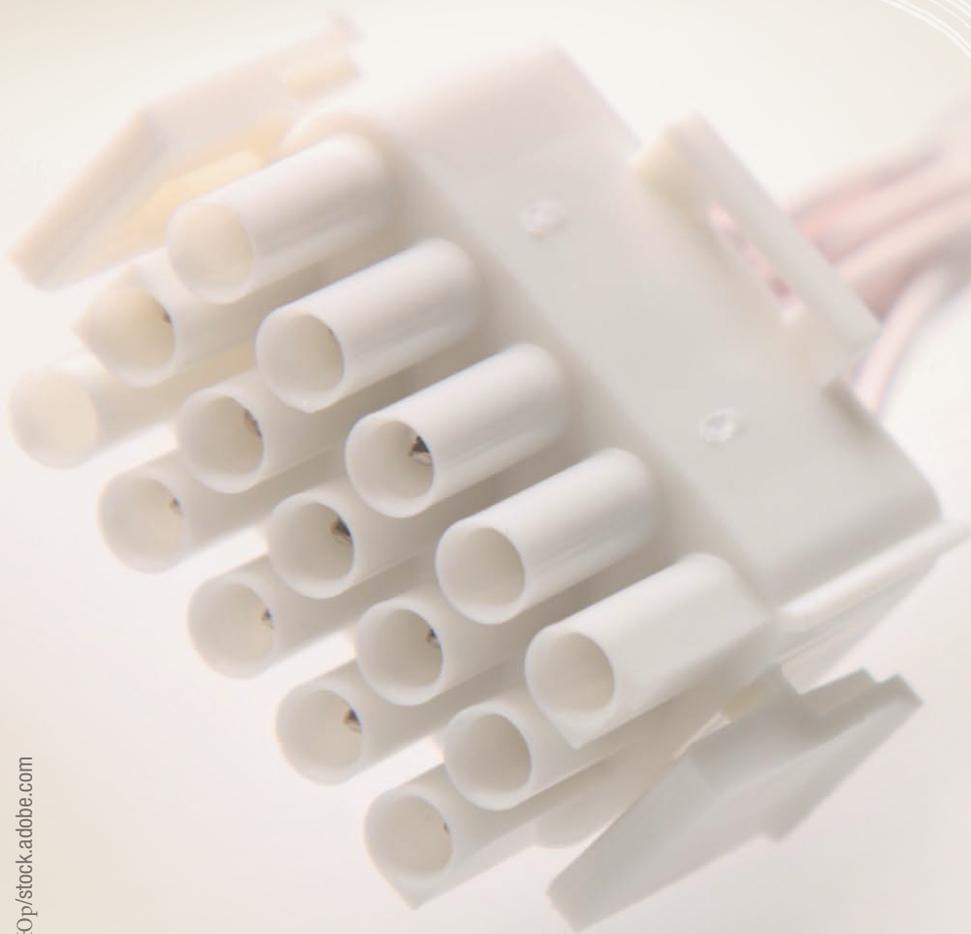


Elektronik

Know-how für Entwickler

Innovationen aus der Elektromechanik

STECKVERBINDER & KABEL Ab Seite 10



**Test-to-Failure garantiert
langfristige Zuverlässigkeit
von Steckverbindern** Seite 22

**Hohe Energiedichte:
Können Festkörperbatterien ihr
Potenzial ausschöpfen?** Seite 28

**Transformation zum
Fahrzeug der Zukunft: Ohne
Halbleiter kein SDV** Seite 41



Wenn es kritisch wird

Die Luft- und Raumfahrtindustrie ist anspruchsvoll.
DigiKey liefert Ihre Bauteile in kürzester Zeit, sodass Ihr
Countdown nie unterbrochen wird.

Finden Sie Ihre Komponenten unter [digikey.de](https://www.digikey.de)

DigiKey

we get technical

KI-Revolution – wo sie wirklich stattfindet

Die ISSCC fand dieses Jahr zum 72. Mal statt und erfreute sich ungebrochenen Interesses. Erneut wurde der Rekord an Einreichungen vom Vorjahr übertroffen. Das diesjährige Konferenzthema fiel mit »The Silicon Engine Driving the AI Revolution« nicht wirklich überraschend aus. Wird doch die »KI-Revolution« in weiten Kreisen als Zauberstab angesehen, mit dessen Hilfe sich sämtliche Probleme in wunderbare Chancen verwandeln lasse. Doch riesige Chancen bieten sich tatsächlich – wenn die Experten in aller Tiefe über das Bescheid wissen, worüber sie sprechen, wenn sie genau wissen, was von den neuen Möglichkeiten realistisch erwartet werden kann und wie sie sich sinnvoll einsetzen lassen, um zu überzeugenden Ergebnissen zu führen. Eine solche Expertin sprach an prominenter Stelle auf der ISSCC: Prof. Daniela Rus vom MIT. In ihrer Keynote (»From Chips to Thoughts: Building Physical Intelligence into Robotic Systems«) unterstrich sie die Bedeutung der Energieeffizienz. Sie spielt nicht nur in Server-Farmen, in denen umfangreiche Modelle trainiert werden, eine Rolle, sondern insbesondere auch dann, wenn KI über den digitalen Bereich hinaus in reale physische Anwendungen übergeht.

Prof. Rus hob hervor, dass Weiterentwicklungen wie Zustandsraummodelle und Liquid-Network-Modelle vielversprechend seien, um dieses Problem zu lösen. Durch die effiziente Nutzung des Arbeitsspeichers und die optimierte Verarbeitung eignen sich diese Modelle besonders für den Einsatz in mobilen Geräten, Robotern und Edge-Systemen. Denn im Gegensatz zu herkömmlichen, ressourcenintensiven KI-Modellen, die umfangreiche Cloud-basierte Berechnungen erfordern, können diese neuen Modelle lokal auf kleineren Geräten ausgeführt werden. Rus ist überzeugt: »Wenn wir KI-Systeme auf nachhaltige Weise weiterentwickeln, werden wir die Lücke zwischen digitaler Intelligenz und Anwendungen in der physischen Welt schließen.« Und weiter: »Wenn 2023 das Jahr von Text-zu-Bild und 2024 das Jahr von Text-zu-Video war, dann könnte 2025 das Zeitalter der physischen Intelligenz einläuten, mit Text-zu-Aktion, Text-zu-Aufgabe, Text-zu-Gerät und Aktion-zu-Umwelt.«

Um dies alles ausführen zu können, sind – wie der Titel des Vortrages schon zum Ausdruck brachte – ICs erforderlich, die mit Hilfe der neusten Prozesstechniken, auf ihre jeweiligen Anwendungsfälle hin optimiert werden können – da geht es nicht nur um möglichst winzige Geometrien, um Chiplets, Advanced-Packaging-Techniken und Heterogeneous Integration, um Elektronik und Photonik zu kombinieren. Auf dieser Basis sind vollkommen neue Designs und Architekturen möglich und erforderlich.

Einige der vielen interessanten Eindrücke von der ISSCC 2025 finden Sie ab Seite 32 in dieser Ausgabe.

IRIS STROH

Leitende Redakteurin
IStroh@compeers.net



Mehr Daten, weniger Stress

20%
Rabatt



MR6000-MAX

Sichern Sie sich

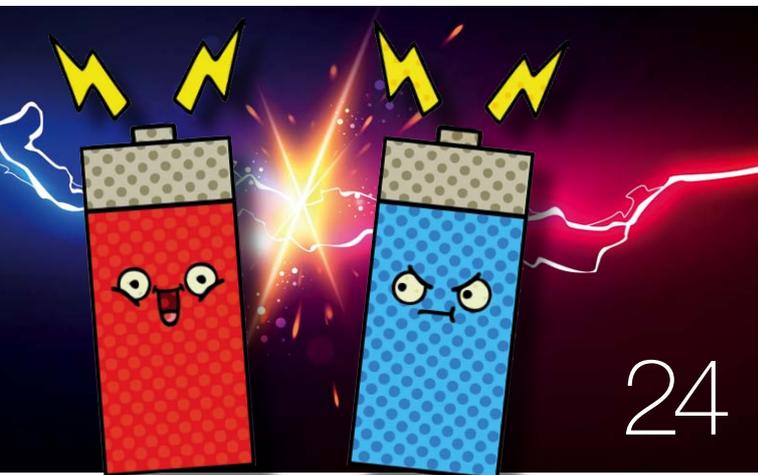
20 % Rabatt

auf das

Speicherrekorder- Aktionspaket

shop.hioki.eu

HIOKI EUROPE GmbH
Helfmann-Park 2
65760 Eschborn



EDITORIAL

3 KI-Revolution – wo sie wirklich stattfindet

GMM-NEWS

6 COSIMA-Studierendenwettbewerb 2024:
Eine Revolution im barrierefreien Einkaufen

IMPULSE

8 Leserwahl »Produkte des Jahres 2025«:
Das sind die Sieger

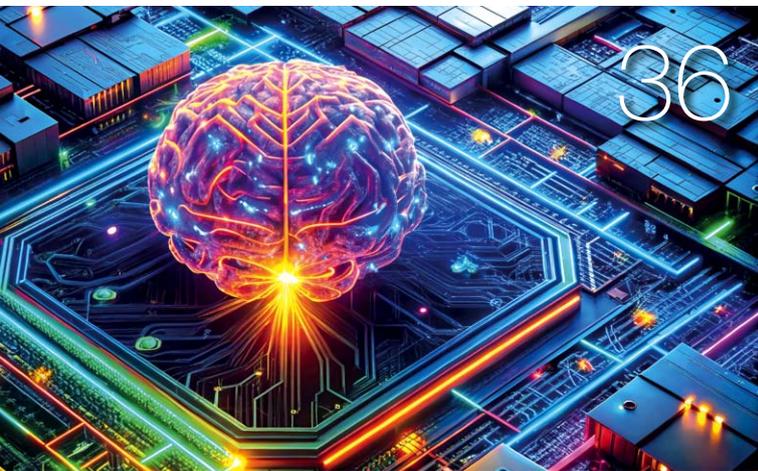
9 Smart-City-Projekt:
KI-gesteuerte Stadtbeleuchtung im Test

STECKVERBINDER & KABEL

- 10 Sicherheit beim autonomen Fahren:**
Board-to-Board- Verbindung von Steuergeräten
- 13 Zukunftsfähige Designs:** Sieben Kriterien für die Auswahl von Industrie- Steckverbindern
- 16 Merkmale robuster Steckverbinder:**
Wenn extreme Anforderungen zu erfüllen sind
- 19 Board-to-Board-Steckverbinder:**
Design für Hochgeschwindigkeits- Signalstrecken
- 22 Langfristige Leistungsfähigkeit von Steckverbindern garantieren:** Test-to-Failure für mehr Zuverlässigkeit

BATTERIEN / AKKUS / LADEGERÄTE

- 24 Ansmann stellt Zellvergleiche an, die nicht hinken:**
Batterielabor für die gezielte Zellauswahl
- 28 Können Festkörperbatterien ihr Potenzial ausschöpfen?:** EV-Batterien für 1000 km Reichweite
- 31 Mit programmierter Firmware:**
Komplettlösung für Lithium-Ionen-Batteriemanagement



ISSCC

32 Die KI-Revolution vorantreiben:

KI braucht Innovationen auf der Speicherseite

36 KI bringt Rechentechnologien an ihre Grenzen:

Alle Hebel müssen umgelegt werden

40 Transformation zum software-definierten Fahrzeug:

Ohne Halbleiter klappt das SDV sicherlich nicht

PASSIVE BAUELEMENTE

44 Unterschied zwischen MTBF und Lebensdauer: Zwei

Parameter – unterschiedliche Bedeutung

47 Nachfrage nach Weichferriten wächst:

»Für uns stehen Expertise und Qualität an erster Stelle«

49 Impressum

Inserenten,

Vorschau

Markt&Technik DC KONFERENZ

23. Oktober 2025

Forum am Schlosspark
Ludwigsburg

**GLEICHSTROM-
NETZE STARTEN
DURCH**

Call for Papers bis 30. April 2025 einreichen!

Gleichstromnetze bieten große Vorteile gegenüber Wechsel- und Drehstromnetzen, vor allem in Produktion und Gebäuden, wie 50% niedrigere Energiekosten und Kupfereinsparungen. Unternehmen, die sie einführen wollen, stehen vor neuen Herausforderungen und benötigen viele Informationen für eine erfolgreiche Implementierung.

Konferenz: Vorteile von Gleichstrom in der industriellen Produktion, in der Halbleiterfertigung, in Gebäuden, in der Beleuchtung, in Datenzentren, in der Logistik und in der Integration von Erneuerbaren Energien (Microgrids for Distributed Power). Erforderliche Komponenten für Sicherheitseinrichtungen, aktuelle Entwicklungen in der Leistungselektronik, Use Cases usw.

Fachausstellung: Die Ausstellung bietet Einblicke in die neuesten Technologien Hersteller präsentieren welche Komponenten es bereits gibt, um Gleichstromnetze aufzubauen.

Networking: Teilnehmer haben die Möglichkeit sich mit Entwicklern, Spezialisten und Entscheidern zu vernetzen.

Mehr Informationen und geplante

Themenschwerpunkte:

markt-technik-dc-konferenz.de

Powered by

Markt&Technik
DIE ZEITUNG FÜR ELEKTRONIK, KI UND INFORMATIONSTECHNIK

COSIMA-Studierendenwettbewerb 2024

Eine Revolution im barrierefreien Einkaufen

Einkaufen stellt für sehbehinderte und blinde Menschen eine erhebliche Herausforderung dar. SmartCart, ein modulares System für Einkaufswagen, ermöglicht barrierefreies Einkaufen. Die innovative Lösung erzielte den zweiten Platz beim Studierendenwettbewerb COSIMA 2024.

Die Schwierigkeiten, die Menschen mit eingeschränktem Sehvermögen im Alltag und insbesondere beim Einkaufen bewältigen müssen, sind vielschichtig und betreffen insbesondere ihre Unabhängigkeit und Sicherheit. Mehr als 90 Prozent der vom Team SmartCart Befragten mit eingeschränktem Sehvermögen gaben an, die Navigation durch überfüllte Supermärkte, die Auswahl der richtigen Artikel und das Vermeiden von Hindernissen seien frustrierende und potenziell gefährliche Herausforderungen. Diese Barrieren beeinträchtigen nicht nur ihre Autonomie, sondern schränken auch ihre Lebensqualität erheblich ein.

Das Team SmartCart

Dass Menschen mit Seheinschränkungen mithilfe eines intelligenten Einkaufswagens uneingeschränkt und gleichberechtigt am Einkaufsleben teilnehmen können, ist das erklärte Projektziel des Teams SmartCart von Prof. Matthias Drüppel an der Dualen Hochschule Baden-Württemberg (DHBW), Standort Stuttgart, (**Bild 1**). Mit fortschrittlichen KI-Algorithmen und präzisen Navigationssystemen schafft SmartCart barrierefreie Einkaufserlebnisse und fördert Unabhängigkeit,



Bild 1. Team-Sprecher Milan Ferus-Comelo bei der Präsentation von SmartCart: An der Unterseite des Einkaufswagens ist eine Einheit mit Raspberry Pi und Lidar-Sensor angebracht, am Griff ist der Produkt-Scanner mit Richtungszeiger montiert. (Bild: Jonas Kron / VDE)

Zugänglichkeit sowie Inklusion. Das Team besteht aus Teamsprecher Milan Ferus-Comelo, Lilly Hörschele und Patrick Mahlfeld; es arbeitet in Kooperation mit dem Unternehmen Alfred Kärcher (**Bild 2**).

Die Projektidee

SmartCart wurde als modulares System entwickelt, das auf verschiedene Plattformen wie Einkaufswagen oder Bollerwagen montiert werden kann. Durch den Einsatz von Technologien wie Lidar zur präzisen Hinderniserkennung und Navigation, Sprachsteuerung für die intuitive Bedienung und haptisches Feedback hilft SmartCart den Nutzerinnen und Nutzern, Orientierung und Sicherheit im Supermarkt zu erlangen. Das System unterstützt die Produkterkennung, kann Einkaufslisten verarbeiten und den Weg zu den gesuchten Produkten aufzeigen.

Hinderniserkennung und Navigation

Die kompakte Einheit (15 cm x 11 cm x 4,5 cm) wird an der Unterseite des Ein-



Bild 2. Das Team SmartCart verfolgt das erklärte Ziel, Menschen mit Sehbeeinträchtigungen den uneingeschränkten und gleichberechtigten Einkauf zu ermöglichen. (Bild: Milan Ferus-Comelo / VDE)

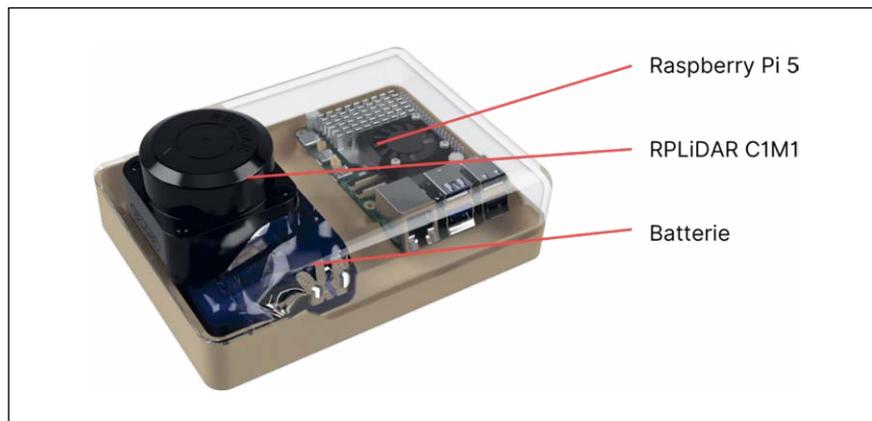


Bild 3. Das an der Unterseite des Einkaufswagens montierbare Modul verwendet Lidar zur präzisen Hinderniserkennung und Navigation. (Bild: Milan Ferus-Comelo / VDE)

kaufswagens befestigt, was eine flexible Nutzung in verschiedenen Supermarktumgebungen erlaubt. Kernkomponenten wie der Raspberry Pi, der Lidar-Sensor und die Batterieeinheit sind in einem robusten Gehäuse untergebracht, das den Anforderungen des täglichen Einsatzes standhält (**Bild 3**).

Die Befestigung erfolgt über ein Montagesystem, das die schnelle Installation und einfache Wartung gewährleistet. Spezielle Halterungen sorgen für eine stabile Verbindung zum Einkaufswagen, ohne dessen Struktur zu beeinträchtigen. Die Energieversorgung stellt ein leistungsstarker, austauschbarer Akku sicher, der eine Betriebszeit von mehreren Stunden erzielt.

Innovative Produkterkennungs-Funktion

SmartCart bietet eine Produkterkennungs-Funktion, die es ermöglicht, gezielt nach Artikeln auf einer Einkaufsliste zu suchen. Mithilfe eines Barcode-Scanners erkennt das System verschiedene Produkte und vergleicht sie mit den gespeicherten Informationen in der Produktdatenbank (**Bild 4**). Neben der Identifizierung der Produkte im Supermarktregal kann SmartCart wichtige Informationen zu den Inhaltsstoffen und Nährwertangaben der Artikel abrufen. Die Datenbank enthält detaillierte Informationen, die es gestatten, Produkte mit bestimmten Inhaltsstoffen wie Zucker oder Gluten zu kennzeichnen. Mithilfe dieser Funktion kann SmartCart die Waren mit den diätetischen Einschränkungen des Nutzers abgleichen und eine Warnung absetzen,

falls eines der ausgewählten Produkte ungewünschte Inhaltsstoffe enthält.

Haptik und Sprachsteuerung

SmartCart setzt auf intuitives haptisches Feedback, damit die Kundinnen und Kunden komfortabel und möglichst hindernisfrei einkaufen können. Mittels eines für die Nutzerinnen und Nutzer gut fühlbaren Zeigers gibt SmartCart die Richtung an, in der sich eine Kollision mit Hindernissen wie anderen Kunden oder Warenregalen vermeiden lässt.

Der Zeiger hat einen Arbeitsbereich von 180°, womit alle Hindernisse im Laden umfahren werden können. Sollte sich ein Hindernis nicht umgehen lassen, zum Beispiel weil der komplette Gang blockiert ist, schaltet sich ein Vibrationsmotor ein und signalisiert damit, dass es erforderlich ist, wieder umzukehren.

Die Sprachsteuerung von SmartCart ist eine Schlüsselkomponente für intuitive Bedienung und Benutzerfreundlichkeit. Das System verwendet ein kompaktes Machine-Learning-Modell der Größe

40 MB, das auf Tausenden von Stunden Sprachdaten trainiert wurde, um eine hohe Genauigkeit zu gewährleisten. Die Ausführungszeit beträgt dabei nur etwa 150ms, was eine schnelle Reaktion auf gesprochene Befehle ermöglicht.

Erfolge und Visionen

Mit seinem zweiten Platz beim COSIMA-Wettbewerb erhält das Team SmartCart dieses Jahr die Gelegenheit, Deutschland beim Wettbewerb iCANX auf internationaler Bühne zu vertreten. Darüber hinaus verzeichnet das Team bereits weitere Erfolge: Das Projekt wurde schon mit zahlreichen Erfolgen gekrönt: SmartCart gewann mehrere Pitch-Wettbewerbe und wurde von den Vereinten Nationen für seinen Beitrag zu den Nachhaltigkeitszielen (SDG 10: Verringerung von Ungleichheiten) anerkannt. Zudem erhielt das Team Unterstützung von international anerkannten Organisationen und nationalen Instituten für Blinde, was die Bedeutung und das Potenzial dieses Projekts unterstreicht. Das Team SmartCart will ein Zeichen für technologische Innovation und soziale Verantwortung setzen, indem es Barrieren abbaut und Unabhängigkeit fördert. In den vergangenen Elektronik-Ausgaben haben wir über weitere Teams des COSIMA-Studierendenwettbewerbs 2024 berichtet, beispielsweise in der Elektronik-Ausgabe 3/2025 über das Team SonoVision, das einen Sonderpreis für seine Smartbrille erhielt, und in der Elektronik-Ausgabe 5/2025 über das Siegerteam Myzelion mit seinem Sensorsystem für die einfache Gartenarbeit.

Weitere Informationen zu COSIMA:

www.cosima-mems.de

ih

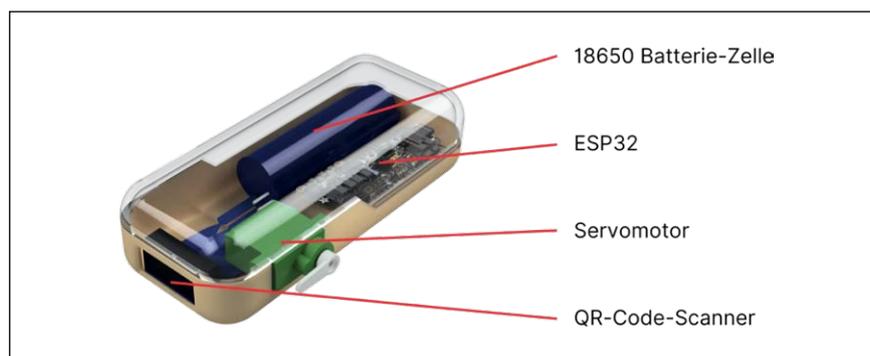


Bild 4. Mithilfe eines Barcode-Scanners können sehbehinderte Kundinnen und Kunden Informationen über Inhaltsstoffe und Nährwertangaben der Produkte abrufen. (Bild: Milan Ferus-Comelo / VDE)

Leserwahl »Produkte des Jahres 2025«

Das sind die Sieger

In der letzten Elektronik-Ausgabe des vergangenen Jahres hatten Sie als Leser die Wahl: 77 Produkte waren zum »Produkt des Jahres« nominiert. Jetzt stehen die Ergebnisse fest. In Ausgabe 8 der Elektronik folgt eine ausführliche Würdigung der gewählten Produkte und der Preisträger.

sponsored by **YOKOGAWA** 
Test&Measurement



Automotive

Eberspächer: 12-V-Batteriemanagement System – BMS für den Niedervoltbereich

HARMAN: Ready Vision QVUE HUD – Pillar-to-Pillar-Display

Intel: Diskrete Grafikeinheit dGPU – KI-Cockpit-Lösung

Elektromechanik

Bopla Gehäuse Systeme: BoVersa – Gehäusesystem

Phoenix Contact: Zubehör für Heavycon Steckverbinder – Push-in-Kontakteinsätze

Yamaichi Electronics: Y-Circ M – M12-Push-Pull-Steckverbinder

Passive Bauelemente

Würth Elektronik: WRIS RSKS – Schwefelresistente Dick-schichtwiderstände

Texas Instruments: RES60A-Q1 – Single-Chip-Dünnschicht-Widerstandsteiler

Isabellenhütte: WAX-Widerstände

Embedded-Systeme

Kontron: K4021-U mSTX – Industrie-Motherboard

Lauterbach: PowerDebug X51 – Debugging-Tool

Tasking: BlueBox Debugger iC7-Familie – Hardware-Debugger

Halbleiter + IP

Infineon Technologies: PSOC Edge E8x – Mikrocontroller

Nvidia: GB200 NVL72 Supercomputer – Exascale-Computer in einem einzigen Rack

NXP Semiconductors: S32N55 Prozessor

Medical

ams Osram: AS591 – 512-Kanal-Analog-Digital-Wandler für Computertomografen

Sensodrive: Sensojoint – Einbaufertige Kompletantriebe für die Medizinrobotik

STMicroelectronics: ST BrightSense Bildsensor Ökosystem – Plug-and-Play-Hardware-Kits

Mess- und Prüftechnik

Rohde & Schwarz: R&S MXO-5C Serie – Oszilloskop

Keysight Technologies: InfiniiVision HD3-Serie – Oszilloskop

Yokogawa Test and Measurement: AQ7420 – High-Resolution Reflectometer

Power

Infineon Technologies: CoolSiC MOSFET 400 V

Würth Elektronik: DC/DC Wandler mit ultraweitem Eingangsspannungsbereich bis 60V

TDK-Lambda: Kompakte programmierbare 3kW Stromversorgungen für die Industrie

Leserpreise

Unter den Teilnehmern der Leserwahl haben wir fünf Amazon-Gutscheine und drei Bausätze – gestiftet durch Franzis – verlost. Die Gewinner der Leserpreise werden persönlich benachrichtigt.

Elektronik für
Einkäufer.
Ab 1 Stück.

Smart-City-Projekt

KI-gesteuerte Stadtbeleuchtung im Test

Regensburg testet eine neue Generation intelligenter Straßenlampen. Das Konzept setzt auf eine KI-gesteuerte dynamische Lichtverteilung, die sich gezielt an den tatsächlichen Bedarf anpasst und nur dort für Helligkeit sorgt, wo sie benötigt wird.

Im Regensburger Dörnberg-Viertel startet das Projekt Smart Dynamic Public Lighting (SDP) zur intelligenten Stadtbeleuchtung. Das System nutzt KI-gesteuerte Lampen, die sich dynamisch an den Bedarf anpassen, um Energie zu sparen und die Lichtverschmutzung zu reduzieren. Die Testphase läuft mit 20 Parkleuchten entlang der »Radlrouten 5« im Rahmen des Smart-City-Projekts R_NEXT.

Sensoren steuern Lichtintensität

Die Straßenlampen erkennen Fußgänger und Radfahrer in Echtzeit mithilfe optischer Sensoren. Nur wenn sich Personen nähern, wird die Beleuchtung hochgedimmt. Danach reduziert sie sich wieder auf ein Mindestmaß. »Normalerweise leuchten Lampen die ganze Nacht in voller Stärke. Diese Lampen leuchten jedoch nur auf, wenn Personen erkannt werden«, erklärt Wolfgang Sczygiol, Geschäftsführer des Elektrosystemlieferanten SDP. Die Beleuchtung wird bei Bedarf hochgedimmt und dann, sobald die Person wieder weiter entfernt ist, langsam abgedunkelt. Das soll nicht nur den Energiebedarf

gering halten, sondern auch Anwohnende und nachtaktive Insekten schonen.

Testlauf und mögliche Ausweitung

Während der einjährigen Testphase wird das System kontinuierlich evaluiert. Anwohnerückmeldungen fließen in die Weiterentwicklung ein. Nach Abschluss dieser Testphase wird geprüft, ob eine Ausweitung auf andere Stadtgebiete sinnvoll ist. »Bei zukünftigen Entwicklungen können dann zusätzliche Sicherheitsfunktionen wie Informationsanzeigen, Alarmknöpfe oder Anpassungen im Design angegangen werden«, so Anne Häner vom Cluster Mobility & Logistics in der TechBase Regensburg. Die technische Umsetzung übernimmt SDP, während die Stadt Regensburg mit ihrem Garten- und Tiefbauamt als Kooperationspartner beteiligt ist.

Regensburg ist Teil des bundesweit größten Smart-City-Förderprogramms »Modellprojekte Smart Cities«. Damit gehört die Stadt zu insgesamt 73 Experimentierorten der integrierten Stadtentwicklung, die von der Bundesregierung gefördert werden. nw



Bild: swan/stock.adobe.com

Jetzt entdecken!

Elektronikbeschaffung
leicht gemacht!

70.000 sofort verfügbare
Produkte - heute bestellt,
morgen geliefert.

www.buerklin.com

Sicherheit beim autonomen Fahren

Board-to-Board- Verbindung von Steuergeräten

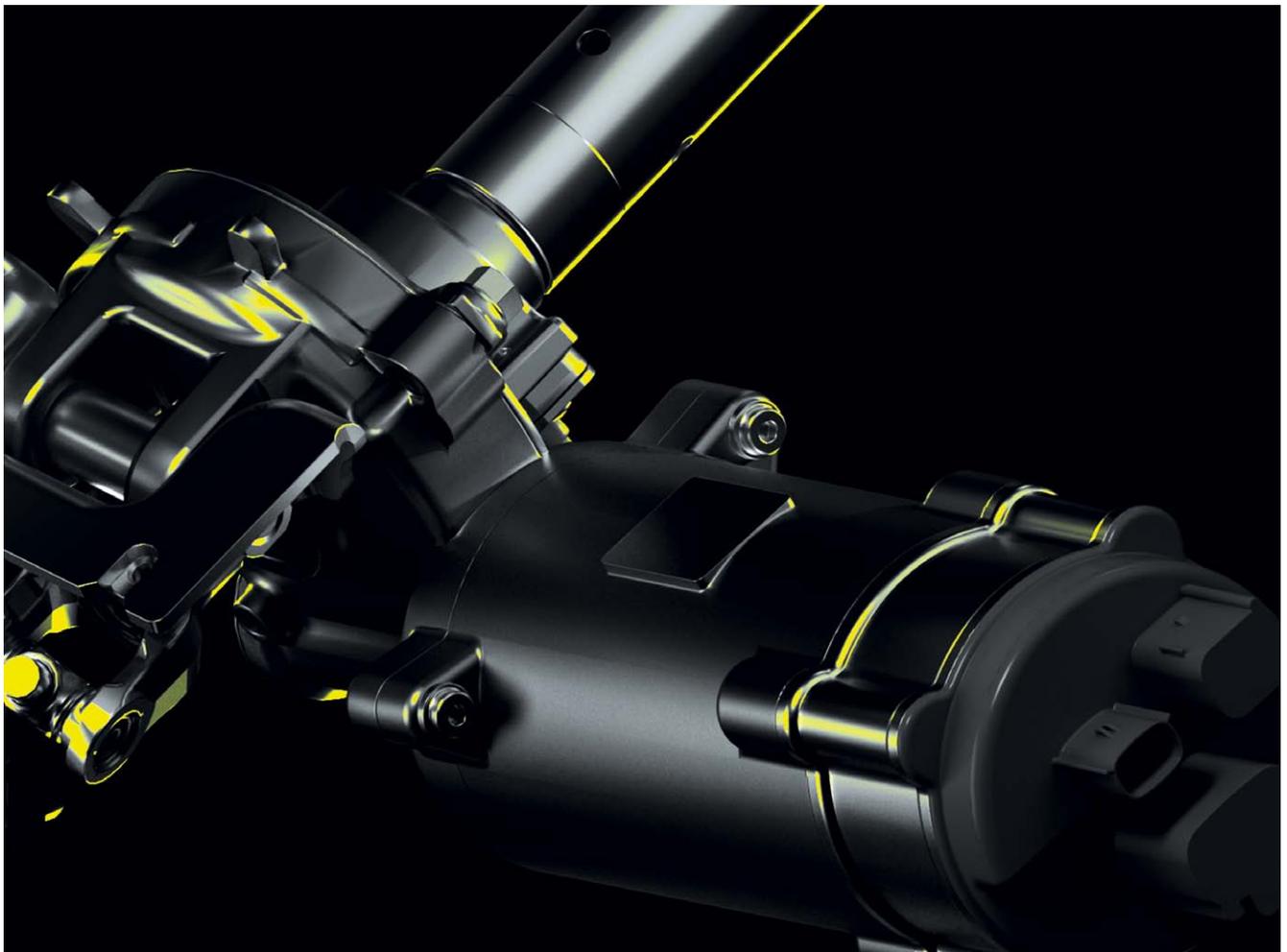


Bild: Ennovi

Der Vormarsch in Richtung höherer Level des autonomen Fahrens erfordert robuste und zuverlässige Lösungen für die Board-to-Board-Verbindung von Steuergeräten. Die traditionellen lötbasierten Verbindungsstrukturen weichen der Einpresstechnik, die eine höhere Haltbarkeit und Signalintegrität verspricht. Von Sohrab Moradi

Die Entwicklung hin zum vollständig autonomen Fahren hat zu einem Anstieg der Anzahl und Vielfalt von Sensoren geführt. Sie werden benötigt, um ein vollständiges und verwertbares Bild der sich dynamisch verändernden Fahrzeugumgebung zu erhalten. Die exponentielle Zunahme der von diesen fortschrittlichen Sensoren erzeugten Datenmenge erfordert eine 10-Gbit/s-Verbindung zum elektronischen Steuergerät (ECU) und ebnete den Weg für die Einführung von Automotive Ethernet.

Aktuelle Steuergeräte basieren in der Regel auf einer einzigen Platine. Um mehr Daten zu verarbeiten, und da die Außenabmessungen des Steuergeräts in x- und y-Richtung festgelegt sind, besteht der einzige Spielraum darin, die z-Achse zu nutzen. Aus diesem Grund erwägen die Entwickler den Einsatz mehrerer Boards – zwei bis drei – innerhalb des Steuergeräts. Für die Kommunikation zwischen diesen Boards benötigen Sie jedoch einen Hochge-

schwindigkeitsstecker von Board zu Board.

Heute befinden wir uns auf Level 2 des eigenen Fahrens, wobei einige Modelle bereits Level 2+ oder sogar Level 2++ erreichen. Bei Level 3 wird die Verantwortung für einen Unfall vom Fahrer auf den Hersteller übertragen. Bei Level 2 liegt die Verantwortung im Falle eines Unfalls beim Fahrer, der beispielsweise nicht rechtzeitig gebremst oder das Fahrzeug nicht rechtzeitig manövriert hat, um einem Hindernis auszuweichen. Bei Level 3 hingegen hat das autonome Fahrsystem die Kontrolle. Sollte es nicht rechtzeitig bremsen oder manövrieren, hat das Auto ein Steuergeräteproblem.

Vorteile der Einpresstechnik

Natürlich kann man eine Standardlösung auf Lötbasis nehmen, von denen es viele auf dem Markt gibt. Bei einer lötbasierten Struktur könnte jedoch die Lötstelle bei Belastung reißen, was

Bild 1. Die Einpresstechnik eliminiert das Risiko von Brüchen und Funktionsstörungen, die bei Lötverbindungen auftreten können.

(Bild: Ennovi)

zu Problemen mit der Signalverbindung führen würde. Eine Einpresstechnik-Lösung hat den Vorteil, dass sie robuster ist als ein Board-to-Board-Steckverbinder auf Lötbasis (**Bild 1**). Auf dem Weg zum autonomen Fahren wird diese Robustheit der Verbindungen zu einem entscheidenden Designkriterium.

Die Beobachtung von Trends in der Datenübertragungsbranche zeigt eine deutliche Präferenz für die Einpresstechnik, insbesondere bei Backplane-Steckverbindern, die mit 112 Gbit/s und



HARWIN

CONNECT TECHNOLOGY WITH CONFIDENCE

WWW.HARWIN.COM

Die Steckverbinder von Harwin haben sich unter extremen Bedingungen bewährt und wurden rigorosen Stoß-, Vibrations- und Temperaturtests unterzogen.

MIT UNSERER QUALITÄT, UNSEREM SERVICE, UNSEREM SUPPORT UND UNSEREN HOCHZUVERLÄSSIGEN PRODUKTEN KÖNNEN SIE SICH AUF HARWIN VERLASSEN.

HRI
RANGE

BBi
RANGE

Ezi
RANGE

Bild 2.

Die mehrreihigen Board-to-Board-Steckverbinder verfügen über eine Einpressstruktur mit besonders zuverlässigen Kontakten und nach IEC 60352-5 und IPC9797 zertifiziert. (Bild: Ennovi)

mehr arbeiten. Die Seltenheit von lötbasierten Backplane-Steckverbindern auf dem Markt ist ein Beweis für die Konsistenz und Effizienz von Einpresssteckverbindern, die für immer dünnere und kürzere Pins ausgelegt sind, um die bestmögliche elektrische Hochgeschwindigkeitsleistung zu erzielen. Bei der Hochgeschwindigkeitsdatenübertragung wird die Präzision immer wichtiger – schon geringe Formabweichungen können die elektrische Leistung beeinträchtigen. Die Form und Länge der Einpressstifte sind präzise, was durch die Einhaltung strenger Fertigungstoleranzen erreicht wird. Wenn diese Stifte auf eine Leiterplatte mit der entsprechenden Lochgröße abgestimmt sind, ergibt sich eine besonders konsistente und zuverlässige Verbindung mit wenig Spielraum für Fehler.

Im Gegensatz dazu kann es bei lötbasierten Verbindungen zu Schwankungen in der Menge des verwendeten Lots kommen, was die Integrität und Leistung der Verbindung beeinträchtigen kann.

Darüber hinaus bedeuten die Kürze und die geringere Kapazität von Einpressstiften im Vergleich zu Lötstiften auf der Leiterplatte, dass Resonanzen reduziert werden. Aus den beiden oben genannten Gründen kann eine höhere Signalintegrität erreicht werden. Darüber hinaus unterstützt eine Einpressstrategie die sozialverträgliche Fertigung mit deutlich geringeren Auswirkungen auf die Umwelt im Vergleich zu Lötverfahren, bei denen während der Montage Lötdämpfe entstehen. OEMs und ihre Tier-1-Partner müssen sicherstellen, dass ihre Konnektivitätslösungen innerhalb des Steuergeräts robust sind, damit es bei der Transformation zum hochautomatisierten Fahren gemäß Level 3 zu keinen Problemen diesbezüglich kommt. Aus diesem Grund nimmt die Dominanz von lötbasierten Verbindungsstrukturen, insbesondere im Steuergerät, sukzessive ab



und der Trend auf dem Markt geht zu Einpresstechnologien wie der mehrreihigen Board-to-Board-Steckverbinderplattform von Ennovi (**Bild 2**).

Diese robuste Standardplattform umfasst Steckverbinder mit Board-Stapelhöhen von 7 mm bis 30 mm, mit ein bis sechs Reihen, von denen jede 4 bis 30 Kontaktanschlüsse haben kann, die den Normen IEC 60352-5 und IPC-9797 entsprechen. Sie bietet Ingenieuren die Flexibilität, die sie für eine kundenspezifische Designstrategie benötigen. Eine optionale Beschichtungstechnologie trägt dazu bei, die Bildung von Zinnwhiskern zu verringern, wodurch das Risiko von Kurzschlüssen verringert und die Lebensdauer der Plattform verlängert wird.

Die Möglichkeit, ausreichend Hochgeschwindigkeits-Verbindungsanschlüsse auf kleinem Raum unterzubringen und dabei dennoch nicht zu viele zu haben, ist eine Priorität und minimiert die Gesamtbetriebskosten. Die aktuelle Plattform basiert auf dem 0,4-mm-Einpressstift, der Datenübertragungsraten von bis zu 10 Gbit/s (5 GHz) ermöglicht und den Spezifikationen der Automobilindustrie entspricht – einschließlich Beständigkeit gegen Feuchtigkeit, Temperaturschwankungen, Vibrationen und mechanische Stöße.

Die Produkt-Roadmap sieht vor, die Plattform auf 0,2-mm-Einpressstifte zu verlagern. Die neue Plattform wird kleiner sein und mehr Daten verarbeiten können. Mit einem noch höheren Level des autonomen Fahrens benö-

tigen die OEMs und Tier-1-Zulieferer höhere Datenübertragungsraten. Derselbe oder ein geringerer Platzbedarf im Steuergerät kann nur durch eine Verkleinerung der Pins erreicht werden, wodurch mehr Pins pro Quadratmillimeter möglich sind und die Datenübertragungsrate erhöht werden kann.

Für eine smarte und sichere Zukunft

Die mehrreihige Board-to-Board-Steckverbinderplattform von Ennovi ist ein Beispiel für den Wandel von traditionellen lötbasierten Strukturen hin zur Einpresstechnik. Sie bietet eine vielseitige und widerstandsfähige Lösung, die den strengen Anforderungen der Automobilindustrie gerecht wird. Mit der Fähigkeit, hohe Datenübertragungsraten zu verarbeiten und eine konsistente elektrische Leistung zu gewährleisten, werden Einpresssteckverbinder zum Eckpfeiler des Steuergerätedesigns auf dem Weg zu Level 3 und darüber hinaus. Die Zukunft der Kfz-Steckverbindungen geht eindeutig in Richtung kleinerer, effizienterer Designs, die den steigenden Datenanforderungen gerecht werden, ohne Kompromisse bei der Zuverlässigkeit oder Sicherheit einzugehen, damit die Fahrzeuge von morgen nicht nur intelligenter, sondern auch sicherer werden. ih



Sohrab Moradi

ist Produktmanager für Einpresstechnologie bei Ennovi. Er verfügt über mehr als zehn Jahre Erfahrung in der Elektronikindustrie und über fünf Jahre Erfahrung im Produktmanagement. Seine Karriere begann er im Bereich Rundsteckverbinder, wo er sich auf das Design elektrischer Komponenten spezialisierte. Inzwischen beschäftigt er sich seit etwa fünf Jahren mit der Einpresstechnologie. Bei Ennovi hat er hierzu ein Produktportfolio aufgebaut, das die Anforderungen des Marktes an Signal- und Leistungsverbindungen erfüllt.

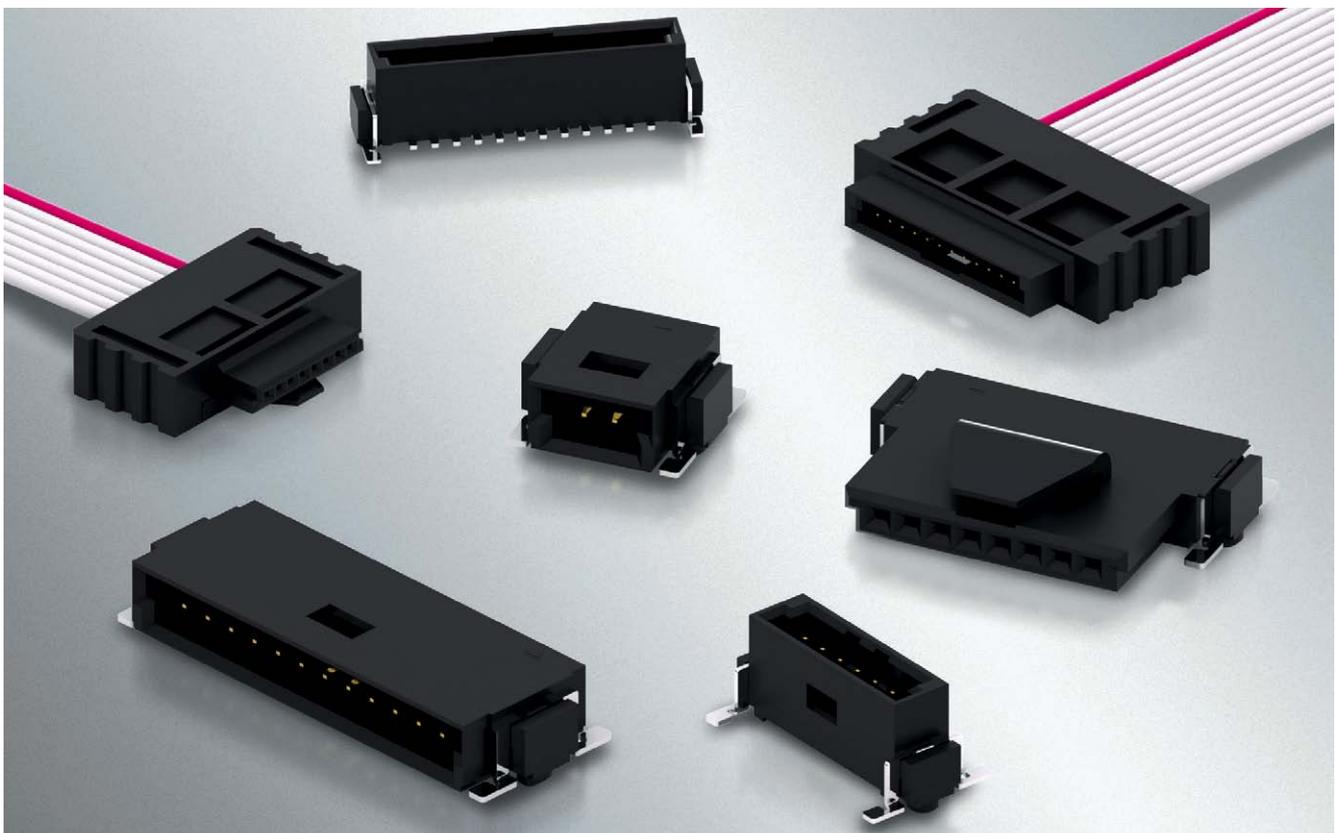
Zukunftsfähige Designs

Sieben Kriterien für die Auswahl von Industrie-Steckverbindern

Die Anforderungen an Steckverbinder in industriellen und Embedded-Systemen haben sich durch den geringeren Platzbedarf, engere Toleranzen und höhere Datenmengen verändert.

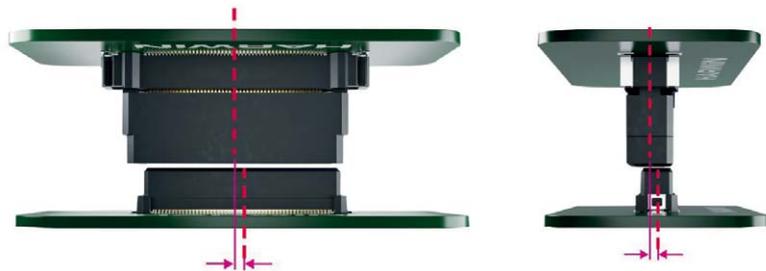
Die Wahl des richtigen Steckers ist daher entscheidend, um auch künftigen Anforderungen gerecht zu werden, ohne dabei das Budget zu sprengen.

Von John Feaster



Die einreihige Kontrol-Serie von Harwin bietet ein verriegelbares Design und ist zwangsgeführt, um Blindstecken zu erleichtern. (Bilder: Harwin)

Eine neue Generation von Floating-Steckverbindern toleriert Fehlausrichtungen, um größere Fertigungstoleranzen in der X- und Y-Achse zu ermöglichen. Dargestellt ist die Flecto-Reihe von Harwin, die eine Fehlausrichtung von bis zu $\pm 0,5\text{ mm}$ unterstützt.



Vibration

In industriellen Umgebungen werden Maschinen in geringeren Abständen zueinander betrieben. Dadurch sind die Überwachungs- und Automatisierungssysteme stärkeren Vibrationen ausgesetzt. Zu beachten ist, dass die Steckverbinder diesen Bedingungen standhalten müssen. Wurden solche Aspekte früher unter Berücksichtigung der Kosten als weniger kritisch angesehen, so rückt Vibrationsfestigkeit mittlerweile in den Vordergrund. Es gibt Steckverbinder mit hoher Zuverlässigkeit (HRI), zum Beispiel die Datamate-Serie von Harwin, die selbst unter extremen Bedingungen einsatzfähig bleiben. Sie liegen jedoch oft außerhalb der Preisspanne der meisten Industrie- und Embedded-Systeme. Das Know-how aus dem Bereich dieser High-Rel-Steckverbinder fließt mittlerweile aber auch in die Entwicklung von Industriesteckern ein. Ein Beispiel ist die Baureihe »Kontrol« von Harwin, die für hohe Vibrationsbelastungen ausgelegt ist und deren Komponenten auf eine zwölfstündige Belastung von 20G getestet werden. Leistungsmerkmale wie ummantelte Stifte und sichere Verriegelungsmechanismen tragen dazu bei, eine sichere Verbindung bei Vibrationen aufrechtzuerhalten.

Dimensionierung

Der Trend zur Miniaturisierung hält an, mit dem Bestreben, mehr Funktionen auf kleinerem Raum unterzubringen. Dies führt zu einer steigenden Nachfrage nach kompakten Steckverbindern mit einem niedrigeren Profil. Darüber hinaus gilt dieser Trend auch für den

Abstand der Steckverbinder. Hier halten die Designmerkmale, die speziell für Highend-Systeme entwickelt wurden, ebenfalls Einzug in industrielle Verbindungen.

Immer filigraner ausgelegte Steckverbinder sind aber nicht die einzige Möglichkeit, um mit der Miniaturisierung Schritt zu halten. Entwickler können auch das Gesamtsystem berücksichtigen, beispielsweise ob sich die Anzahl der erforderlichen Pins reduzieren lässt. Alternativ bieten Steckverbinder mit gemischtem Layout sowie Hybridsteckverbinder eine weitere Option, das Design auf Systemebene zu verkleinern. Hier werden Energieübertragung und Signalkommunikation in einer einzigen Einheit kombiniert und so die Gesamtzahl der erforderlichen Steckverbinder reduziert.

Designkomplexität

Kleinere Steckverbinder mit minimalen Abständen machen eine höhere Genauigkeit bei der Leiterplattenfertigung erforderlich. Daraus kann eine höhere Fehlerquote resultieren, wenn die Steckverbinder nicht perfekt ausgerichtet sind – vor allem, wenn mehrere Steckzyklen durchgeführt werden. Indem die Gesamtzahl der Steckverbinder auf einer Platine reduziert wird, verringert sich auch das Risiko einer Fehlausrichtung eines einzelnen Steckverbinderpaars. Dies erhöht die Toleranz des Designs.

Ein anderer Ansatz, dieses Problem zu lösen, ist der Einsatz schwimmender (Floating) Steckverbinder, die zusätzliche Toleranzen erlauben und gleichzeitig Strom- und Signalübertragung in einer einzigen Einheit kombinieren.

Harwin hat deshalb im vergangenen Jahr die Floating-Steckverbinder der Serie »Flecto« auf den Markt gebracht. Diese Board-to-Board-Verbinder mit feinem Raster und hoher Pinzahl tolerieren Fehlausrichtungen von bis zu $\pm 0,5\text{ mm}$ sowohl in der X- als auch in der Y-Richtung. Sie bieten neben einer schnellen Datenübertragung und gemischten Signal- sowie Stromversorgungsoptionen auch eine erhöhte Ausrichtungstoleranz.

Elektromagnetische Störungen (EMI)

Da Maschinen, Systeme und Geräte in einer Fabrikhalle immer näher beieinander platziert werden und immer mehr (und komplexere) elektronische Systeme in diesen industriellen Umgebungen zum Einsatz kommen, steigt auch das Risiko elektromagnetischer Störungen (EMI). Diese können den Betrieb empfindlicher Elektronik stören und die Signalintegrität beeinträchtigen. Um Systeme zukunftsicher zu gestalten, müssen Entwickler die Umgebung berücksichtigen, in der diese Systeme eingesetzt werden. In störungsbehafteten EMI-Umgebungen müssen folglich Maßnahmen ergriffen werden, um nicht nur die aktuellen, sondern auch zukünftige EMI-Pegel zu senken.

Es kann sein, dass das Layout den Einsatz eines Standard-Board-to-Board-Steckverbinders (zum Beispiel die Serie »Kontrol« von Harwin) zulässt. Entwickler sollten jedoch auch Endgehäuse/Backshells und geflochtene Kabelbaugruppen in Betracht ziehen, um künftigen EMI-Herausforderungen zu begegnen.

Datenraten

Mit dem Aufkommen des industriellen IoT (IIoT) erfordern moderne Anwendungen höhere Datenübertragungsraten. Dieser Trend wird sich fortsetzen und muss berücksichtigt werden – sei es durch den Einsatz von Steckverbindern mit höherer Datenrate oder durch die Edge-Datenverarbeitung, um so die zu übertragende Datenmenge zu reduzieren. Da die erzielte Datenrate auf dem Schaltungslayout und nicht nur auf dem Steckverbinder basiert, muss die angegebene Leistungsfähigkeit eines Steckverbinders im jeweiligen Layout überprüft werden.

Steckzyklen und Haltbarkeit

Wichtig bei der Auslegung des Steckverbinders ist auch die erhöhte Anzahl an Steckzyklen, die viele Steckverbinder jetzt durchlaufen. Indem man die möglichen Steckzyklen berechnet, kann man festlegen, ob ein Standard-Steckverbinder geeignet ist oder ob ein dediziertes HRI-Modell erforderlich ist. Wie bei der Vibrationsfestigkeit finden die für HRI-Serien entwickelten Technologien – mit ihrer hohen Anzahl an Steck- und Trennzyklen – mittlerweile ihren Weg in preisgünstigere Serien. So sind die Kontrol-Steckverbinder von Harwin für 500 Steckzyklen ausgelegt, was für eine industrielle Baureihe sehr hoch ist.

Zuverlässigkeit der Lieferkette

Was die Zuverlässigkeit der Lieferkette betrifft, zeigt sich wieder der Trend zur Vertrauenswürdigkeit des Lieferanten und zur Second Source. In den vergangenen Jahren ist die Zahl gefälschter und minderwertiger Bauteile gestiegen, ebenso wie die Zahl der Websites, auf denen Produkte angeboten und »Bestellungen« für Bestände entgegengenommen werden, die nicht vorhanden sind und auch nie vorhanden sein werden.

Harwin empfiehlt, immer zu überprüfen, ob Beziehungen zwischen den Komponentenherstellern und den Vertriebspartnern tatsächlich bestehen. Wie viele andere Hersteller nutzt das Unternehmen ein Franchise-Vertriebsmodell nach ECIA-Standards, um betrügerische oder gefälschte Teile zu verhindern. Dabei werden Vertriebspartner auf der Website sowie auf TrustedParts.com aufgeführt. cp

John Feaster

ist Product Manager BBI Connectors bei Harwin.



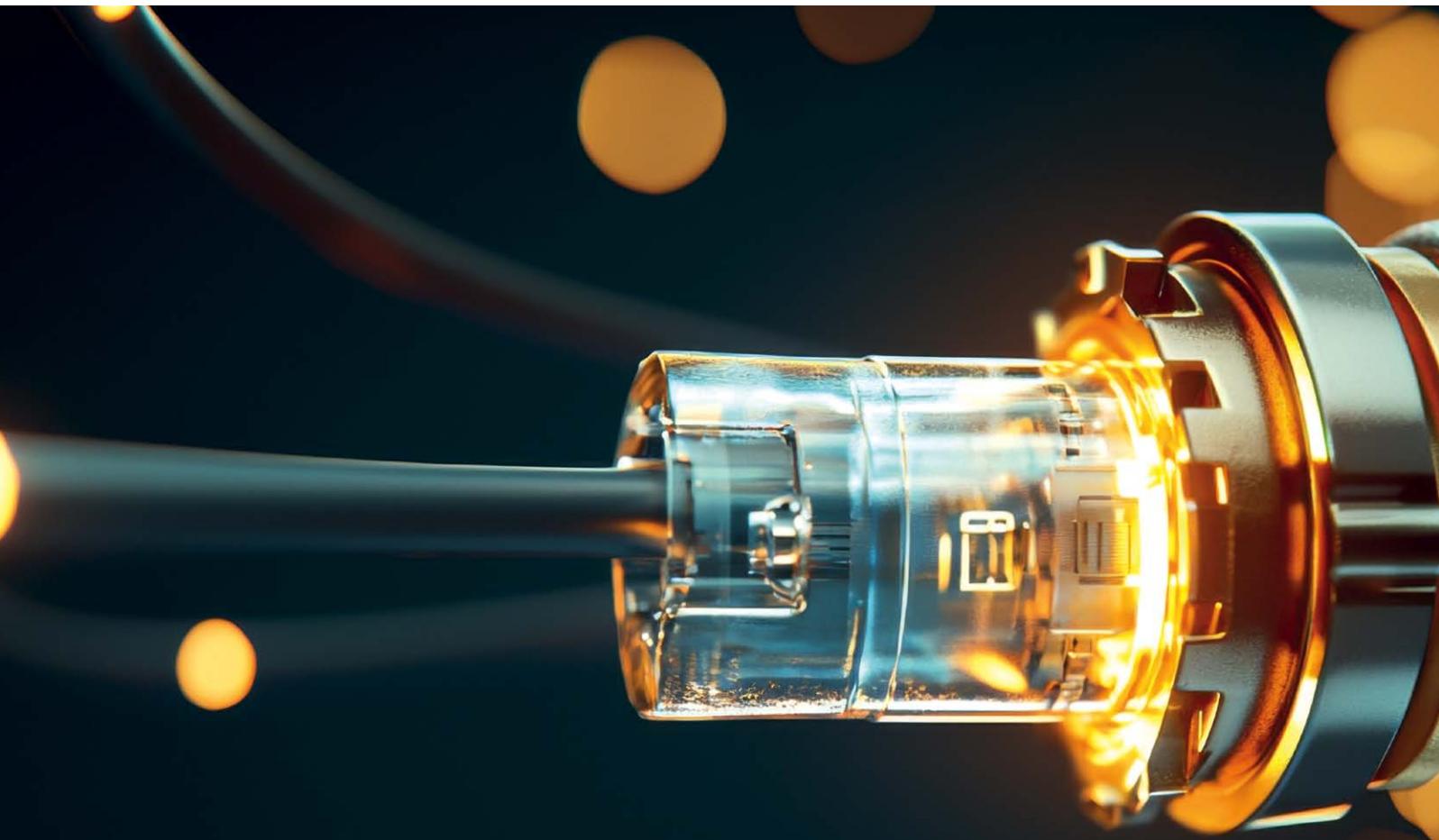
Kundenspezifische Rundsteckverbinder der internationalen Standards M8 und M12

- ✓ Individuelle Längen
- ✓ Offene Kabel-Enden nach Kundenvorgabe bearbeitet
- ✓ Für alle standardmäßigen Codierungen



Merkmale robuster Steckverbinder

Wenn extreme Anforderungen zu erfüllen sind



Immer mehr Anwendungen benötigen robuste Steckverbinder – von der Luftfahrt über die Landwirtschaft bis hin zu industriellen Anwendungen. Doch wodurch unterscheiden sich diese Komponenten? Worauf ist bei der Auswahl zu achten?

Von Rolf Horn

Die Nachfrage nach hochzuverlässigen Steckverbindern entwickelt sich dynamisch. Zunehmend eingesetzt werden diese Komponenten zum Beispiel in der Prozessautomation, in Solar- und Windkraftanlagen, im Bergbau und im industriellen Bereich. Weil viele der heutigen Industrieanwendungen und Militäroperationen auf Echtzeitdaten beruhen, ist eine stabile Datenübertragung in immer mehr Anwendungen unerlässlich.

Die Anforderungen, die an robuste Steckverbinder gestellt werden, sind

dabei vielfältig – und abhängig von der jeweiligen Applikation. Unter anderem auf die folgenden Aspekte ist zu achten:

→ **Hohe Temperaturen:** Militärische Einsätze oder Weltraummissionen erfordern Steckverbinder, die nicht nur extremer Kälte und Hitze standhalten, sondern auch Temperaturwechsel zuverlässig überstehen. Fortschritte in der Verbindungstechnik haben eine Materialzusammensetzung ermöglicht, die solche Bedingungen ohne Leistungseinbußen toleriert.

→ **Leichte Materialien:** In der Luft- und Raumfahrt spielt das Gewicht seit jeher eine wichtige Rolle, da sich jedes Gramm auf die Aerodynamik und den Kraftstoffbedarf auswirkt. Neue Verbundwerkstoffe gewinnen aber auch an Bedeutung, weil immer mehr Steckverbinder in autonomen Fahrssystemen, Elektrofahrzeugen, in der Robotik und in der industriellen Automatisierung zum Einsatz kommen und dort ebenfalls möglichst wenig Gewicht mitbringen dürfen.

→ **Modulare Bauweise:** Der Infrastrukturbedarf ändert sich häufig, und die Geräte und Systeme von heute können schon morgen veraltet sein. In solchen Fällen will man einen kompletten Austausch der Komponenten vermeiden. Modulare Steckverbinder bieten die Möglichkeit, Teile selektiv auszutauschen. Anwender können auch verschiedene Konfigurationen kombinieren, um mehr Flexibilität für individuelle Anforderungen zu gewinnen.

→ **Miniaturisierung:** Die Einführung von Sensoren in einer Vielzahl von Anwendungsfällen einschließlich Automobilsystemen führt zu einem größeren Bedarf an Steckverbindern in verschiedenen Größen. Die Miniaturisierung hilft, kompakte Systeme zu entwickeln, was in einer Vielzahl von Anwendungen, vom Militär bis zur Luft- und Raumfahrt und darüber hinaus, notwendig wird.

Steigende Nachfrage – die Ursachen

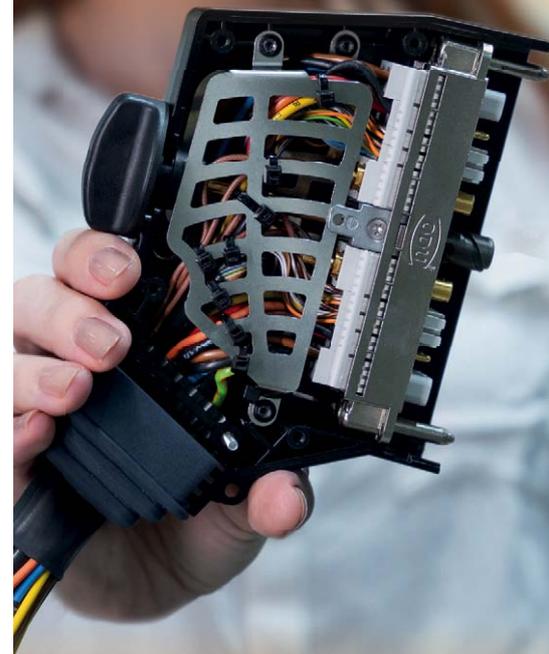
Der wachsende Bedarf nach robusten Steckverbinder-Designs fällt wahr-



Bild: buspro/stock.adobe.com



CABLE MEETS CONNECTOR



Reliable
system solutions
for every requirement



Bild 1.
Steckverbinder TBF10SL-4PS-B
von ITT Cannon mit Bajonettverschluss.
(Bild: ITT Cannon, LLC)

scheinlich mit dem Aufkommen von vernetzten Maschinen in der Industrie zusammen.

Industrielles IoT erfordert eine Datenerfassung von Sensoren, die einer Vielzahl von schwierigen Bedingungen ausgesetzt sein können. Datenverarbeitung und Echtzeitinformationen sind heute die Grundlage zahlreicher Applikationen: Militär, Bahntechnik, Luft- und Raumfahrt, Öl- und Gasindustrie, Landwirtschaft, Fabrikautomation und Robotik. Auch unter schwierigen Umwelt- und Betriebsbedingungen dürfen in diesen Anwendungen Signalintegrität und Übertragungsgeschwindigkeit nicht beeinträchtigt werden.

Eigenschaften und Design von robusten Steckverbindern

Bei der Auswahl der Steckverbinder ist es zu empfehlen, folgende Überlegungen einzubeziehen:

→ **Gewicht des endgültigen Systems:** Das Gewicht kann die Leistung eines Steckverbinders beeinträchtigen, indem es einfach den Druck auf die Enden erhöht und zu Verschleiß führt. Auch bei batteriebetriebenen Systemen wie Robotern oder halb-

autonomen Maschinen spielt das Gewicht eine wichtige Rolle, da die für das Schleppen des zusätzlichen Gewichts erforderliche Energie die Lebensdauer der Batterie verkürzen kann.

Das Gewicht bestimmt das Material des Steckverbindergehäuses. Gehäuse aus leichtem Aluminium verringern das Gesamtgewicht.

→ **Cybersicherheit und Tarnung:** Militärische Operationen erfordern spezielle Abschirmungstechniken in robusten Steckern. Vollmetallgehäuse schützen elektronische Signale und verhindern elektromagnetische Störungen. Für diesen Einsatzbereich bietet beispielsweise die Steckverbinder-Serie CA/5015 von ITT Cannon ein umfangreiches Sortiment an Endgehäusen mit Anschlüssen über Einzeldrähte oder Kabel in geschirmter und ungeschirmter Ausführung.

→ **Form des Steckers:** Steckverbinder gibt es in verschiedenen Formen. Rundsteckverbinder sind die gängigste Variante für die Übertragung von Strom, Signalen und Daten. Die Stifte lassen sich beim Zusammenstecken leichter ausrichten, und das runde Design ermöglicht eine kompakte Abdichtung.

→ **Verriegelung:** Sobald der Stecker zwei Systeme miteinander verbindet, muss er verriegelt werden, damit sich die Verbindung nicht löst. Zu den gebräuchlichsten Verriegelungssystemen gehören ein schraubenähnlicher Kupplungsmechanismus mit Gewinde, der die Verbindung fest an ihrem Platz hält, sowie Druck-Zug-Verbindungen, bei denen sich die Verbindungen durch Drücken verriegeln und durch Ziehen lösen lässt. Steckverbinder wie der TBF10SL-4PS-B von ITT Cannon (Bild 1) verfügen über einen Bajonettmechanismus mit Stiften und Nuten, die mit einer Drehung einrasten. Der Gewindekupplungsmechanismus sorgt für die höchstmögliche Vibrationsfestigkeit, was insbesondere in der Luft- und Raumfahrt sowie bei mili-

tärischen Anwendungen von erheblichem Vorteil ist.

→ **Steckzyklen:** Wiederholtes Ein- und Ausstecken von Geräten kann zur Abnutzung im Stecker führen. Deshalb werden Steckverbinder nach der Anzahl der Steckzyklen bewertet, denen sie standhalten können. Ein zuverlässiger Steckverbinder kann Hunderte solcher Steckzyklen ohne nennenswerte Schäden verarbeiten.

→ **Schutz vor dem Eindringen von Medien:** Wiederholter Kontakt mit Sand oder Wasser kann Verbindungen korrodieren lassen und die Signalübertragung verschlechtern. Extreme Umgebungen erfordern in der Regel Steckverbinder mit einer Schutzart von IP68 oder höher.

Ein Beispiel für robuste Verbindungstechnik sind die Steckverbinder der Serie CA/5015 von ITT Cannon. Sie erfüllen die Norm MIL-DTL-5015, eignen sich aber auch für Anwendungen im Schienenverkehr, der Luft- und Raumfahrt, Industrie sowie in Fabrikautomation und Robotik.

Die Serie bietet fünf verschiedene Polarisierungen, mit denen der Benutzer sicherstellen kann, dass die Komponenten immer in der richtigen Ausrichtung gesteckt sind, um eine Beschädigung der Elektronik zu vermeiden. Die Steckverbinder sind mit einer Vielzahl von Beschichtungen erhältlich: Cadmium, Zinn-Zink (J-Beschichtung), Zink-Nickel-Blau, Zink-Kobalt-Schwarz und Nickel-Kompositionen. cp



Rolf Horn

arbeitet als Applikationsingenieur bei DigiKey Electronics und ist seit 2014 in der europäischen technischen Support-Gruppe tätig. In erster Linie ist er für die Beantwortung von entwicklungs- und ingenieurtechnischen Fragen aller Art von Endkunden und für das Schreiben und Korrekturlesen von deutschen Artikeln und Blogs auf den Plattformen TechForum und maker.io von DigiKey zuständig.

Board-to-Board-Steckverbinder

Design für Hochgeschwindigkeits-Signalstrecken



Board-to-Board-Steckverbinder.
(Bild: Würth Elektronik eiSos)

In Elektronikanwendungen, insbesondere bei mobilen Endgeräten, nimmt die Miniaturisierung der Komponenten und die Erhöhung der Signalgeschwindigkeit immer mehr zu. Damit wächst die Komplexität der Signalübertragung.

Von Baptiste Bouix

Die Signalfade in Computersystemen durchlaufen in der Regel die I/O- sowie Speicherbusse des Hauptprozessors. Diese Signalkomponenten umfassen Speicherkanäle wie DDR-RAM für den Zugriff auf den Hauptspeicher und I/O-Kanäle für die Kommunikation mit Peripheriegeräten. Die I/O-Kanäle ermöglichen die Kommunikation mit verschiedenen externen Geräten und Schnittstellen wie USB, SATA für Fest-

platten und SSDs, Ethernet, Audioanschlüsse usw.

Die steigende Komponentendichte hat dazu geführt, dass Erweiterungsplatten vermehrt genutzt werden, um zusätzliche Peripheriefunktionen in Geräte zu integrieren. Das hat direkte Auswirkungen auf die Verkleinerung und die Erhöhung der Signalgeschwindigkeiten von High-Density-Board-to-Board-Steckverbindern. Zwar sind Stiftleisten immer

noch die gängigsten Board-to-Board-Steckverbinder, denn sie bieten aufgrund ihres größeren Rastermaßes eine zuverlässige Spannungsversorgung, doch sie unterstützen nur moderate Signalgeschwindigkeiten. Für anspruchsvollere Anwendungen in komplexen digitalen Signalfaden werden vermehrt High-Density Board-to-Board-Steckverbinder eingesetzt. Dabei sind unterschiedliche Faktoren zu berücksichtigen.

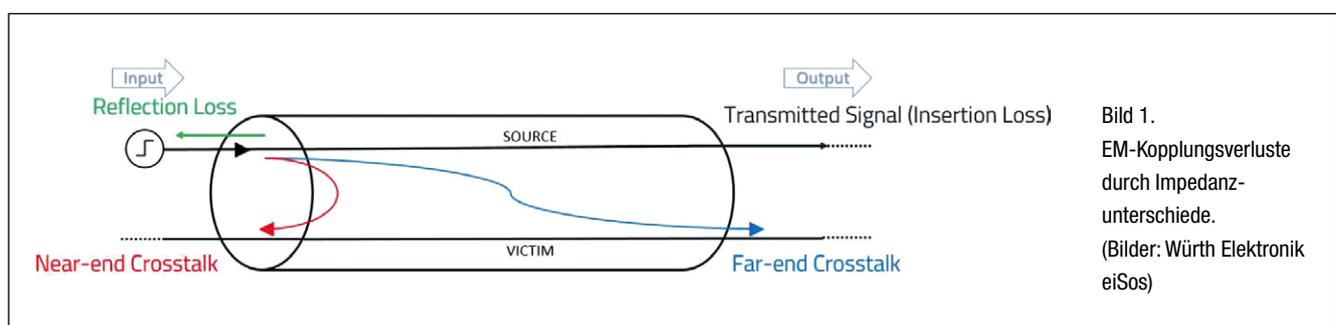


Bild 1.
EM-Kopplungsverluste durch Impedanzunterschiede.
(Bilder: Würth Elektronik eiSos)

Elektromagnetische Kopplung

Was sind die Folgen der elektromagnetischen Kopplung in Übertragungsleitungen und Steckern? Die elektromagnetische Kopplung zwischen Leitern ist verantwortlich für die Impedanz, die eine Verallgemeinerung des Widerstands für Wechselströme darstellt. Die Impedanz wiederum führt zu einem gewissen Signalverlust. Zusätzlich verursachen Leckströme in benachbarten Leitern, wie naheliegende Pins, Kabel oder Signalleitungen in Leiterplatten, Verluste.

Des Weiteren können Impedanzunterschiede entlang der gesamten Übertragungsstrecke zu Signalreflexionen und weiteren Verlusten führen (Bild 1). Die Einfügedämpfung ergibt sich somit aus der Summe aller frequenzabhängigen Verluste und der zusätzlichen Dämpfung entlang der gesamten Übertragungsleitung.

Kopplungsverluste durch Impedanzunterschiede

Da eine (PCB)-Übertragungsleitung, einschließlich der Steckverbinder, niemals perfekt sein wird, ist es höchstwahrscheinlich, dass die Einfügedämpfung je nach Frequenz der Übertragungsstrecke wie eine komplexe Kombination schwacher Tiefpassfilter aus L- und C-Komponenten erscheint (Bild 2).

Gemessene Einfügedämpfung für ZIF-Stecker

Die physikalische Eigenschaft von L- und C-Komponenten besteht darin, Spannungsänderungen zu widerstehen, nicht jedoch bestimmte Frequenzen selektiv zu reduzieren. In einem Augendiagramm (Bild 3) bei niedrigen Frequenzen ist deutlich zu erkennen, dass verlustbehaftete Verbindungskomponenten (FFC-Kabel mit kleinem Rastermaß) einen exponentiellen Verlauf mit sinusähnlichen Unregelmäßigkeiten bewirken, während ein perfekter Tiefpassfilter ein symmetrisches Auge ohne den exponentiellen Abfall ergeben hätte.

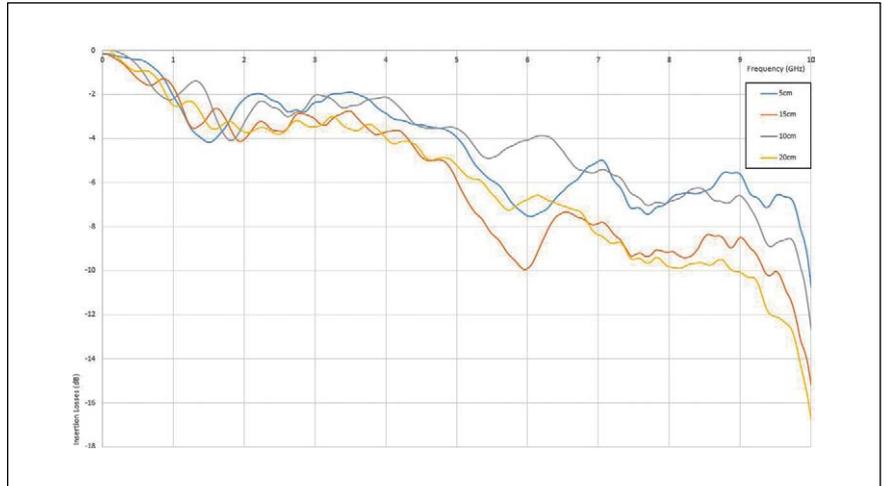


Bild 2. Gemessene Einfügedämpfung für ZIF-Steckverbinder.

Dies bedeutet jedoch, dass die Übertragungsleitung limitierenden Faktoren unterliegt: Ist die Signalfrequenz zu hoch, wird die Anstiegszeit im Vergleich zur Symbolrate zu hoch, und es droht, die fundamentale Sinuswelle (die Sinuswelle mit der Nyquist-Frequenz) zu verlieren. Der Jitter explodiert, und das Signal wird für den Empfängerchip unlesbar, wie in Bild 4 dargestellt. Im Allgemeinen benötigen Empfängerchips Signale, die den Spezifikationen für Anstiegszeit, Schwellenwert und Schwellenzeit entsprechen.

Die Anforderungen an die Signalstrecken

Die meisten High-Speed-Signalprotokolle enthalten auch Anforderungen an die Übertragungsstrecke. Es existieren allerdings keine einheitlichen Regeln für diese Normen. Protokollstandards definieren immer die Art der Signalisierung (single ended oder differentiell) und geben manchmal die Leitungsimpedanz ganz oder teilweise an. USB

erfordert eine differentielle Impedanz von 90 Ohm für die Leitung. HDMI-Anschlüsse haben 100±15 Ohm. Bei PCI-Express-Sendern und -Empfängern kann die Impedanz zwischen 85 Ohm und 120 Ohm liegen, wobei dieser Spielraum unter Entwicklern teils zu hitzigen Debatten führt.

Um ein Beispiel zu nennen: Betrachtet man den PCIe-Standard von Generation 3.0 bis 5.0, so beträgt der zulässige Gesamtverlust des Signalpfads vom Senderchip zum Empfängerchip 22 dB bis hin zu 36 dB. Schlüsselst man nun die verschiedenen Komponenten in der gesamten Übertragungsstrecke nach Verlusten auf (CPU, Hauptplatine, Board Edge Connector und Unter- oder Erweiterungsplatine), beträgt die zulässige Einfügedämpfung des Steckers selbst nur 1,7 dB bis 1,5 dB bei der differentiellen Signalübertragung für Frequenzen von 4 GHz bis 16 GHz (Bild 5).

Wenn die CPU direkt auf die Leiterplatte gelötet wird und keinen Sockel hat, entfallen erhebliche Verluste.

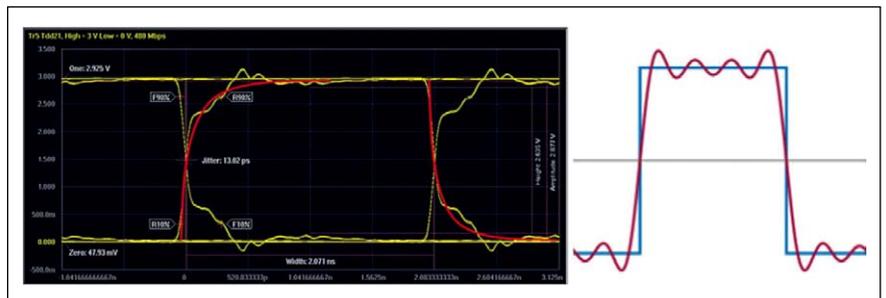


Bild 3. Reale kopplungsbedingte Verschleifung des Rechtecksignals bei 480 Mbit/s (links) vs. gefiltertes Rechtecksignal fünfter Ordnung (rechts).

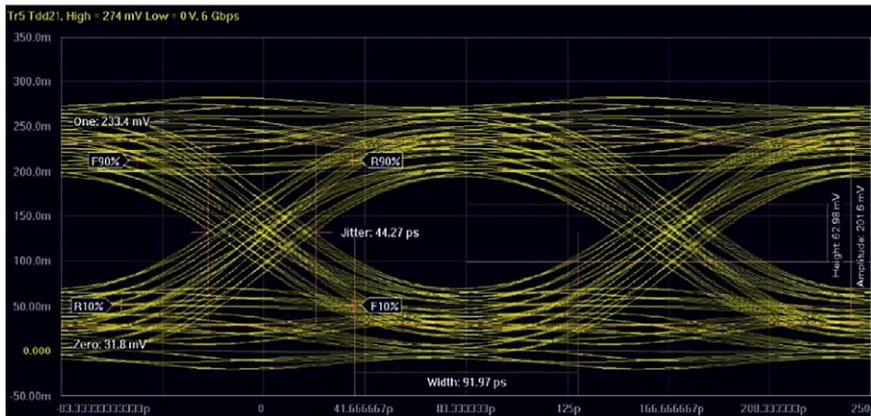


Bild 4. Echte kopplungsbedingte Rechtecksignalverzerrung bei 6000 Mbit/s.

Durch sorgfältiges Design lassen sich auch die Verluste für die Hauptplatine sowie für Unter- und Erweiterungsplatinen reduzieren. Dadurch können die erlaubten Verluste für den Steckverbinder deutlich größer werden. Ein Steckverbinder, der in einer Desktop-CPU- oder Serverkonfiguration nicht in das PCIe-Verlustbudget passen würde, kann mit einer kundenspezifischen Platine durchaus kompatibel sein.

Ein Beispiel: Das Protokoll für einen USB 3.2 Gen 2 weist einen Budgetverlust von 24,5 dB von Chip zu Chip bei 5 GHz auf. Wenn es als I/O-Protokoll verwendet wird, nutzt dieses Budget von den A- oder C-Steckern sowie das Kabel. Bei Verwendung einer Erweiterungsplatine mit einer Board-to-Board-Verbindung (BTB) zur Hauptplatine wird das Budget für die BTB-Steckerverluste vom Budget für die USB-Steckerverluste abgezogen.

Hingegen, wenn das High-Speed Inter-Chip-Protokoll ohne andere Kompo-

nenten als den BTB-Stecker zwischen dem Sender- und dem Empfängerchip verwendet wird, beträgt das Verlustbudget volle 24,5 dB bei 5 GHz. Das ist viel angenehmer für den Steckverbinder.

Die Frage nach der Kompatibilität mit einem Standard ist also alles andere als trivial. Üblicherweise geben die Hersteller an, ob bestimmte gängige Protokolle wie PCIe oder SAS verwendet werden können. Diese Informationen beruhen häufig auf Feldtests und/oder Augendiagrammtests. Sie sind zwar interessant, bieten aber keine weiteren Informationen und unterliegen den Vorbehalten und dem Testaufbau, wie in den vorangegangenen Abschnitten beschrieben.

Verschiedene Wege führen zum Ziel

Ein pragmatischer Ansatz wäre es, die spezifische Höhe und die damit verbun-

dene maximale Abtastrate/Bandbreite bei einem bestimmten Verlustniveau anzugeben, damit Kunden sie mit Normen in Verbindung bringen können. Allerdings ist zu beachten, dass dieser Ansatz stark von den Testbedingungen abhängt, was für Kunden irreführend sein kann. Daher sollte dies von Anwendungsingenieuren gehandhabt werden.

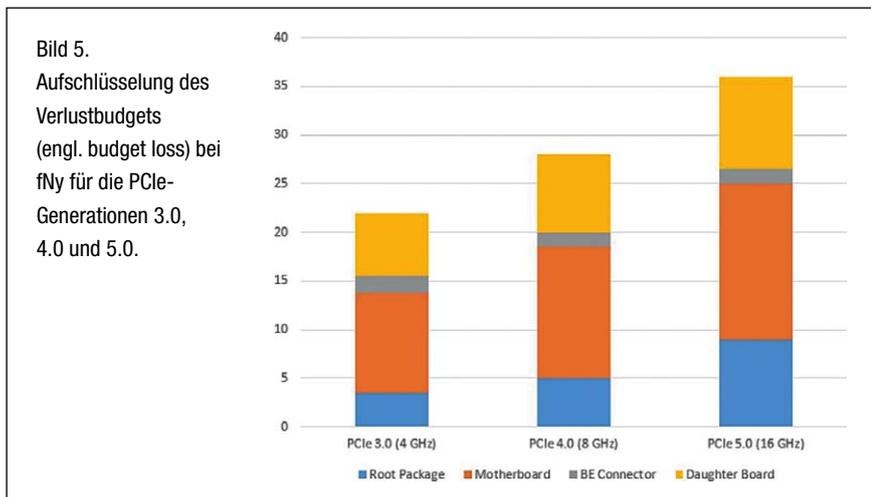
Hersteller wie Würth Elektronik stellen kostenlos zusätzliche Dokumentationen – wie Application Notes oder Leitfäden – einschließlich Verlustdiagrammen zur Verfügung.

Allerdings können Board-to-Board-Verbinder mit Leiterbahnen unterschiedlicher Impedanz verwendet werden, was die effektiven Verluste auf den Kundenplatinen beeinflussen würde. Darüber hinaus sollten verschiedene Topologien wie differentielle und Single-ended-Leitungen sowie Optionen für verschiedene Board-to-Board-Abstände zum Einsatz kommen. Hierbei handelt es sich jedoch um eine große Menge an Informationen, die zusammengetragen und berücksichtigt werden müssen, und die für manche Kunden möglicherweise unklar oder irreführend sein können.

Fazit

Hochfrequenzsignalisierung ist ein äußerst komplexes Thema, selbst für vergleichsweise einfache Komponenten wie Steckverbinder. Einige Kunden haben genug Zeit und Know-how, um die gesamte Signalstrecke von Chip zu Chip zu simulieren, wenn der Hersteller ihnen ein geeignetes 3D-Modell zur Verfügung stellt. Andere wiederum stützen sich auf weniger präzise Methoden, wie allgemeines Know-how, oder sie verlassen sich rein auf Normen.

cp



Baptiste Bouix

ist Product Manager International bei Würth Elektronik France.

Langfristige Leistungsfähigkeit von Steckverbindern garantieren

Test-to-Failure für mehr Zuverlässigkeit

In einer Welt mit immer komplexeren Fahrzeugen spiegelt das Testen von Komponenten nach allgemeinen Spezifikationen möglicherweise nicht mehr die realen Anwendungsfälle wider.

Wie trägt Test-to-Failure dazu bei, dass Komponenten zuverlässig funktionieren – und zwar wann und wo sie am dringendsten benötigt werden? Von Ahmed Abou Gharam



»Design for Reliability« erfordert eine Neubewertung traditioneller Testmethoden und innovative Modelle zur Vorhersage der Zuverlässigkeit. (Bild: Molex)

Für Fahrzeugentwickler bringt jede neue Funktion und Architektur eine Reihe einzigartiger Herausforderungen mit sich, insbesondere wenn mehrere solcher Fortschritte gleichzeitig erfolgen. So verfügen Elektrofahrzeuge und Fahrzeuge mit fortschrittlichen Fahrerassistenzsystemen über deutlich komplexere elektrische Systeme und Sensoren als herkömmliche Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor. Sie erfordern neue Ansätze für das Wärmemanagement, einen stärkeren Fokus auf die Batteriesicherheit sowie funk-

tionale Sicherheit für elektrische Lenkung und Bremsen. Herausforderungen wie diese werden mit neuen Funktionen in Elektrofahrzeugen, zunehmend interaktiven Infotainmentsystemen, der kontinuierlichen Weiterentwicklung von Fahrerassistenzsystemen und der Weiterentwicklung des vollständigen autonomen Fahrens noch weiter steigen.

Mit zunehmender Komplexität der elektrischen Fahrzeugsysteme steigen auch die Anforderungen an die Leistung der verwendeten Komponenten. So können

einige Steckverbinder in Elektrofahrzeugen nicht nur während der Fahrt, sondern auch während des Ladevorgangs nahezu im Dauerbetrieb sein und müssen so konzipiert sein, dass sie diesen zusätzlichen Betriebsbedingungen standhalten.

Die Fahrzeuge von heute und morgen verlangen von Komponentenherstellern wie Molex sicherzustellen, dass die Teile den Standards sowie den gesetzlichen Anforderungen entsprechen und während der gesamten Lebensdauer des Fahrzeugs zuverlässig funktionieren. »Design for Reliability« (DFR) erfordert einen grundlegenden Wandel, der eine Neubewertung traditioneller Testmethoden und innovative Modelle zur Vorhersage der Zuverlässigkeit einschließt. Künstliche Intelligenz (KI) und maschinelles Lernen (ML) helfen dabei, Designs für reale Bedingungen zu optimieren – bis hinunter auf die Komponentenebene.

Von Test-to-Pass zu Test-to-Failure

Obwohl die Funktion von Fahrzeugen immer komplexer wird, arbeiten viele Hersteller daran, die Komponenten zu vereinfachen und nach Einzellösungen zu suchen, die an verschiedenen

Stellen mit unterschiedlichen Belastungsbedingungen oder Arbeitszyklen eingesetzt werden können. Molex konstruiert seine Steckverbinder deshalb so, dass sie größeren Hitze-, Vibrations-, Eindring-, Korrosions- und anderen Einflüssen standhalten. Dazu müssen jedoch die Konstruktionsstärke für einen zuverlässigen Betrieb ermittelt und das traditionelle Test-to-Pass-Modell auf Test-to-Failure umgestellt werden.

Test-to-Pass ist zwar die historische Norm, sagt aber nur aus, ob die Testkriterien erfüllt sind oder nicht. Es misst weder, wie groß die Abweichungen sind, noch den Sicherheitsfaktor beim Bestehen. Im Gegensatz dazu bestimmt Test-to-Failure die Sicherheitsmargen oder die Differenz zwischen den Designgrenzen, beispielsweise der Produktfestigkeit, und den Akzeptanzkriterien der Spezifikation.

Dieser Ansatz ist nicht nur im Transportwesen zu finden; er spiegelt die Herausforderung wider, mit der Entwickler konfrontiert sind, wenn komplexere, funktionsreichere Erwartungen zu berücksichtigen sind. In der kürzlich durchgeführten Molex Reliability and Hardware Design Survey unter mehr als 750 Entwicklern und Systemarchitekten gaben 86 Prozent der Befragten an, dass sie neue Produkte so entwerfen, dass sie entweder die aktuellen Anforderungen übertreffen oder über die aktuellen Anforderungen hinaus mögliche zukünftige Anforderungen erfüllen.

Mit Test-to-Fail an die Grenzen gehen

Wie treibt Molex also diesen Übergang zu praxisnahen Zuverlässigkeitstests voran? Beschleunigte Lebensdauertests (ALT; Accelerated Life Testing) sind eine branchenübergreifende Methode, um die Lebensdauer eines Produkts im Feld zu simulieren. Das Produkt wird dabei über einen verkürzten Zeitraum extremen Umgebungs- und Nutzungsbedingungen ausgesetzt. Anschließend wird festgestellt, ob es die Spezifikationen noch erfüllt. Diese Belastungen können Belastungen sein, die über

alltägliche Anwendungsfälle hinausgehen, zum Beispiel starke Vibrationen oder hohe Temperaturen oder beschleunigte Nutzungsraten wie das wiederholte Anschließen und Trennen eines Steckers. Zu beachten ist jedoch, dass ALT keine ideale Teststrategie ist und bei unsachgemäßer Anwendung zu Unter- oder Überdimensionierung führen kann.

Test-to-Failure sorgt für ein genaueres Verständnis der Produktfestigkeit im Verhältnis zur Belastung im Feld, da die Komponente bis zum Versagen belastet wird. Die Daten können auch zur Entwicklung des ALT-Beschleunigungsfaktors verwendet werden. Durch Test-to-Failure-Methoden können Entwickler ein Produkt optimieren, ohne es überzudimensionieren, und gleichzeitig sicherstellen, dass es die Leistungs- und Zuverlässigkeitsanforderungen erfüllt.

Molex verwendet die Test-to-Failure-Methode, um besser zu verstehen, wie gut die Produkte des Unternehmens realen Umgebungen standhalten. Aktuelle und zukünftige Produktdesigns lassen sich so verbessern, und wir vermitteln unseren Kunden Vertrauen. Dabei misst Molex nicht nur die Leistungsfähigkeit eines physischen Produkts oder Prototyps, sondern stellt auch Prognosen über die Zuverlässigkeit während des gesamten Produktentwicklungszyklus.

Vorhersagemodelle mit Test-to-Failure-Daten trainieren

Vorausschauende Entwicklung und digitale Zwillinge haben im Fahrzeugbau schon lange ihren Platz, aber Molex wendet diese Methoden jetzt auch auf Komponentenebene an. Dabei werden Daten verwendet, die durch umfangreiche Produkttests, zum Beispiel Test-to-Failure, erfasst und durch POF-Modelle untermauert werden.

Sowohl den Kunden als auch Molex bietet diese Vorgehensweise mehrere Vorteile, darunter:

→ Produkte sind nachweislich in der Lage, den anspruchsvollen Bedingungen standzuhalten – mit den unterstützenden Daten als Beweis.

→ Die Prototyp- und Testphase kann einfacher, kostengünstiger, kollaborativer und sogar experimenteller sein, wodurch sich virtuelle Prototypen vor dem physischen Prototyping verbessern lassen.

Besser noch: Die KI- und ML-Modelle, die diese Methoden unterstützen, werden kontinuierlich mit den neuesten Produkttestergebnissen trainiert, was sie mit der Zeit immer leistungsfähiger und genauer macht. Eine solche Modellierung erlaubt eine breitere Anwendung über ein weites Anwendungsspektrum hinweg.

Die nächste Generation von Zuverlässigkeitstests

Als Anbieter von Verbindungslösungen für das Transportwesen kombiniert Molex ein umfangreiches Produktangebot mit einem breiten Spektrum an interdisziplinärem Fachwissen – von der Entwicklung über das Prototyping bis hin zu Tests. Die langjährige Erfahrung des Unternehmens mit Test-to-Failure-, ALT- und anderen Design-for-Reliability-Methoden hat den Grundstein für den beschriebenen innovativen und vorausschauenden Ansatz gelegt. Die Kunden erhalten dadurch Daten, die sie für eine fundiertere Entscheidungsfindung und größeres Vertrauen in die langfristige Zuverlässigkeit der Produkte benötigen. ih

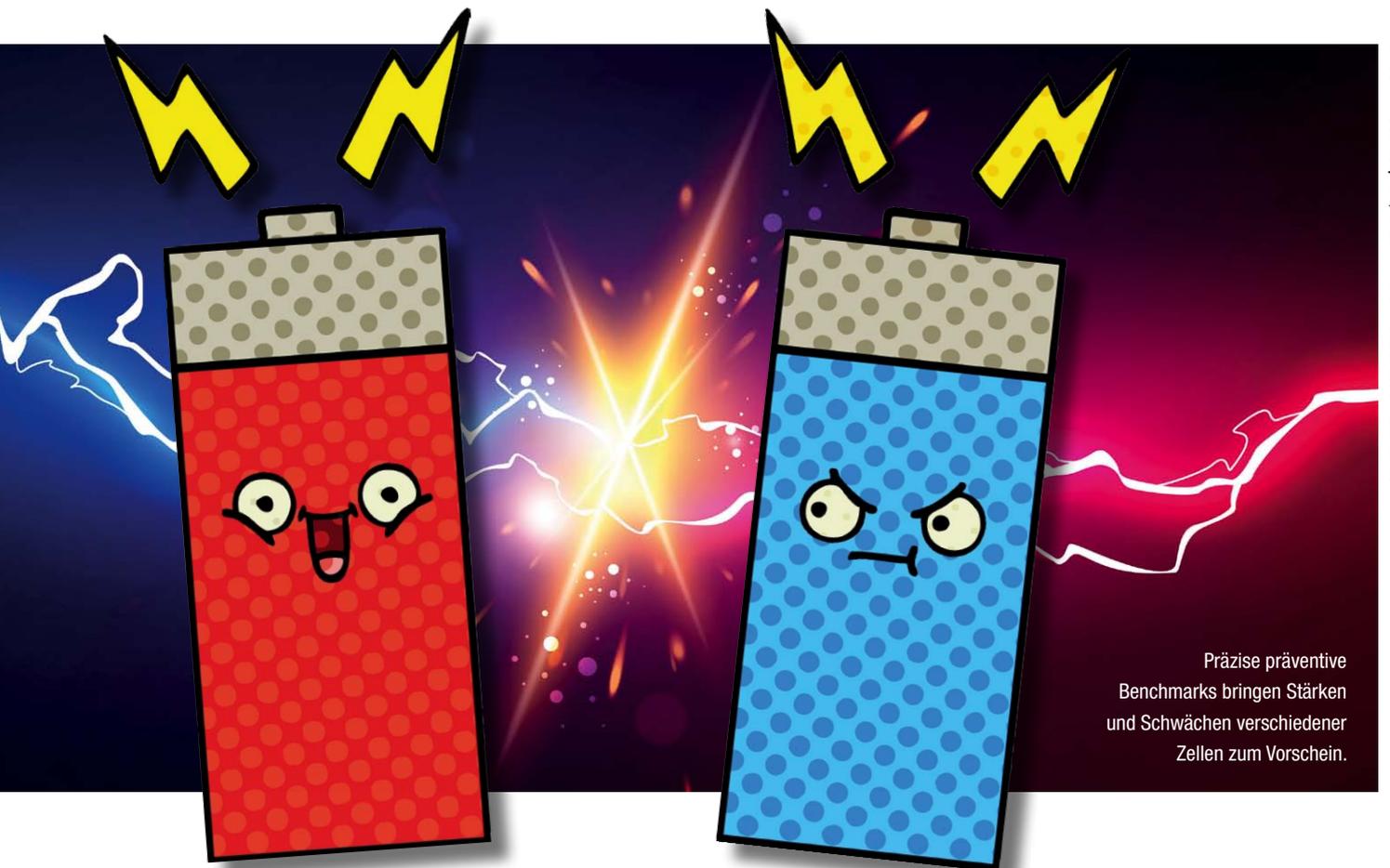


Ahmed Abou Gharam

ist Design for Reliability Director bei Molex. In dieser Position leitet er ein multidisziplinäres Ingenieur-Team. Die Gruppe konzentriert sich auf die Entwicklung von Zuverlässigkeitsprüfungen und Validierungsstrategien, um sicherstellen zu können, dass die Produkte in puncto Zuverlässigkeit, Leistungsfähigkeit sowie in Übereinstimmung mit den gängigen Normen funktionieren. Vor seiner Tätigkeit bei Molex arbeitete er für Unternehmen wie die Litens Automotive Group und General Motors.

Ansmann stellt Zellvergleiche an, die nicht hinken

Batterielabor für die gezielte Zellauswahl



Bilder: lineartspilot; Black White Mouse/stock.adobe.com

Präzise präventive
Benchmarks bringen Stärken
und Schwächen verschiedener
Zellen zum Vorschein.

Zelltesting und präventive Zellqualifizierung, wie sie das neue Ansmann-Batterielabor zum Aufbau seiner umfangreichen, auch ungewöhnliche Zellarten umfassenden herstellerneutralen Zelldatenbank praktiziert, ist kein Selbstzweck. Erklärtes Ziel ist es, die Lebensdauer und Leistungsfähigkeit von Akkupacks und Akkusystemen kontinuierlich zu verbessern, um die Bedürfnisse der Kunden optimal zu erfüllen.

Von Stefan Ehrler und Miriam Leunissen

Mehr als 400 unterschiedliche Zellen – über 300 Rundzellenarten, 60 prismatische und 40 sonstige – erfasst die Ansmann-Zelldatenbank derzeit, qualifiziert und vermessen im neuen Batterielabor. Ziel ist die optimierte Beratung der Kunden des Unternehmens bei neuen Akkulösungen. Denn bekanntermaßen hat jede Akkuanwendung ein sehr spezifisches Anforderungsprofil, für das die üblichen Standardzellen häufig nicht die beste Wahl sind.

Aus diesem Grund variiert Ansmann auch sehr stark bei den Herstellern. Neben den weltbekannten koreanischen und chinesischen Zellherstellern sind mit Murata, Eve, BAK, Great Power, Haidi und anderen europäische und internationale Hersteller im Portfolio, die sonst eher wenig Aufmerksamkeit erhalten und selten in die Auswahl geeigneter Akkuzellen einbezogen werden. Darunter eine ganze Reihe von Zellen, von denen aufgrund besonders herausragender Eigenschaften und Messergebnisse genau ein Zelltyp des jeweiligen Herstellers in die Ansmann-Zelldatenbank aufgenommen wurde.

Systematisch ist ein Expertenteam von Ansmann darum weltweit auf der Suche nach immer neuen Zelltypen und testet sie auch auf ungewöhnliche Parameter. Warum aber hat sich das Unternehmen entschlossen, in Form eines »Batterielabors« so massiv in die Bereiche Zellvermessung und -benchmarking zu investieren und stetig auszubauen? Im Grunde liegt die Antwort auf der Hand: So nimmt die Anzahl der Zellformate stetig zu. Überdies steigt die Zahl der Zellchemien und der Zellhersteller. Damit wird die Frage, welche Zelle sich am besten für welche Anwendung eignet, immer komplexer und schwerer zu beantworten. Hinzu kommt, dass die Datenblätter der Zellhersteller häufig nur einen begrenzten Teil der Wahrheit verraten, und das nur unter Idealbedingungen. Präventive, systematische Messreihen – auch über Monate hinweg und auch nach dem Zellausfall – schaffen dagegen Klarheit über die Eignung eines Zelltyps für spezifische aktuelle und kommende Anwendungen.

Die Verwendung ungeeigneter Zellen kann sich sehr negativ auf die Leistung und die Lebensdauer eines Akkupacks auswirken. So führt die überdurchschnittliche Alterung der Zellen in einer Anwendung dazu, dass die Kapazität und die Lebensdauer des Akkupacks schneller als erwartet abnehmen, was beim Endkunden des Kunden zu Reklamationen führen kann. Denn altert die Zelle vorzeitig, erhöht sich unter anderem ihr Innenwiderstand zu stark. Ihr Wirkungsgrad und ihre Leistungsfähigkeit in der Anwendung nehmen frühzeitig ab. Was immer die kritischen Auswahlkriterien waren, sei es Stromabgabemöglichkeit, Beschleunigung oder anderes: Die Performance des Akkupacks wird beeinträchtigt.

Damoklesschwert Zellaalterung und Zellausfall

Vergleichbar und kaum weniger wichtig für die durchschnittliche Performance einer Geräteserie beim Endkunden ist das Problem der ungleichmäßigen Alterung in einem Akkupack: Wenn die Zellen innerhalb des Packs ungleichmäßig altern, kann auch dies zu einer unvorhersehbar verkürzten Lebensdauer führen und den vorzeitigen Austausch des Akkupacks erforderlich machen. Häufige Praxis ist dies im medizinischen Bereich. Akkupacks haben dort ein »Best before«-Datum mit üppigem Sicherheitspuffer, um Sicherheit und Zuverlässigkeit zu gewährleisten. Durch die Verwendung optimaler Zellen mit – auch in kritischen

Situationen – gut bekanntem Verhalten kann dieses Datum deutlich nach hinten geschoben und damit Austauschkosten gespart werden. Ähnliches gilt für die radikale Reduktion der Wahrscheinlichkeit eines Komplettausfalls von Zellen innerhalb eines Packs. Auch dafür ist die gute Kenntnis des jeweiligen Zellverhaltens Voraussetzung.

Fakt ist: Wenn elektrisch betriebene Geräte wegen Schwächen des Akkupacks nicht die erwartete Leistung, Zuverlässigkeit und Lebensdauer bieten, kann die nicht optimale Zellauswahl sowohl für den Hersteller als auch für den Endnutzer erhebliche Kosten und Unannehmlichkeiten verursachen. Das klingt einfach und logisch. Fakt ist jedoch ebenso, dass das Belastungsprofil erheblichen Einfluss auf diese Parameter hat, insbesondere auf die Lebensdauer – jedoch ohne aufwendige Tests, wie sie Ansmann vornimmt und in der Datenbank auch für kommende Fragestellungen und Projekte zugänglich macht, nicht in die Zellauswahl einbezogen werden kann.

Wie groß die Unterschiede sein können, zeigt die nachfolgende Grafik. In **Bild 1** sind die erreichten Zyklenzahlen bei unterschiedlicher Last abgebildet.

Ein besonders innovativer Ansatz im Zelltestlabor in Assamstadt ist außerdem das Testen über das Ende der vorgesehenen Lebensdauer hinaus. Dabei wird untersucht, wie sich die Zelle nach Ablauf ihrer Lebensdauer verhält. Ein kritischer Aspekt ist dabei, ob das Überdruckventil auslöst und die Zelle spannungsfrei wird, wodurch der

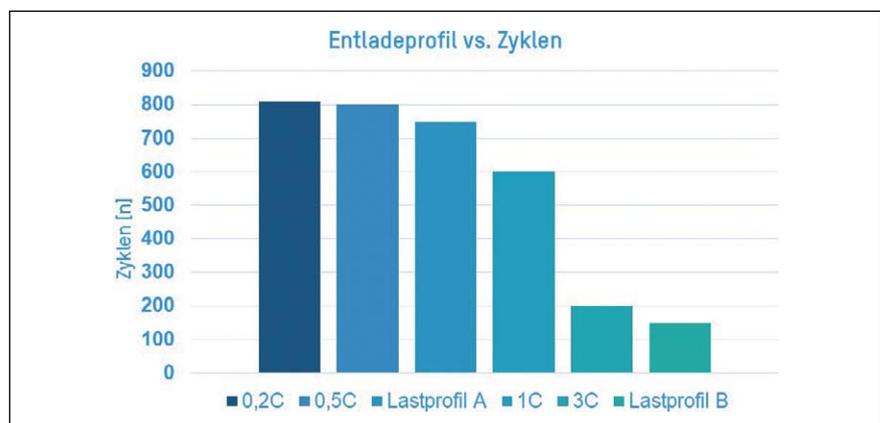


Bild 1. Wird das exakte Lastprofil der späteren Anwendung getestet, kann es gegenüber dem Datenblatt zu Überraschungen kommen. (Bild: Ansmann)

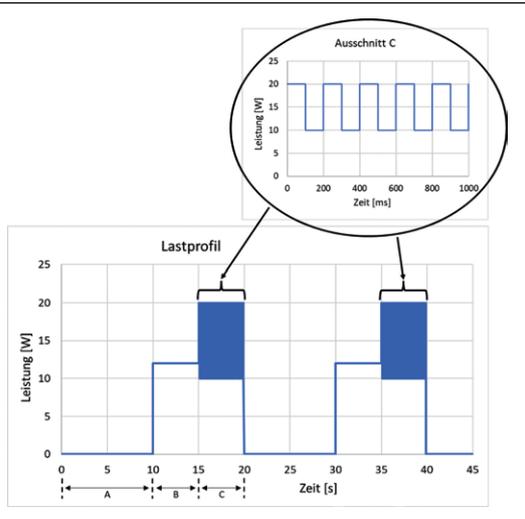


Bild 2. Präzise Lastprofile der Anwendung werden unter verschiedenen Zuständen nachgebildet und real an den Vergleichszellen beaufschlagt. (Bild: Ansmann)

gesamte Pack ausfällt und unbenutzbar wird. Diese Tests sind entscheidend, um die Zuverlässigkeit von Zellen und Akkupacks auch über ihre erwartete Lebensdauer hinaus zu gewährleisten und mögliche Risiken frühzeitig zu erkennen und zu minimieren.

Investition im modernen Testgerätepark mit erfahrenem Testteam

Mit neuen Batteriezell- und Packtestgeräten und zusätzlichen Temperaturschränken rücken nun die Experten für mobile Energie diesen Themen bei Ansmann bedarfsgerecht systematisch zu Leibe. Ein erfahrenes Expertenteam mit vier Mitarbeitern mit jeweils langjähriger Erfahrung und unterschiedlichem fachlichen Hintergrund erstellt die Prüfabläufe, begleitet die Messreihen und verfasst einen detaillierten Analysebericht. Es berät bei der Zellauswahl und unterstützt Kunden eigener oder fremder Produkte gezielt bei Akkuproblemen während der Produktlaufzeit. Ebenso ermöglichen die Daten die Beratung zu den Nutzungsparametern der Zelle oder des Packs bezüglich optimaler Ladeschlussspannung/Lade-/Entladeströme und Temperaturfenster. Zentrale Anwendungsparameter für die Analyse der Prüflinge sind dabei: Zyklenfestigkeit, nutzbare

Kapazität, State-of-Health (SOH), Temperaturverhalten und Spannungsverlauf. Diese werden verglichen und die für den jeweiligen Bedarf geeignetste Zelle ausgewählt (Bild 2).

Nachhaltige Hilfe auch für Akkuprobleme im Bestandsmarkt

Nützlich ist das neue Detailwissen über das Verhalten bestimmter Zellen in Akkupacks jedoch nicht nur für Neuentwicklungen. Immer häufiger gibt es auch Anfragen für Analysen der Zellen in der aktiven, laufenden Anwendung – vor allem, wenn Herausforderungen bei der Nutzung der Batterien im Gerät auftreten, wenn zum Beispiel Packs vermehrt zu früh ausfallen. Dabei kann im Versuch eine Vielzahl von Parametern erfasst werden. Dazu gehören die relative und absolute Kapazität, der Innenwiderstand über den Lebenszyklus, die Temperatur des Prüflings und der Umgebung. Auch die Lebensdauer und Zyklenfestigkeit der Zellen, Lastprofile und dynamische Lastwechsel lassen sich nach genau vordefinierten Anforderungen simulieren und in der Praxis anwenden. In der nächsten Grafik werden präzise Lastprofile der Anwendung unter verschiedenen Zuständen nachgebildet und real an der Zelle beaufschlagt. Vermessen werden im neuen Zelltestlabor in Assamstadt Rundzellen in allen typischen Größen wie 18650, 21700, 26650, 32140 – von 10280er als

kleinster bis 60144er als größter Rundzelle reicht die Bandbreite. Dazu alle im Endverbraucherbereich üblichen Größen wie AAA, AA, C, D, 9-V-Blocks, Knopfzellen und weitere. Auch andere Zelltypen wie Pouchzellen und prismaische Zellen können geprüft werden. Ebenso gibt es bezüglich der Zellchemie kaum Einschränkungen – von Li-Ion, Li-Po, Li-Fe, NiMH, Alkaline, Zink bis hin zu neuen Kandidaten wie natriumbasierte Zellchemien. Testen können die Experten in ihrem Labor Zellen und Packs im Leistungsbereich zwischen 1 mWh und 10 kWh (Bild 3).

Durch Investitionen in einen modernen Anlagenpark an Mess- und Simulationsgeräten namenhafter Hersteller sowie mehrerer Temperaturschränke sind alle wichtigen Parameter in breiter Spanne mess- und abbildbar. Die messbare Spannung reicht derzeit bei Einzelzellen von 0V bis 5V und bei Packs von 5V bis 80V. Bei der Stromstärke bis 400A und Spitzenleistung von 2kW, bei Zellen bis 280A mit Spitzenleistung von 6KW bei Packs. All dies in einem Temperaturbereich von Zelle und Pack von -40°C bis +100°C und einer Umgebungstemperatur zwischen -40°C und +100°C.

Dank der erweiterten Testmöglichkeiten ergeben sich deutliche Vorteile im Hinblick auf die Produktlebensdauer: Optimierte Zyklenfestigkeit in Relation zur Produktlebensdauer, die Kapazität, die der Zelle oder dem Pack aufgrund ihres Lastprofils entnommen werden kann, der State-of-Health über die Anzahl der Zyklen und die Erfassung des Verhaltens von



Bild 3. Screenshot: Weboberfläche der Ansmann-Zellendatenbank mit über 400 Zelltypen. (Bild: Ansmann).

Prüflingen im relevanten Temperaturbereich ermöglichen es, das Produkt des Kunden und damit auch die Erfahrung der Benutzer mit dem jeweiligen Produkt nachhaltig zu optimieren – in den Kerneigenschaften, die es ausmachen.

Längere Akkupack-Wechselintervalle, längere Produktlebensdauer

Als besonders interessanter Vorteil für qualitativ sehr hochwertige oder sicherheitskritische Anwendungen erweist sich die Optimierung der empfohlenen Wechselintervalle anhand der zu erwartenden Lebensdauer. Sie kann auf Basis der im Labor ermittelten Daten deutlich gezielter erfolgen als zuvor. Ein aktuelles Beispiel für Kosteneinsparung aus dem Maintenance-Bereich zeigt: Durch Tests anhand der konkreten Geräte-Belastungsprofile konnte vor Kurzem bei einem sehr leistungsstarken, hochwertigen Akkupack im Dentalbereich die zu erwartende Lebensdauer vorab konkret ermittelt und das notwendige Austauschintervall im Feld für den Kunden sehr präzise festgelegt und dadurch deutlich verlängert werden.

Stefan Ehrler, Innovationsmanager bei Ansmann, ist die hohe Präzision und Realitätsnähe wichtig, in der diese Tests

nun seit zwei Jahren umgesetzt werden können. Neu ist dabei auch die präventive Datensammlung über das exakte Zellverhalten in verschiedenen Stadien der Nutzung, während Qualitätstests an Zellen seit jeher gemacht werden. Auch Zellen bis zum Versagen zu testen, wäre nicht neu. Ehrler ist seit 2010 bei Ansmann tätig. Ihn zeichnen mehr als zwölf Jahre Erfahrung in der Qualitätssicherung und im Service rund um das Thema Akkupacks und Einzelzellen und die daraus resultierenden Herausforderungen in der Anwendung aus. Seine Erfahrungen von Kunden-, Produktions- und Lieferantenseite rund um das Thema Zellen bringt er seit zwei Jahren in das neu gegründete Zellkompetenzteam ein.

Für Ehrler und seine Kollegen ist es wichtig, dass dieser neue, konsequente Schritt zur Erweiterung der Zelltestungs- und Zellvermessungsmöglichkeiten – wo erforderlich auch mit Profilerstellung über Monate hinweg – es nun ermöglicht, bei der Vorauswahl von Zellen viel gezielter vorzugehen. Dadurch ist es nun möglich, die Optimierung des Lebenszyklus der Zellen und der Akkupacks im Produkt viel exakter vorzunehmen und dem Kunden dadurch mittelfristig Aufwand und Kosten zu ersparen.

Der Nutzen der erweiterten Zelltestung ist vielfältig. Durch präzise Tests und Analysen wird sichergestellt, dass der ausgewählte Zelltyp die Anforderungen der spezifischen Anwendungen eines Kundenprojekts optimal erfüllt. Zudem nutzt das Zellkompetenzteam seine neuen Möglichkeiten auch für Analysen der Zellen in der aktiven, laufenden Anwendung. Dies ermöglicht die gezielte Beratung bei Akkuproblemen während der Produktlaufzeit sowie eine optimierte Nutzung der Zellen und Packs. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Kostenoptimierung. Durch die Auswahl der richtigen Zellen können die Gesamtkosten für den Kunden gesenkt werden, da weniger häufige Austauschintervalle und eine höhere Effizienz der Zellen die Betriebskosten senken. eg

Stefan Ehrler

ist Innovationsmanager bei Ansmann.

Miriam Leunissen

ist freie Technologiejournalistin.

DEUTRONIC 
EDWANZ group

✓ weltweite Kompetenz in Automotive-Ladegeräten

Power

Electronics for

-  Charging Technology
-  Transportation
-  Logistics
-  Test & Automation
-  DEUTRONIC-systems
-  + MORE

Können Festkörperbatterien ihr Potenzial ausschöpfen?

EV-Batterien für 1000 km Reichweite



Festkörperbatterien versprechen einzigartige Vorteile in Bezug auf Leistung und Sicherheit, doch bis zu einer breiten kommerziellen Nutzung ist es noch ein weiter Weg. Von Mark Patrick

Die Ladezeiten von Elektrofahrzeugen sind nur ein Aspekt, der durch Festkörperbatterien verbessert werden könnte. (Bild: 24K-Production/stock.adobe.com)

Einige innovative Technologien beflügeln die Fantasie und werden in verschiedenen Sektoren eingehend diskutiert. Festkörperbatterien passen zu dieser Beschreibung. Dieser relativ neue Batterietyp wird als leichter, sicherer und leistungsstärker angepriesen und soll eine höhere Energiedichte

als Lithium-Ionen-Batterien (Li-Ion) aufweisen. Es wird vorausgesagt, dass dieser Batterietyp mehrere Bereiche verändern wird, darunter Elektrofahrzeuge, Konsumgüter und Speicher für erneuerbare Energien.

Weltweit belief sich der Markt für Festkörperbatterien 2022 auf 126,7 Milli-

onen US-Dollar und sollte bis zum Vorjahr auf voraussichtlich 240,18 Millionen US-Dollar anwachsen. Eine atemberaubende Zukunftsprognose: Bis 2030 schließlich wird ein Wert von 1,646 Milliarden US-Dollar prognostiziert, bei einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate von fast 40 Pro-

zent während des Vorhersagezeitraums. Eine rasante Entwicklung, selbst wenn man die technischen Herausforderungen berücksichtigt, die einer breiten Akzeptanz im Wege stehen könnten.

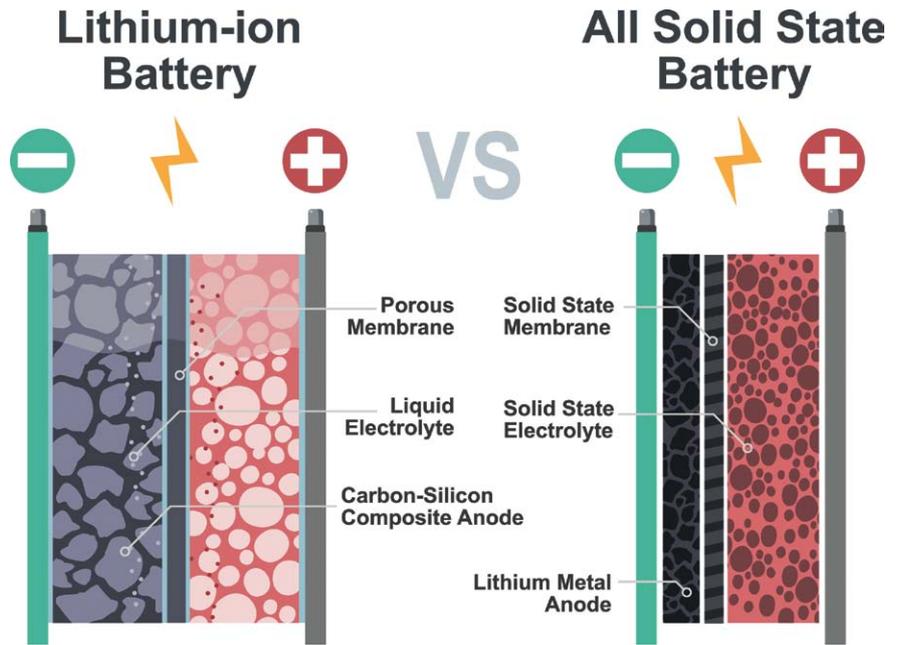
Großes Interesse an Festkörperbatterien

Natürlich beruht die Begeisterung für Festkörperbatterien zum Teil auf den Nachteilen bestehender wiederaufladbarer Batterien, die in zahlreichen Applikationen wie Mobiltelefonen, Laptops und Elektrofahrzeugen zum Einsatz kommen. Technologien wie Lithium-Ionen haben in den letzten Jahren rasante Fortschritte gemacht, haben aber immer noch ihre Grenzen. Gewicht und Kapazität waren zwei der größten Nachteile. Bei Elektroautos führen diese Einschränkungen zu Reichweitenangst, bei mobilen Geräten zu einem klobigeren Design und umständlichem Aufladen.

Neben Gewicht und Kapazität ist auch die Sicherheit ein Problem. Die Elektrolytflüssigkeit, die die Lithium-Ionen enthält, ist hochgradig flüchtig und brennbar, was zu einer möglichen Brand- oder Explosionsgefahr führt, insbesondere bei hohen Temperaturen. Es sind Alternativen zu herkömmlichen Zellen mit flüssigem Elektrolyt erforderlich, die eine höhere Energiedichte und bessere Sicherheit bieten. Hier kommen Festkörperbatterien ins Spiel. Die grundlegenden Unterschiede in der zugrundeliegenden Chemie bringen in mehreren Schlüsselbereichen erhebliche Vorteile mit sich, solange wichtige technische Herausforderungen bewältigt werden können.

Chemie von Festkörperbatterien

In einer typischen Lithium-Ionen-Zelle gibt es zwei feste Elektroden – die Kathode und die Anode –, einen zentralen Separator, der als mechanische Barriere dient, und den flüssigen Lithium-Ionen-Elektrolyten. In einer Festkörperbatterie hingegen dient ein festes Substrat aus Keramik oder Polymer sowohl als Separator als auch als Elektrolyt und trennt so effektiv die Kathode und die Anode,



Ein Vergleich zwischen Li-Ionen- und Festkörperbatterien. (Bild: AllahFoto/stock.adobe.com)

die typischerweise aus reinem Lithium bestehen (**Bild 1**).

Bei Festkörperbatterien können verschiedene Arten von Festelektrolyten mit jeweils spezifischen Eigenschaften verwendet werden. Elektrolyte aus Keramik bieten beispielsweise eine hohe Leitfähigkeit für Ionen und thermische Stabilität, während Sulfidelektrolyte Flexibilität und eine bessere Ionenbewegung ermöglichen. Durch die Verwendung nicht brennbarer Festelektrolyte anstelle der brennbaren flüssigen Elektrolyte in Lithium-Ionen-Batterien können Risiken wie thermisches Durchgehen und Kriechverluste vermieden werden.

Durch die veränderte Bauweise in Verbindung mit dem Einbau einer reinen Lithiumanode ergeben sich deutlich höhere Energiedichten. Dadurch liegt das Potenzial von Festkörperzellen bei bis zu 11 kWh/kg, wobei kurzfristig etwa 1 kWh/kg erreicht werden können. Dieser Wert übertrifft die Fähigkeiten heutiger Zellen und kann zu einer Gewichtsreduktion von bis zu 30 Prozent bei gleicher Kapazität führen.

Mögliche Anwendungsbereiche von Festkörperbatterien

Für Entwickler kann ein solcher technischer Fortschritt einen großen Unter-

schied bedeuten. Bei Fahrzeugapplikationen kann durch eine Erhöhung der Dichte einer Batterie die Größe der Batterie insgesamt reduziert werden, wodurch die Nutzlast des Fahrzeugs erhöht oder die Reichweite vergrößert werden kann. Für gewerbliche Nutzer und private Autobesitzer ergeben sich dadurch möglicherweise ausreichende Kosten- oder Leistungsvorteile, um den Umstieg von Autos mit Verbrennungsmotor auf Elektrofahrzeuge zu rechtfertigen.

Festkörperbatterien könnten auch als Energiequelle für Elektronikgeräte wie Smartphones, Laptops und Wearables eingesetzt werden. In jedem Fall sind Faktoren wie erhöhte Sicherheit, höhere Energiedichte, längere Lebensdauer und verbesserte Flexibilität beim Design überzeugende Gründe für einen Wechsel.

Andere Applikationen rücken ebenfalls in den Vordergrund. Durch die zunehmende Digitalisierung öffentlicher Bereiche kommt es immer häufiger zur Einführung batteriebetriebener, IoT-basierter Knotenpunkte in städtischen Gebieten und Industrien. Diese Netzwerke werden für zahlreiche Aktivitäten eingesetzt, wie etwa für die Verfolgung von Assets, vorausschauende Wartung, Energiemanagement und die Überwachung von Smart Cities. Hier



Herkömmliche Batterien für Elektrofahrzeuge sind groß und komplex. Diese negativen Eigenschaften können durch Festkörperbatterien ausgeglichen werden. (Bild: Sergi/stock.adobe.com)

können kleinere, sicherere und langlebigere Batterien die Leistung verbessern und die Kosten der IoT-Architektur senken, was wiederum neue Geschäftsmöglichkeiten eröffnet.

Herausforderungen bei Produktion und Skalierbarkeit bewältigen

Unter technischen Gesichtspunkten ist das Potenzial von Festkörperbatterien also unübersehbar. Aber man muss auch realistisch bleiben. Es gibt mehrere technische und fertigungstechnische Hürden, darunter Produktionskomplexität, Skalierungsprobleme, Materialkompatibilität, Langlebigkeit und Kosten.

Festelektrolyte haben im Allgemeinen eine geringere ionische Leitfähigkeit als organische Elektrolyte, insbesondere bei Raumtemperatur, was die Leistung von Festkörperbatterien einschränkt. Sie können auch relativ spröde werden, was ihre Haltbarkeit beeinträchtigt. Bei der Herstellung von Festkörperbatterien müssen dünne, einwandfreie Schichten aus Festelektrolyt hergestellt und ein ultrafeiner, präziser Kontakt mit den Elektroden geschaffen werden. Für diese Prozesse sind hochpräzise Verfahren und Steuerung erforderlich. Die Skalierung solcher Prozesse stellt auch eine Herausforderung für die Qualität und Konsistenz dar, die überwunden werden muss, um die kommerzielle Durchführbarkeit zu erreichen.

Laut einem Artikel aus dem Jahr 2024 mit dem Titel *Advancements and Challenges in Solid-State Battery Technology: »An In-Depth Review of Solid Electrolytes and Anode Innovations«* (Fortschritte und Herausforderungen in der Technologie von Festkörperbatterien: Eine eingehende Überprüfung von Festelektrolyten) stellen Materialauswahl und Kosten ebenfalls Herausforderungen dar, die überwunden werden müssen. Auch schreiben die Autoren des Artikels, dass die Suche nach geeigneten Materialien für Festelektrolyte mit hoher Ionenleitfähigkeit, mechanischer Festigkeit und Stabilität aufwändig sein kann. Viele der aussichtsreichen Festelektrolytmaterialien sind teuer oder nur mit hohem Aufwand in ausreichenden Mengen synthetisierbar, was Fragen zur Kosteneffizienz von Festkörperbatterien aufwirft. Auch die Suche nach kompatiblen Elektrodenmaterialien, die mit diesen Festelektrolyten effizient arbeiten können, stellt eine weitere Herausforderung für die Fertigung dar.

Aktuelle Fortschritte bei der Kommerzialisierung

Ungeachtet dieser Herausforderungen wurden intensive Forschungs- und Entwicklungsbemühungen im Bereich Festkörperbatterien unternommen, und mehrere Unternehmen haben kommerziell nutzbare Produkte entwickelt – wenn auch in relativ kleinem Maß-

stab. TDK hat beispielsweise ein proprietäres Material für seine CeraCharge-Festkörperbatterien eingeführt. In der nächsten Generation bietet diese Technologie bereits eine Energiedichte von 1.000 Wh/l, was etwa dem Hundertfachen der Energiedichte der frühen Festkörperbatterien von TDK entspricht. TDK zufolge kann die Technologie in tragbare Geräte wie kabellose Kopfhörer, Hörgeräte und Smartwatches integriert werden, um vorhandene Knopfzellen zu ersetzen.

Mittlerweile beschäftigen sich auch globale Automobilhersteller wie Mercedes-Benz mit der Kommerzialisierung von Festkörperbatterien. Das Unternehmen kündigte kürzlich eine Partnerschaft mit dem US-amerikanischen Start-up-Unternehmen Factorial an, um eine Festkörperbatterie zu entwickeln, mit der die Reichweite von Elektrofahrzeugen im Vergleich zur heutigen Durchschnittsleistung um etwa 80 Prozent erhöht werden könnte. Diese neue sulfidbasierte Batterie mit der Bezeichnung Solstice hat eine Energiedichte von 450 Wh/kg und bleibt auch bei Betriebstemperaturen von über +90 °C stabil. Darüber hinaus soll diese nur noch ein Drittel der Größe typischer Lithium-Ionen-Batterien aufweisen, was zu einer Gewichtsersparnis von 40 Prozent führt (**Bild 2**).

Toyota hat angekündigt, bis 2027/2028 seine erste Festkörperbatterie für seine Elektrofahrzeuge der nächsten Generation einzuführen. Sie soll eine Reichweite von etwa 1.000 km bieten und in 10 Minuten oder weniger auf 10 bis 80 Prozent aufgeladen werden können. Toyota hat außerdem die Entwicklung einer Lithium-Ionen-Festkörperbatterie mit noch besseren technischen Daten bestätigt, die im Vergleich zu den Lithium-Ionen-Batterien mit flüssigem Elektrolyt der Baureihe Performance eine Verbesserung der Reichweite um 50 Prozent ermöglichen soll.

Der entscheidende Moment für die Einführung von Festkörperbatterien

Festkörperbatterien sorgen in vielen Bereichen für Aufsehen. Die Techno-

logie birgt ein enormes Potenzial für Elektrofahrzeuge, Elektronik für Verbraucher und IoT-Netzwerke, wobei die Vorteile in Bezug auf Gewicht, Sicherheit, Haltbarkeit und Energiedichte die Leistung erheblich verbessern. Bis zu einer breiten Akzeptanz ist es jedoch noch ein weiter Weg, da sich die Entwickler mit den Herausforderungen der Fertigung, Skalierbarkeit und Konsistenz auseinandersetzen müssen. Doch kontinuierliche Fortschritte

in der Nanotechnologie, Materialwissenschaft und Elektrochemie werden wahrscheinlich dazu beitragen, die aktuellen Herausforderungen zu bewältigen und den Weg für eine breite Akzeptanz zu ebnen. Mit Unternehmen wie TDK, Mercedes-Benz und Toyota, die ihre Pläne und Produkte veröffentlichen, hat die Dynamik im Bereich der Festkörperbatterien einen wichtigen Punkt erreicht, sodass sie eine gute Wahl für die Zukunft sind. eg



Mark Patrick

ist Director of Technical Content, EMEA, bei Mouser Electronics.

Er absolvierte seinen Abschluss in Elektrotechnik an der Coventry University mit Auszeichnung und durchlief mehrere technische Positionen im Support und Vertrieb, etwa bei Texas Instruments.

Mit programmierter Firmware

Komplettlösung für Lithium-Ionen-Batteriemangement

Renesas Electronics stellt Komplettlösungen für das Management von Lithium-Ionen-Batterien in einer Vielzahl von batteriebetriebenen Consumer-Produkten vor, darunter für E-Bikes, Staubsauger, Robotik und Drohnen.

Das R-BMS F (Ready Battery Management System with Fixed Firmware) soll mit seiner bereitgestellten vorvalidierten Firmware die Lernkurve für Entwickler erheblich verkürzen. Denn dadurch wird die schnellere Entwicklung von sicheren und leistungsfähigen Batteriemangementssystemen möglich.

Konzipiert für Lithium-Ionen-Batterien mit sowohl zwei bis vier beziehungsweise drei bis zehn Zellen in Serie umfassen die R-BMS-F-Lösungen die Fuel-Gauge-ICs (FGICs) von Renesas, einen Mikrocontroller und ein analoges Batterie-Frontend, programmierte Firmware, Software, Entwicklungstools sowie eine vollständige Dokumentation. Entsprechende Evaluierungskits sind ab sofort verfügbar.

Die vorvalidierte Firmware

Firmware ist in Batteriemangementssystemen unverzichtbar, da sie zur Überwachung des Batterieladestands, State-of-Health, des Stroms und der Temperatur sowie zum aktiven Ausgleich der Batteriezellspannungen und zur Fehlererkennung genutzt wird. In manchen Fällen verfügen die Entwickler von Consumer-Elektronik jedoch nicht über ausreichendes Spezialwissen, das für die Entwicklung der Regelalgorithmen erforderlich ist. Diese stellen sicher, dass die Batterien in einem sicheren



Temperaturbereich betrieben werden, und gewährleisten eine ausreichende Batterielebensdauer über viele Lade- und Entladezyklen.

Die R-BMS-F-Lösungen von Renesas beinhalten eine vorgetestete Firmware, um mit der im FGIC integrierten MCU zusammenzuarbeiten. Die Firmware enthält wichtige programmierte Funktionen, um die Batterielebensdauer zu erhöhen und einen sicheren Betrieb zu gewährleisten. Dazu gehören Zellausgleich, Stromregelung sowie die Überwachung von Spannung und Temperatur. Für zusätzliche Flexibilität bietet das Batteriemangementssystem Entwicklern die Möglichkeit, viele Parameter über eine grafische Benutzeroberfläche einzustellen. So können sie die Lösung an spezifische Anforderungen anpassen und für unterschiedliche Zellchemien einstellen, ohne eine

vollständig integrierte Entwicklungsumgebung zu verwenden.

Die beiden Batteriemangementssysteme

Das R-BMS F für zwei bis vier Zellen in Serie (~8 V bis 16 V) basiert auf dem RAJ240055 FGIC für Lithium-Ionen-Batterien. Zielapplikationen des RTK0EF-0163DK0002BU sind Staubsauger, Saugroboter, Consumer- und Medizinanwendungen.

Das R-BMS F für drei bis zehn Zellen (~12 V bis 40 V) basiert auf den FGICs für Lithium-Ionen-Batterien RAJ240100 und RAJ240090. Das RTK0EF0136DK0002BU adressiert Anwendungen wie E-Bikes, E-Mobilität, Staubsauger, Robotik, Drohnen, Industrie-, Consumer- und Medizinanwendungen. ih

Die KI-Revolution vorantreiben

KI braucht Innovationen auf der Speicherseite

In der Keynote von Jaihyuk Song, Corporate President & CTO der Device Solutions Unit von Samsung Electronics, geht es darum, welche Innovationen aufseiten der Speichertechnologien helfen können, um die KI-Revolution weiterzutreiben.

Von Iris Stroh

»Jüngste Fortschritte in der Halbleitertechnologie, gepaart mit dem exponentiellen Datenwachstum, haben eine dritte Welle der KI-Entwicklung ausgelöst. Als Plattform ist KI in der Lage, Technologien in unzähligen Bereichen zu transformieren und voranzutreiben, einschließlich Transport, Robotik, Fertigung, Finanzwesen oder Sicherheitsbereich, und letztlich auch unser eigenes Leben«, erklärt Song. Halbleiter stehen aus seiner Sicht an vorderster Front, um die Nutzung von KI voranzubringen. Und auch wenn die Halbleiterindustrie sich stetig weiterentwickelt, wird es wohl noch eine Zeitlang dauern, bis die KI mit den Fähigkeiten des menschlichen Gehirns immer und überall konkurrieren kann. Ein Vergleich von Song zwischen KI und menschlichem Gehirn zeigt zunächst, dass es etwa 3,4 Milliarden Jahre gedauert hat, bis aus dem ursprünglichen Einzeller ein Gehirn mit seiner heutigen Komplexität geworden ist. Da war die KI doch deutlich schneller, sie hat »in nur 80 Jahren unglaubliche Fortschritte gemacht. Sie erreicht Genauigkeitsniveaus, die weit über das hinausgehen, was ursprünglich möglich war«, sagt Song. Seine Aussage

belegt er mit einem MMLU-Benchmark (Massive Multitask Language Understanding): Kam GPT2 im Jahr 2019 auf eine Genauigkeit von 32,4 Prozent, liegt OpenAI 01 2024 bereits bei 92,3 Prozent. Obwohl die Genauigkeit bei einem Menschen, der nicht Experte ist, geringer ausfällt (34,5 Prozent, die von Experten liegt bei 98 Prozent) hat das Gehirn auch heute noch klare Vorteile: Es ist schneller, der Energieverbrauch ist geringer, und die Speicherkapazität ist deutlich höher (**Bild 1**).

Drei Probleme: Leistungsaufnahme, Memory-Wall und Speicherkapazität

Aus der Sicht von Song muss die Halbleiterindustrie drei Probleme lösen, damit das Wachstumspotenzial von KI ausgeschöpft werden kann. Der erste Punkt ist die Leistungsaufnahme. In diesem Zusammenhang verweist Song beispielsweise auf die Leistungsaufnahme, die für das Training von KI-Modellen notwendig ist und die extrem gestiegen ist. Lag der Stromverbrauch für GPT1 mit 118 Mio. Parametern noch bei 3,7 kWh, kommt GPT4 mit 1,8 Billionen Parametern bereits auf

148 GWh. Song: »Diese Energie entspricht nahezu der vollständigen Aufladung von 2,5 Millionen Tesla-Fahrzeugen des Modells Y.«

Die »Memory-Wall« steht als zweiter Punkt auf der Liste der Herausforderungen, die gemeistert werden müssen. Mit der Weiterentwicklung generativer KI-Modelle habe sich die Rechenleistung von GPUs mit jeder Generation vervielfacht, die Entwicklungen auf der Speicherseite verliefen dagegen viel langsamer. Das heißt, dass mit jeder neuen Generation auf der GPU-Seite der Unterschied zwischen Speicher- und Prozessgeschwindigkeit größer wird (**Bild 2**).

Und die dritte Schwierigkeit liegt in unzureichender Speicherkapazität. Song erklärt: »Um beispielsweise das kritische Problem mit Halluzinationen in generativer KI anzugehen und die Zuverlässigkeit zu verbessern, wurde die RAG-Technologie entwickelt.« RAG steht für Retrieval Augmented Generation und ist eine Technik, die die Ausgabe von großen Sprachmodellen zu verbessern hilft, indem auf eine Wissensbasis außerhalb der Trainingsdaten verwiesen wird, bevor das LLM die Antwort generiert. Tech-

nisch wird dies meistens über eine Vektordatenbank realisiert, die um ein Vielfaches größer ausfällt als die Ursprungsdaten, und »dafür sind SSDs mit hoher Bandbreite und Speicherkapazität notwendig«, erläutert Song. Deshalb fordert er, dass die Speicherindustrie sich nicht ausschließlich auf die kontinuierliche Weiterentwicklung von Hochleistungs- und Low-Power-Produkten konzentrieren soll, sondern auch vollkommen neue Ansätze entwickelt, die für spezielle Anwendungen optimiert sind und auf innovativen Speicherarchitekturen basieren. Song betont: »Diese Ziele lassen sich meiner Meinung nach nur durch eine Zusammenarbeit mit Partnern erreichen.«

Verschiedene Technologien

HBM (High-Bandwidth-Memory)

Song ist überzeugt, dass die Entwicklungsgeschwindigkeit von HBMs wirklich schnell ist, alle zwei Jahre komme eine neue Variante auf den Markt, die Bandbreite pro Generation konnte im Durchschnitt um etwa das 1,5-Fache vergrößert werden. Mit HBM4 wurde im Vergleich zu HBM3E sogar eine Verdopplung der Bandbreite erreicht. Um die höhere Geschwindigkeit zu ermöglichen, nutzt Samsung bei HBM4 einen Logikprozess (eine FinFET-Technologie der Samsung Foundry) anstelle eines DRAM-Prozesses für die Core-Dies. Früher kam diese Prozesstechnologie ausschließlich für den Base-Die zum Einsatz. Darüber hinaus hat sich in der HBM4-Generation die Gesamtzahl der Kanäle pro Stapel im Vergleich zu HBM3 verdoppelt, ebenso die Anzahl der I/Os, wobei die Datenleitungen (DQ) von 1.000 auf 2.000 erhöht wurden. Darüber hinaus unterstützen HBM3 und HBM3E derzeit Konfigurationen mit bis zu zwölf gestapelten Core-Dies (12H), während HBM4 voraussichtlich 16H-Konfigurationen mithilfe der Hybrid Copper Bonding (HCB)-Technologie unterstützen wird. Und um potenzielle zukünftige Einschränkungen beim Stacking und bei der Leistungssteigerung von HBM zu adressieren, setzt Samsung zum Beispiel auf Weiterentwicklungen wie Co-

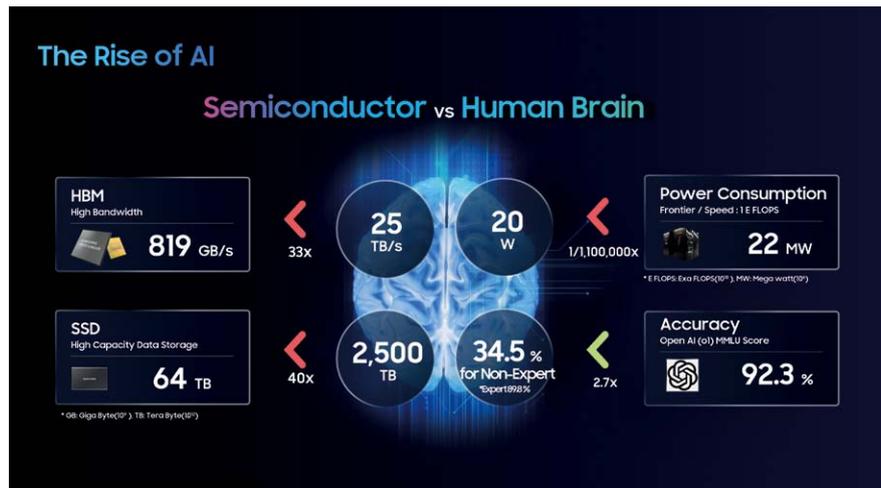


Bild 1. Vergleich zwischen der Leistung eines menschlichen Gehirns und einer KI, die mithilfe von Halbleitern aufgebaut ist. (Bild: Samsung Electronics)

Package Optic (CPO). »Die Verwendung eines Logikprozesses wie für HBM4 ermöglicht aber auch die Realisierung kundenspezifischer HBMs«, führt Song aus. Dabei werden die Core-Dies aus standardisierten HBM-Generationen beibehalten, während das Base-Die mit zusätzlicher kundenspezifischer Logik an kundenspezifische Anforderungen angepasst wird.

SSDs

Um die Speicherkapazität von SSDs zu erhöhen und den Formfaktor zu begrenzen, müssen aus Sicht von Song mehrere Probleme in verschiedenen technischen Bereichen adressiert werden. Dazu zählt er einerseits die Erhöhung der NAND-Flash-Integration mithilfe der QLC-Technik (Quad-Level

Cell), andererseits müssen auch mehr Dies in einem Gehäuse untergebracht und PCIe Gen6/Gen7 unterstützt werden. Zudem müssen thermische Probleme und eine schlechter werdende Signalintegrität gelöst werden, die durch die zunehmende Integration in begrenzten Formfaktoren entstehen. »Wir benötigen einen fortschrittlichen Datenwiederherstellungsmechanismus, um die Datenzuverlässigkeit für SSDs mit hoher Kapazität gewährleisten zu können«, führt Song weiter aus. »Da mehrere NAND-Chips an einen Kanal angeschlossen sind, um ultrahochkapazitive SSDs zu bauen, tritt aufgrund von Stub-Effekten eine Signalverschlechterung auf. Die Minimierung der Stub-Länge mit DQ-Swap-Funktionalität kann die Signalintegrität auf

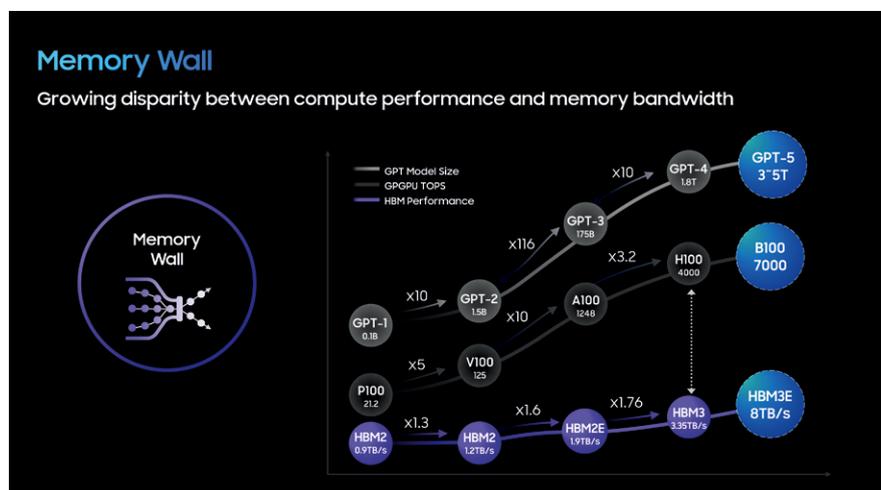


Bild 2. Die Lücke zwischen Speicher- und Compute-Leistung wird immer größer. (Bild: Samsung Electronics)

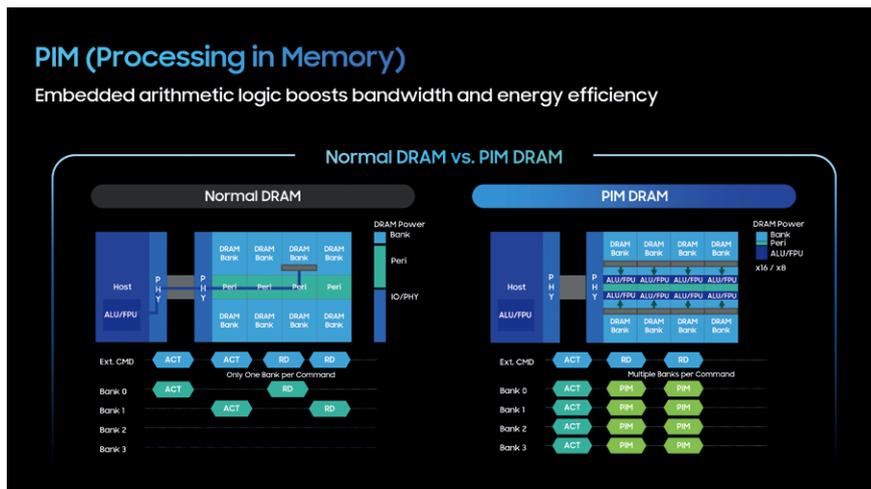


Bild 3. PIM – Processing in Memory: Vergleich zwischen einem üblichen DRAM und einem PIM-DRAM. (Bild: Samsung Electronics)

PCB-Ebene verbessern.« Mit zunehmenden I/O-Frequenzen steigt auch das Problem mit Übersprechen. Um diese Crosstalk-Probleme zu adressieren, werden seiner Meinung nach ein DQ-Shielding und fortschrittliche Equalizer unerlässlich. Er weist außerdem darauf hin, dass mit der Einführung der PAM4-Signalübertragung in PCIe Gen 6.0 die SI-Margin im Vergleich zur NRZ-Signalübertragung (Non-Return-to-Zero) von PCIe Gen 5.0 erheblich verringert wird.

Außerdem steigt bei SSDs mit hoher Kapazität in kompakter Bauweise die Anfälligkeit für Rauschen, zum Beispiel durch verschiedene aktive ICs und PMICs. »Dieses Rauschen kann zusätzlichen Jitter verursachen, der als Power Supply Induced Jitter (PSIJ) bekannt ist«, fährt Song fort. Daher ist laut seiner Aussage die Optimierung des PDNs (Power Distribution Network) ein entscheidender Bestandteil bei der Entwicklung von SSDs mit ultrahoher Kapazität.

»Der Hauptvorteil von SSD-Lösungen liegt eindeutig in ihrer Kapazität und Leistung«, erklärt Song. Für KI-Systeme seien aber auch Sicherheit und Verfügbarkeit von entscheidender Bedeutung. Dieses Problem überwinden selbstverschlüsselnde SSDs (SEDs). Sie ermöglichen eine Datensicherheit mit starkem Schlüsselschutz und eine in Hardware realisierte Root-of-Trust, sodass Datenintegrität gewährleistet werden kann«, legt Song weiter dar. Und um die Ver-

fügbare von KI-Systemen zu verbessern, lassen sich zusätzliche Funktionen nutzen, einschließlich Dual-Port-Unterstützung, Fail-in-Place-Operationen. Damit ist es möglich, dass die SSD weiter funktioniert, selbst wenn einige NAND-Dies ausfallen.

CXL

»CXL ist definitiv ein Vorteil, sowohl für die Kunden als auch für die Branche, denn mit CXL lassen sich die Gesamtbetriebskosten reduzieren und die Performance erhöhen«, sagt Song. CXL (CXL: Compute Express Link) wurde 2022 eingeführt. Seitdem arbeite Samsung eng mit der Branche zusammen, sodass mittlerweile verschiedene Produktlinien für verschiedene Anwendungen eingeführt werden konnten:

→ CMM-D nutzt die CXL-Schnittstelle, um die DRAM-Kapazität zu erhöhen.

→ CMM-H ist eine hybride Speichererweiterung mit Flash und DRAM, die in zwei Varianten unterteilt ist: CMM-H (Tiered Memory) unterstützt bis zu 4 TB NAND-Flash-Kapazität und verwendet DRAM als Cache; CMM-H (Persistent Memory) unterstützt 32 GB DRAM und umfasst Funktionen wie Batteriesicherung und Global Persistent Flush (GPF).

→ CMM-B für Memory-Pooling. CMM-B trennt verfügbare Rechen- und Speicherressourcen und erleichtert somit die unabhängige Res-

sourcenzuteilung innerhalb von Rack-Clustern.

Speicher für Edge-Geräte mit KI

KI-Anwendungen wandern zusehends von der Cloud in die Edge, folglich sind auch Speicher notwendig, die für KI-Anwendungen im Edge optimiert sind. Dementsprechend hat Samsung mit LPW (LPDDR Wide-IO) einen solchen Speicher entwickelt. Bei LPW hat das Unternehmen laut Song einerseits die I/O-Geschwindigkeit reduziert und andererseits die Anzahl der I/Os erhöht. »Dadurch ist LPW um 166 Prozent schneller als LPDDR5x, während die Leistungsaufnahme um 54 Prozent reduziert werden konnte«, erklärt Song. Es werde bereits daran gearbeitet, die Leistungsaufnahme mithilfe einer VWB-Technik (Vertical Wire Bonding) weiter zu reduzieren. »Wir arbeiten hier eng mit den SoC-Herstellern zusammen, um eine Standardisierung zu erreichen.« Laut seiner Aussage werden die ersten LPW-Speicher voraussichtlich bis 2028 auf den Markt kommen.

PIM (Processing in Memory Technology)

Bei PIM-Ansätzen werden ALUs (Arithmetik-Logik-Einheiten) und Gleitkommaeinheiten (FPUs) in der Nähe der DRAM-Banken integriert. »Durch ein PIM-Konzept können in KI-Systemen zwei Hauptziele erreicht werden: Erstens wird die Speicherbandbreite erheblich erweitert und zweitens wird die Energieeffizienz verbessert«, beschreibt Song. So kann die Spitzenbandbreite mit diesem Ansatz im Vergleich zu herkömmlichen DRAMs um bis das Achtfache erhöht werden. Zudem haben laut Song bestehende PIM-Systeme gezeigt, dass die Leistungssteigerungen auf Systemebene je nach Anwendung variieren, aber im Allgemeinen eine etwa drei- bis vierfache Verbesserung der Latenz und eine Energieeinsparung von 70 Prozent erreichen. Das habe ein Test mit einer geräteinternen LLM-Inferenzierung in einem Samsung-Galaxy-S24-Ultra-System gezeigt. Das Interesse an dieser Technologie in der Industrie sei sehr hoch (Bild 3).

Song verweist auf die Entwicklung hauseigener LPDDR5x-PIMs. Dass LPDDR5x gewählt wurde, erklärt er mit einem Vergleich zwischen DDR5 und LPDDR5x: LPDDR5x hat eine 1,5-mal höhere Bandbreite pro Pin und spart bei der Übertragung derselben Kapazität mehr als 60 Prozent Energie ein.

Ansätze für die weitere Skalierung der Speichertechnologien

Um die heutige 6F²-DRAM-Zellstruktur weiter zu verkleinern, entwickelt die Speicherindustrie laut Song vertikale Kanaltransistoren, um die Zellfläche zu reduzieren und die Leistung zu erhöhen. Ein anderer Ansatz, die »Kapazität drastisch zu erhöhen, besteht in der vertikalen Stapelung der Zellen«, erklärt Song weiter. Darüber hinaus setze die Speicherindustrie auch auf eine Cell-on-Peri-Struktur. Samsung geht davon aus, dass mit diesen Ansätzen die Skalierung von DRAM-Technologien bis in den Sub-10-Nanometer-Bereich möglich wird. Song fährt fort: »Langfristig planen wir die Einführung einer neuen HBM-Architektur, die für KI-Rechenumgebungen optimiert ist.« Mit dieser neuen Struktur will Samsung folgendes Problem lösen: »Sieht man sich den Stromverbrauch von HBM genauer an, stellt man fest, dass der größte Stromverbrauch während des Datentransports zwischen HBM und Compute-Die auf-

tritt.« Folglich soll die neue Struktur dahingehend optimiert sein, dass die Datenbewegungen zwischen HBM und Compute-Die minimiert werden.

Mit Blick auf NAND-Speicher berichtet Song, dass die Industrie BVNAND und Multi-BVNAND aktiv weiterentwickelt. BVNAND (Bonding VNAND) adressiert thermische Probleme, die mit der COP-Struktur (Cell over Periphery) verbunden sind, und zwar mithilfe von C2C-Hybrid-Bonding (Chip-to-Chip-Hybrid-Bonding). Bei dieser Methode werden die Zell- und Peripherieschichten während der Herstellung getrennt, was den Einsatz fortschrittlicher Prozesse speziell für die Peripherieschicht ermöglicht und somit die durch Zellprozess-Beschränkungen auferlegten I/O-Geschwindigkeitsbegrenzungen überwindet. Bei der Entwicklung der Multi-BVNAND-Technologie geht es darum, mehr als 1000 Wortleitungsebenen (Word Line Layers) zu erreichen.

Darüber hinaus finden nach Informationen von Song diverse Aktivitäten im Bereich DRAM-Packaging statt. Dabei geht es zum Beispiel darum, mithilfe von TCB (Thermal Compression Bonding) und HCB (Hybrid Copper Bonding) die Anzahl der gestapelten Schichten um weitere 30 Prozent zu erhöhen und den thermischen Widerstand um 20 Prozent zu reduzieren. Auf der Systemebene wiederum arbeitet die Speicherindustrie an einer Technologie für sehr große Speicherpakete, die in

der Lage sind, mehr als zwölf HBM-Einheiten aufzunehmen.

Überdies arbeite die Speicherindustrie seit Kurzem auch an einem I-Cube-Ansatz, der eine heterogene Integration erlaubt, die über das Mooresche Gesetz hinausgeht. I-Cube S nutzt laut Song einen Interposer auf Basis von Silizium und befindet sich bereits in der Massenproduktion. I-Cube E und I-Cube R nutzen einen RDL-Interposer (Redistribution Layer), um Logikchips und Speicher wie HBM (High Bandwidth Memory) zu verbinden. Laut Song sind diese Entwicklungen bald abgeschlossen, sodass dann sogar »bis zu 16 HBMs in einem Paket integriert werden können.«

Die Speicherhierarchie ändert sich

»Im Vergleich mit der herkömmlichen Speicherhierarchie haben moderne Speichersysteme eine viel tiefere Hierarchie. Da Anwendungen immer mehr Kapazität und höhere Leistung benötigen, werden immer mehr neue Speichersegmente eingeführt, um den verschiedenen Anforderungen gerecht zu werden«, erklärt Song. Die Unterstützung dieser tieferen Speicherhierarchie erfordert aber ein Überdenken der Systemsoftware-Architektur, deshalb fordert er: »Es muss eine offene Zusammenarbeit geben, bei der die Speicherindustrie aktiv mit der Open-Source-Community, Anbietern von Betriebssystemen sowie Standardisierungsorganisationen wie Open Compute Project und SNIA zusammenarbeitet, um ein Ökosystem für die neue Speicherhierarchie aufzubauen.« (Bild 4)

Und abschließend: »Wir haben mit Hinblick auf das KI-Zeitalter bereits bemerkenswerte Fortschritte erzielt. Dennoch ist es für die Zukunft wichtig, einen kooperativen Ansatz zu verfolgen, bei dem nicht nur Speicherhersteller, Equipment- und Material-Lieferanten sowie EDA-Unternehmen zusammenarbeiten, sondern auch Forschungsinstitute, Universitäten und Kunden aktiv am F&E-Prozess beteiligt sind.«

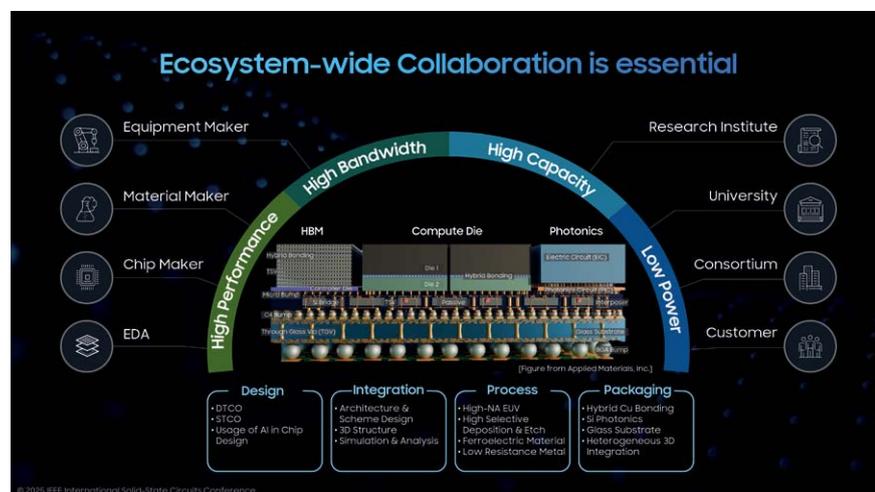


Bild 4. Eine Zusammenarbeit über das gesamte Ökosystem hinweg ist für die Weiterentwicklung der Speichertechnologien entscheidend. (Bild: Samsung Electronics)

KI bringt Rechentechnologien an ihre Grenzen

Alle Hebel müssen umgelegt werden

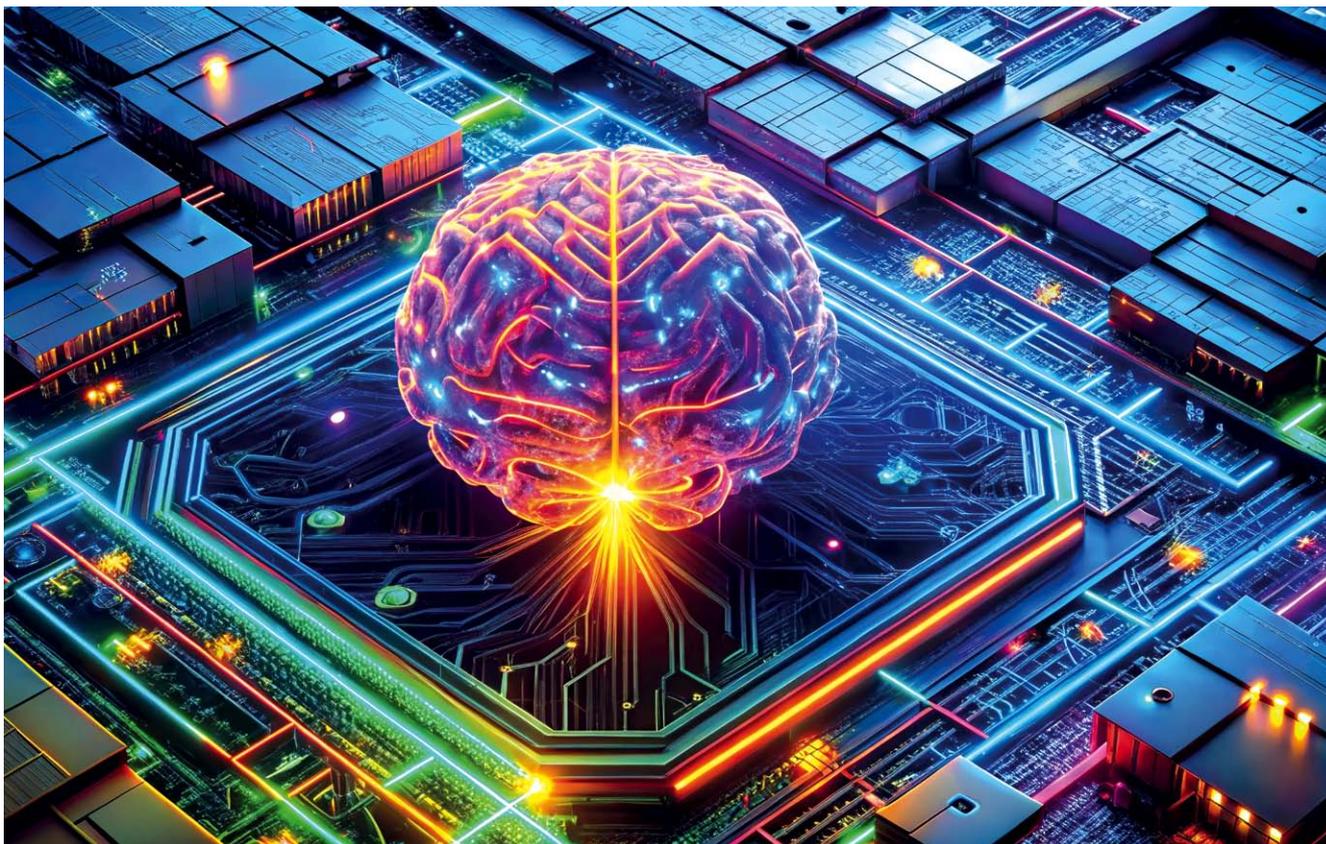


Bild: hapsuwanArt/stock.adobe.com

Die rasanten Entwicklungen im KI-Bereich erfordern aus der Sicht von Navid Shahriari, Senior Vice President, Foundry Technology Development, Intel, Fortschritte auf Systemebene – von energieeffizienten Edge-Komponenten über Cloud-Computing bis hin zu den Kommunikationsnetzwerken dazwischen.

Von Iris Stroh

Navid Shahriari ist überzeugt, dass die rasante Ausbreitung von KI herkömmliche Rechentechnologien an ihre Grenzen bringt, sodass neue Ansätze gefunden werden müssen, um der stei-

genden Nachfrage nach Rechenleistung, Speicherbandbreite, Konnektivität und leistungsfähiger Infrastruktur nachgekommen werden kann. Dafür hält er Fortschritte in der gesamten

Innovationsmatrix für erforderlich – von Software und Systemarchitektur bis hin zu Halbleitern und Packaging (**Bild 1**). »In jedem Bereich sind Weiterentwicklungen notwendig. Darüber

hinaus muss das gesamte System gemeinsam optimiert werden, um Leistung zu maximieren und Energie sowie Kosten zu senken«, betont Shahriari.

Silizium

Zur Innovationsmatrix gehört natürlich auch die weitere Miniaturisierung von Siliziumstrukturen. Shahriari nennt fünf Ansätze, um dabei weiter voranzukommen. Zunächst verweist er auf RibbonFETs, GAA-Transistoren, die die heutigen FinFETs ablösen. Sie ermöglichen innerhalb einer Technologieplattform die flexible Anpassung der Transistoren beziehungsweise ihrer Kanäle an die verschiedenen Anforderungen (High Performance versus Low Power). An zweiter Stelle nennt er PowerVias, mit der die Transistoren von der Rückseite der Halbleiter mit Strom versorgt werden können. Mit PowerVias sinke der Spannungsabfall (IR-Drop) auf ein Fünftel, und sie schaffen auf der Vorderseite zusätzlichen Platz für Signalleitungen. Laut Shahriari erfüllen PowerVias alle thermomechanischen JEDEC-Belastungsanforderungen ohne Ausfälle und ermöglichen eine über 5 Prozent höhere Schaltfrequenz im Silizium. »Intel 18A, unsere führende Prozesstechnologie, wird branchenweit die erste Kombination aus Ribbon-FET- und PowerVia-Technologien aufweisen«, sagt Shahriari. Der dritte Ansatz, um die Skalierung weiterzutreiben, ist die High-NA-EUV-Lithographie. Sie lässt flexible Designregeln zu, reduziert parasitäre Kapazitäten und verbessert die Leistung. Zudem vereinfacht sie Entwurfsprozesse, da weniger komplexe Designregeln und Multi-Patterning notwendig sind. »Die Front-Side-Interconnects von Intel 14A sind für die Einfachbelichtung mit hoher numerischer Apertur optimiert, sodass Ausbeute und Zuverlässigkeit verbessert werden«, erklärt Shahriari weiter. Im Zusammenhang mit High-NA-EUV verweist er auf eine weitere Entwicklung, die Intel vorangetrieben hat: Um das typischerweise kleinere Belichtungsfeld zu vergrößern, hat Intel ein Verfahren entwickelt, mit dem einzelne Dies elektrisch verbunden

werden können (elektrisches Die-Stretching). Laut Shahriari arbeiten die EDA-Anbieter an Tools, die dieses Verfahren unterstützen.

High-NA-EUV benötigt außerdem hochentwickelte Modelle und Maskentechnologien. Intel adressiert diese Punkte mithilfe von KI/ML und kurvilinearen Masken (Belichtungsmasken mit gekrümmten Strukturen), sodass Genauigkeit und Effizienz gesteigert, das Prozessfenster erweitert und die Fertigungstoleranzen reduziert werden.

3D-Integration

Mit dem steigenden Bedarf an Rechenleistung wird es immer wichtiger, mehr Rechenleistung auf kleinerem Raum und mit geringerem Energieverbrauch zu realisieren. Und das ist mit der 3DIC-Technologie möglich, sie reduziert nach Angaben von Shahriari Kosten und Platzbedarf, erhöht die Leistung durch größere Bandbreite und senkt den Stromverbrauch durch vertikales Stapeln verschiedener Halbleiterkomponenten. Bei dieser Integrationsmethode spielen der Basis-Chip auf Basis eines fortschrittlichen Prozessknotens eine entscheidende Rolle, der Through Silicon Vias (TSV) und fortschrittliche Schnittstellen unterstützen muss, damit die vertikal gestapelten Komponenten nahtlos verbunden werden können. Doch auch hier es erforderlich, dass die Skalierung weitergeht. Deshalb müssten die vertikalen und lateralen Verbindungen im Gehäuse ebenfalls skalierbar sein, denn nur dann könnte die Steigerung der Verbindungsdichte für mehr Bandbreite und eine verbesserte Energieeffizienz gewährleistet werden. »Eine kostengünstige Interconnect-Skalierung in Kombination mit standardbasierten Verbindungen wie UCIe ist unerlässlich, um ein Chiplet-Ökosystem zu ermöglichen, in dem Plug-and-Play Produktvielfalt und

-anpassung zulässt«, betont Shahriari. In diesem Zusammenhang verweist er auf den Einsatz von Glas als Substratmaterial und fordert eine Weiterentwicklung dieses Ansatzes.

Darüber hinaus müsse dem steigenden Energiebedarf von KI-Anwendungen durch eine Verbesserung der Effizienz der Energieversorgung auf Systemebene und neue Kühlkonzepte auf Komponenten- und Systemebene Rechnung getragen werden. Fortschrittliche Gehäuse-technologien entwickeln sich seiner Meinung nach so, dass die Grenzen zwischen Packaging und Backend-off-Line (BEOL) zunehmend verschwinden. Zugleich werden Gehäuse zu komplexen heterogenen Systemen, sodass auch die »Fertigungs- und Testverfahren weiterentwickelt werden müssen, um sicherzustellen, dass die Ausbeute hoch bleibt«, meint Shahriari. Er richtet außerdem Forderungen an die EDA-Industrie, denn eine modulare Designumgebung, die eine einfache Integration mehrerer Chips in einem Gehäuse ermöglicht, sei von entscheidender Bedeutung. Die Tools müssten eine Partitionierung über verschiedene Chips hinweg sowie deren Co-Design und Co-Optimierung ermöglichen. »In vielen der aktuellen 3DIC-Designumgebungen fehlen jedoch Modelle zur thermischen und mechanischen Belastungssimulation, was zu potenziellen Fehlern und Re-Designs führen kann. Um nahtlose Integration zu gewähr-



Bild 1. Innovationsmatrix. (Bild: Intel)

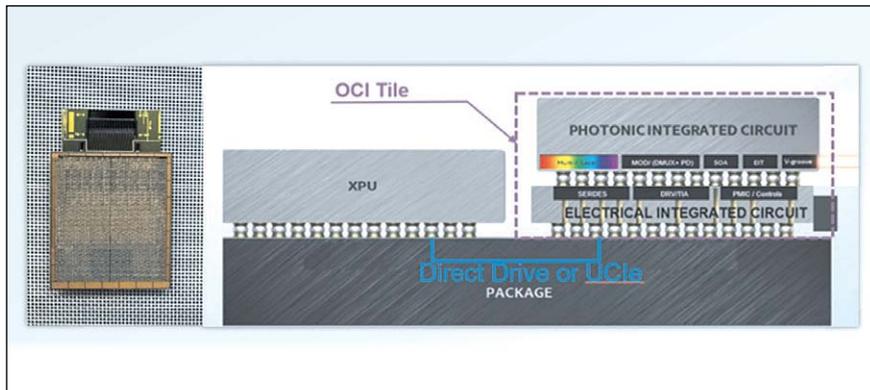


Bild 2. 4 Tb/s optischer Compute-Interconnect (OCI) mit heterogen gestapelten EIC- (elektrisches IC) und PIC-Komponenten (photonische IC). (Bild: Intel)

leisten, müssen 3DIC-Design-Tools alle Schritte von der Implementierung über die Extraktion und Zuverlässigkeitsanalyse bis hin zur Verifizierung abdecken«, fordert Shahriari.

Interconnect

Aber auch der Interconnect steht unter Druck, denn mit einer exponentiellen Skalierung paralleler KI-Arbeitslasten muss auch die Interconnect-Bandbreitendichte steigen, die Latenz und Leistungsaufnahme wiederum sinken. Diese Anforderungen lassen sich durch eine engere Integration mittels 2,5D- und 3D-Montagetechnologien besser erfüllen. Neue Gehäusetechnologien reduzieren laut Shahriari außerdem die Gesamtbetriebskosten (TCO), da die sehr kostspieligen (sowohl preislich als auch mit Blick auf die Leistungsaufnahme) Verbindungen zwischen den GPUs minimieren.

Die Energie, die zur Übertragung jedes einzelnen Datenbits benötigt wird, hängt direkt vom Signalverlust (Channel Loss) ab. »Das Verhältnis zwischen Signalverlust und Energieverbrauch pro Bit hat zur Definition von Industriestandards wie UCIe geführt, die eine energieeffiziente, hochdichte Kommunikation innerhalb eines Gehäuses ermöglichen – UCIe erlaubt Datenraten von bis zu 1,35 TB/s pro Millimeter Die-Umfang bei 1 pJ/bit«, führt Shahriari aus.

Darüber hinaus weist er darauf hin, dass längere Verbindungen innerhalb der Platine und des Racks eine zunehmende Datenserialisierung erforderlich

machen, um die praktikable Signaldichte von Steckverbindern zu berücksichtigen und die Gesamtbandbreite zu erhöhen. Serielle Datenraten pro Kanal haben sich etwa alle drei bis vier Jahre um den Faktor 2 erhöht, einschließlich Industriestandards wie Ethernet, PCIe und OIF-CEI. Die derzeit in der Produktion befindlichen SerDes kommen auf eine Datenrate von 212 Gb/s mit PAM4-Modulation, sodass die Kommunikation innerhalb eines Racks (~1 Meter Reichweite) mit 4 bis 6 pJ/Bit möglich ist.

Mit weiter steigenden Datenraten sinkt bei drahtgebundenen Verbindungen die Reichweite, die zwischen SerDes-Retimern überbrückt werden kann. Weitere Retimer verlängern zwar die Reichweite, allerdings steigen damit auch die Leistungsaufnahme, die Latenzzeit und die Kosten. Um dem entgegenzuwirken wurden optische Verbindungen eingeführt, und das in einer Vielzahl von Anwendungen von Unterseekabeln bis zu Rack-zu-Rack-Verbindungen. Die optische Verbindung passt aber auch zur Skalierungsstrategie für KI-Netzwerke. Aus Sicht von Shahriari müssen optische Verbindungen künftig auch im Rack selbst eingesetzt werden, um Bandbreite bei akzeptablem Energieverbrauch zu skalieren. »Dafür werden derzeit Technologien wie Co-Packaged Optics, kurz CPO, und Direct-Drive-Linearoptik entwickelt«, berichtet Shahriari. Nach seiner Aussage hat Intel jüngst ein vollständig integriertes, bidirektionales »Optical Compute Interconnect«-Chiplet demonstriert. Es basiert auf der hauseigenen Silicon-Photonics-Technologie und erreicht

eine Übertragungsrate von 4 Tbit/s (8 Fasern \times 8 Wellenlängen/Faser \times 32 Gbit/s/Wellenlänge in jede Richtung), aber auch eine Übertragung mit 224 Gb/s PAM4 über 23 km Glasfaser mit direkter linearer Ansteuerung. Laut Shahriari läuft derzeit eine koordinierte Initiative, um den Ausbau des Ökosystems für optische Interconnects innerhalb von Racks zu beschleunigen (Bild 2).

Stromversorgung

Mit dem steigenden Energiebedarf paralleler Workloads wie KI wächst auch die elektrische Leistung pro Gehäuse rasant. Üblicherweise wandeln Motherboard-Spannungsregler (MBVR) die Spannung auf Platinebene (z.B. 12V) in die von den Chips benötigte Spannung um. Typischerweise sitzen diese MBVRs neben dem Gehäuse oder unter dem Gehäuse (Off Package). Doch die von den MBVRs bereitgestellte Stromdichte hält mit zukünftigen Hochleistungschips nicht Schritt. Außerdem sinkt ihre Effizienz mit steigender Leistung und Stromstärke (I²R-Verlust), was sich negativ auf die Systemleistung auswirkt.

Somit sind Ansätze notwendig, mit denen die Spannungsumwandlung näher an den Halbleiter gebracht werden kann. Das ist mit ins Gehäuse integrierten Spannungsreglern (Fully Integrated Voltage Regulators, FIVRs) möglich, die den letzten Schritt der Leistungsumwandlung übernehmen (On Package). Intel hat FIVRs erstmals vor über zehn Jahren in der Haswell-Generation eingeführt. Seitdem wurde dieser Ansatz in vielen Produkten eingesetzt und weiterentwickelt, zum Beispiel in Form von dichteren magnetischen Induktoren und Kondensatoren. Zusätzlich zu den FIVRs hat Intel ein eigenständiges, CMOS-basiertes 2,4-V-IVR-Chiplet (IVR: Integrated Voltage Regulator) entwickelt, das auf der hauseigenen HDMIM-Technologie (High Density Capacitor) basiert. Es nutzt einen kapazitiv geschalteten Spannungsregler (SCVR) mit einem kontinuierlich anpassbaren Spannungswandlungsverhältnis.

Für künftige Anforderungen jenseits von 1 bis 2 kW reicht die MBVR-Architektur nicht mehr aus. Dieses Problem kann gelöst werden, indem die Hochspannungswandlung (12 V) direkt ins Gehäuse integriert wird (**Bild 3**). Besonders effektiv ist ein zweistufiger Ansatz: ein 12-V-SCVR kombiniert mit einem nachgelagerten IVR (1,8 bis 2,4 V). Leistungsdichte und Effizienz dieser zweistufigen Architektur hängen von hochwertigen passiven Komponenten ab – zum Beispiel eingebetteten Deep-Trench-Kondensatoren (eDTC) und magnetischen Induktivitäten zusammen mit On-Die-Kondensatoren. Galliumnitrid (GaN) ermöglicht Hochspannungswandler mit höherer Effizienz und Dichte als siliziumbasierte Lösungen. Da reine GaN-Prozesse keine integrierten Treiber mit hohen Schaltfrequenzen erlauben, ist eine Kombination mit CMOS erforderlich. Intel hat eine GaN-on-Silizium-Technologie entwickelt, dank der sich GaN-Leistungstransistoren und CMOS-Treiber auf demselben 300-mm-Wafer fertigen lassen. Shahriari: »Diese Technologie kann Hochspannungs-IVR-Optionen mit einer Eingangsspannung von bis zu 12 V unterstützen, um eine Leistungsskalierung über 1 bis 2 kW hinaus zu ermöglichen.«

Architektur und Software

Rechenarchitekturen der nächsten Generation müssen exponentielle Verbesserungen bei Systemkennzahlen wie Leistung pro Watt, pro Dollar und pro mm² ermöglichen und zugleich die Herausforderungen in den Bereichen thermische und Power-Integrity meistern. Neue Ansätze sollten aus Shahriaris Sicht also kohärente Systeme ermöglichen, in denen Wafer und Chipllets durch fortschrittliche Verpackungs- und Siliziumprozesse gestapelt und verbunden werden. Zudem müssen sie die nahtlose Integration von benutzerdefinierten Beschleunigern für verschiedene Arbeitslasten unterstützen. Software spielt in der Innovationsmatrix ebenfalls eine entscheidende Rolle. Shahriari fordert, dass sie durch Zusammenarbeit, Standardisierung

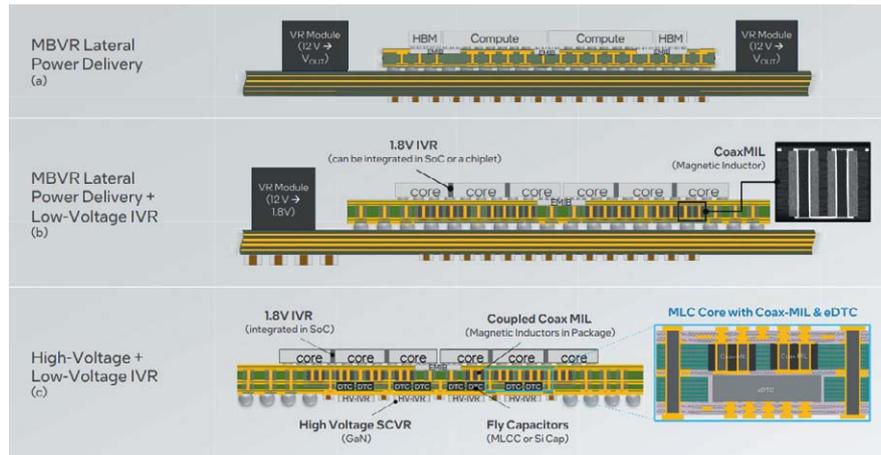


Bild 3. Die Entwicklung der Stromversorgung von Off-Package zu On-Package, um den steigenden Leistungsbedarf zu unterstützen. (Bild: Intel)

und Interoperabilität in Open-Source-Ökosystemen weiterentwickelt wird. Automatisierung solle die Sicherheit erhöhen und Prozesse optimieren, während optimierte Software die Hardware bestmöglich ausnutzen können soll. Die Verteilung von Software auf Tausende von GPUs stellt hohe Anforderungen an Bandbreite und Latenz. KI-gestützte Software hilft, Systeme besser abzustimmen und die Integration zu verbessern.

Blick über die klassische Datenverarbeitung hinaus

Technologien wie neuromorphe und Quantencomputer sind entscheidend für zukünftige Durchbrüche bei Effizienz und Geschwindigkeit. Seit 2018 haben die Loihi-Forschungschips von Intel, die in mehr als 250 Forschungslaboren weltweit eingesetzt werden, gezeigt, dass neuromorphe Chips, die mit CMOS-Prozesstechnologie hergestellt werden, bei einer Vielzahl von Beispielen Algorithmen und -anwendungen eine Leistungssteigerung um Größenordnungen ermöglichen können. Viele dieser Beispiele basieren auf neuartigen, vom Gehirn inspirierten Algorithmen, die mit heutigen Software- und KI-Methoden nicht kompatibel sind. Eine neue Klasse von Ansätzen deutet laut Shahriari jedoch darauf hin, dass in naher Zukunft eine 1000-fache Steigerung für die heute weit verbreiteten Deep-Learning- und Transformationsmethoden erreichbar sein wird.

Quantencomputer wiederum können hochkomplexe Probleme exponentiell schneller als herkömmliche Computer lösen. Sie können nach Ansicht von Shahriari zukünftig Branchen revolutionieren und Probleme wie Klimawandel, Arzneimittelentwicklung und -forschung etc. schneller lösen. Allerdings sei diese Hardware nicht ausreichend skalierbar und robust, und es sei entscheidend, diese Technologie aus dem Labor in den Bereich der Technik zu überführen. Eine weitere Herausforderung für KI mit Quantencomputern besteht seiner Aussage nach darin, große Datenmengen in diese komplexen Maschinen einzuspeisen.

Intels Ansatz in der Quantenforschung umfasst den gesamten Computing-Stack, einschließlich der Qubit-Herstellung, über Kryo-CMOS-Technologien zur Steuerung der Qubits bis hin zu Software, Compiler, Algorithmen und Anwendungen.

Der Vorteil für die KI ist eindeutig: Quantencomputer können komplexe Berechnungen schneller durchführen als klassische Computer, was ein kürzeres Training und eine schnellere Analyse von KI-Modellen ermöglichen könnte. Zwei der wichtigsten Prinzipien des Quantencomputings sind Superposition und Verschränkung, die die gleichzeitige Suche nach Lösungen ermöglichen, was sich direkt auf das Training und die Optimierung von KI-Modellen auswirken könnte. Die Möglichkeit, große Datenmengen parallel zu analysieren, kann auch die Fähigkeit

der KI verbessern, Muster zu erkennen, zum Beispiel in Bildern oder Sprache. Anstatt klassische KI-Algorithmen zu verwenden, könnten neue KI-Algorithmen entwickelt werden, die direkt für die Nutzung von Quanteneigenschaften optimiert sind. Shahriari bekräftigt, dass Quantencomputer klassische Computer nicht ersetzen, sondern eher als Rechenbeschleuniger für spezielle Anwendungen eingesetzt werden.

»Deshalb wird die Systemlösung für KI in Zukunft wahrscheinlich eine hybride Implementierung von klassischem und Quantencomputing nutzen«, prognostiziert Shahriari.

Zusammenarbeit im Ökosystem

Die schnelle Entwicklung der nächsten Generation von Hochleistungsrechnern erfordert Shahriaris Meinung nach eine branchenweite Zusammenarbeit in der Innovationsmatrix. Durch die

Zusammenarbeit mit Endnutzern und Partnern über den gesamten Technologie-Stack hinweg – von der Fertigung über Design-Tools und IP bis hin zum Systemdesign und zur Software – könne sichergestellt werden, dass die Entwicklungen marktorientiert, termingerecht und ökologisch nachhaltig sind und dass vorhandenes Know-how und Fortschritte im gesamten Ökosystem genutzt werden.

Die Co-Optimierung auf Systemebene erfordert eine enge Zusammenarbeit, um schnelle Fortschritte erzielen zu können. Interdisziplinäres Fachwissen und der Austausch von Wissen in strategischen Partnerschaften sind entscheidend für die effiziente Problemlösung sowie für verkürzte Entwicklungszyklen. Shahriari ist überzeugt: »Die Nutzung branchenübergreifender Stärken vermeidet Doppelarbeit und ermöglicht es, dass Teams effektiver arbeiten können.«

Herausforderungen und Chancen für die Branche

Vor fast zwanzig Jahren stieß die Skalierung der CPU-Taktfrequenz an ihre Grenzen. Um die Rechenleistung weiter zu erhöhen, wurden Parallelprozessorarchitekturen entwickelt, zusammen mit einer Vielzahl begleitender Technologien – beispielsweise für die Halbleiterfertigung, für das Packaging oder für die Kühlung. Shahriari ist überzeugt, dass die Industrie heute in einer ähnlichen Situation ist, in der die exponentielle Leistungsskalierung, diesmal zur Unterstützung der KI, auf grundlegende Herausforderungen bezüglich Leistung, Konnektivität und Kosten stößt. »Auch hier wird eine schrittweise Skalierung unserer Systeme nicht ausreichen, und wir werden neue Ansätze zur Lösung dieses Problems benötigen – eine KI-Innovationsmatrix.«, so Shariari abschließend. st

Transformation zum software-definierten Fahrzeug

Ohne Halbleiter klappt das SDV sicherlich nicht

Peter Schiefer, President und CEO der Automotive Division von Infineon Technologies, umreißt in seiner Keynote auf der diesjährigen ISSCC die entscheidende Rolle, die Halbleiter beim Übergang zum software-definierten Fahrzeug (SDV) spielen. Von Iris Stroh



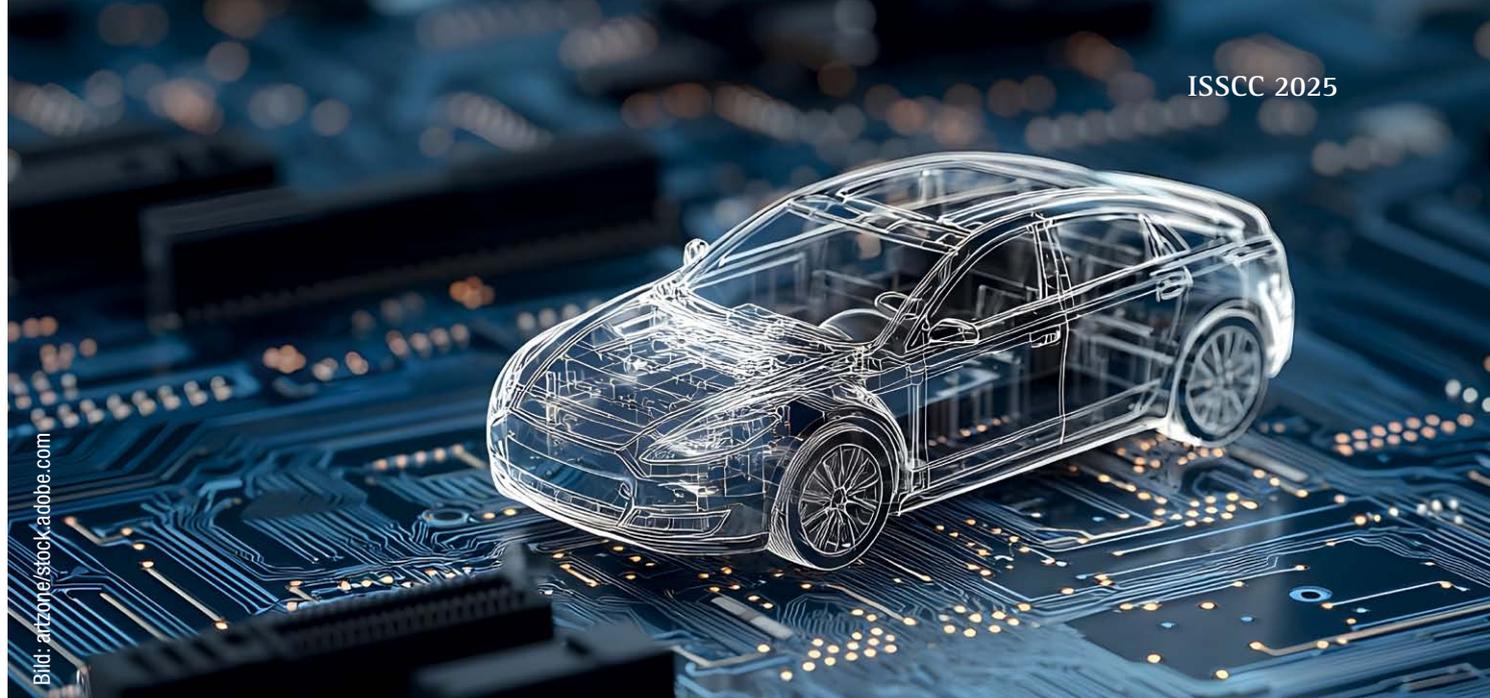


Bild: arzzone/stock.adobe.com

»Die Automobilindustrie durchläuft einen großen Wandel, ich denke, ich kann mit Fug und Recht behaupten, dass wir in den nächsten fünf Jahren mehr Veränderungen erleben werden als in den letzten 50 Jahren«, lautet die Überzeugung von Schiefer. In Zukunft sei das Auto vollständig vernetzt, es wird immer online und es wird benutzerorientiert sein, sprich es wird viele Einstellungs- und Aktualisierungsmöglichkeiten geben. Dazu kommt noch das automatisierte und vollelektrische Fahren. »Halbleiter werden die Digitalisierung, aber auch die Dekarbonisierung der Mobilität vorantreiben. Und das ist wichtig, denn 25 Prozent der weltweiten CO₂-Emissionen stammen aus dem Bereich Transportation«, erklärt Schiefer. Aber auch in Hinblick auf »Vision Zero«, mit dem die Europäische Union sich das Ziel gesetzt hat, über einen höheren Automatisierungsgrad beim Fahren die Zahl der Verkehrstoten bis 2050 auf null zu bringen. »Und dafür braucht man zuverlässige Elektronik. Das heißt, dass die neueste und beste Automobilqualität ein Muss ist, dass funktionale Sicherheit ein Muss ist und dass sichergestellt ist, dass die Cybersicherheit das gesamte System des Autos abdeckt«, betont Schiefer.

Die Automobilindustrie ist ein wichtiger Absatzmarkt für die Halbleiterindustrie

Dass Schiefer auf einer ausgemachten Halbleiterkonferenz über die Automobilindustrie spricht, kann er leicht

erklären: Die Automobilindustrie wird zum immer wichtigeren Absatzmarkt für die Halbleiterhersteller. Obwohl die Anzahl der verkauften Pkws stagniert, steigt der Halbleiter-Content seit Jahren. Laut Schiefer waren im letzten Jahr bereits 11 von 89 Millionen Fahrzeugen vollständig elektrifiziert (BEV: Battery Electric Vehicle). Schiefer prognostiziert: »Bis zum Ende dieses Jahrzehnts wird der Anteil der BEVs etwa ein Drittel ausmachen. Und das ist der Grund dafür, dass der Markt für Halbleiter trotz stagnierender Produktion deutlich wächst.« Denn wenn man sich den Halbleiteranteil pro Auto im letzten Jahr ansieht, hatte ein Fahrzeug mit klassischem Verbrennungsmotor einen Halbleiteranteil von rund 750 Dollar, in einem Elektroauto waren es bereits 1300 Dollar. »Dieser Halbleiteranteil wird weiter steigen, da immer mehr Funktionen und Merkmale in das Auto eingebaut werden«, ist Schiefer überzeugt.

Das software-definierte Fahrzeug

Aus Schiefers Sicht sprechen zwar viele Gründe für ein SDV, die wichtigsten sind seiner Meinung nach aber die Möglichkeit, ein individuelles Benutzererlebnis zu schaffen und darüber hinaus die Möglichkeit zu erhalten, das Auto mit der Cloud zu verbinden, um Software-Updates zu empfangen.

Vor allem der letztgenannte Punkt hat Vorteile, denn dann könnten die OEMs Funktionen und Daten monetarisieren

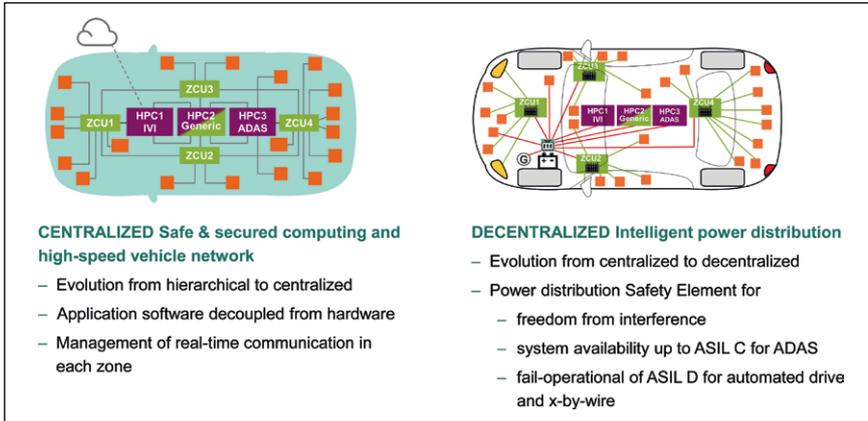
und Funktionen und Funktionalitäten upgraden. So könnte man zum Beispiel nach dem Kauf eines Gebrauchtwagens Funktionen und Features nachbestellen, die der Erstbesitzer nicht haben wollte. »Das Auto kann im Laufe seiner gesamten Lebensdauer mit neuen Funktionen ausgestattet werden«, erläutert Schiefer weiter.

Software und Hardware werden getrennt

Um ein software-definiertes Auto zu bauen, müssen zuallererst Software und Hardware getrennt werden. Das hat nach Ansicht von Schiefer viele Vorteile wie OTA-Updates, verkürzte Time-to-Market oder Personalisierung des Fahrzeugs. Schiefer: »Wenn man Software und Hardware voneinander trennt, kann man auf beiden Seiten innovativ sein. Dies erhöht die Geschwindigkeit und bietet auch mehr Innovationsmöglichkeiten.« Schiefer führt außerdem an, dass SDVs die Realisierung von Level-5-Fahrzeugen (kein Fahrer) leichter machen.

Wandel in der E/E-Architektur

Bislang waren in Fahrzeugen mehr als 100 separate elektronische Steuergeräte (ECU) mit eigener Software und Hardware eingebaut. Das erfordert rund fünf Kilometer Kabel mit einem Gewicht von 25 Kilogramm. »Dieser Ansatz eignet sich nicht, um einen konsolidierten Software-Ansatz zu verfolgen«, meint Schiefer. Also versuchen die OEMs, die



SDVs bedingen eine zentralisierte Rechenleistung und eine dezentralisierte Stromversorgung. (Bild: Infineon)

Anzahl der verteilten Steuergeräte zu reduzieren.

Der erste Schritt in diese Richtung ist die Domänenarchitektur, bei der Funktionen in einem Domänen-Controller logisch zusammenfasst werden, es gibt beispielsweise einen Domänen-Controller für Infotainment, einen für Body-Control, einen für Power-Train. Fahrzeuge mit dieser Architektur sind bereits auf der Straße. Schiefer erklärt weiter: »Der Nachteil der Domänenarchitektur ist, dass es sich um logische Cluster handelt und dass das Auto im Gegensatz zu einem Smartphone große Abmessungen hat.«

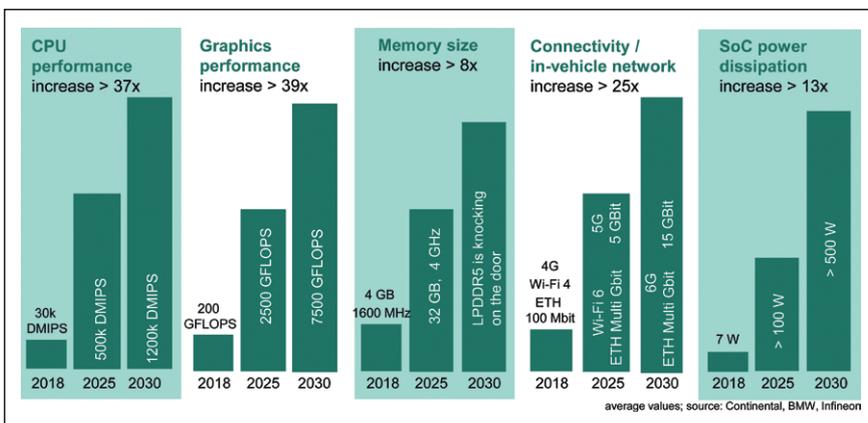
Die Weiterentwicklung der Domänenarchitektur ist die Zonenarchitektur – eine Architektur, die ebenfalls auf Clustern beruht, bei denen aber die Funktionen aufgrund ihrer physischen Lage in einer Zonen-Control-Unit gebündelt werden, zum Beispiel in jeder Ecke des Fahrzeugs. Die beiden Ansätze

werden gemischt, sodass einige Funktionen in einem Domänen- und einige in Zonen-Controllern zusammengefasst werden. Langfristig erwartet Schiefer, dass alle Funktionen, die logisch geclustert werden können, in einem oder mehreren zentralen Rechnern im Auto zusammengeführt werden, plus zusätzliche Zone-Control-Units (ZCU). Schiefer teilt gemäß dieser Architektur die Halbleiter in drei Bereiche ein. Zentralrechner, ZCU und Endpunkte. Die zentralen Rechner (HPC: High Performance Computing) benötigen SoCs mit hoher Rechenleistung, die laut Schiefer mit Fertigungstechnologien im einstelligen Nanometerbereich umgesetzt werden. Dazu kommen Safety-MCUs und eine ausfallsichere Stromversorgung. Die Zonen-Mikrocontroller wiederum übernehmen Steuerungs- und Gateway-Funktionen einschließlich Protokollübersetzung. Der dritte Bereich umfasst die zahlreichen verschiedenen

Endpunkte mit ihren eigenen ECUs. In diesem Bereich sind zum Beispiel Aufgaben wie die lokale Kontrolle über intelligente Echtzeitmechatronik (wie Getriebe, Motorsteuerung, Lenkung usw.) angesiedelt, aber auch Funktionen wie Sitzverstellung, elektrische Fensterheber, Zentralverriegelung und Radar. Die Rechenleistung wird zwar zentralisiert, im Gegensatz dazu wird aber die Stromversorgung dezentralisiert. Der bisherige Ansatz mit einer Batterie und einem großen Kabelbaum funktioniert »aus Sicherheitsgründen nicht mehr, weil bei dieser neuen E/E-Architektur sichergestellt sein muss, dass alle Zonen- und Hochleistungs-Rechencluster eine unabhängige und redundante Stromversorgung haben«, erklärt Schiefer.

Mikrocontroller und ihre Herausforderungen

»Früher hatten die Mikrocontroller zwei Hauptaufgaben: System-Management und Echtzeitsteuerung«, sagt Schiefer. Heute müssen sie viel mehr Aufgaben übernehmen, sodass mittlerweile in vielen Fällen diverse Hardware-, einschließlich KI-Beschleuniger, und Datenverarbeitungs-Engines notwendig sind. Das heißt: Diese Mikrocontroller sind mit viel mehr Kernen ausgestattet. Darüber hinaus muss der Controller in der Lage sein, gewisse Funktionalitäten aufrechtzuerhalten, selbst wenn Teile des Systems ausfallen. Schiefer betont: »Wenn es zu einem Systemausfall kommt, muss das System in der Lage sein, sich selbst zu reparieren.« Diese Ausfallsicherheit ist natürlich nicht für alle Kerne notwendig, »aber für die Echtzeitsteuerung ist das sehr wichtig«, ergänzt Schiefer. Darüber hinaus muss die Hardware skalierbar sein, damit eben verschiedene Funktionalitäten mithilfe unterschiedlicher Prozessorkerne realisiert werden können. Schiefer ist der Überzeugung, dass RISC-V dafür der richtige Ansatz ist. Die Open-Source-ISA ist skalierbar und flexibel, »Anpassungen sind leicht möglich, und sie erfüllt alle Anforderungen, die ich zuvor erwähnt habe«, legt Schiefer dar.

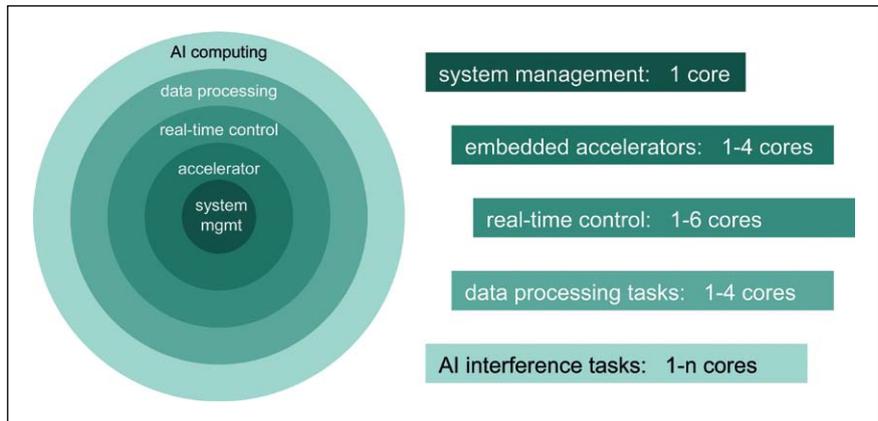


Die Anforderungen an die Hardware steigen: Leistungssteigerungen bei Komponenten in den Jahren 2018, 2025 und 2030. (Bild: Infineon)

Über KI im Fahrzeug wird am häufigsten diskutiert, wenn es um das automatisierte Fahren geht. Sie übernimmt laut Schiefer aber noch ganz andere Funktionen. Er verweist auf ein Beispiel, bei dem die Heckklappe mithilfe des Fußes geöffnet werden kann. Früher arbeiteten diese Systeme nicht immer zuverlässig, doch »jetzt gibt es neue Systeme, bei denen KI den Sensor optimiert, was die Funktion viel robuster macht.« Ein weiteres Beispiel sind Elektrofahrzeuge, in denen das Batterie-Management KI-gestützt ist. Schiefer erklärt: »Das hat einerseits den Vorteil, dass die Lebensdauer der Batterie verlängert wird. Andererseits erhält man dadurch jederzeit einen sehr guten Überblick über den Zustand der Batterie.«

Die Stromversorgung ist in SDVs einerseits dezentralisiert, andererseits muss sie redundant ausgelegt sein. Darüber hinaus sind Halbleiter-Sicherheitselemente notwendig, die die klassischen Schmelzsicherungen ersetzen. Diese halbleiterbasierten Sicherheitselemente stellen hohe Systemverfügbarkeit und Widerstandsfähigkeit sicher, und zwar bis Automotive Safety Integrity Level (ASIL) C für ADAS und einen Fail-Operational-Level von ASIL D für automatisierte Fahr- und X-by-Wire-Anwendungen. Dass es halbleiterbasierte Sicherheitselemente anstelle von Schmelzsicherungen sein müssen, liegt an der geforderten Geschwindigkeit mit der die Sicherheitselemente reagieren müssen: weniger als 500 Mikrosekunden – mit Schmelzsicherungen oder Relais ist das nicht möglich.

Der dritte Bereich, den Schiefer im Zusammenhang mit bestehenden Herausforderungen nennt, ist das Hochgeschwindigkeitsnetzwerk. Das gestiegene Datenvolumen hat dazu geführt, dass Ethernet ins Auto kam. Im High-End-Bereich (Backbone) dominiert Ethernet, das von 100 Mb/s bis 1 Gb/s reicht. Im Bereich der Domänen- oder Zonen-Controller ist dagegen noch eine ganze Vielzahl von Kommunikationsstandards (CAN FD, Flexray, LIN etc.) zu finden. Aber auch hier gibt es den Trend, Ethernet 10BASE-T1S einzuführen, wobei es laut Schiefer trotzdem noch dauert, bis hier ein einheitlicher Standard zum Einsatz kommt.

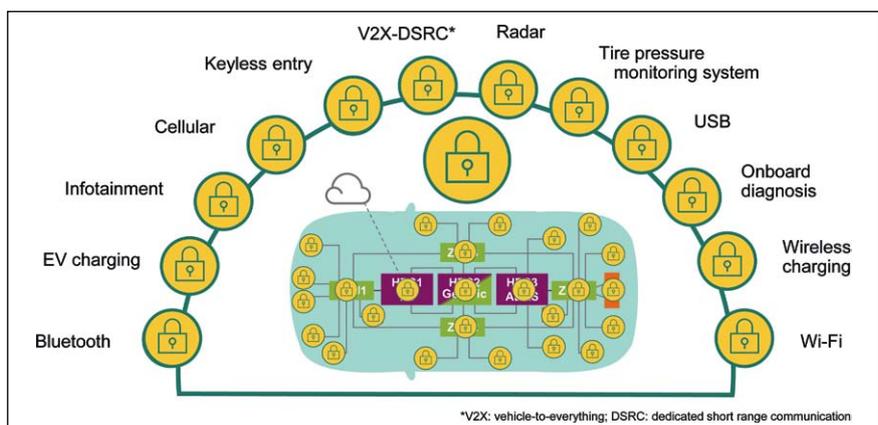


Heutige Mikrocontroller müssen viel mehr Aufgaben übernehmen, sodass auch immer mehr Prozessorkerne integriert werden müssen. (Bild: Infineon)

Darüber hinaus gibt es im Fahrzeug mit Wi-Fi und Bluetooth auch drahtlose Kommunikationsstandards, zum Beispiel um Smartphones mit dem Infotainmentsystem des Fahrzeugs zu verbinden oder schlüssellosen Zugang zum Auto zu ermöglichen. Mit den steigenden Zugängen ins Fahrzeug steigt auch die Gefahr für Hackerangriffe.

Neben herkömmlichen logischen Angriffen setzen Angreifer zunehmend physische Methoden wie Seitenkanalangriffe ein, um durch Beobachtung des Systemverhaltens sensible Informationen zu extrahieren. Eine weitere erhebliche Bedrohung sind Fehlerinjektionsangriffe, bei denen Programme oder Daten durch Störungen oder Strahlung manipuliert werden. Diese Verlagerung zu physischen Angriffen unterstreicht den Bedarf an robusten Hardwareoptionen einschließlich ausreichender Rechenleistung und Konsistenzprüfungen.

Um die Sicherheit dieser Systeme zu bewerten, sind gründliche Tests und Überprüfungen unerlässlich. Neben ISO 21434 werden voraussichtlich auch andere Standards wie der Cyber-Resilience Act (CRA) Anforderungen für Gegenmaßnahmen und Tests mit sich bringen. »Die Automobilindustrie muss beim Thema Cybersecurity einen ganzheitlichen Ansatz verfolgen. Sie muss das gesamte System und alle einzelnen Eintrittspunkte schützen. Dazu muss Software und Hardware kombiniert werden, mit Software allein ist ein umfassender Schutz nicht möglich. Und jeder muss sich im Klaren darüber sein, dass es hundertprozentige Sicherheit nie geben wird«, betont Schiefer. Schiefer abschließend: »Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Verbraucher das Fahrzeug in ihr Leben integriert haben wollen, und softwaredefinierte Fahrzeuge sind der Weg, dies zu erreichen.«



Das Thema Cybersecurity wird auch wegen der zunehmenden Anzahl an Angriffspunkten immer wichtiger. (Bild: Infineon)

Unterschied zwischen MTBF und der Lebensdauer von AC/DC-Stromversorgungen

Zwei Parameter – unterschiedliche Bedeutung

MTBF und die Lebensdauer von Stromversorgungen sind zwei unterschiedliche, aber komplementäre Parameter für die Bewertung der Zuverlässigkeit und Langlebigkeit eines Produkts. MTBF (Mean Time Between Failures) hilft, die Häufigkeit von Ausfällen während der Betriebszeit zu verstehen, die Lebensdauer dagegen gibt Auskunft über die gesamte erwartete Nutzungsdauer des Produkts.



Bild: Cagkan/stock.adobe.com

Stromversorgungen sind das schlagende Herz aller elektronischen Geräte. Ohne sie ist Funktionalität unmöglich. Darum müssen Hersteller von AC/DC-Stromversorgungen den Kunden die hohe Qualität ihrer Produkte zusichern, um wettbewerbsfähig zu bleiben. Zuverlässigkeit ist ein entscheidender Indikator zur Beschreibung der Produktqualität, und die Ausfallrate von Produkten wird häufig verwendet, um ihre Zuverlässigkeit zu messen. Im Laufe der Zeit neigt die Funktionalität von Produkten dazu abzunehmen. Die Ausfallrate eines Produkts schwankt im Laufe seiner Lebensdauer und folgt typischerweise einer Badewannenkurve, wie in der nachfolgenden Grafik dargestellt, die insbesondere auf die Ausfallszenarien elektronischer Produkte anwendbar ist. Diese Kurve kann grob in drei Phasen unterteilt werden (**Bild 1**)

1. Frühausfallphase

Bei der ersten Phase handelt es sich um die Frühausfallphase, die zu Beginn der Lebensdauer eines Produkts auftritt. In

dieser Zeit weist das Produkt eine hohe Ausfallrate auf, hauptsächlich aufgrund von Herstellungsfehlern, die in den Vorversandprüfungen möglicherweise nicht erkannt wurden. Bei Cincon (Vertrieb: Emtron) wird jede Stromversorgung zu 100 Prozent geprüft, um sicherzustellen, dass jede Einheit alle Spezifikationen erfüllt, bevor sie versendet wird. Dadurch werden Frühausfälle effektiv eliminiert.

2. Nutzungsphase

Phase zwei stellt die zufällige oder konstante Nutzungsphase dar. Dies ist auch die normale Ausfallrate des Designs. Diese Phase wird als die Periode angenommen, in der das Produkt im Einsatz sein wird. Die Ausfallrate für diese Periode wird als niedrig und flach erwartet und bleibt somit nahezu konstant.

3. Verschleißausfallphase

Während Produkte über einen längeren Zeitraum im Einsatz bleiben, beginnt die Ausfallrate aufgrund des

Night of Electronics

Save the date
22. Mai 2025

PARTNER



Bürklin

CODICO

CONRAD

DigiKey



NÜRNBERG MESSE

PULS



Ask for more
information



Stand 31.03.2025

Powered by

Elektronik

elektroniknet.de

Markt&Technik

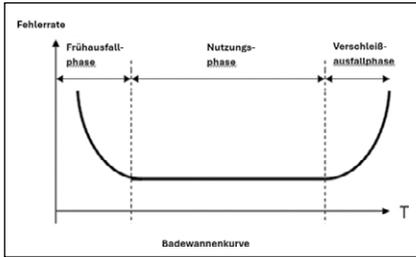


Bild 1. Badewannenkurve (Grafik: Emtron)

Materialverschleißes zu steigen. Dieser Effekt beschleunigt sich mit der Zeit, bis schließlich alle Einheiten ausfallen.

MTBF

MTBF und Lebensdauer sind wichtige Parameter, die in der Produktdesignphase berücksichtigt werden müssen. Sie können helfen, Problemstellen zu lokalisieren, indem überbeanspruchte Teile identifiziert oder der größte Beitrag zur Ausfallrate gefunden wird. Sie sind auch Schlüsselindikatoren für Entwickler/Ingenieure, um eine gute Stromversorgung auszuwählen. Sicherheitsingenieure verwenden häufig verschiedene Methoden und Standards, um den MTBF-Wert von Produkten zu berechnen. Es gibt mehrere Zuverlässigkeitsvorhersage-Standards, darunter MIL-HDBK-217F und Telcordia SR-332 (Bellcore). Diese beiden sind derzeit die beliebtesten Zuverlässigkeitsstandards auf dem Markt und werden in militärischen und Kommunikationsanwendungen verwendet. MIL-HDBK-217 ist ein weit verbreiteter Standard, der aus zwei Berechnungsmethoden besteht. Eine ist als Part Stress Analysis Prediction bekannt, die in späteren Designphasen anwendbar ist; die andere ist die Parts Count Reliability Prediction, die in frühen Designphasen und während der Ausarbeitung des Designs benutzt wird. Bei der Part Stress Analysis Prediction wird die Zuverlässigkeit durch Summieren der Ausfallrate jedes Teils bestimmt. Für jedes Teil wird die Ausfallrate individuell bewertet und berechnet, indem die Variablen Umgebungstemperatur, elektrische Belastung, Basis-Ausfallrate, Leistungsbewertung, Betriebsumgebungsfaktor und Teilequalitätsfaktor einbezogen werden.

$\lambda_p = \lambda_b * \pi_Q * \pi_S * \pi_T * \pi_E$ (failures/ 10⁶ hrs)
 Unit failure rate(λ_u) = $\sum_{i=1}^n N_i \lambda_{pi}$
 where:
 λ_b : Based Failure Rate
 π_Q : Quality Factor
 π_S : Power Stress Factor
 π_T : Temperature Factor
 π_E : Environment Factor
 N_i : Quantity of ith part
 λ_{pi} : Failure rate of ith part
 MTBF= 1/ λ_u (hrs)

Die Gleichung (Kasten, oben) ist die Formel zur Berechnung der Teileausfallrate λ_p . Ein Beispiel für ein Leistungsmodul: Wenn die MTBF= 1000 kh (etwa 114 Jahre) beträgt, bedeutet dies nicht, dass jedes Modul 114 Jahre lang ohne Ausfall arbeiten kann. Aus MTBF= 11/ λ ergibt sich: $\lambda = 11/MTBF = 11/114$ Jahre; das heißt, die durchschnittliche Ausfallrate dieses Leistungsmoduls beträgt etwa 0,88 % pro Jahr. Mit anderen Worten: 8,8 Einheiten von 1000 Stück fallen pro Jahr im Durchschnitt aus.

Lebensdauer

Bei einer AC/DC-Stromversorgung ist ein entscheidendes Bauteil der interne Aluminium-Elektrolytkondensator. Dieser Kondensator zeichnet sich als das Bauteil mit der kürzesten Lebensdauer aus und wird deshalb auch als Critical Component bezeichnet. Es ist möglich, die erwartete Lebensdauer von Stromversorgungen durch die Bewertung der erwarteten Lebensdauer dieses Kondensators zu schätzen. Dessen Langlebigkeit hängt von verschiedenen anwendungsspezifischen Faktoren ab, wobei die Betriebstemperatur ein entscheidender Faktor ist.

Sie spielt eine bedeutende Rolle bei der Alterung der internen Strukturen und der Verschlechterung der elektrischen Eigenschaften im Laufe der Zeit. Bei Elektrolytkondensatoren kann die erwartete Lebensdauer durch Reduzierung der Temperatur des Bauteils um 10 °C verdoppelt werden (Arrhenius-Gleichung). Bei Polymer-Kondensatoren ist eine zehnfache Verlängerung

$L = L_o \times 10^{\frac{T_m - T_o}{20}}$ for polymer capacitor
 $L = L_o \times 2^{\frac{T_m - T_o}{10}}$ for electrolytic capacitor
 where:
 L_o : Lifetime at rated Temperature
 T_m : Allowable Maximum Temperature
 T_o : Capacitor Temperature on operation

der Lebensdauer durch eine Reduzierung der Temperatur um 20 °C am Bauteil erreichbar. Im Kasten rechts oben sind die Formeln zur Schätzung der Lebensdauer dargestellt.

Wie unterscheidet sich MTBF von der Lebensdauer?

Laut den zuvor bereitgestellten Informationen liegt der Hauptunterschied darin, dass MTBF alle Komponenten umfasst, während sich die Lebensdauer ausschließlich auf die Elektrolytkondensatoren konzentriert. Es ist auch wichtig, dass bei der MTBF-Berechnung verschiedene Methoden angewendet werden. MTBF ist ein statistischer Wert, der die durchschnittliche Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Ausfällen eines Systems angibt. Dagegen bezeichnet die Lebensdauer oder auch Nutzungsdauer die gesamte Betriebszeit eines Produkts, bis es endgültig ausfällt und nicht mehr repariert werden kann.

Fazit

MTBF und Lebensdauer sind also zwei unterschiedliche, aber komplementäre Parameter für die Bewertung der Zuverlässigkeit und Langlebigkeit von Produkten. MTBF hilft dabei, die Häufigkeit von Ausfällen während der Betriebszeit zu verstehen und ist besonders nützlich für die Planung von Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen. Dagegen gibt die Lebensdauer Aufschluss über die gesamte erwartbare Nutzungsdauer eines Produkts und ist entscheidend für die langfristige Planung und den Austausch von Komponenten. Beide Parameter sind unerlässlich, um die Qualität und Zuverlässigkeit von elektronischen Geräten und Systemen zu gewährleisten. eg



Jan Wanior (links) und Dr. Helko Meuche (rechts) rechnen nicht mit negativen Auswirkungen von Trumps Zollpolitik auf die Lieferkette von Weichferriten nach Europa, sie sehen aber mögliche Risiken auf der Nachfrageseite. (Bild: MB Electronic)

»Green Energy« lässt Nachfrage nach Weichferriten wachsen

»Für uns stehen Expertise und Qualität an erster Stelle«

Jan Wanior, Leiter Vertrieb und Marketing bei MB Electronic, und Dr. Helko Meuche, Vertriebsleiter Magnetics bei MB Electronic, können sich über ein deutliches Umsatzwachstum in den letzten Jahren freuen. Einer der Treiber: Green Energy. Zwar sehen sie keine Auswirkungen von US-Präsident Trumps Zollpolitik auf die Lieferkette nach Europa, aber Risiken auf der Nachfrageseite.

Sie vertreiben als MB Electronic Kühltechnik, Widerstände und Kerne. Wie hoch ist derzeit der Anteil der Weichferrite am Umsatz?

Jan Wanior: Unser Umsatzanteil mit weichmagnetischen Materialien beträgt etwa 50 Prozent. Weichmagnetische Materialien sind aber nicht nur Ferritkerne, sondern auch Pulverkerne wie Alloy oder Eisen und amorphe sowie nanokristalline Bandkerne.

Die Branche nutzt diese Begriffe. Leider werden weder in Messekatalogen noch in der Presse diese Begriffe oder die vollständige Materialpalette abgedeckt. Ferritkerne, hier die weichmagnetischen Ferrite, sind mit am bekanntesten und haben dadurch mehr Aufmerksamkeit erlangt.

Hat sich der Anteil der weichmagnetischen Materialien über die Jahre verändert?

Dr. Helko Meuche: Nein, der Anteil der weichmagnetischen Materialien am Gesamtgeschäft der MB Electronic ist stabil und gemeinsam mit den anderen Geschäftsfeldern in den letzten Jahren solide gewachsen.

Wir sind insgesamt in den letzten drei Jahren gewachsen, mit einer Verdopplung von 2021 auf 2023 und einem Rückschritt um etwa 25 Prozent im letzten Jahr. In Summe ergibt sich daraus über die vergangenen drei Jahre ein Wachstum von 50 Prozent, das sich über alle Produktbereiche erstreckt.

Weichferrite lassen sich auf die unterschiedlichsten Arten einsetzen. In welche Richtung geht die Mehrheit Ihrer Anfragen: Drosseln, Transformatoren oder EMV-Bauteile?

Wanior: Pulverkerne werden überwiegend in Drosseln eingesetzt, geringfügig auch bei EMV-Anwendungen. Weichferrite ohne Luftspalt kommen in Trafos und EMV-Anwendungen zum Einsatz, mit eingeschliffenem Luftspalt können sie aber auch für Drosseln verwendet werden. Ein weiterer Schwerpunkt liegt in den letzten Jahren auf Anwendungen im induktiven Laden, beispielsweise für Flurförderfahrzeuge. Bei amorphen oder nanokristallinen Kernen ist der Einsatz vergleichbar mit dem weichmagnetischer Ferrite mit Schwerpunkt stromkompensierte Drosseln.

Wenn Sie die Anwendungsbereiche Ihrer Kunden betrachten, was sind die Haupteinsatzgebiete der von Ihnen gelieferten Weichferrit-Lösungen: Automotive, Industrie, Energie?

Dr. Meuche: Bisher war das Haupteinsatzgebiet unserer Produkte eher industrielle Stromversorgungen für die Bereiche Maschinenbau, Automatisierungs- oder Medizintechnik. In den letzten fünf Jahren ist besonders der Bereich Green Energy gewachsen. Hier sind vor allem Applikationen wie Solarwechselrichter, DC-Schnellladesäulen oder die Hochvolt-Gleichspannungsübertragung zu nennen. Zusätzlich sehen wir eine starke Nach-

Aktuell beträgt die Regellieferzeit bei unseren weichmagnetischen Produkten etwa 24 Wochen.

frage im Bereich der Ladesäulen sowie in der Sensorik, wir liefern hier vor allem Schalenkerne für induktive Näherungsschalter.

Welche Bedeutung hatte die Lieferkette für Weichferrite in den Jahren der Corona-Pandemie?

Wanior: Während der Covid-Pandemie, mit der damit verbundenen temporären Abschottung Chinas, wurden die Lieferketten vor allem 2020/21 belastet. Dennoch waren wir immer lieferfähig. Über unser Lager konnten wir Schwankungen weitgehend abpuffern. Während der darauffolgenden Allokation in den Jahren 2022 und 2023 waren die weichmagnetischen Materialien nicht betroffen. Der Großteil dieser Produkte wird in Asien mit Schwerpunkt China produziert. Geringe Fertigungskapazitäten sind in Europa und Amerika vorhanden. In den Medien finden Diskussionen zur Liefersicherheit überwiegend bezüglich Halbleitern statt. Für die Leistungselektronik sind weichmagnetischen Bauteile ebenso unverzichtbar.

Ihre Lieferanten in puncto Weichferrite sind Micrometals und DMEGC. Warum haben Sie sich für diese Lieferanten entschieden?

Dr. Meuche: Wir sind schon über Jahrzehnte für die Alloy-Kerne einer der wichtigsten Vertriebspartner von Micrometals. Dies zeigt, wie wichtig es ist, in diesem Geschäft sichere und langfristige Partner zu haben. Daher arbeiten wir in diesem Bereich überwiegend mit den Marktführern zusammen. Für uns stehen Expertise und Qualität an erster Stelle. Auch die Partnerschaft mit DMEGC hat sich über fast zehn Jahre solide entwickelt. DMEGC ist global einer der beiden größten Ferrithersteller. Dort beziehen wir ebenfalls die nanokristallinen Kerne.

Welchen Leistungsbereich decken Sie in puncto Weichferrit-Lösungen ab?

Wanior: Unsere Kerne werden in Stromversorgungen von wenigen Watt, in DC-Ladesäulen und Solarwechselrichtern im kW-Bereich, aber auch in der Hochvolt-Gleichspannungsübertragung bei einigen GW eingesetzt. Hier sind alle Leistungsklassen vertreten.

Welches sind aus Ihrer Erfahrung bei der Suche nach der passenden Lösung für die Applikation des Kunden die größten Knackpunkte?

Dr. Meuche: Bisher basierte die Produktauswahl überwiegend auf der Erfahrung und Empirie der jeweiligen Entwickler. Dazu ist ein grundlegendes Verständnis der weichmagnetischen Materialien zwingend erforderlich. In den letzten Jahren wird diese Erfahrung zunehmend auch von Designtools unterstützt. Diese Tools erleichtern die Kernausswahl, aber ohne den Aufbau von Prototypen geht es noch immer nicht. Mittlerweile laufen auch hier die ersten Ansätze, KI-basierte Designs zu entwickeln.

Sie selbst benennen ja nur die Weichferrite – vielen Kunden geht es ähnlich. Pulverkerne sind zwar bekannt, die Auslegung unterscheidet sich gravierend von Ferritkernen. Aus diesem Grund herrscht große Verunsicherung. Entwickler gehen häufig den einfachen Weg und nutzen das Altbekannte, und das ist in diesem Fall Ferrit. Darüber hinaus stiftet die extrem breite Auswahl an Materialien innerhalb der Produktgruppen zusätzlich Verwirrung. Manche Anwender sehen buchstäblich vor lauter Bäumen den Wald nicht. Herr Wanior und ich arbeiten beide bereits seit über 25 Jahren mit diesen Materialien, und wir versuchen, unseren Kunden Orientierung und grundlegendes Verständnis der weichmagnetischen Materialien zu vermitteln, eigene Designtools und gerade auch das von Micrometals unterstützen uns dabei zusätzlich.

Mit welchen Vorlaufzeiten sollte eine Planung weichmagnetischer Lösungen erfolgen? Haben sich dabei in den letzten Jahren Veränderungen ergeben? Wie lang sind die aktuellen Lieferzeiten für Standardprodukte, hat die sich Lieferzeit in den letzten zwölf Monaten verändert?

Wanior: Von der ersten Idee bis zur Serienlieferung induktiver Bauteile sollte eine Zeit von etwa einem Jahr eingeplant werden. Aktuell beträgt die Regellieferzeit bei unseren weichmagnetischen Produkten etwa 24 Wochen. Sie setzt sich aus der

Produktionszeit der Hersteller von vier bis acht Wochen und der Transportzeit zusammen. Derzeit ist die Produktionszeit bei unseren Herstellern stabil, jedoch verlängern sich die Transportzeiten bei den Seefrachten zum Teil dramatisch. Gerade aus Asien müssen wir derzeit mit etwa 14 Wochen Laufzeit inklusive Zollabfertigung und Nachlauf kalkulieren. Dies hängt im Wesentlichen an der Umfahrung Afrikas als Ausweichroute für den Suezkanal.

Sie heben bei Ihrer Beratungsleistung die Kernaussagen mit hausinternen Berechnungstools hervor – welchen Zusatznutzen können Sie hier gegenüber den Online-Designstools der Hersteller bieten?

Dr. Meuche: In unserer Beratung können wir herstellerübergreifend agieren. Daher ist es unser Anspruch, für den Kunden die technisch und kommerziell optimale Lösung zu finden. Zum Beispiel kann eine PFC-Drossel sowohl mit einem Pulverkern als auch mit einem Ferritkern mit Luftspalt aufgebaut werden.

Beides hat seine Vor- und Nachteile. Hier muss mit dem Kunde das Optimum gefunden werden. Naturgemäß verwenden die Designtools der jeweiligen Hersteller nur die jeweils eigenen Produkte. Hier kommen dann unsere hausinternen Tools zum Einsatz. Sie berücksichtigen alle Materialklassen, ob Pulver-, Ferrit- oder Bandkern der verschiedenen Hersteller.

Geo- und wirtschaftspolitisch hat Trump bereits in den ersten Wochen seiner zweiten Präsidentschaft durch Strafzölle und ähnliches einiges in Bewegung gesetzt. Ist zu befürchten, dass seine Maßnahmen auch Auswirkungen auf die Lieferverfügbarkeit und Preisentwicklung bei Weichferriten haben wird?

Wanior: Mit einem Einfluss auf die Verfügbarkeit und Lieferzeit ist im Moment eher nicht zu rechnen. In welcher Höhe sich Zölle für EU-Importe aus China erhöhen, kann zum jetzigen Zeitpunkt nicht abgeschätzt werden. Da sich die Fertigungen aller wesentlichen Marktteilnehmer in China befinden, wird das wahrscheinlich Einfluss auf die Lieferfähigkeit und die Preise der Produkte selbst in den USA haben. Europa ist daher nicht direkt betroffen. Eventuell ‚profitieren‘ wir sogar. Allerdings sehen wir die Risiken auf der Nachfrageseite, da Herr Trump offensichtlich einen globalen Handelskrieg vom Zaun bricht.

Das Interview führte Engelbert Hopf.

IMPRESSUM

Director Content Electronics: Dr. Ingo Kuss
Redaktionsteam: Heinz Arnold (ha/1253), Caspar Grote, Produktmanager Events (cg/1368), Engelbert Hopf, Chefredakteur (eg/1320), Ute Häußler, Ltd. Red. (uh/1369), Irina Hübner (ih/1339), Andreas Knoll, Ltd. Red. (ak/1319), Dr. Ingo Kuss, Chefredakteur, verantwortlich für den Inhalt im Sinne des Presserechts (ku/1324), Corinna Puhlmann-Hespen (cp/1316), Corinne Schindlbeck, Ltd. Red. (sc/1311), Iris Stroh, Ltd. Red. (st/1326), Nicole Wörner (nw/1325), Karin Zühke, Ltd. Red. (zū/1329)
Die Ressortverteilung entnehmen Sie bitte der Internetseite elektroniknet.de/electronics-redaktion
Layoutteam: Wolfgang Bachmaier (Ltg.), Alexander Zach
Redaktionsassistent: Alexandra Chromy (ac/1317)
So erreichen Sie die Redaktion: Tel.: 089 25556-1317, redaktion@elektronik.de

Sales Director Electronics: Carolin Schlüter (1570)
Sales Director New Electronics: Christian Stadler (1375)
Regional Sales Managers: Burkhard Bock (1305), Malina Colombo (1382), Emilia Dietrich (1574), Martina Greulich (1576)
Anzeigenassistent: Rosi Böhm (1307)
Anzeigenverwaltung und Disposition: Jeanette Blaukat (1014), Stefan Buchner (Ltg., 1481)
Auslandsrepräsentanz (Foreign Representation):
USA: Véronique Lamarque, E&Tech Media, Inc, 80 Kendrick Street, Brighton, MA 02135, Phone/Fax: +1 860-536-6677, E-Mail: veronique.lamarque@gmail.com, Skype: E&Tech Media
Anzeigenpreise: Es gilt die Anzeigenpreisliste Nr. 60 vom 1. Januar 2025
So erreichen Sie die Anzeigenabteilung: Tel.: 089 25556-1376
media@elektronik.de, www.elektroniknet.de/media

Vertrieb: Robin Beilicke (1340), rbeilicke@componeurs.net
Bestell- und Abonnement-Service: Componeurs GmbH (ehemals WEKA Fachmedien GmbH), c/o Zenit Pressevertrieb GmbH, Postfach 810640, 70523 Stuttgart, Tel.: 0711 82651-210, Fax: 0711 82651-333, abo@componeurs.net

Organschaft: Die Elektronik ist Organ der VDE/VDI-Gesellschaft Mikroelektronik, Mikrosystem- und Feinwerktechnik (GMM). Die Mitglieder der GMM erhalten die Elektronik im Rahmen ihrer Mitgliedschaft.

Erscheinungsweise: 26 Ausgaben

Jahresabonnement Print Inland	199,00 €
Jahresabonnement Print Ausland	221,10 €
	inkl. der aktuellen MwSt.
Einzelausgabe Print	10,00 € inkl. der aktuellen MwSt., zzgl. 3,00 Euro Versandkosten
Jahresbezug digitales E-Paper	70,00 € inkl. der aktuellen MwSt., ohne Versandkosten (Inland/Ausland)
Einzelausgabe digitales E-Paper	3,99 € inkl. der aktuellen MwSt., ohne Versandkosten (Inland/Ausland)

74. Jahrgang, ISSN 0013-5658, Vertriebskennzeichen ZKZ 2594

Druck: Vogel Druck und Medienservice GmbH, Leibnizstr 5, 97204 Höchberg, auch Anschrift für Beilieferer und Beilagen.

Urheberrecht: Alle in »Elektronik« erschienenen Beiträge sind urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch Übersetzungen, vorbehalten. Reproduktionen, gleich welcher Art, ob Fotokopie, Mikrofilm oder Erfassung in Datenverarbeitungsanlagen, nur mit schriftlicher Genehmigung des Verlags. Aus der Veröffentlichung kann nicht geschlossen werden, dass die beschriebene Lösung oder verwendete Bezeichnungen frei von gewerblichen Schutzrechten sind.

Haftung: Für den Fall, dass in »Elektronik« unzutreffende Informationen oder in veröffentlichten Programmen oder Schaltungen Fehler enthalten sein sollten, kommt eine Haftung nur bei grober Fahrlässigkeit des Verlags oder seiner Mitarbeiter in Betracht.

Geschäftsführer: Matthias Hose

© 2025 Componeurs GmbH

Anschrift für Verlag, Redaktion, Vertrieb, Anzeigenverwaltung und alle Verantwortlichen:

Componeurs GmbH, Richard-Reitzner-Allee 2, 85540 Haar

Tel. 089 25556-1000, www.componeurs.net

Telefon-Durchwahl im Verlag: Sie wählen 089 25556 und dann die Nummer, die in Klammern hinter dem jeweiligen Namen angegeben ist.



WISSEN, WAS ZÄHLT
 Geprüfte Auflage
 Klare Basis für den Werbemarkt

Mitglied der Informationsgemeinschaft
 zur Feststellung der Verbreitung
 von Werbeträgern e.V. (IWV), Bad Godesberg

INSERENTEN

Bürklin GmbH & Co. KG	www.buerklin.com	9
Componeurs GmbH	www.componeurs.net	5, 45
Deutronic Elektronik GmbH	www.deutronic.com	27
DigiKey	www.digikey.com	2
GUDECO Elektronik Handelsgesellschaft mbH	www.gudeco.de	15
Harwin PLC	www.harwin.com	11
HIOKI EUROPE GmbH	www.hioki.eu	3
ODU GmbH & Co. KG	www.odu.de	17
Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG	www.we-online.de	52

Werden auch Sie Premiumanbieter!



Aaronn Electronic GmbH

www.elektroniknet.de/anbieterkompass/aaronn-electronic-gmbh.1046339/index.html



ADKOM Elektronik GmbH

www.elektroniknet.de/anbieterkompass/adkom-elektronik-gmbh.1044464/index.html



altec ComputerSysteme GmbH

www.elektroniknet.de/anbieterkompass/altec-computersysteme-gmbh.10474/index.html



Avnet Abacus

www.elektroniknet.de/anbieterkompass/avnet-abacus.8891853/index.html



btv technologies GmbH

www.elektroniknet.de/anbieterkompass/btv-technologies-gmbh.8805675/index.html



ce consumer electronic GmbH

www.elektroniknet.de/anbieterkompass/ce-consumer-electronic-gmbh.8922924/index.html



CTX Thermal Solutions GmbH

www.elektroniknet.de/anbieterkompass/ctx-thermal-solutions-gmbh.9033131/index.html



DISPLAY ELEKTRONIK GmbH

www.elektroniknet.de/anbieterkompass/display-elektronik-gmbh.13536/index.html



DMB Technics AG

www.elektroniknet.de/anbieterkompass/dmb-technics-ag.8921669/index.html



EBV Elektronik GmbH & Co. KG

www.elektroniknet.de/anbieterkompass/ebv-elektronik-gmbh-co-kg.1000056/index.html



EDT-Europe Germany

www.elektroniknet.de/anbieterkompass/edt-europe-germany.39846625/index.html



Elektrosil GmbH

www.elektroniknet.de/anbieterkompass/elektrosil-gmbh.1000057/index.html



ept GmbH

www.elektroniknet.de/anbieterkompass/ept-gmbh.1001572/index.html



Georg Schlegel GmbH & Co. KG

www.elektroniknet.de/anbieterkompass/georg-schlegel-gmbh-co-kg.1013404/index.html



GEYER Electronic GmbH

www.elektroniknet.de/anbieterkompass/geyer-electronic-gmbh.1010375/index.html



GLYN GmbH & Co. KG

www.elektroniknet.de/anbieterkompass/glyn-gmbh-co-kg.16319/index.html



GUDECO Elektronik Handelsgesellschaft mbH

www.elektroniknet.de/anbieterkompass/gudeco-elektronik-handelsgesellschaft-mbh.1014943/index.html



HEITEC AG

www.elektroniknet.de/anbieterkompass/heitec-ag.39058316/index.html



hema electronic GmbH

www.elektroniknet.de/anbieterkompass/hema-electronic-gmbh.17288/index.html



Hitex GmbH

www.elektroniknet.de/anbieterkompass/hitex-gmbh.1001233/index.html



ICP Deutschland GmbH

www.elektroniknet.de/anbieterkompass/icp-deutschland-gmbh.8806901/index.html



Innodisk Europe B.V.

www.elektroniknet.de/anbieterkompass/innodisk-europe-b-v.39719294/index.html



Intertec Components GmbH

www.elektroniknet.de/anbieterkompass/intertec-components-gmbh.1052561/index.html



JAUCH QUARTZ GmbH

www.elektroniknet.de/anbieterkompass/jauch-quartz-gmbh.1000452/index.html



Jianghai Europe Electronic Components GmbH

www.elektroniknet.de/anbieterkompass/jianghai-europe-electronic-components-gmbh.8875741/index.html



Karl Kruse GmbH & CO KG

www.elektroniknet.de/anbieterkompass/karl-kruse-gmbh-co-kg.106394/index.html



Kingbright Electronic Europe GmbH

www.elektroniknet.de/anbieterkompass/kingbright-electronic-europe-gmbh.9033326/index.html



Kisling AG

www.elektroniknet.de/anbieterkompass/kisling-ag.39408266/index.html



MB Electronic AG

www.elektroniknet.de/anbieterkompass/mb-electronic-ag.1021385/index.html



MACNICA ATD Europe GmbH

www.elektroniknet.de/anbieterkompass/macnica-atd-europe-gmbh-vorher-macnica-gmbh.8912793/index.html



MES Electronic Connect GmbH & Co. KG

www.elektroniknet.de/anbieterkompass/mes-electronic-connect-gmbh-co-kg.1002142/index.html



MEV Elektronik Service GmbH

www.elektroniknet.de/anbieterkompass/mev-elektronik-service-gmbh.21440/index.html



MJC Elektrotechnik GmbH

www.elektroniknet.de/anbieterkompass/mjc-elektrotechnik-gmbh.8902924/index.html



N&H Technology GmbH

www.elektroniknet.de/anbieterkompass/n-h-technology-gmbh.8829676/index.html



Parasoft

www.elektroniknet.de/anbieterkompass/parasoft.39272061/index.html



PEAK-System Technik GmbH

www.elektroniknet.de/anbieterkompass/peak-system-technik-gmbh.1051441/index.html



PETERMANN-TECHNIK GmbH

www.elektroniknet.de/anbieterkompass/petermann-technik-gmbh.1057204/index.html



PHYTEC Meßtechnik GmbH

www.elektroniknet.de/anbieterkompass/phytec-messtechnik-gmbh.1003540/index.html



Recom Power GmbH

www.elektroniknet.de/anbieterkompass/recom-power-gmbh.39062895/index.html



RED Frequency

www.elektroniknet.de/anbieterkompass/red-frequency.3927719/index.html



RM Components GmbH

www.elektroniknet.de/anbieterkompass/rm-components-gmbh.1057172/index.html



ROHM Semiconductor GmbH

www.elektroniknet.de/anbieterkompass/rohm-semiconductor-gmbh.25440/index.html



SafeLab GmbH Electronic Component Testing

www.elektroniknet.de/anbieterkompass/safelab-gmbh-electronic-component-testing.39819578/index.html



SCHURTER

www.elektroniknet.de/anbieterkompass/schurter.1046530/index.html



Shanghai Yongming Electronic Co., Ltd

www.elektroniknet.de/anbieterkompass/shanghai-yongming-electronic-co-ltd.39849186/index.html



SIGLENT TECHNOLOGIES GERMANY GmbH

www.elektroniknet.de/anbieterkompass/siglent-technologies-germany-gmbh.39263702/index.html



SPEA GmbH

www.elektroniknet.de/anbieterkompass/spea-gmbh.1000586/index.html



Swissbit AG

www.elektroniknet.de/anbieterkompass/swissbit-ag.8882395/index.html



Tektronix GmbH

www.elektroniknet.de/anbieterkompass/tektronix-gmbh.100597/index.html



TRACO ELECTRONIC GmbH

www.elektroniknet.de/anbieterkompass/traco-electronic-gmbh.8821013/index.html



Verifysoft Technology GmbH

www.elektroniknet.de/anbieterkompass/verifysoft-technology-gmbh.8871121/index.html



WIBU-SYSTEMS AG

www.elektroniknet.de/anbieterkompass/wibu-systems-ag.1033771/index.html



Willert Software Tools GmbH

<https://www.elektroniknet.de/anbieterkompass/willert-software-tools-gmbh.1047009/index.html>



Win Source Electronics

www.elektroniknet.de/anbieterkompass/win-source-electronics.39821292/index.html



Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG

www.elektroniknet.de/anbieterkompass/wuerth-elektronik-eisos-gmbh-co-kg.8857146/index.html

**Kontakt: Ute Beyer | Projektkoordinatorin New Business | Tel. 089 25556-1577
E-Mail: ubeyer@componeers.net | matchmaker.elektroniknet.de**



WÜRTH ELEKTRONIK MORE THAN YOU EXPECT

YOUR CONNECTION TO US: **MYWE**



WE meet @ PCIM

Halle 6 - 342

Mit MyWE haben Sie rund um die Uhr, 7 Tage die Woche, alle Prozesse im Blick. Greifen Sie schnell und einfach auf alle relevanten Produktdaten zu, versenden Sie Anfragen und geben Sie Bestellungen auf. Dank des klaren Designs und Ihres anpassbaren Dashboards erreichen Sie Ihr Ziel mit nur wenigen Klicks.

Die Sendungsverfolgung für alle gängigen Spediteure zeigt Ihnen, wann Ihre Lieferungen ankommen. So sind Sie immer auf dem neuesten Stand.

Jetzt registrieren: www.we-online.com/mywe

#mywe

Highlights

- Sendungsverfolgung aller gängigen Spediteure
- Übersicht über alle Anfragen, Angebote und Bestellungen
- Umfangreiche Informationen zu Produkten
- Lagerbestände in Echtzeit
- Wissenspanel mit interessanten Inhalten und Services