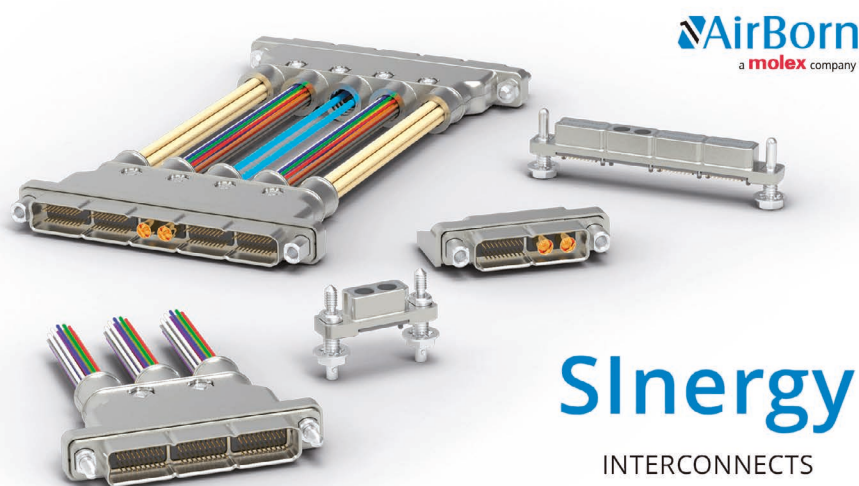


Qualität durch Design

## Zwingende Anforderungen für die Luft-/Raumfahrt- und Verteidigungsindustrie

Praktische Erkenntnisse und bewährte Verfahren optimieren Design, Fertigung und Test von Steckverbindern, um den steigenden Anforderungen an Produktzuverlässigkeit und -lebensdauer gerecht zu werden.



### SInergy

INTERCONNECTS

Alle Bilder © Defense Visual Information Distribution Service

Hinweis: Die Veröffentlichung von Bildmaterial des US-Verteidigungsministeriums (DoD) bedeutet nicht, dass das DoD den Inhalt befürwortet.

Einer der wichtigsten und anspruchsvollsten Aspekte moderner Luft-/Raumfahrt- und Verteidigungstechnik besteht darin, Qualität und Zuverlässigkeit in jede Phase der Produktentwicklung zu integrieren – vom ersten Entwurf und der Materialauswahl über die Prototypenfertigung und strenge Tests bis hin zur Fertigung und Qualifizierung nach Normen. Schließlich stehen Menschenleben auf dem Spiel. Daher darf es keine Fehler geben, wenn es darum geht, die Sicherheit und Leistungsfähigkeit von Technologien zu gewährleisten, die trotz längerer Einwirkung extremer Umgebungs-, mechanischer und thermischer Belastungen einwandfrei funktionieren müssen.

### Für Energie- und Informationsübertragung

Moderne Flugzeuge, Raumfahrzeuge, Raketen und Verteidigungssysteme enthalten tausende, wenn nicht Millionen elektronischer, elektrischer und optischer Komponenten. Innovative Steckverbinder ermöglichen es diesen unterschiedlichen Systemen, zu kommunizieren, Energie zu übertragen und als zusammenhängende Lösungen zu funktionieren. Steckverbinder für Luft-/Raumfahrt- und Verteidigungsanwendungen müssen strengen militärischen, industriellen und fertigungstechnischen Standards hinsichtlich Zuverlässigkeit und Qualität entsprechen. Zudem müssen sie den stetig wachsenden Anforderungen an höhere Datenraten sowie reduzierter Größe, Gewicht, Leistungsaufnahme und Kosten (SWaP-C) gerecht werden.

Die Philosophie des „Qualitäts-Designs“ findet sich in jeder Phase des Produktlebenszyklus, beginnend mit den ersten Konzepten und Entwürfen. Dies erfordert ganzheitliches Denken und funktionsübergreifende Zusammenarbeit zwischen Entwicklern/Konstrukteuren, Fertigungsingenieuren, Materialwissenschaftlern,

Qualitätsingenieuren, Supply-Chain-Managern und Anwendungstechnikern vor Ort. Ebenso wichtig ist, die Kundenbedürfnisse einzubeziehen, um auf die schnell wachsenden technologischen Anforderungen frühzeitig zu reagieren. Das Ergebnis geht über eine verbesserte Produktzuverlässigkeit und -lebensdauer hinaus und führt zu einer effizienteren Fertigung, geringeren Kosten, erhöhter Sicherheit und letztlich zu einem größeren Missionserfolg.

### Präzise Abstimmung von Merkmalen und Funktionen

Um einen unterbrechungsfreien Betrieb in Land-, See- und Weltraumanwendungen zu gewährleisten, müssen Steckverbinder starken Vibrationen, hohen Stoßkräften, Temperaturschwankungen sowie übermäßiger Feuchtigkeit, Staub und Verunreinigungen standhalten. Die richtige Materialzusammensetzung ist ebenfalls erforderlich, um Korrosion durch Salznebel und Oxidation zu verhindern, die zu einem schnellen Verschleiß führen.

Steckverbinder müssen außerdem so konstruiert sein, dass sie Hunderte oder sogar Tausende von Steckzyklen ohne Ausfall überstehen, da die Lebenszyklen von Plattformen in der Luft-/Raumfahrt- und Verteidigungstechnik in Jahrzehnten und nicht in Jahren gemessen werden. Es ist üblich, dass Flugzeuge, Marineschiffe, Landfahrzeuge und Satelliten eine Betriebslebensdauer von 30 bis 40 Jahren oder sogar mehr aufweisen.

Um Langlebigkeit zu gewährleisten, müssen Fehlerquellen gefunden und behoben werden, während gleichzeitig die mechanische Belastbarkeit, die Anpassungsfähigkeit an die Umgebung und die Betriebsdauer verbessert werden. Eine sorgfältige Bewertung der Kompromisse zwischen Leistungsfähigkeit und Design umfasst Verbesserungen der Abschirmung gegen elektromagnetische Störungen (EMI) und der Signalintegrität unter Störbehauptung. Ausgefeilte Routing-Strategien, die Übersprechen und Signalverschlechterung über große Entfernungen reduzieren, sind ebenso wichtig, wie eine fortschrittliche Abschirmung, um die Signal-treue aufrecht zu erhalten.

Autor:  
George Dubniczki  
Molex  
www.molex.com

## Gewachsene Herausforderungen

Bei der ersten Produktentwicklung und den nachfolgenden Iterationen hilft ein proaktiver, datengestützter Ansatz dabei, die Leistungsfähigkeit der Steckverbinder zu optimieren, ohne sie zu kompliziert zu gestalten. Der Trend zu höheren Datenübertragungsraten und kleineren Bauformen bringt zusätzliche Herausforderungen mit sich. Fortschrittliche Luft-/Raumfahrt- und Verteidigungssysteme, von Satelliten und unbemannten Luftfahrzeugen (UAV) bis hin zu Ausrüstung für Soldaten und fortschrittlicher Avionik, werden immer kleiner. Die Integration von mehr Funktionen auf kleinerem Raum führt zu einer höheren Dichte an elektronischen Bauelementen und Verbindungen. Durch das Hinzufügen weiterer Bauteile auf kleinerem Raum entsteht auch mehr Wärme, was die Herausforderungen beim Wärmemanagement noch verschärft.

## Miniaturisierte modulare Hybridsteckverbinder

Die SIenergy-Serie miniaturisierter modularer Hybridsteckverbinder von AirBorn entstand aus der Analyse zukünftiger Anforderungen. Kunden wünschten sich modulare Lösungen, die für Signal- und HF-Übertragung geeignet sind. Zudem wurde gewünscht, mehrere Eingänge in einem einzigen Steckverbinder zu kombinieren, um maximale Flexibilität zu erreichen. Das Ergebnis: eine ausgezeichnete Serie von Steckverbindern mit kleinem Formfaktor, die bis zu 25 GBit/s pro Lane mit militärischer Robustheit unterstützen. Damit eignet sich SIenergy ideal für zahlreiche Anwendungen, darunter militärische Head-up-Displays in Helmen.

Für Weltraumanwendungen und bestimmte militärische Umgebungen müssen Verbindungen so ausgelegt sein, dass sie ionisierender Strahlung standhalten, ohne die Leistungsfähigkeit zu beeinträchtigen. Der rasante Anstieg der Weltraumforschung und der Satellitenstarts rückt strahlungsresistente (rad-hard) Elektronik und Steckverbinder immer stärker in den Fokus. Daher müssen bei der Entwicklung strahlungsresistenter Verbindungen bestimmte Materialien und Abschirmungsoptionen berücksichtigt werden. Zu den wichtigsten Designkriterien zählt das Kontaktsystem, das auch als „Herzstück des Steckverbinders“ bezeichnet wird.

## Zuverlässigkeit beginnt am Kontakt

Ein gutkonstruiertes Kontaktsystem ist entscheidend für die Zuverlässigkeit von Steckverbindern, da es für die elektrische Leitfähigkeit sorgt und gleichzeitig Verschleiß und Vibrationen standhält. Als zentrales Element für die Strom- oder Signalübertragung



zwischen zwei verbundenen Schaltkreisen oder Geräten vereint das Kontaktsystem Maschinenbau, Elektrotechnik, Signalintegritätsdesign und Materialwissenschaft. Signalbeeinträchtigungen und mechanischer Verschleiß werden häufig durch ungleichmäßige Kraftverteilung oder falsch ausgerichtete Kontakte verursacht. Ein wichtiges Ziel bei der Produktentwicklung ist es, die erforderliche Kraft zu bestimmen, um die langfristige mechanische und elektrische Zuverlässigkeit zu gewährleisten. In missionskritischen Anwendungen mit häufigen Vibrationen, Stößen und thermischen Schwankungen kann ein höherer Druck erforderlich sein, um die Leistungsfähigkeit aufrechtzuerhalten.

Andere Faktoren wie Kontaktgeometrie, Federspannung und Materialauswahl sind ebenso wichtig. Leitfähigkeit, Korrosionsbeständigkeit und Oberflächenhärte beeinflussen die Alterung der Kontakte. Die richtige Kombination aus Kontaktgeometrie, Kontaktbasismaterial (z.B. Berylliumkupfer oder andere Kupferlegierungen) sowie die Oberflächenbeschaffenheit (z.B. Gold) ist entscheidend für die Zuverlässigkeit von Steckverbindern.

Verschiedene Kontaktarten finden sich beispielsweise in hochwertigen, robusten und zuverlässigen Steckverbindern. Eine häufige Design-Überlegung für die Luft-/Raumfahrt- und Verteidigungstechnik ist die Verwendung mehrerer Kontaktpunkte, um hohen Vibrationen und G-Kräften standzuhalten.

Steckverbinder-Designs mit bis zu vier Kontaktpunkten bieten beispielsweise erhöhte Stabilität und Signalintegrität, wodurch sie sich ideal für diese Bereiche eignen. Da diese Kontaktsysteme mechanische Belastungen bei Vibrationen/Stößen über redundante Kontaktwege verteilen, sind sie besser in der

Lage, einen unterbrechungsfreien Betrieb zu gewährleisten.

## Basis Vierpunkt-Kontaktsystem

Die verSI-Steckverbinder-Serie von AirBorn basiert auf einem Vierpunkt-Kontaktsystem, um die Zuverlässigkeit zu verbessern und Signalverluste oder Fehlfunktionen zu verhindern. Sollte ein Kontakt aufgrund von Vibrationen oder Verschmutzungen vorübergehend unterbrochen sein, halten die anderen Kontaktpunkte die Verbindung aufrecht. Dadurch eignen sie sich besonders für Anwendungen mit hoher Geschwindigkeit und hoher Signaldichte und tragen zu einer längeren Lebensdauer bei. verSI-Steckverbinder sind für bis zu 2500 Steckzyklen qualifiziert, aber einige Kunden berichten von einer einwandfreien Leistung über 20.000 Steckzyklen hinaus.

Das grundlegende Konzept der Verteilung der elektrischen und mechanischen Belastung auf mehrere Kontaktpunkte ist ein Eckpfeiler der Steckverbinderentwicklung für Luft-/Raumfahrt- und Verteidigungstechnik. Kontinuierlicher Fortschritt in der Materialwissenschaft, Beschichtungstechnologie (z.B. dicke Goldbeschichtung über Nickel) und Fertigungspräzision sorgt für hochrobuste Steckverbinder mit mehreren Kontaktpunkten und absolute Zuverlässigkeit.

## Fertigungspräzision und Automatisierung

Ein weiterer wichtiger Grundsatz der Produktqualität ist die fertigungsgerechte Entwicklung, die bei den Produktkonzepten und Prototypen beginnt und sich bis zur Serienfertigung und Auslieferung an den Kunden erstreckt. Die koordinierte Zusammenarbeit zwischen Produktdesignern und Fertigungsingenieuren erleichtert die Auswahl von Konzepten und Prototypen, wobei



deren Auswirkungen auf die Materialauswahl, Entscheidungen zur Lieferkette, Fertigungsprozesse und letztlich die Produktkosten und die Markteinführungszeit berücksichtigt werden.

Robuste und zuverlässige Steckverbinder sollten mit präzisen und automatisierten Fertigungsprozessen hergestellt werden. Produktentwickler verwenden zunehmend digitale Zwillinge, also digitale Modelle von Fertigungsprozessen, um verschiedene Szenarien zu simulieren, Arbeitsabläufe zu optimieren und Probleme vorherzusagen, bevor sie mit der eigentlichen Produktion beginnen.

Die Automatisierung der Fertigung kann Wiederholbarkeit, Genauigkeit und Durchsatz bei höheren Stückzahlen erheblich steigern und menschliche Fehler reduzieren. Der zunehmende Bedarf an Miniaturisierung, insbesondere im Luft-/Raumfahrt- und Verteidigungssektor, übt einen enormen Druck auf die Fertigungsprozesse aus. Unternehmen möchten Steckverbinder kontinuierlich verkleinern, ohne dabei Kompromisse bei Qualität, Zuverlässigkeit und Robustheit einzugehen.

Als Unternehmen von Molex hat AirBorn Zugang zu einer globalen Fertigungspräsenz und den neuesten Entwicklungen in den Bereichen Automatisierung und Prozesstechnologien, um die Herstellung von automatisierter Bearbeitung, Stanzen, Beschichten, Formen und robotergestützter

Montage ermöglicht eine schnelle Produktion bei gleichzeitiger Senkung der Arbeitskosten, optimierter Materialausnutzung und reduziertem Abfall. Die Wiederholbarkeit der Prozesse ist ein weiterer Vorteil der Automatisierung, vor allem bei miniaturisierten Steckverbindern mit sehr kleinen Rastermaßen, hoher Pin-Anzahl und engen Toleranzen.

Wenn Komponenten dicht gepackt sind, steigt das Risiko von elektromagnetischen Störungen (EMI) und Übersprechen deutlich an. Die Fertigungsprozesse müssen die Integrität der Abschirmung, der Erdungspfade und die präzise Impedanzkontrolle innerhalb des Steckverbinders gewährleisten.

### Strenge Tests und Normqualifizierung

Interne Tests beginnen bereits in der Prototypenphase und werden bis zur Serienfertigung fortgesetzt, um Leistungsfähigkeit, Haltbarkeit und Langlebigkeit zu validieren. Hochzuverlässige Steckverbinder für die Luft-/Raumfahrt- und Verteidigungstechnik müssen strenge Qualitätsstandards erfüllen.

Darüber hinaus muss die Leistungsfähigkeit der Steckverbinder je nach Verwendungszweck gemäß strengen Qualitätsstandards validiert werden, darunter IPC-620 Klasse 3 (einschließlich Weltraumzusatz), MIL-STD-202, MIL-STD-810, MIL-DTL-83513, MIL-STD-1344, NASA-STD-87394, NASA ASTM-E595, NASA

EEE-INST-002, ECSS-E-ST-10-03C, IPC-A-610 Klasse 3 und AS9100.

Zur Überprüfung werden präzise Testmethoden, -geräte und -verfahren eingesetzt, von denen viele im ISO/IES-17025-zertifizierten Labor von AirBorn von einem Team aus internen Test- und Entwicklungsingenieuren durchgeführt werden. Sie arbeiten mit Kunden zusammen, um Testprogramme durchzuführen, die Umgebungs-, mechanische, elektrische und Materialanalysen umfassen. Die Einhaltung der MIL-SPECs beinhaltet auch umfangreiche Anforderungen an die Dokumentation und Rückverfolgbarkeit, oft bis hin zu den Chargennummern der Rohstoffe und einzelnen Fertigungsschritten. Dies ist entscheidend für Qualitätsaudits, Fehleranalysen und das Lebenszyklus-Management.

Vor allem müssen die Entwicklungsteams sich strikt an militärische Standards und Branchenvorschriften halten, um sicherzustellen, dass neue Designs und Materialien umfangreichen Tests unterzogen werden und die vollständige Konformität nachweisen. Der Einsatz von Röntgen-/CT-Bildgebung und -Inspektion ist ebenfalls entscheidend, um Fehler frühzeitig zu erkennen und die allgemeine Produktkonsistenz sicherzustellen.

Bei Verbindungen geht es nicht nur darum, zwei Punkte miteinander zu verbinden. Es handelt sich um komplexe, hochtechnisierte Systeme, die unter enormem Druck, extremen Bedingungen und mit immer anspruchsvolleren Anforderungen an die Signalintegrität und Datenübertragungsraten fehlerfrei funktionieren müssen – und das alles unter Berücksichtigung der allgegenwärtigen SWaP-C-Beschränkungen. Ein konsequenter Fokus auf Qualität und Innovation beginnt mit einer sorgfältigen Abwägung von Fähigkeiten und Kompetenzen, um einen ausfallsicheren Betrieb hochzuverlässiger Elektronik- und Verbindungslösungen zu gewährleisten.

Die vielfältigen Herausforderungen werden die Grenzen der Materialwissenschaft, Elektrotechnik und Fertigungsprozesse immer weiter verschieben und Qualität und Zuverlässigkeit im Verbindungsdesign zu einer ständigen sich weiterentwickelnden Priorität machen.

### Wer schreibt:

George Dubniczki ist Chief Technology Officer und Vice President Engineering bei AirBorn mit Sitz in Georgetown, Texas, einem Unternehmen von Molex. [www.airborn.com](http://www.airborn.com) ◀