

# Simulation von Koppelinduktivitäten zwischen Kommutierungs- und Ansteuerkreisen in Leistungsmodulen

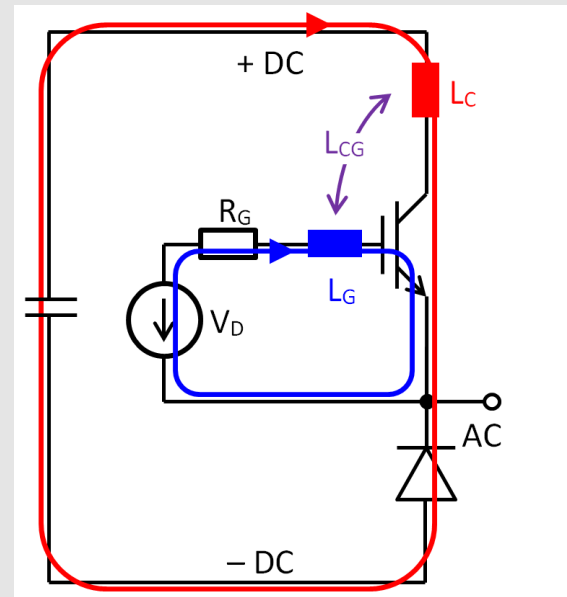
Matthias Spang

SEMIKRON Elektronik GmbH & Co. KG

matthias.spang@semikron.com

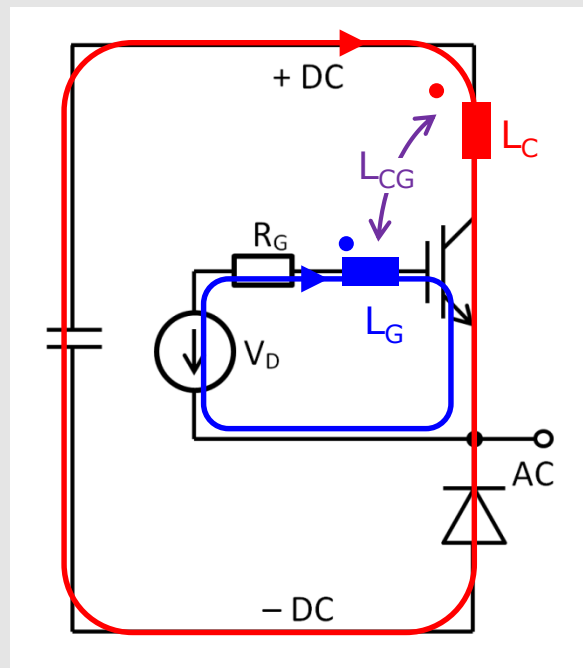
37. CADFEM ANSYS Simulation Conference

17.10.2019, Kassel



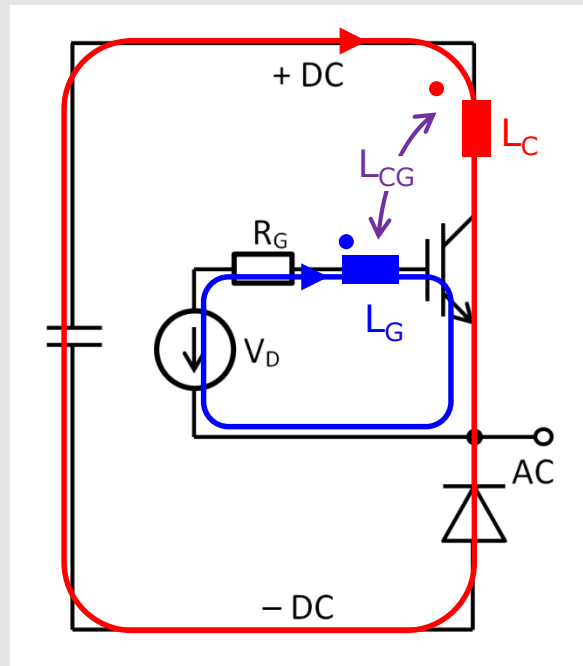
# Grundlagen

- Im Schaltvorgang treten hohe  $di/dt$  im Kommutierungskreis auf.
- Die resultierende zeitliche Änderung des Magnetfelds koppelt eine Spannung in den Gatekreis ein. Die entsprechende Koppelinduktivität  $L_{CG}$  kann positiv oder negativ sein.
- Beispiel:  $L_{CG}=0.2\text{nH}$ ,  $di/dt=5\text{A/ns}$  → 1V Einkopplung in Gatekreis



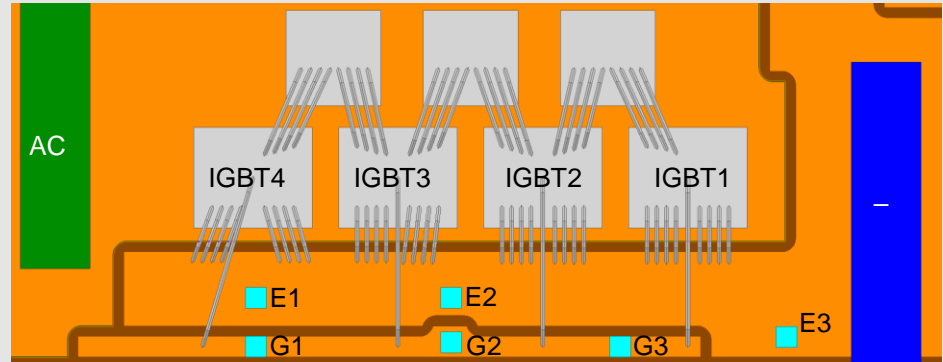
# Grundlagen

- Je höher  $L_{CG}$ , um so langsamer werden die Schaltvorgänge.
- Bei parallelgeschalteten Transistoren beeinflussen die  $L_{CG}$  die dynamische Stromaufteilung.



# Einfluss von $L_{CG}$ auf Schaltgeschwindigkeit und Stromaufteilung

- Beispiel: Unterer Schalter eines Halbbrückenmoduls
- Messung des Schaltverhaltens mit unterschiedlichen Positionen der Gate- / Emitteranschlüsse  
 $V_{DC}=600V$ ,  $I_L=300A$ ,  $R_G=2\Omega$

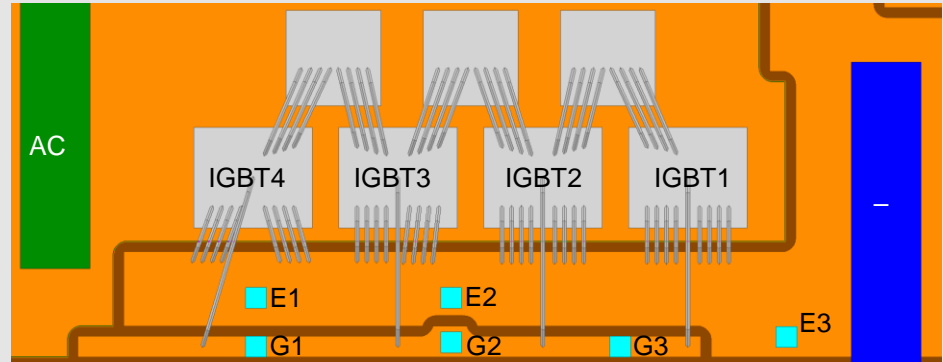


- Simulation der parasitären Induktivitäten in ANSYS Q3D Extractor (AC Analyse)
- Ergebnis:  
Einschaltverluste und Einschaltstromspitzen korrelieren gut mit den simulierten mittleren  $L_{CG}$ -Werten.  
Ausschaltverhalten der IGBTs wird kaum beeinflusst.

Terminal- positionen	Simulation			Messung			
	Avg. $L_{CG}$	$E_{on}$	$I_{Cmax}$	$E_{on}$	$I_{Cmax}$	$E_{off}$	$V_{CEmax}$
G3, E1	– 1.35nH			9.8mJ	572A	20.9mJ	787V
G1, E1	– 0.35nH			13.3mJ	531A	21.0mJ	771V
G2, E2	– 0.14nH			15.5mJ	515A	21.0mJ	789V
G3, E3	1.52nH			32.7mJ	404A	20.9mJ	779V
G1, E3	2.46nH			36.6mJ	385A	20.8mJ	784V

# Einfluss von $L_{CG}$ auf Schaltgeschwindigkeit und Stromaufteilung

- Beispiel: Unterer Schalter eines Halbbrückenmoduls
- Messung des Schaltverhaltens mit unterschiedlichen Positionen der Gate- / Emitteranschlüsse  
 $V_{DC}=600V$ ,  $I_L=300A$ ,  $R_G=2\Omega$



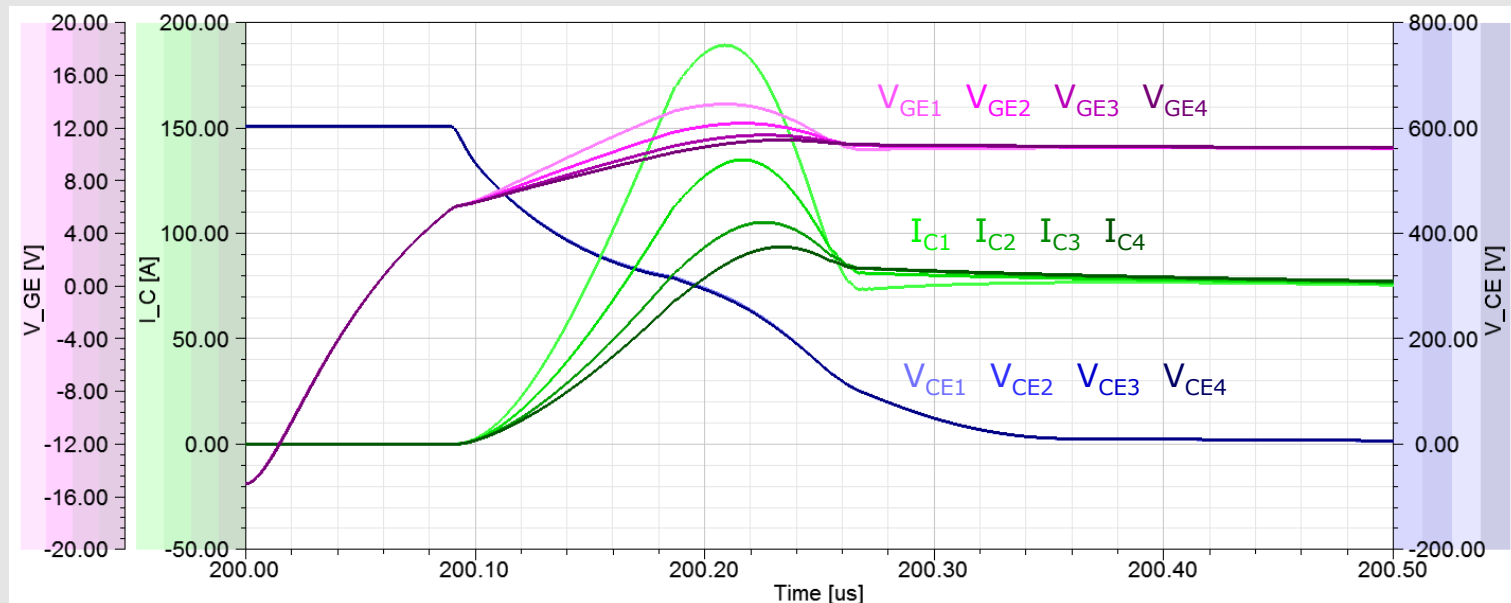
- Schaltungssimulation unter Berücksichtigung aller Induktivitäten liefert simulierte  $E_{on}$  und  $I_{Cmax}$ .
- Simplorer-Chipmodelle aus „Semiconductors Device Level“ angepasst an Datenblattwerte. Nichtlineare Kapazitäten berücksichtigt. Rückwärtserholverhalten des Diodenmodells angepasst an Messung mit G2, E2.

Terminal- positionen	Simulation			Messung			
	Avg. $L_{CG}$	$E_{on}$	$I_{Cmax}$	$E_{on}$	$I_{Cmax}$	$E_{off}$	$V_{CEmax}$
G3, E1	– 1.35nH	5.3mJ	574A	9.8mJ	572A	20.9mJ	787V
G1, E1	– 0.35nH	13.8mJ	523A	13.3mJ	531A	21.0mJ	771V
G2, E2	– 0.14nH	15.9mJ	513A	15.5mJ	515A	21.0mJ	789V
G3, E3	1.52nH	31.8mJ	407A	32.7mJ	404A	20.9mJ	779V
G1, E3	2.46nH	37.5mJ	376A	36.6mJ	385A	20.8mJ	784V

# Einfluss von $L_{CG}$ auf Schaltgeschwindigkeit und Stromaufteilung

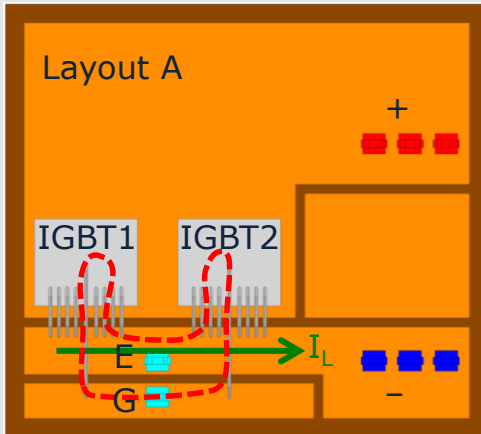
– Simulierte Stromaufteilung auf parallele IGBTs für den Fall G2, E2:

$L_{CG}$	Gate 1	Gate 2	Gate 3	Gate 4
IGBT 1	-0.10nH	-0.10nH	-0.05nH	-0.03nH
IGBT 2	-0.60nH	-0.03nH	-0.03nH	0.00nH
IGBT 3	-0.88nH	-0.37nH	0.21nH	0.21nH
IGBT 4	-0.91nH	-0.39nH	0.15nH	0.71nH
Mittelwert	-0.62nH	-0.22nH	0.07nH	0.22nH
Simulierte $E_{on}$	5.5mJ	4.1mJ	3.3mJ	2.9mJ

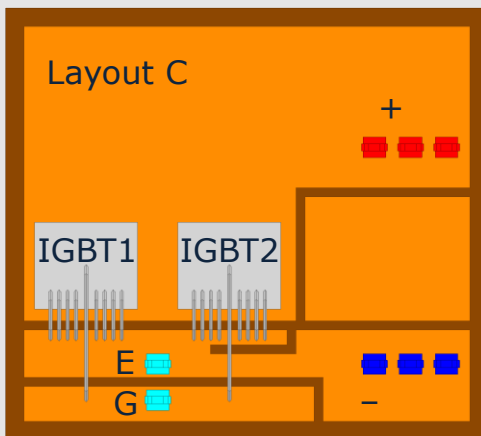
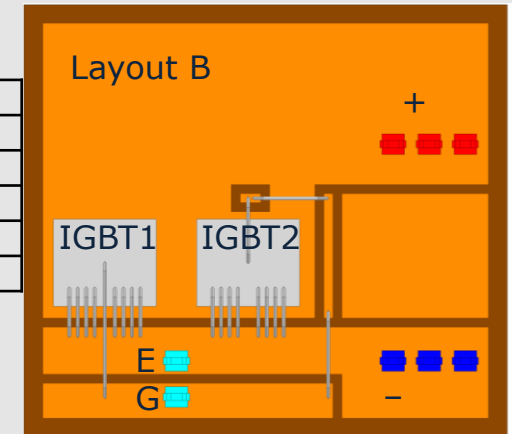


# Maßnahmen zur Symmetrierung der $L_{CG}$

– Einfaches Simulationsbeispiel mit 2 IGBTs:



$L_{CG}$ (nH)	Layout A		Layout B	
	Gate1	Gate2	Gate1	Gate2
IGBT1	0.51	-0.45	0.51	-0.37
IGBT2	-0.07	0.13	-0.06	0.76
Mittelwert	0.22	-0.16	0.22	0.19
$E_{on}$ (mJ)	4.5mJ	5.4mJ	5.2mJ	5.3mJ

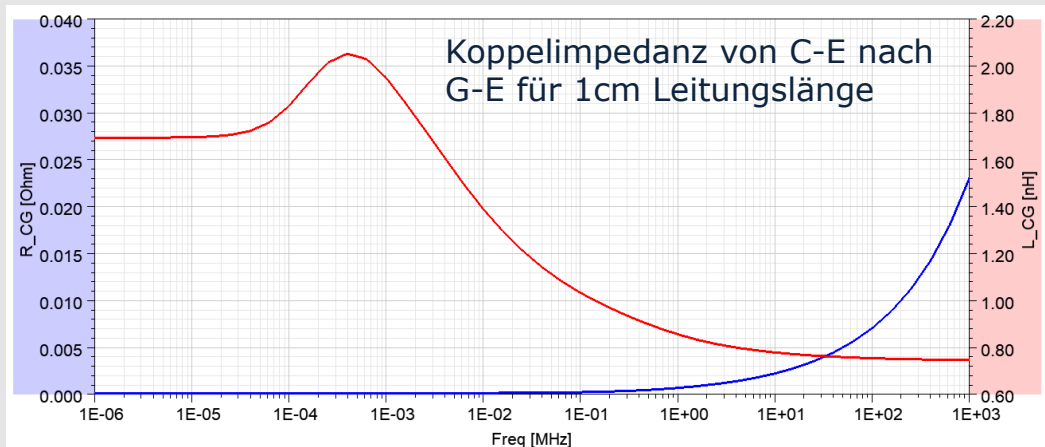
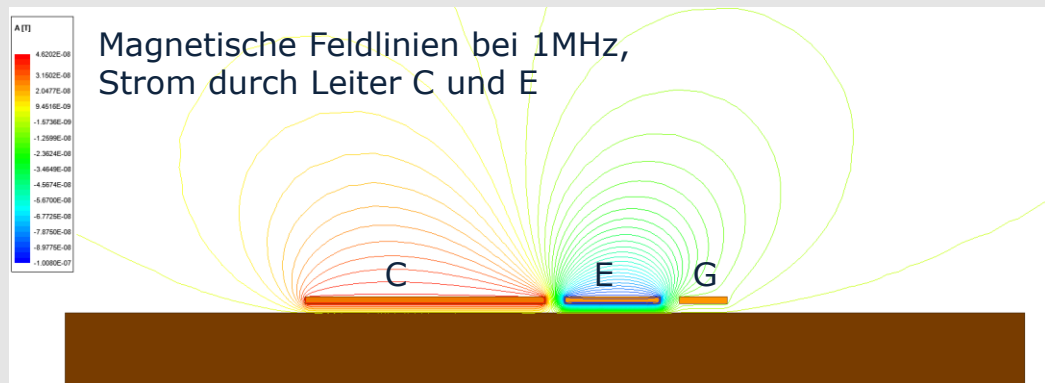
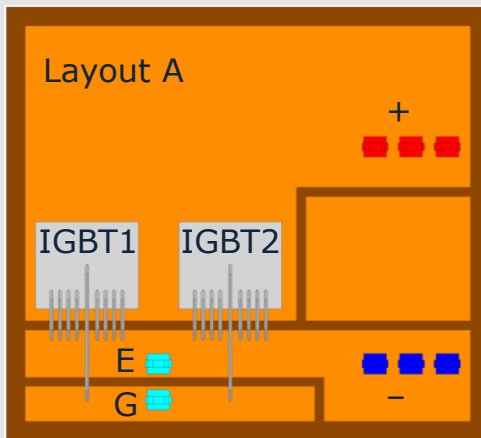


$L_{CG}$ (nH)	Layout C	
	Gate1	Gate2
IGBT1	0.52	-0.27
IGBT2	-0.06	0.43
Mittelwert	0.23	0.08
$E_{on}$ (mJ)	5.0mJ	5.3mJ

Einschaltverluste mit zum letzten Beispiel vergleichbaren Parametern und Chipmodellen simuliert.

# Frequenzabhängigkeit der Koppelimpedanz

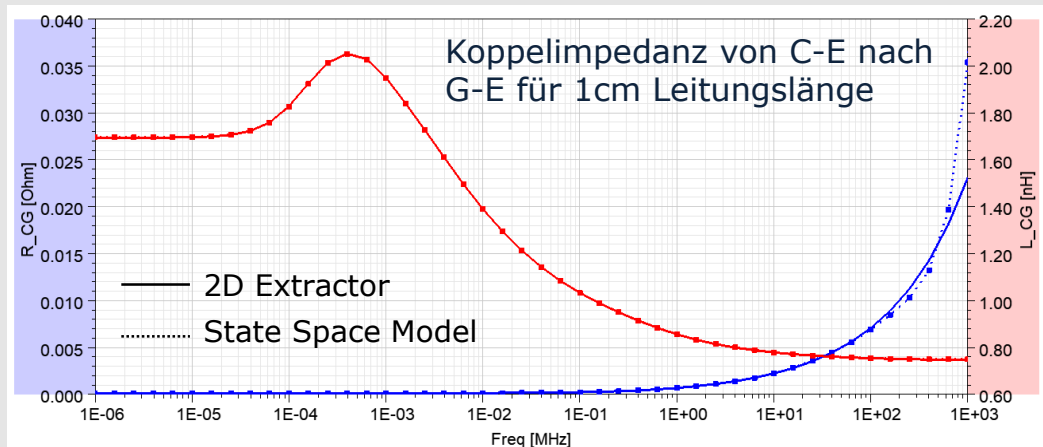
- Aufgrund von Stromverdrängungseffekten sind R und L frequenzabhängig.
- Beispiel: Simulation der Koppelimpedanz einer ebenen 4-Leiter-Struktur auf DCB in 2D Extractor





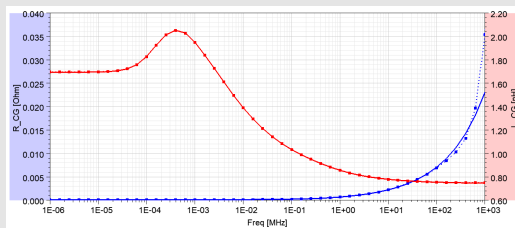
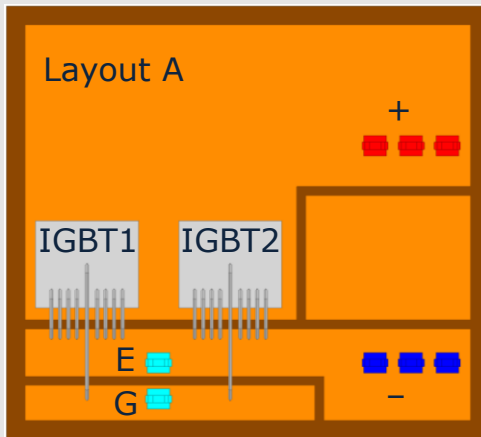
# Frequenzabhängigkeit der Koppelimpedanz

- Die in 2D Extractor simulierte Koppelimpedanz wird als Zustandsraummodell in Simplorer eingebunden.
- Extraktion des Zustandsraummodells aus 2D Extractor mit Network Data Explorer  
Bezugsimpedanz:  $0.1\text{m}\Omega$   
Resultierende Modellordnung: 76
- Überprüfung des Zustandsraummodells per Frequenzbereichssimulation in Simplorer

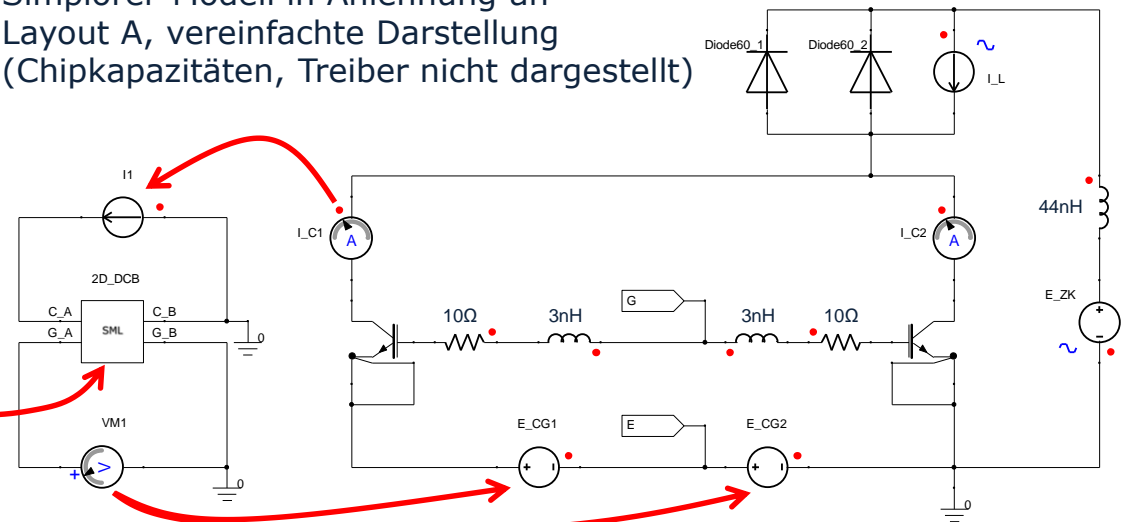


# Frequenzabhängigkeit der Koppelimpedanz

- Simulation des Einschaltvorgangs in Simplorer
- Die Einkopplung des Stroms  $I_{C1}$  in die Emittterverbindung erfolgt über gesteuerte Quellen und das Zustandsraummodell.



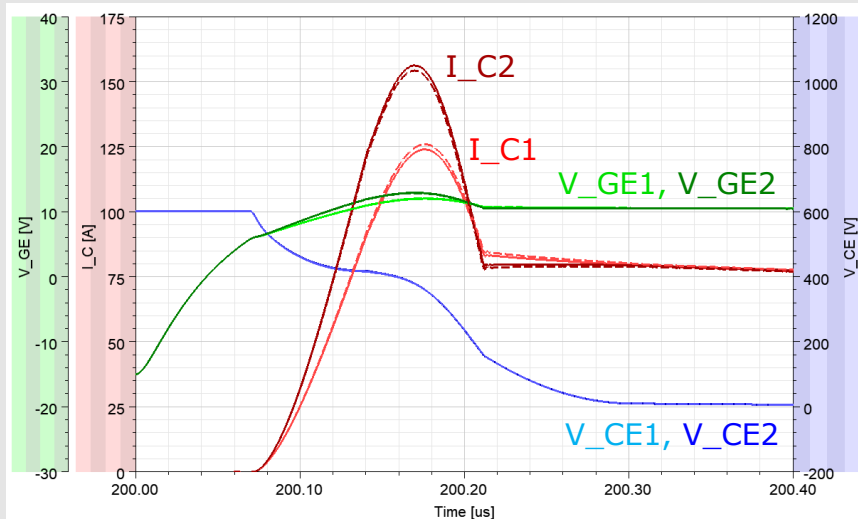
Simplorer-Modell in Anlehnung an Layout A, vereinfachte Darstellung (Chipkapazitäten, Treiber nicht dargestellt)



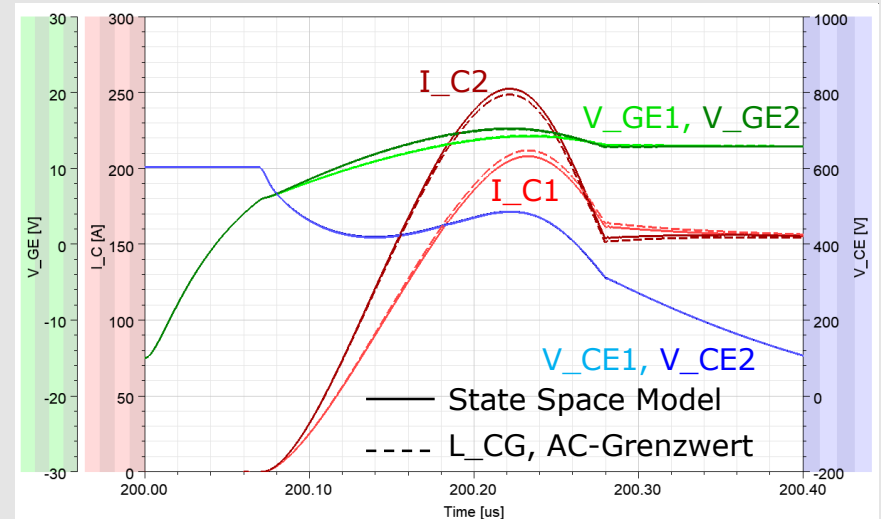
# Frequenzabhängigkeit der Koppelimpedanz

- Simulation des Einschaltvorgangs in Simplorer
- Einschaltstromaufteilung mit State Space Model im Vergleich zu konstanter Koppelinduktivität  $L_{CG}$  (AC-Grenzwert 0.75nH).

$I_L=150A$



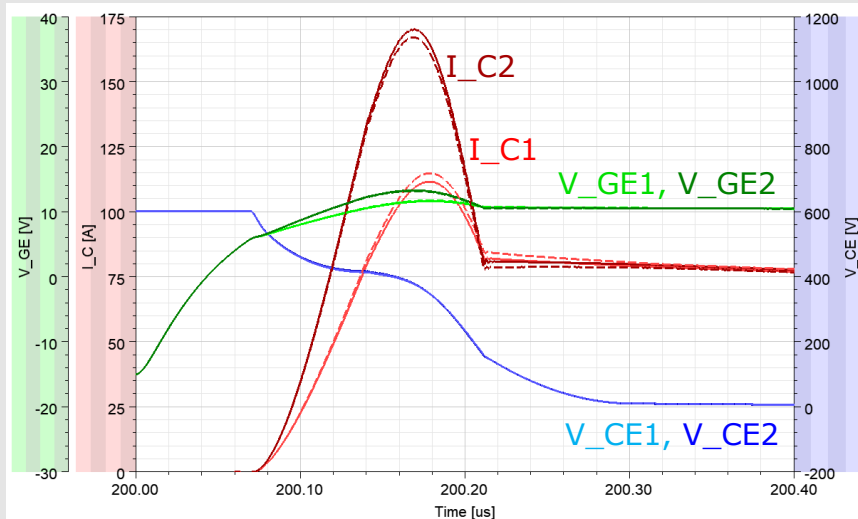
$I_L=300A$



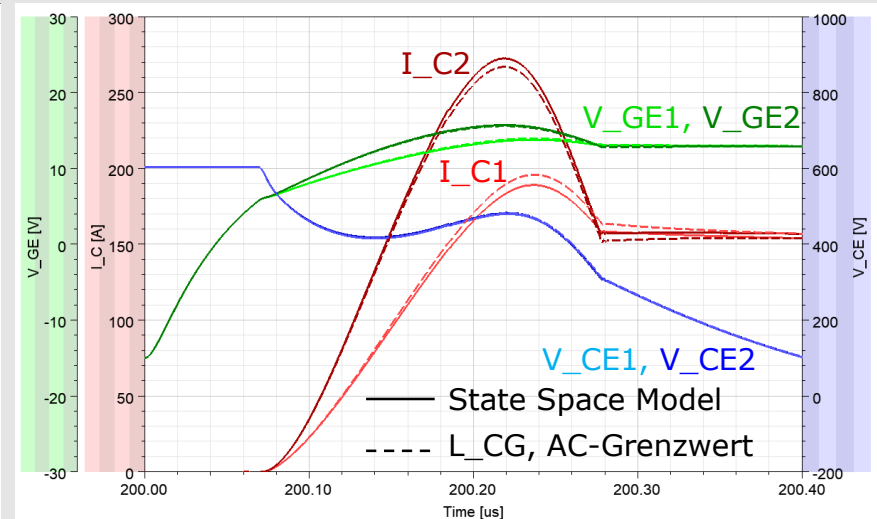
# Frequenzabhängigkeit der Koppelimpedanz

- Simulation des Einschaltvorgangs in Simplorer
- Einschaltstromaufteilung mit State Space Model im Vergleich zu konstanter Koppelinduktivität  $L_{CG}$  (AC-Grenzwert 0.75nH).
- Impedanz der Emittterverbindung verdoppelt (entspricht 2cm, AC-Grenzwert 1.5nH)
- Die simulierten Stromverläufe bestätigen, dass der AC-Grenzwert der Koppelinduktivität für diese Geometrie eine gute Näherung darstellt.

$I_L=150A$



$I_L=300A$



# Zusammenfassung

- Koppelinduktivitäten  $L_{CG}$  zwischen Kommutierungs- und Gatekreis haben starken Einfluss auf das Schaltverhalten und auf die dynamische Stromaufteilung auf parallele Transistoren.
- Simulationen der parasitären Induktivitäten mithilfe von Q3D Extractor können Hinweise zur Layoutoptimierung geben.
- Eine Abschätzung mithilfe von 2D Extractor bestätigt, dass für typische Schaltvorgänge der AC-Grenzwert der Koppelinduktivität eine gute Näherung für die Koppelimpedanz darstellt.

A blurred photograph of a modern office interior. In the foreground, a person in a grey suit is walking quickly from left to right, carrying a bright orange bag. In the background, two other people are standing near a large window, looking out. The floor is highly reflective, showing the silhouettes of the people. The overall atmosphere is one of a busy, professional environment.

**Thank you for your  
attention!**