

Wechselrichter oder Inverter werden von verschiedenen grossen Zulieferern wie BorgWarner, Bosch, Denso, Vitesco usw. hergestellt. Da jedes Hybridfahrzeug oder BEV Inverter braucht, werden diese in grossen Stückzahlen hergestellt und da es sich dadurch um ein interessantes Marktsegment handelt, versuchen sich die einzelnen Hersteller qualitativ zu über-, preislich aber zu unterbieten. Durch die Kundenwünsche nach grösseren Reichweiten und die Entwicklungen im Batteriesektor sind die Batteriespannungen auf 800 V angestiegen. Für diese Spannungen wurden neue Halbleitermaterialien entdeckt, welche bessere Eigenschaften aufweisen als Silizium. Im Endeffekt müssen aber die Entwickler den gesamten Antriebsstrang im Auge behalten, also Batterie, Wechselrichter und Motor und es ist auch in der Elektromobilität nicht so, dass bei kleinsten Einzelwirkungsgraden auch der Gesamtwirkungsgrad in jedem Fall am besten ist. Genau das wird beim Inverter festgelegt und so beginnt die Suche nach dem besten Kompromiss.

## Energieverluste

Obwohl 75 % der Verluste in einem BEV auf das Fahrzeug selbst zurückzuführen sind, müssen - wie beim verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeug - dort Verbesserungen entwickelt werden, wo es ein Potenzial gibt. Vitesco ist es 2020 gelungen, durch den Wechsel von Silizium-IGBT auf Silizium-Karbid-MOSFET (SiC) die Wechselrichterverluste um 56 % zu verkleinern und so im WLTP-Zyklus ca. 3 % Energie einzusparen. Wenn die Verluste verkleinert werden, kann die Reichweite mit der gleichen Batteriekapazität vergrössert oder die Batterie und damit die Kosten bei gleicher Reichweite verkleinert werden.

In den letzten Jahren wurden grosse Fortschritte in der Entwicklung von Halbleitermaterialien gemacht, welche für bestimmte Einsatzarten ihre Vorteile haben. So werden die SiC-Transistoren vor allem bei Spannungen über 400 V eingesetzt, da die Verluste von Si-IGBT bei höheren Spannungslagen zu gross würden. Die Verluste teilen sich in Leitungs- und Schaltverluste auf.

Die Leitungsverluste beziehen sich auf die Energie, welche verloren geht, wenn der Transistor durchgeschaltet ist.

$$E_{\text{Verl}} = \Delta U \cdot I \cdot t$$

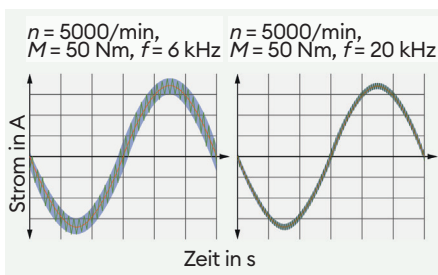


Bild 2: Durch höhere Schaltfrequenzen lässt sich die Sinusform exakter nachbilden.

Als  $\Delta U$  wird der Spannungsverlust im Leitungskanal des MOSFET bezeichnet.

Bei den Schaltungsverlusten geht es um den Rampenanstieg des Stroms. Es ist ja nicht möglich, dass der Strom zeitlos von 0 auf beispielsweise 1000 A ansteigt. Da gibt es eine Verzögerung im ns-Bereich. In dieser Zeit wird durch die Umschaltung elektrische Energie in Wärmeenergie umgewandelt. Wird zusätzlich die Schaltfrequenz angehoben, nehmen diese Verluste linear zu. Höhere Schaltfrequenzen ermöglichen aber eine bessere Abbildung der sinusförmigen Stromkurve.

Verbesserungen wurden auch im Platinenbau erreicht. Dadurch ergeben sich geringe Streuinduktivitäten und durch die Dämpfung unerwünschter Schwingungen mit speziellen Schaltungen wird die Schaltgeschwindigkeit zusätzlich verbessert.

## Variable Schaltfrequenzen

Für die Drehstromversorgung eines dreiphasigen Wechselstrommotors ist die genaue Abbildung der Sinusform wichtig, denn nur wenn die Phasenverschiebung genau  $120^\circ$  beträgt und die Kurven keine Ecken und Kanten aufweisen, wird die Summe der drei Phasenspannungen in jedem Punkt null ergeben. Entsprechen die Spannungen aber nicht genau der Sinusform, werden auch die Magnetfelder nicht sinusförmig ansteigen und abschwellen, was zu Schwingungen und Geräuschen führt und den motorischen Wirkungsgrad sinken lässt. Bild 2 zeigt den Unterschied des sinusförmigen Verlaufs bei Schaltfrequenzen von 6 kHz bzw. 20 kHz.

Je höher die Schaltfrequenz, desto besser wird der motorische Wirkungsgrad, dafür wird jener der Leistungselektronik schlechter, weil die Leistungshalbleiter häufiger schalten müssen. Darauf weisen die Kurven in Bild 3 hin. Die Verluste in der Leistungselektronik steigen linear mit der Frequenz, dagegen verringern sich die Verluste des Motors bis zu einer Schaltfrequenz von 16 kHz deutlich. Im Diagramm wird der Punkt bei 6 kHz (A) für die Leistungselektronik und bei 20 kHz (B) für den Motor als null angenommen. So muss entweder ein Kompromiss bestimmt werden, oder die Schaltfrequenz muss während des Betriebs angepasst werden.

Die Wirkungsgrade werden auch von der Temperatur und den geforderten

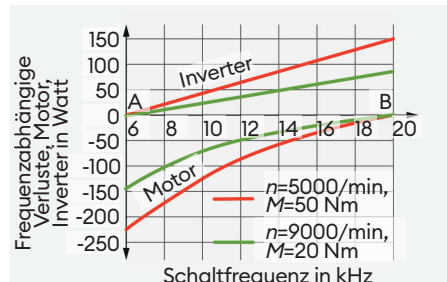


Bild 3: Gemessene Verluste bezogen auf die Referenzpunkte A (Inverter) und B (Motor).

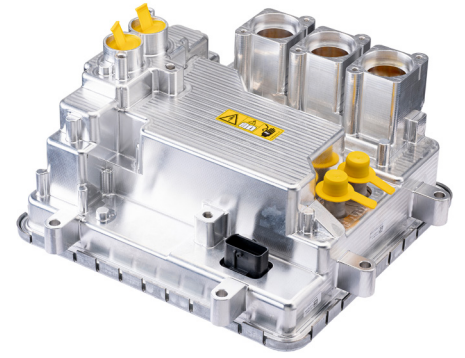


Bild 1: Der Wechselrichter in SiC-Technologie, wie ihn Vitesco 2020 vorgestellt hat.

Drehmomenten beeinflusst. Aus diesen Gründen wäre eine stufenlose dreier- oder mehrdimensionale Veränderung der Schaltfrequenz optimal (Drehzahl, Drehmoment, Temperatur usw.). Der Entwicklungsaufwand würde aber grösser und das Produkt teurer. Deshalb hat sich Vitesco im motorischen Betriebskennfeld auf 4 Frequenzen von 6, 12, 16 und 20 kHz entschieden (Bild 4). Das Kennfeld umfasst die Drehmomentabgabe über der Drehzahl im Antriebs- und Rekuperationsbetrieb. Die grauen Punkte weisen auf die Betriebspunkte während dem Durchlauf des WLTP-Zyklus hin.

## SiC kontra Si

Neben dem Wirkungsgrad sind es im Fahrzeugbau immer auch die Kosten, welche in die Entscheidungsfindung hineinspielen. So werden vorläufig bei Spannungen unterhalb von 400 V die Si-IGBT Bestand halten. Sie weisen einen schlechteren Wirkungsgrad und auch höhere Schaltzeiten auf, sind aber kostengünstiger als die Transistoren aus SiC. Das macht sie im preissensitiven Bereich der E-Fahrzeuge im Moment noch unschlagbar. Da BEV noch grundsätzlich teuer sind, werden in die kleineren Fahrzeuge (noch) nicht die teureren SiC-MOSFET eingebaut. Diese müssen, damit sie wirklich sehr schnell schalten können, von speziellen Schaltungen angesteuert werden, was den Preis noch einmal ansteigen lässt.

So werden auch in der alternativen Antriebstechnik nicht nur die besten Lösungen eingesetzt, sondern manchmal auch die kostengünstigsten.

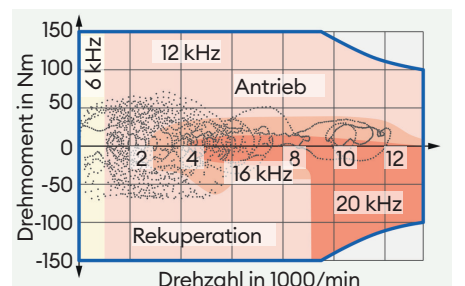


Bild 4: Kennfeld mit den WLTP-Betriebspunkten und den gewählten Schaltfrequenzen.