

# **S**olar – **S**imulations- und **O**ptimierungsmethodik für **l**eistungselektronische Systeme – effizient, komp**a**kt und **r**obust

→ **Projektprogramm LES**  
des Bundesministeriums für Bildung und Forschung



→ **Projekträger:**  
VDI / VDE Innovation + Technik GmbH



→ **Partner:**

- Robert-Bosch GmbH (Konsortialführer)
- TU Berlin
- Computer Simulation Technology AG (CST)
- Adapted Solutions GmbH



**BOSCH**

## Partner

- Die Bosch-Gruppe ist ein international führendes Technologie- und Dienstleistungsunternehmen. Mit Kraftfahrzeug- und Industrietechnik, sowie Gebrauchsgütern und Gebäudetechnik erwirtschafteten rund 306 000 Mitarbeiter im Geschäftsjahr 2012 einen Umsatz von 52,5 Mrd. €.
- Die TU Berlin beschäftigt sich in seinem Berlin Center of Advanced Packaging seit vielen Jahren mit Methodenentwicklung für den Entwurf leistungselektronischer Geräte. Themenschwerpunkte sind EMV, Packaging, Zuverlässigkeit und Thermik, für die umfassende Möglichkeiten zur meßtechnischen Validierung zur Verfügung stehen
- Die Adapted Solutions GmbH ist ein KMU mit Sitz in Chemnitz, das sich mit der Entwicklung und Anwendung von Simulationssoftware auf der Gebiet der Elektroenergietechnik, Antriebstechnik und Leistungselektronik beschäftigt. Seit der Gründung im Jahr 2003 wurden 2 Software-Produkte bis zur Marktreife entwickelt.
- Computer Simulation Technology AG (CST), ein mittelständisches Unternehmen mit Firmensitz in Darmstadt, ist einer der weltweit renommiertesten und der größte europäische Anbieter von Software für die 3D Simulation elektromagnetischer Felder. CST besitzt Tochterfirmen in Deutschland, Frankreich, UK, den Vereinigten Staaten und Südkorea und beschäftigt insgesamt 190 Mitarbeiter, von denen 130 Mitarbeiter in Deutschland.

## Zielsetzung von ‚Solar‘

- Entwicklung einer **domänenübergreifenden Methodik** zur **Auslegung** und **Optimierung** leistungselektronischer Systeme
- Auslegung und Optimierung eines **hocheffizienten, robusten** und **kompakten Solar-Wechselrichters**



## Komponente Solar-Wechselrichter

### Funktion Netzwechselrichter

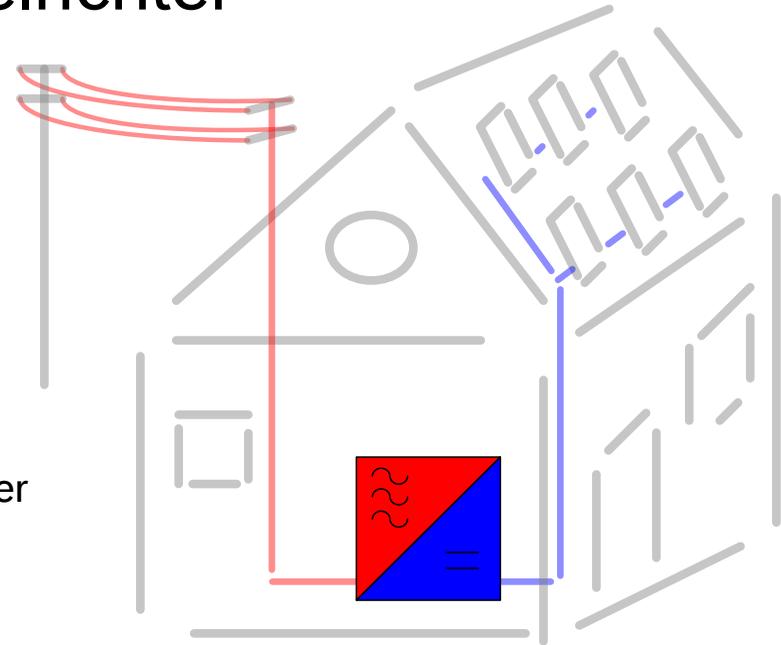
- Umwandlung von Gleichstrom in netzfrequenten Wechselstrom

### Stand der Technik

- Hohe Wirkungsgrade, gute EMV
- Hohe Kosten, Materialeinsatz
- Entwicklung der Leistungselektronik und der Regelungstechnik unter Einsatz verschiedener Simulationstools für einzelne Domänen

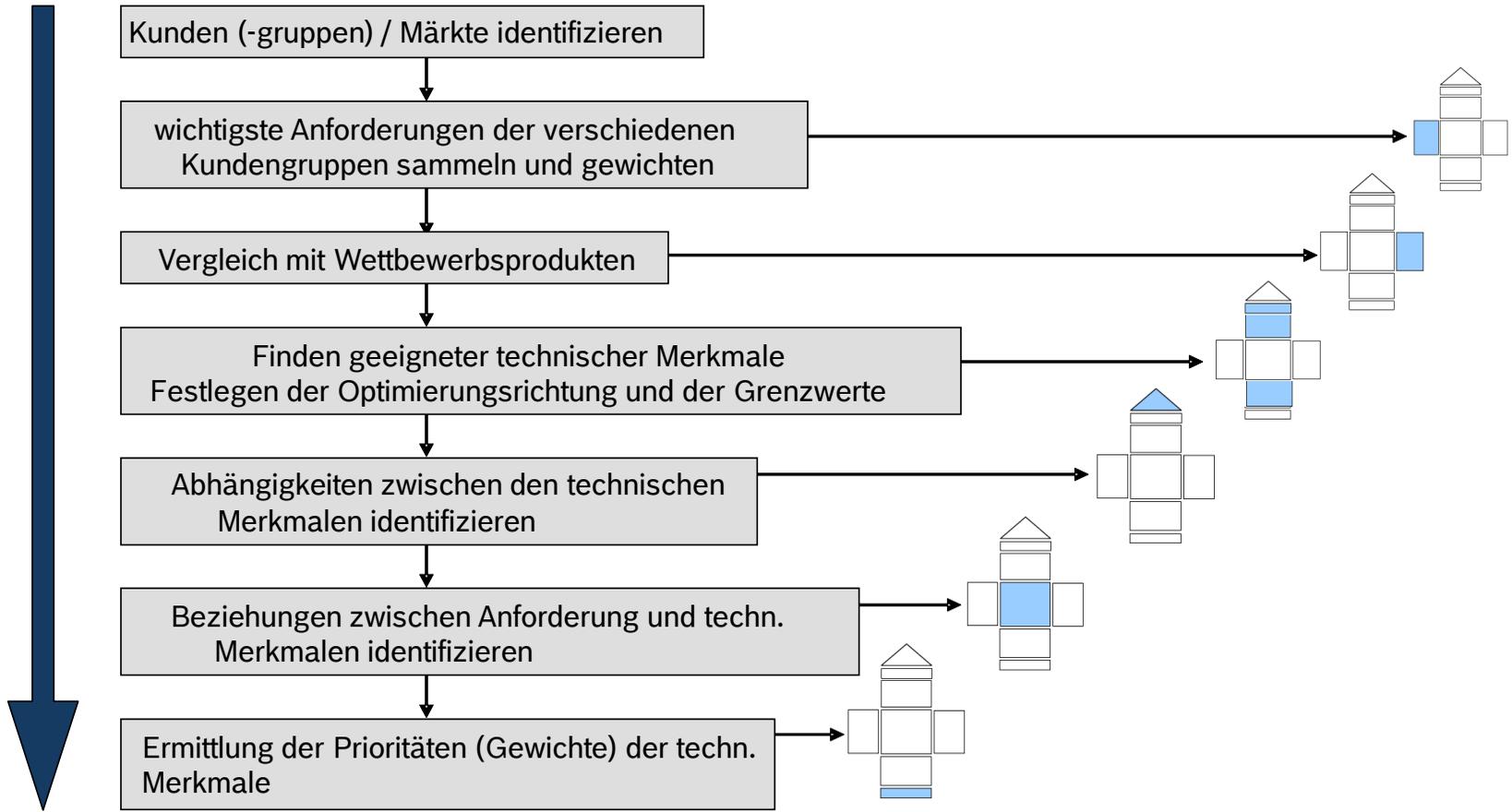
### Herausforderungen in Zukunft

- Bauraumreduktion und Kostensenkung
- Einhaltung aller Standards

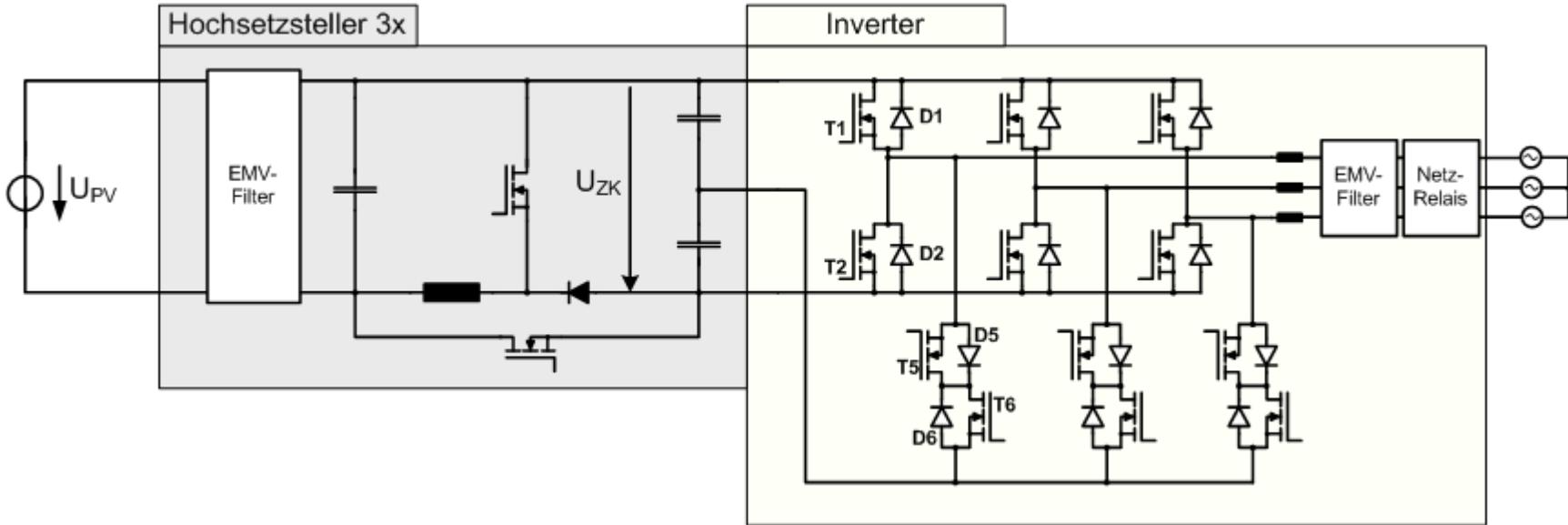


Multi-Domain-Simulationen des Systems unter Einbeziehung von EMV und Thermik sind wesentliche Voraussetzungen für das Erreichen zukünftiger Entwicklungsziele kompakter leistungselektronischer Komponenten

## Anforderungsanalyse Solarwechselrichter

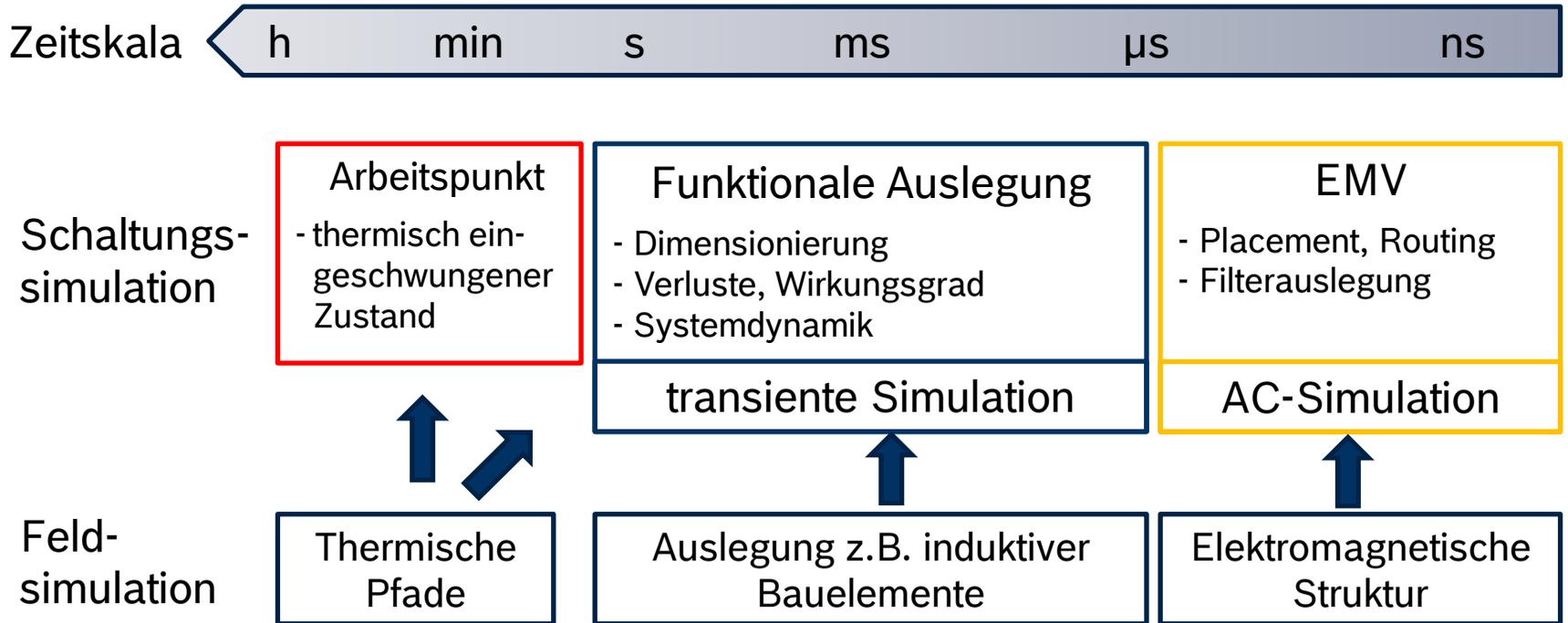


# Ausgewählte Schaltungstopologie



- ➔ Drei Hochsetzsteller-Eingänge für den Anschluss separat geführter PV-Strings mit großem Eingangsspannungsbereich
- ➔ Inverterstufe: T-Type-NPC (**N**eutral-**P**oint-**C**lamped Converter). Neben dem bevorzugten 3-Level Betrieb ist auch 2-Level Betrieb möglich

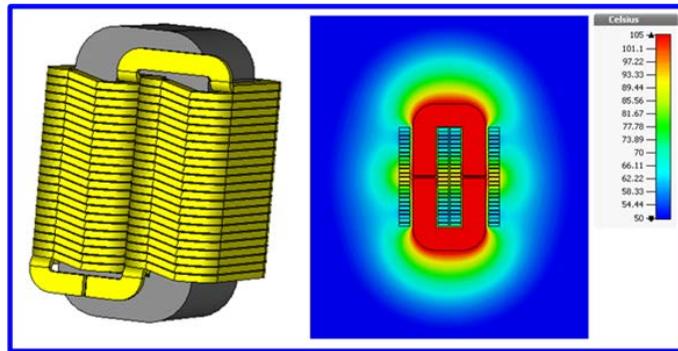
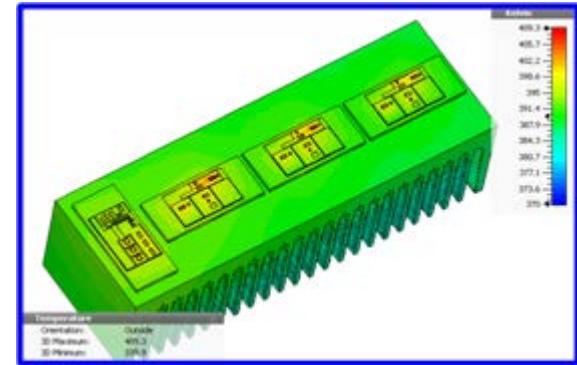
## Anforderungen an die Toolkette



Modellbildung und -parametrierung und iterative Validierung

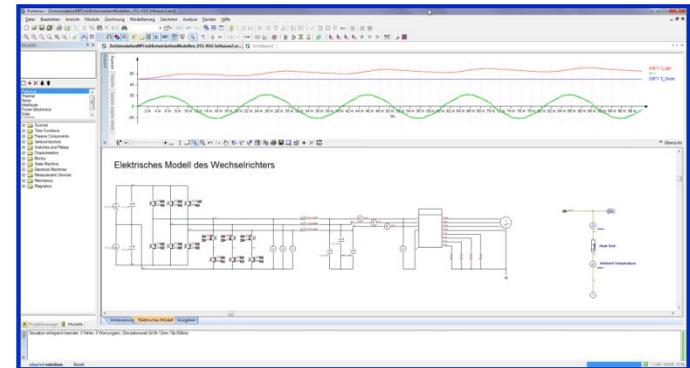
## Thermische Auslegung

- Geometriebasierte Kühlkörpermodelle und Parametrier-Tool
- Generierung von  $R_{th}$ -Matrizen aus FEM-Simulation und Importfilter für Portunus

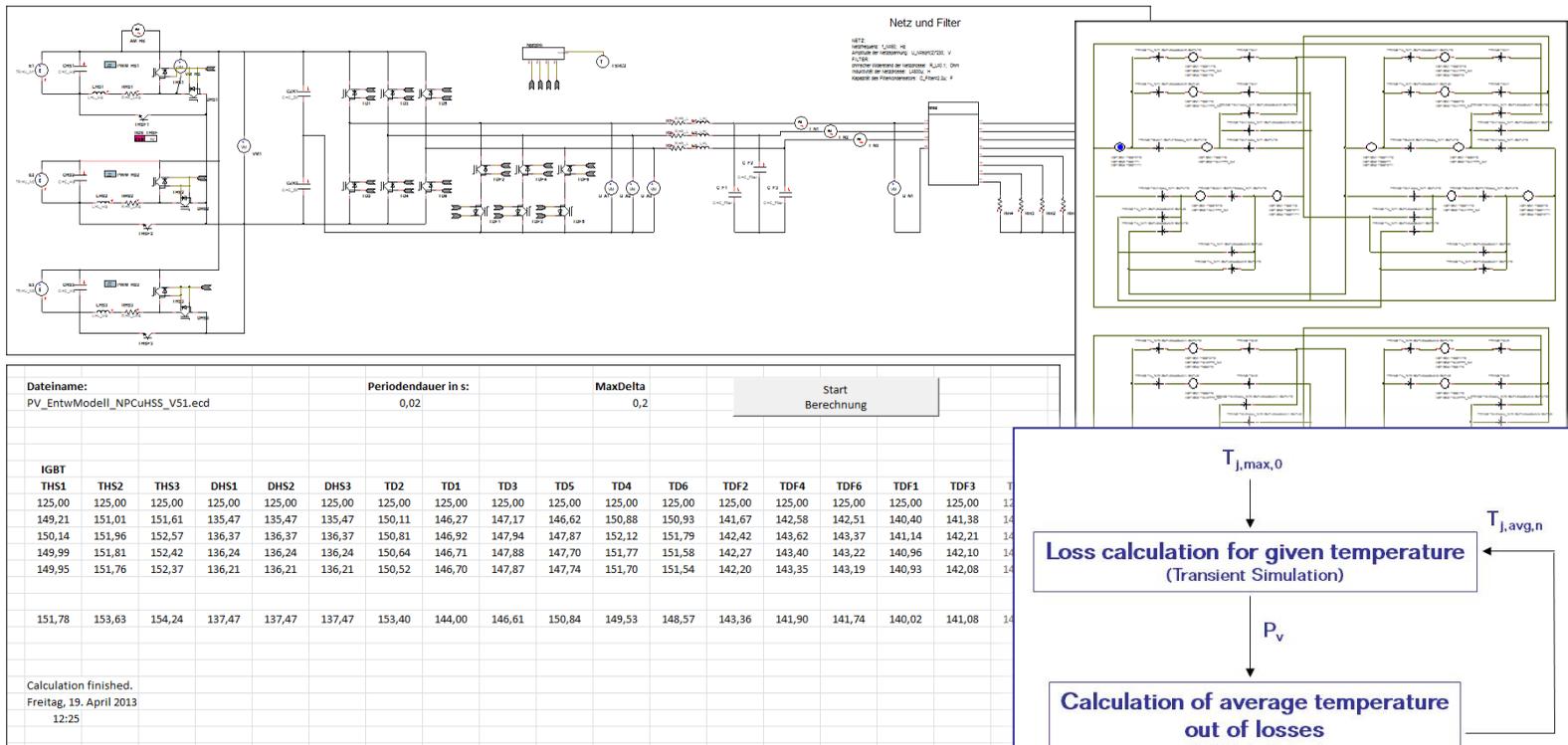


- Thermische Simulation der Netzdrosseln unter Verwendung der berechneten Verluste

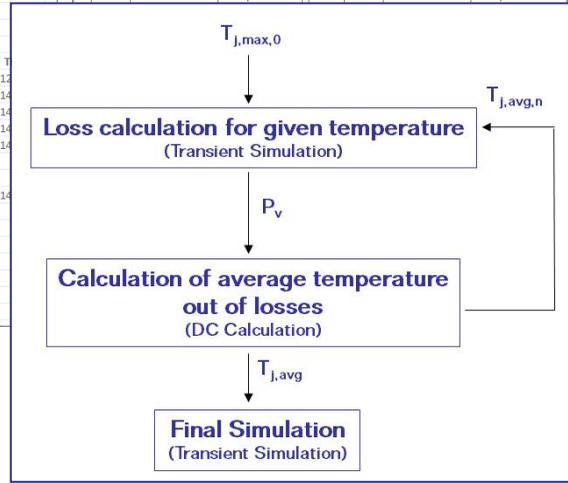
- Automatische Bestimmung des elektrothermischen Gleichgewichts
- Gekoppelte Schaltungssimulation



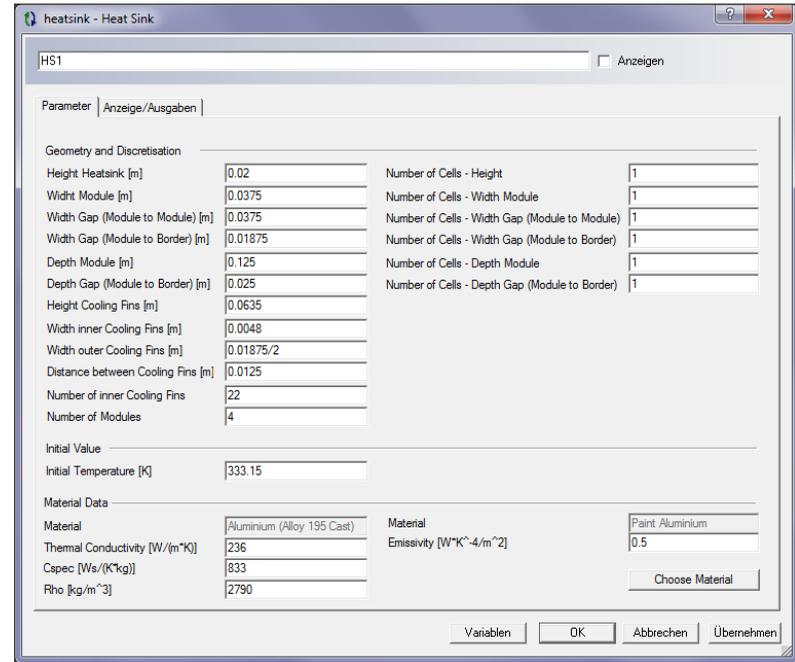
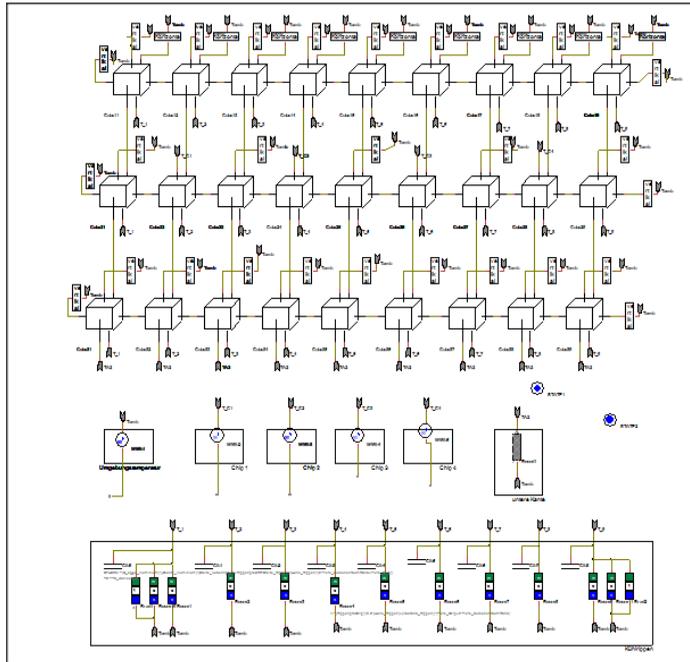
## Elektrothermisch stationärer Arbeitspunkt



- ➔ Skriptbasierte Berechnung vor finaler Simulation
- ➔ Rechenzeit für ‚Solar‘-Topologie ca. 90 min.

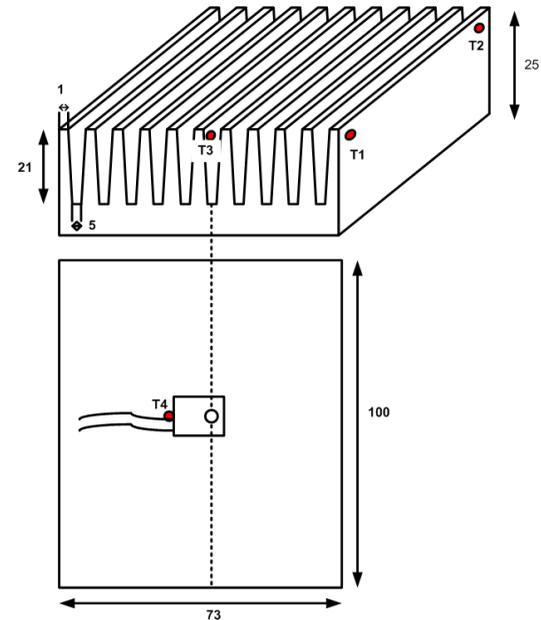
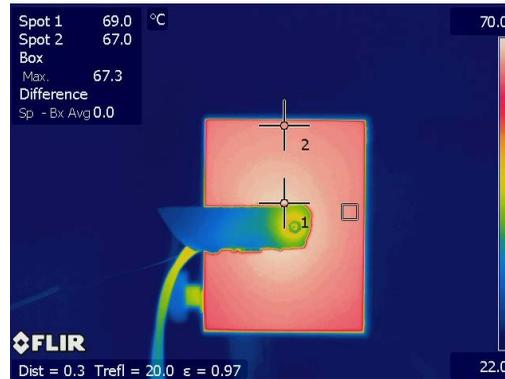
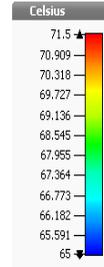
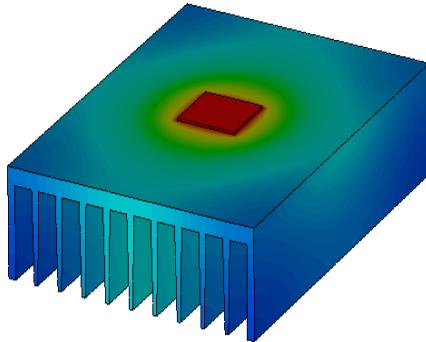


## Beispiel: Kühlkörper-Netzwerkmodell



- Automatisch generierbares Netzwerkmodell mit sehr kurzen Rechenzeiten
- Nichtlineare Wärmeübergänge (Konvektion, Abstrahlung) werden analytisch berücksichtigt

## Vergleich der Kühlkörpermodelle



Quelle: CST AG

- Testkühlkörper frei umströmt aufgehängt
- Mehrere Temperaturmesspunkte, Thermographie der Oberfläche
- Leistung von 21W in der Mitte des Kühlkörpers eingepreßt (Fläche: 16mm x 17mm)

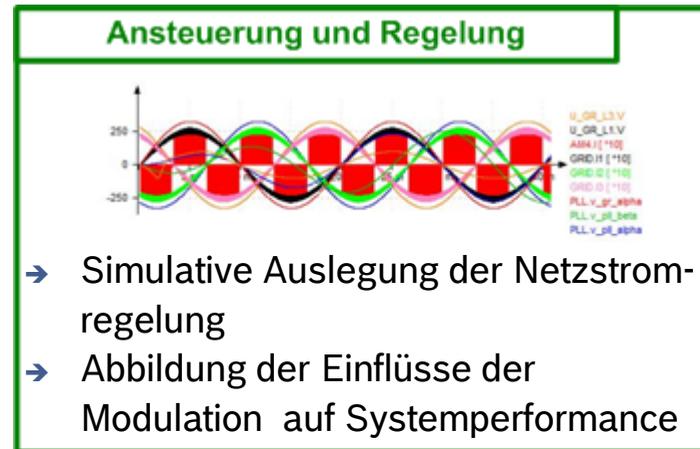
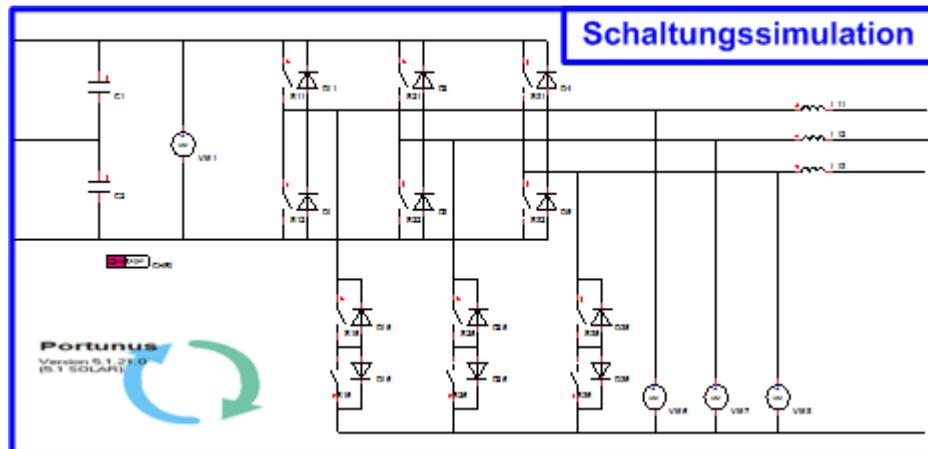
### Zwei Simulationsansätze:

- 3d numerisch mit CST MPHYSICS® STUDIO
- Simulation mit parametrischem Portunus-Modell

	T1 / °C	T2 / °C	T3 / °C	T4 / °C	P <sub>DIODE</sub>
Messung	66,3	65,7	67,8	69,8	21 W
Simulation in CST:				71,0	
Simulation in Portunus:				77,9	

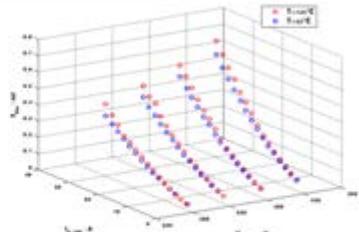
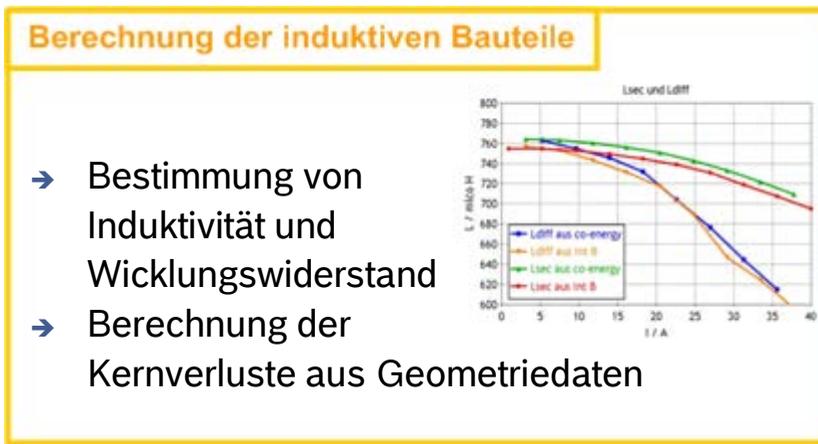


## Funktionale Auslegung



### Modellierung der Halbleiter

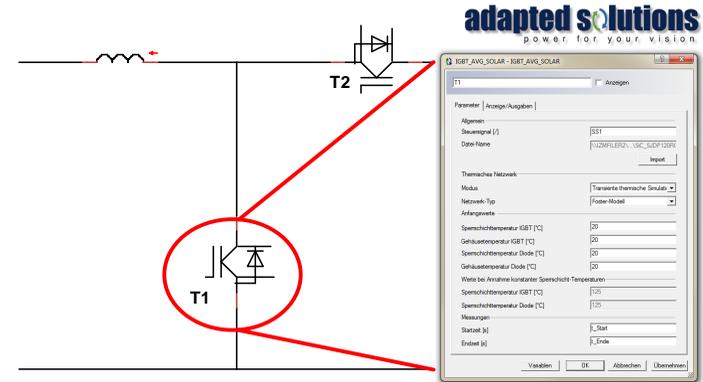
- Elektrothermische Mittelwert-Modelle
- Automatische Parameterextraktion
- Schnittstelle für die automatische Modellerzeugung aus Datenblattwerten und Messdaten

## Simulationsmodelle für Leistungshalbleiter

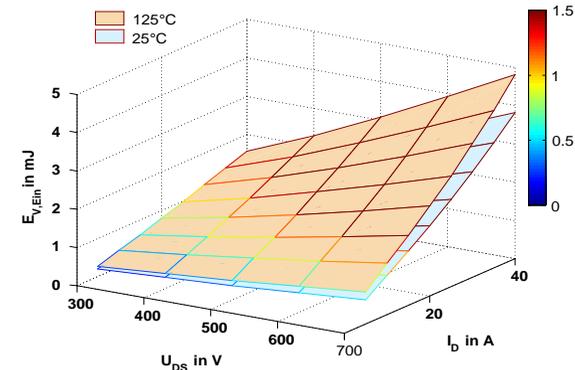
### Anforderungen:

- Geringe Rechenzeiten für transiente Simulationen im Zeitbereich von mind. ms
- Exakte Berechnung der Verlustleistungen
- Gekoppelte elektrothermische Berechnung
- Einfach parametrierbar



### Generisches Halbleitermodell in Portunus

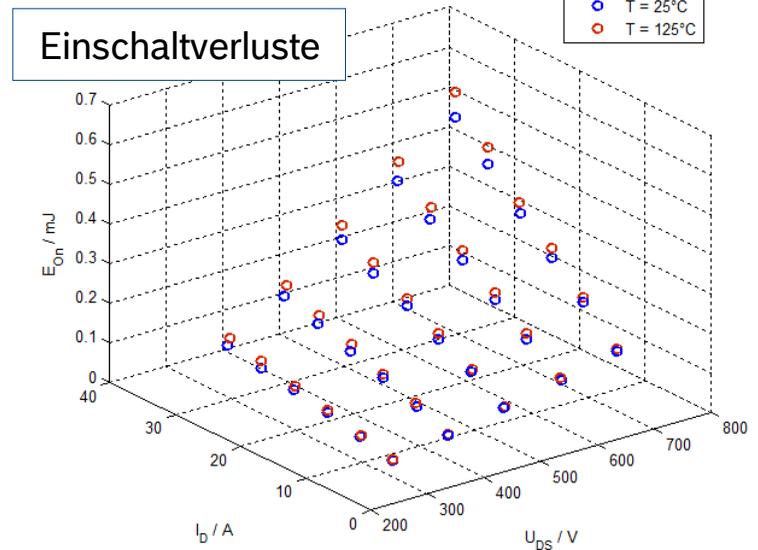
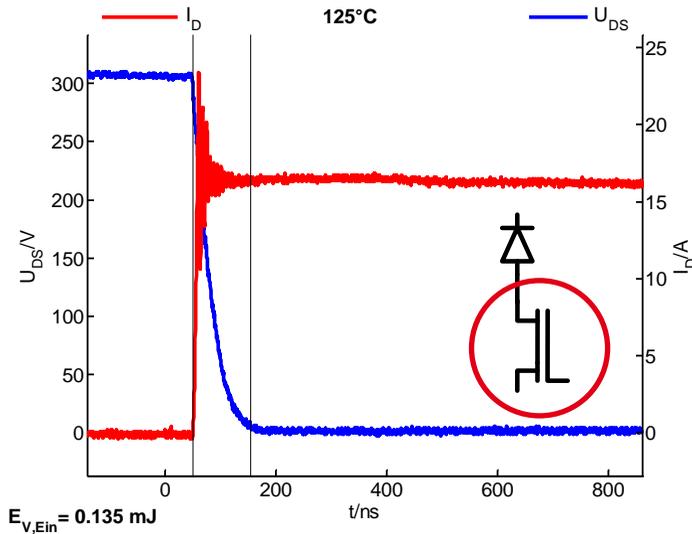
- Statische Kennlinien aus Datenblatt oder Messung
- Kurvenanpassung auf Zielfunktionen, Wertetabelle
- Dynamische Verluste aus Messung der Schaltenergien (Mittelwert-Modelle)
- Kennfeldmodelle (Spannung, Strom, Temperatur)



## Beispiel: Hochsetzsteller Modul

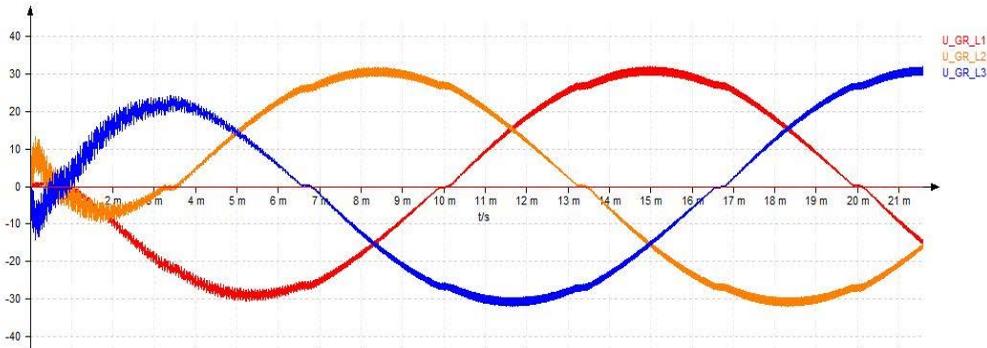
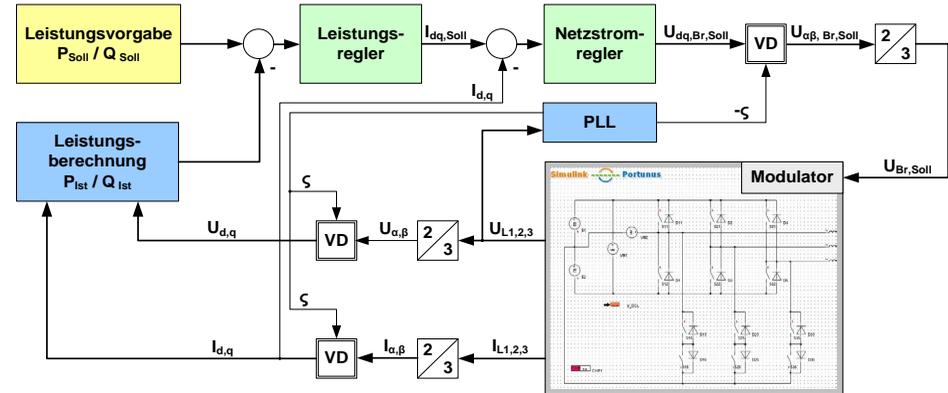
### Bestimmung der Schaltverluste:

- SiC-JFET und SiC-Schottky-Diode
- Doppelpulsmessung mit  $U_G = -15V / +2V$ ,  $R_G = 6.8 \Omega$
- Messdaten sind Input für Verlustmodellierung in der Schaltungssimulation

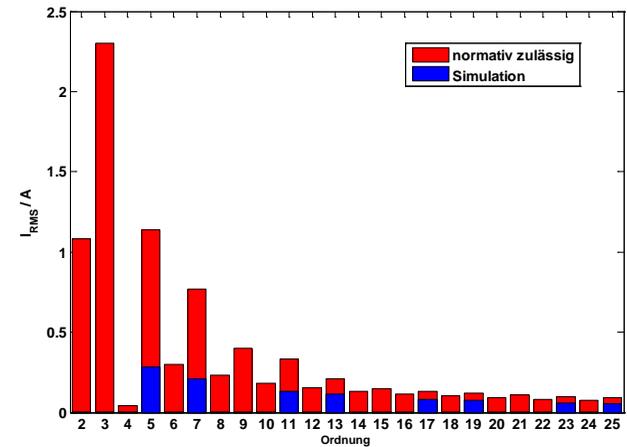


## Netzstromregelung

- Simulation der Stromregelung in dq-Koordinaten
- Getrennte Vorgabe von Wirk- und Blindleistung
- VHDL-AMS-Modelle der Reglerstruktur in Portunus



**Unterschreitung der normativ erlaubten  
Oberschwingungsströme**

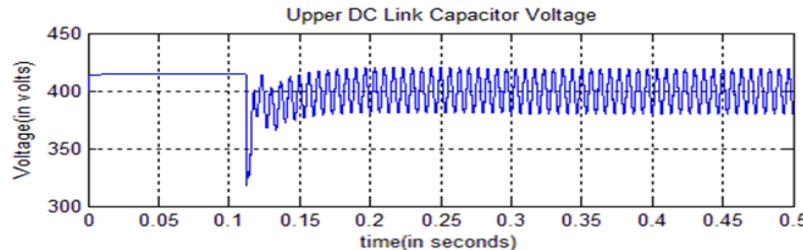
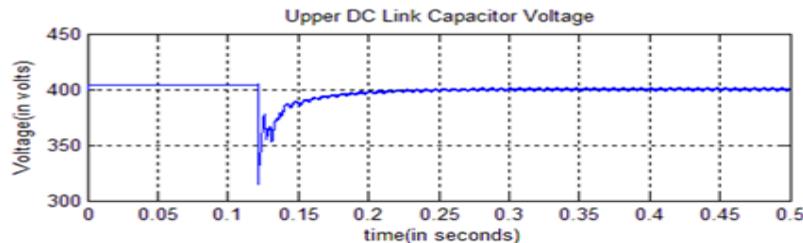


## Glättung der Zwischenkreisspannungen

- Den DC-Spannungen der beiden Zwischenkreishälften ist im 3-Level-Betrieb mit nicht verbundenem Sternpunkt eine Schwingung mit dreifacher Netzfrequenz überlagert.
- Glättung der Teilspannungen durch angepasstes Modulationsverfahren, z.B. Injektion einer 3. Harmonischen.

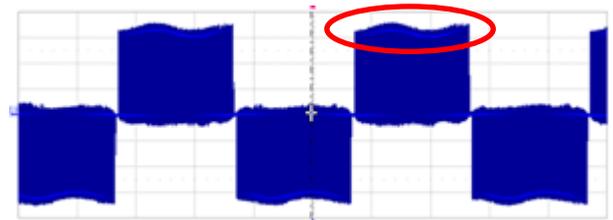
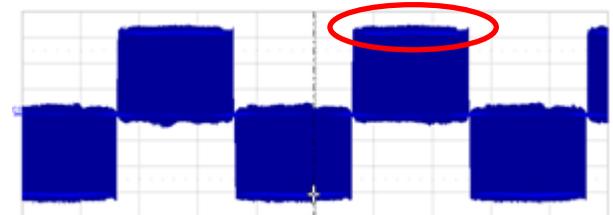
### Simulation einer Kondensatorspannung

Oben mit Kompensation, Unten ohne

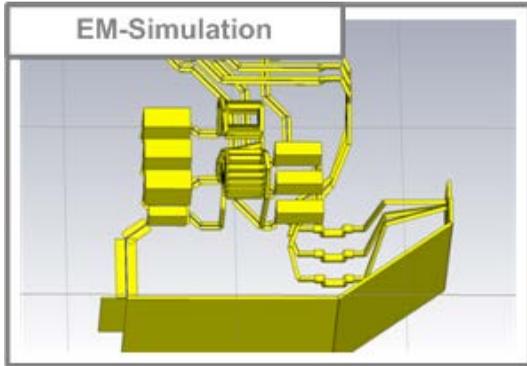


### Messung einer Modulspannung

Oben mit Kompensation, Unten ohne



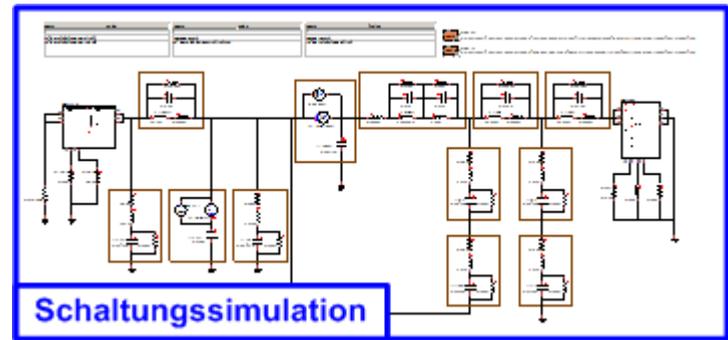
## EMV-Simulation: Toolkette



### Extraktion der Strukturparasiten für Schaltungssimulation

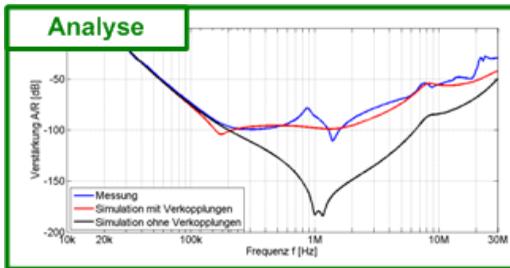
- Optimierte graphische Partitionierung, automatischer Aufruf von Fast Henry und Schnittstelle zu Portunus
- Verbesserung des CST-PEEC-Algorithmus
- Erweiterung um temperaturabhängige Materialparameter
- Frequenzbereichssimulationen von Filterbauelementen

- Optimierung des Layouts
- Anpassung der Komponenten



### Simulation der EMV-Störaussendung

- Erweiterung der Modellbibliothek:
  - Koppelmatrizen
  - Frequenzgang-Basiselemente
- Komfortable Schnittstellen zu CST-Tools



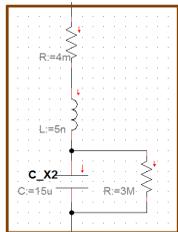
- Methode zur Vereinfachung der sehr komplexen Strukturen entwickelt und getestet



## Modelle zur EMV-Untersuchung

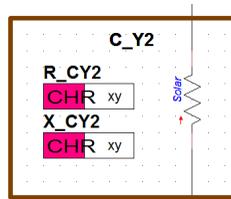
### Beispiel:

Modell eines realen Kondensators mit parasitären Bauelementen

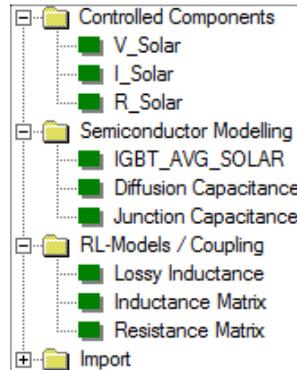
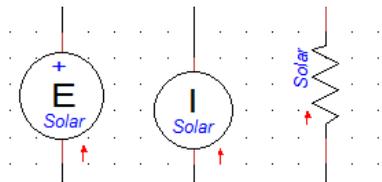


Impedanzmessung des realen Bauelements

Ersatz durch frequenzabhängige komplexe Impedanz



### Solar-Modelle:



### Formelmodul für frequenzabhängige Parameter

```

1 // General Data
2 double VDC=270;
3
4 // System
5 double NR=4;
6 double m=3;
7 double Imax=0.00283;
8 double Lmin=0.000295;
9 double Rs=0.0107;
10
11 // Control
12 double Iref = 1000;
13 double Hys=100;
14 double Advance = 10;
15

```

Value Assignment (during simulation)

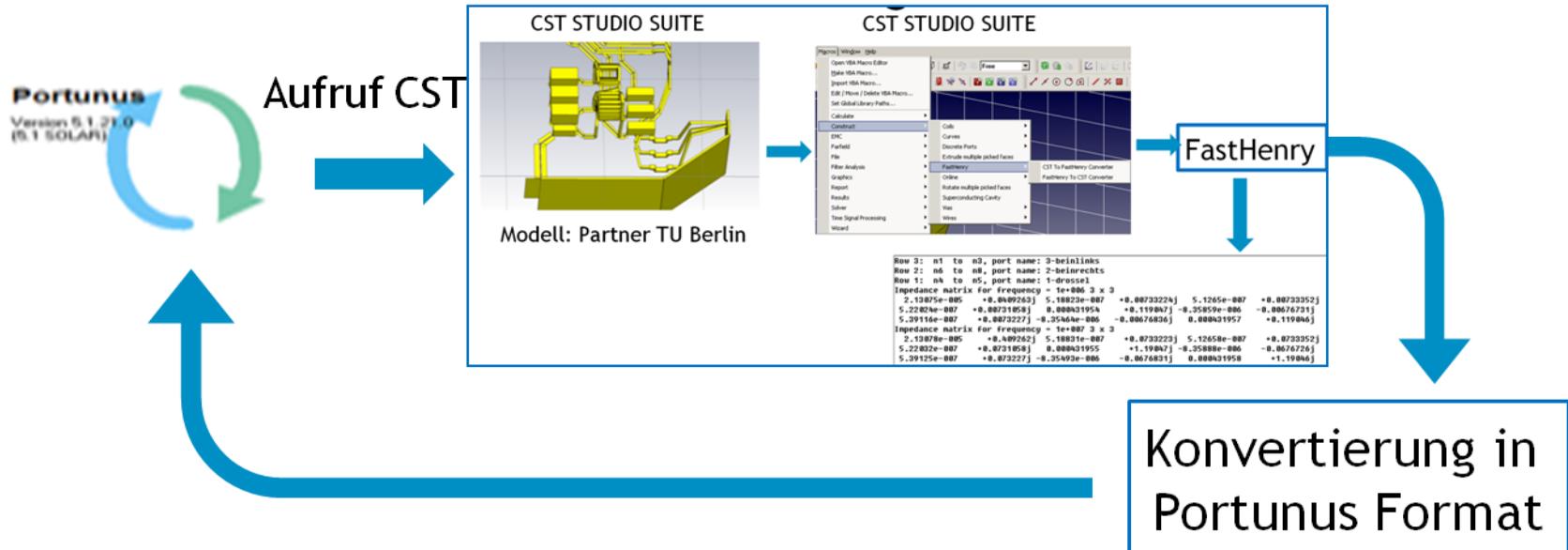
```

1 if (domain != 4)
2 {
3     I = 0.02;
4     R = 0.1;
5 }
6
7 if (domain == 4)
8 {
9     I = 0.02 + 1.0 / f;
10    R = 0.1 + 0.3 * f;
11 }

```

Message: [1](23) The variable (L) is not assigned a value. Initial value of 0.0 is assumed. [1](24) The variable (R) is not assigned a value. Initial value of 0.0 is assumed. Syntax OK

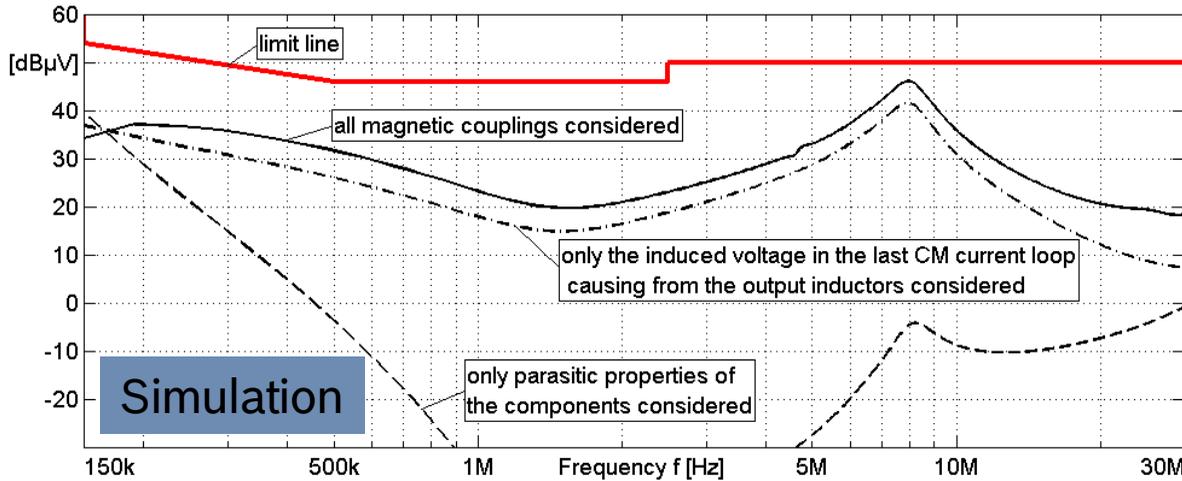
## Kopplung der funktionalen und EM - Simulation



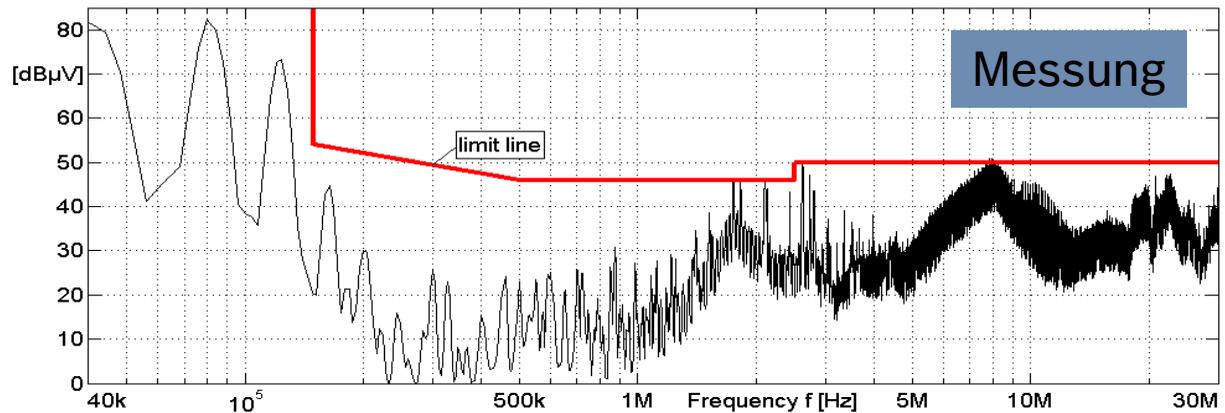
- Aufbereitung der Struktur in CST Studio Suite
- Berechnung der Parasitics (L, M, R) durch PEEC-Solver
  - Aufruf des Solvers ‚Fast Henry‘ / Nutzung des CST - eigenen PEEC-Solvers
- Simulation und Ergebnisanalyse im Schaltungssimulator



## Einflüsse auf die netzseitige Störspannung



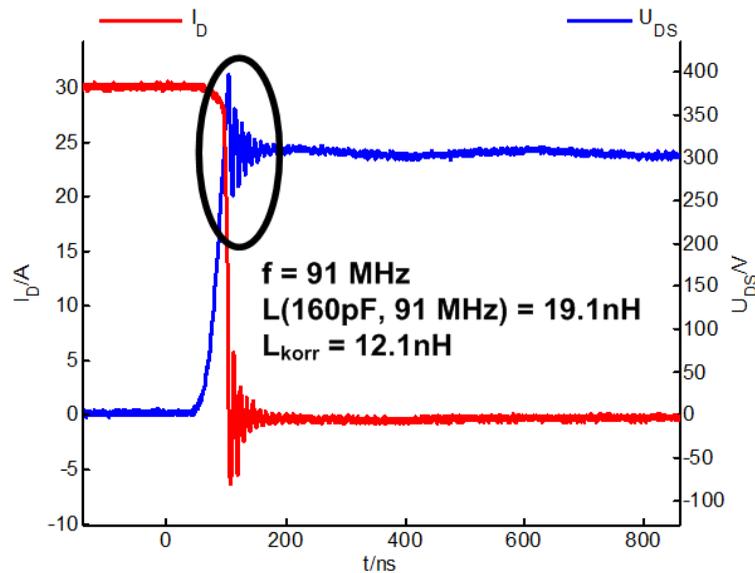
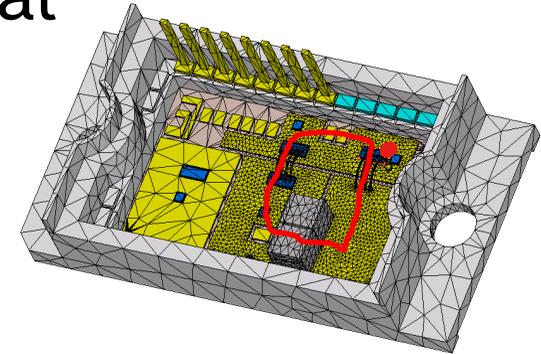
Quelle: TU Berlin



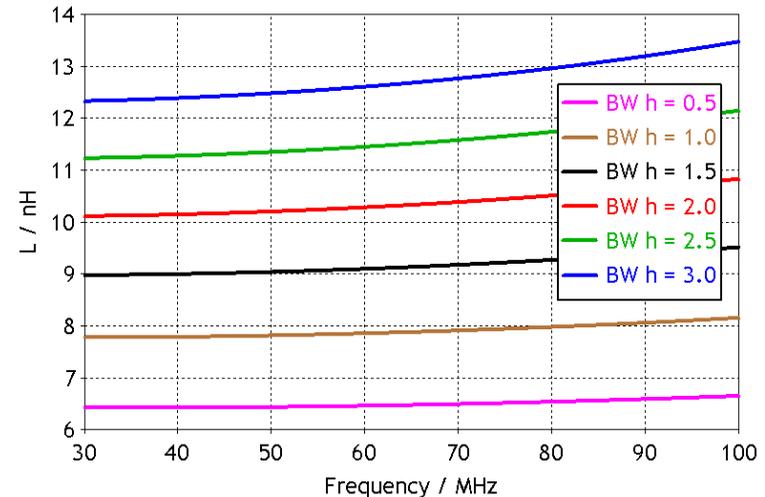
**BOSCH**

## Beispiel: Kommutierungsinduktivität

- Bestimmung der Induktivität des Kommutierungskreises aus der Messung des Ausschaltvorgangs
- Berechnung der Kreisinduktivität aus Schwingfrequenz und Kapazität von JFET, Diode und Struktur
- Korrektur des Wertes um die zusätzliche Induktivität des Koaxialshunts (Strommessung)



Quelle: CST AG



Berechnete Kommutierungsinduktivitäten

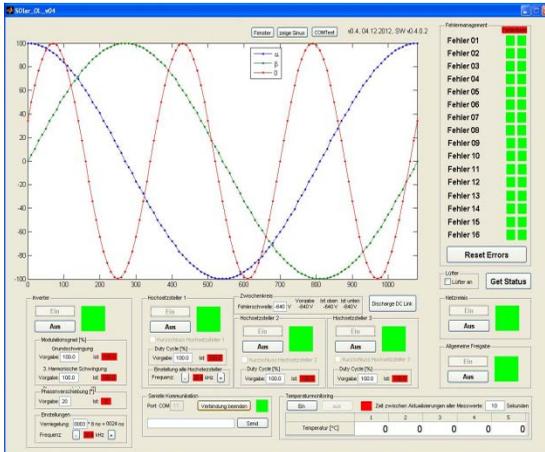
## Methodendemonstrator

### Leistungsteil

- 3-phasiger T-Type **Neutral Point Clamped Converter**
- Drei Hochsetzsteller an den PV-Eingängen
- Halbleitermodule für Inverter- und Hochsetzsteller
- Netz- und Hochsetzstellerdrosseln
- EMV-Filter für PV- und Netzseite
- Aufbau im Unterrauftrag durch Fraunhofer IZM



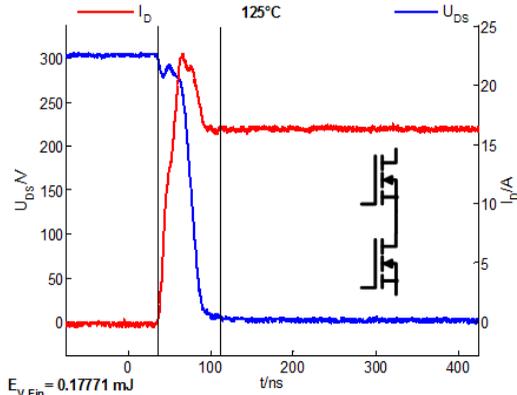
Quelle: Fraunhofer IZM



### Ansteuerplattform

- FPGA und DSP-basierte Ansteuerung
- Modulation und Taktfrequenzen wählbar
- Bedienung über Softwareoberfläche

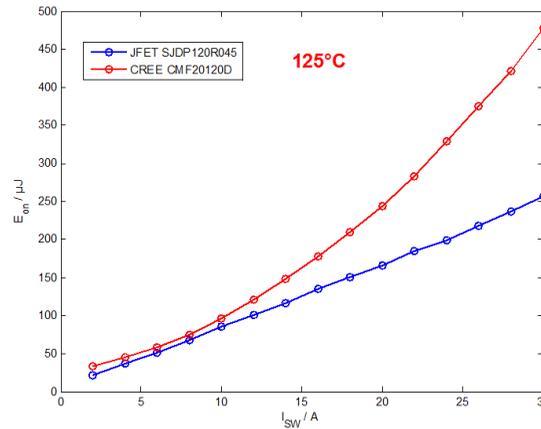
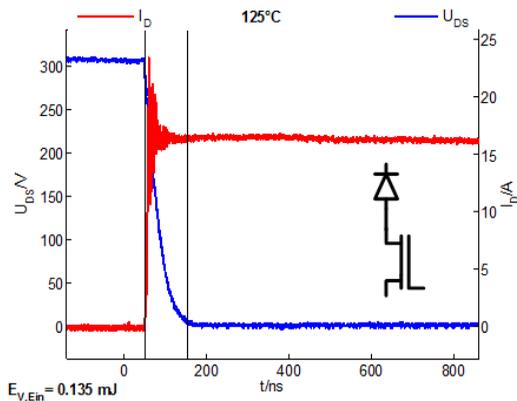
## Auswahl SiC-Leistungsschalter



### SiC-Schalter:

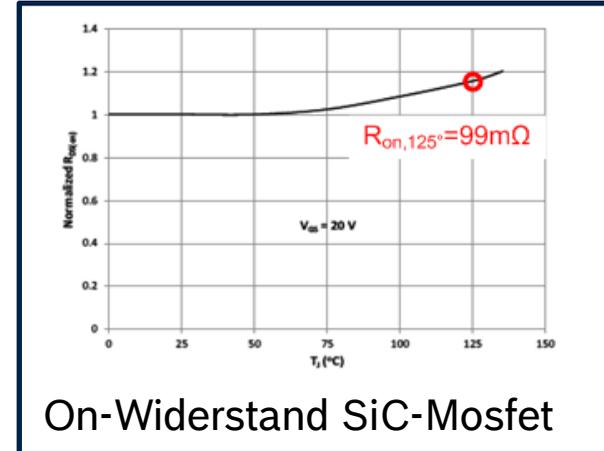
- ➔ **Mosfet** (CFD20120, Fa. Cree)
- ➔ **JFET** (Normally-on, Fa. Semisouth, SJDP120R045)

### Auswahl: Normally-On-JFET

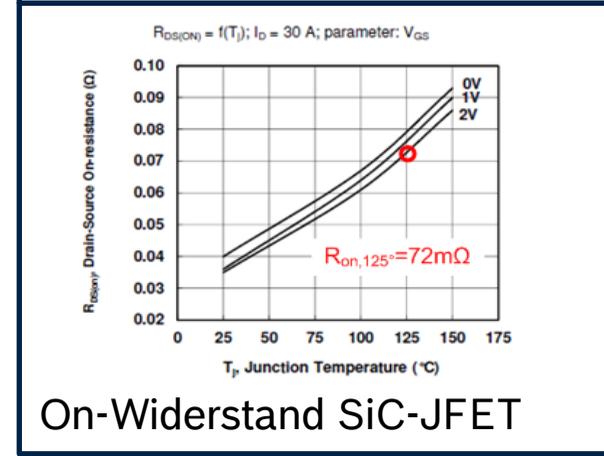


Vergleich Einschaltverhalten

Einschaltverluste bei U=300V



On-Widerstand SiC-Mosfet

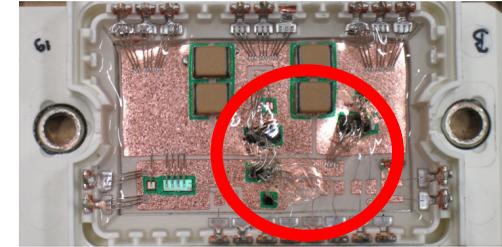


On-Widerstand SiC-JFET

## Invertermodule mit SiC-JFETs

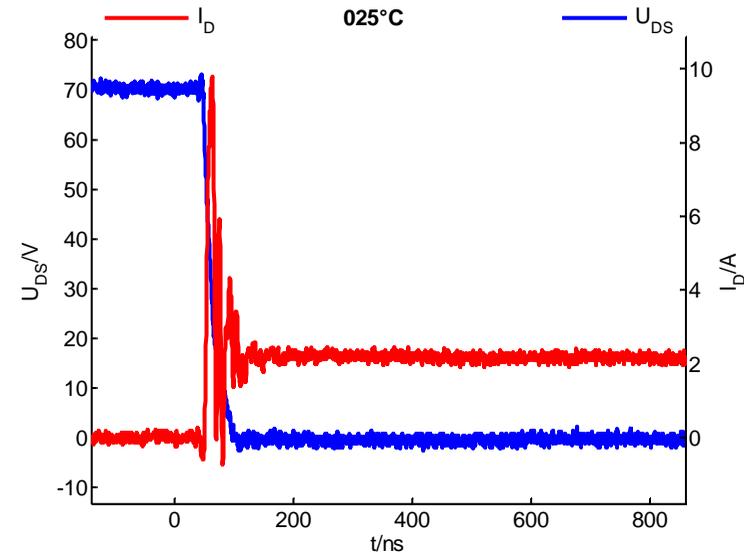
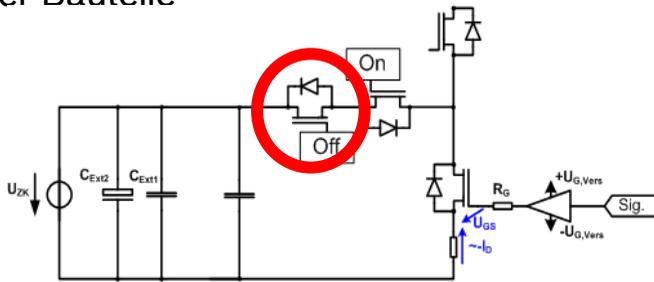
### Modulaufbau:

- Pro Modul je ein Brückenweig eines T-Type-NPC
- SiC-JFET mit paralleler SiC-Schottky-Diode



### Modulausfälle im Inverterbetrieb:

- Normally-on JFETS (Fa. Semisouth)
- Beobachtet wurde u.a. parasitäres Einschalten der Bauteile



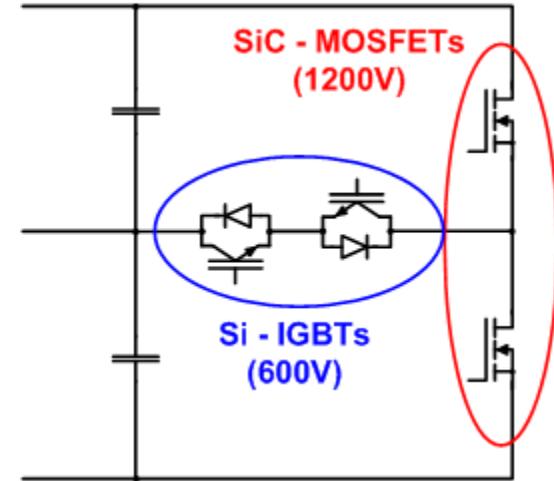
- Impedanz der Anschlüsse für die Gate-Ansteuerung wurde als kritischer Pfad identifiziert
- **Betrieb des Umrichters nur sehr eingeschränkt möglich**



## Alternative: Hybridsystem SiC / Si

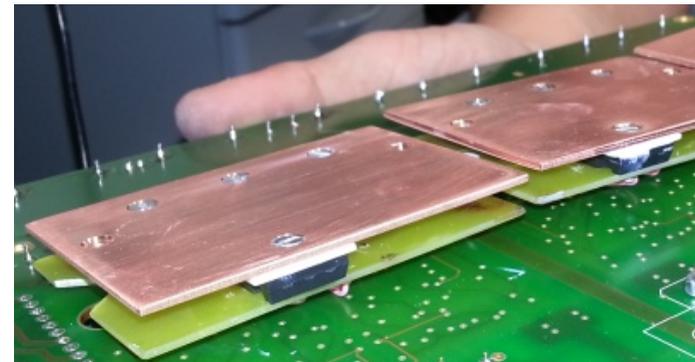
### Motivation:

- T-Type-NPC benötigt nur zwei 1200V-Bauteile pro Brückenzweig.
- SiC-Schalter zeigen Vorteile insbesondere bei hohen Sperrspannungen > 600V.
- Nutzung der Bodydiode der SiC-MOSFETS
- Bestens zur Validierung der Toolkette geeignet

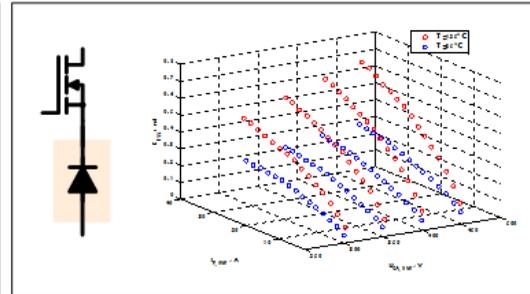
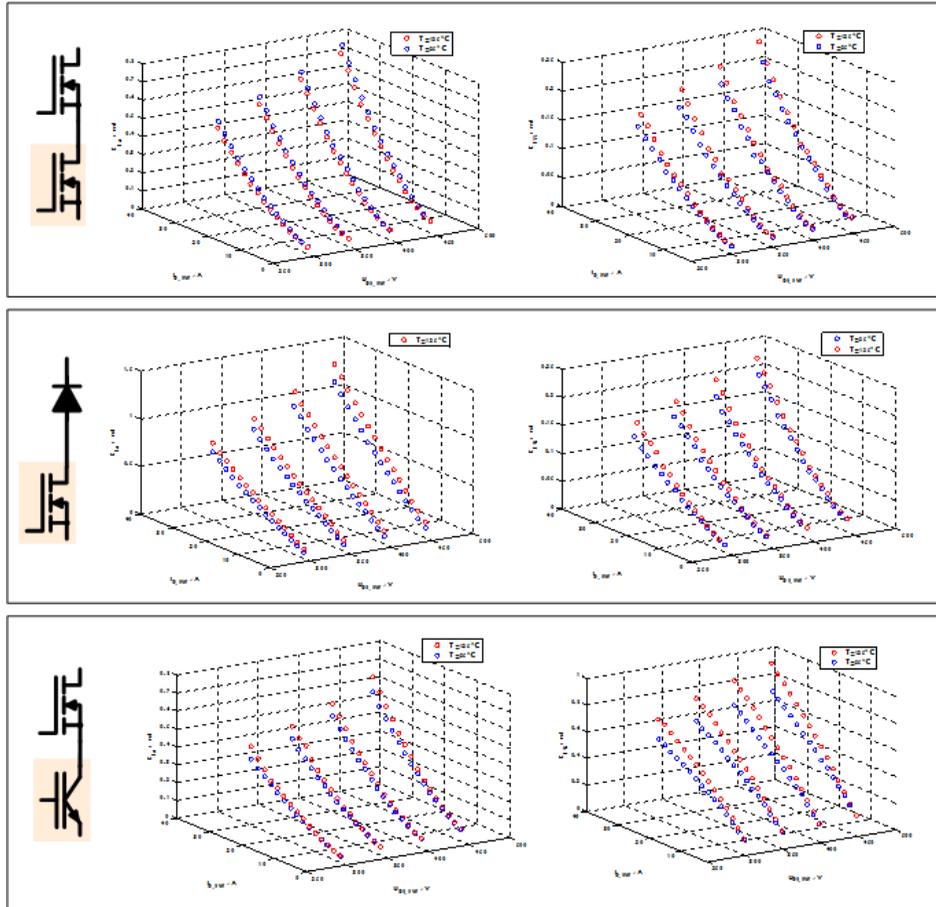


### Realisierung im vorhandenen Umrichter:

- Ersatz der ursprünglich vorgesehenen DBC-Module.
- Anpassung der bestehenden Gate – Units ( $U_{GS, SiC-MOS} = 0V / +18V$ )

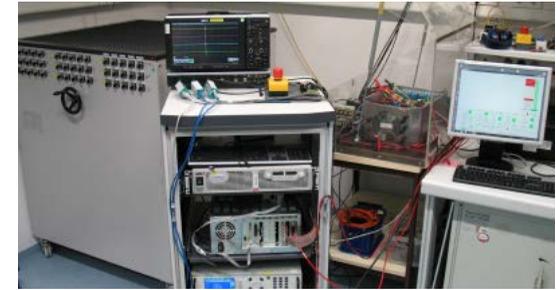
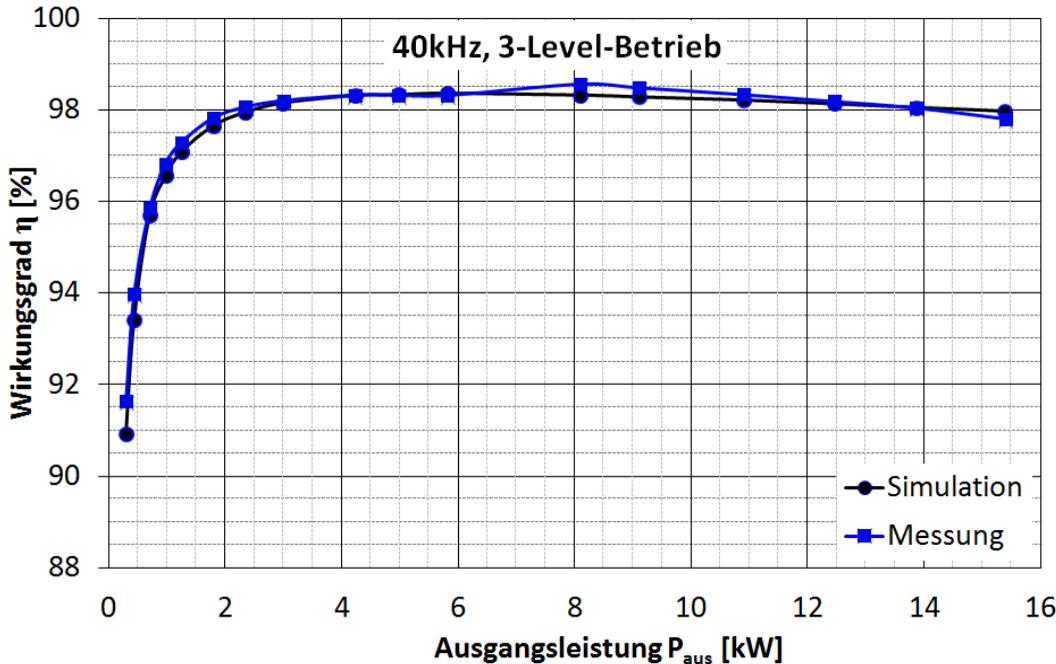


# Messungen der Schaltverluste des Hybridsystems



- Modellbildung für Verlustsimulation des Inverters
- Aufwand für Messung und Modellerstellung deutlich höher als bei Full-SiC-JFET-System

## Validierung: Wirkungsgrade



### 3-Levelbetrieb, $f_T = 40\text{kHz}$

- $\eta_{EU} = 98.2 \%$
- $\eta_{max} = 98.6 \%$

### 3-Levelbetrieb, $f_T = 30\text{kHz}$

- $\eta_{EU} = 98.2 \%$
- $\eta_{EU} = 98.5 \%$

### 2-Levelbetrieb, $f_T = 40\text{kHz}$

- $\eta_{EU} = 95.8 \%$
- $\eta_{max} = 97.2 \%$

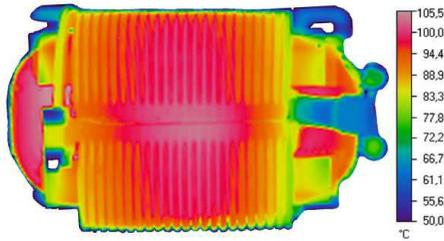
Europäischer Wirkungsgrad:

$$\eta_{EU} = 3\% \cdot \eta_{5\%} + 6\% \cdot \eta_{10\%} + 13\% \cdot \eta_{20\%} + 10\% \cdot \eta_{30\%} + 48\% \cdot \eta_{50\%} + 20\% \cdot \eta_{100\%}$$

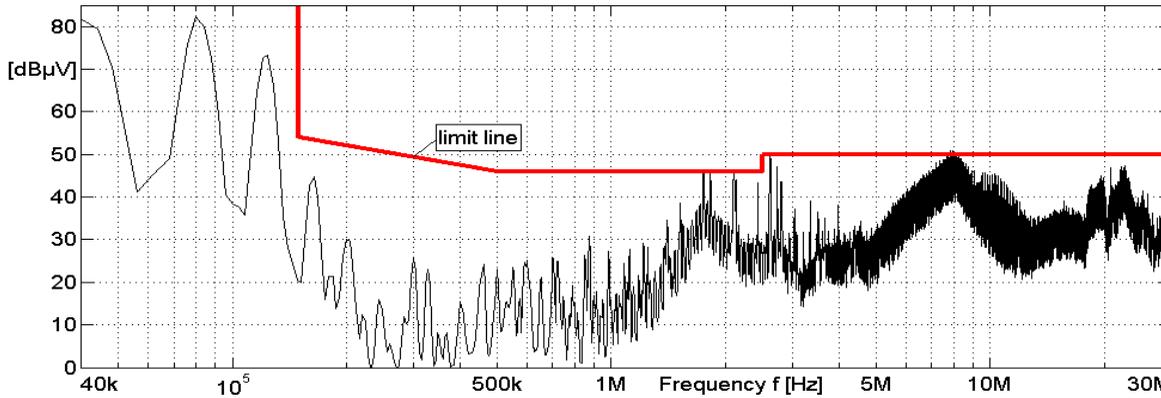
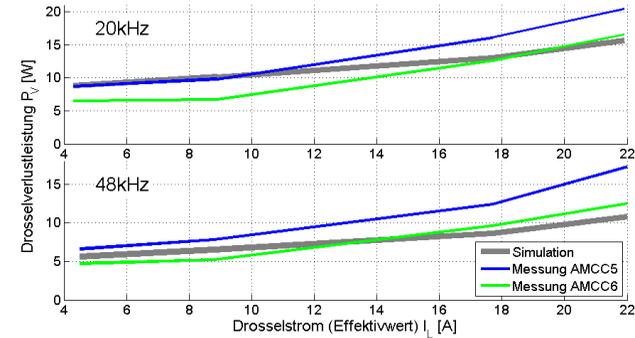


**BOSCH**

## Weitere Validierungsmessungen



→ Validierung der Drosselverluste durch elektrische und kalorimetrische Messungen.



→ Messung der leitungsgebundenen EMV-Störaussendung bei Bosch Power-Tec



**BOSCH**

## Ausblick

- Verbundprojekt 'SOlar' wurde im Mai 2013 abgeschlossen.
- Gemeinsamer Abschlussbericht wurde bereits veröffentlicht :  
Technische Informationsbibliothek Universitätsbibliothek Hannover (TIB)  
Link: <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb14/77574168X.pdf>
- Weiterentwicklungen der Softwaretools sind abgeschlossen und werden in Kürze released
- Nutzung der Funktionalitäten und der geschaffenen Schnittstellen zwischen den Tools dann möglich



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!