



**Division E**  
Electrified Powertrain  
Technology



# Siliziumkarbid als Treiber der Elektromobilität- wie Kohlenstoff die Effizienz von Elektroautos erhöht



Dr. Stefan Hain



# Agenda

Wie funktioniert ein Antriebsinverter?

Transistoren in der Leistungselektronik

Wie Kohlenstoff die Effizienz von Transistoren verbessern kann

Effizienzvorteile von SiC basierten Antriebsinvertoren

Zusammenfassung und Ausblick

# Agenda

## Wie funktioniert ein Antriebsinverter?

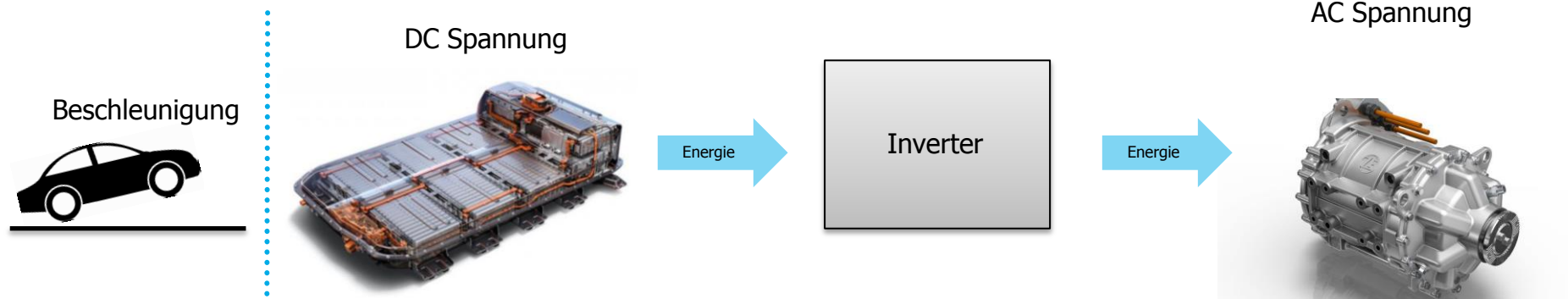
Transistoren in der Leistungselektronik

Wie Kohlenstoff die Effizienz von Transistoren verbessern kann

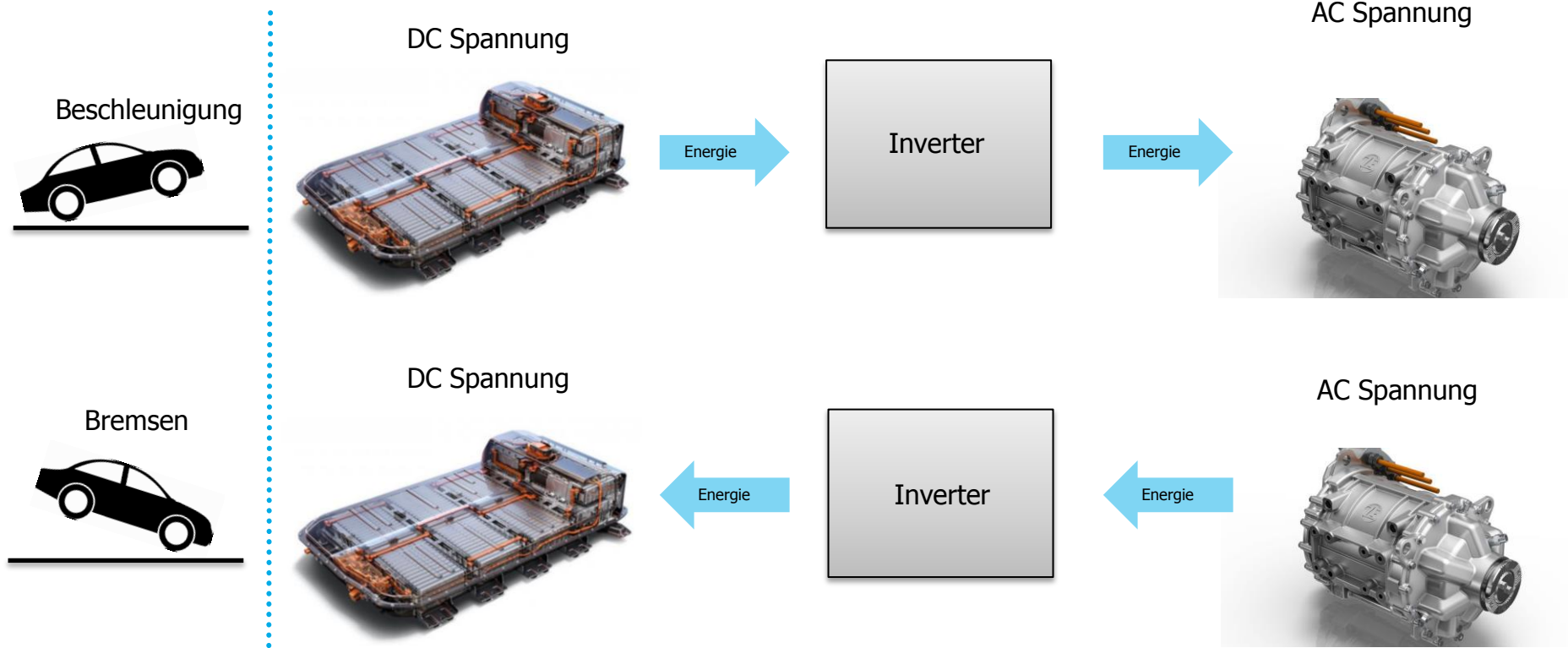
Effizienzvorteile von SiC basierten Antriebsinvertern

Zusammenfassung und Ausblick

# Wie funktioniert ein Antriebsinverter?

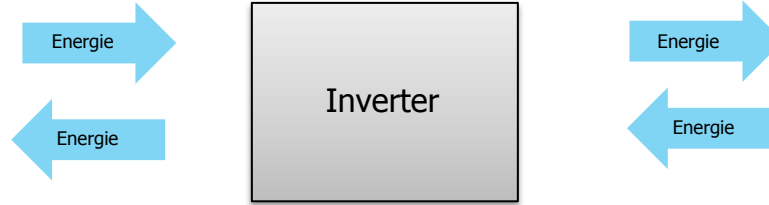


# Wie funktioniert ein Antriebsinverter?



# Wie funktioniert ein Antriebsinverter?

DC Spannung



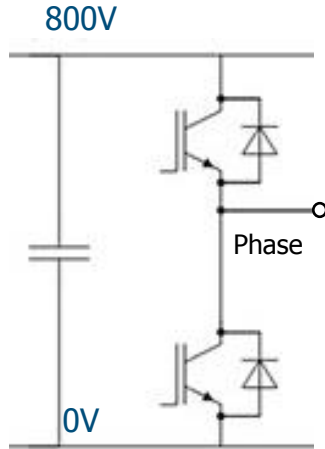
AC Spannung



- Steuert Energiefluss zum Motor
- Ermöglicht Energiefluss vom Motor zurück in die Batterie
- Energiewandlung muss hoch effizient sein

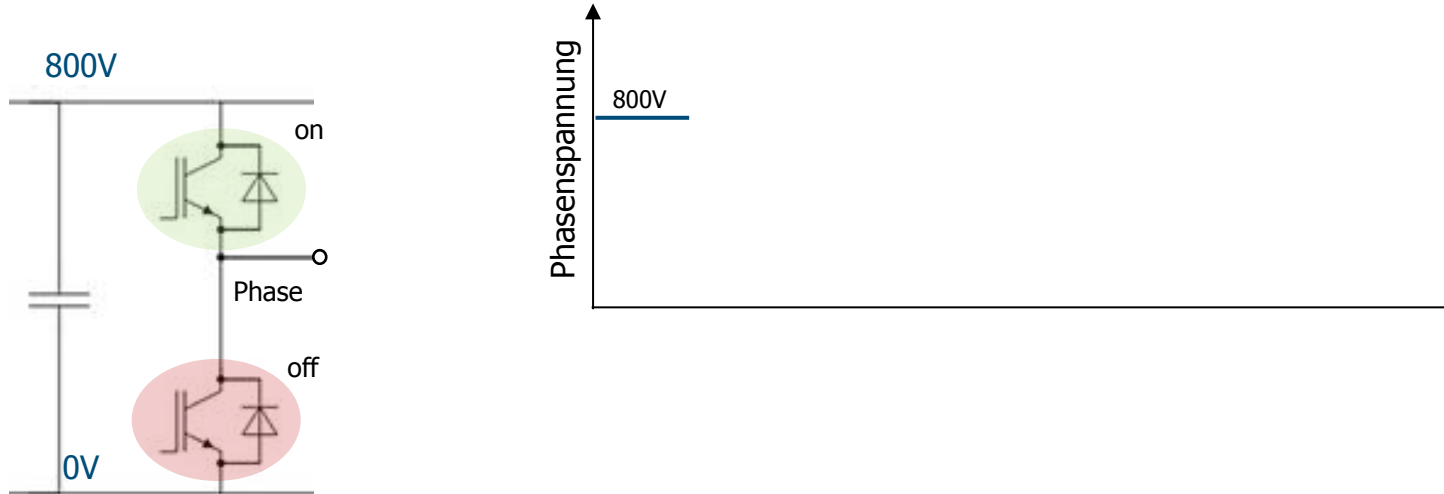
# Wie funktioniert ein Antriebsinverter?

Eine „Halbbrückenordnung“ von zwei leistungselektronischen Schaltern kann die Spannung an der Phase zwischen den beiden anliegenden Potentialen hin- und herschalten



# Wie funktioniert ein Antriebsinverter?

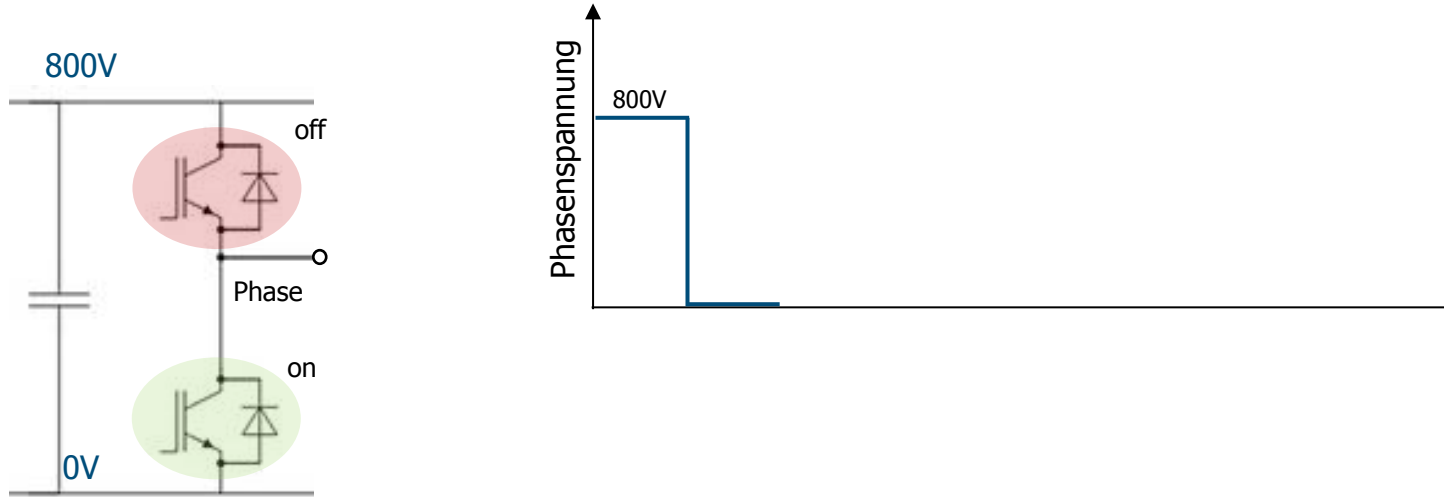
Eine „Halbbrückenanordnung“ von zwei leistungselektronischen Schaltern kann die Spannung an der Phase zwischen den beiden anliegenden Potentialen hin- und herschalten





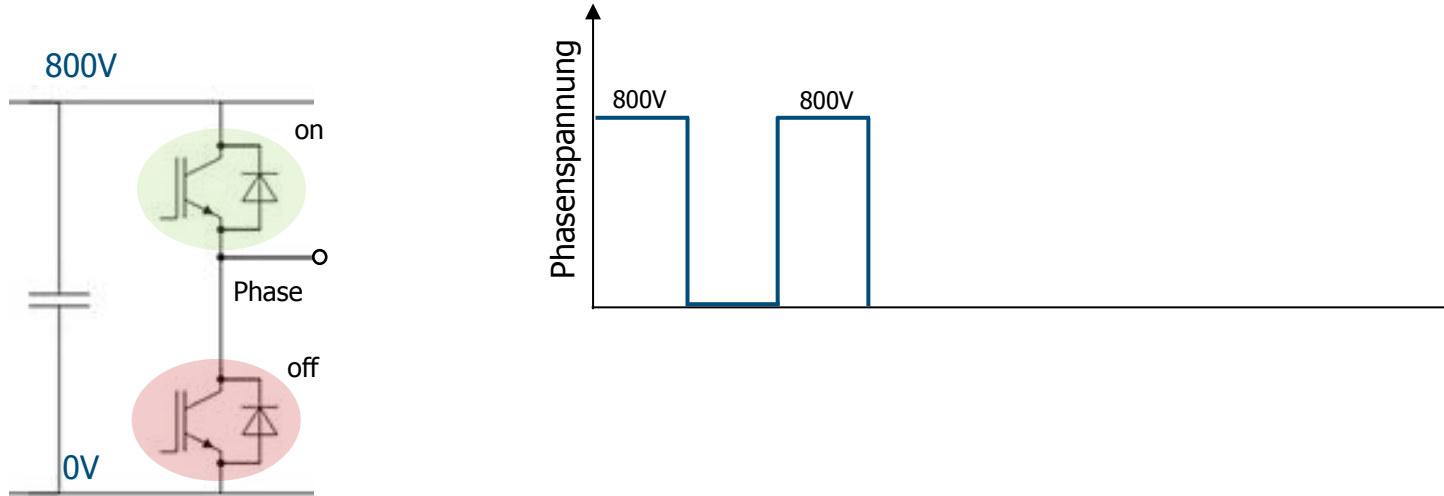
# Wie funktioniert ein Antriebsinverter?

Eine „Halbbrückenordnung“ von zwei leistungselektronischen Schaltern kann die Spannung an der Phase zwischen den beiden anliegenden Potentialen hin- und herschalten



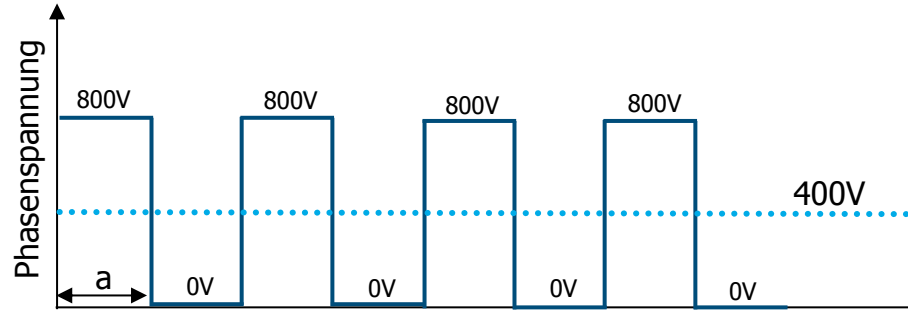
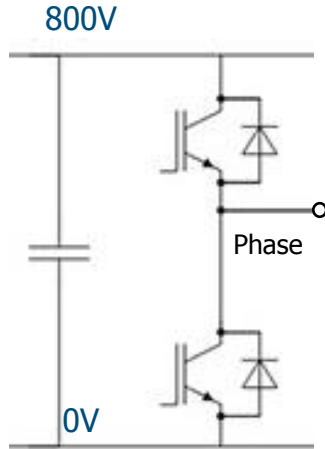
# Wie funktioniert ein Antriebsinverter?

Eine „Halbbrückenordnung“ von zwei leistungselektronischen Schaltern kann die Spannung an der Phase zwischen den beiden anliegenden Potentialen hin- und herschalten



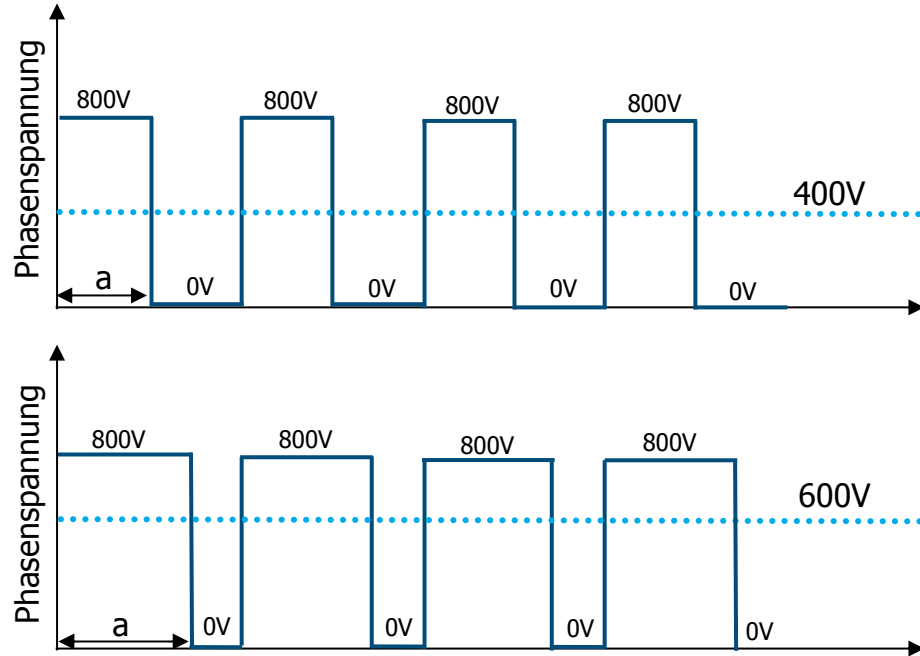
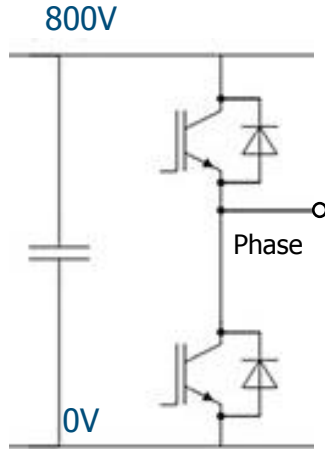
# Wie funktioniert ein Antriebsinverter?

Eine „Halbbrückenordnung“ von zwei leistungselektronischen Schaltern kann die Spannung an der Phase zwischen den beiden anliegenden Potentialen hin- und herschalten



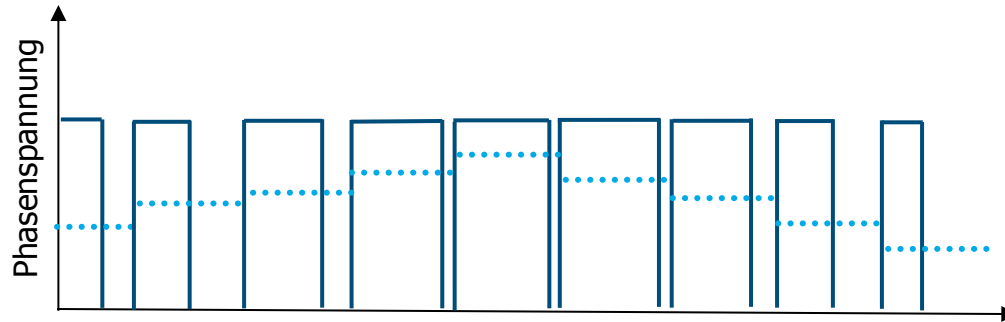
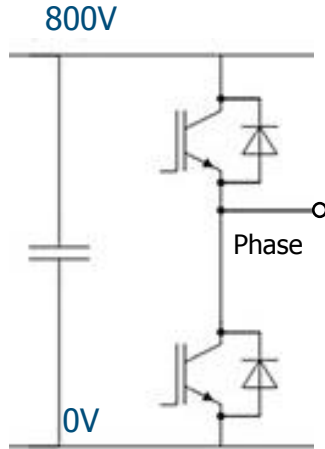
# Wie funktioniert ein Antriebsinverter?

Eine „Halbbrückenanordnung“ von zwei leistungselektronischen Schaltern kann die Spannung an der Phase zwischen den beiden anliegenden Potentialen hin- und herschalten



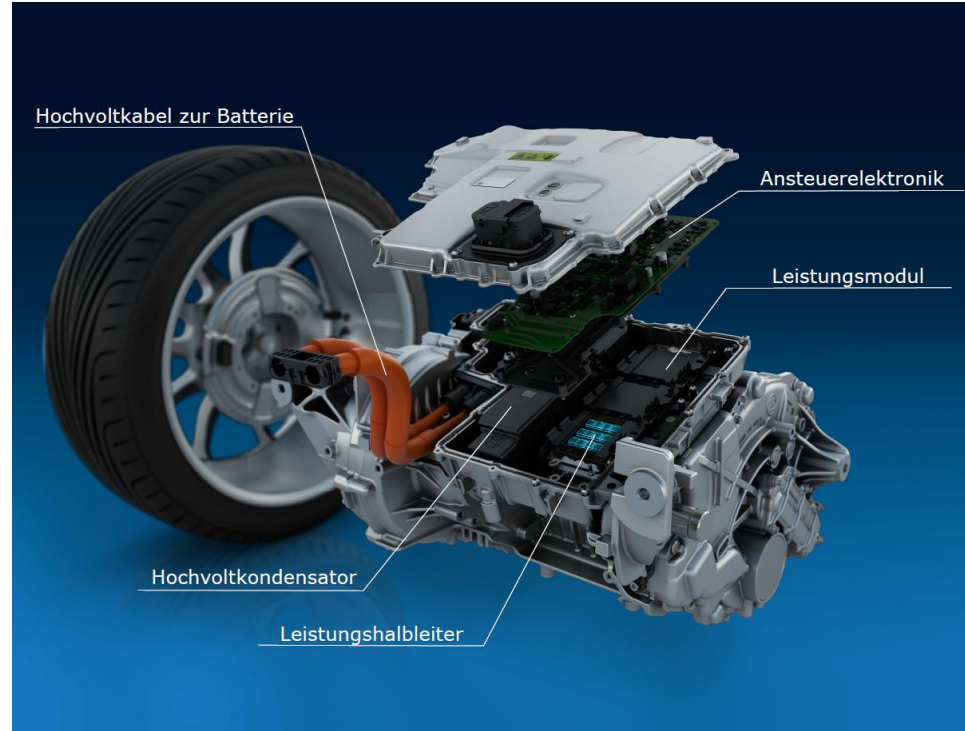
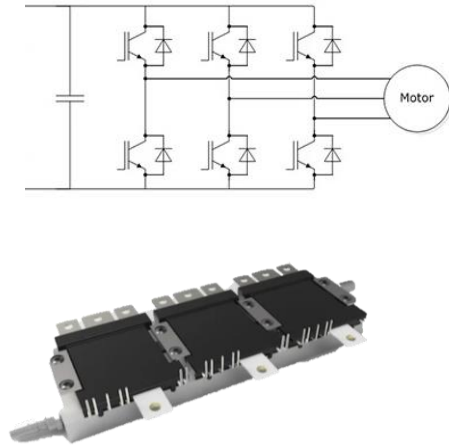
# Wie funktioniert ein Antriebsinverter?

Eine „Halbbrückenordnung“ von zwei leistungselektronischen Schaltern kann die Spannung an der Phase zwischen den beiden anliegenden Potentialen hin- und herschalten



**Mit einer Transistorhalbbrücke kann eine beliebige Spannungsform erzeugt werden**

# Wie funktioniert ein Antriebsinverter?



Jeder dreiphasige Inverter besteht aus 3 Halbbrückenschaltungen, aufgebaut aus Leistungstransistoren

# Agenda

Wie funktioniert ein Antriebsinverter?

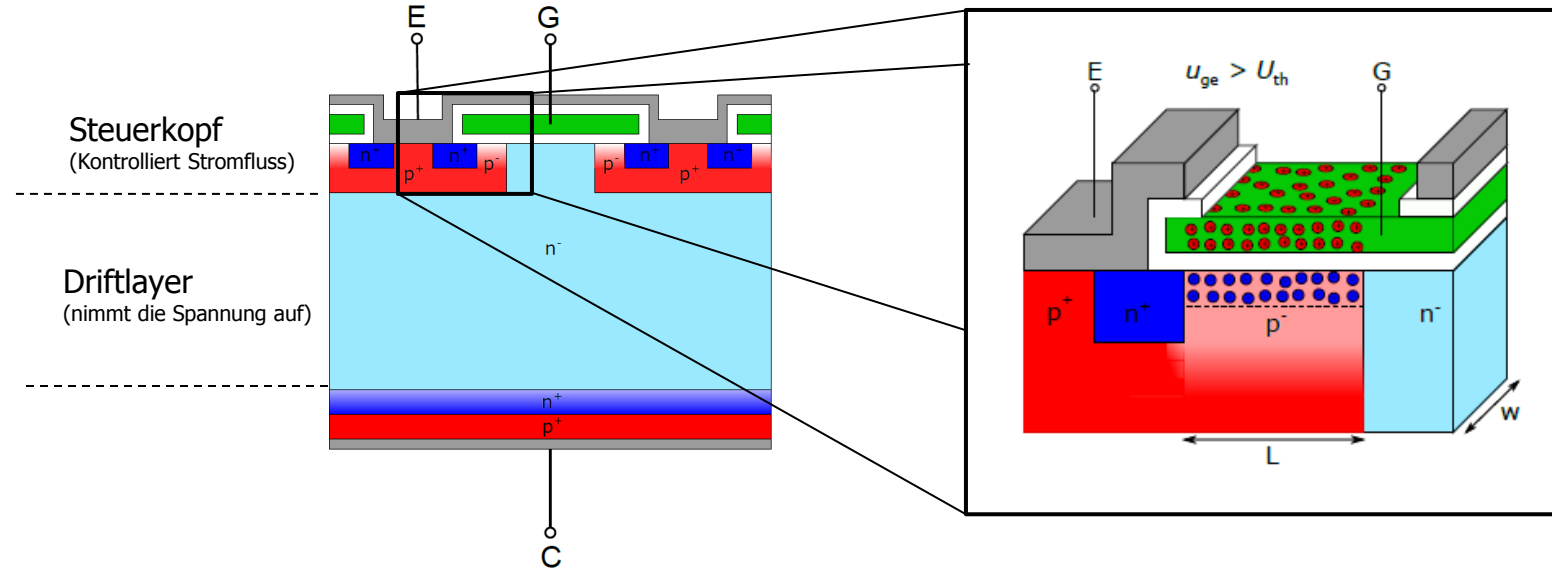
## Transistoren in der Leistungselektronik

Wie Kohlenstoff die Effizienz von Transistoren verbessern kann

Effizienzvorteile von SiC basierten Antriebsinvertern

Zusammenfassung und Ausblick

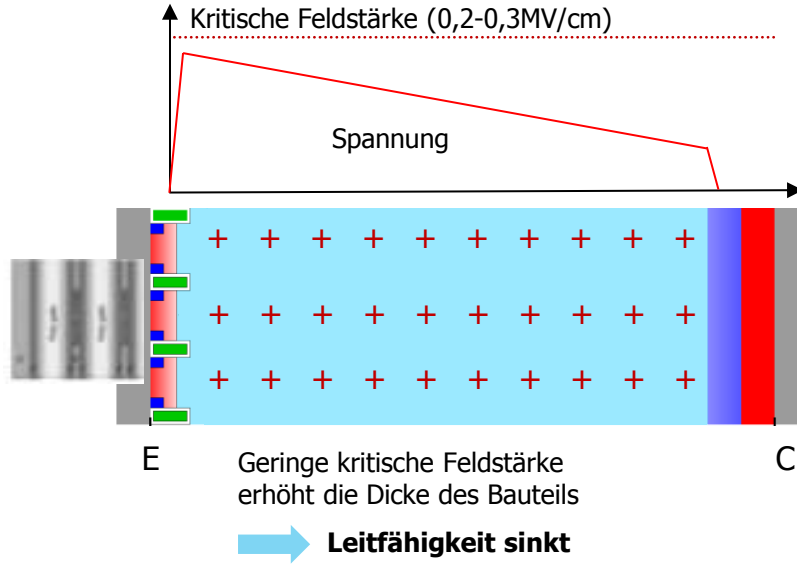
## IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) als Standard Transistor für E-Mobilität Anwendungen



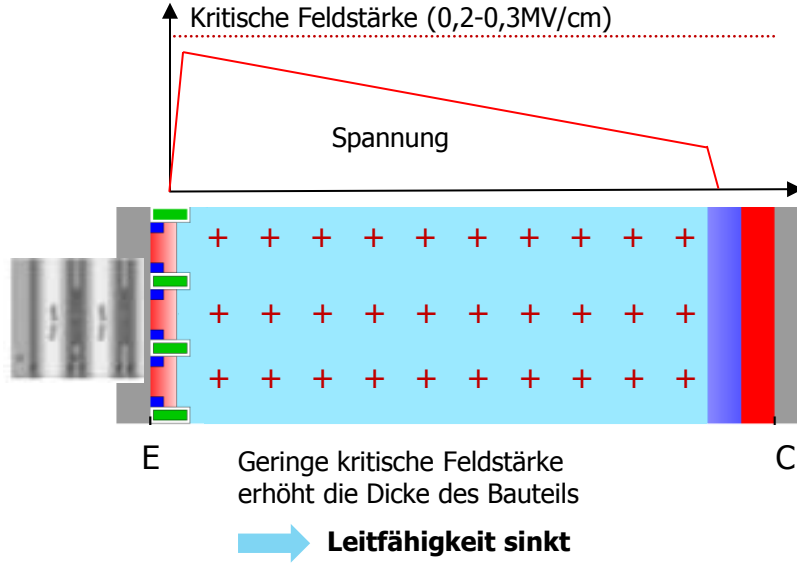
Leistungstransistoren in der E-Mobilität können bis zu 1200V Spannung sperren und >100A Strom führen



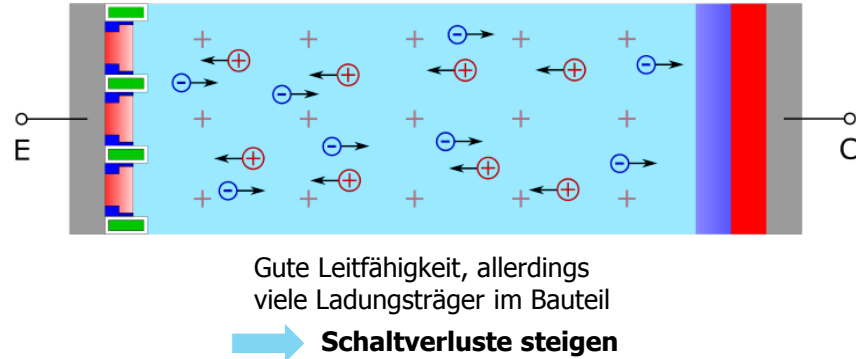
## IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) als Standard Transistor für E-Mobilität Anwendungen



## IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) als Standard Transistor für E-Mobilität Anwendungen



**Idee:**  
Überschwemmung des Halbleiters mit hochleitfähigem bipolarem Plasma



**Effizienz von Leistungstransistoren basiert auf einem Kompromiss aus Leit- und Schaltverlusten**

# Agenda

Wie funktioniert ein Antriebsinverter?

Transistoren in der Leistungselektronik

**Wie Kohlenstoff die Effizienz von Transistoren verbessern kann**

Effizienzvorteile von SiC basierten Antriebsinvertern

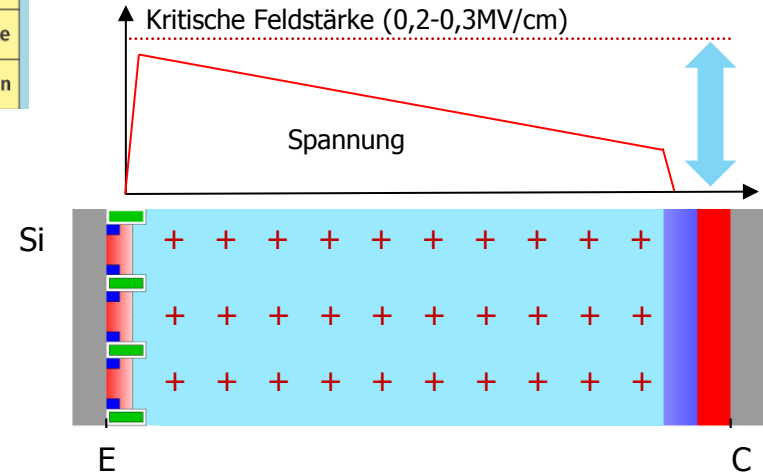
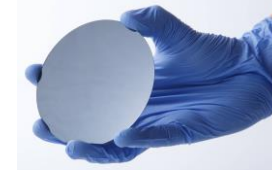
Zusammenfassung und Ausblick

# Wie Kohlenstoff die Effizienz von Transistoren verbessern kann

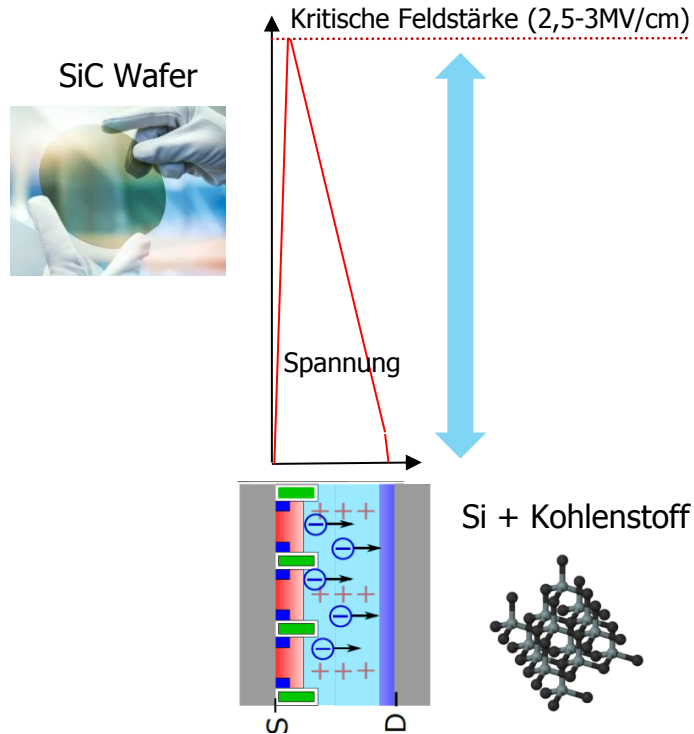
Die Kombination von Silizium und Kohlenstoff kristallisiert in einer Diamantkristallstruktur, welche eine um ca. 10x höhere kritische Feldstärke aufweist

H																	He
Li	Be	B	C	N	O	F	Ne										
Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar										
K	Ca	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr										
Rb	Sr	In	Sn	Sb	Te	I	Xe										
Cs	Ba	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn										

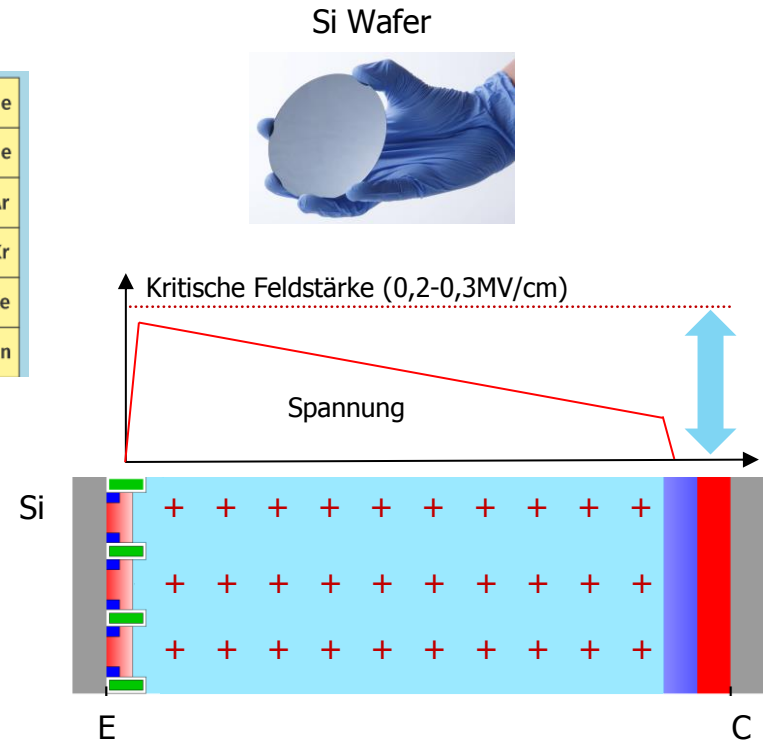
Si Wafer



# Wie Kohlenstoff die Effizienz von Transistoren verbessern kann

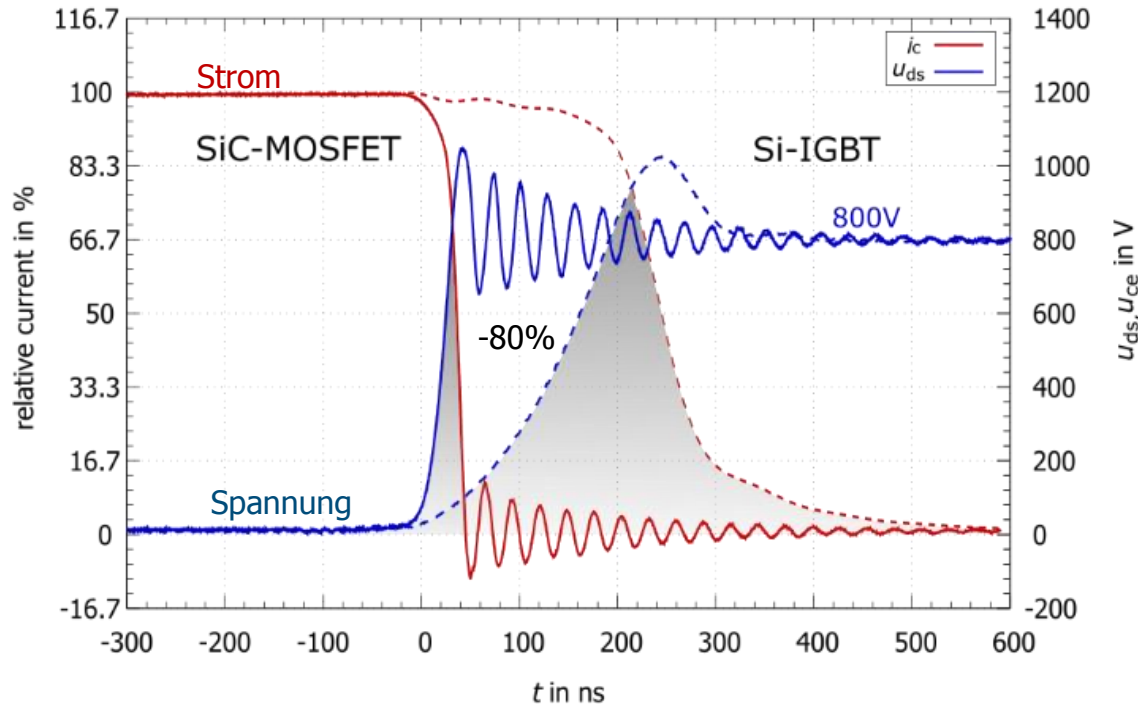


H																	He
Li	Be	B	C	N	O	F	Ne										
Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar										
K	Ca	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr										
Rb	Sr	In	Sn	Sb	Te	I	Xe										
Cs	Ba	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn										



**SiC Halbleiter können so dünn gebaut werden, dass auf das Plasma verzichtet werden kann**

# Wie Kohlenstoff die Effizienz von Transistoren verbessern kann



Ein auf SiC basierender MOSFET zeigt ein signifikant besseres Schaltverhalten als ein Si IGBT

# Agenda

Wie funktioniert ein Antriebsinverter?

Transistoren in der Leistungselektronik

Wie Kohlenstoff die Effizienz von Transistoren verbessern kann

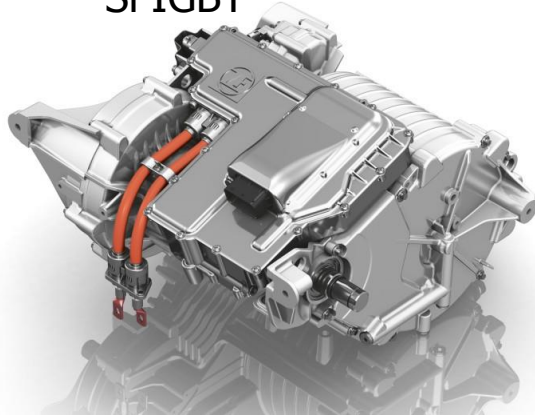
**Effizienzvorteile von SiC basierten Antriebsinvertern**

Zusammenfassung und Ausblick

# Effizienzvorteile von SiC basierten Antriebsinvertern

## 800V Technologie

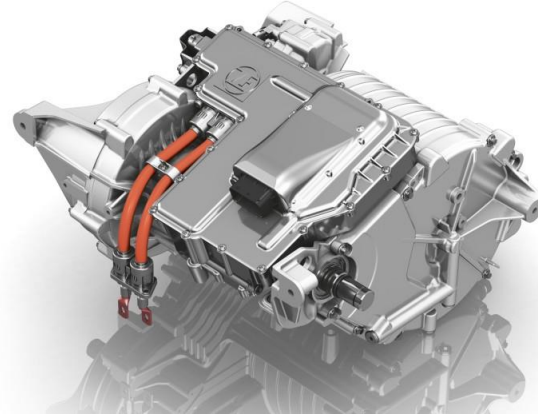
Si IGBT



example: ZF inverter, 800V, 600A

VS.

SiC MOSFET



example: ZF inverter, 800V, 600A

**Identischer Aufbau zweier Inverter für eine faire Ermittlung der Effizienzvorteile durch SiC**

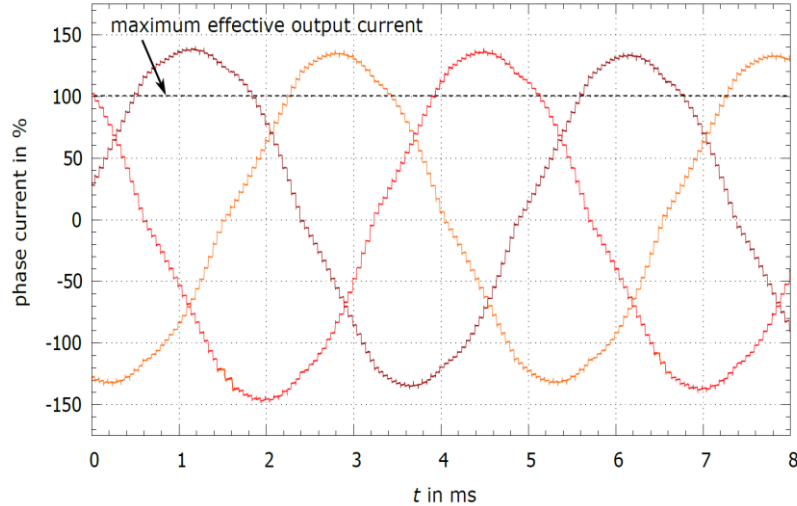


# Effizienzvorteile von SiC basierten Antriebsinvertern

## Si-IGBT



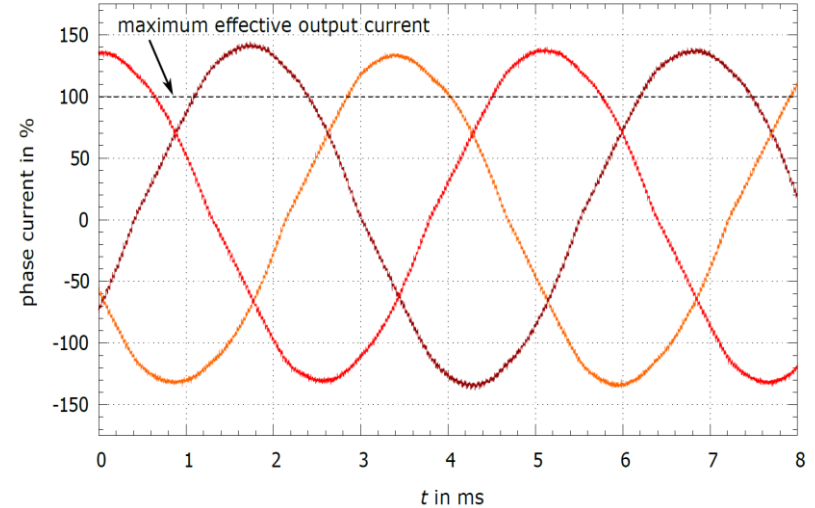
800V, max. power, 10kHz



## SiC-MOSFET



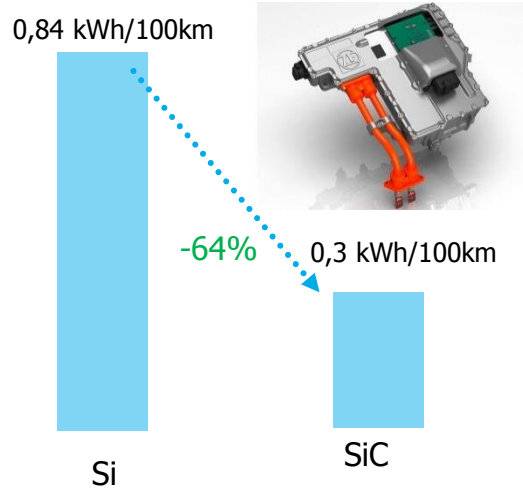
800V, max. power, 20kHz



**Schnelles Schalten durch SiC erlaubt eine höhere Schaltfrequenz → geringere Maschinenverluste**

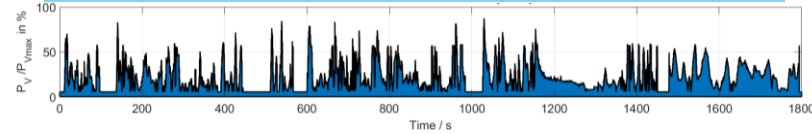
# Effizienzvorteile von SiC basierten Antriebsinvertern

## WLTP-Verluste der Inverter



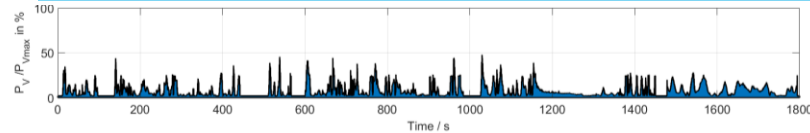
400km

100%



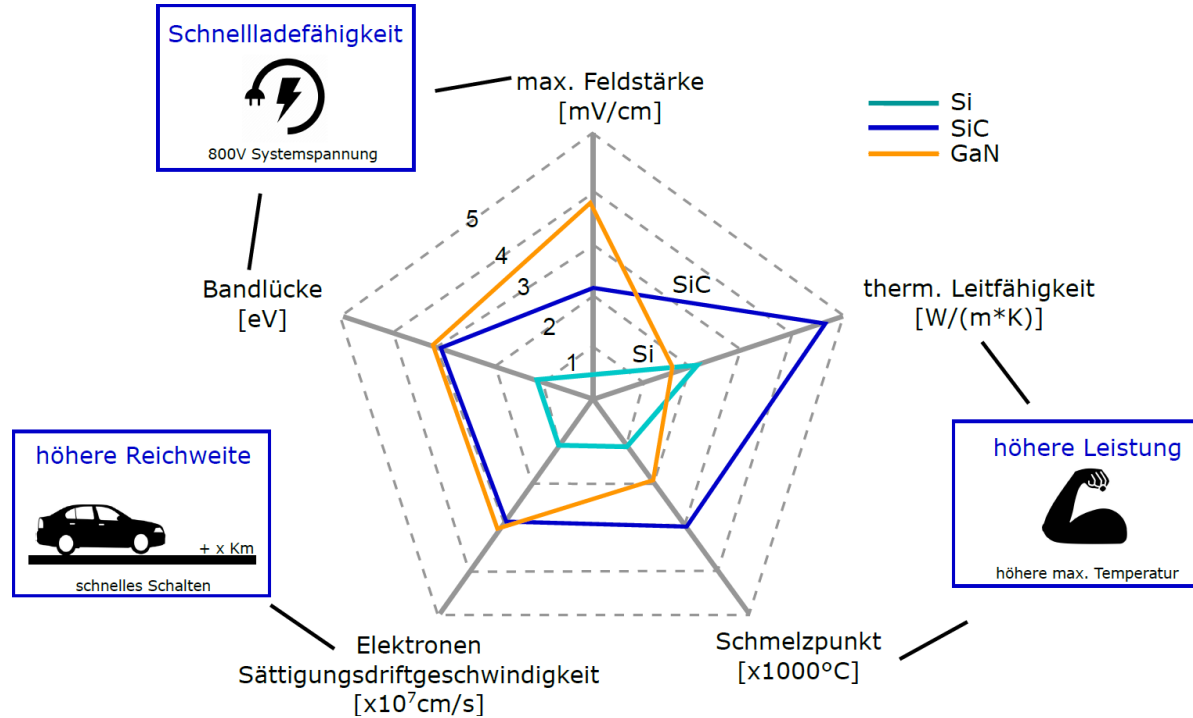
412km

103%



**SiC erlaubt eine höhere Reichweite von ca. 3% wenn nur Inverterverluste betrachtet werden**

# Effizienzvorteile von SiC basierten Antriebsinvertern



**SiC Halbleiter zeigen gegenüber Si in jeder Disziplin signifikante Vorteile**

# Agenda

Wie funktioniert ein Antriebsinverter?

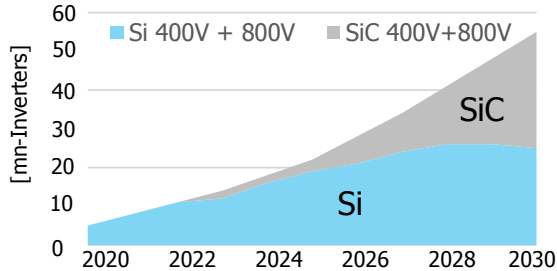
Transistoren in der Leistungselektronik

Wie Kohlenstoff die Effizienz von Transistoren verbessern kann

Effizienzvorteile von SiC basierten Antriebsinvertern

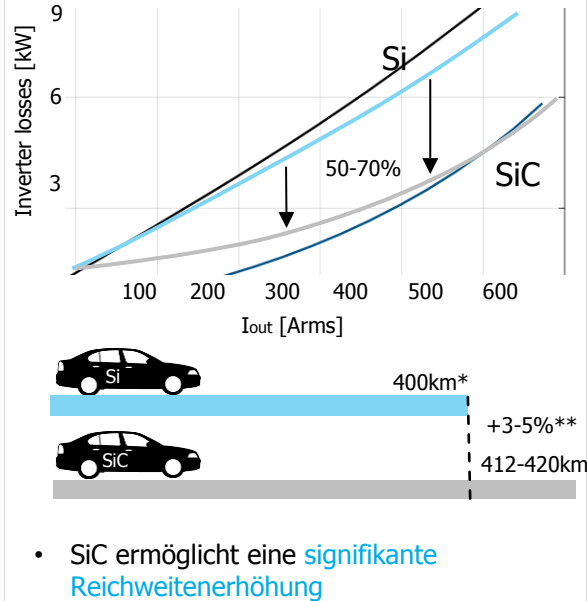
**Zusammenfassung und Ausblick**

## Markttrend



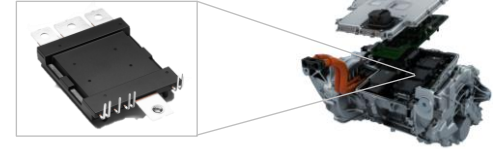
- Es gibt einen klaren **Trend zu SiC** als Halbleitermaterial **für Antriebsinverter**
- **Bis 2030** wird die **SiC Technologie** den Markt für automotive Antriebsinverter **dominieren**

## Vorteil von SiC



## Herausforderungen

Example of SiC Module



≈ 40% der Inverterkosten werden durch die SiC Module verursacht.

- Die höheren Kosten für SiC müssen auf **Systemebene kompensiert** werden
- Typisch ist die **Kompensation der Kosten** durch die **Einsparung von Batteriekapazität**

**SiC wird als WBG-Technologie den Invertermarkt für E-Mobility dominieren**



# Thank you for your attention!

Dr. Stefan Hain  
ZF Friedrichshafen AG  
[stefan.hain@zf.com](mailto:stefan.hain@zf.com)