

elektronik.de

Elektronik

Fachmedium für industrielle Anwender und Entwickler

Sonderdruck

Kontaktlose Energieübertragung:

Sicherheitstechniken im Qi-Standard

www.rohm.com/eu

Sicherheitstechniken im Qi-Standard



Im Leistungsbereich bis 15 W hat sich der Industriestandard Qi des Wireless Power Consortiums etabliert, um Akkus in Mobilgeräten ohne Kabel zu laden. Der Qi-Standard adressiert nicht nur die Interoperabilität, sondern hauptsächlich die elektrische Sicherheit – mit einem mehrstufigen Sicherheitskonzept.

Von Winfried Bilgic

Die kontaktlose Energieübertragung wird schon wesentlich länger in der Automatisierungsbzw. Produktionstechnik eingesetzt, als womöglich bekannt. Typische Einsatzgebiete waren und sind fahrerlose Transportsysteme, in der Krantechnik und beispielsweise in der Reinraumtechnik, d.h. immer dort, wo eine Kabelnachführung oder der Schleifkontakt technisch schwierig umzusetzen oder unerwünscht sind.

Diese Einsatzgebiete sind in der Regel auf dem Firmengelände und können durch entsprechende Arbeitsschutzmaßnahmen abgesichert werden. Etwas anders ist es mit dem Wireless Charging von Smartphones, wie es Samsung, Google, Apple und andere Hersteller anbieten. Ob zu Hause, am Arbeitsplatz, unterwegs im Auto, im

Hotel oder am Flughafen – die Nutzung der kontaktlosen Ladetechnik sollte für die Anwender, unabhängig von der Umgebung, so sicher und so angenehm wie möglich sein.

Die Übertragungstechnik nach dem Qi-Standard des Wireless Power Consortiums (WPC [1]) basiert auf magnetischer Induktion, d.h. ein magnetisches Wechselfeld wird auf der Senderseite (Transmitter) erzeugt und induziert auf der Empfängerseite (Receiver) eine Wechselspannung. Diese Wechselspannung wird anschließend gleichgerichtet und beispielsweise durch einen Linearregler auf eine feste Ausgangsspannung stabilisiert.

Besonders sicherheitsrelevant ist das magnetische Wechselfeld, das insbesondere in Metalllegierungen Wirbelströme induziert. Abhängig von den

Materialparametern, der magnetischen Flussdichte und der Arbeitsfrequenz kann sich das Material unterschiedlich schnell erwärmen. Was auf dem Induktionskochfeld erwünscht ist, ist beim Wireless Charging unerwünscht.

Der Qi-Standard des WPC

Ein Grundgedanke des Qi-Standards ist die Interoperabilität, d.h. unabhängig vom Hersteller soll jeder Qi-Sender mit jedem Qi-Empfänger sicher und benutzerfreundlich funktionieren. Die Sicherheit ist im Standard kontinuierlich weiterentwickelt und erweitert worden. Seit dem Qi-Standard V1.2 wird zwischen zwei Moden unterschieden: dem sogenannten BPP (Baseline Power Profile) bis 5 W und dem EPP (Extended Power Profile) bis 15 W.

Im Qi-Sender ist ein mehrstufiges Sicherheitskonzept in der Schaltungstechnik und Firmware integriert, um aus den verschiedenen Signalstärken und

-formen den Leistungsfluss vorab zu konfigurieren, zu regeln bzw. ggf. auch abzuschalten. Ein typischer Qi-Sender besteht immer aus einem Wechselrichter, einem Mikrocontroller, einem Demodulator und diversen Messpunkten, an denen Größen wie z.B. Spannung, Stromstärke, Temperatur usw. erfasst werden.

Der Qi-Empfänger beinhaltet immer einen synchronen Gleichrichter, einen Messpunkt und einen Linearregler. Zusätzlich verfügt er über eine Kommunikationsschnittstelle, um per Lastmodulation dem Sender definierte Datenpakete senden zu können (Bild 1). Dieser Kommunikationskanal ist exklusiv zwischen Sender und Empfänger und ausschließlich zur Regelung gedacht.

Im EPP-Modus kann der Sender auch mithilfe einer vereinfachten Frequenzmodulation mit dem Empfänger kommunizieren. Die bidirektionale Kommunikation im EPP-Modus ist eine Konzepterweiterung, die es ermöglicht, den Leistungsfluss auszuhandeln. Die Betriebsphasen im Qi-Standard sehen folgendermaßen aus:

- Bereitschaft und Initialisierung (Standby & Configuration Phase),
- Aushandeln (Negotiation Phase),
- Kalibrieren (Calibration Phase),
- Energieübertragung (Power Transfer Phase).

Die Betriebsphasen berücksichtigen neben der generellen Leistungsregelung insbesondere die Dynamik der magnetischen Kopplung zwischen dem Sender und dem Empfänger. Die Selbstinduktivitäten der Sender- bzw. Empfängerspule L_p, L_s erhöhen sich nach der Kopplung – wenn die Empfängerspule auf die Senderspule gelegt wird – in L_p', L_s' messbar, weil sie das magnetische Material der jeweils gegenüberliegenden Spule erfassen.

Das führt zu einer Verschiebung der Resonanz und bedeutet auch, dass sich die Güten der Spulen verbessern können, weil die ohmschen Verluste weniger stark ansteigen. Sobald jedoch ein Fremdkörper aus einer spezifischen Metalllegierung (Foreign Object, FO) zwischen Sender und Empfänger liegt, verringern die im Fremdkörper induzierten Wirbelströme die ursprüngliche magnetische Durchflutung und die Induktivitäten verringern sich – was ebenfalls zu einer Veränderung der Güte führt.

Die Wirbelströme in dem Fremdkörper führen im Energieübertragungska-

nal zu zusätzlichen elektrischen Verlusten. Der Empfänger kann über seine Kommunikationsschnittstelle jederzeit die von ihm empfangene Leistung in definierten Datenpaketen an den Sender übermitteln. Die elektrischen Verluste im Fremdkörper können ermittelt werden, indem die gesendete Leistung mit der empfangenen Leistung verglichen wird. Der Sender kann daraus eine Leistungsbilanz und/oder einen Leistungstrend ermitteln. Ein ganz besonderer Anwendungsfall ist zudem das schnelle Entfernen eines Empfängers vom Sender, z.B. wenn ein Smartphone von der Ladeschale genommen wird. In diesem Fall könnten die maximalen Belastungsgrenzen von Bauteilen überschritten und irreparabel geschädigt werden. Als Schutzmaßnahme kann über eine Begrenzung des Feldes per Schwellwertentscheidung der Sender einfach abgeschaltet werden. In den nachfolgenden Abschnitten werden die Merkmale dieser Schutzfunktion weiter ausgeführt.

Verschiebung der Resonanz

Wenn kein Empfänger auf dem Sender aufliegt, befindet sich das Energieübertragungssystem in der Bereitschaftsphase. In diesem Zustand wird in periodischen Abständen ein sogenannter analoger Ping über den Wechselrichter in den Primärkreis initiiert, d.h. für einen kurzen Zeitraum wird der Resonanzkreis mit einer kleinen Amplitude angeregt. Die Signalfrequenz wird vom Sender zwischen den Resonanzkondensatoren und der Resonanzspule gemessen und anschließend entsprechend verarbeitet.

Die Amplitude und die Dauer dieses Pulses verringern sich deutlich, wenn z.B. ein magnetisches Material auf die Senderspule gelegt wird. Das magnetische Material vergrößert die intrinsische

Induktivitäten L_p in L_p' und die Resonanzfrequenz f_0 verringert sich. Der angeregte Resonanzkreis hat eine höhere Dämpfung, sodass sich die Amplitude und die Dauer des Pulses verringern.

In Bild 2 ist eine Gegenüberstellung der Signalform zu sehen. Das Signal wurde zwischen der Kondensatorbank und der Spule mit Bezug zur Masse gemessen. Wird ein spezifischer Schwellwert der Amplitude unterschritten, kann der Sender detektieren, dass ein Objekt auf der Senderspule aufliegt. Er kann aber noch nicht bestimmen, ob es sich dabei um einen Fremdkörper oder einen Wireless-Power-Empfänger handelt.

Um das zu ermitteln, initiiert der Sender einen sogenannten digitalen Ping über den Wechselrichter, der genug Energie überträgt, um die Elektronik auf der Empfängerseite zu wecken und in Betrieb zu nehmen. Dieser Puls hat allerdings nicht genug Energie um einen Fremdkörper signifikant zu erwärmen.

Der Empfänger muss nun mit einem definierten Datenpaket antworten, damit der Sender die nächste Betriebsphase einleiten darf. Wird das Datenpaket nicht vom Empfänger gesendet, geht der Sender davon aus, dass es sich um einen metallischen Fremdkörper handelt und verbleibt im Bereitschaftsmodus.

Veränderung der Güte durch Fremdkörper

Wenn der Empfänger durch den digitalen Ping aufwacht, antwortet er über seinen Kommunikationspfad mit diversen Parametern. Handelt es sich bei dem Empfänger um einen EPP-Empfänger, so fragt er das Leistungsvermögen des Senders ab und übermittelt einen sogenannten Referenzgütefaktor Q_{ref} , den

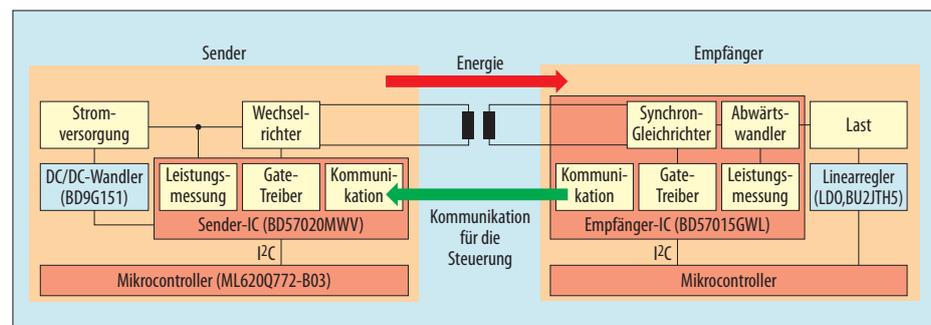


Bild 1. Zwischen Wireless-Power-Sender und -Empfänger bestehen zwei Kanäle, einer zur Energieübertragung und einer für die Kommunikation. Bei höherer Leistung – dem Extended Power Profile (EPP) – wurde der Kommunikationskanal erweitert, sodass in beide Richtungen Daten übertragen werden können. (Bild: Rohm Semiconductor)

der Sender an seiner Sendespule erwarten kann.

Ausschließlich im EPP-Modus werden auch einige Parameter vom Sender bestätigt bzw. die theoretisch übertragbare Leistung mitgeteilt. Der tatsächliche Gütefaktor wird vom Sender durch eine zusätzliche Diagnostik gemessen und mit dem vom Empfänger übertragenen Referenzgütefaktor Q_{ref} verglichen. Liegt die Abweichung innerhalb eines vertretbaren Rahmens, kann die nächste Betriebsphase initiiert werden – oder der Sender wird abgeschaltet (Bild 3).

In diesem Zusammenhang ist es wichtig zu verstehen, wie sich die Güte

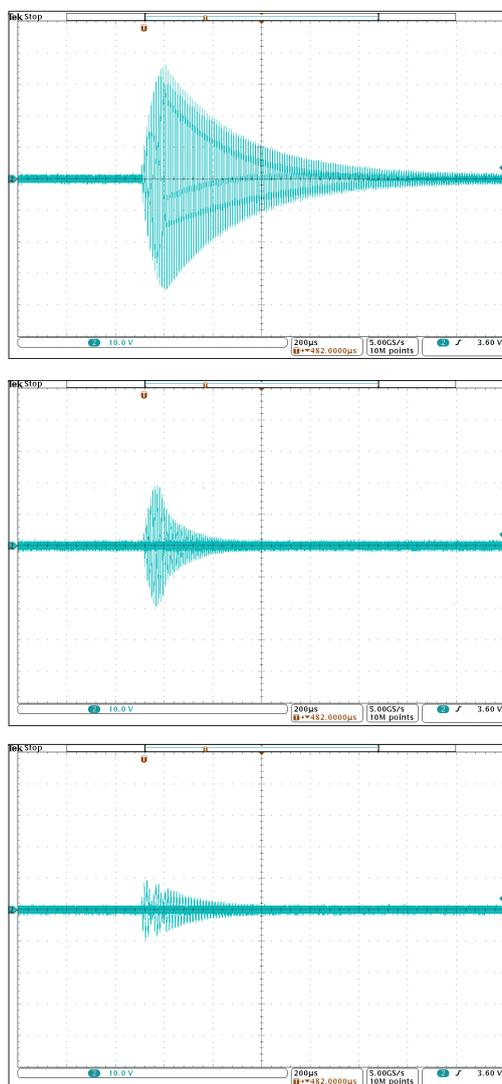


Bild 2. Über die Höhe der Spannung am Resonanzkreis des Senders kann detektiert werden, ob sich ein Objekt im Magnetfeld der Senderspule befindet. Die Messung oben zeigt den Spannungsverlauf ohne und die Messung unten den Spannungsverlauf mit einem Empfänger in der Nähe der Senderspule. Der in der Mitte dargestellte Spannungsverlauf zeigt die Reaktion auf eine Metallmünze als Fremdkörper im Nahfeld.

(Bild: Rohm Semiconductor)

der Spule physikalisch ergibt. Unabhängig von den ohmschen Verlusten und der Frequenz ist die Induktivität bzw. der magnetische Fluss entscheidend. Streng nach Maxwell, kann der magnetische Fluss über ein Flächenintegral der magnetischen Flussdichte B zu der senkrecht durchsetzten Fläche A ermittelt werden.

Bei der Betrachtung der magnetischen Feldlinien einer waagrecht platzierten Ringspule fällt auf, dass diese in der Mitte der Spule besonders senkrecht verlaufen – der magnetische Fluss bzw. die Induktivität und die Güte haben dort die stärkste Gewichtung. Das bedeutet: wenn ein Metallstück die Flussdichte durch seine Wirbelströme schwächt, ist die Veränderung der Güte besonders in der Mitte der Spule ausgeprägt und weniger stark, wenn das Metallstück auf dem Schenkel der Spule liegt.

Per Leistungsbilanz Fremdkörper detektieren

Nachdem diverse Datenpakete zwischen dem Sender und dem Empfänger ausgetauscht und positiv bestätigt wurden, kann die eigentliche Leistungsübertragung stattfinden. Der Sender erzeugt sein magnetisches Wechselfeld in Abhängigkeit von den Steuer-Datenpaketen des Empfängers, um letztendlich eine stabile Ausgangsspannung zu gewährleisten. In diesen Datenpaketen wird auch die empfangene Leistung übermittelt.

Gleichzeitig ermittelt der Sender mit Hilfe seiner eigenen Messwerte die gesendete Leistung. Eine direkte Gegenüberstellung der beiden Leistungen zeigt bereits auf, dass auch in einem Wireless-Power-System ohne Fremdkörper, ein Ungleichgewicht besteht. Schaltungsbedingt gibt es Verluste, die unbedingt berücksichtigt werden sollten, z.B. die ohmschen und die Schaltverluste im Wechselrichter, ebenso die Verluste in den Ferriten und in den Abschirmblechen.

In der Regel sind diese Verluste als bekannte Verluste in der Firmware des Senders abgelegt. Anders verhält es sich mit den bekannten Verlusten auf der Empfängerseite, die sich z.B. durch einen metallischen Rahmen und das Gehäuse ergeben. Diese Eigenmetalle (Friendly Metals) können meistens mit Hilfe von Widerständen am Empfänger

vordefiniert werden. Die Berücksichtigung der bekannten Verluste und der empfangereigenen Metalle in der Leistungsbilanz bereinigt das Ungleichgewicht der gemessenen Leistungswerte.

Die Leistungsbilanz wird kontinuierlich ermittelt, um die bekannten Verluste ergänzt und anschließend ausgewertet. Falls zwischen der Sender- und der Empfänger-Spule ein metallischer Fremdkörper liegt, erzeugen die Wirbelströme zusätzliche Verluste, die in der Leistungsbilanz registriert werden. Überschreiten diese Verluste einen gewissen Schwellwert, schaltet sich der Sender ab und die Leistungsübertragung wird beendet. Das soll verhindern, dass sich ein Fremdkörper unnötig erwärmt und ggf. den eigentlichen Empfänger, z.B. ein Smartphone, aufheizt.

Praktisch verhindert dieser Mechanismus den Fehlerfall, dass sich die Zelltemperatur von Akkus außerhalb der Spezifikation bewegt. In diesem Zusammenhang ist wiederum wichtig zu verstehen, wo dieser Schutzmechanismus besonders effektiv ist. Die Wirbelströme im Fremdkörper sind außer zur Arbeitsfrequenz auch zur magnetischen Flussdichte direkt proportional, die an den Schenkeln der Spule die höchste Amplitude aufweist und weniger hoch in der Spulenmitte ist.

Begrenzung der Feldstärke

Der Qi-Standard legt die Schaltung und Wirkungsweise des Senders sehr detailliert fest, um insbesondere den Handlungsrahmen auf der Empfängerseite so flexibel wie möglich zu halten. Die Empfängerseite ist bei Qi bis auf die Kommunikation kaum spezifiziert. Dadurch wird erreicht, dass auf der Empfängerseite die Miniaturisierung sehr ausgeprägt werden kann. Typischerweise sind die Empfänger-ICs nur wenige Quadratmillimeter groß:

- BD57011AGWL, 5 W, ca. 9 mm²,
- BD57015GWL, 10 W, ca. 13 mm² und
- BD57016GWL, 15 W, ca. 18 mm².

Zusätzlich wird der für ein Empfänger-IC gewählte Halbleiterfertigungsprozess auf eine spezifische Spannungsklasse limitiert. Sie legt auch die maximal zulässige Spannungen fest, die in dieser Applikation an den IC-Eingängen anliegen dürften.

Die maximale zulässige Spannung am Gleichrichter im Empfänger liegt typischerweise bei 20 V. Es gibt allerdings einen Betriebsfall, in dem die Spannung überschritten werden könnte: Dann, wenn der Empfänger die maximal verfügbare Leistung abrufen und anschließend sehr schnell vom Sender entfernt wird.

Die meisten Qi-Wireless-Power-Systeme werden in einer Serienresonanzschaltung betrieben. In dieser ist die induzierte Spannung umgekehrt proportional zur magnetischen Kopplung. Beim schnellen Entfernen fällt die magnetische Kopplung rapide ab. Auf der Senderseite verringert sich die Last im Wechselrichter und der Strom steigt schneller als die Stromregelung sie kompensieren kann. Der Anstieg im Stromfluss induziert im Empfänger eine höhere Spannung am Gleichrichter, sie kann sehr leicht den maximal zulässigen Wert erreichen.

Die Strommessung im Sender erfolgt klassischerweise im Gleichstrompfad; diese ist systembedingt träge, sodass zusätzlich eine Schwellwertdetektion ähnlich wie beim analogen Ping im Resonanzkreis zwischen den Kondensatoren und der Spule angesetzt wird. Der Stromanstieg erhöht ebenfalls die Spannung über den Bauelementen im primärseitigen Resonanzkreis. Wird hier ein spezifischer Schwellwert erreicht, schaltet der Sender den Wechselrichter ab und irreparable Schäden am Sender können verhindert werden.

Sicherheits- und Schutzfunktionen

Die Kombination aller Sicherheitsmerkmale macht ein Qi-Wireless-Power-System robust. Sie greifen ineinander und kompensieren so gegenseitig die



Bild 4. Das Wireless-Power-Evaluierungs-Kit von Rohm und Würth besteht aus einem Sender (große Leiterplatte unten) und einem Empfänger (oben).
(Bild: Rohm Semiconductor)

Schwächen einzelner Sicherheitsfunktionen. So ist beispielsweise die Auswertung der Güteveränderung zum Erkennen von Fremdkörpern in der Mitte der Spulen besonders effektiv. Für Fremdkörper an den Spulenschenkeln eignet sie sich allerdings weniger. Dafür liefert die Leistungsbilanz bei an den Spulenträgern platzierten Fremdkörpern besonders gut detektierbare Messwerte – und weniger gute Ergebnisse wenn ein Fremdkörper sich in der Mitte der Spulen befindet.

Das Wireless Power Consortium (WPC) hatte bis vor einem Jahr etwa 240 Unternehmen als Mitglieder gelistet. Innerhalb eines Jahres ist die Mitgliederanzahl auf über 400 Unternehmen gestiegen. Allein diese Entwicklung zeigt, dass sich der Qi-Standard gefestigt hat und zunehmend Fürsprecher findet. Rohm Semiconductor ist Mitglied im WPC, engagiert sich dort im Board of Management und arbeitet gemeinsam mit anderen WPC-Mitgliedern in diversen Arbeitsgruppen an der Weiterentwicklung des Qi-Standards.

Eine kontaktlose Energieübertragung lässt sich mit wenigen Handgriffen im Labor umsetzen, aber eine sichere und interoperable Leistungsübertragung erfordert tiefgehendes Wissen und breite Erfahrung. Dies gilt insbesondere dann, wenn ein Konzept so umgesetzt werden soll, dass es als Produkt wirtschaftlich attraktiv ist.

Vom Wissen und den Erfahrungen der Fachleute, die am Qi-Standard mitarbeiten, können Entwickler von Wireless-Power-Systemen profitieren – wenn sie bei ihrer Arbeit auf ICs setzen, die entsprechend dem Qi-Standard zertifiziert wurden, z.B. den Sender-IC BD57020MWV [2] – kombiniert mit dem Mikrocontroller ML610Q772-B03 [3] – für beide Profile BPP (bis 5 W) und EPP (bis 15 W) und den Empfänger-IC BD57015GWL [4] für EPP (bis 10 W) von Rohm. Sender- und Empfänger-IC sind auch die Hauptbestandteile des Evaluierungs-Kits (Bild 4), das Rohm in Kooperation mit Würth realisiert hat und seit Ende 2016 anbietet [5]. Mit ihm lässt sich die kontaktlose Energieübertragung

sehr einfach testen und in ein System integrieren.

Die Qi-Zertifizierung ist ein weite-

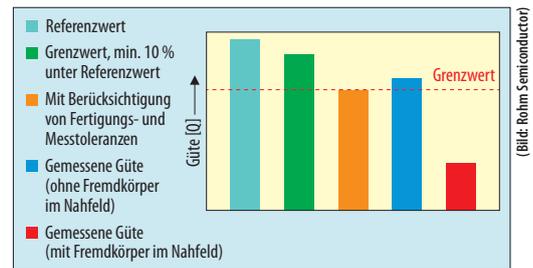


Bild 3. Im Sender wird der vom Empfänger übertragene Referenzgütefaktor (Q_{ref}) mit dem vom Sender gemessenen Gütefaktor verglichen. Weicht der gemessene Gütefaktor deutlich vom Referenzwert ab und unterschreitet den Schwellwert, so wird die Energieübertragung beendet.

res entscheidendes Sicherheitsmerkmal für Entwickler und auch für Endanwender. Sie gliedert sich in einen Compliance-Test der die Qi-Spezifikation prüft und einen Interoperabilitätstest, der den operativen Betrieb des Wireless-Power-Systems (DUT, Device Under Test) mit einem definierten Satz von Qi-Produkten testet. Die Zertifizierung garantiert, dass die Spezifikationen des Standards eingehalten werden und auch beurkundet sind – bestätigt mit dem offiziellen Qi-Logo des WPC. *hs*

Literatur

- [1] Wireless Power Consortium, www.wirelesspowerconsortium.com
- [2] Wireless Power Transmitter IC BD57020MWV. Rohm Semiconductor, Datenblatt, www.rohm.de/web/de/datasheet/BD57020MWV/bd57020mwv-e
- [3] ML610Q772 8-bit Microcontroller. Lapis Semiconductor, Datenblatt, www.lapis-semi.com/en/data/datasheet-file_db/miconlp/FEDL610Q772-01.pdf
- [4] Wireless Power Receiver IC BD57015GWL. Rohm Semiconductor, Datenblatt, www.rohm.de/web/de/datasheet/BD57015GWL/bd57015gwl-e
- [5] Wireless Power Design Kit for Medium Power. Rohm Semiconductor, www.rohm.com/web/eu/wireless_power

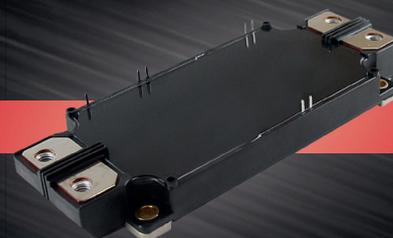
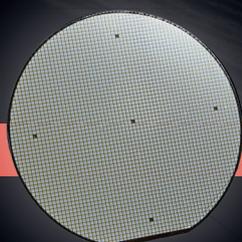
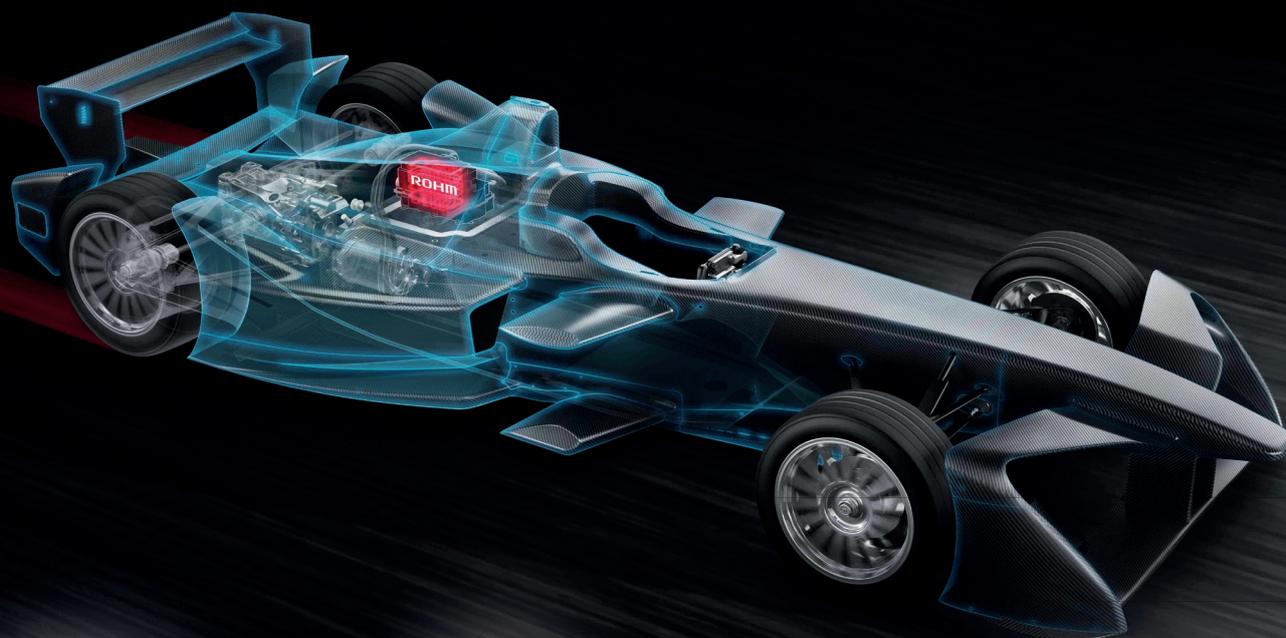


Dipl.-Ing. Winfried Bilgic

hat Elektrotechnik an der Universität Duisburg-Essen studiert. Seit seinem Eintritt bei Rohm Semiconductor ist er im technischen Support tätig. Sein Schwerpunkt liegt im Bereich Power Management und in den Wireless-Power-Applikationen. Seit 2015 ist er für die FAEs in den Bereichen Automobil, Industrie und Konsumgeräte im European Design Center verantwortlich.

Winfried.Bilgic@de.rohmeurope.com

SMALLER STRONGER FASTER



Das Venturi Formel E Team setzt in seinen elektrisch angetriebenen Rennwagen auf die neueste Generation von Invertern, die auf der Full SiC Modul Technologie von ROHM beruhen. ROHM hat durch die Bereitstellung von zukunftsweisenden SiC-Leistungshalbleitern einen großen Entwicklungsschritt in der Elektromobilität ermöglicht. Das Unternehmen produziert SiC-Bauteile in-house in einem vertikal integrierten Fertigungssystem und gewährleistet damit höchste Qualität und eine konstante Versorgung des Marktes.

SMALLER

Die SiC Technologie ermöglicht eine reduzierte Chipgröße, die zu einem kleineren und leichteren Inverter führt.

STRONGER

SiC verbessert den Wärmewirkungsgrad und die Leistungsdichte für eine stärkere Performance.

FASTER

SiC unterstützt Fahrzeuge dabei schneller die Ziellinie zu erreichen und ermöglicht Fast-Charging Lösungen.

OFFICIAL TECHNOLOGY PARTNER

**VENTURI**
FORMULA-E TEAM

www.rohm.com/eu