



innovations
for high
performance
microelectronics

Simulation und Messung des thermischen Widerstandes von Silicium-Germanium- Hetero-Bipolartransistoren

Korndörfer, Falk

**IHP
Im Technologiepark 25
15236 Frankfurt (Oder)
Germany**

- **Motivation**
- **R_{TH} -Messmethode**
- **Wirkung des Seebeck-Effektes auf den R_{TH} -Messwert**
- **Wirkung der Dotierung auf R_{TH}**
- **Zusammenfassung**

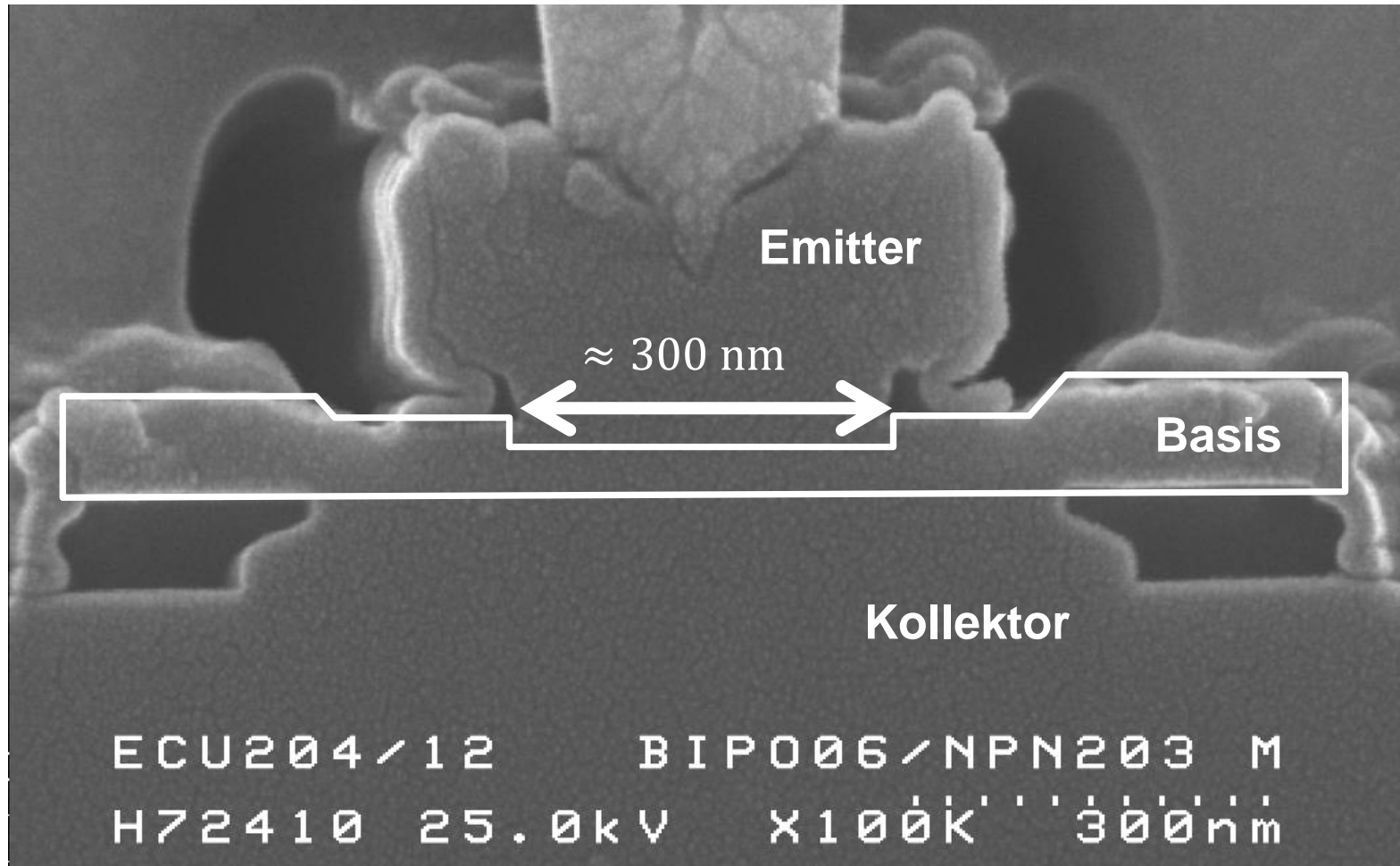
- **Signifikanter Einfluss der Temperatur auf die Hochfrequenzeigenschaften moderner SiGe-HBTs**

$$\Delta f_{T,\max}/\Delta T \approx -2,5\%/10K$$

Verschärfung der Bedingungen durch laterale und vertikale Skalierung

Angestrebte Steigerung der f_T - und f_{\max} -Werte führt zu größeren Leistungsdichten im HBT

- **Thermischer Widerstand R_{TH} bei Messungen bis zu 30% höher als bei numerischen Simulationen**



- Motivation
- **R_{TH} -Messmethode**
- Wirkung des Seebeck-Effektes auf den R_{TH} -Messwert
- Wirkung der Dotierung auf R_{TH}
- Zusammenfassung

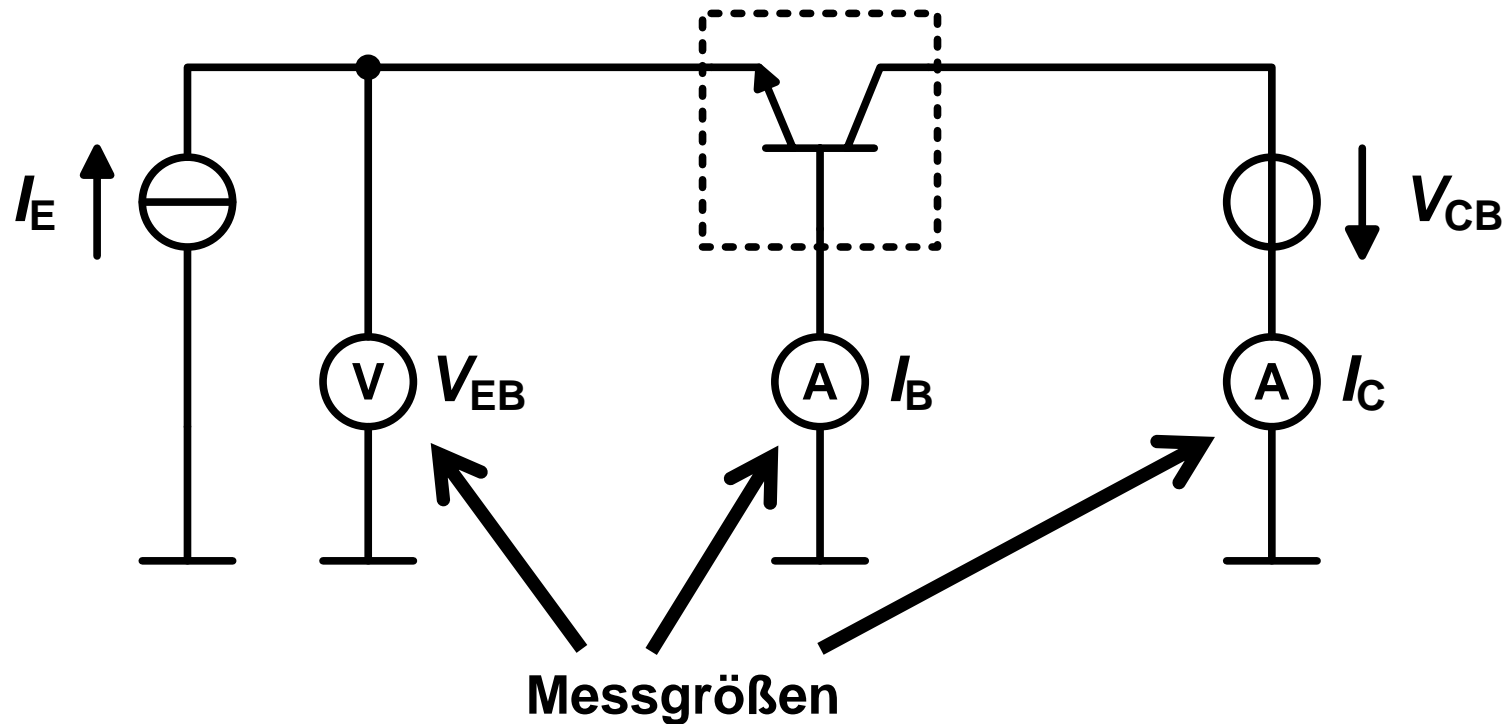
- **Maß für die Übertemperatur:** $T_R = T_J - T_A$
 T_J : HBT-Temperatur, T_A : Umgebungstemperatur
- **Abhängig von**
Geometrie/Abmessungen des HBT
Thermischen Leitfähigkeiten der Materialien

$$R_{TH} = \frac{T_R}{P_D}$$

$$\begin{aligned} P_D &= V_{CE} I_C + V_{BE} I_B \\ &= V_{EB} I_E + V_{CB} I_C \end{aligned}$$

I_E konstant

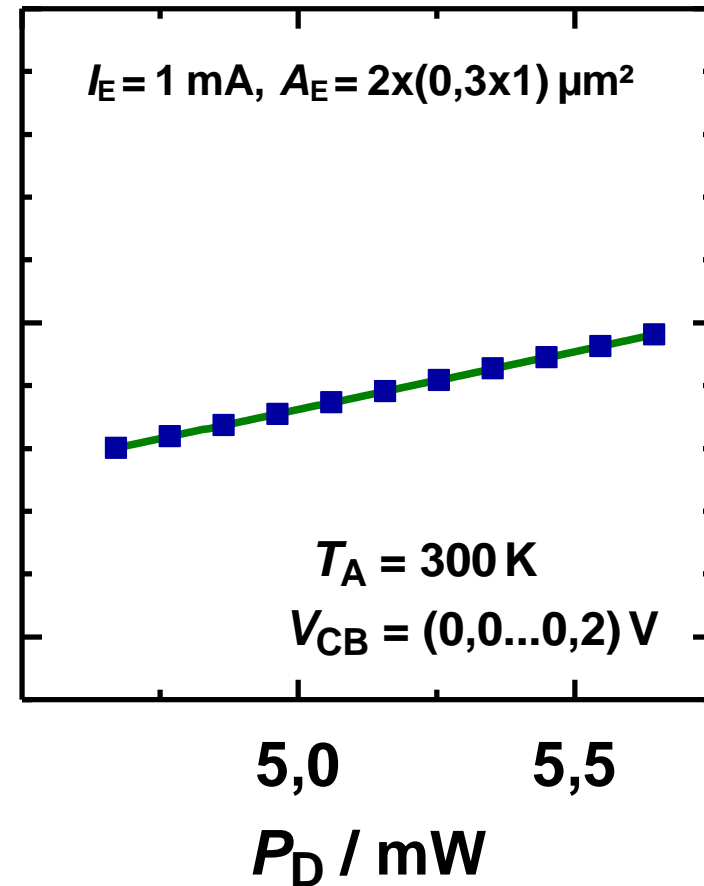
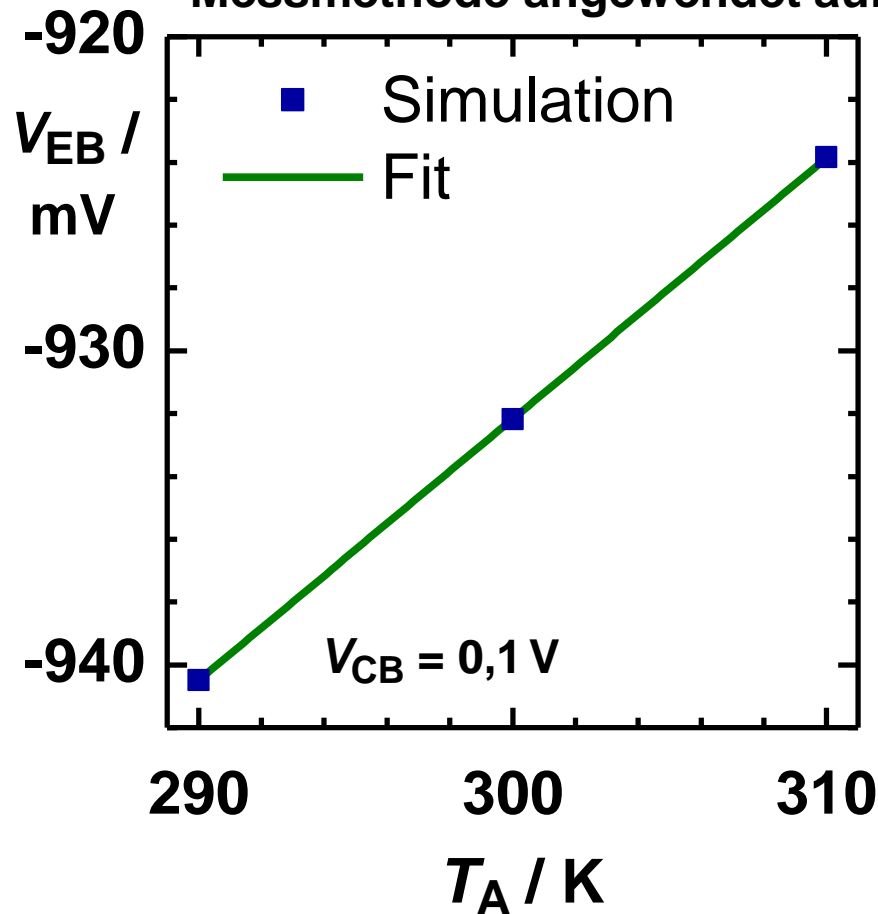
1. T_A variabel, V_{CB} konstant
2. V_{CB} variabel, T_A konstant



Messmethode (2)



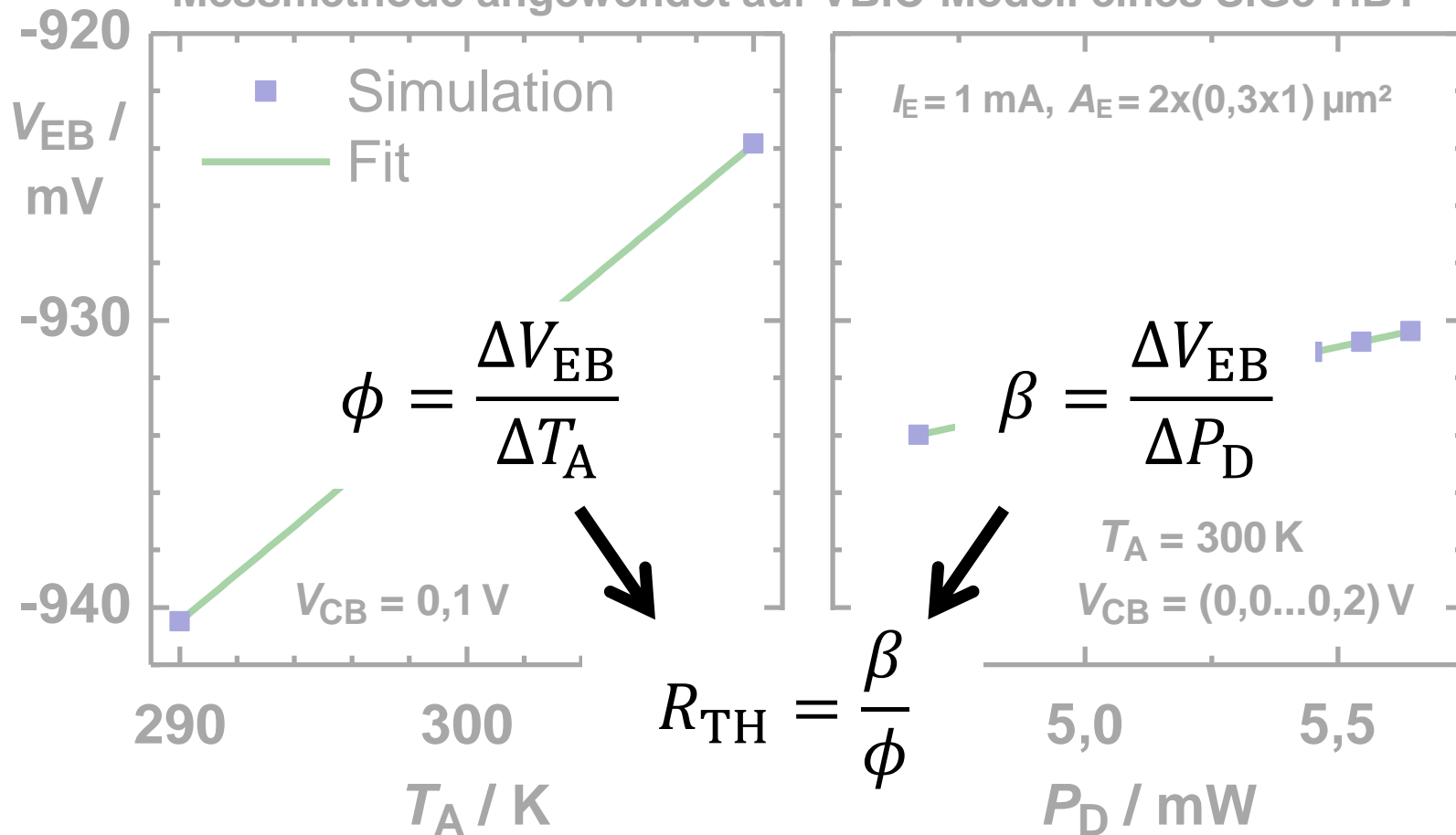
Messmethode angewendet auf VBIC-Modell eines SiGe-HBT



Messmethode (3)



Messmethode angewendet auf VBIC-Modell eines SiGe-HBT



- **Early-Effekt, Basisweitenmodulation**
Rein elektrische Rückwirkung von V_{CB} auf V_{EB} als
Temperaturänderung interpretiert → zu große R_{TH} -Werte
- **Änderung der Leistung bei T_A -Änderung**
→ Annahme $\Delta T_J = \Delta T_A$ nicht korrekt

$$P_D = V_{EB} I_E + V_{CB} I_C$$



V_{EB} ändert sich mit T_A

Neue Messmethode (1)



- **Messung bei zwei Emitterströmen zur Kompensation des Early-Effektes [1]**

$$\gamma(I_E) = \gamma_{TH}(I_E) + \gamma_{EL}$$

$$\gamma(I_E) = \left. \frac{\partial V_{EB}}{\partial V_{CB}} \right|_{I_E, T_A}$$

**In erster Näherung
unabhängig von I_E**

- **Korrektur der Temperaturkoeffizienten [2]**

Neue Messmethode (2)



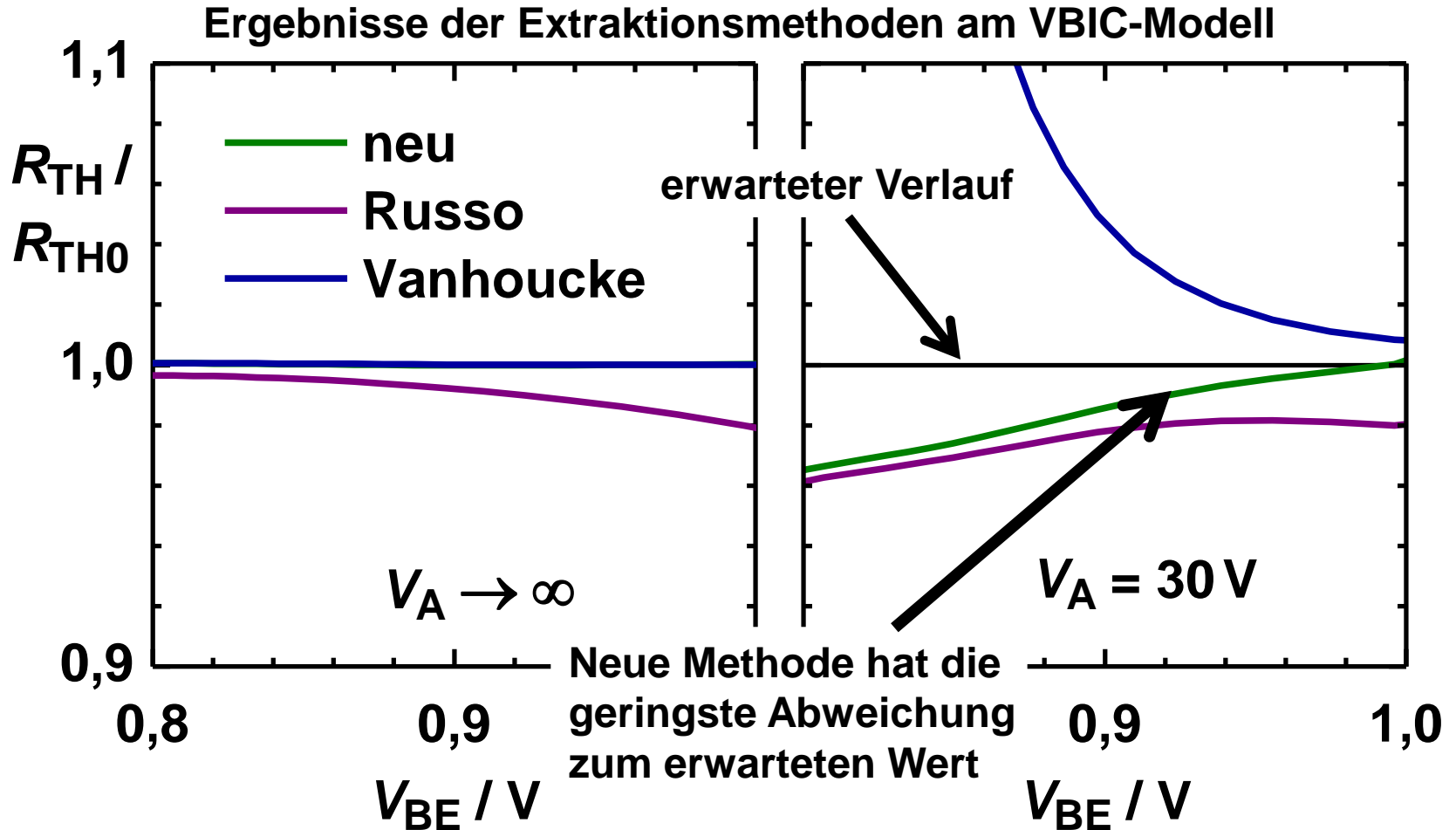
- **Kombination der Methoden von Russo [1] und von Vanhoucke [2]**

$$R_{\text{TH}} = \frac{\gamma_1 - \gamma_2}{\phi_1^* I_1^* - \phi_2^* I_2^*}$$

$$I_n^* = \left. \frac{\partial P_D}{\partial V_{\text{CB}}} \right|_{I_{\text{En}}, T_A}, \quad \gamma_n = \left. \frac{\partial V_{\text{EB}}}{\partial V_{\text{CB}}} \right|_{I_{\text{En}}, T_A}$$

$$\phi_n^* = \left. \frac{\partial V_{\text{EB}}}{\partial T_A} \right|_{I_{\text{En}}, V_{\text{CB}}} - \left. \frac{\partial P_D}{\partial T_A} \right|_{I_{\text{En}}, V_{\text{CB}}} \left. \frac{\partial V_{\text{EB}}}{\partial P_D} \right|_{I_{\text{En}}, T_A}$$

Neue Messmethode (3)



- Motivation
- R_{TH} -Messmethode
- **Wirkung des Seebeck-Effektes auf den R_{TH} -Messwert**
- Wirkung der Dotierung auf R_{TH}
- Zusammenfassung

Seebeck-Effekt (1)



- Auftreten einer Thermospannung V_{Th} aufgrund eines Temperaturunterschiedes

$$V_{Th} = S \cdot \Delta T$$

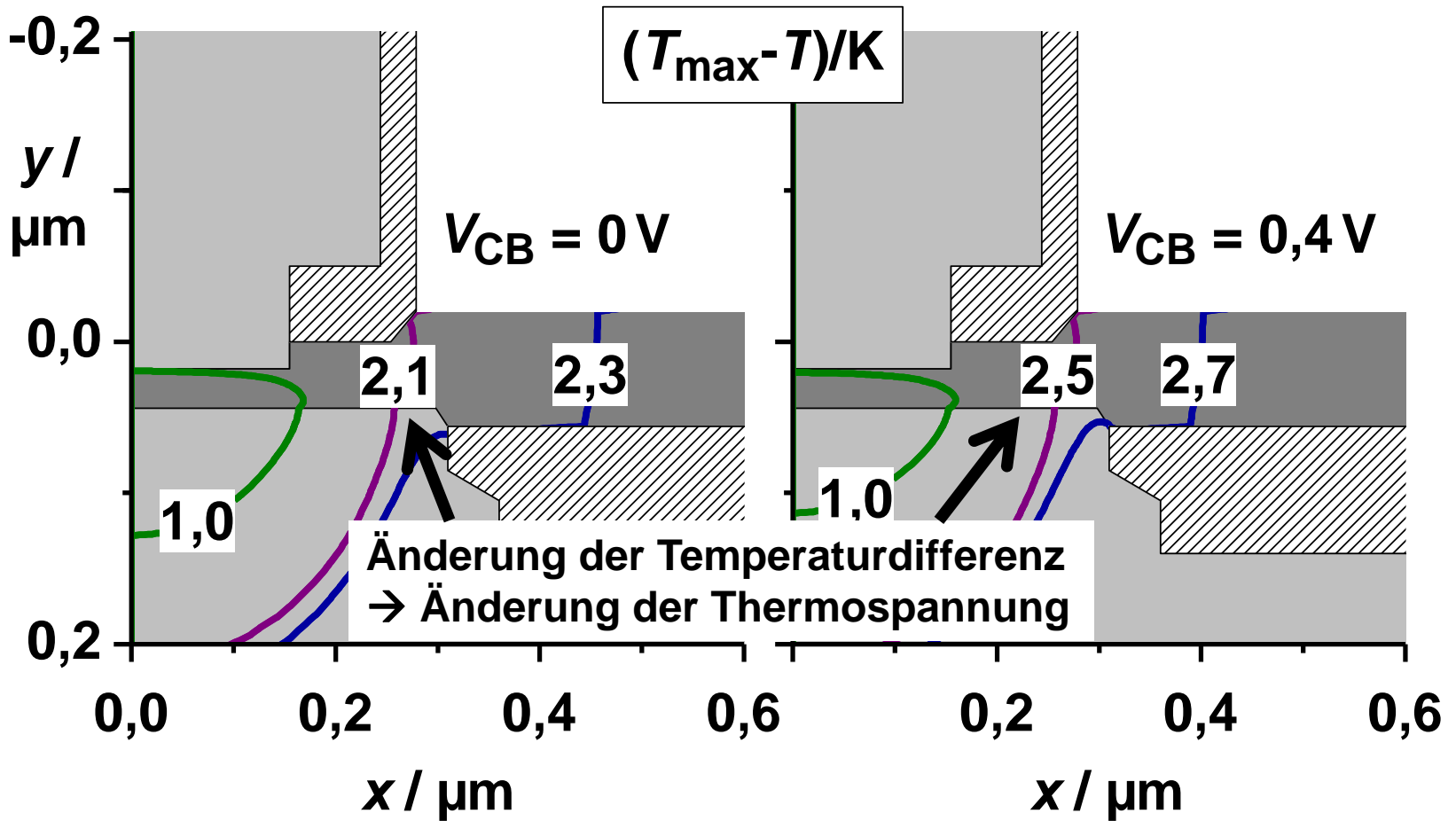
- Seebeck-Koeffizient S

Metalle: $\mu\text{V/K}$

Halbleiter: mV/K

- Bisher nicht bei R_{TH} -Extraktion beachtet

Seebeck-Effekt (2)

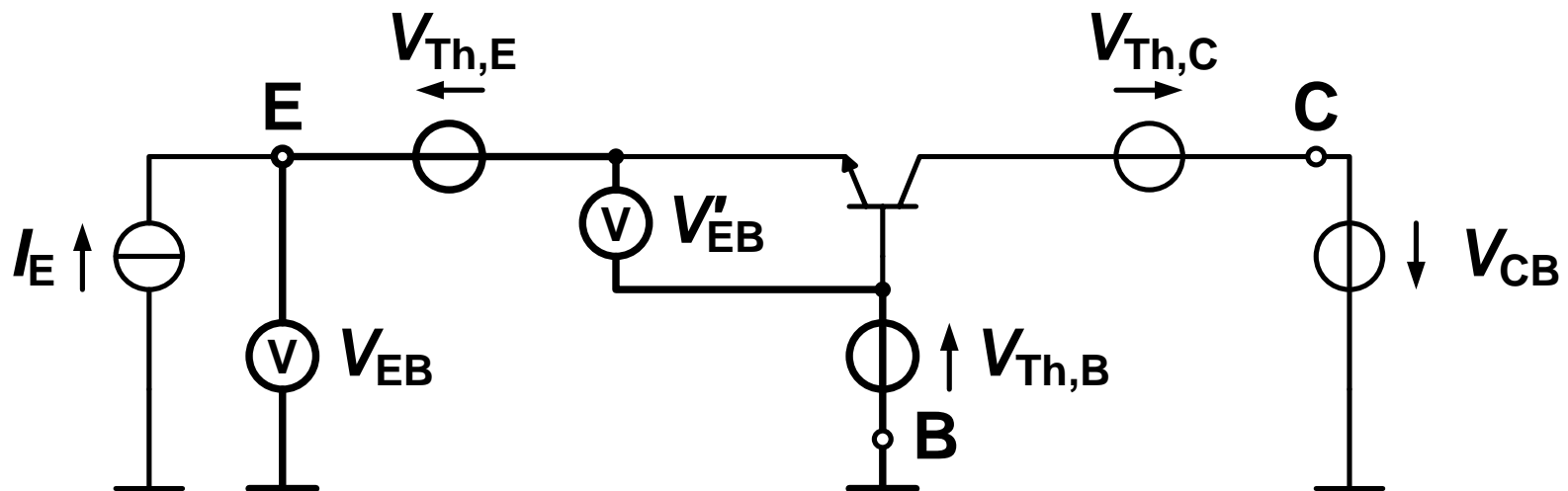


Seebeck-Effekt (3)

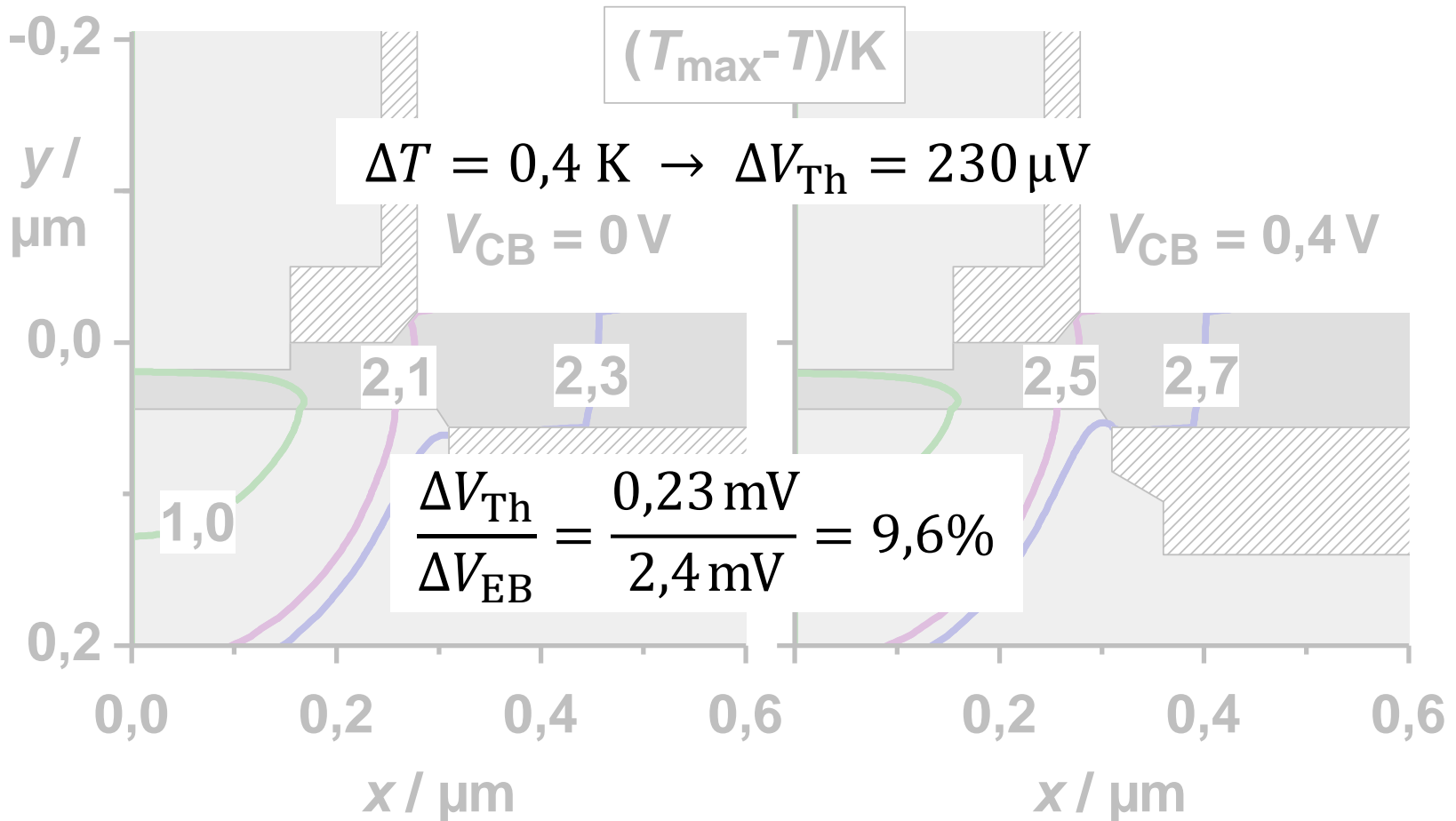
- Thermospannungen $V_{Th,B}$ und $V_{Th,E}$ wirken V_{EB} entgegen

$$V_{EB} = V'_{EB} - (V_{Th,B} + V_{Th,E})$$

- Verringerung des extrahierten R_{Th} -Wertes



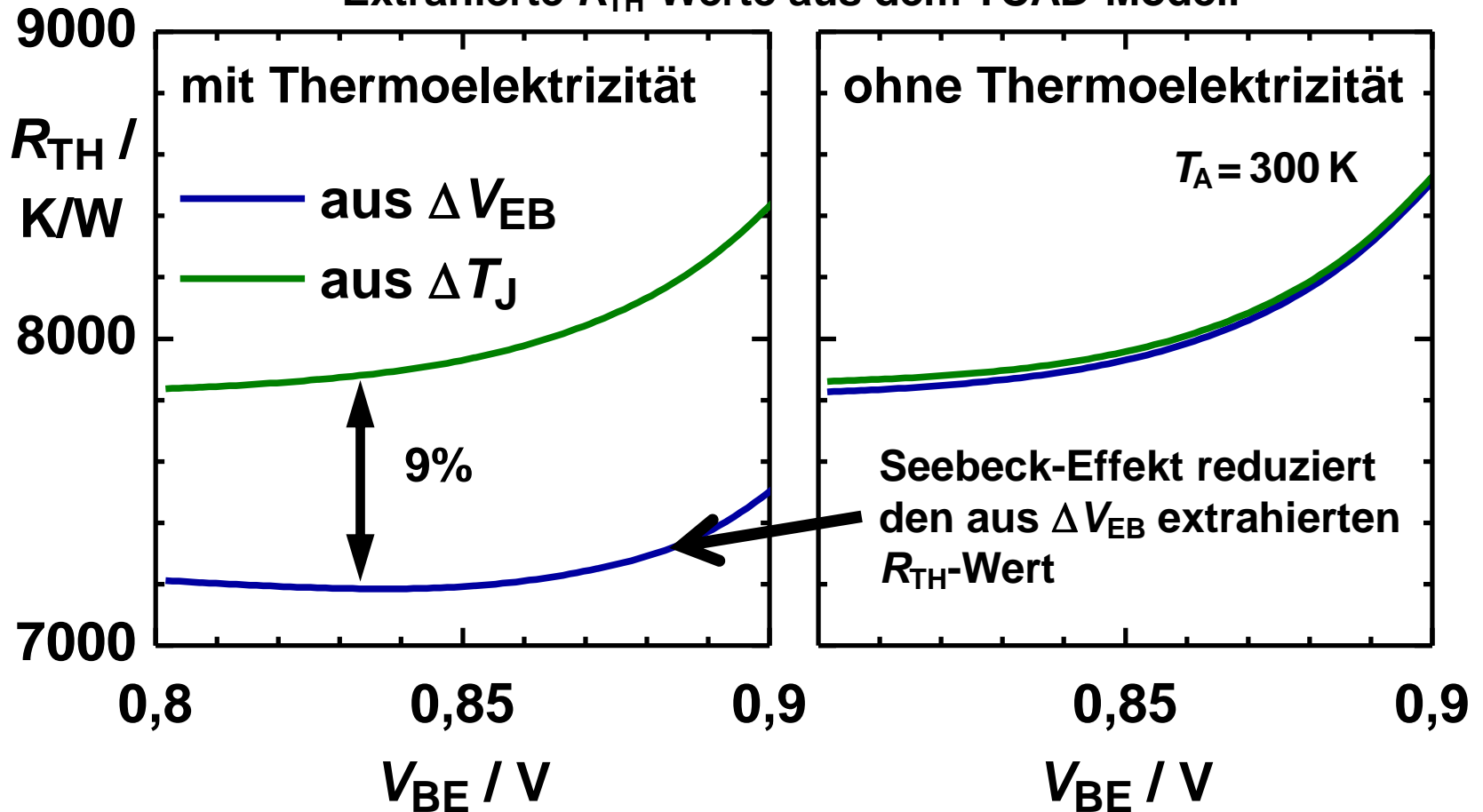
Seebeck-Effekt (4)



Seebeck-Effekt (5)

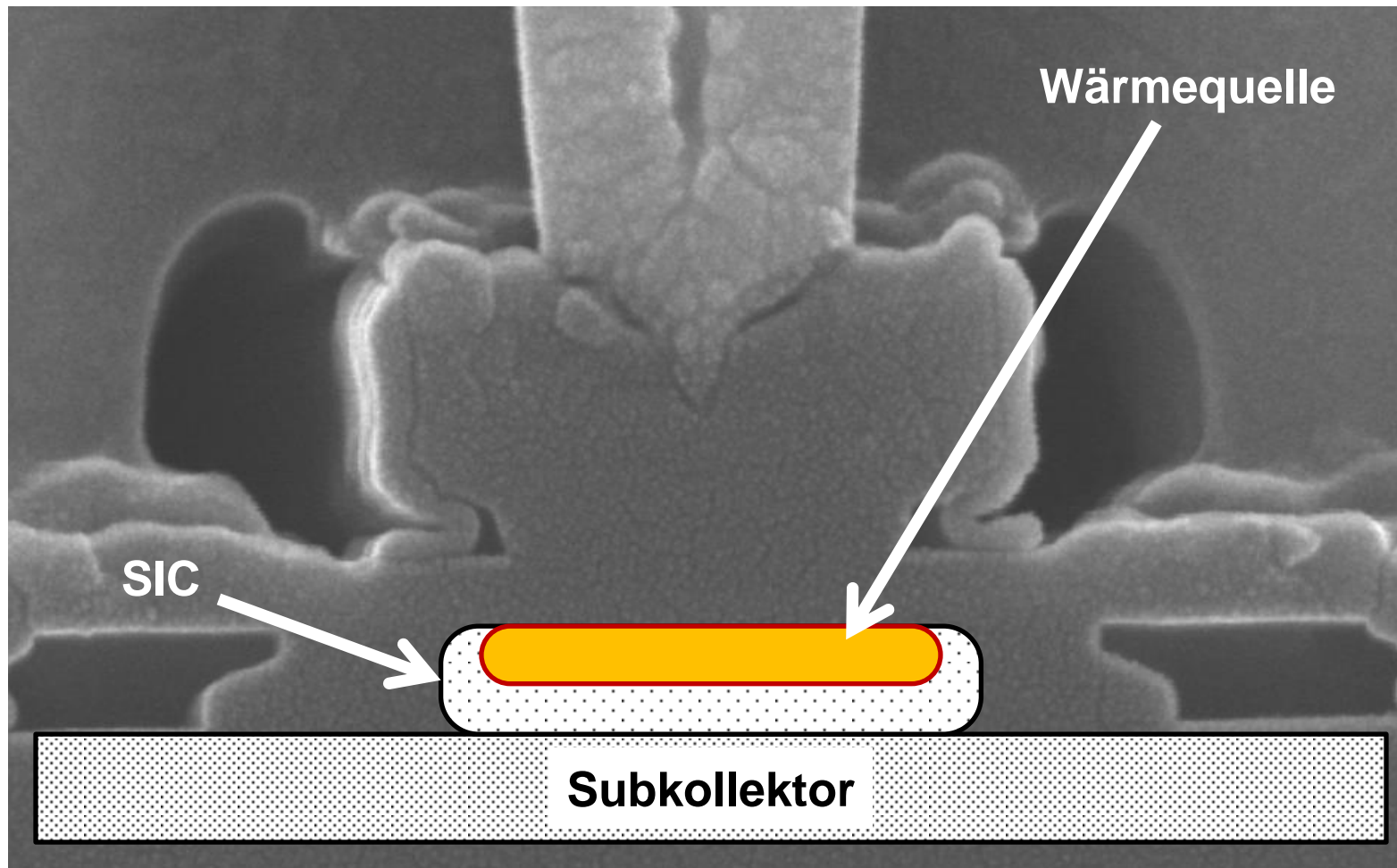


Extrahierte R_{TH} -Werte aus dem TCAD-Modell



- Motivation
- R_{TH} -Messmethode
- Wirkung des Seebeck-Effektes auf den R_{TH} -Messwert
- **Wirkung der Dotierung auf R_{TH}**
- Zusammenfassung

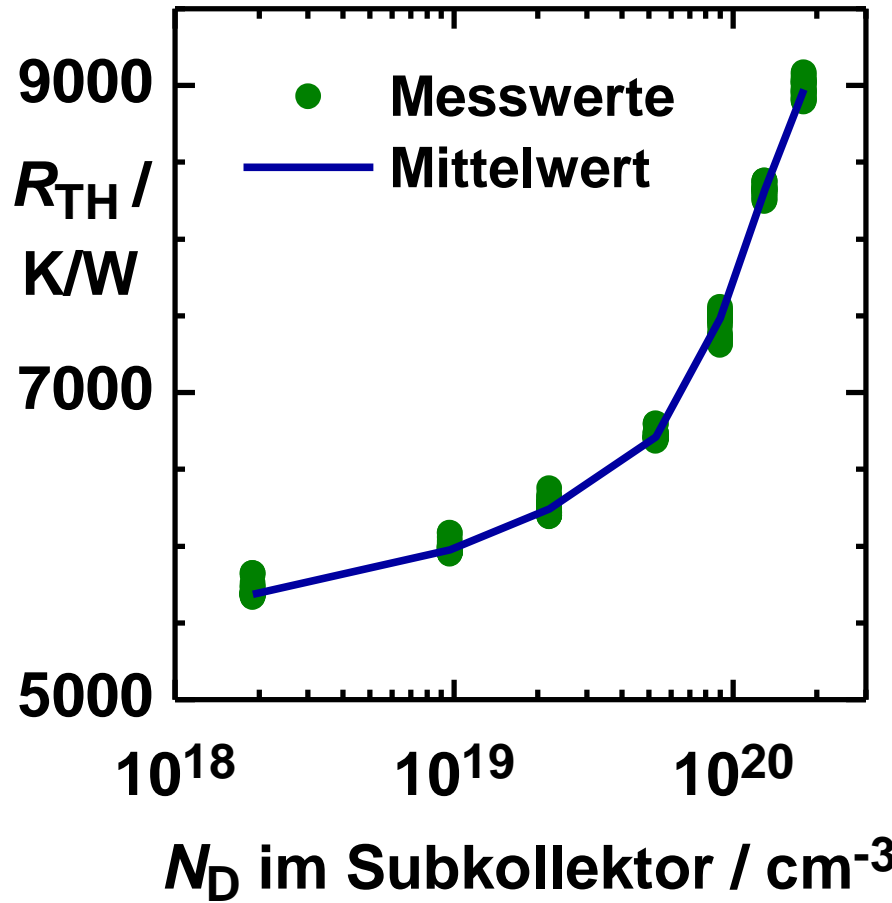
Dotierung (1)



Dotierung (2)



Gemessene R_{TH} -Werte (unkorrigiert)

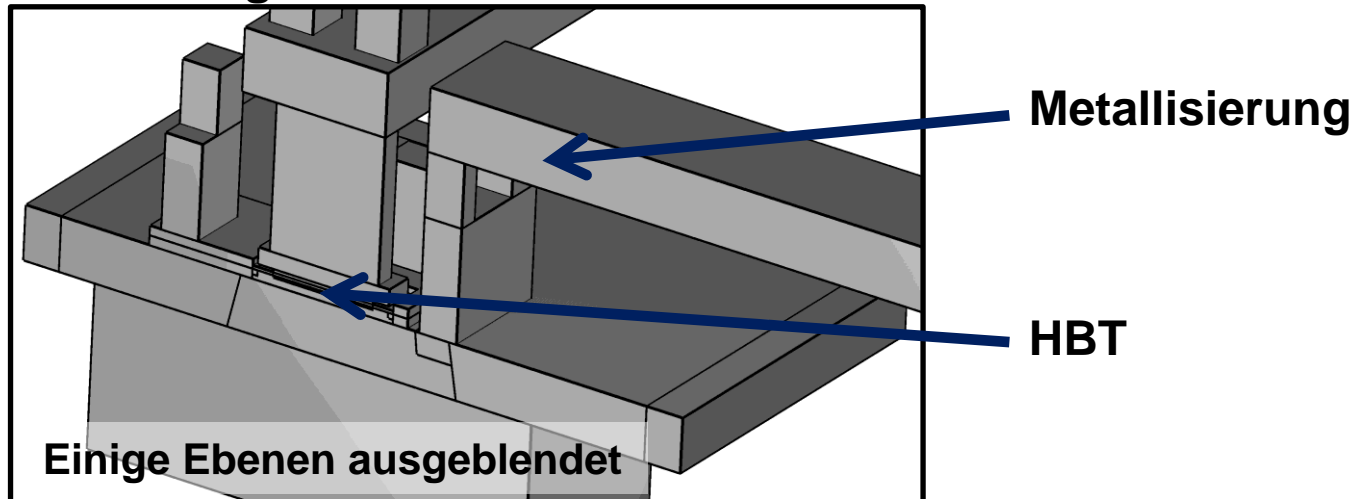


- Arsen-Dotierung im Subkollektor $2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ bis $2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$
- R_{TH} -Änderung um mehr als 50%
- 27 Messungen pro Dotierung
Mehrere Chips
Verschiedene IE

- Anpassung der thermischen Leitfähigkeit im Simulationsmodell durch Optimierung

Beschränkung auf Lösen der Wärmeleitungsgleichung für zeiteffiziente Simulation → R_{TH} -Messwerte um den Seebeck-Effekt korrigiert

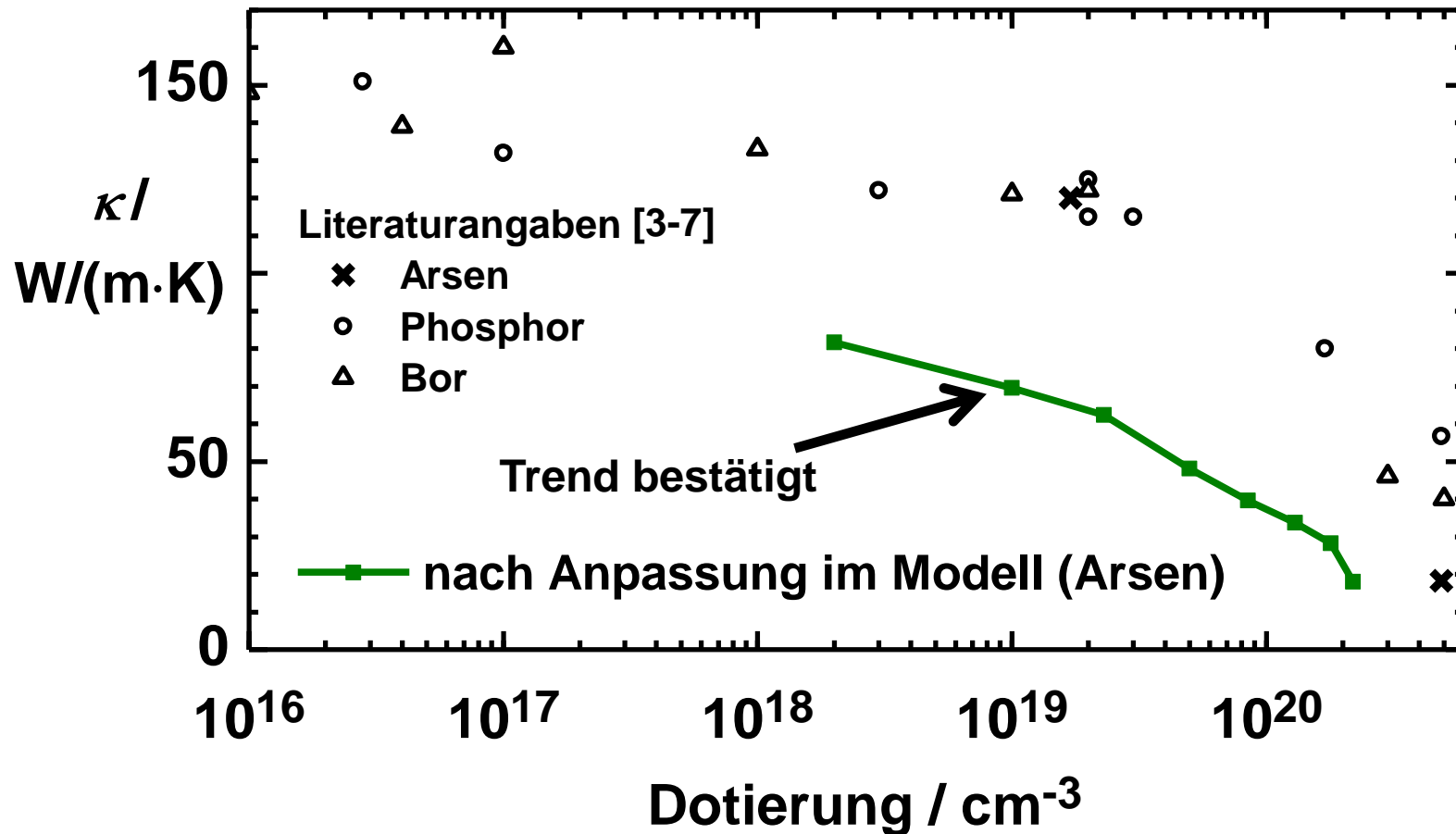
- Metallisierung im 3D-Modell enthalten



Dotierung (4)



Anpassung der thermischen Leitfähigkeit von Silicium



- **Verbesserte R_{TH} -Messmethode entwickelt**
- **Seebeck-Effekt verringert den extrahierten R_{TH} -Wert**
- **Thermischer Widerstand durch Arsendotierung um mehr als 50% erhöht → jetzt im Modell enthalten**
- **Genauerer Entwurf der HBTs → Optimierung des Subkollektors möglich**

Referenzen (1)



- [1] S. Russo u. a.: „Evaluating the self-heating thermal resistance of bipolar transistors by DC measurements: A critical review and update“. In: *Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting 2009*. 2009, S. 95–98. DOI: 10.1109/BIPOL.2009.5314135.
- [2] T. Vanhoucke, H.M.J. Boots und W.D. van Noort: „Revised method for extraction of the thermal resistance applied to bulk and SOI SiGe HBTs“. In: *Electron Device Letters, IEEE* 25 (3 March 2004), S. 150–152. ISSN: 0741-3106.
- [3] Glen A. Slack: „Thermal Conductivity of Pure and Impure Silicon, Silicon Carbide, and Diamond“. In: *Journal of Applied Physics* 35 (12 1964), S. 3460–3466. ISSN: 00218979.
- [4] L. Weber und E. Gmelin: „Transport properties of silicon“. In: *Applied Physics A Solids and Surfaces* 53 (2 1991), S. 136–140. i s sn: 0721-7250. DOI: 10.1007/BF00323873.
- [5] M. Asheghi u. a.: „Thermal conduction in doped single-crystal silicon films“. In: *Journal of Applied Physics* 91 (8 2002), S. 5079–5088. ISSN: 00218979.

Referenzen (2)



- [6] M. G. Burzo, P. L. Komarov und P. E. Raad: „Non-contact thermal conductivity measurements of p-doped and n-doped gold covered natural and isotopically-pure silicon and their oxides“. In: *Thermal and Mechanical Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems, 2004. EuroSimE 2004. Proceedings of the 5th International Conference on (2004)*, S. 269–276.
- [7] Yongjin Lee und Gyeong S. Hwang: „Mechanism of thermal conductivity suppression in doped silicon studied with nonequilibrium molecular dynamics“. In: *Phys. Rev. B (Physical Review B)* 86 (7 2012). DOI: 0.1103/PhysRevB.86.075202.