

#### VERGLEICH ZWISCHEN HARDWARE- UND SIMULATIONSBASIERTEM ENTWICKLUNGSPROZESS AM BEISPIEL EINES WBG-LEISTUNGSMODULS

CADFEM ELEKTROMAGNETIK TECHNOLOGIETAGE 18.06.2021



#### Holger Gerstner, Fraunhofer IISB



## Agenda

- Herausforderungen in der Entwicklung von Antriebsumrichtern
- Entwurfsmethodik für Leistungsmodule
- Hardwarebasierter Designprozess
- Simulationsbasierter Designprozess
- Simulationsunterstützter Entwicklungsprozess von Leistungsmodulen
- Zusammenfassung



## Agenda

- Herausforderungen in der Entwicklung von Antriebsumrichtern
- Entwurfsmethodik für Leistungsmodule
- Hardwarebasierter Designprozess
- Simulationsbasierter Designprozess
- Simulationsunterstützter Entwicklungsprozess von Leistungsmodulen
- Zusammenfassung



#### Herausforderungen in der Entwicklung von Antriebsumrichtern

- Anforderungen an Stromtragfähigkeit führt zur Parallelschaltung von Leistungshalbleiterbauelementen
- Kurzschlussfestigkeit
- Hohe Anforderungen an Zuverlässigkeit und Lebensdauer
- Einhaltung der maximalen Spannungsgradienten
- Einhaltung der Spannungsratings über den gesamten Betriebsbereich

Halbleiterschalter	Technologie	$U_{ m drv,rec}$	$C_{ m g}$	${U}_{ m th}$
GS66508B	GaN-HEMT	$6\mathrm{V}$	$0,\!23\mathrm{nF}$	$1,1\mathrm{V}$
IMZA65R048M1H	SiC-MOSFET	$18\mathrm{V}$	$1,\!12\mathrm{nF}$	$_{3,5\mathrm{V}}$
IPBE65R050CFD7A	Si-MOSFET	$20\mathrm{V}$	$4,\!86\mathrm{nF}$	$_{3,5\mathrm{V}}$
STGWA30HP65FB	Si-IGBT	$15\mathrm{V}$	$_{3,46\mathrm{nF}}$	$5\mathrm{V}$

Allgemeine Anforderung

Im Besonderen Anforderungen an WBG-Umrichter

WBG-Schalter erreichen nur in darauf abgestimmten Schaltzellen ihr Leistungspotential



## Agenda

- Herausforderungen in der Entwicklung von Antriebsumrichtern
- Entwurfsmethodik f
  ür Leistungsmodule
- Hardwarebasierter Designprozess
- Simulationsbasierter Designprozess
- Simulationsunterstützter Entwicklungsprozess von Leistungsmodulen
- Zusammenfassung



# Entwurfsmethodik für Leistungsmodule





# Entwurfsmethodik für Leistungsmodule



- Schaltverhalten
- Stromaufteilung
- Gatekreisverhalten →Timing der Einzelschalter
- Strom- und Spannungsratings
- Schutzbeschaltungen
- Strom- und Spannungsgradienten
- Oszillationsverhalten
- CM-Ströme



#### Entwurfsmethodik für Leistungsmodule

- Schaltverhalten ergibt sich aus Wechselwirkung aller Elemente in der Schaltzelle
- Von Datenblatt oder charakteristischen Werten kann nur begrenzt auf das dynamische Verhalten geschlossen werden
- Auf Grund der vielen
   Randbedingungen zwangsläufig iterativer Entwicklungsprozess







## Agenda

- Herausforderungen in der Entwicklung von Antriebsumrichtern
- Entwurfsmethodik für Leistungsmodule
- Hardwarebasierter Designprozess
- Simulationsbasierter Designprozess
- Simulationsunterstützter Entwicklungsprozess von Leistungsmodulen
- Zusammenfassung



## Hardwarebasierter Designprozess

Datenblatt Kondensator



Datenblatt Package



Datenblatt Halbleiter



<u>Analytik:</u> max di/dt max du/dt Abschaltüberspannung Gate als Serienschwingkreis



<u>Testaufbauten:</u> Doppelpuls Ausgangskennlinienfeld Gateladung







- Herausforderungen in der Entwicklung von Antriebsumrichtern
- Entwurfsmethodik f
  ür Leistungsmodule
- Hardwarebasierter Designprozess
- Simulationsbasierter Designprozess
- Simulationsunterstützter Entwicklungsprozess von Leistungsmodulen
- Zusammenfassung



Schaltungssimulation

Vorausgesetztes Netzwerk

Elemente eines vordefinierten
 Ersatzschaltbildes werden bestimmt



- Beispiele
  - Bestimmung Abschaltüberspannung
  - Bestimmung Einfluss Gateinduktivität [1]

#### Unbekanntes Netzwerk

Verhalten wird physikalisch oder verhaltensbasiert abgebildet



Beispiele

 Dynamische Strom- und Spannungsbeziehung an den Leistungshalbleiterschalter



Schaltungssimulation

Vorausgesetztes Netzwerk

Elemente eines vordefinierten
 Ersatzschaltbildes werden bestimmt



#### Unbekanntes Netzwerk

Verhalten wird physikalisch oder verhaltensbasiert abgebildet



niedrig Komplexität: hoch



- Aktive Bauelemente
- Leistungshalbleiterschalter
- Ansteuerschaltungen
- Ggfs. Schutzbeschaltungen
- Passive Bauelemente
- Leiterbahnen sowie deren induktive bzw. kapazitive Kopplung
- Zwischenkreis- und Impulskondensator
- Gatewiderstand (intern/extern)
- Beschaltung (Last)

Abbildungsgenauigkeit des Gesamtmodells wird von dem Bauelement mit der niedrigsten Abbildungsgenauigkeit bestimmt



Rechenaufwand bzw. Anforderung an Datenbasis



Aktive Bauelemente – Leistungshalbleiterschalter

Eigenes Leistungshalbleiterschaltermodell Leistungshalbleiterschaltermodell eines Halbleiterherstellers



- Kanalverhalten
  - Gate-Ladungsmessung
  - Ausgangskennlinienfeld

- Kapazitätsbestimmung
  - Gate-Ladungsmessung (vgl. [2])
  - Kleinsignalkapazitätsmessung (Curve Tracer)

Jedes Modell muss im Vorfeld auf Eignung und Funktionsumfang getestet werden

Fraunhofer

## Simulationsbasierter Designprozess

Passive Bauelemente - Leiterbahn

- Breitbandiges Simulationsmodell notwendig um Leit- und Schaltverhalten in einem Modell abbilden zu können
- Transiente Schaltungssimulation benötigt Leiterbahneigenschaften im Zeitbereich

**Frequenzbereich** 

R(f)

L(f)





Passive Bauelemente - Leiterbahn









Passive Bauelemente - Leiterbahn

Genetischer Algorithmus zur Bestimmung von Impedanzen nach [3]



Fraunhofer





Passive Bauelemente – Impuls- und Zwischenkreiskondensatoren





Zwischenkreiskondensator







Passive Bauelemente – Interner Gatewiderstand des Leistungshalbleiters

- Bei R<sub>g,ext</sub> = 0 wird die Schaltgeschwindigkeit des Leistungshalbleiterschalters von der Eingangsimpedanz des Leistungshalbleiterschalters, dem Widerstand der Ansteuerschaltung und der Impedanz der Gatezuleitung bestimmt.
- Eingangsimpedanz der Leistungshalbleiterschalter und Widerstand der Ansteuerschaltung müssen messtechnisch bestimmt werden







Passive Bauelemente - Beschaltung (Last)

- Validierung erfolgt im Doppelpulsversuch
- Zur Vereinfachung der Modellbildung wird eine Luftspule verwendet
- Hier kann die gleiche Methodik zur Transformation des Frequenz- in den Zeitbereich angewandt werden

(keine Sättigung, keine Hysterese des Kernmaterials)





 Vergleich der transienten Kurvenverläufe zwischen Simulation und Messung im Doppelpulstest





Vergleich der transienten Kurvenverläufe zwischen Simulation und Messung im Doppelpulstest









Advanced Power Modules www.iisb.fraunhofer.de © Fraunhofer IISB

100

Zeit t (ns)

200

Messung

Simulation





- Bipolarverhalten der Bodydiode nicht im Schaltermodell implementiert
- Diese zusätzliche Ladung hat auf Grund der Schaltgeschwindigkeit deutlichen Einfluss auf das Schaltverhalten

Sehr gute Übereinstimmung beim Ausschalten

Es werden nur Effekte nachgebildet, die auch im Schaltermodell implementiert sind







- Bipolarverhalten der Bodydiode nicht im Schaltermodell implementiert
- Diese zusätzliche Ladung hat auf Grund der Schaltgeschwindigkeit deutlichen Einfluss auf das Schaltverhalten

- Terminal der Halbleiterschalter direkt mit den Tastköpfen zu kontaktieren ist fehleranfällig
- Terminals können konstruktionsbedingt nicht kontaktiert werden

Gatespannungsmessung nur mit Hilfe der Schaltungssimulation interpretierbar



## Agenda

- Herausforderungen in der Entwicklung von Antriebsumrichtern
- Entwurfsmethodik für Leistungsmodule
- Hardwarebasierter Designprozess
- Simulationsbasierter Designprozess
- Simulationsunterstützter Entwicklungsprozess von Leistungsmodulen
- Zusammenfassung



# Simulationsunterstützter Entwicklungsprozess von Leistungsmodulen





## Agenda

- Herausforderungen in der Entwicklung von Antriebsumrichtern
- Entwurfsmethodik für Leistungsmodule
- Hardwarebasierter Designprozess
- Simulationsbasierter Designprozess
- Simulationsunterstützter Entwicklungsprozess von Leistungsmodulen
- Zusammenfassung



## Zusammenfassung

- Simulationsunterstützter Entwicklungsprozess
  - Vorab-Definition eines sicheren Arbeitsbereichs
- Direkten Einblick in Strom- und Spannungsverläufe an den Leistungshalbleiterbauelementen
- Unabhängiger Vergleich verschiedener Leistungshalbleiter bzw. Packages
- Flexibilität in der Wahl der Tastkopfpositionierung bei der Inbetriebnahme
- Mehraufwand der Modellbildung kann durch Modularität der Einzelsimulationsmodelle immer weiter begrenzt werden
- Die Schaltungssimulation kann als Integrationsplattform f
  ür weitere Untersuchungen (Thermik, EMV, usw.) genutzt werden





# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Holger Gerstner Schottkystr. 10 91058 Erlangen, Germany +49 (0) 9131 / 761-557 holger.gerstner@iisb.fraunhofer.de www.iisb.fraunhofer.de





#### Literaturverzeichnis

H. Gerstner, T. Heckel, A. Endruschat, A. Roßkopf, B. Eckardt and M. März, "SiC power module loss reduction by PWM gate drive patterns and impedance-optimized gate drive voltages," 2017 IEEE 5th Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA), 2017, pp. 300-307, doi: 10.1109/WiPDA.2017.8170564.

- H. Gerstner, et al.: Non-linear Input Capacitance Determination of WBG Power FETs using Gate Charge Measurements: 2018 IEEE 6th Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA); S. 247–253.
- I. Rahimi Pordanjani, C. Y. Chung, H. Erfanian Mazin and W. Xu, "A Method to Construct Equivalent Circuit Model From Frequency Responses With Guaranteed Passivity," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 26, no. 1, pp. 400-409, Jan. 2011, doi: 10.1109/TPWRD.2010.2080323.
- [4] B. Krauter and S. Mehrotra, "Layout based frequency dependent inductance and resistance extraction for on-chip interconnect timing analysis," Proceedings 1998
   Design and Automation Conference. 35th DAC. (Cat. No.98CH36175), San Francisco, CA, USA, 1998, pp. 303-308, doi: 10.1145/277044.277133.