

Leistungselektronik

Kapitel 8: Aufbautechnologie und Entwärmung

Prof. Dr.-Ing. A. Kleimaier

Leistungselektronik

Aktuelles Kapitel

Kapitel 1: Einführung, Brainstorming, Übersicht
2: Grundlagen netzgeführte Stromrichter
3: Grundlagen selbstgeführte Stromrichter
4: Leistungshalbleiterbauelemente

Einstieg:
allgemeine
Grundlagen

Kapitel 5: Wechselrichter 1: Topologie und Komponenten
6: Wechselrichter 2: Steuerverfahren und Pulsmuster
7: Wechselrichter 3: Dimensionierung und Simulation

zentrales
Thema

Kapitel 8: Aufbautechnologie und Entwärmung
9: Ansteuerung von Leistungshalbleitern
10: Schaltvorgänge von Leistungshalbleitern
11: Vermessung, Inbetriebnahme und Test

Technologie
& Detailwissen

Kapitel 12: Spezielle Einsatzgebiete und Topologien – Referate

Vergrößerung
Wissensbasis

Leistungselektronik

Übersicht

Kapitel 8: Aufbautechnologie und Entwärmung

8.1 Grundlagen Aufbautechnik

8.2 Praxisbeispiele Modulaufbauten

8.3 Verbindungstechnik

8.4 Grundlagen thermische Berechnung

8.5 Thermischer Modulwiderstand

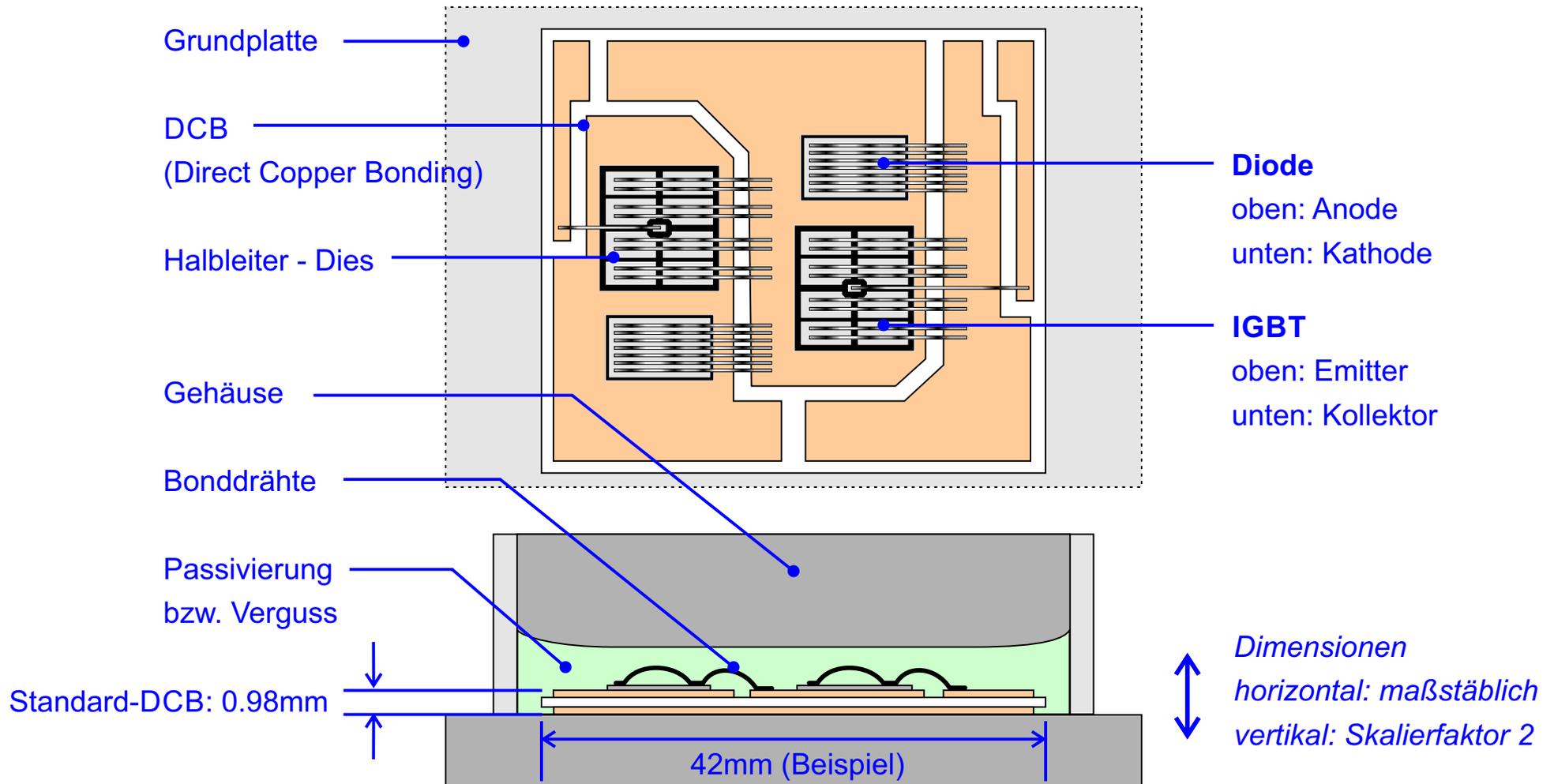
8.6 Dynamisches Verhalten

8.7 Entwärmung Gesamtsystem

} Aufbau- und
Verbindungstechnik
"AVT"

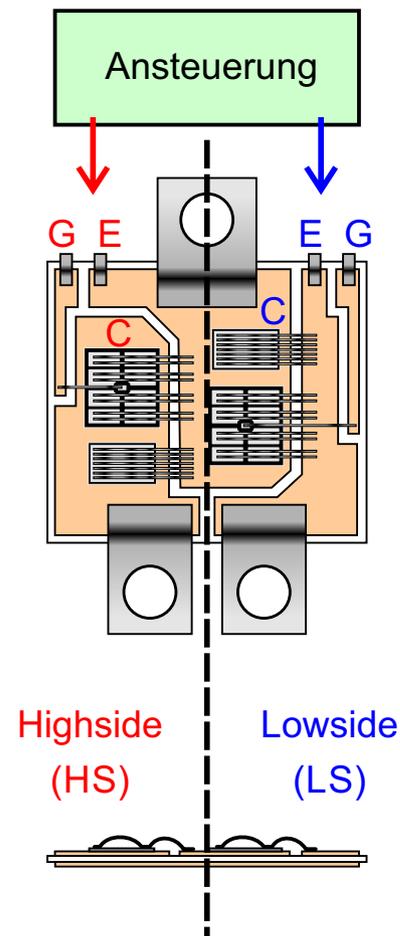
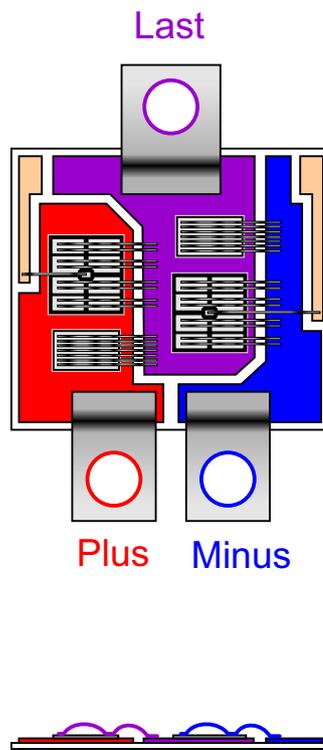
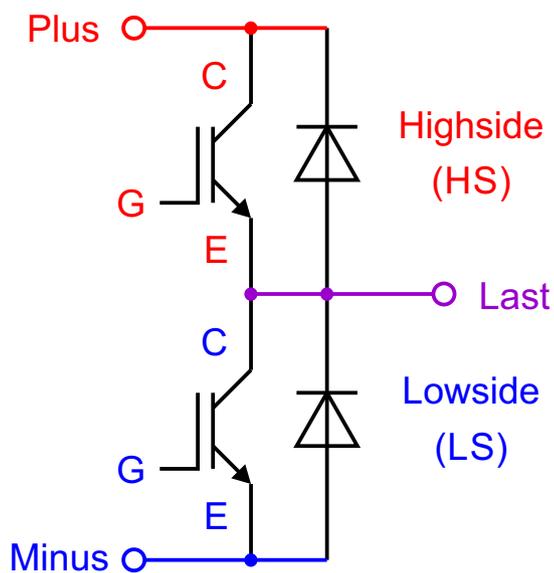
8.1 Grundlagen Aufbautechnik

Beispiel Halbbrückenlayout



8.1 Grundlagen Aufbautechnik

Anschlüsse / Potentiale



8.1 Grundlagen Aufbautechnik

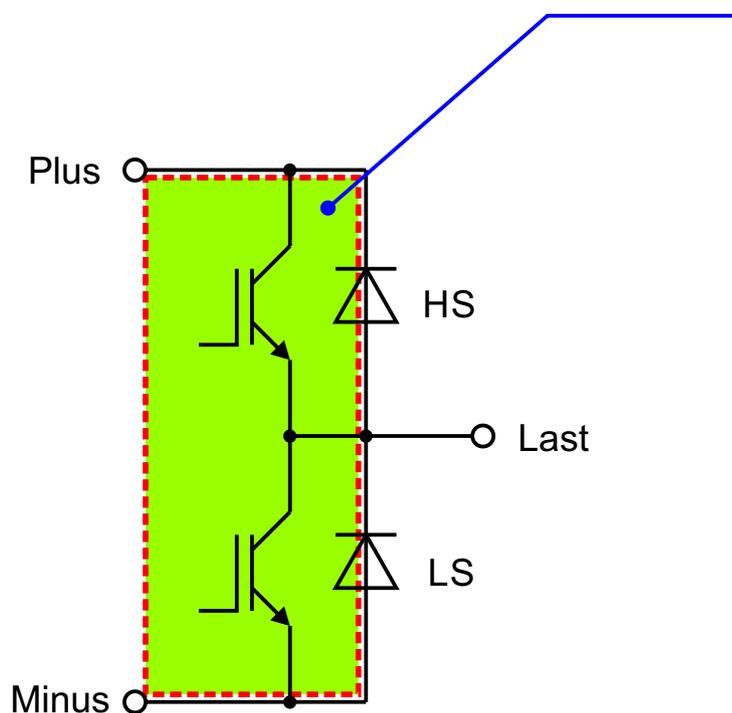
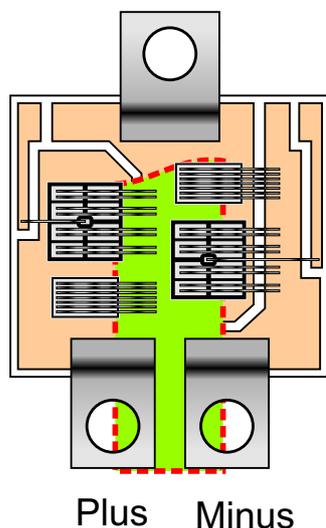
Anforderungen ↔ Problembaustellen

Anforderung	Baustelle	Ausfallszenario
Vibration, Schock	Verbindungstechnik	Abheben/Bruch Bonddrähte, Lotermüdung Die-DCB / DCB-Grundplatte Delamination DCB-Substrat
Temperaturzyklen	Verbindungstechnik	
Lastwechsel	Verguss/Passivierung	"Rekonstruktion" Chipmetallisierung
Kühlung	Materialauswahl, Aufbau	Unzulässiger lokaler Temperaturhub
Isolation	Abstände, Verguss	Durchschlag
hohe Strombelastung	Querschnitte, Bonddrähte	lokale Übertemperatur
Schaltüberspannung	niederinduktiver Aufbau	Avalanchebetrieb → thermischer Durchbruch
Bauraum	Gehäuse, Aufbau, Kühlung	steht ggf. im Trade-off mit den Sicherheitsreserven der Auslegung

8.1 Grundlagen Aufbautechnik

Anforderung niederinduktiver Aufbau

IGBT-Ausschaltvorgang: Schaltüberspannung
läßt sich durch kleine Modulinduktivität deutlich
reduzieren → Kap. 10 Schaltvorgänge



Faustregel:

Modulinduktivität wird
durch die Fläche bestimmt,
die von Plus-HS-LS-Minus
eingeschlossen wird

IGBT-Module 600V:

typisch: 10..20nH
schlecht: > 30nH

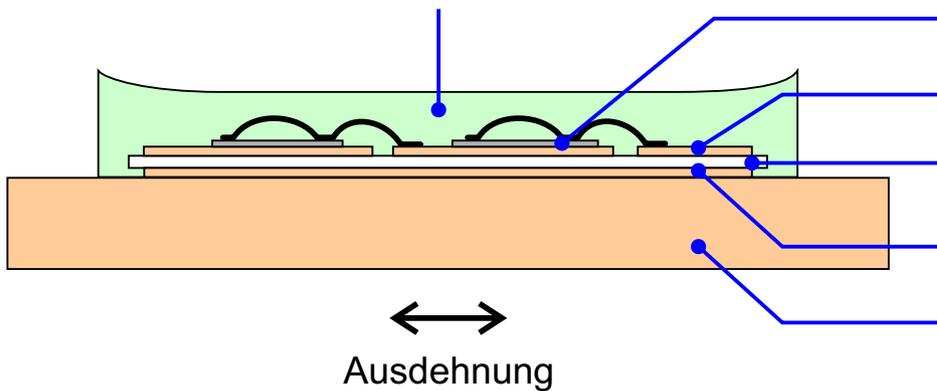
Prinzipiell:

Plus/Minus-Anschlüsse
eng beieinander halten

8.1 Grundlagen Aufbautechnik

Anforderung Temperaturzyklenfestigkeit

Verguss: darf keine unzulässigen Kräfte auf Bonddrähte ausüben



Material:

- 70µm Silizium
- 300µm Kupfer
- 380µm bzw. 630µm Keramik Al₂O₃
- 300µm Kupfer
- 3mm Grundplatte Kupfer

Besser: AlSiC

Schlechter: Aluminium

Ausdehnungskoeffizient:

- $\alpha = 4 \cdot 10^{-6} / K$ } Die
- $\alpha = 17 \cdot 10^{-6} / K$ } DCB
- $\alpha = 7 \cdot 10^{-6} / K$ }
- $\alpha = 17 \cdot 10^{-6} / K$ } GP
- $\alpha = 17 \cdot 10^{-6} / K$ }
- $\alpha = 24 \cdot 10^{-6} / K$ }

Bestimmend:

- DCB-Keramik
- Grundplatte



Temperaturstress:

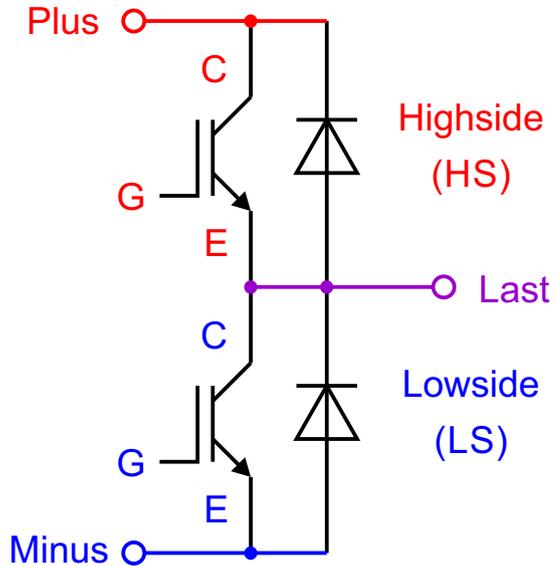
- Verbindung Chip - DCB
- Verbindung DCB - Grundplatte

} Lebensdauerlimitierend!

hier: ohne Lotschichten (siehe Abschn. 8.3)

8.2 Praxisbeispiele Modulaufbauten

Sixpack = 3 Halbbrückenmodule



jeweils 2 IGBTs / Dioden pro Schalter parallel

Bedingung Durchlasskurve IGBT:
positiver Temperaturgradient

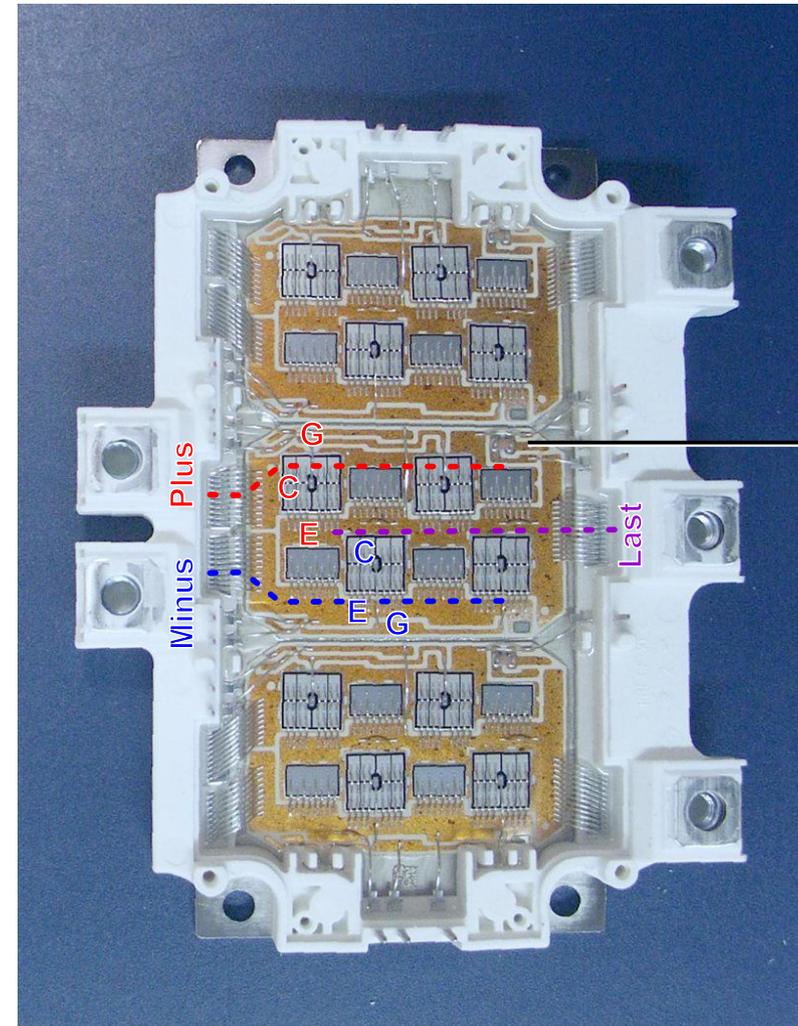
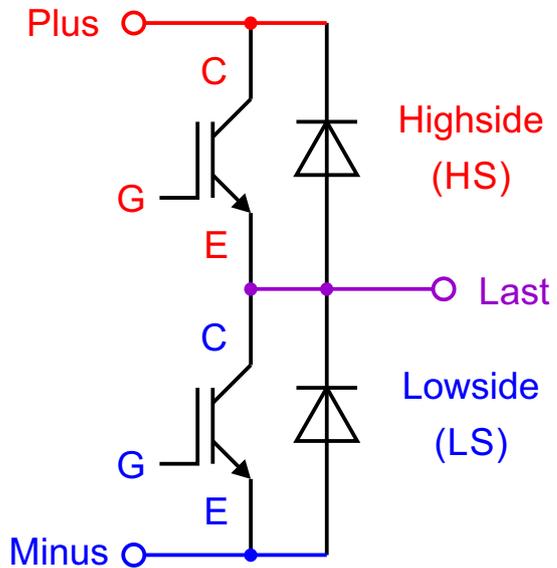


Bild: A.Kleimaier / Infineon FS400R06A1E3 "Hybridpack1" ohne Deckel

8.2 Praxisbeispiele Modulaufbauten

Einzelnes Halbbrückenmodul



jeweils 4 IGBTs / Dioden pro Schalter parallel
Einzel-DCBs für jeden Schalter

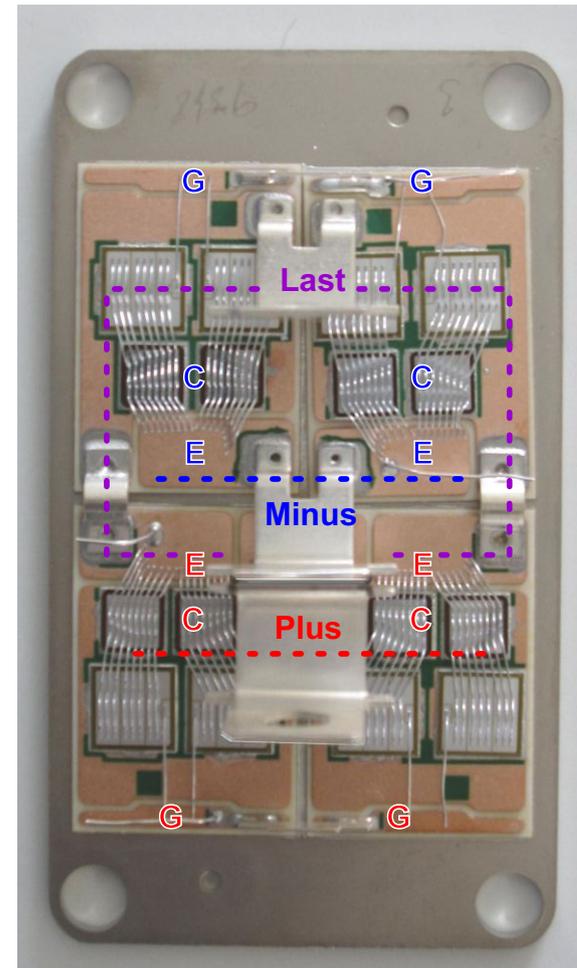
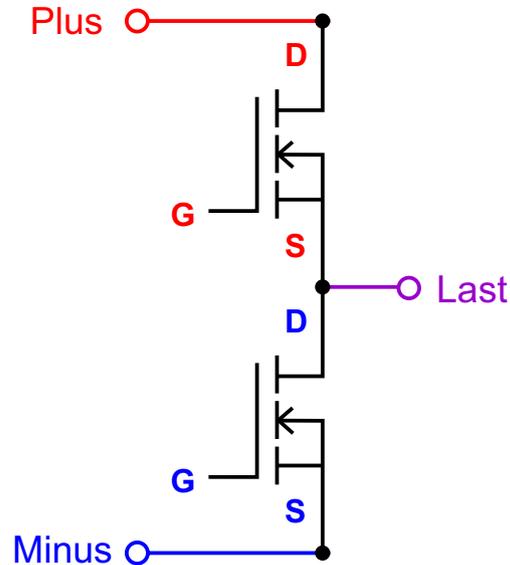


Bild: A. Kleimaier / Semikronmodul

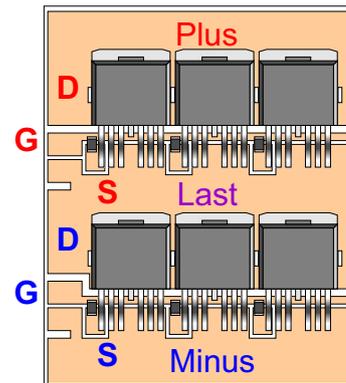
8.2 Praxisbeispiele Modulaufbauten

Kleinere Ströme: Modulaufbau mit TO-Gehäusen



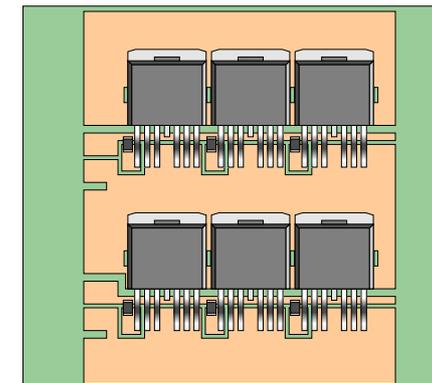
Gehäuster, Diskrete
Leistungsmosfets:
z.B. im TO263-7 bzw. D²-Pak

Layout auf DCB
(eher unüblich)

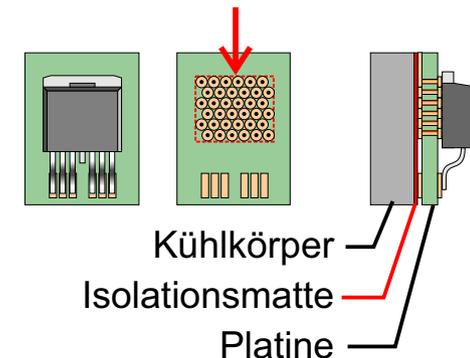


Wärmeübergang:
im TO-Gehäuse
deutlich schlechter

Layout auf PCB
z.B. 200µ-Dickkupferplatte

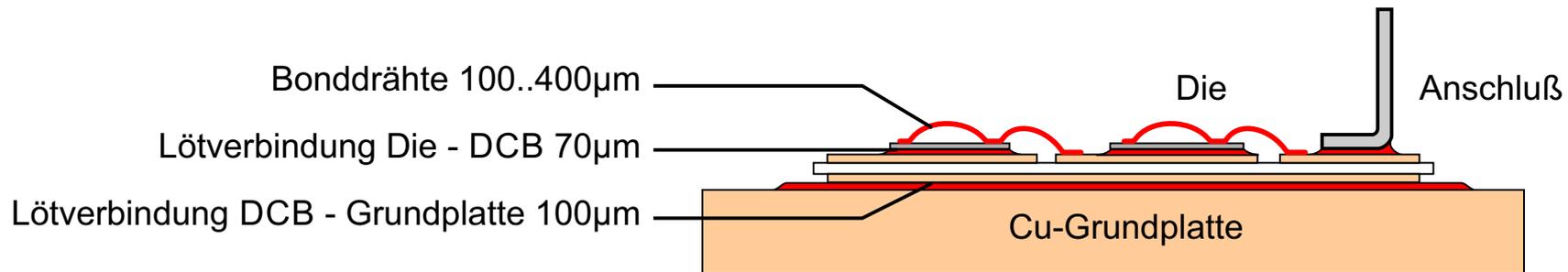


Typ. Lösung für Entwärmung:
Drain-Footprint mit Vias aufgefüllt
(Durchkontaktierungen)



8.3 Verbindungstechnik

Löten und Bonden



Lote:

- "Chiplot" (Pb, Problem: RoHS)
- SnAg3 (Schmelzpunkt 220°C)

Problem:

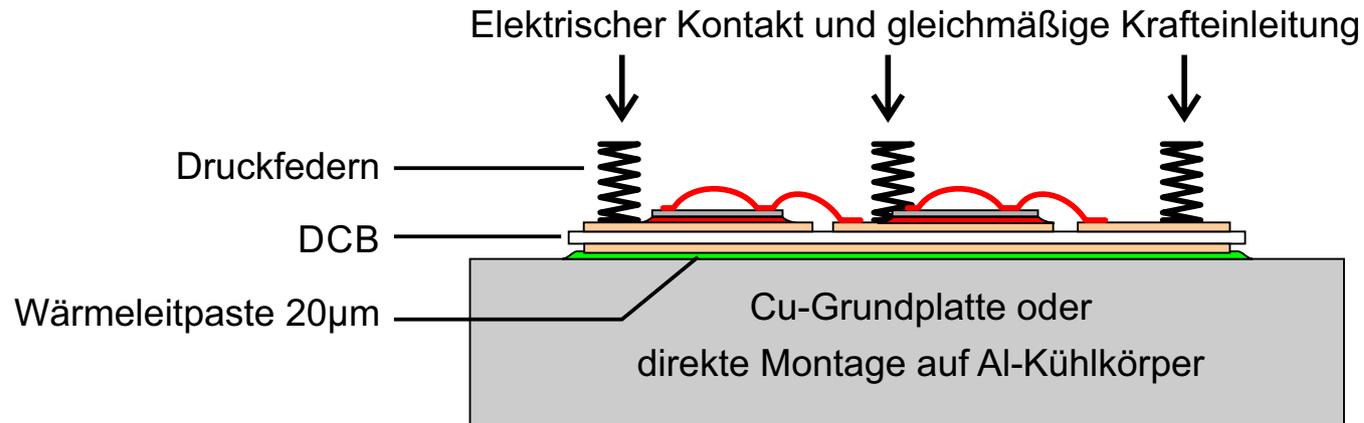
- Temperaturzyklenfestigkeit begrenzt
- Abhilfe: Grundplatte aus AlSiC

Lötprozess:

- Lötpaste mit Schablone auftragen
- Schmelzvorgang im Ofen

8.3 Verbindungstechnik

Druckkontaktierung



Vorteil/Nachteil:

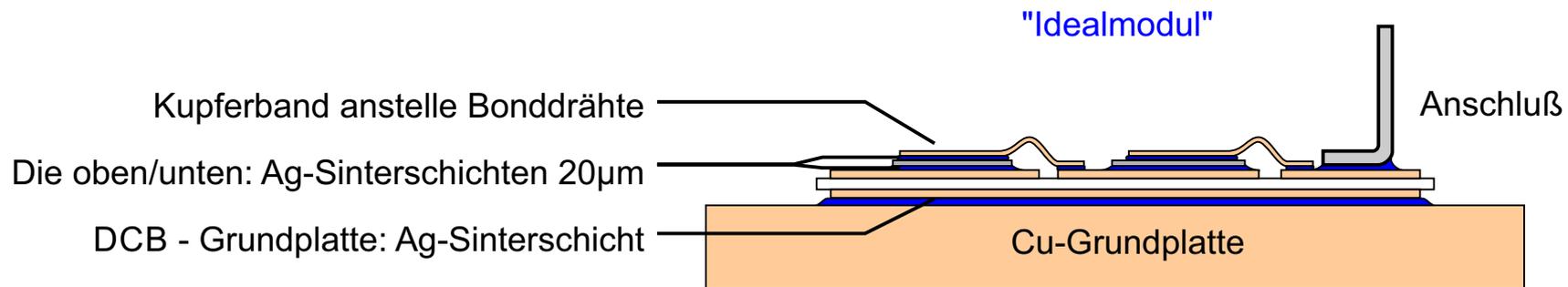
- Lebensdauerlimitierung durch die Lötverbindung DCB - Grundplatte entfällt
 - Aber: Spalt DCB - Grundplatte muß genau definiert sein (z.B. Durchwölben der DCB)
- ⇒ Herstellprozess kritisch, Knowhowfrage

Einsatz:

- Feder-Druckkontakte: SKiiP-Module von Semikron
- vgl. Abschnitt 4.4, Pressverbände Scheibenzellen-Thyristoren

8.3 Verbindungstechnik

Sintertechnologie



Vorteile:

- Lastzyklen Stresstest: bis 100.000
(Standard-Lötmodule: 20.000)
- Bereits in Serie: Verbindung Chip-DCB

Sinterprozess:

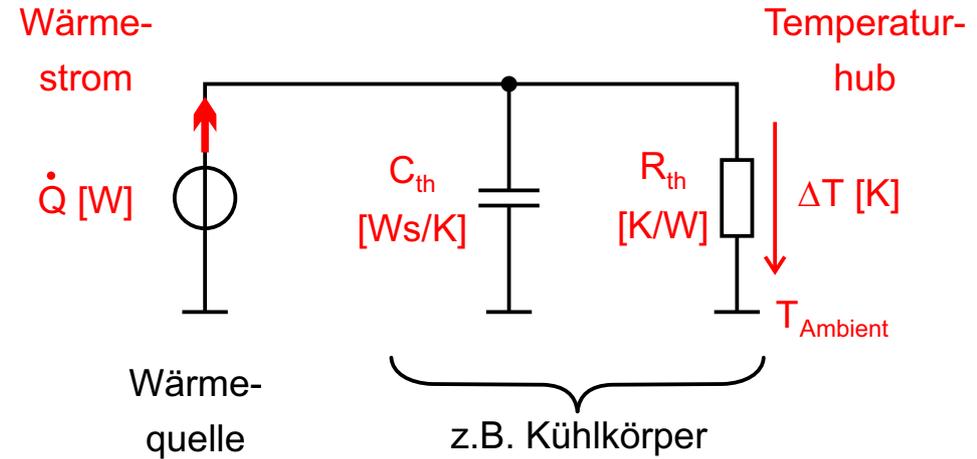
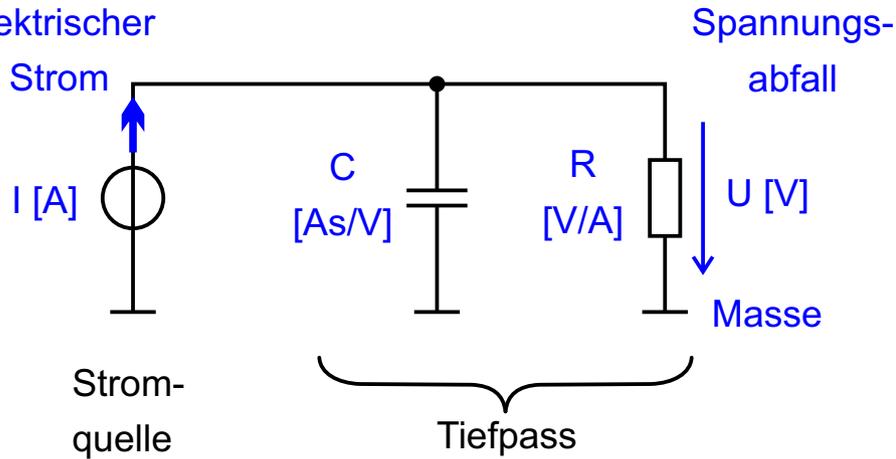
- Ag-Pulverpaste aufbringen
- Sintern bei hohem Druck und ca. 250°C
(Niedertemperatur-Diffusionsintern)

8.4 Grundlagen thermische Berechnung

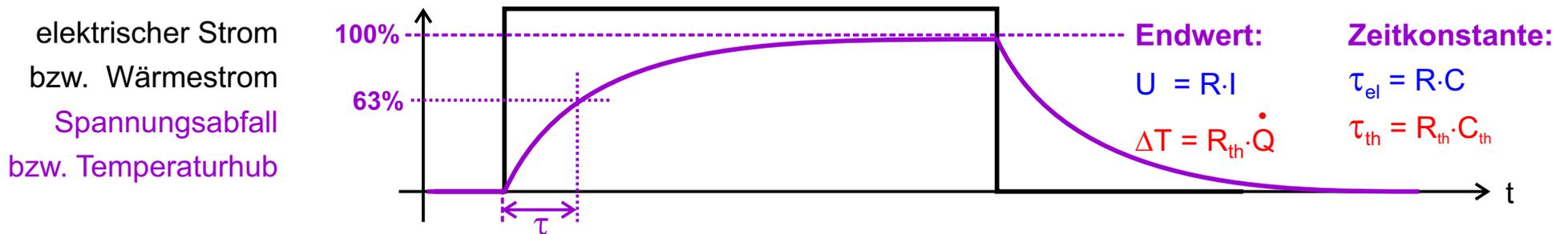
Ersatzschaltbild

elektrisch

thermisch

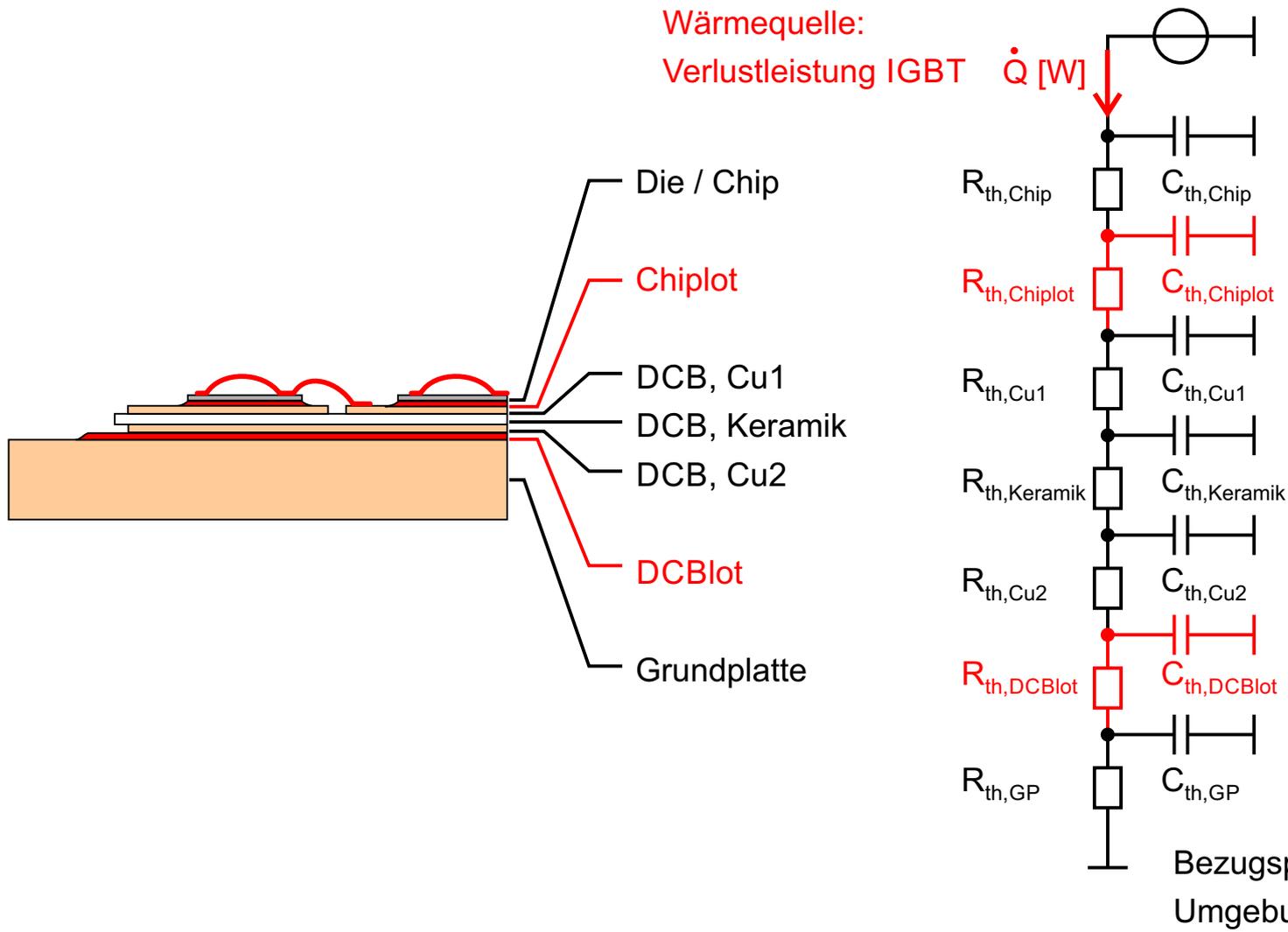


Zeitverhalten: Verzögerungsglied

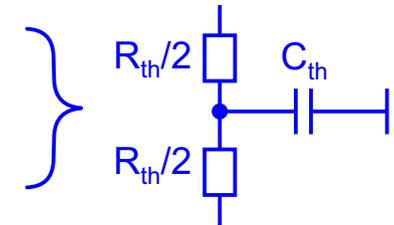


8.4 Grundlagen thermische Berechnung

Thermisches Ersatzschaltbild Modulaufbau



pro Element,
genauer:



Rechnung stationär:

- $R_{th,Modul} = \Sigma R_{th}$

Rechnung dynamisch:

- Zeitkonstanten
- Simulationsmodell

8.4 Grundlagen thermische Berechnung

Thermischer Widerstand und thermische Kapazität

spez. Wärmeleitfähigkeit: λ [W/mK]

thermischer Widerstand: $R_{th} [K/W] = \frac{1}{\lambda [W/mK]} \cdot \frac{d [mm]}{A [mm^2]} \cdot 10^3$

spez. Wärmekapazität: c [J/kgK]

thermische Kapazität: $C_{th} [Ws/K] = \underbrace{\rho [g/cm^3] \cdot c [J/kgK]}_{\text{Wärmespeicherzahl } s [kJ/m^3K]} \cdot V [mm^3] \cdot 10^{-6}$

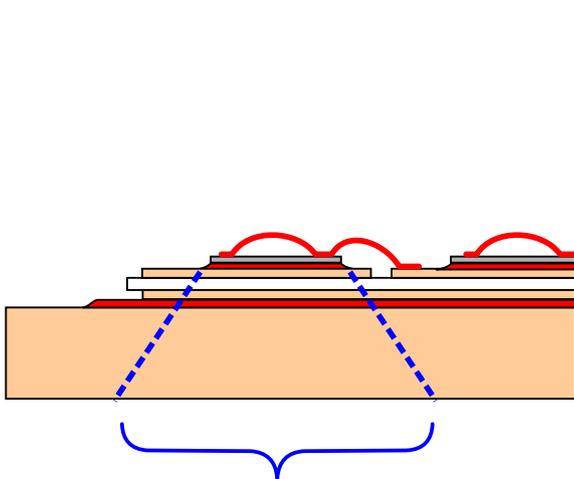
Geometriedaten Aufbau:
Querschnittsfläche A [mm²]
Schichtdicke d [mm]

$V = d \cdot A$ [mm³]
1J = 1Ws

Bauelement	Material	λ [W/mK]	s [kJ/m ³ K]	α [10 ⁻⁶ /K]
Die / Chip	Si	148	1720	4.1
Lötverbindung	SnAg3	70	1670	28
Sinterschicht	Ag	240	2465	19
DCB / Grundplatte	Cu	394	3400	17.5
DCB, standard	Al ₂ O ₃	24	3100	6.8 .. 8.3
DCB, alternative	AlN	180	3430	4.7 .. 5.7
Grundplatte, alt.	AlSiC	180	2220	7.0

8.5 Thermischer Modulwiderstand

Beispielrechnung Standardmodul Al_2O_3 -DCB



Element	Spreizung	A [mm ²]	d [mm]	R _{th} [K/W]
IGBT-Die	1.0	77	0.07	0.006
Chiplot	1.0	77	0.07	0.013
DCB, Cu	1.2	92	0.30	0.008
DCB, Al_2O_3	1.3	100	0.38	0.158 ← 67% R _{th,mod}
DCB, Cu	1.5	116	0.30	0.007
DCBlot	1.5	116	0.10	0.012
GP, Cu	3.0	231	3.00	0.032 ← 14% R _{th,mod}
Summen			4.22	<u>0.236</u>

Hinweis: Spreizung sehr konservativ gerechnet

pro Mosfet/IGBT-Die

8.5 Thermischer Modulwiderstand

Beispiel FEM-Simulation

Schritt 1

Problemdefinition

- Geometrie
- Materialparameter
- Randwertbedingungen

Schritt 2

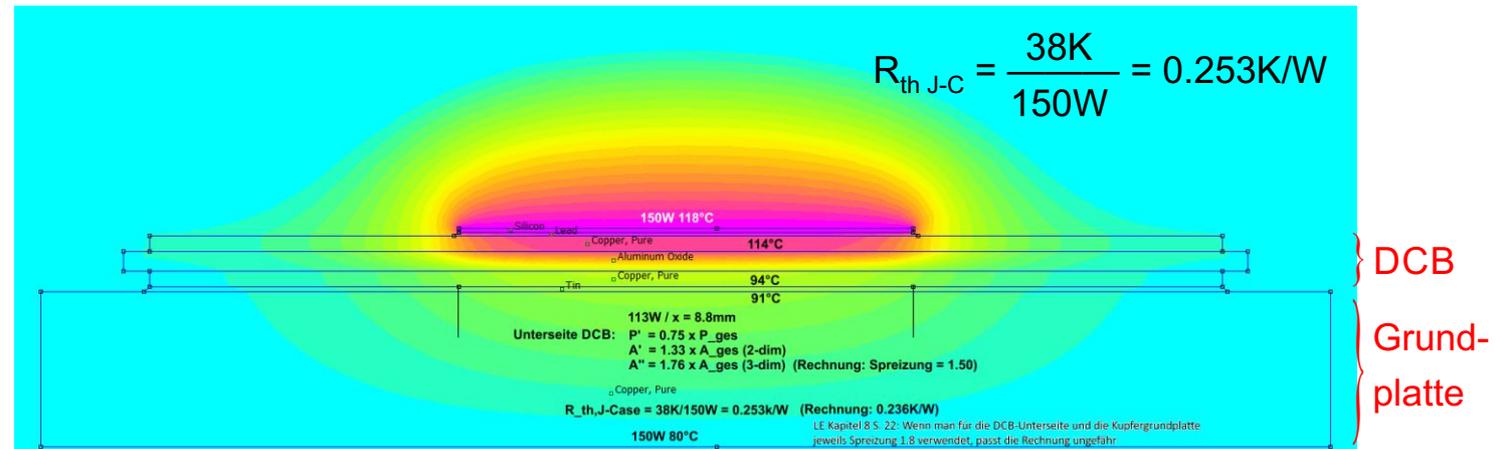
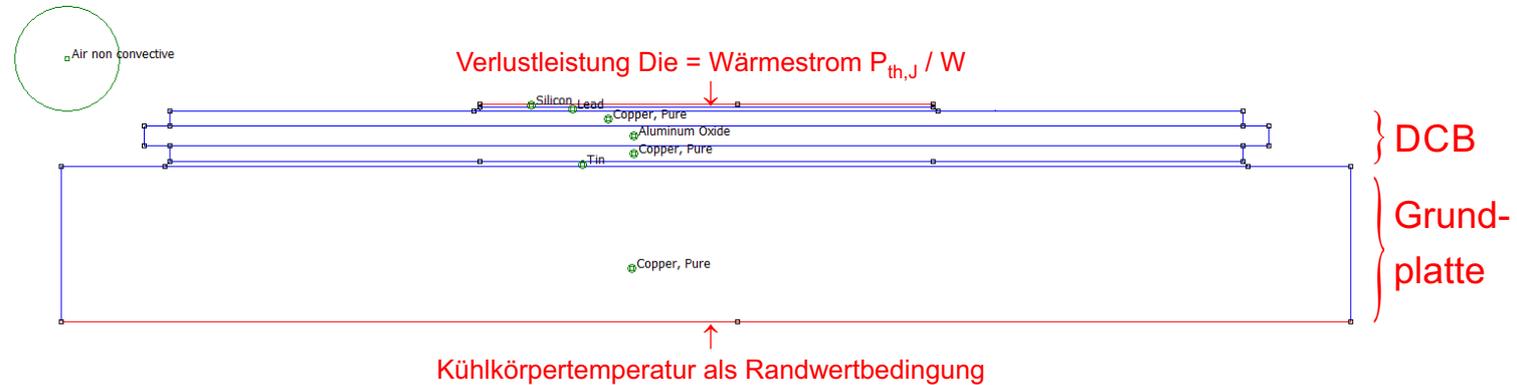
FEM-Rechnung

- Triangles } Software
- Solver }

Schritt 3

Postprozessoranalyse

- Density Plot
- Point Properties
- Analytische Kontrollrechnung
- Problem: hier nur 2D

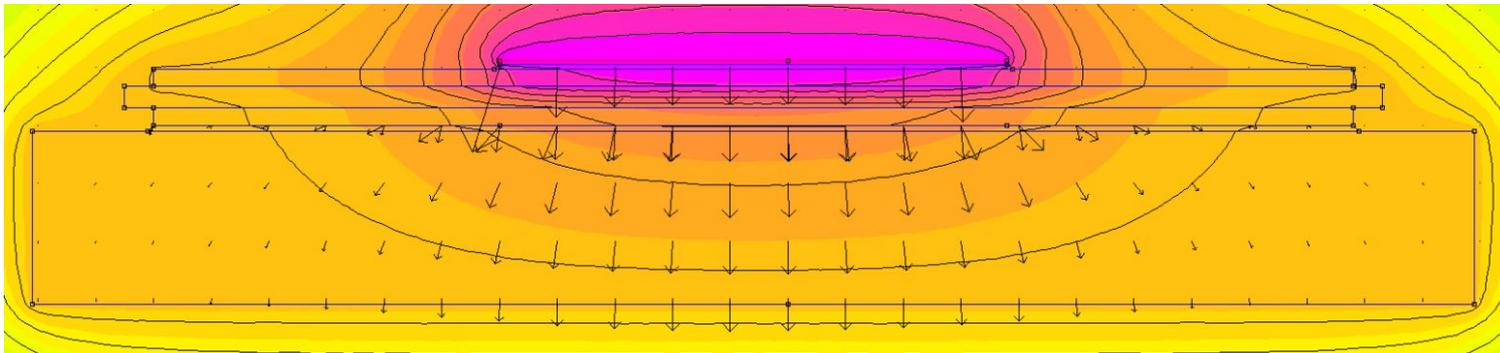


Simulation: A. Kleimaier / femm 4.2, David Meeker, www.femm.info

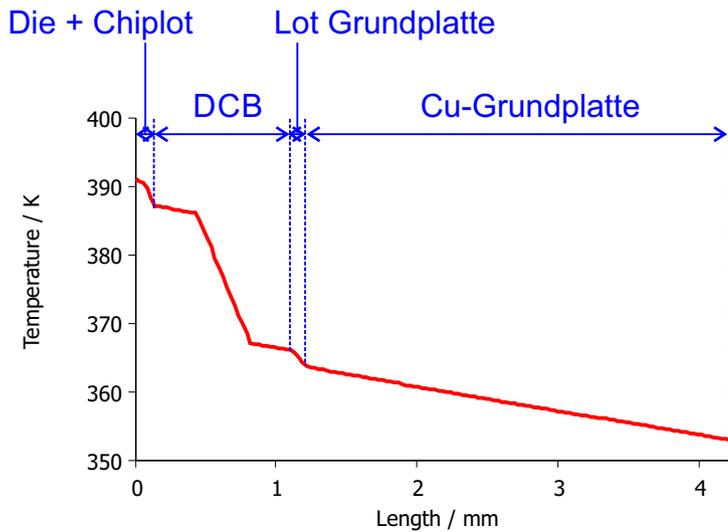
8.5 Thermischer Modulwiderstand

Beispiel FEM-Simulation

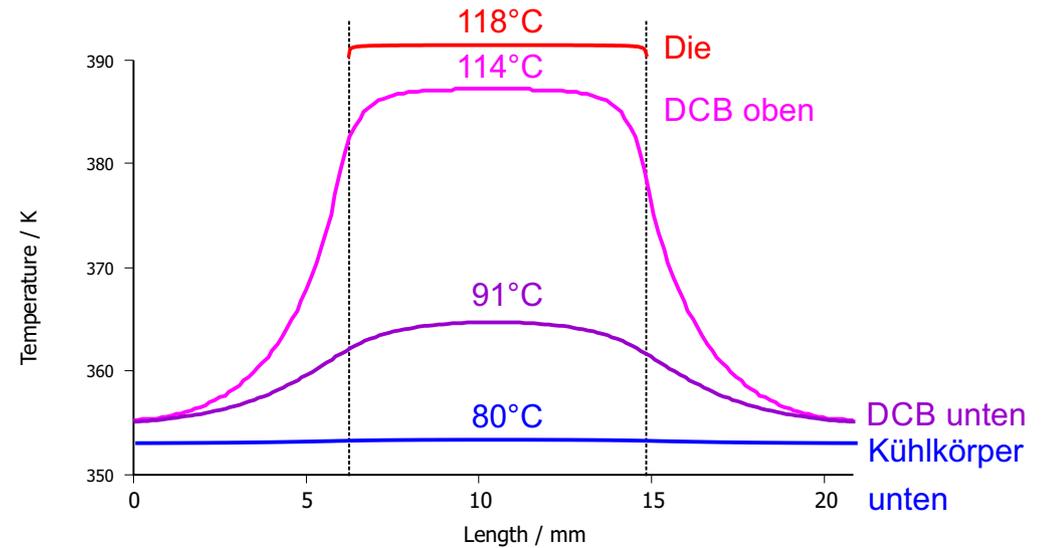
Contourplot und Heat flux density vectors



Temperaturverlauf vertikal



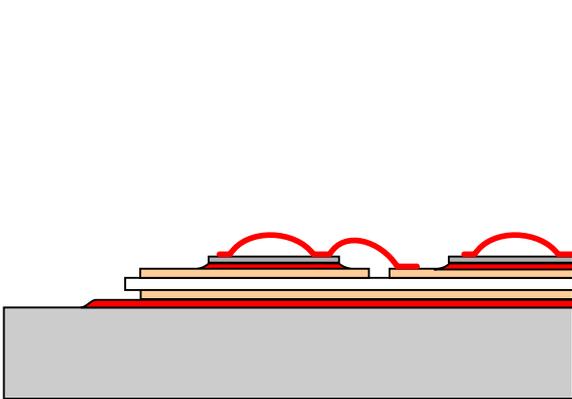
Temperaturverläufe horizontal



Simulation: A. Kleimaier / femm 4.2, David Meeker, www.femm.info

8.5 Thermischer Modulwiderstand

Beispielrechnung AlN-DCB mit AlSiC-Grundplatte

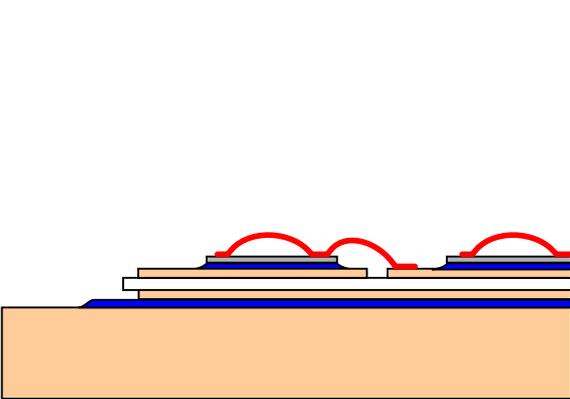


Element	Spreizung	A [mm ²]	d [mm]	R _{th} [K/W]
IGBT-Die	1.0	77	0.07	0.006
Chiplot	1.0	77	0.07	0.013
DCB, Cu	1.2	92	0.30	0.008
DCB, AlN	1.3	100	0.63	0.035 ← 21% R _{th,mod}
DCB, Cu	1.5	116	0.30	0.007
DCBlot	1.5	116	0.10	0.012
GP, AlSiC	2.5	193	3.00	0.086 ← 51% R _{th,mod}
Summen			4.47	<u>0.167</u>

pro Mosfet/IGBT-Die

8.5 Thermischer Modulwiderstand

Beispielrechnung Modul mit AlN-DCB mit Cu-Grundplatte, vollständig gesintert



Element	Spreizung	A [mm ²]	d [mm]	R _{th} [K/W]
IGBT-Die	1.0	77	0.07	0.006
Ag-Sinterschicht	1.0	77	0.02	0.001
DCB, Cu	1.2	92	0.30	0.008
DCB, AlN	1.3	100	0.63	0.035
DCB, Cu	1.5	116	0.30	0.007
Ag-Sinterschicht	1.5	116	0.03	0.001
GP, Cu	3.0	231	3.00	0.032
Summen			4.47	<u>0.090</u>

pro Mosfet/IGBT-Die

8.6 Dynamisches Verhalten

Beispielhafte Berechnung von Zeitkonstanten

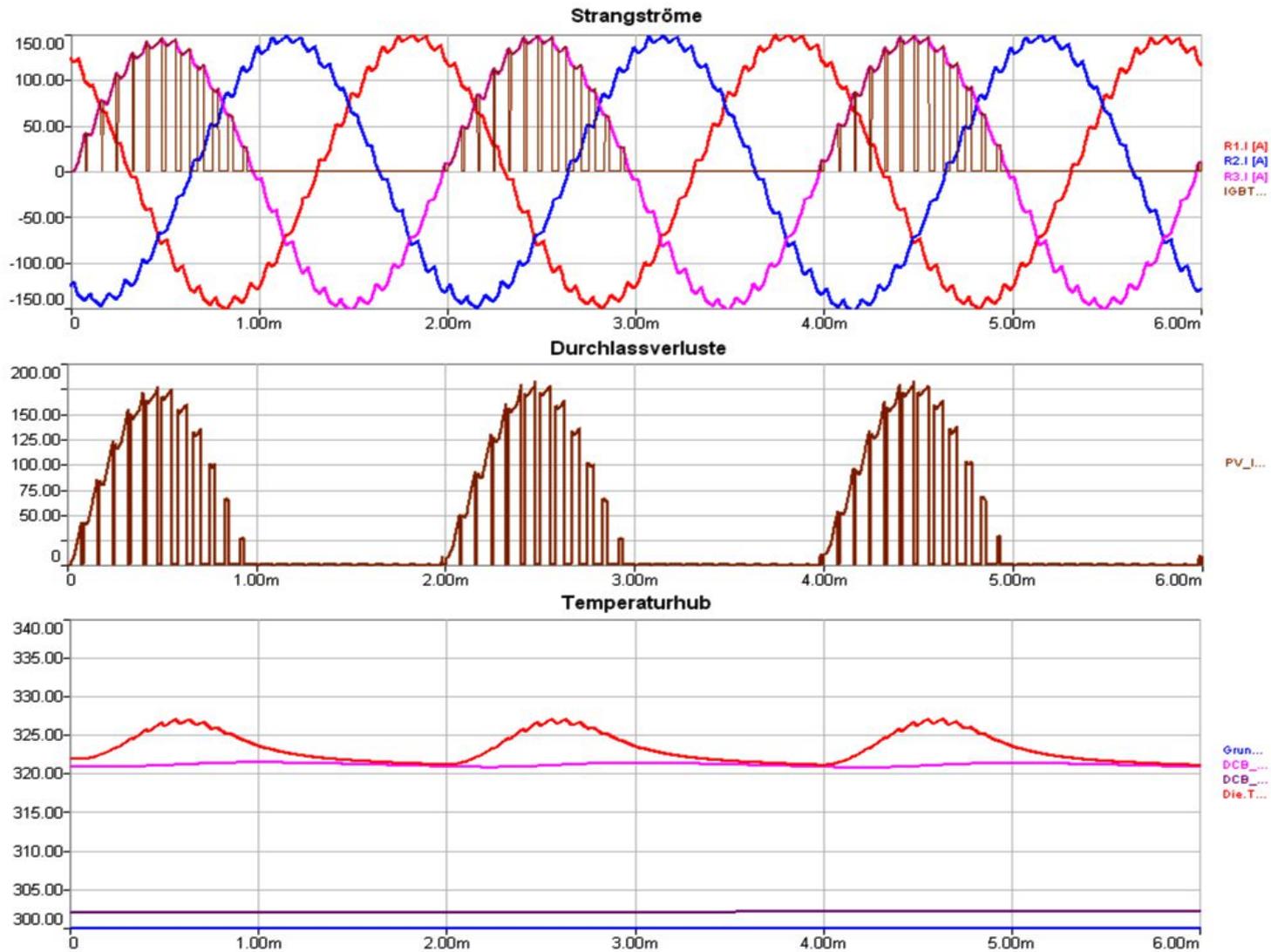
IGBT-Die SIGC76T60R3	A = 7.9mm x 9.7mm, d = 0.07mm	$C_{th} = 9 \text{ mWs/K}$	} 112mWs/K
Chiplot	A = 7.9mm x 9.7mm, d = 0.07mm	$C_{th} = 9 \text{ mWs/K}$	
DCB-Kupferschicht, oben	A = 8.7mm x 10.7mm, d = 0.30mm	$C_{th} = 94 \text{ mWs/K}$	
Entwärmung des Pakets über den R_{th} des darunterliegenden Al_2O_3		$R_{th} = 0.158 \text{ K/W}$	$\tau_{th} = 18\text{ms}$
CU-Modulgrundplatte (SKM 400GB066D)	A = 59mm x 104mm, d = 3mm Entwärmung Case-Heatsink, Paste	$C_{th} = 63 \text{ Ws/K}$ $R_{th} = 0.038 \text{ K/W}$	$\tau_{th} = 2.4\text{s}$
Al-Kühlkörper, ohne Rippen (Fischer SK461)	A = 400mm x 300mm, d = 20mm Entwärmung bei $v_L = 5\text{m/s}$	$C_{th} = 5952 \text{ Ws/K}$ $R_{th} = 0.020 \text{ K/W}$	$\tau_{th} = 2\text{min}$

...zum Verständnis:

τ_{th} wird mit fallendem R_{th} kleiner, weil sich ein kleinerer Temperaturhub ergibt \Rightarrow Endwert wird schneller erreicht!

8.6 Dynamisches Verhalten

Betrieb bei $f_0 = 500\text{Hz}$ und $f_T = 12\text{kHz}$, $a = 80\%$



Strangströme

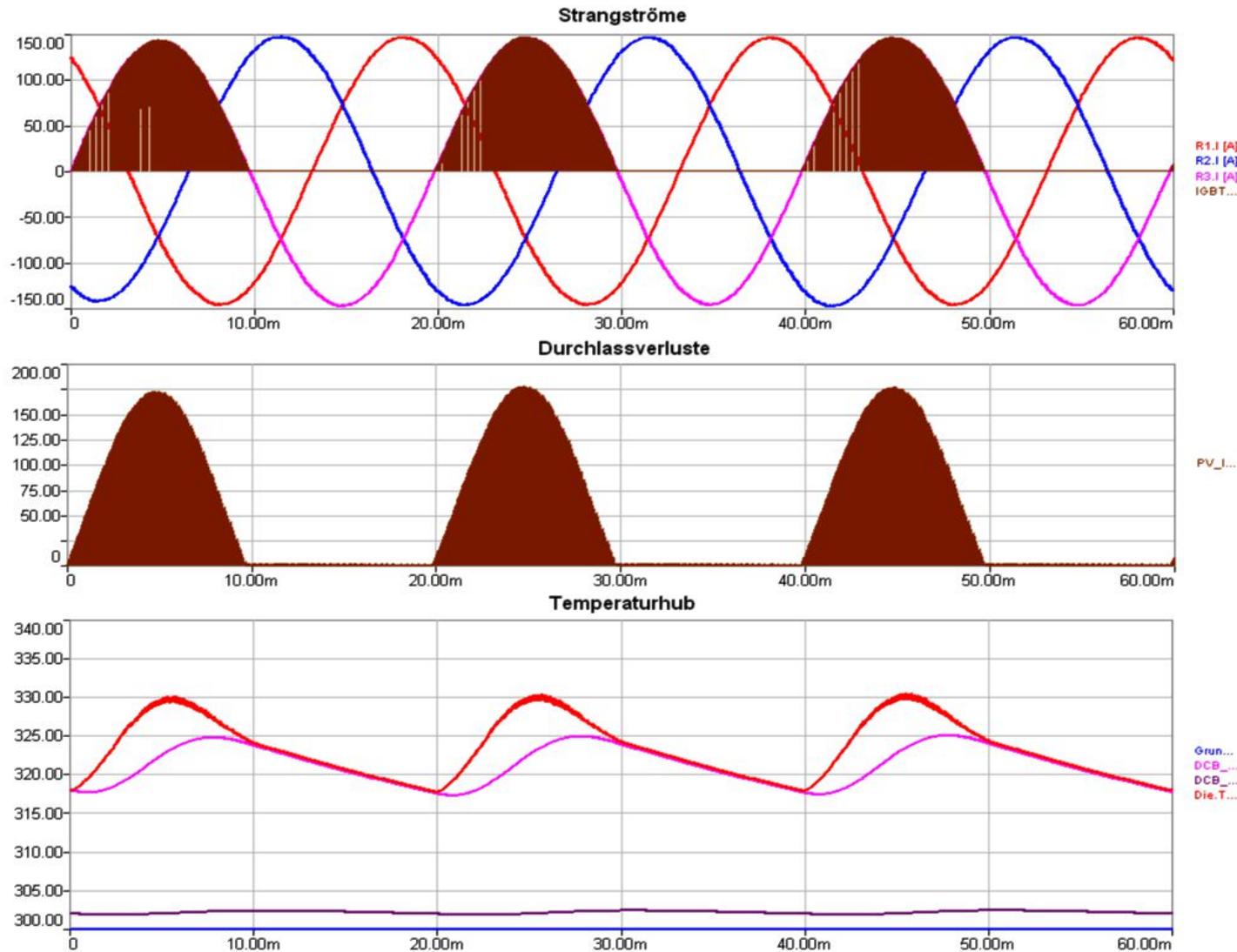
Durchlassverluste
Highside-IGBT
in Phase 3

Temperaturverläufe:

Die
DCB Cu-Schicht oben
DCB Cu-Schicht unten
Grundplatte = Bezug 300K

8.6 Dynamisches Verhalten

Betrieb bei $f_0 = 50\text{Hz}$ und $f_T = 12\text{kHz}$, $a = 80\%$



Strangströme

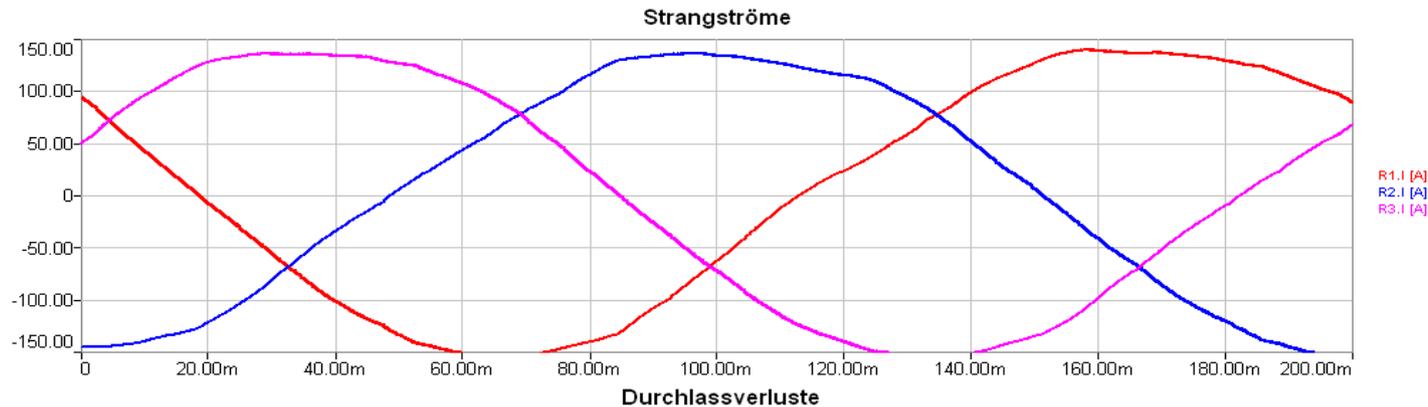
Durchlassverluste
Highside-IGBT
in Phase 3

Temperaturverläufe:

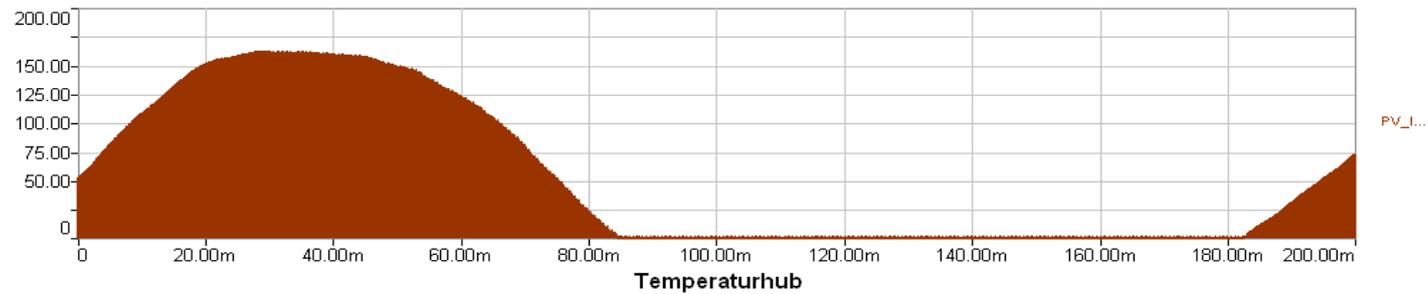
Die
DCB Cu-Schicht oben
DCB Cu-Schicht unten
Grundplatte = Bezug 300K

8.6 Dynamisches Verhalten

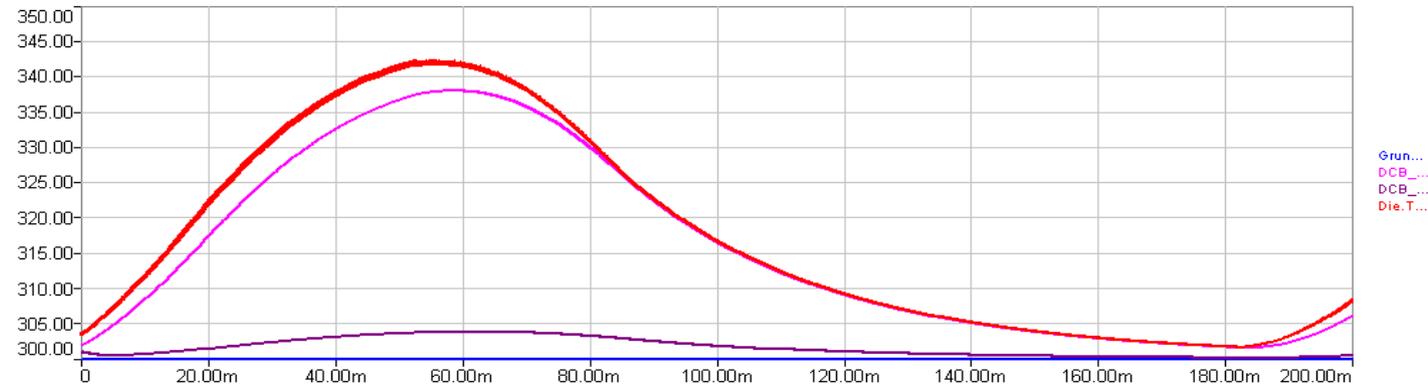
Betrieb bei $f_0 = 5\text{Hz}$ und $f_T = 12\text{kHz}$, $a = 10\%$



Strangströme



Durchlassverluste
Highside-IGBT
in Phase 3

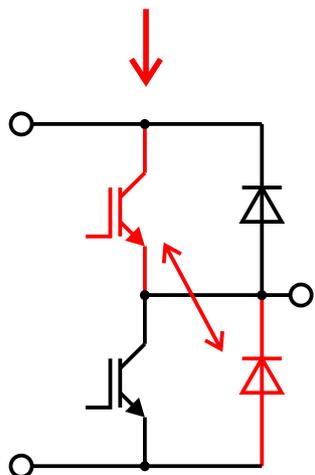
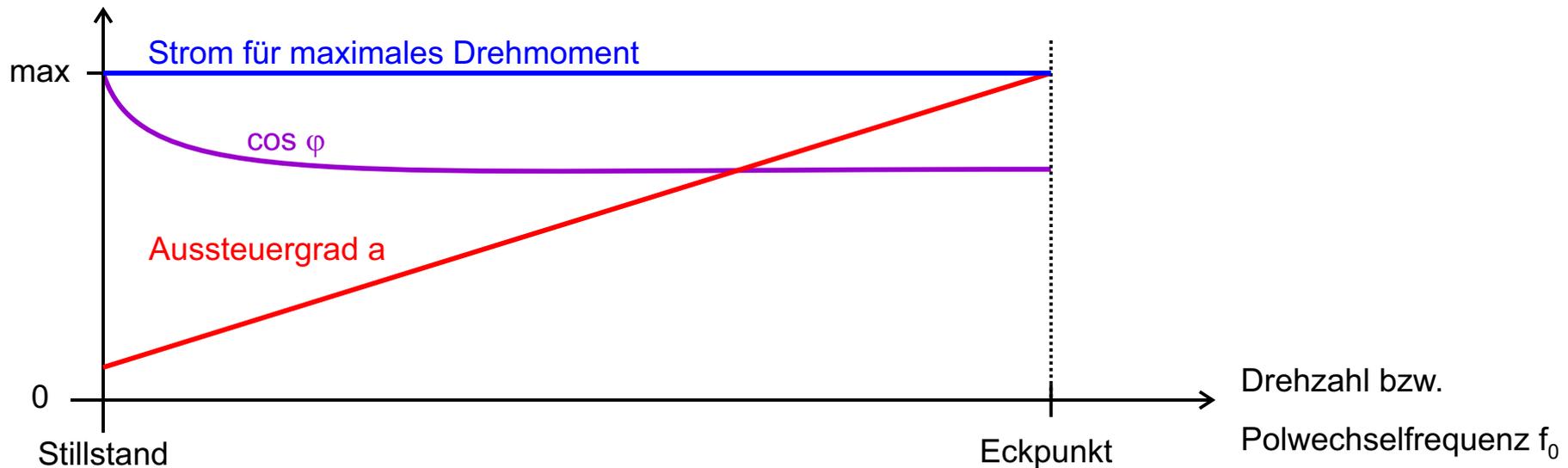


Temperaturverläufe:

Die
DCB Cu-Schicht oben
DCB Cu-Schicht unten
Grundplatte = Bezug 300K

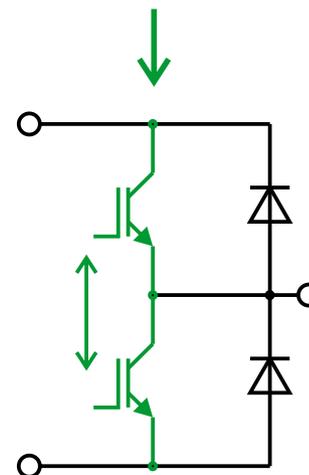
8.6 Dynamisches Verhalten

Belastung der Halbleiter bei drehzahlvariablen Umrichterantrieben



Worst-Case:

- Phase pulst im Stromscheiden mit f_T
- Vorteil: kleine Aussteuerung
- Durchlassverluste IGBT ↔ Diode $\approx 50:50$
- Schaltverluste: **hauptsächlich IGBT**



Worst-Case:

- Fast Durchschaltbetrieb
- Hauptsächlich IGBTs leitend
- IGBT ↔ IGBT = 50:50 mit f_0
- Vorteil: **hohe Grundfrequenz, schneller als kleinstes τ_{th}**

8.7 Entwärmung Gesamtsystem

Vergleich mit Standardaufbau

Standard, stationär: Luftkühlung

Problem 1: Wärmeübergang Modul - Kühler

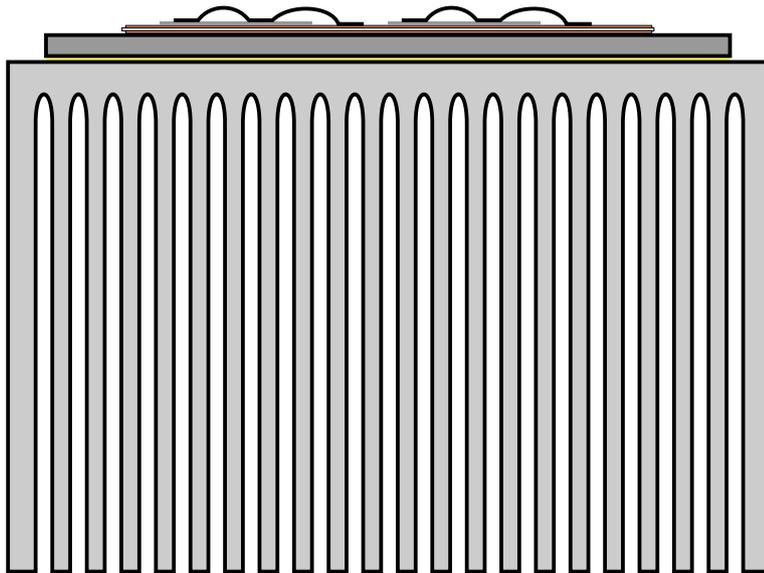
Wärmeleitpaste: $\lambda \approx 1..10 \text{ W/mK}$

Problem 2: Wärmeübergang Kühler - Luft

⇒ Baugröße + Gewicht

Beispiel aus Kapitel 7:

Kühlkörper ⇒ Luft 0.020 K/W gesamt (3 Phasen)



Automotive, Traktion: Wasserkühlung

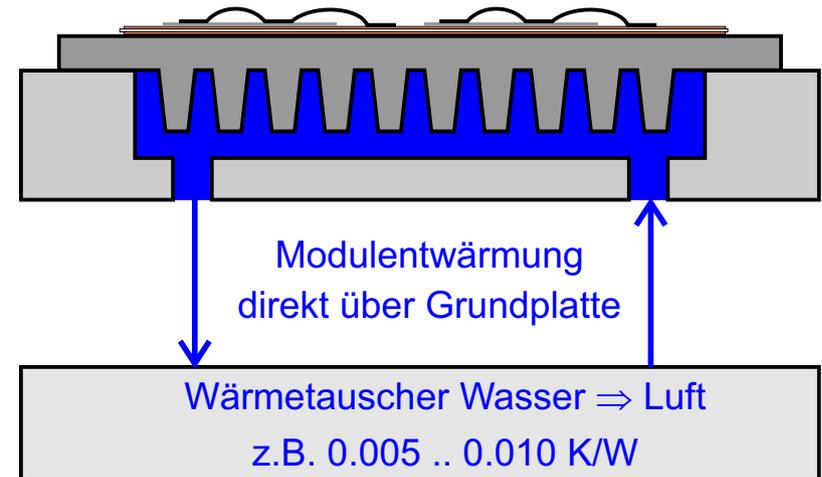
Vorteil 1: kleines ΔT_{S-A} , bessere WR-Ausnutzung

Vorteil 2: baut sehr kompakt, kleines Gewicht

Nachteil: ggf. aufwändiges Wasserkühlsystem
(Ausfallsicherheit, Kosten)

Anhaltspunkt:

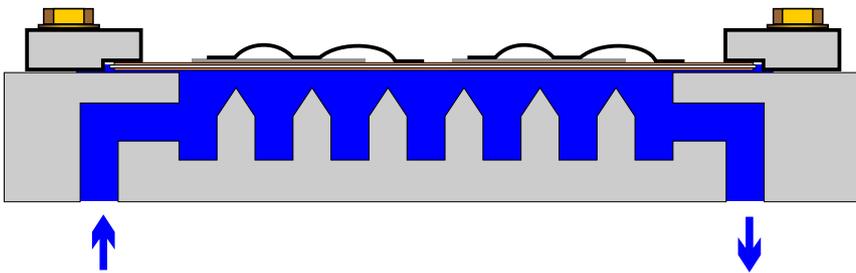
3 Phasenmodule ⇒ Wasser 0.003 .. 0.005 K/W



8.7 Entwärmung Gesamtsystem

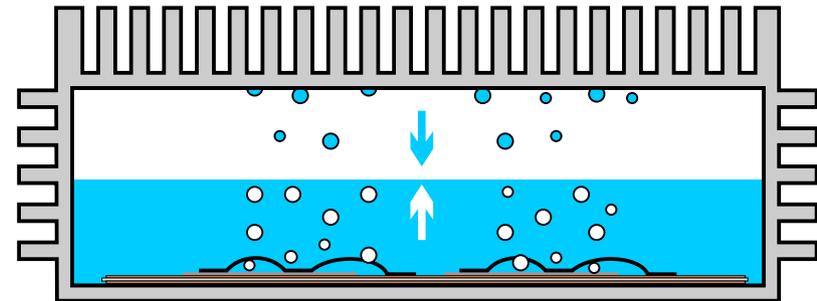
Alternative Kühlmethoden

Direkte DCB-Kühlung



- Kühlmittel: Wasser
- möglichst turbulente Strömung an der DCB-Unterseite begünstigt Wärmeübergang
- Gefahr: Betrieb mit Luftblasen (Zeitkonstante DCB ca. 20ms)
- Gefahr: Undichtigkeit an DCB-Auflage

Siedebadkühlung



- Kühlmittel: FC (verschiedene Siedepunkte)
- Dampfblasen steigen an der Wärmequelle auf und kondensieren an den Gehäusewänden
- Problem: gesamtes System muß dicht sein, inklusive der elektrischen Durchführungen
- Korrekte Befüllung, Lage im Betrieb???