Die 3 Generationen der Leiterplatte kennenlernen:

Von fliegender Verdrahtung über FR4 zu Additively Manufactured Electronics (AME)

MDI Mechatronisches Design & Innovationen

6. Oktober 2026

Zusammenfassung

Dieses technische Whitepaper analysiert die technologische Evolution elektronischer Verbindungsträger anhand des Fachwebinars von Steffen Braun (MDI). Es zeichnet den Weg von der diskreten Handverdrahtung der ersten Generation über den etablierten Standard der subtraktiven FR-4-Leiterplatte der zweiten Generation bis hin zur additiven Fertigung elektronischer Schaltungen (AME) als dritter Generation nach. Neben einer sachlichen Gegenüberstellung von Konstruktions- und Fertigungsprinzipien bietet das Dokument Entwicklungsleitern, Mechatronik-Konstrukteuren und Hardware-Entwicklern einen strukturierten, fünfstufigen Bewertungsrahmen sowie eine praxisorientierte Checkliste, um den Einsatz von AME gegenüber FR-4 fundiert und risikoarm im Projekt zu evaluieren.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung: Der Generationswechsel in der Hardware -Entwicklung 3

2 Zusammenfassung 3

3 Detaillierte Analyse der drei Technologie-Generationen 4

3.1 Generation 1: Fliegende Verdrahtung (Point-to-Point Wiring) 4

3.1.1 Charakteristik und Fertigungslogik 4

3.1.2 Konstruktive und betriebliche Grenzen 5

3.2 Generation 2: Die subtraktive FR-4-Leiterplatte 5

3.2.1 Fertigungsprinzip: Subtraktiv und planar 5

3.2.2 Stärken des Standards 5

3.2.3 Entwicklungs- und Konstruktionsgrenzen 5

3.3 Generation 3: Additively Manufactured Electronics (AME) 6

3.3.1 Fertigungsprinzip: Additiv und multiprozessfähig 6

3.3.2 Neue konstruktive Freiheiten 6

4 Der historische Vergleich: Lerneffekte für die heutige Praxis 7

5 Fünfstufiger Bewertungsrahmen für Entwicklungsteams 7
5.1 Schritt 1: Ermittlung der echten Schmerzpunkte im aktuellen Design . . . 7
5.2 Schritt 2: Festlegung unverhandelbarer Pflichtanforderungen 7
5.3 Schritt 3: Formulierung einer präzisen AME-Hypothese 8
5.4 Schritt 4: Prozess- und Schnittstellenprüfung 8
5.5 Schritt 5: Vergleichender Prototypentest mit Akzeptanzkriterien 8

6 Checkliste für Hard- und Firmware-Entwickler, sowie Elektronik-Konstrukteure als Sparring 8

7 Fazit und Ausblick 9

8 Quellenangaben 9

1 Einleitung: Der Generationswechsel in der Hardware - Entwicklung

Die Anforderungen an moderne mechatronische Baugruppen steigen kontinuierlich. Miniaturisierung, Hochfrequenztauglichkeit, anspruchsvolle thermische Randbedingungen und komplexe dreidimensionale Einbauräume fordern traditionelle Konstruktionsansätze heraus. Dennoch dominiert in der industriellen Praxis seit Jahrzehnten ein bestimmter Schaltungsträger: die starre Leiterplatte auf Basis von FR-4.

In dem Webinar *„Die 3 Generationen der Leiterplatte kennenlernen!“*[1] stellt Steffen Braun (MDI) diese Entwicklung in einen historischen Kontext. Eine zentrale Erkenntnis des Vortrags lautet: Technologieübergänge in der Elektronik geschehen selten als schlagartiger Bruch. Vielmehr existieren Fertigungsverfahren über lange Zeiträume parallel, ergänzen einander in Nischen und lösen sich erst dann in breiteren Anwendungsfeldern ab, wenn Konstruktionsdruck, Fertigungssicherheit und wirtschaftliche Randbedingungen diesen Schritt erzwingen.

Für Entwicklungs- und Konstruktionsteams stellt sich heute nicht die abstrakte Frage, welches Verfahren absolut überlegen ist. Entscheidend ist vielmehr das präzise Verständnis dafür, welche spezifischen Bauraum-, Signal- und Montagegrenzen mit etablierten FR-4-Leiterplatten erreicht werden und an welchen Stellen additive Elektronikfertigung (Additively Manufactured Electronics, AME) bereits heute messbare Vorteile im Entwicklungsprozess bieten kann.

2 Zusammenfassung

- **Drei Fertigungsgenerationen:** Das Webinar strukturiert die Elektronikverbindungstechnik in drei wesentliche Epochen: fliegende Handverdrahtung (Generation 1), subtraktive Flachleiterplatten auf FR-4-Basis (Generation 2) und additive Elektronikfertigung (AME, Generation 3).
- **FR-4 als Referenzstandard:** Die glasfaserverstärkte Epoxidharz-Leiterplatte bildet das Rückgrat industrieller Elektronik mit hochoptimierten Massenfertigungsprozessen, global etablierten Lieferketten und standardisierten IPC-Regelwerken.
- **Grenzen etablierter Verfahren:** Steigende Integrationsdichte, komplexe 3D-Geometrien, thermische Engpässe und lange Iterationsschleifen bei externen Leiterplattenbestellungen setzen der klassischen Konstruktion Grenzen.
- **Potenziale von AME:** Die additive Fertigung ermöglicht das simultane Drucken dielektrischer Substrate und leitfähiger Leiterbahnen im Raum. Dies erlaubt neue Freiheiten in der Z-Achse, das Einbetten von Komponenten und stark verkürzte Prototypenzyklen im eigenen Haus.

[1] Link zum Video: `https://youtu.be/fQfYx87JEjA`

- **Analogie zur Historie:** Der heutige Entwicklungsstand von AME lässt sich mit der Frühphase des Gehäuse-3D-Drucks um das Jahr 2017 vergleichen: Eine Phase des Übergangs von reiner Prototypenerprobung hin zu industriellen Designrichtlinien und Standards.

3 Detaillierte Analyse der drei Technologie-Generationen

Merkmal	Gen. 1: Fliegende Verdrahtung	Gen. 2: FR-4 (Subtraktiv)	Gen. 3: AME (Additiv)
Verbindungsart	Diskrete Drähte, Litzen	Geätzte Leiterbahnen (Kupfer)	z.B. Gedruckte Nanopartikeltinten
Substrat	Keine Trägerplatte (Chassis)	Epoxidharz (FR-4)	Gedrucktes Photopolymer/Polymer
Geometrie	Manuell dreidimensional	Streng planar (2D) bzw. Multilayer	Freiform, 3D-Leiterzüge, Kavitäten
Vias / Durchstiege	Nicht relevant	Mechanisch/Laser gebohrt, galvanisiert	Additiv aufgebaut ohne Bohrschritt
Bauteilplatzierung	Handlötung an Stützpunkte	Bestückung auf Außenlagen	Auf Außenlagen oder im Substrat eingebettet
Wirtschaftlichkeit	Nur Einzelstücke / Reparatur	Unschlagbar bei mittleren bis hohen Stückzahlen	Ideal für Prototypen, Kleinserien, hohe Komplexität
Iterionsdauer	Sofort modifizierbar	Tage bis Wochen (Leiterplattenfertiger)	Stunden bis Tage (inhouse verfügbar)

Tabelle 1: Systematischer Vergleich der drei Leiterplatten-Generationen

3.1 Generation 1: Fliegende Verdrahtung (Point-to-Point Wiring)

In den Anfangsjahren der Röhren- und Transistortechnik wurden Schaltungskomponenten direkt von Anschlusspunkt zu Anschlusspunkt auf Lötleisten, Sockeln oder frei im Gehäuse verdrahtet.

3.1.1 Charakteristik und Fertigungslogik

Die Verbindungsherstellung erfolgte manuell durch Verdrillen, Klemmen und Weichlöten isolierter Drähte. Jedes Gerät stellte im Grunde ein Unikat dar. Änderungen am Schaltplan ließen sich unmittelbar durch Umhängen von Leitungen testen, ohne dass Vorrichtungen oder lithografische Werkzeuge angefertigt werden mussten.

3.1.2 Konstruktive und betriebliche Grenzen

Mit zunehmender Schaltungsgröße stieg die Anfälligkeit exponentiell. Typische Fehlerbilder waren:

- **Schwingungsbrüche:** Mechanische Vibrationen führten an den Lötstützpunkten zu Ermüdungsbrüchen der Kupferlitzen.
- **Elektromagnetische Kopplungen (EMV):** Unkontrollierte Leitungsschleifen, veränderliche Leitungsabstände und fehlende definierte Masseflächen erschwerten die Beherrschung von Störsignalen.
- **Aufwand in Prüffeld und Reparatur:** Bei komplexeren Verdrahtungsknäueln war die visuelle und messtechnische Fehlersuche extrem zeitaufwendig und kaum reproduzierbar.

3.2 Generation 2: Die subtraktive FR-4-Leiterplatte

Mit der Erfindung der geätzten gedruckten Schaltung (maßgeblich geprägt durch Paul Eisler in den 1930er- und 1940er-Jahren) und der Einführung von FR-4 (=Flame Retardant Typ 4) als genormtem Basismaterial entstand die moderne Elektronikfertigung.

3.2.1 Fertigungsprinzip: Subtraktiv und planar

FR-4 besteht aus einem Glasfasergewebe, das mit bromiertem Epoxidharz imprägniert und beidseitig mit einer geschlossenen Kupferschicht kaschiert ist. Leiterbahnen entstehen subtraktiv: Nicht benötigtes Kupfer wird fotolithografisch maskiert und chemisch weggeätzt. Mehrlagige Multilayer-Platinen entstehen durch Laminieren einzelner Lagen unter hohem Druck und Temperatur, gefolgt von Durchkontaktierungen (DK, NDK, Vias) mittels Bohren und galvanischer Kupferabscheidung.

3.2.2 Stärken des Standards

- **Hohe Skalierbarkeit:** In der Serien- und Massenfertigung unschlagbar geringe Stückkosten pro Quadratzentimeter.
- **Umfassendes Regelwerk:** Vollständig durchnormte Auslegungs- und Abnahmekriterien (IPC-Standards wie IPC-A-600, IPC-A-610, IPC-2221).
- **Globales Fertigungsökosystem:** Weltweit austauschbare Auftragsfertiger (EMS) und standardisierte Bestückungs- und Lötprozesse (SMD, Reflow, Welle).

3.2.3 Entwicklungs- und Konstruktionsgrenzen

Trotz aller Vorzüge unterliegt die FR-4-Leiterplatte physikalischen und organisatorischen Beschränkungen:

- **Strenge 2D-Flächigkeit:** Die Schaltung bleibt planar oder im besten Fall starr-flexibel biegbar. Eine dreidimensionale Verlegung von Leiterzügen im Volumenkörper ist subtraktiv nicht möglich.
- **Lieferzeiten bei Iterationen:** Jede Hardwareänderung erfordert eine erneute Leiterplattenbestellung. Lieferzeiten von Tagen bis mehreren Wochen bremsen agile Entwicklungszyklen aus. Es ist klar, dass die hier genannten Zeiten stark vom Unternehmen und deren Prozesse abhängt. Kurze Bestellprozesse inklusive Einkauf, Anfragen etc. können die Zeiten von der Änderung des Datensatzes bis zur Lieferung auf den Labortisch reduzieren.
- **Materialverlust:** Durch das flächige Wegätzen von Kupfer und das Fräsen der Konturen fällt chemischer und mechanischer Abfall an.

3.3 Generation 3: Additively Manufactured Electronics (AME)

Die dritte Generation löst sich vom planaren Schichtaufbau und der Trennung zwischen Gehäusestruktur und Schaltungsträger.

3.3.1 Fertigungsprinzip: Additiv und multiprozessfähig

Bei AME werden Substrat und Leiterbahnen schichtweise aus flüssigen oder pastösen Ausgangsmaterialien aufgebaut (beispielsweise über Inkjet-Druck, Aerosol-Jet oder Dispensen). Dabei kommen dielektrische Photopolymere oder Thermoplaste parallel zu leitfähigen Nanopartikeltinten (häufig Silber oder Kupfer) zum Einsatz, die thermisch oder per UV-Licht ausgehärtet werden.

3.3.2 Neue konstruktive Freiheiten

- **Echte Z-Achsen-Freiheit:** Leiterbahnen können frei im 3D-Raum geführt werden, schräg verlaufen oder um interne Kavitäten herumgeführt werden, ohne dass gebohrt werden muss.
- **Eingebettete Bauelemente (Embedded Components):** Passive und aktive SMD-Bauteile können während des Druckvorgangs in Hohlräume im Substrat eingesetzt und direkt kontaktiert werden.
- **Mechatronische Integration:** Schaltungsträger und Gehäusebauteil verschmelzen zu einer Einheit (Moulded Interconnect Devices / Mechatronical Integrated Devices -> 3D-MID-Verwandtschaft).
- **Inhouse-Prototyping über Nacht:** Da keine Masken oder Lithografiewerkzeuge benötigt werden, können Funktionsmuster innerhalb weniger Stunden direkt aus den CAD-Daten gedruckt werden.

4 Der historische Vergleich: Lerneffekte für die heutige Praxis

Im Webinar zieht Steffen Braun zwei aufschlussreiche Vergleiche:

1. **Die Einführung von FR-4 in den 1950er- und 1960er-Jahren:** Auch damals stieß die gedruckte Schaltung anfangs auf Skepsis bei Ingenieuren, die auf die bewährte Handarbeit vertrauten. Erst als die Komplexität der Schaltungen den Handaufbau unbezahlbar und fehleranfällig machte, setzte sich FR-4 flächendeckend durch.

2. **Der 3D-Druck mechanischer Gehäuse um das Jahr 2017:** Vor rund zehn Jahren galt der Gehäusedruck im Prototypenbau oft als unpräzise und materialtechnisch limitiert. Heute ist additives Rapid Prototyping aus der Produktentwicklung nicht mehr wegzudenken und wird in vielen Bereichen für Endbauteile genutzt.

Wichtige methodische Einschränkung: Eine historische Analogie zeigt Tendenzen von Innovationskurven auf, ersetzt jedoch keine empirischen Messwerte. AME-Leiterplatten weisen heute bei Materialkosten, Leitfähigkeit der Tinten und Dauertemperaturbeständigkeit andere Kennwerte auf als jahrzehntelang optimiertes FR-4. Jedes Entwicklungsteam muss daher eigene, projektbezogene Verifikationsmessungen durchführen.

Dies wird aber genau so durchgeführt beim 3D-Druck mechanischer Gehäuse: Ableitung von Eigenschaften für das Serienprodukt aus dem Prototypen, ohne die hohen Anforderungen der Serie. Dafür schnelle Iterationsschleifen für Detailprobleme des Gesamtsystems.

5 Fünfstufiger Bewertungsrahmen für Entwicklungsteams

Um von allgemeinen Technologieversprechen zu belastbaren Projektentscheidungen zu gelangen, empfiehlt sich ein strukturierter Prüfprozess:

5.1 Schritt 1: Ermittlung der echten Schmerzpunkte im aktuellen Design

Analysieren Sie, an welchen Stellen Ihre bestehende Baugruppe an Grenzen stößt:

- Liegt ein kritischer Bauraumengpass vor, der sich durch 3D-Entflechtung lösen ließe?
- Verursachen lange externe Leiterplattenlieferzeiten Projektverzögerungen?
- Gibt es Anforderungen an Gewichtsreduktion oder Hochfrequenzanpassung durch kürzere Z-Achsen-Leiterwege?

5.2 Schritt 2: Festlegung unverhandelbarer Pflichtanforderungen

Definieren Sie Ausschlusskriterien:

- Einsatztemperaturbereich (z. B. Automotive −40 °C bis +125 °C)?
- Maximaler Dauerstrom und Spannungsfestigkeit?
- Mechanische Schock- und Vibrationsprofile?
- Konformität und Zulassungsstandards (z. B. UL94-V0 Brennbarkeitsklasse)?
- Medizinische Regularien?

5.3 Schritt 3: Formulierung einer präzisen AME-Hypothese

Vermeiden Sie es, das gesamte System auf einmal additiv umstellen zu wollen. Formulieren Sie stattdessen eine klare Teilhypothese:

Durch die additive Fertigung des Sensor-Frontend-Moduls können wir die Bauhöhe um 30 % verringern und die Prototypen-Iterationen von vier Wochen auf zwei Tage verkürzen.

5.4 Schritt 4: Prozess- und Schnittstellenprüfung

Klären Sie die Durchgängigkeit der CAD/CAM-Kette:

- Unterstützt das eingesetzte ECAD-System echte 3D-Routing-Features oder werden mechatronische Co-Design-Tools (z. B. MCAD-ECAD-Kopplung) benötigt?
- Welche Nachbearbeitungsschritte (Sintern, Lötpaste, Bauteilklebung) sind inhouse oder über Spezialdienstleister abgedeckt?
- Wer kann hier helfen? Müssen eventuell auch externe Partner gefunden werden?

5.5 Schritt 5: Vergleichender Prototypentest mit Akzeptanzkriterien

Fertigen Sie ein repräsentatives Testmuster sowohl konventionell als auch additiv. Messen Sie elektrische Übergangswiderstände, Signalintegrität und thermisches Verhalten unter identischen Laborbedingungen. Nur wenn die vorher definierten Akzeptanzkriterien erreicht werden, erfolgt die Freigabe für Folgephasen.

6 Checkliste für Hard- und Firmware-Entwickler, sowie Elektronik-Konstrukteure als Sparring

Vor der Entscheidung für ein AME-Teilprojekt sollte das Team folgende Punkte abhaken können:

-> Sind alle elektrischen und thermischen Grenzwerte der Baugruppe vollständig dokumentiert?

-> Ist die genaue Ursache für Verzögerungen oder Engpässe im bisherigen FR-4-Design identifiziert?

-> Liegt eine messbare, quantifizierbare Hypothese für den Einsatz von AME vor?

-> Wurden die dielektrischen Eigenschaften (Permittivität, Verlustfaktor) des AME-Substrats bei den Zielbetriebsfrequenzen überprüft?

-> Ist geklärt, ob oberflächenmontierte Bauteile Standard-Reflow-Temperaturen standhalten oder Niedertemperaturlote / Leitkleber erforderlich sind?

-> Existiert ein Prüfplan für die elektrische und mechanische Validierung des AME-Musters?

7 Fazit und Ausblick

Die Betrachtung der drei Generationen der Leiterplatte belegt: Elektronikkonstruktion ist keine statische Disziplin. Die klassische FR-4-Leiterplatte wird auch in den kommenden Jahren das dominierende Basismaterial für die weltweite Großserienfertigung bleiben. Gleichzeitig entwickelt sich die additive Elektronikfertigung (AME) mit hohem Tempo von einer experimentellen Nischentechnologie zu einem wirkungsvollen Werkzeug für High-End-Nischen, Raumfahrt, Medizintechnik und agile Prototypenphasen.

Wer die Prinzipien beider Fertigungswelten versteht und nach objektiven ingenieurwissenschaftlichen Kriterien entscheidet, sichert sich in der Produktentwicklung entscheidende Geschwindigkeits- und Konstruktionsvorteile.

Nutzen Sie dieses Whitepaper als Diskussionsgrundlage für Ihr nächstes Entwicklungsmeeting. Hinterfragen Sie starre Bauraumgrenzen und prüfen Sie, wo eine additive Prototypenfertigung Ihren Entwicklungszyklus spürbar beschleunigen kann.

8 Quellenangaben

Original-Webinar von Steffen Braun (MDI):
Titel: *Die 3 Generationen der Leiterplatte kennenlernen!*
Videolink: `https://youtu.be/fQfYx87JEjA`
Website: `https://www.mdi-design.biz`