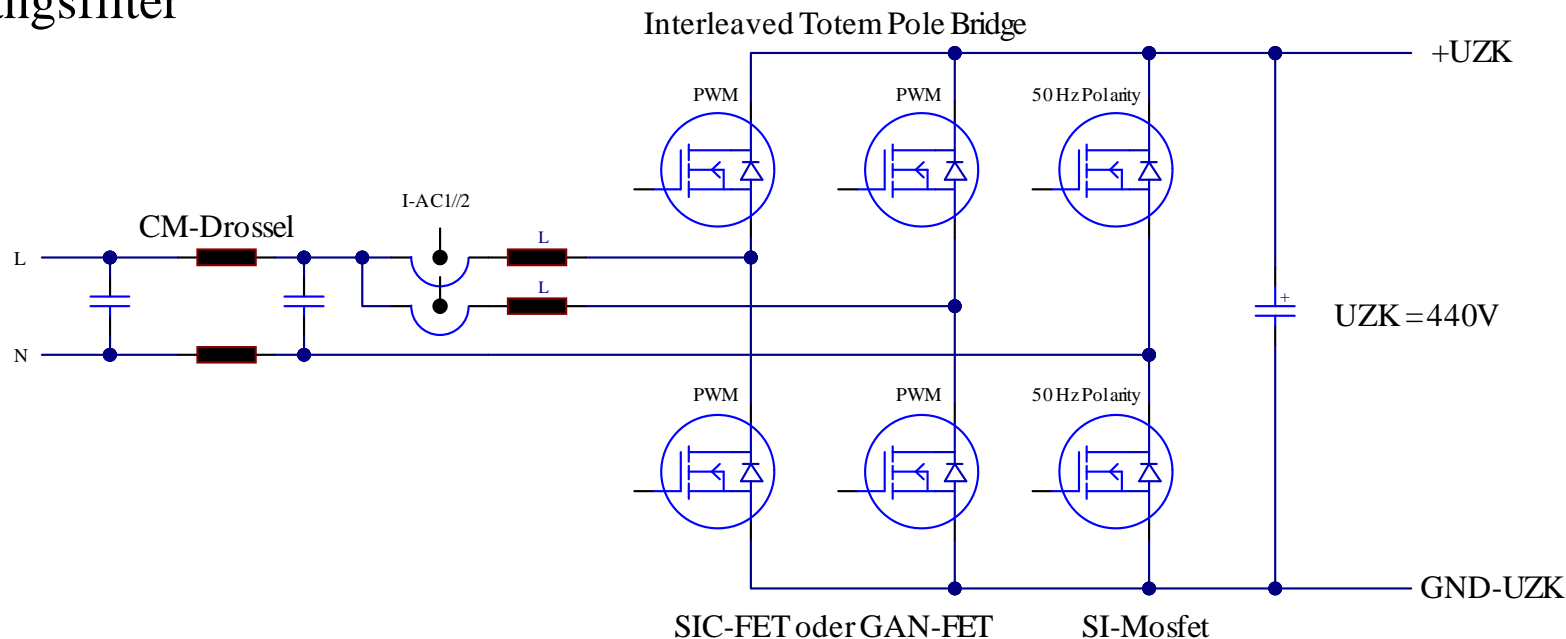
Kommunikationsteil

Leistungsteil

Blick auf ein Gehäuse für spezielle Anforderungen (rugged/gehärtetes Design)

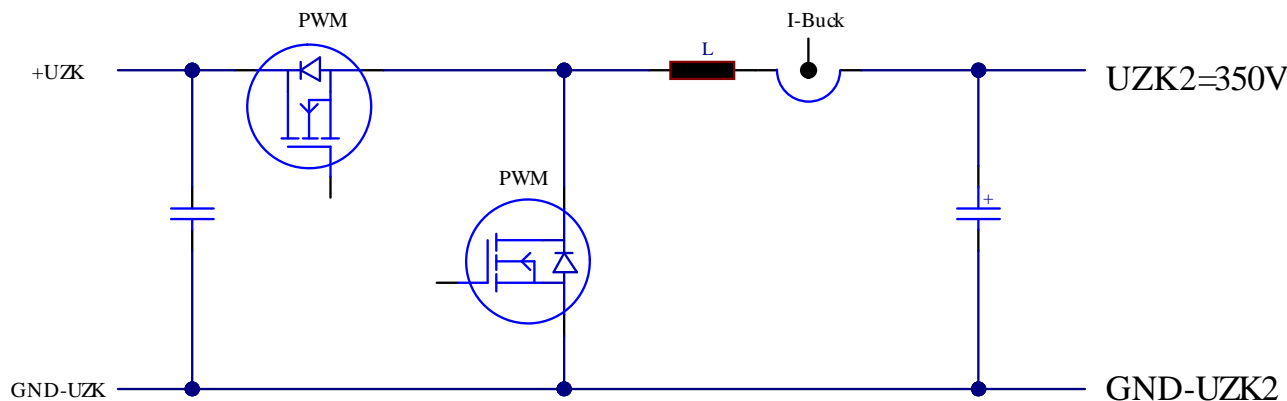
# Master-Unit: Totem Pole-Stufe

- Interleaved Totem Pole-Brücke für 230VAC auf 440V Zwischenkreis mit  $PF \geq 99\%$
- Niedrigere Verluste und weniger EMV-Probleme durch Verwendung von SIC- oder GAN-Transistoren. Parasitäre Eigenschaften ( $C_{rss}$ ,  $C_{oss}$ ,  $t_{rr}$ ,  $Q_{rr}$ ) sind gegenüber herkömmlichen SI-FETs weniger problematisch.
- Durch Interleaving ( $180^\circ$  Versatz) reduzieren sich die Anforderungen an den Eingangsfilter



# Die Buck-Stufe

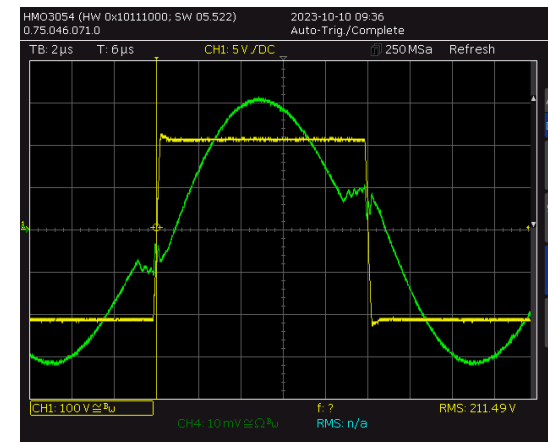
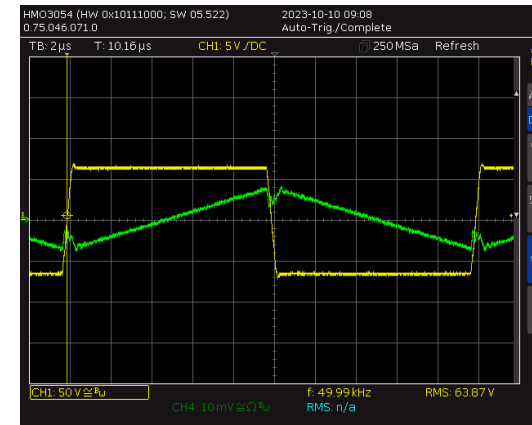
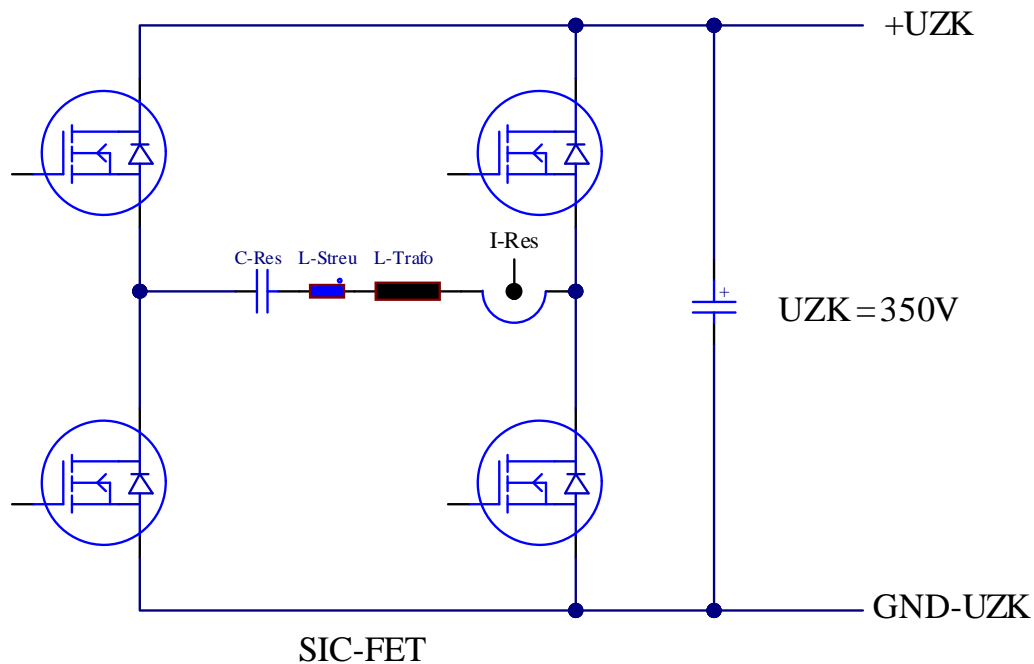
- Die Buck-Stufe arbeitet mit einer aktiven Freilaufdiode. Dies vereinfacht die Regelung bei niedriger Last, da der Drossel-Strom nicht „lückend“ ist. Er fließt kontinuierlich und lässt einen Energiefluss in beide Richtungen zu.
- Die Buck-Stufe sorgt als nachgeschaltete Stufe zur PFC-Booster-Stufe für einen Kurzschluss-Schutz und versorgt die Gegentakt-Sinusbrücke stets mit einer für den optimalen Arbeitspunkt passenden Zwischenkreisspannung.



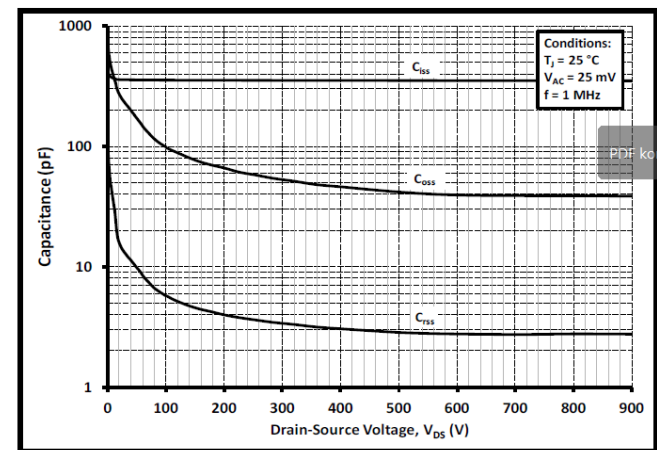
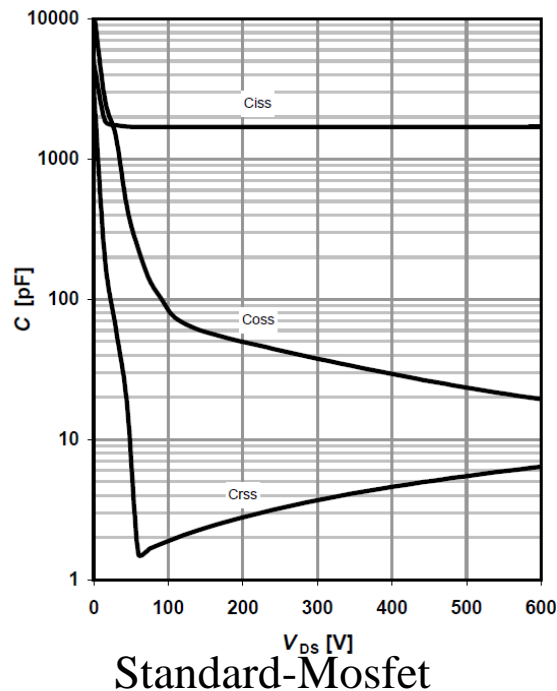
# Die Sinus-Resonanz-Gegentakt-Brücke

- Die Sinus-Resonanz-Gegentakt Brücke arbeitet immer im idealen Arbeitspunkt und damit mit Festfrequenz. Es wird nicht mit Frequenzmodulation gearbeitet.
- Die vorgeschaltete Buck-Stufe ersetzt somit die sonst notwendige LLC-Frequenzmodulation.
- Die LLC-Brücke arbeitet mit der Verstärkung  $V=1$

Sinus-Resonanz-Gegentakt-Brücke



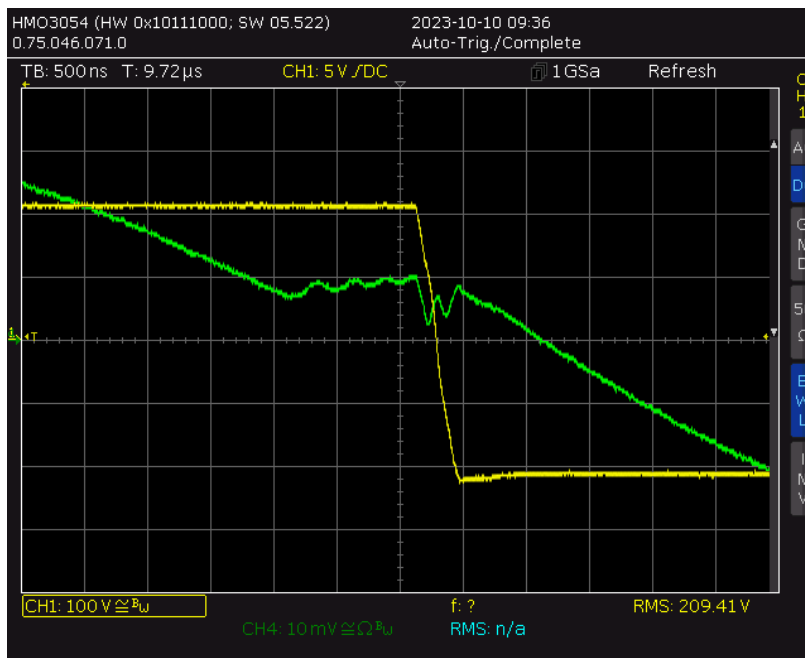
- Die Sinus-Brücke arbeitet immer im ZVS-Modus (Zero Voltage Switching)
- ZVS ist unabhängig vom Laststrom
- ZVS-Kommutierung wird über den Magnetisierungsstrom des Transformators erreicht.
- Es muss sichergestellt sein, dass ZVS quasi von 0V-UZK bis max. UZK erreicht wird. Damit ist auch HighCAP-Charging (z.B. 50F/600V) von 0V bis U<sub>max</sub> realisierbar.
- SIC-Transistoren haben auch hier als ZVS-Schalter ihre Vorteile, da deren Drain-Source-Kapazität nur verhältnismäßig wenig ansteigt bei fallender Drain-Source-Spannung.



SIC-Transistor



- Die Sinusbrücke muss gegen harten Kurzschluss geschützt werden.
- Eine schnelle Sinus-Strommessung muss bei kritischen Strömen sofort die Brücke abschalten. Ein Wiederanlauf nach Abschaltung muss stets spannungsfrei (UZK=0V) erfolgen. Dafür sorgt eine intelligente Steuerung mit aktiver Zwischenkreisentladung.
- Die Festfrequenz-Sinusbrücke kommt mit wenig Streu- bzw. Reihen-Resonanzinduktivität aus. Dies reduziert die AC-Verluste in dem Transformator, da er sehr streuinduktivitätsarm gewickelt werden kann. Meist kann man auf eine zusätzliche Reiheninduktivität verzichten.



Einstellbare Kommutierungszeiten (hier z.B. 500ns) führen zu niedrigen Störemissionen.

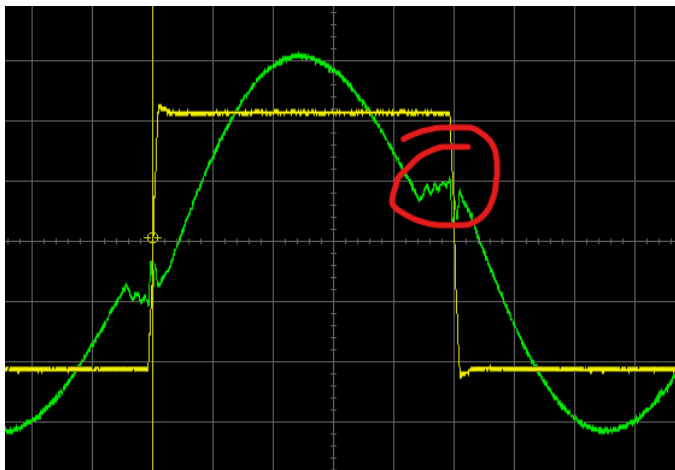
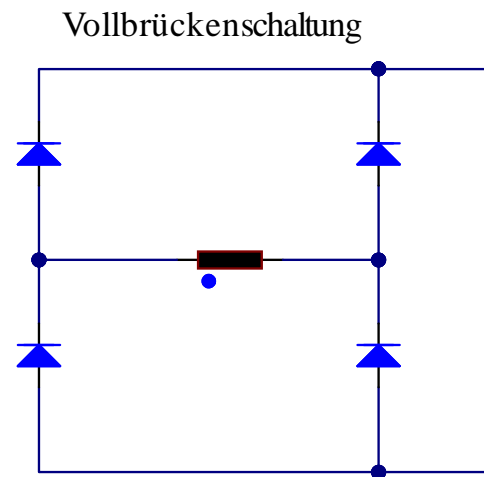
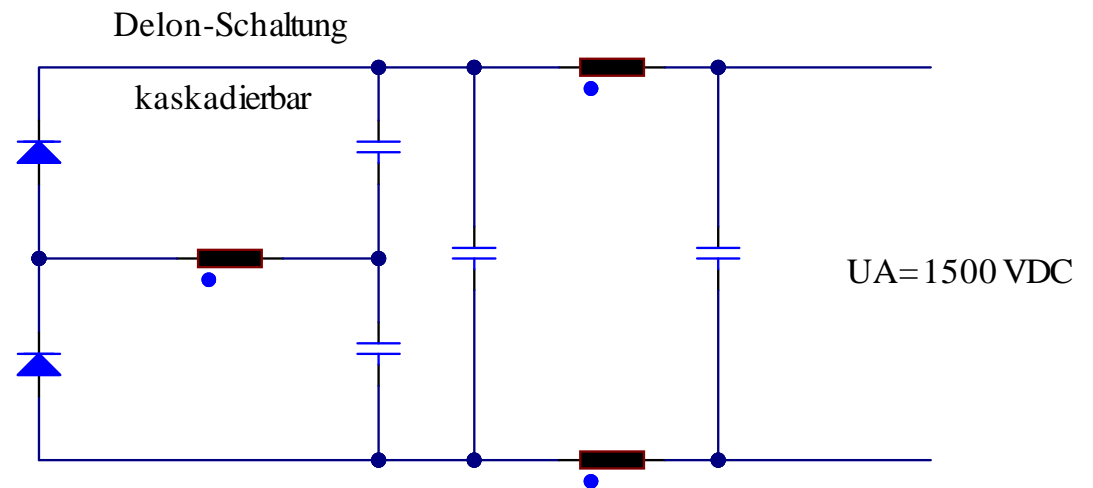
Die natürliche (harte) Kommutierungszeit liegt um den Faktor 10 niedriger (<50ns) und sorgt durch steile  $dU/dt$ -Flanken für EMV-Störungen.

Die Kommutierungszeit ist eine Funktion der Drain-Source-Kapazität, der Amplitude des Magnetisierungsstroms und der Amplitude der Drain-Source-Spannung. Die Kommutierungszeit kann auch durch Hinzufügen zusätzlicher Kapazitäten parallel zu Drain-Source verlangsamt werden.

# Die Ausgangsgleichrichtung

Die Delon-Schaltung verdoppelt die einfache Wicklungsspannung und kann daher eine sehr gute Option sein, um durch die halbe Anzahl von Windungen weniger Wicklungskapazität zu Erzeugen. (LC-Ringing)

Eine Spannungskaskadierung ist bei Hochvolt-Ausgängen vorteilhaft. Dadurch lassen sich unangenehme Begleiterscheinungen durch parasitäre Eigenschaften wie L/C-Ringing besser in den Griff bekommen.



# Topologie der Remote-Unit

- Die Eingangsstufe wird gebildet aus einer 2-fach spannungs-kaskadierten Buck-Stufe
- Die Buck-Stufe wandelt die 1500V-Spannung von der Master-Unit in eine kleinere Zwischenkreis-Spannung
- Ein sinusresonante Gegentaktstufe wandelt die Zwischenkreisspannung in eine galvanisch getrennte zweite Zwischenkreisspannung um.
- Eine Totem-Pole-Stufe wandelt die zweite Zwischenkreisspannung um in eine 230VAC-Spannung.

## Fazit

- Für die Realisierung von Master- und Remote-Unit sind lediglich 3 Grundsaltungen notwendig:
- Totem-Pole-Schaltung für 230VC zu DC und DC zu 230VAC
- Buck-Schaltung für die Umsetzung auf die notwendige Zwischenkreisspannung
- Sinusresonanter Gegentakter für die galvanische Trennung

**Vielen Dank für ihre Aufmerksamkeit !**

SYKO Gesellschaft für Forschung & Entwicklung GmbH & Co. KG

Jahnstrasse 2

63533 Mainhausen

Telefon: 06182-93520

[www.syko.de](http://www.syko.de)

[info@syko.de](mailto:info@syko.de)