

# Technische Auslegung physischer Konnektivität für Industrie 4.0

Von: Michael Meckl, Product Portfolio Director, ENNOVI

---

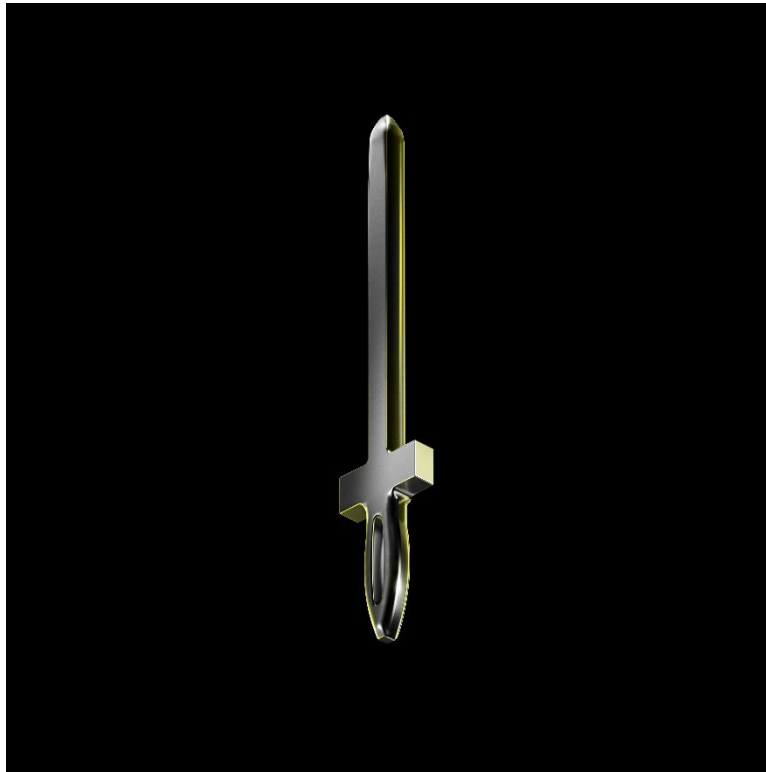
Industrie-4.0-Systeme basieren auf verteilter Sensorik, Echtzeitregelung und autonomem Betrieb in Fertigungen, Lagern und industriellen Maschinen. Die digitalen Ebenen dieser Systeme – etwa Netzwerke, Regelalgorithmen und Analytik – hängen von der Integrität der physischen elektrischen Schnittstellen ab, die Energie und Signale übertragen. Mechanische Vibrationen, Temperaturschwankungen, hohe Ströme und kompakte Bauformen belasten Steckverbinder und Verbindungssysteme. Ausfälle auf der physikalischen Ebene, z. B. sporadische Kontaktunterbrechungen, gerissene Lötstellen oder ineffiziente Strompfade, verringern die Anlagenverfügbarkeit, erhöhen Wartungskosten und beeinträchtigen die Leistung.

Robuste physische Konnektivität zu entwickeln bedeutet, Technologien auszuwählen, die elektrische Performance und mechanische Integrität über lange Lebenszyklen sicherstellen, die Fertigkeit unterstützen und in moderne automatisierte Montageprozesse passen. Auf Basis bewährter Automotive-Erfahrung zeigt dieser Beitrag, wie ENNOVIs ausgereifte Hardware-Konnektivitätslösungen Entwicklerinnen und Entwicklern helfen können, das volle Potenzial intelligenter, vernetzter Industriesysteme auszuschöpfen – durch höhere Zuverlässigkeit, bessere Fertigkeit und geringere Lebenszykluskosten.

## Gelötete Verbindungen und ihre Grenzen

Das Löten ist seit Jahrzehnten die dominierende Methode, um Bauteile auf Leiterplatten (PCBs) zu befestigen und elektrische Verbindungen herzustellen, und es ist in vielen kontrollierten Anwendungen weiterhin effektiv. Lötstellen stoßen jedoch an Grenzen, wenn sie häufigen thermischen oder mechanischen Belastungen ausgesetzt sind.

Der häufigste Belastungsfaktor ist das Temperaturwechselverhalten (Thermal Cycling). Unterschiede im Wärmeausdehnungskoeffizienten (CTE) zwischen Bauteil, Lot und Leiterplatte führen dazu, dass sich die Materialien mit unterschiedlichen Raten ausdehnen und zusammenziehen. Diese Relativbewegung kann Schubspannungen in der Lötstelle erzeugen und zu thermischer Ermüdung, Mikrorissen und schließlich zum Bruch führen. Mechanische Vibrationen und Stöße können die Degradation der Lötstelle verstärken und die Ausfallzeit deutlich verkürzen.



*Bild 1: Press-Fit-Steckverbinder verbinden hohe Normalkraft mit lötfreier Kontaktierung und Optionen zur Whisker-Minderung.*

Eine Alternative sind lötfreie mechanische Verbindungstechnologien wie Press-Fit, die laut unabhängigen Branchenvergleichen in rauen Umgebungen eine deutlich höhere Zuverlässigkeit erreichen und typische, mit Lötstellen verbundene Zuverlässigkeitsrisiken reduzieren können. Press-Fit-Steckverbinder stellen eine robuste Verbindung her, indem ihre nachgiebigen Kontaktpins mechanisch in eine metallisierte Durchkontaktierung (Plated Through-Hole, PTH) der Leiterplatte eingepresst werden.

Moderne, nachgiebige Press-Fit-Auslegungen erzeugen eine hohe Normalkraft im Kontaktbereich und gewährleisten damit über lange Einsatzzeiten einen stabilen elektrischen Leitpfad – selbst bei starker Vibration. Dieser Mechanismus der mechanischen Haltekraft kompensiert zudem CTE-Mismatch und hält den Kontakt auch bei Erwärmung und Abkühlung konstant. Da lötfreie Press-Fit-Verbindungen keinen thermischen Prozess benötigen, sondern auf kontrollierter mechanischer Verformung beruhen, unterstützen sie automatisierungsfreundliche Montageabläufe und können Fertigungslinien vereinfachen, indem nachgelagerte Lötprozesse entfallen.

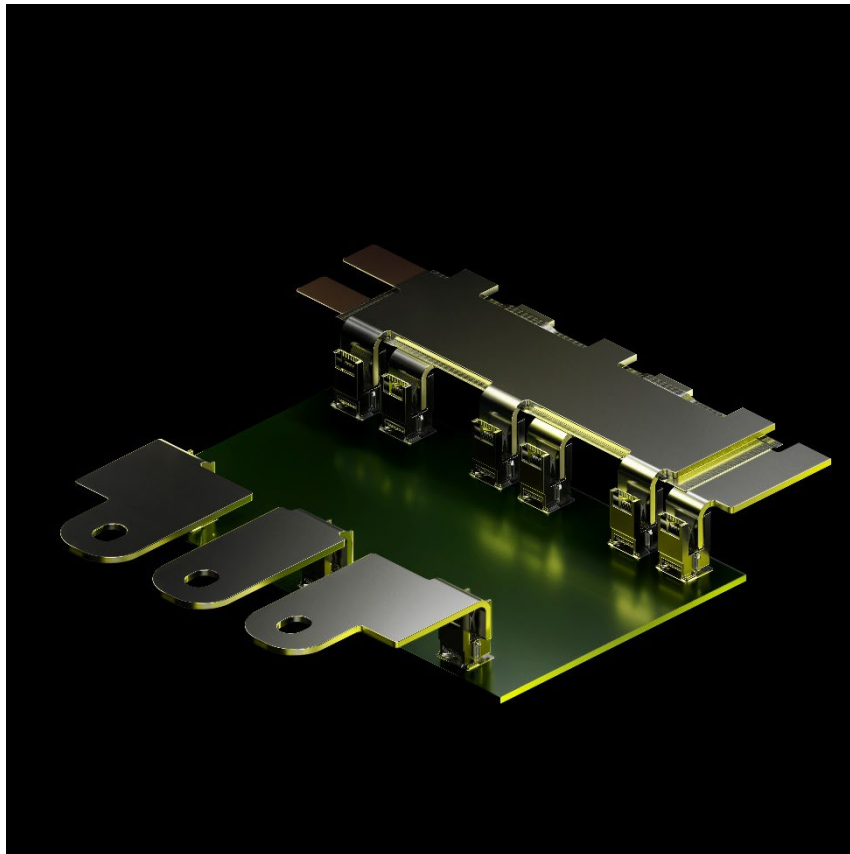
## **Grenzen der Leitungsverdrahtung in der Energieverteilung**

Die Energieverteilung stellt in Industrie-4.0-Systemen eine weitere Klasse physischer Konnektivitätsherausforderungen dar. Viele industrielle Module – etwa Motorantriebe, Wechselrichter, Batteriesysteme und Stromwandler – erfordern eine Bereitstellung hoher Ströme bei geringen ohmschen Verlusten und minimaler Wärmeentwicklung. Klassische Kabelbäume sind zwar flexibel und etabliert, können jedoch voluminös werden, durch

zahlreiche Übergänge zusätzlichen Widerstand einbringen und Montage sowie Service erschweren.

Entwickelte Stromschiensysteme (Busbars) sind eine wirksame Alternative, um hohe Ströme effizient zu verteilen. Eine Stromschiene besteht typischerweise aus einem massiven Metallleiter, der Leistung innerhalb eines Moduls oder einer Baugruppe mit geringen Verlusten leitet und verteilt. Gegenüber Punkt-zu-Punkt-Verdrahtung können Busbars den Gesamtwiderstand und die Induktivität reduzieren, die Energieeffizienz erhöhen und die Wärmeentwicklung verringern. Durch ihren größeren Querschnitt wird Wärme zudem besser verteilt und abgeführt, wodurch Hotspots vermieden werden, die andernfalls die Alterung benachbarter Komponenten beschleunigen könnten. Als zentralisierte Leiter vereinfachen Busbars das Layout und reduzieren potenzielle Ausfallstellen, die durch viele einzelne Kabel und Anschlüsse entstehen.

Busbar-Architekturen werden zunehmend in der Automobilindustrie und in der Leistungselektronik eingesetzt, um Stromtragfähigkeit und thermisches Verhalten zu optimieren – und viele Erkenntnisse aus diesen Bereichen lassen sich direkt auf industrielle Energieversorgungssysteme übertragen. In vielen Fällen können Busbars mit kundenspezifischen Steckverbindern kombiniert werden, die Montagetoleranzen und mechanische Spannungen beherrschen und so Zuverlässigkeit und Fertigbarkeit zusätzlich verbessern.



*Bild 2: Busbar Konnektoren können hohe Ströme wirksam und effizient verteilen.*

**Industrie-4.0-Beispiel: Autonome mobile Roboter ([AMRs](#))**

Autonome mobile Roboter (AMRs) verdeutlichen, warum die Wahl der physischen Konnektivität in Industrie-4.0-Hardware entscheidend ist. Diese Systeme navigieren häufig durch große Anlagen, transportieren Nutzlasten, führen Hubvorgänge aus oder interagieren mit Fördertechnik. Ihre Designs umfassen verteilte Sensornetzwerke, Echtzeit-Steuer Elektronik, Antriebssysteme sowie kompakte, hochdichte Energiequellen.

In AMRs werden häufig Lithium-Ionen-Batterien aufgrund ihrer hohen Energiedichte und langen Zyklenfestigkeit eingesetzt und ermöglichen kompakte Energiesysteme für den Dauerbetrieb. Die effiziente Bereitstellung hoher Ströme in begrenzten Bauräumen erzwingt jedoch Zielkonflikte zwischen mechanischer Robustheit, Wärmeentwicklung und Fertigbarkeit. Eine busbar-zentrierte Energieverteilung kann die Verkabelungskomplexität reduzieren und das thermische Verhalten verbessern; lötfreie Press-Fit-Verbindungen wiederum können zuverlässige Kontakte bereitstellen, die Vibrationen und Temperaturänderungen tolerieren – ohne lötlstellenbedingte Ausfallmechanismen.

Diese Hardware-Strategien sind nicht auf AMRs beschränkt; sie sind ebenso relevant in anderen industriellen Anwendungen wie dezentralen Wechselrichtern, Motorantrieben und Edge-Steuermodulen, in denen konstante elektrische Performance die digitalen Funktionen und Regelkreise unterstützt, die Smart Manufacturing ausmachen.

## **Fazit**

In Industrie-4.0-Ökosystemen steht oft die digitale Intelligenz im Fokus – doch die Zuverlässigkeit der Hardware an den physischen Schnittstellen entscheidet, ob fortschrittliche Funktionen im Feld dauerhaft verfügbar sind. ENNOVIs Press-Fit-Verbindungen und fortschrittliche Busbar-Lösungen bieten konstruktive Ansätze für typische Herausforderungen industrieller Elektronik: Lötstellenermüdung vermeiden, hohe Stromdichten in kompakten Layouts unterstützen, die Montage für automatisierte Produktion vereinfachen und Signalintegrität in verteilten Systemen ermöglichen.

Mit quantifizierten mechanischen Kennwerten, Validierung nach Automotive-Standards und einer Historie von Hochvolumen-Einsätzen bieten ENNOVIs Interconnect-Technologien Elektronikentwicklern eine verlässliche Basis, auf der Industrie-4.0-Systeme mit Vertrauen aufgebaut werden können.