# Neue Entwärmungskonzepte für Silizium Carbit (SiC) - Transistoren Leistungsklasse 300 Watt

FED-Regionalveranstaltung bei den Lackwerken Peters, 27.11.2025

Präsentiert von: Umer Ahmed

© Alle Rechte geschützt – GED GmbH, D-53809 Ruppichteroth – Germany

GESELLSCHAFT FÜR ELEKTRONIK UND DESIGN
MODERNE VERBINDUNGSTECHNOLOGIEN

# Warum ist das thermische Design so entscheidend?

- Anforderung an moderne Leistungselektronik: Höhere Leistungen, kleinere Bauform.
- SiC ermöglicht >100 W/cm² und erhöht die Wärmemanagement-Anforderungen.
- Thermische Engstellen entstehen oft zwischen Substrat und TIM und verkürzen die Lebensdauer.
- Gutes thermisches Design stabilisiert den Wärmeübergang und verhindert Leistungsverluste. (Tj : Thermal Junction)

Co by GEDmbH, 53809 Germany 2025

# Warum Silicium Carbit (SiC)-Transistoren?

- Höhere Leistungsdichte durch große Bandlücke (Eg ≈ 3,3 eV).
- SiC ermöglicht hohe Schaltfrequenzen, hohe Wärmeleitfähigkeit und effizienten Betrieb bis ≥150 °C.
- SiC treibt E-Mobilität und Antriebe voran,

  das Wärmemanagement bleibt entscheidend.

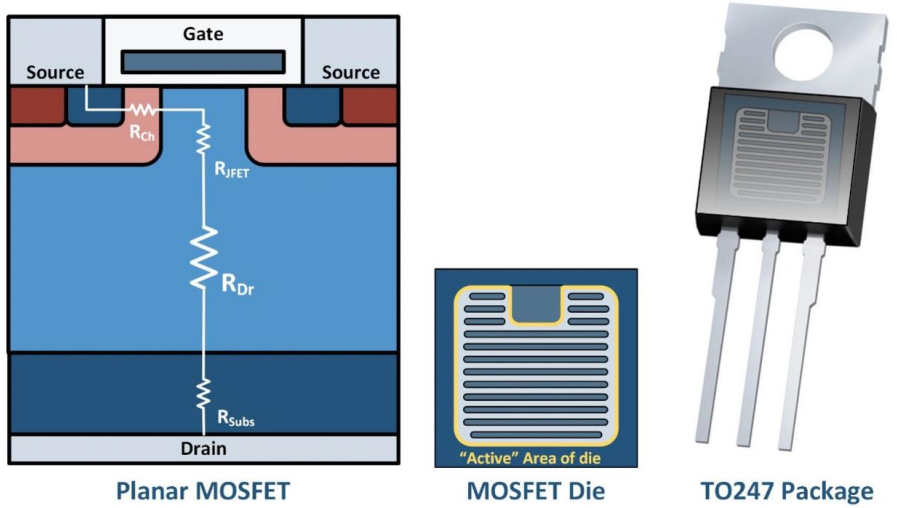



*Abbildung 1: MOSFET's*

# Thermisches Modell vom Bauteil zur Umgebung

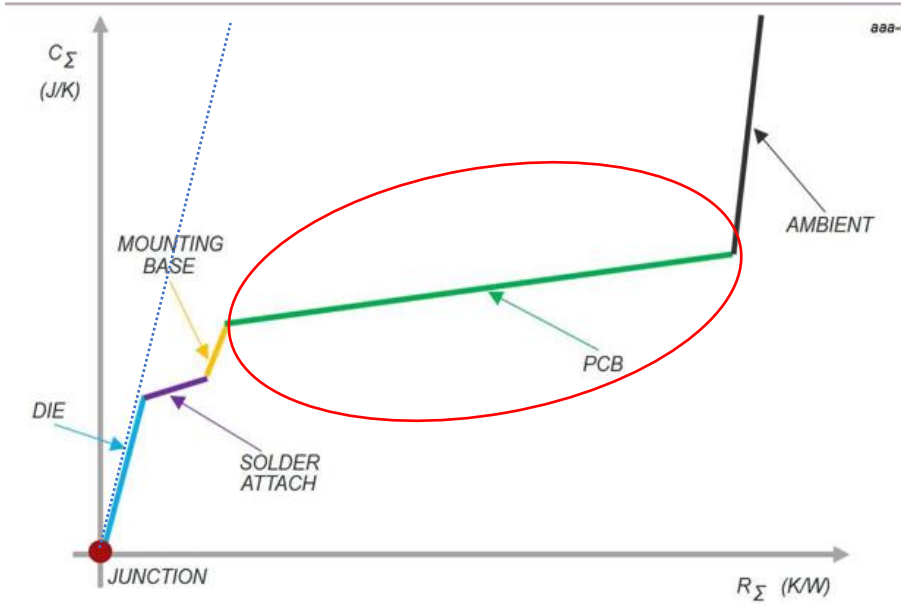



*Abbildung 2: Kumulative Funktionsstruktur-Grafik*

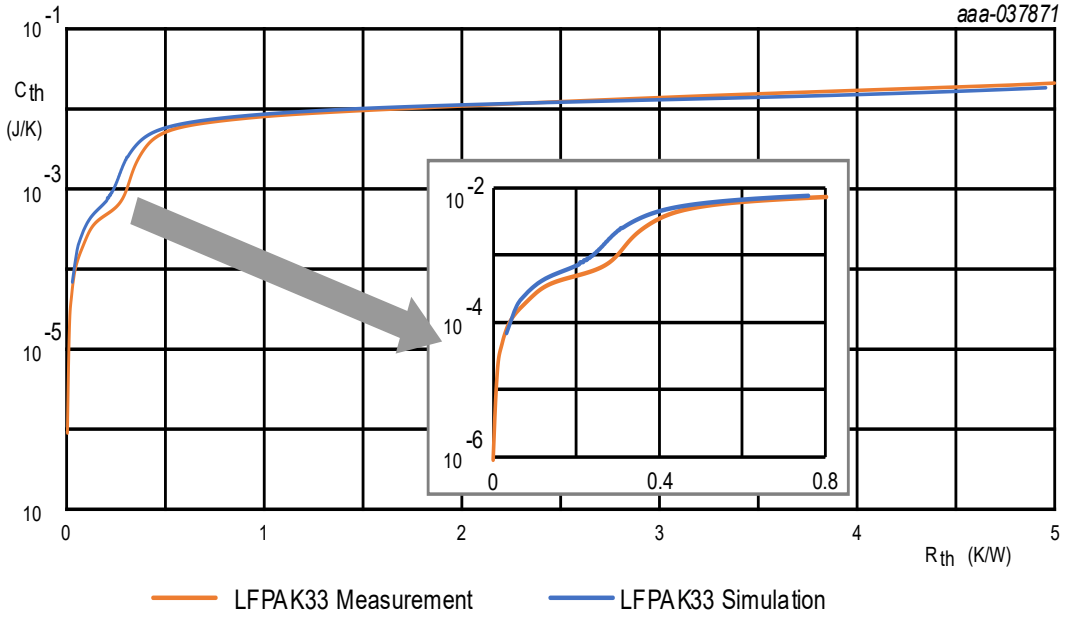



*Abbildung 3: Vergleich der kumulativen Strukturfunktion*

- Die kumulative Strukturfunktion (CSF) zeigt thermische Grenzen zwischen den Schichten auf, wobei jeder Wendepunkt eine Materialschnittstelle (Chip, Lötstelle, DBC, TIM usw.) anzeigt.
- Im Bereich unterhalb von 1 K/W und 0,01 J/K stellen die Kurven die Wärme dar, die von der Verbindungsstelle zur Montagebasis fließt, und der lange flache Gradient nach 1 K/W, der einen relativ hohen Wärmewiderstand anzeigt, deutet auf Wärme hin, die in die Leiterplatte fließt.

# Leistungsaufnahme im Vergleich zu Betriebsparametern

- MOSFETs sind in der Regel für den größten Leistungsverlust verantwortlich.
- Der Leitungsverlust entsteht im Durchlasswiderstand des MOSFET ($R_{DS(ON)}$).
- Schaltverluste steigen mit der Schaltfrequenz und den elektrischen Parametern.

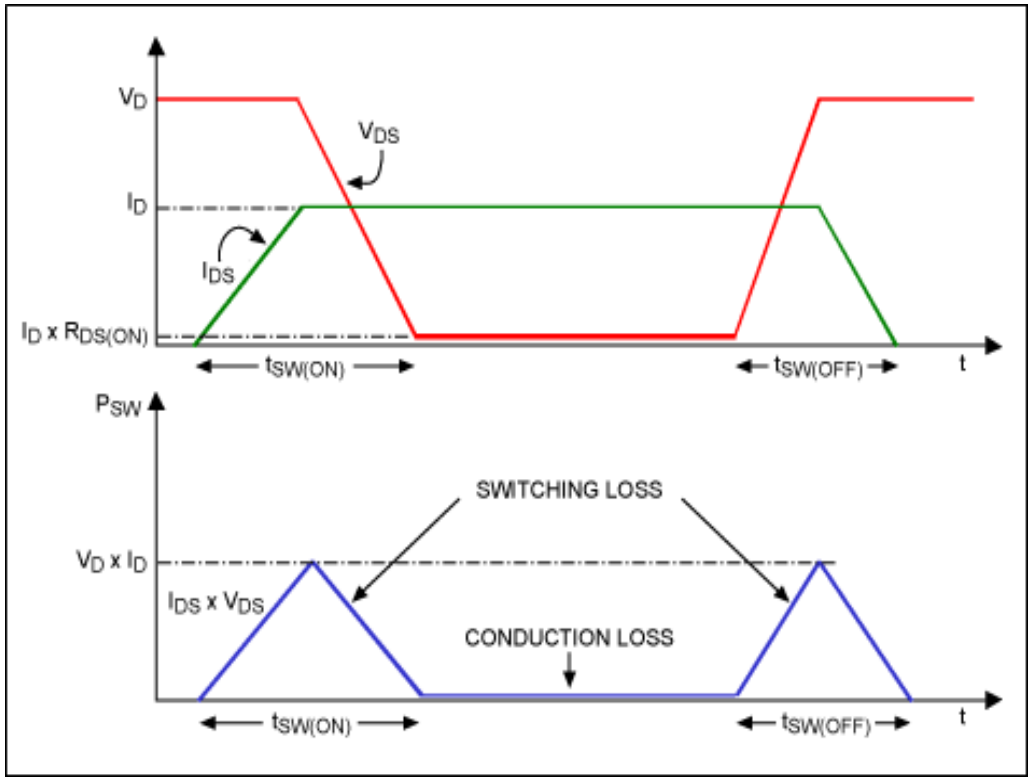



*Abbildung 4: Wellenformen von Spannung, Strom und Verlusten des Leistungs-MOSFET*

# Thermische Designanforderungen für Leistungselektronik der Klasse >30 W

Das Symbol θ wird im Allgemeinen zur Bezeichnung des Wärmewiderstands verwendet. Der Wärmewiderstand wird in °C/Watt (°C/W) angegeben und bezeichnet den Widerstand, auf den die Wärme bei der Übertragung von einer heißen IC-Verbindung zur Umgebungsluft trifft.

| Parameter | Beschreibung | Typische Werte / Anmerkungen |
|---|---|---|
| **Maximale Sperrschichttemperatur (Tj max)** | Die höchstzulässige Temperatur am Halbleiterübergang | Häufig 125–150 °C, je nach Gerät |
| **Zulässiger Wärmewiderstand zwischen Anschluss und Umgebung (RthJA)** | Maximale thermische Widerstandsfähigkeit von der Verbindungsstelle zur Umgebung, die Tj < Tj max gewährleistet | Berechnet aus P × Rth ≤ Tj max – Ta |

*Tabelle 1: Gesamtwärmewiderstand Widerstandspfad*

- θ = Thermal Resistance (°C/W)
- P = Total Device Power Dissipation (W)
- T = Temperature (°C)
- ΔT = Temperature Differential = P × θ
- $\theta_{JA}$ = Junction-Ambient Thermal Resistance
- $\theta_{JC}$ = Junction-Case Thermal Resistance
- $\theta_{CA}$ = Case-Ambient Thermal Resistance
- $\theta_{JA} = \theta_{JC} + \theta_{CA}$
- $T_J = T_A + (P \times \theta_{JA})$
- *Note: $T_{J(Max)}$ = 150°C (Sometimes 175°C)*

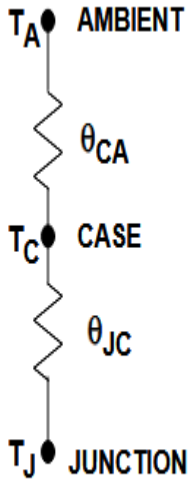



*Abbildung 5: Grundlegende thermische Zusammenhänge*

# Substrat- und Verpackungskonzepte

- Substrate dienen als Basis für den Aufbau von Halbleiterkomponenten.
- Sie unterscheiden sich in Material, Herstellung und Leistung je nach Anwendung.
- DBC-Substrate bieten hohe Wärmeleitfähigkeit und mechanische Robustheit.

**Direct Bonded Copper (DBC)**

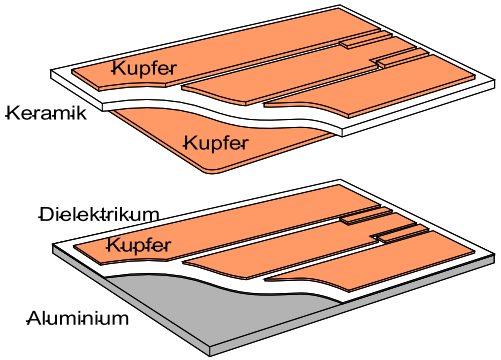



*Abbildung 6:* Direct Bonded Copper (DBC)

**IMS (Insulated Metal Substrate)**

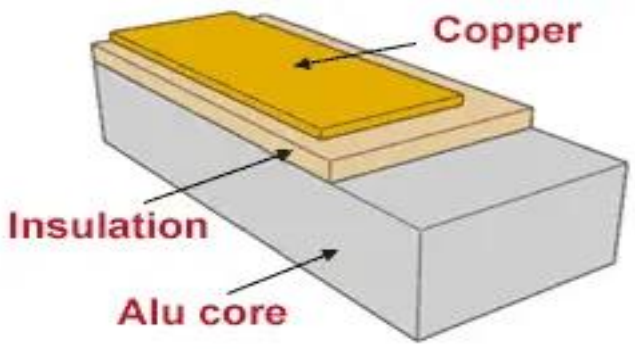



*Abbildung 7: IMS (Insulated Metal Substrate)*

**AMB (Active Metal Brazed)**

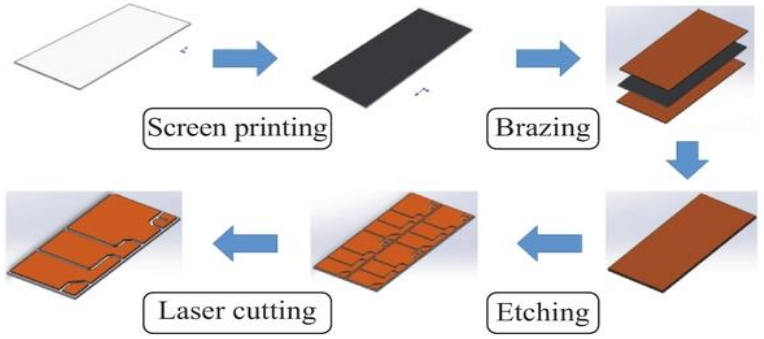



*Abbildung 8: AMB (Active Metal Brazed)*

# Features der Substrattypen

| Technologie | Beschreibung | Thermische/mechanische Vorteile | Typische Anwendungen |
|---|---|---|---|
| **DBC (Direct Bonded Copper)** | Keramik (in der Regel $Al_2O_3$ oder AlN) mit Kupferschichten verbunden | Hohe Wärmeleitfähigkeit, elektrisch isolierend, robust für hohe Leistung | Leistungsmodule, IGBTs, MOSFETs |
| **IMS (Insulated Metal Substrate)** | Metallbasis (Aluminium oder Kupfer) mit dielektrischer Schicht und Kupferleiterbahnen | Moderate Wärmeleitfähigkeit, dünnes Profil, kostengünstig | LED-Module, Stromrichter |
| **AMB (Active Metal Brazed)** | Kupferschichten, die mit aktiver Metallbindung auf Keramik gelötet sind | Hervorragende Wärmeleitfähigkeit, sehr hohe Zuverlässigkeit | Hochleistungsmodule, Automobilindustrie, Industrie |
| **FR4 Dickkupfer & Die-Embedding** | Möglichkeiten für Die-Embedding, nanoWired | Hohe Wärmeleitfähigkeit, Konzept für beidseitige Entwärmung | Diverse |

# GED nanoAVT vom Chip bis zur Umgebung

- Die kommenden Folien zeigen **den vollständigen thermischen Pfad**, den die Wärme durchläuft:

❖Vom Halbleiter-Chip (Die)

❖in das darauf montierte Flüssigkeits- Kühlkörpersystem

❖bis zur Abgabe der Wärme an die Umgebungsluft.

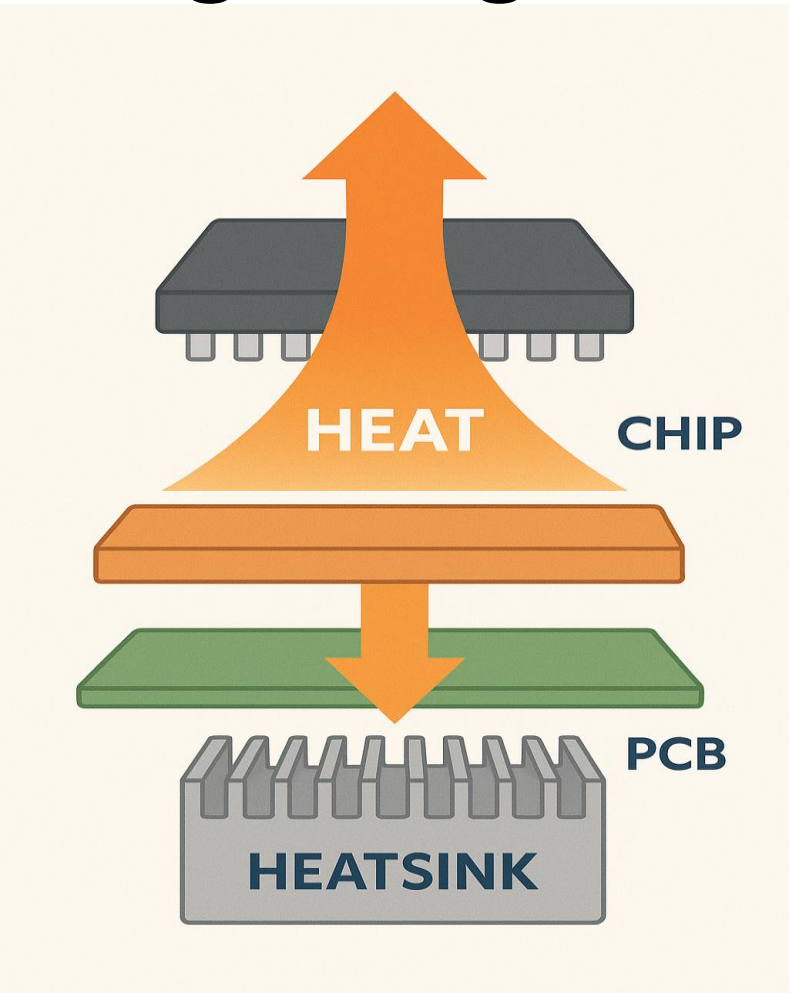



*Abbildung 9:Wärmeabführ vom Chip bis zur Umgebung*

# Kompakt und effizient: Integration von SiC-Dies

- Hohe Mechanische Stabilität und optimale Wärmeleitung
- Reduzierte parasitäre Induktivität und Kapazität
- Schnelleres Umschalten und geringere Verluste
- Niedrigere elektromagnetische Störungen
- Ermöglicht hohe Leistungsdichte in kompakten Modulen

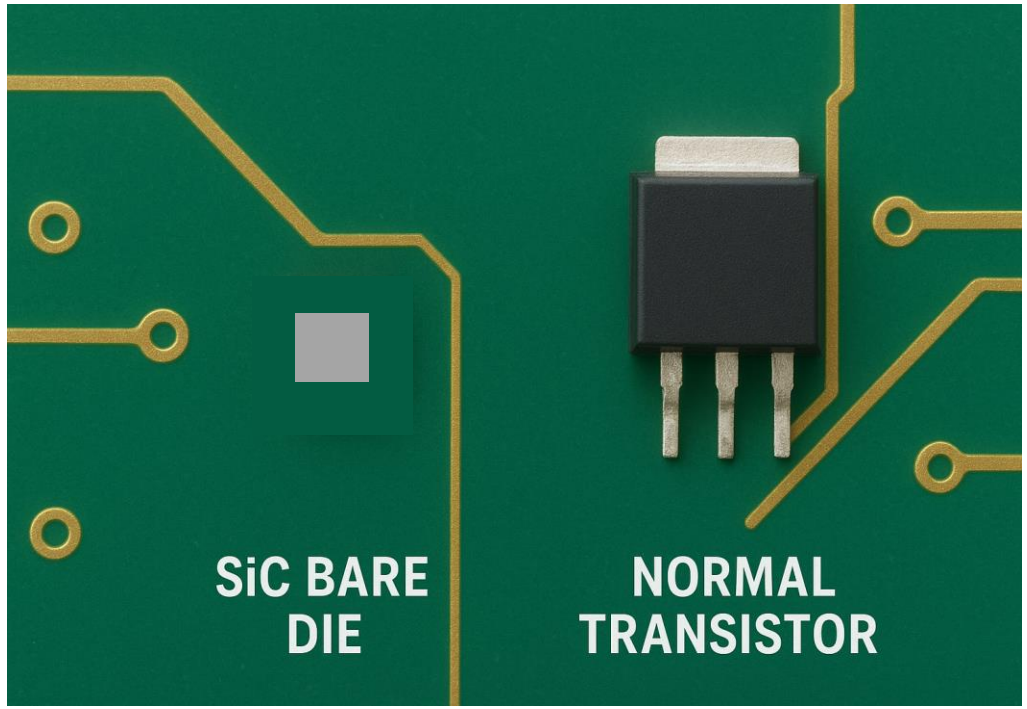



*Abbildung 12: Die und Gehäuse Bauteil Unterschied*

| SiC-Die | SOT-Transistor |
|---|---|
| 4,3□ mm x 0,37dick | 16 x 19mm x 5,5 dick |

# NanoWired: Moderne Chip-to-Substrat Thermal-schnittstelle

- **NanoWiring**
  - Metallische Nanodrähte (Cu/Ag/Ni/Au), 10–50 µm
  - Extrem große Kontaktfläche → sehr niedriger R_th
- **Bonding-Verfahren**
  - **KlettWelding:** Metallische Verbindung bei Raumtemperatur
  - **KlettSintering:** Niedertemperatur-Sintern (~150 °C), höhere Festigkeit
- **Vorteile**
  - Keine Voids
  - Ultra-niedriger thermischer Widerstand (**0Ω**)
  - Hohe Zuverlässigkeit: –50 °C bis 500 °C

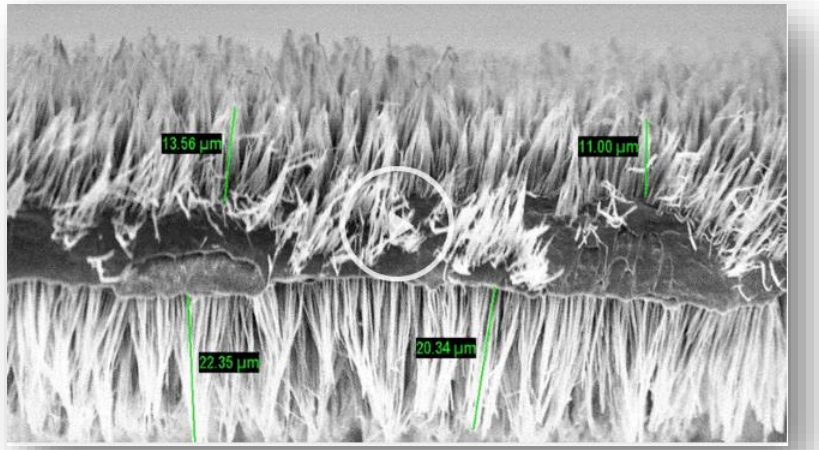
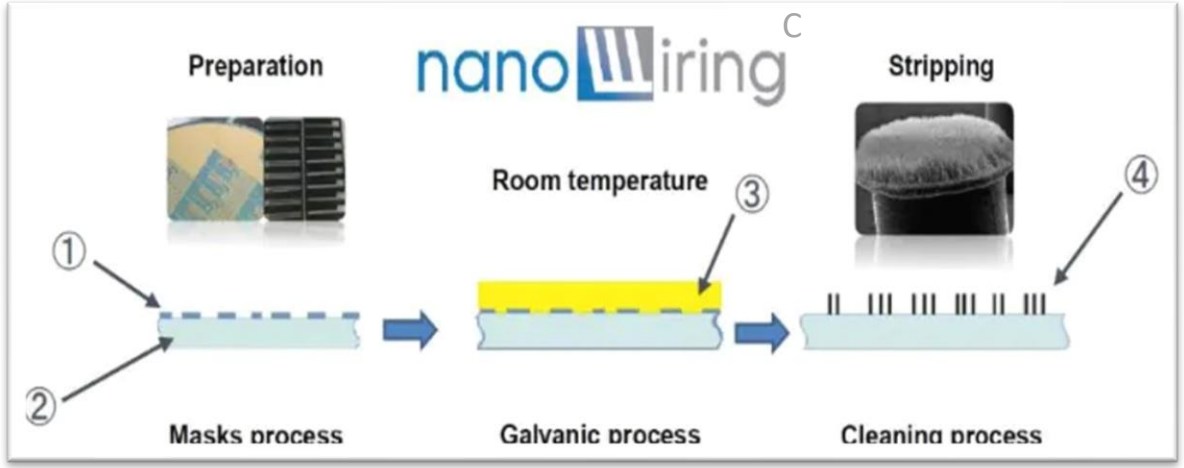



*Abbildung 10 & 11:* Nanowiring Metallische nanodrähte



# NanoWiring auf Dickkupfer PCB

- **Dickkupfer PCB 6 lagen**
  - 4 Kupferlagen à 210 µm
  - Hohe Wärmeleitfähigkeit & Stromtragfähigkeit
- **NanoWiring-Bonding**
  - DIE ↔ PCB-Cu-Layer
  - KlettSintering

❖ **Vorteile**

- Minimaler R_th ins PCB
- Keine Löt-Delamination, keine Flussmittelreste
- Effiziente Wärmeverteilung in alle Richtungen

**SiC-Transistor Die embedded in Dickkupfer-PCB**

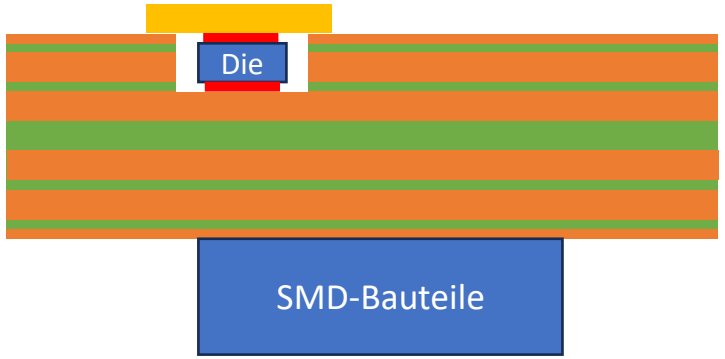



*Abbildung 13:* Dickkupfer PCB Stackup

# Kupferteil & Wärmefluss

- **Kupferteil**
  - Via KlettSintering direkt mit dem DIE verbunden
  - Schnelle laterale Wärmeverteilung
  - Geringerer thermischer Engpass
- **Warum Kupfer?**
  - Sehr hohe Wärmeleitfähigkeit (~370 W/mK)
  - Reduziert Hotspots, homogenisiert Temperatur

❖ **Leistungsvorteile**
  - Niedriger & stabiler R_th
  - Keine Lötfehler (Voids)
  - Hohe Zuverlässigkeit in der Verbindung

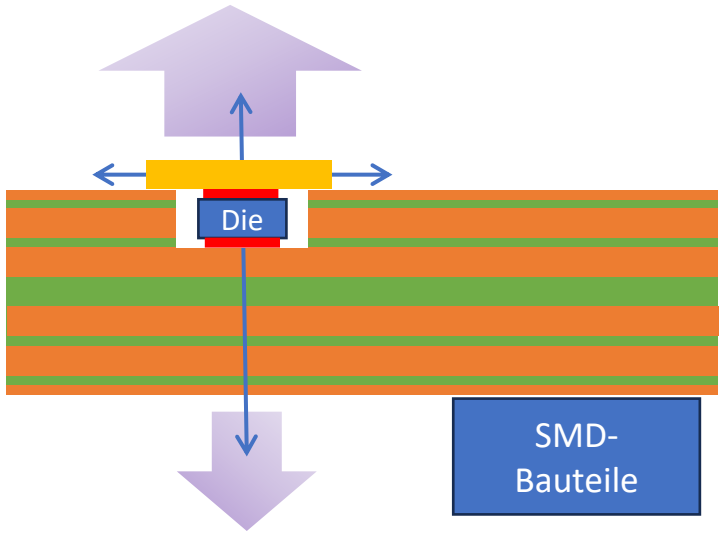



*Abbildung 14:* SiC-Transistor Die embedded in Dickkupfer-PCB

# Aktive Kühlkonzepte

| Verfahren | Beschreibung | Vorteile | Überlegungen / Kompromisse |
|---|---|---|---|
| **Ventilatoren / Zwangsbelüftung** | Luftstrom über Bauteile oder Kühlkörper zur Erhöhung der konvektiven Wärmeübertragung | Einfach, kostengünstig, skalierbar | Lärm, bewegliche Teile, eingeschränkte Wirksamkeit bei sehr hoher Leistung |
| **Flüssigkeitskühlung** | Pumpen von Kühlmittel (Wasser, Glykol) durch Kühlplatten oder Rohre, die an heißen Bauteilen angebracht sind | Sehr effizient, kann hohen Wärmefluss bewältigen | Komplexität, Kosten, potenzielle Leckagen, Wartung |
| **Mikrokanalsysteme** | Miniatur-Flüssigkeitskanäle, die direkt in das Gerät oder Substrat integriert sind | Extrem hohe thermische Leistung auf kleinem Raum | Hohe Herstellungskosten, komplexe Konstruktion, Probleme mit Druckabfall |

*Tabelle 3: Beschreibung aktiver Kühlkonzepte*

- **Zuverlässigkeit**
- **Integration**

# Flüssigkeitskühlung

- **Wärmefluss**
  - Wasserkühlung Alu-Kühlkörper am PCB
  - Pumpe → Radiator → Lüfter
  - Rückführung zum Kühlkörper
- **Zusätzlicher Pfad**
  - Aluminiumprofil-Wand als passiver Kühlkörper
- **Warum überlegen?**
  - Wasser: ~25× bessere Wärmeabfuhr als Luft
  - Mehrstufige, parallele Wärmewege
  - 55°C bei 150W

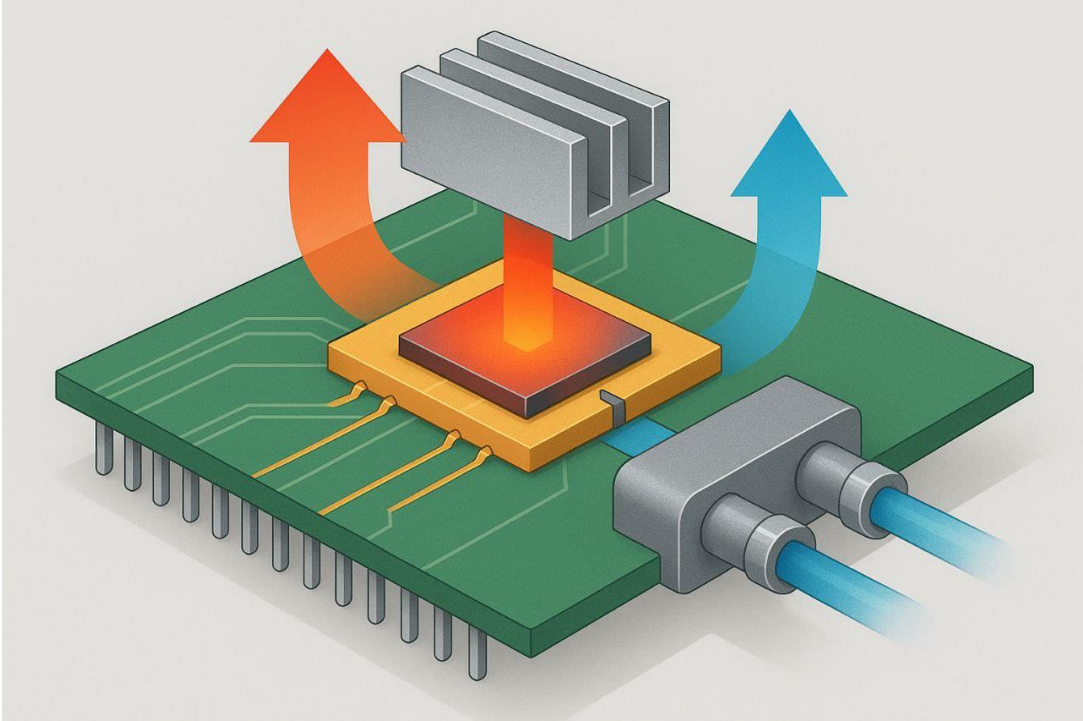


*Abbildung 15:* Wasserkühlung

# GED - DC/DC Wandler Konzept für 20 kW

- DC/DC Schaltwandler Entwicklung
- PCB mit eingebetteten SIC-Dies
- SIC-Dies mit nanoWired verbunden
- 4-Lagen Dickkupfer, je 210 µm
- 2-seitige Kühlmöglichkeit
- kompaktes und robustes Design

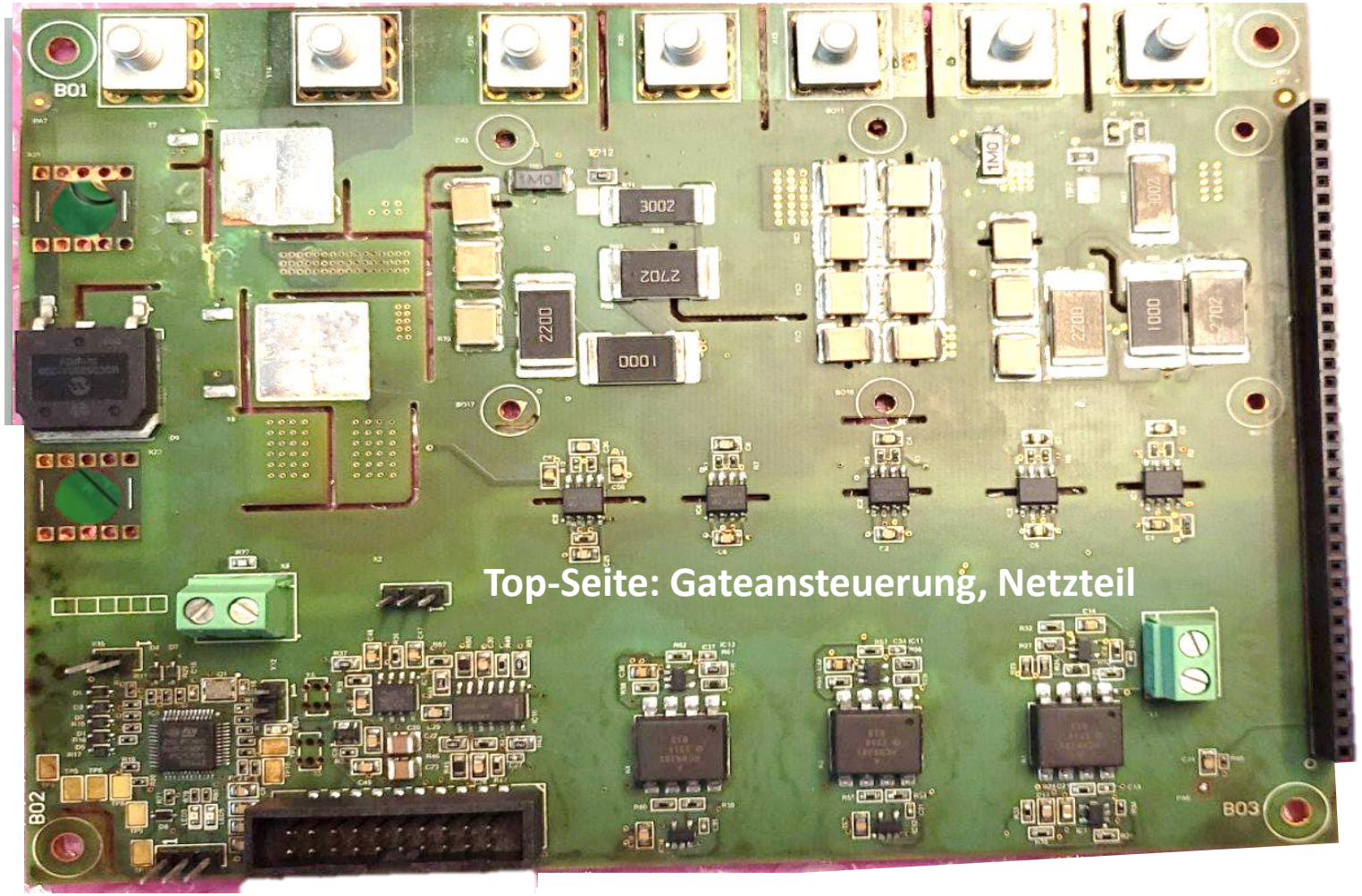



*Abbildung 16:* GED-DC/DC LP

# Wärmeleistung Messungen mit Wasserkühlung

- Verschiedene Kühlkonzepte für 500 W getestet.
- Das wassergekühlte System mit Kühlkörper und Lüfter war am effektivsten.
- Max. Temperaturerhöhung: 55 °C bei 150 W.
- Sehr gutes Temperatur- und Wärmemanagement.

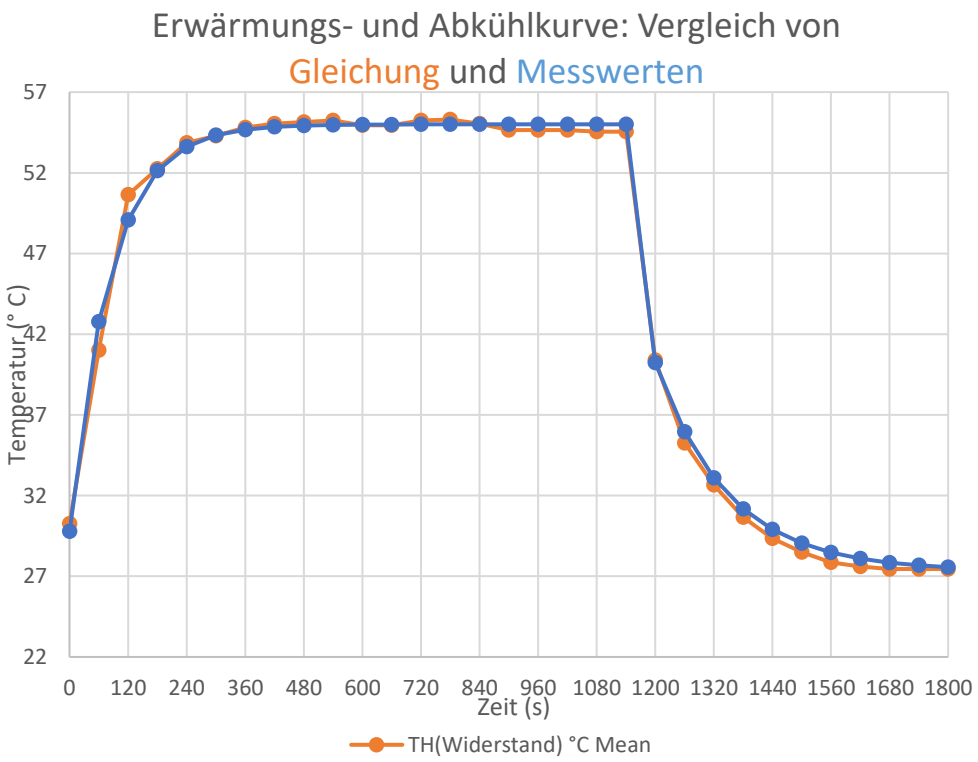



*Abbildung 17: Vergleich der Simulation zur Messung*

# GED-Design: nanoAVT Gehäuse

Das Gehäuse vereint alle Teile des 20kW DC/DC Wandlers. Die Konstruktion kann bis zu 500 W Wärme über das Gehäuse mit Aluminiumprofilwänden und einem wasserbasierten Kühlsystem ableiten. Die Isolationsanforderungen zwischen den Kreisen betragen 1.200 Volt.

*Abbildung 18: GED Design Gehäuse (Innen)*

*Abbildung 19: GED Design Gehäuse (außen)*

# Kontakt

**GED Gesellschaft für Elektronik und Design mbH**
Pastoratsstraße 3
53809 Ruppichteroth, Germany

| | |
|---|---|
| Phone: | +49 22 47 - 92 19- 0 |
| Fax: | +49 22 47 - 92 19- 50 |
| eMail: | h.platz@GED-PCB-MCM.de |
| Internet: | www.GED-PCB-MCM.de |

| | | |
|---|---|---|
| Office: | Petra Severin | +49 2247 - 92 19 - 0 |
| Vertrieb: | Hanno Platz | +49 2247 - 92 19 - 11 |


Stand: 14.11.2025 HP

Co by GEDmbH, 53809 Germany 2025

# nanoAVT

20 kW DC/DC Wandler

Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt KMU-Innovativ: nanoAVT
mit den Partnern nanoWired, Becker & Müller und der TU-Dresden

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

Vielen Dank ☺