

Solar – **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



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

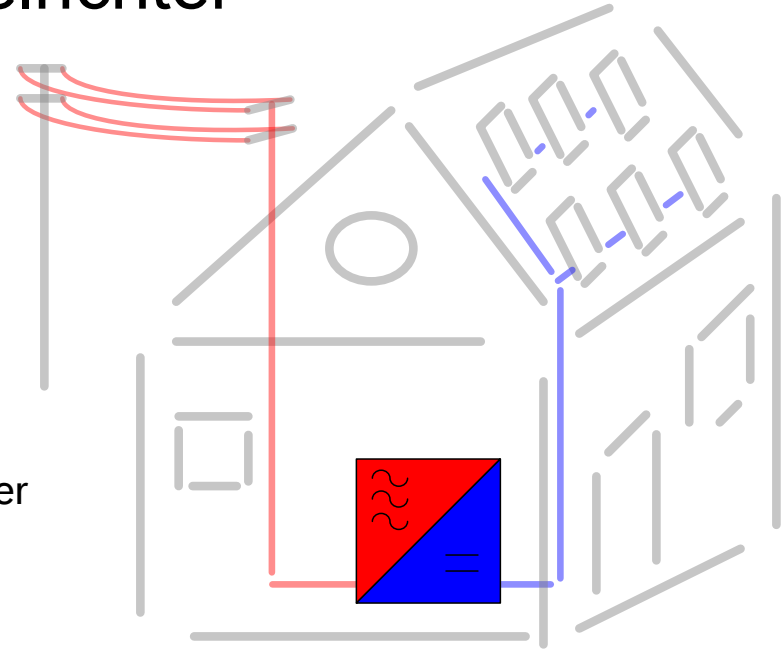
- Umwandlung von Gleichstrom in netzfrequenten Wechselstrom

Stand der Technik

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

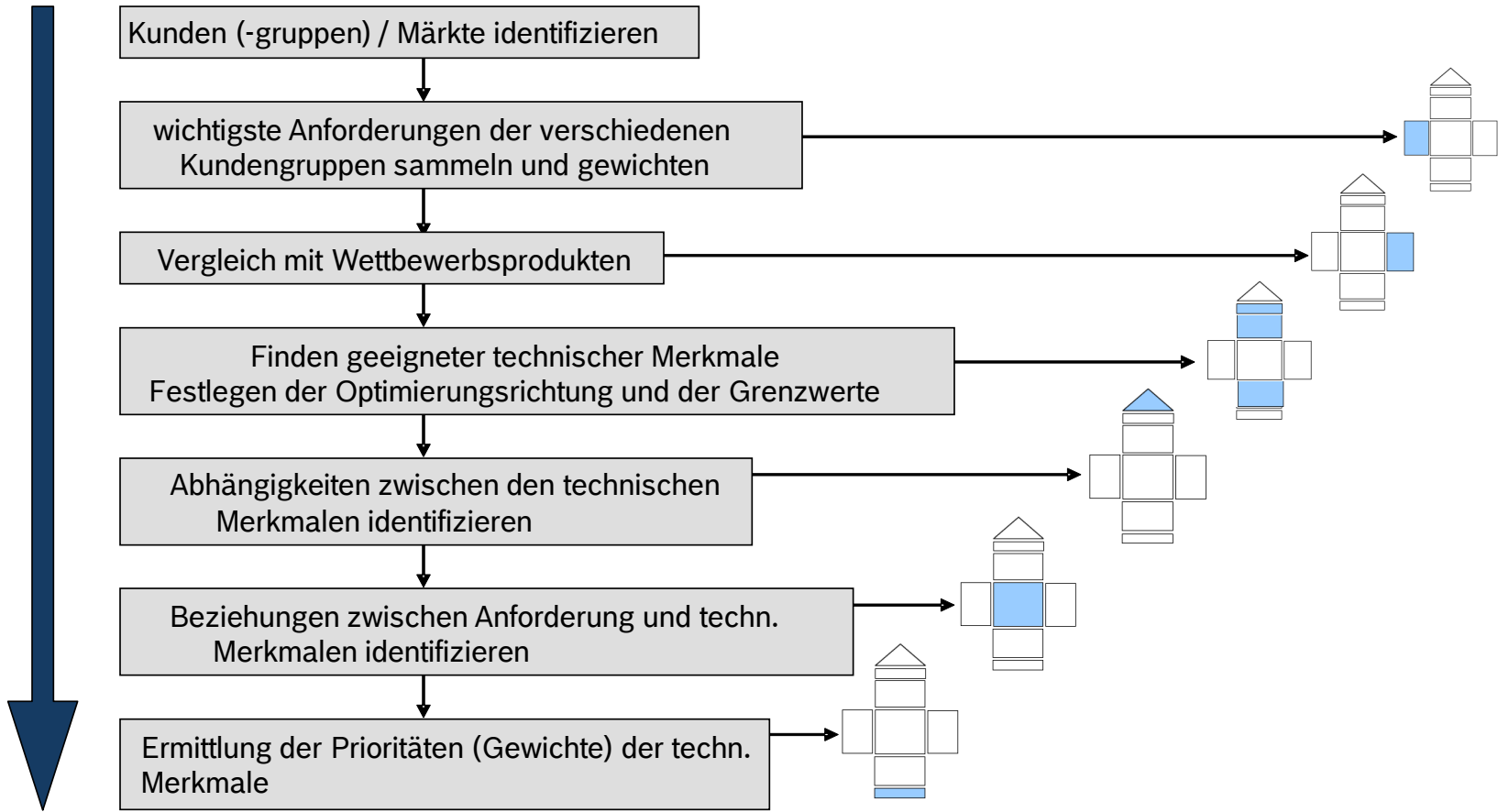
Herausforderungen in Zukunft

- Bauraumreduktion und Kostensenkung
- Einhaltung aller Standards

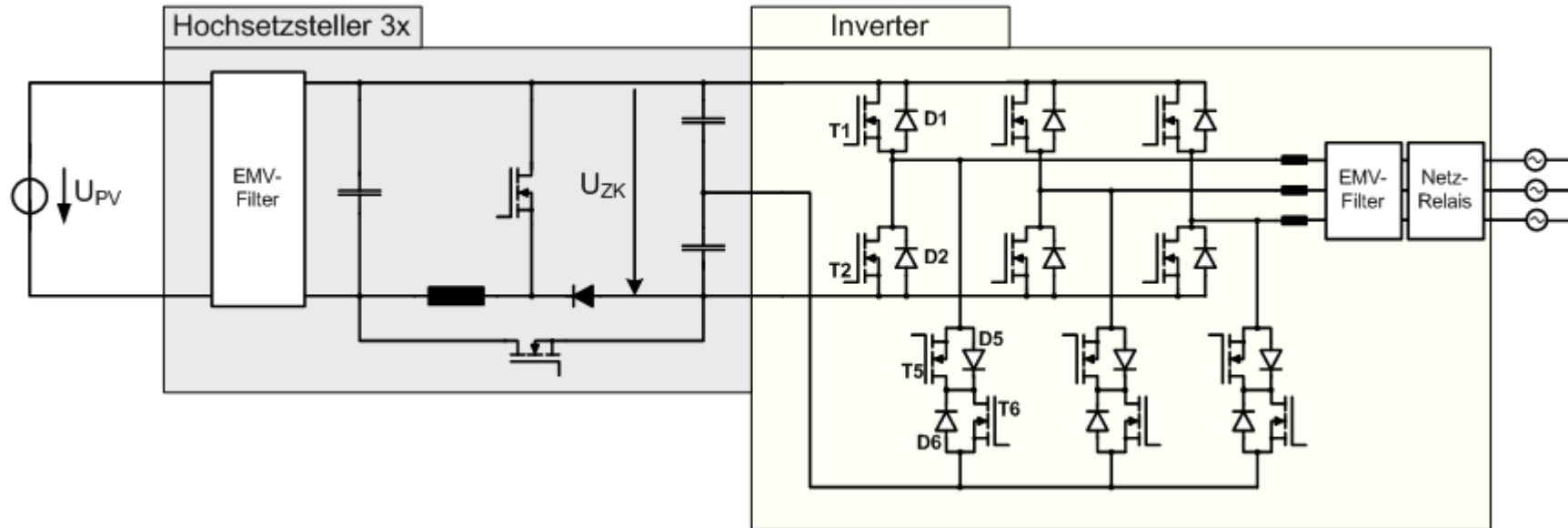


Multi-Domain-Simulationen des Systems unter Einbeziehung von EMV und Thermik sind wesentliche Voraussetzungen für das Erreichen zukünftiger Entwicklungsziele kompakter leistungselektronischer Komponenten

Anforderungsanalyse Solarwechselrichter

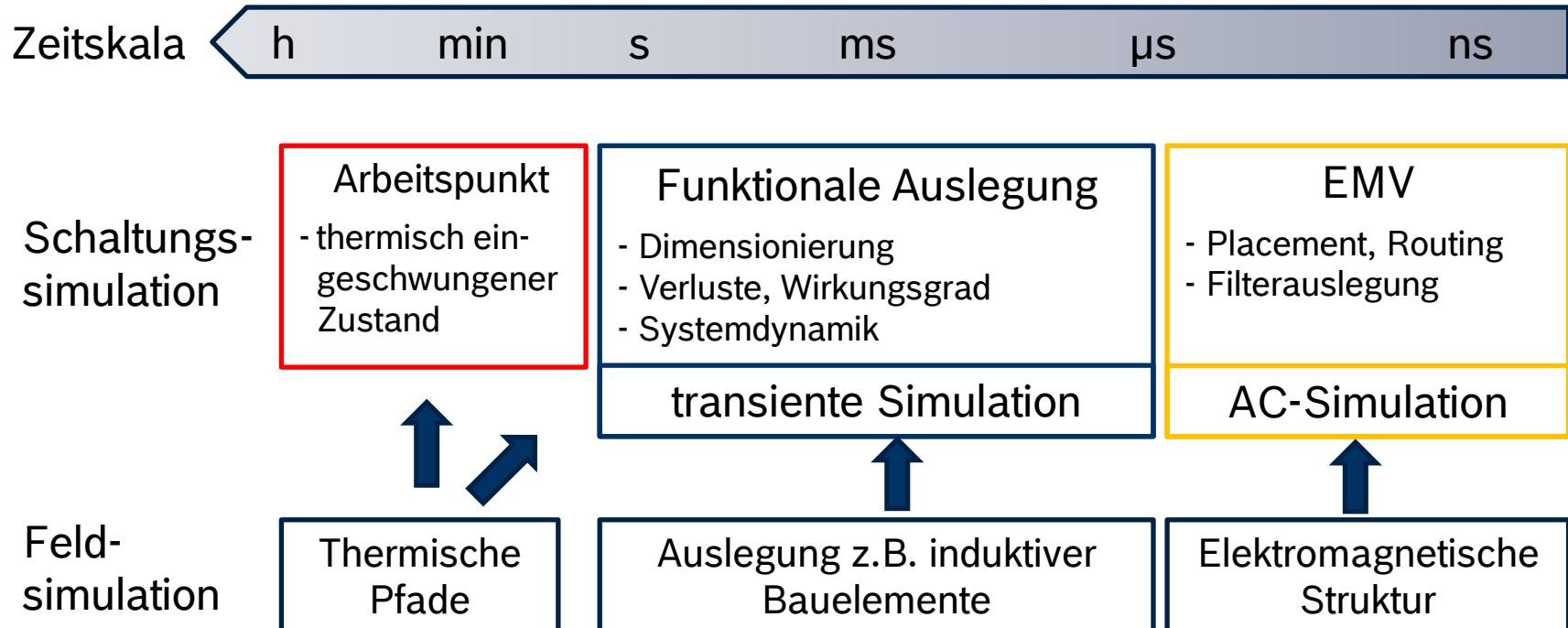


Ausgewählte Schaltungstopologie



- ➔ 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

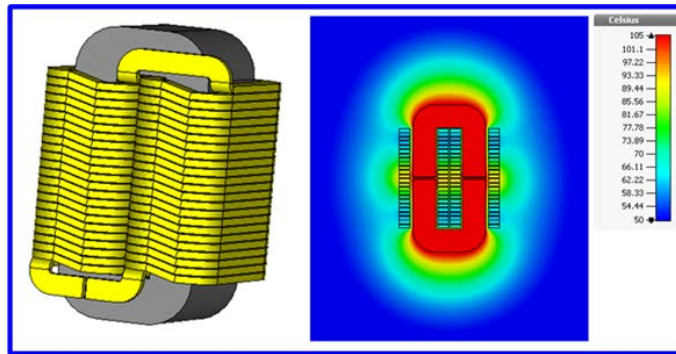
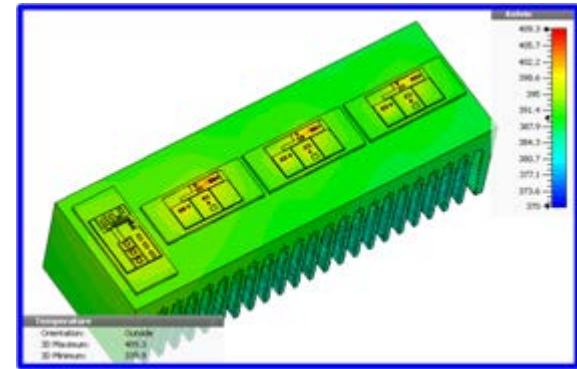
Anforderungen an die Toolkette



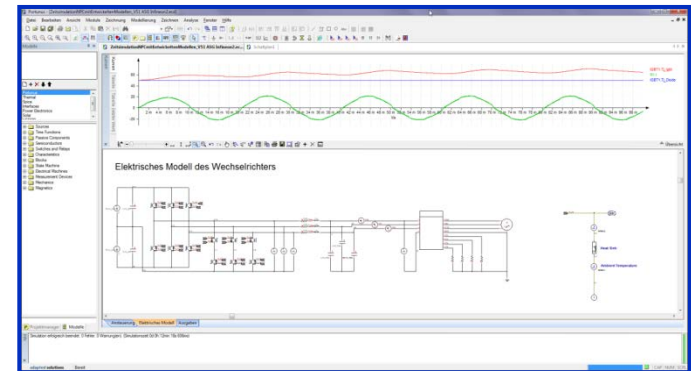
Modellbildung und -parametrierung und iterative Validierung

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

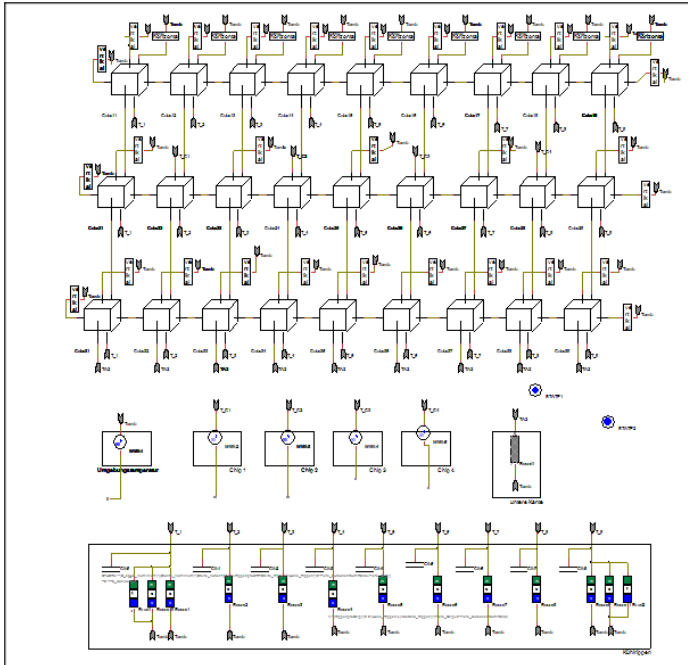


- Automatische Bestimmung des elektrothermischen Gleichgewichts
- Gekoppelte Schaltungssimulation


```
graph TD; Tj_max_0[Tj,max,0] --> Loss[Loss calculation for given temperature  
(Transient Simulation)]; Loss --> Pv[Pv]; Pv --> Avg_Temp[Calculation of average temperature  
out of losses  
(DC Calculation)]; Avg_Temp --> Tj_avg_n[Tj,avg,n]; Tj_avg_n --> Loss; Avg_Temp --> Final_Sim[Final Simulation  
(Transient Simulation)];
```

The flowchart illustrates an iterative process for calculating the average temperature. It begins with an input $T_{j,max,0}$ leading to a box labeled "Loss calculation for given temperature (Transient Simulation)". This box outputs P_v to a box labeled "Calculation of average temperature out of losses (DC Calculation)". This box then outputs $T_{j,avg,n}$ back to the "Loss calculation" box, forming a feedback loop. Additionally, the "Calculation of average temperature" box outputs to a final box labeled "Final Simulation (Transient Simulation)".

Beispiel: Kühlkörper-Netzwerkmodell



heatsink - Heat Sink

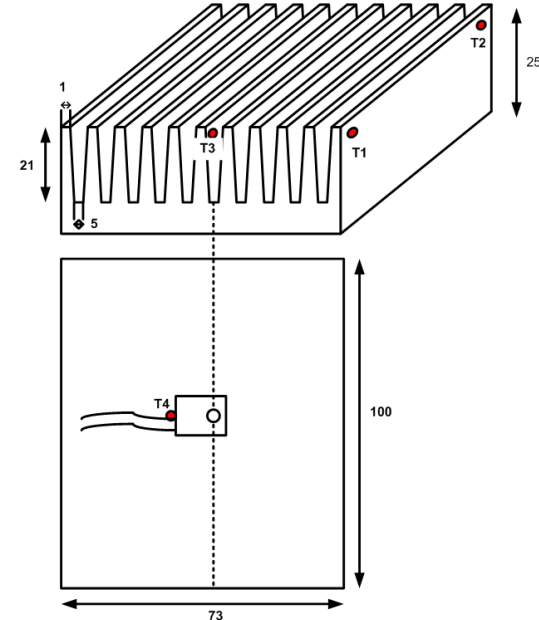
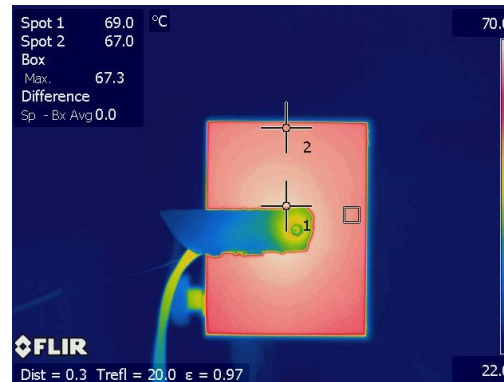
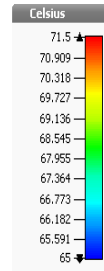
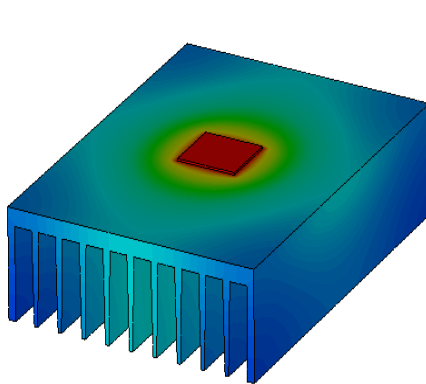
HS1 ☐ Anzeigen

Parameter Anzeige/Ausgaben

Geometry and Discretisation			
Height Heatsink [m]	0.02	Number of Cells - Height	1
Width Module [m]	0.0375	Number of Cells - Width Module	1
Width Gap (Module to Module) [m]	0.0375	Number of Cells - Width Gap (Module to Module)	1
Width Gap (Module to Border) [m]	0.01875	Number of Cells - Width Gap (Module to Border)	1
Depth Module [m]	0.125	Number of Cells - Depth Module	1
Depth Gap (Module to Border) [m]	0.025	Number of Cells - Depth Gap (Module to Border)	1
Height Cooling Fins [m]	0.0635		
Width inner Cooling Fins [m]	0.0048		
Width outer Cooling Fins [m]	0.01875/2		
Distance between Cooling Fins [m]	0.0125		
Number of inner Cooling Fins	22		
Number of Modules	4		
Initial Value			
Initial Temperature [K]	333.15		
Material Data			
Material	Aluminium (Alloy 195 Cast)	Material	Paint Aluminium
Thermal Conductivity [W/(m·K)]	236	Emissivity [W ⁴ /K ⁴ ·m ²]	0.5
Specif [Ws/(K·kg)]	833		
Rho [kg/m ³]	2790		
<input type="button" value="Variablen"/> <input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Abbrechen"/> <input type="button" value="Übernehmen"/>			

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

Vergleich der Kühlkörpermodelle



Quelle: CST AG

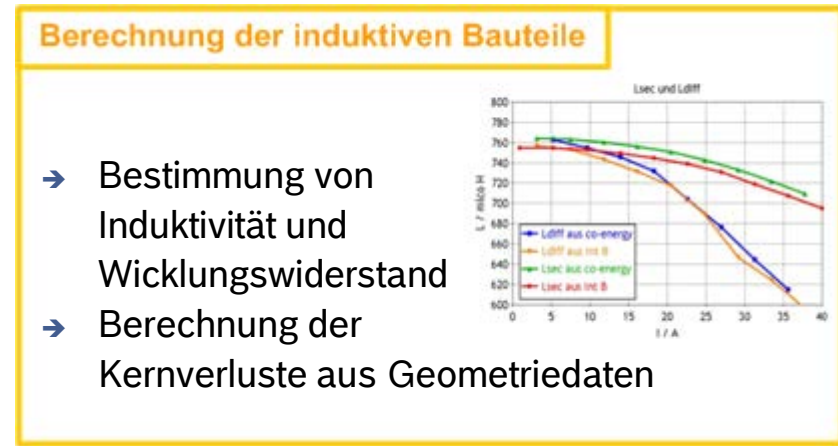
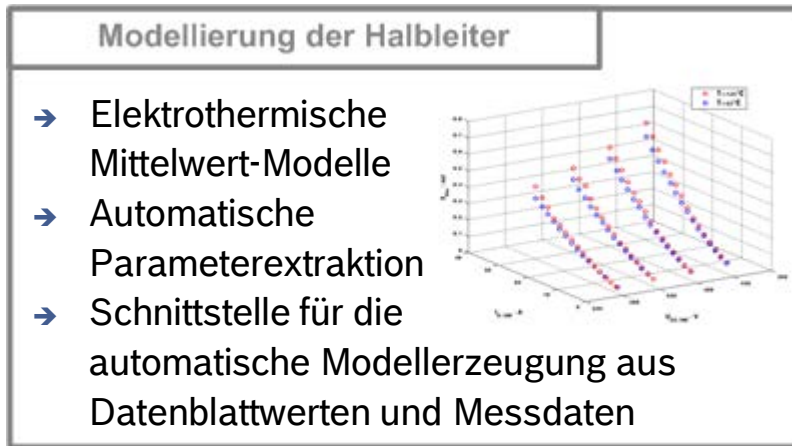
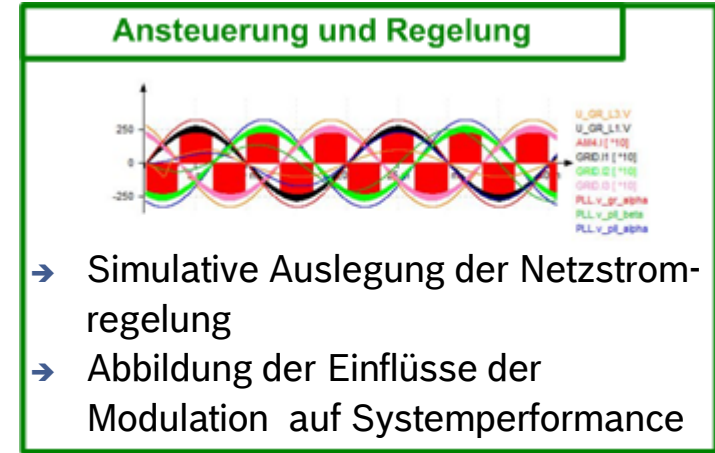
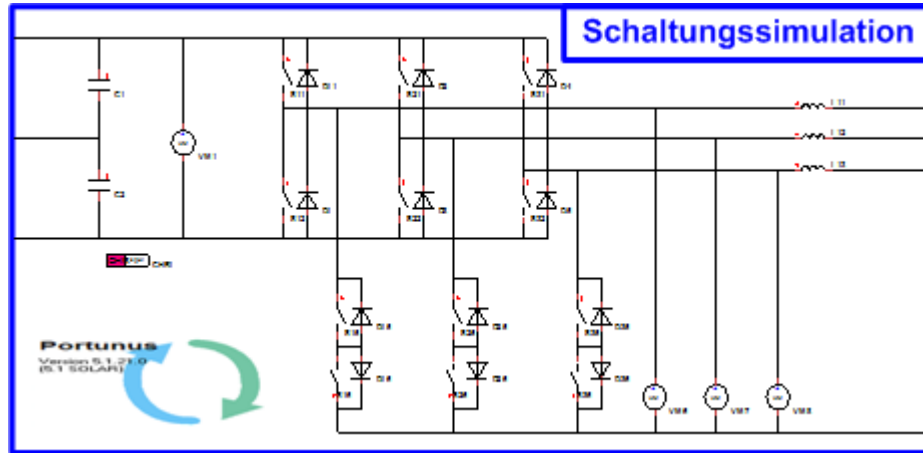
- Testkühlkörper frei umströmt aufgehängt
- Mehrere Temperaturmesspunkte, Thermographie der Oberfläche
- Leistung von 21W in der Mitte des Kühlkörpers eingepreßt (Fläche: 16mm x 17mm)

Zwei Simulationsansätze:

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

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

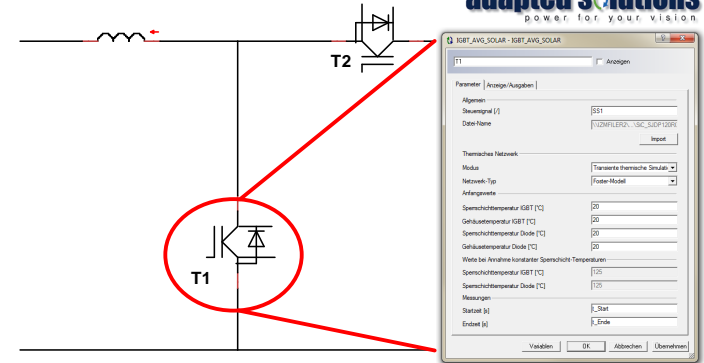
Funktionale Auslegung



Simulationsmodelle für Leistungshalbleiter

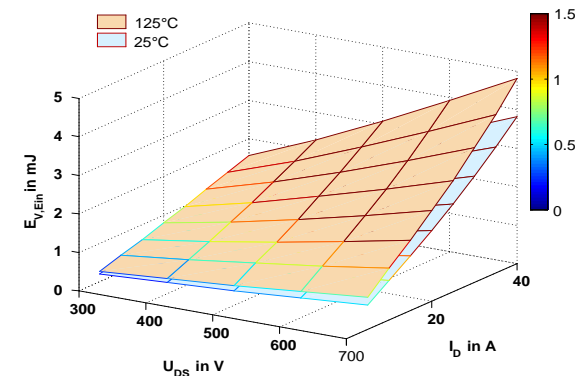
Anforderungen:

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



Generisches Halbleitermodell in Portunus

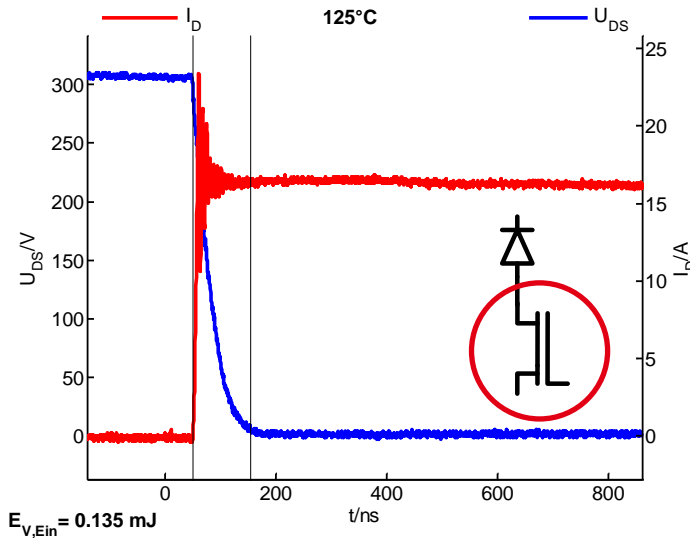
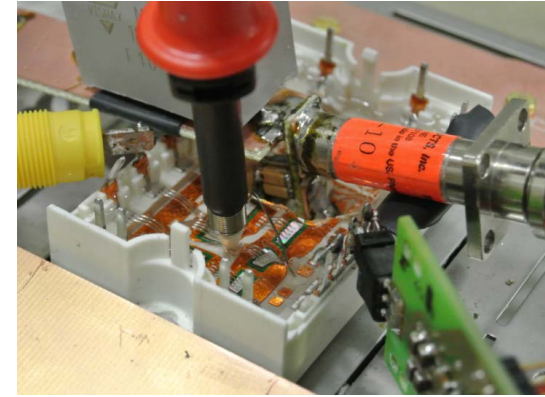
- Statische Kennlinien aus Datenblatt oder Messung
- Kurvenanpassung auf Zielfunktionen, Wertetabelle
- Dynamische Verluste aus Messung der Schaltenergien (Mittelwert-Modelle)
- Kennfeldmodelle (Spannung, Strom, Temperatur)



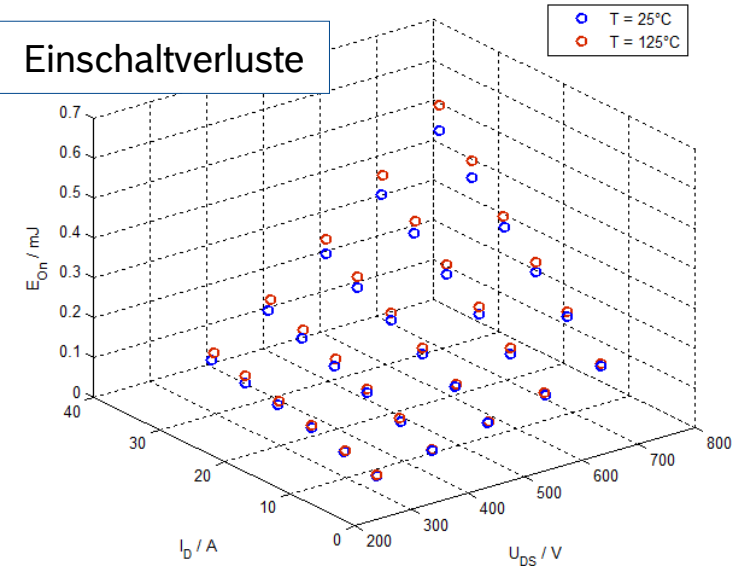
Beispiel: Hochsetzsteller Modul

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

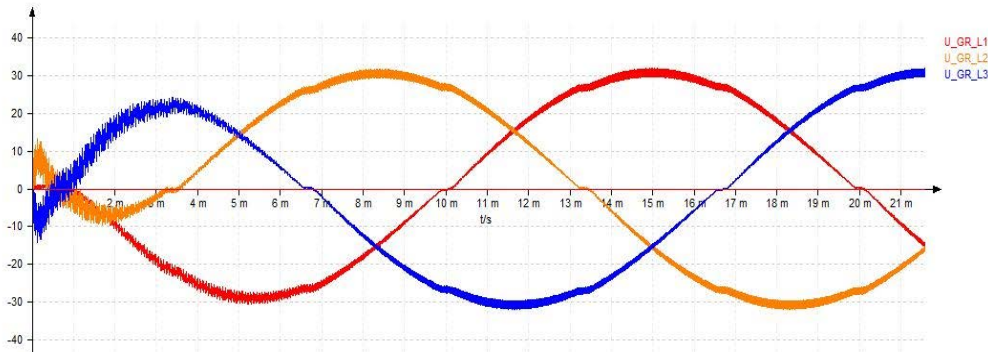
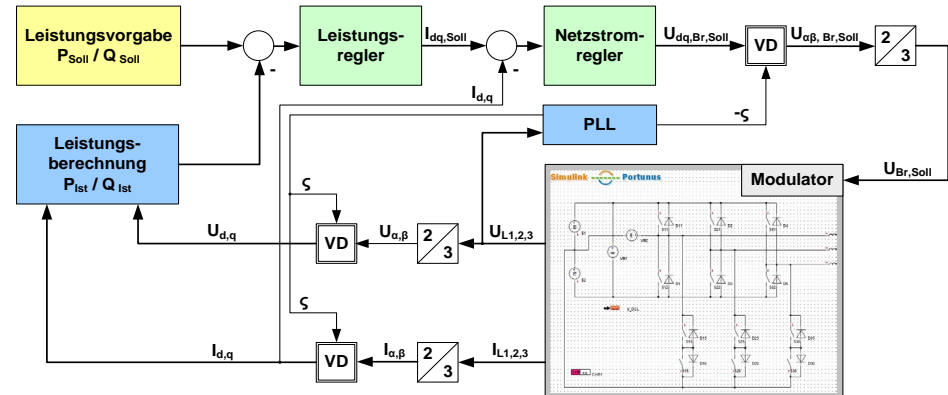


Einschaltverluste

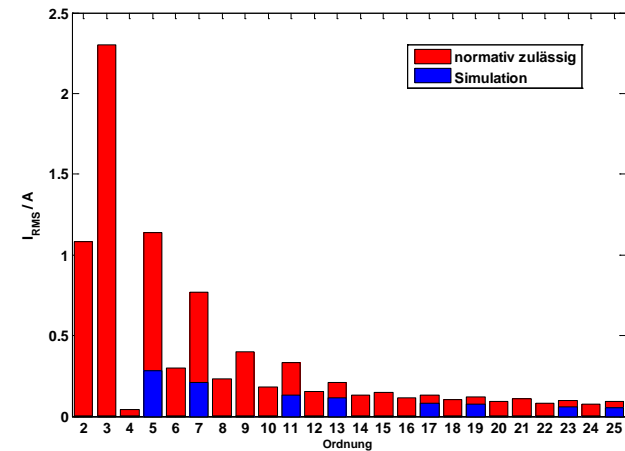


Netzstromregelung

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



Unterschreitung der normativ erlaubten
 Oberschwingungsströme

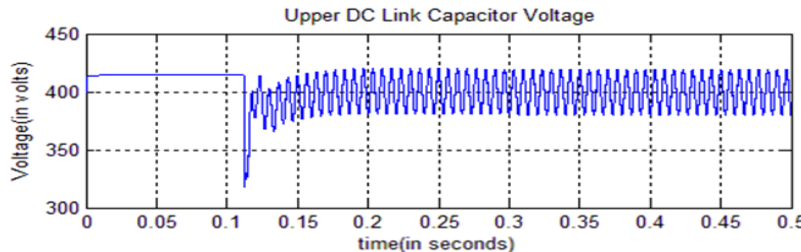
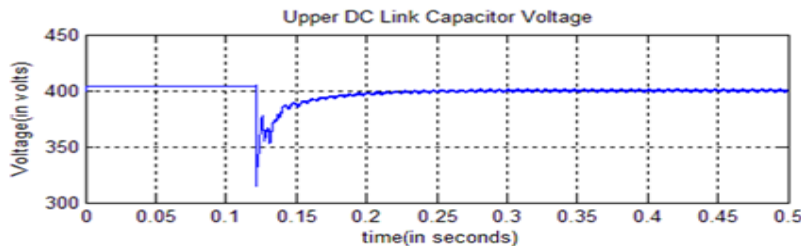


Glättung der Zwischenkreisspannungen

- 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.

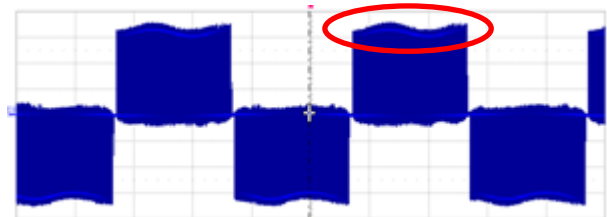
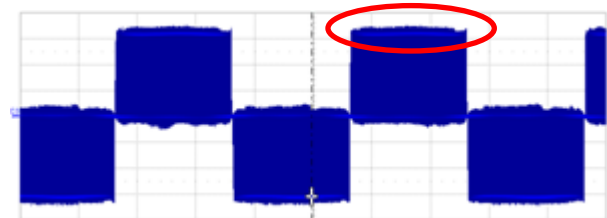
Simulation einer Kondensatorspannung

Oben mit Kompensation, Unten ohne

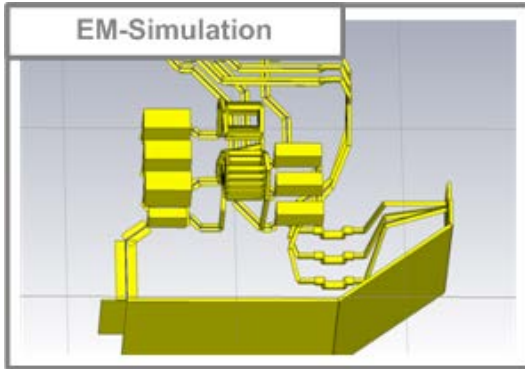


Messung einer Modulspannung

Oben mit Kompensation, Unten ohne



EMV-Simulation: Toolkette

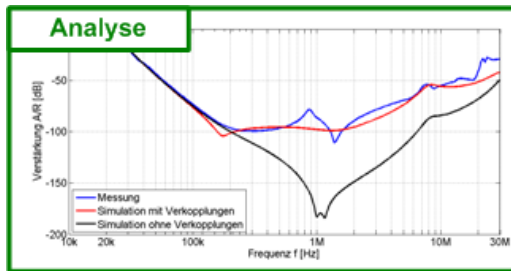


Extraktion der Strukturparasiten für Schaltungssimulation

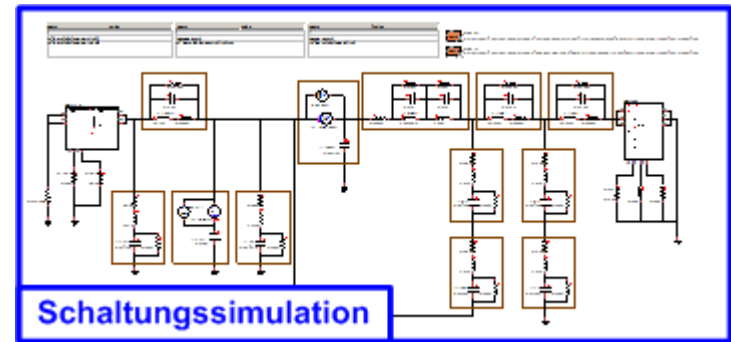
- Optimierte graphische Partitionierung, automatischer Aufruf von Fast Henry und Schnittstelle zu Portunus
- Verbesserung des CST-PEEC-Algorithmus
- Erweiterung um temperaturabhängige Materialparameter
- Frequenzbereichssimulationen von Filterbauelementen



- Optimierung des Layouts
- Anpassung der Komponenten



- Methode zur Vereinfachung der sehr komplexen Strukturen entwickelt und getestet



Simulation der EMV-Störaussendung

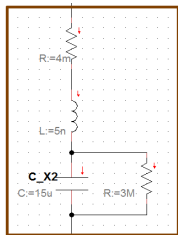
- Erweiterung der Modellbibliothek:
 - Koppelmatrizen
 - Frequenzgang-Basiselemente
- Komfortable Schnittstellen zu CST-Tools



Modelle zur EMV-Untersuchung

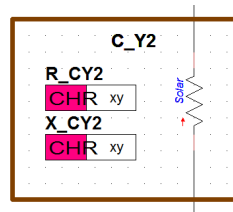
Beispiel:

Modell eines realen Kondensators mit parasitären Bauelementen

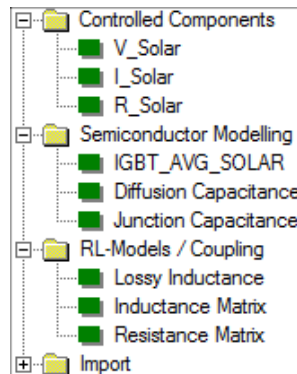
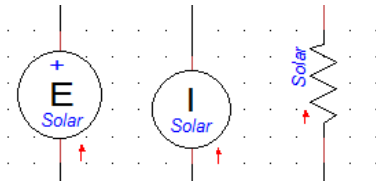


Impedanzmessung des realen Bauelements

Ersatz durch frequenzabhängige komplexe Impedanz

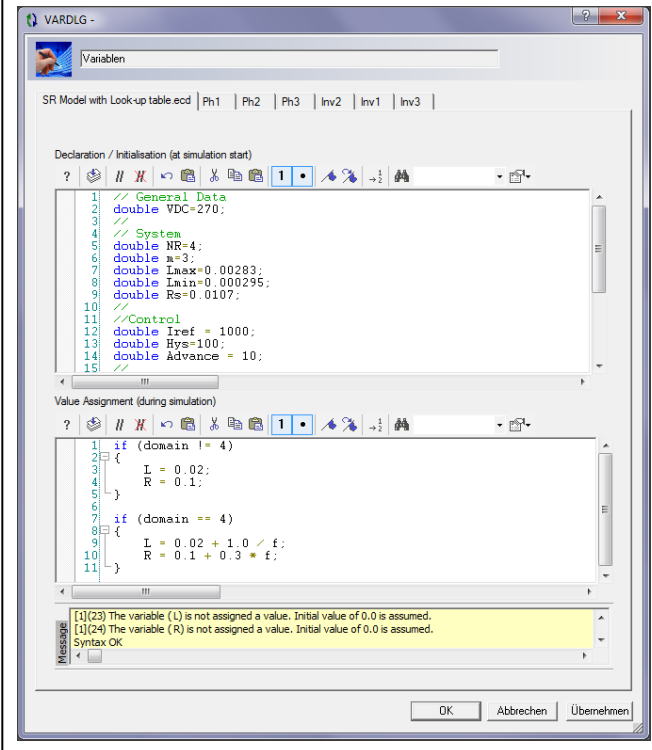


Solar-Modelle:

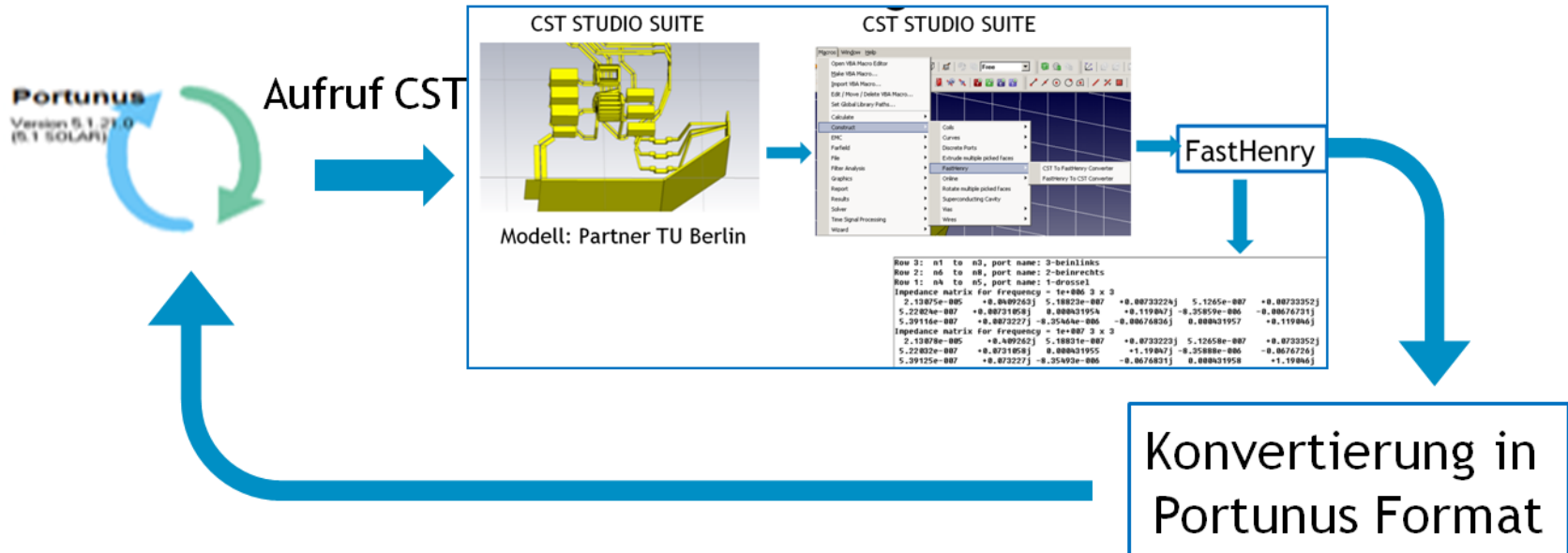


Formelmodul für

frequenzabhängige Parameter

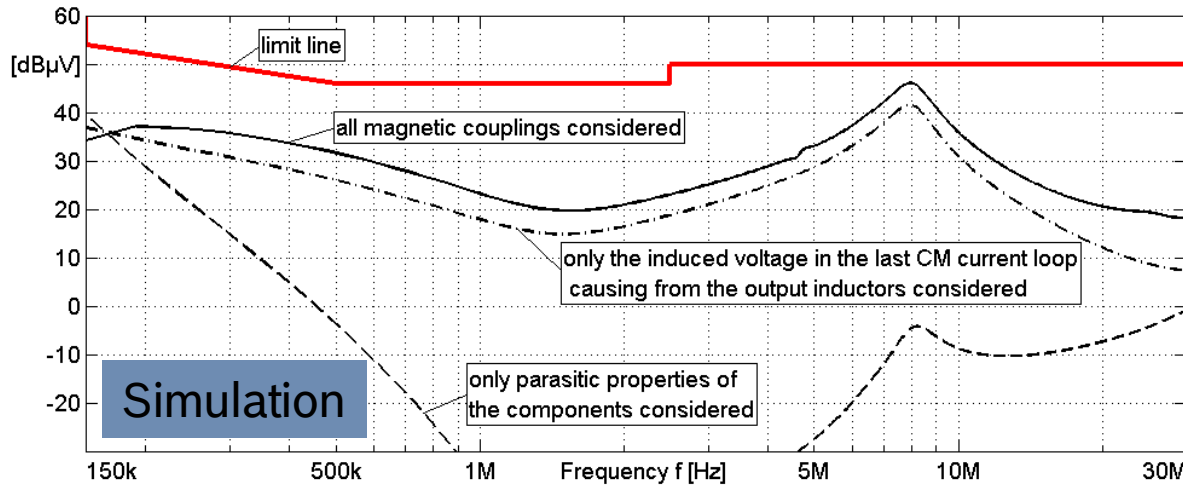


Kopplung der funktionalen und EM - Simulation

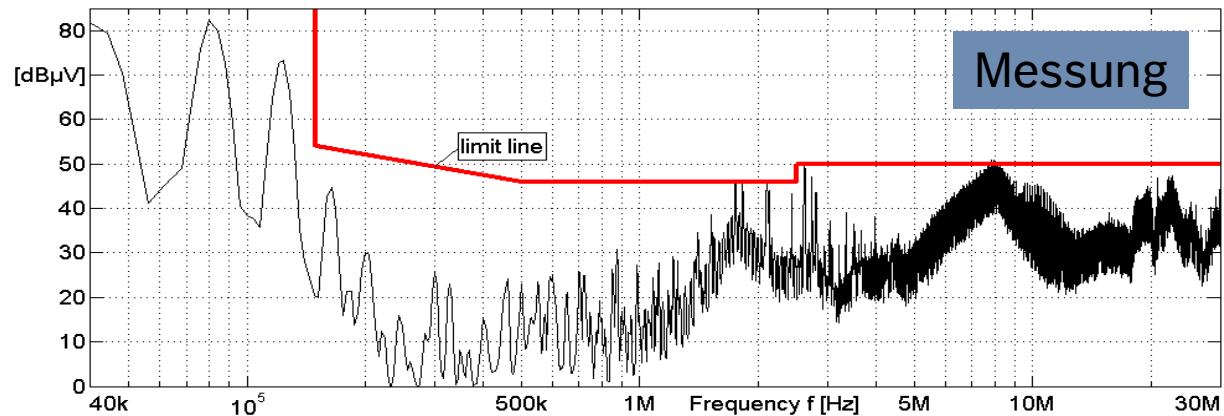


- ➔ Aufbereitung der Struktur in CST Studio Suite
- ➔ Berechnung der Parasitics (L, M, R) durch PEEC-Solver
 - ➔ Aufruf des Solvers ‚Fast Henry‘ / Nutzung des CST - eigenen PEEC-Solvers
- ➔ Simulation und Ergebnisanalyse im Schaltungssimulator

Einflüsse auf die netzseitige Störspannung

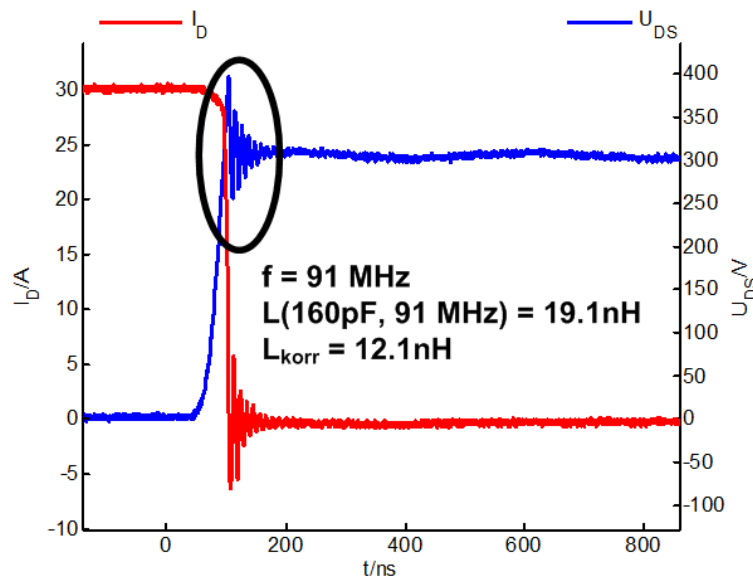
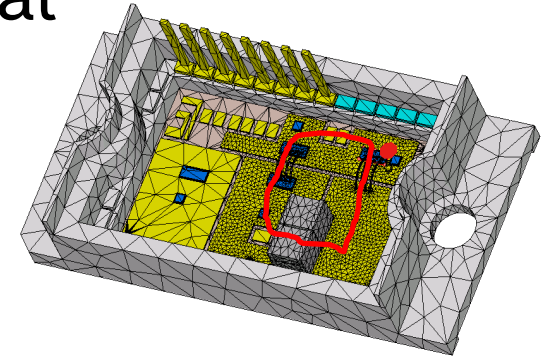


Quelle: TU Berlin

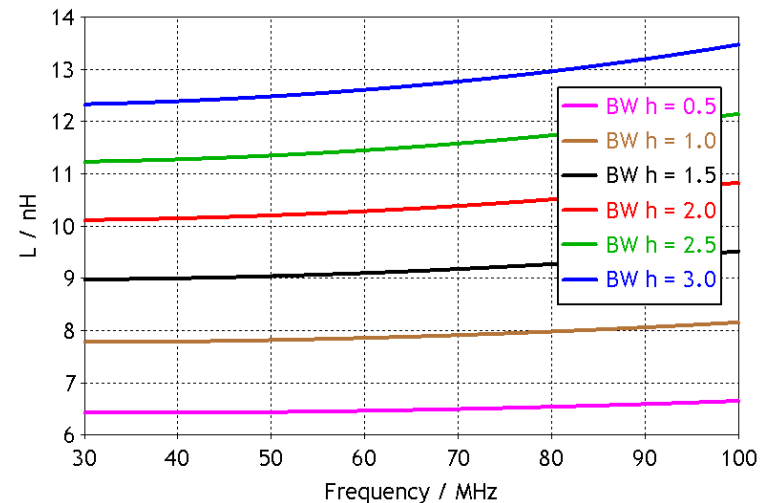


Beispiel: Kommutierungsinduktivität

- 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

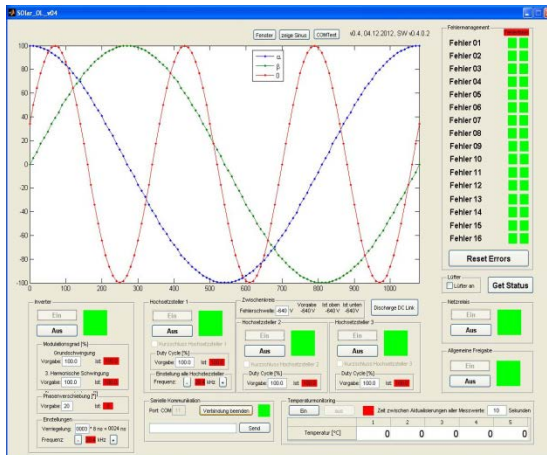


BOSCH

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

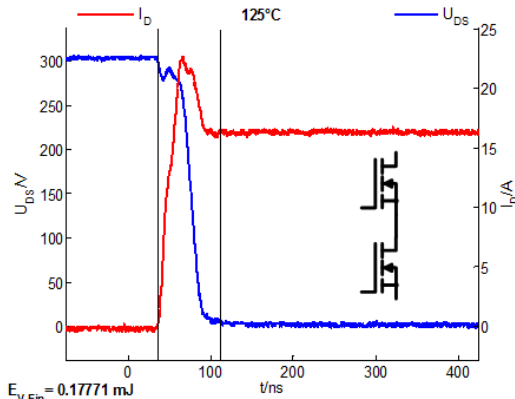


Quelle: Fraunhofer IZM

Ansteuerplattform

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

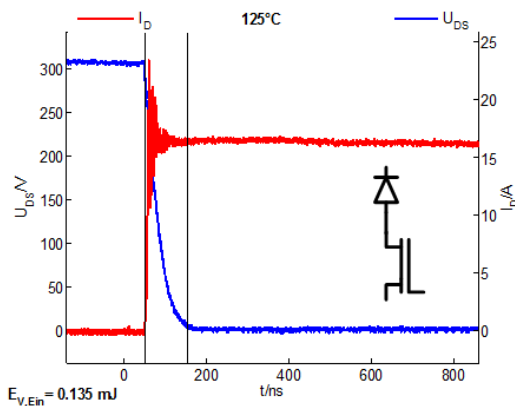
Auswahl SiC-Leistungsschalter



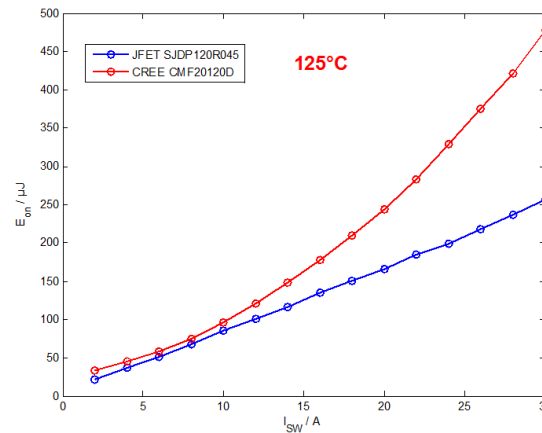
SiC-Schalter:

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

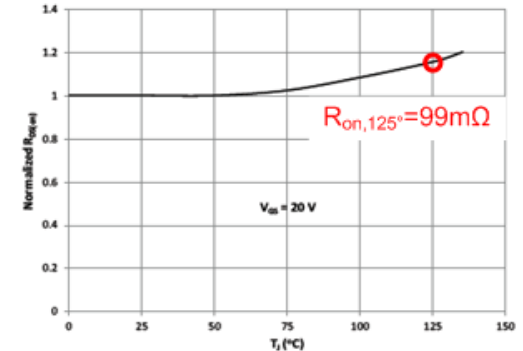
Auswahl: Normally-On-JFET



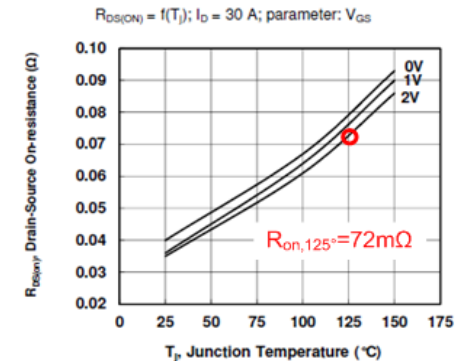
Vergleich Einschaltverhalten



Einschaltverluste bei U=300V



On-Widerstand SiC-Mosfet

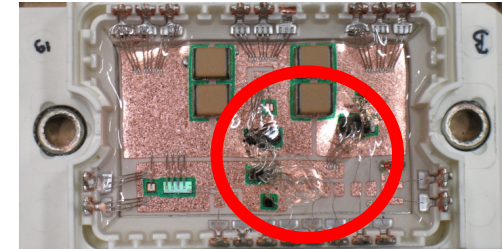


On-Widerstand SiC-JFET

Invertermodule mit SiC-JFETs

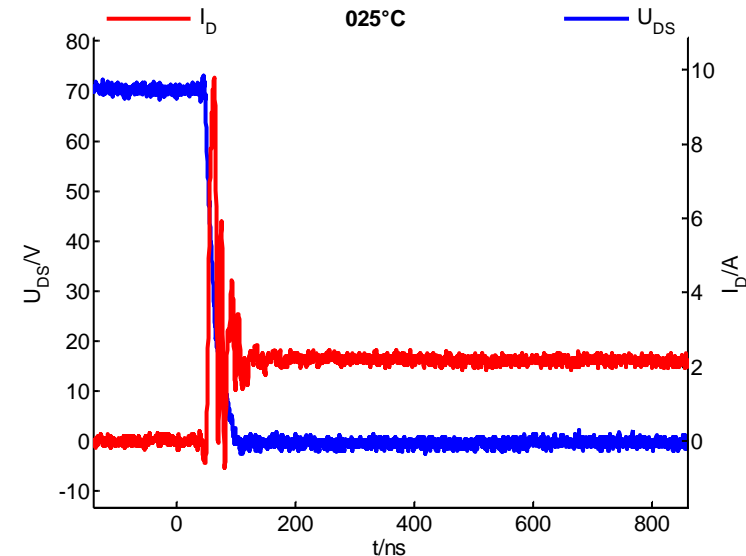
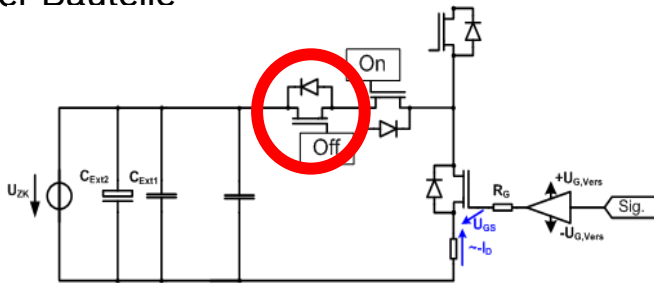
Modulaufbau:

- Pro Modul je ein Brückenzeig 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

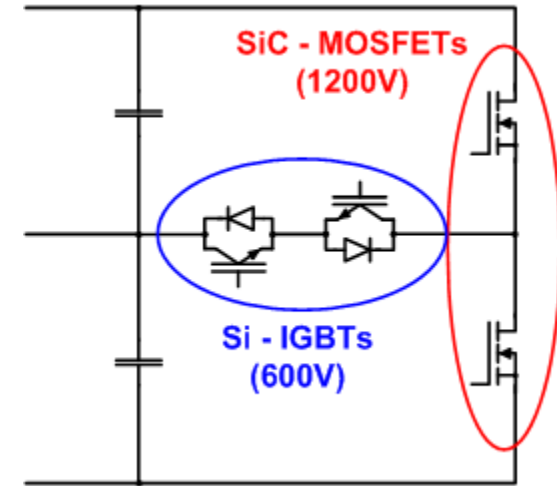


- Impedanz der Anschlüsse für die Gate-Ansteuerung wurde als kritischer Pfad identifiziert
- **Betrieb des Umrichters nur sehr eingeschränkt möglich**

Alternative: Hybridsystem SiC / Si

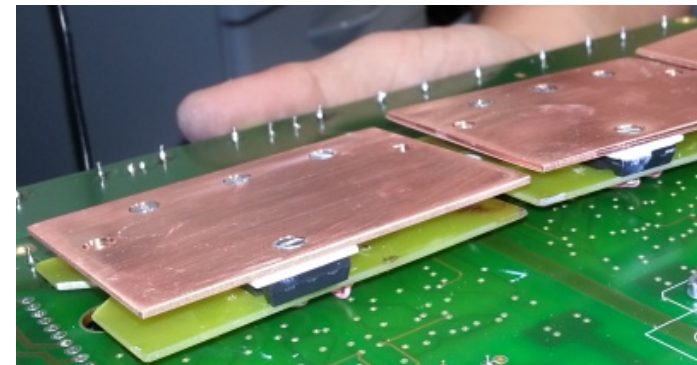
Motivation:

- 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

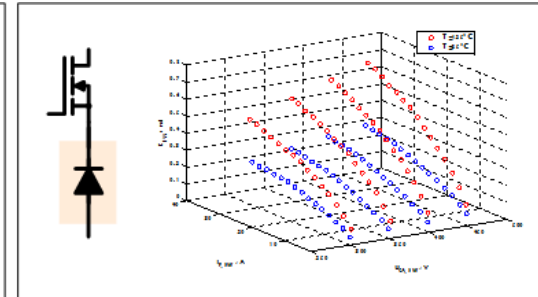
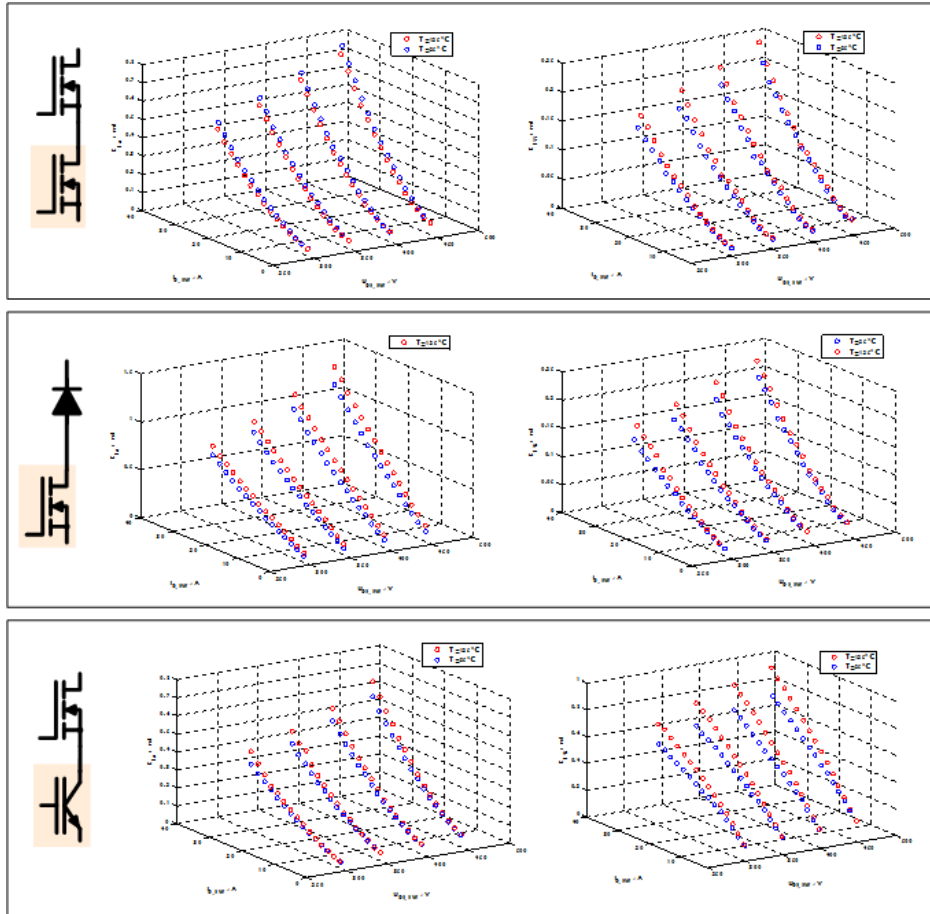


Realisierung im vorhandenen Umrichter:

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

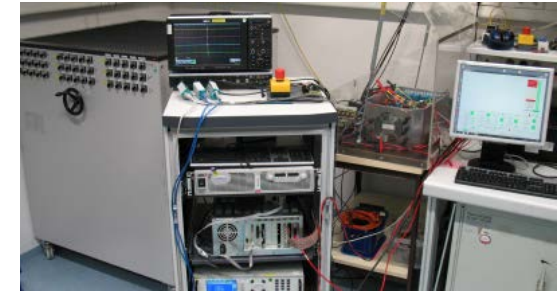
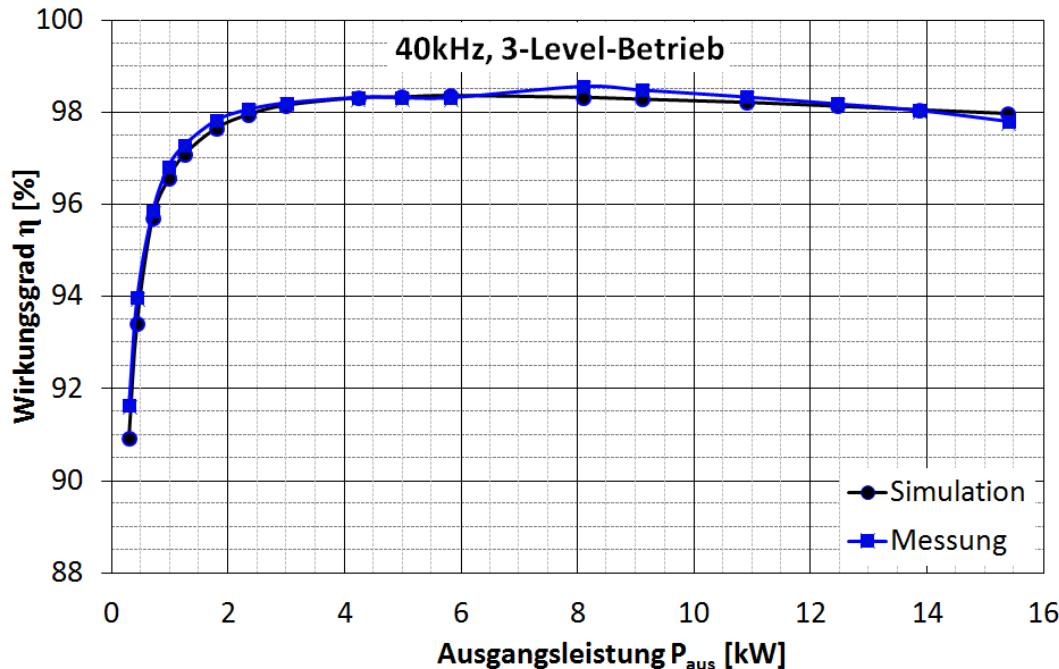


Messungen der Schaltverluste des Hybridsystems



- 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, $f_T = 30\text{kHz}$

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

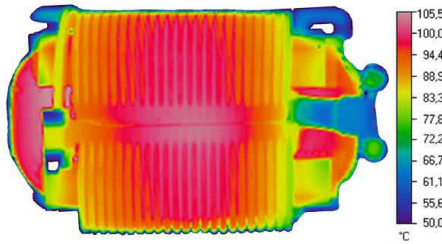
2-Levelbetrieb, $f_T = 40\text{kHz}$

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

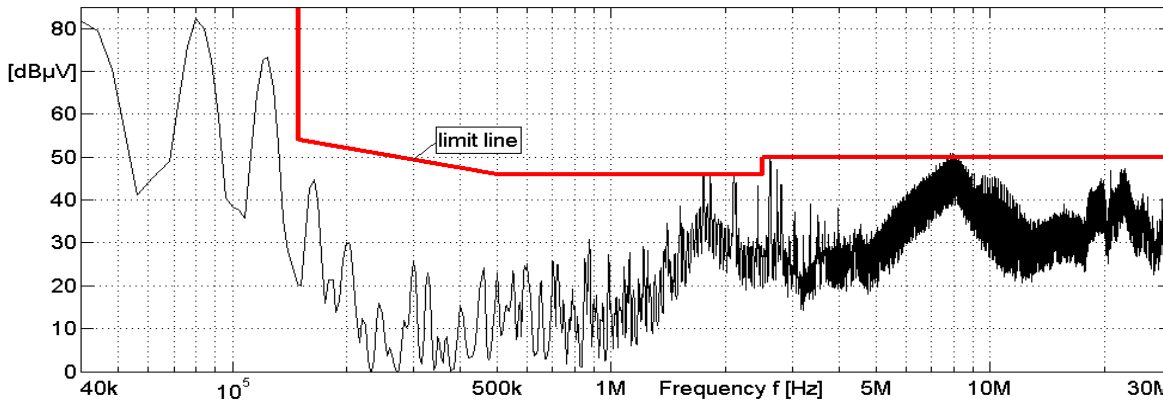
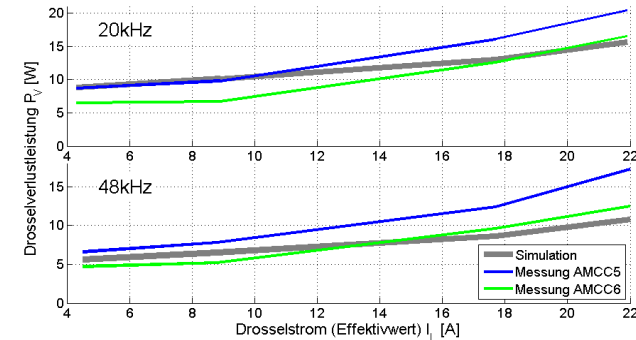
Europäischer Wirkungsgrad:

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

Weitere Validierungsmessungen



→ Validierung der Drosselverluste durch elektrische und kalorimetrische Messungen.



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

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!