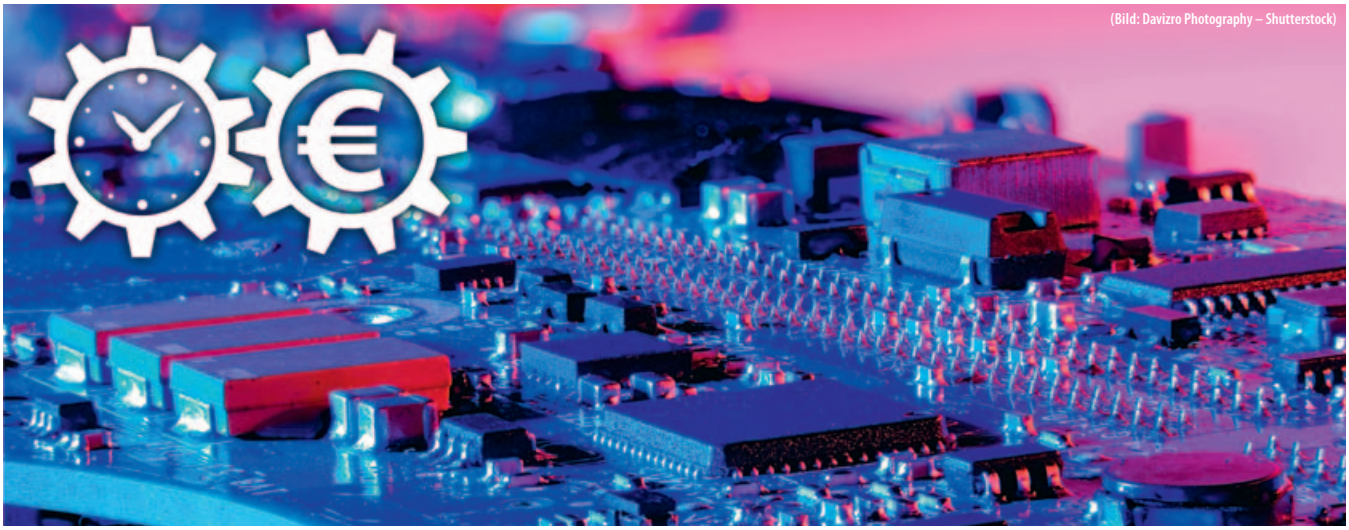
Best Practices bei Gerätedesign und Montage:

Zeit ist Geld!


(Bild: Davizro Photography – Shutterstock)

Bei der Entwicklung elektronischer Geräte können bis zu 20 Prozent an Zeit und Kosten eingespart werden, wenn man diese Maßnahmen trifft: frühzeitige Design-Evaluierung, veränderte Prototypenphasen, kürzere Fertigungszeiten, neue Testkonzepte und erweiterte Montage-Dienstleistungen.

Bekannte Trends wie Miniaturisierung, höhere Packungsdichte sowie steigende Komplexität verursachen auf dem Weg von der Produktidee bis zur Serienfertigung vielfältige Probleme. Dabei könnte der Produkteinführungsprozess an sich erheblich verkürzt werden – so die Erfahrungen bei Ihlemann. Der ZVEI spricht von der Parallelisierung von Design, Produktion der Prototypen und Industrialisierung für die Serie (DfX – Design for Excellence). Dabei gilt: Je früher Best-Practice-Erfahrungen berücksichtigt werden, desto höher fallen die Zeit- und Kostenersparnisse aus.

Aus Sicht des EMS-Dienstleisters gibt es dabei folgende Hauptansatzpunkte:

- eine Design-Evaluierung des PCB-Layout vor Abschluss der Designphase
- die frühzeitige Anwendung von Serienstandards bereits in der Prototypenphase
- die Nutzung neuer Technologien und Methoden für kürzere Durchlaufzeiten in der Fertigung
- eine bessere und schnellere Fehlererkennung und -korrektur durch variable Testkonzepte
- bessere Verzahnung von Fertigung, Montage und Funktionstests, um die Auslieferung zu beschleunigen

Design-Evaluierung des PCB-Layout

Noch in der Designphase, also vor dem ersten Bestellen der Leiterplatte, kann durch eine Software-gestützte virtuelle Bestückung geprüft werden, ob die maßgeblichen Standards wie IPC-A-610 „Acceptability of Electronic Assemblies“, ferner die Vorgaben der Bauteilhersteller sowie die maschinenspezifischen Designrichtlinien der Fertigung eingehalten werden. Die virtuelle Bestückung erkennt typische Designfehler wie

- **Probleme mit Bauelementen:** beispielsweise zu geringe Abstände von Bauelementen zueinander, falsche Padgrößen und Bohrungen sowie Aufschwimmen von Bauteilen durch eine falsche Padgestaltung und falsche Bauformen aufgrund von falschen Artikelnummern (Stücklistenfehler)
- **Probleme mit Durchkontaktierungen:** Zu geringe Bohrdurchmesser zum Beispiel verhindern die Kapillarwirkung und das Aufsteigen des Lots. Eine weitere Quelle ist Lötzinnabfluss bei den Vias direkt in SMD-Pads.
- **Aufbau der Leiterplatte:** Fehlende Wärmefallen in Innenlagen an den Durchsteigern/Bohrungen mit Verbindungen zu Masseflächen verhindern wegen nicht ausreichender Durchwärmung einen vollständigen Lötdurchstieg.

„Nach unseren Erfahrungen werden durch die Design-Evaluierung etwa 95 Prozent der Designfehler erkannt. Die restlichen 5 Prozent betreffen lediglich kundenspezifische Sonderentwicklungen“, berichtet Bernd Richter, Vorstand der Ihlemann AG. Nach der virtuellen Bestückung erstellt der Fertigungs-Dienstleister einen ausführlichen Report (**Bild 1**) und gibt Hinweise zur Beseitigung der festgestellten Probleme sowie zur Fertigungsoptimierung. Dazu gehören auch Hinweise zum Materialmanagement, denn problematische Bauteile können oft durch Alternativen ersetzt werden. Hier berücksichtigt der Dienstleister neben der Funktionalität auch Aspekte wie gesetzliche Normen, die langfristige Verfügbarkeit (Obsoleszenz-Management) sowie die Materialpreisentwicklung.

Die vorgeschlagenen Designkorrekturen können in dieser frühen Phase des Produkteinführungsprozesses noch relativ einfach umgesetzt werden. Werden die Korrekturen nicht berücksichtigt, treten sie spätestens in der Serienferti-

gung als verdeckte Fehlerquellen auf. Das führt beispielsweise dazu, dass automatisierte Lötprozesse wie Selektivlöten durch nachträgliche Handlötstellen ergänzt werden müssen. Das erhöht die Fehlerquote, führt zu steigenden Kosten und verzögert die Auslieferung.

Die Erkenntnisse aus der Design-Evaluierung ermöglichen zudem eine kürzere Fertigungsvorbereitung, nachdem technologisch weitgehend sichergestellt ist, dass beim Übergang von der Prototypen- zur Serienphase keine zeit- und kostenaufwändigen Korrekturen mehr erforderlich sind.

Eine neue Sicht auf die Prototypenphase

Dafür aber werden die technologischen Unterschiede zwischen Prototypen- und Serienfertigung durch kompaktere Designs und kleinere Bauteile zunehmend größer. Da im traditionellen Prototypenbau viele Bauteile manuell bestückt werden, wirkt sich die zunehmende Miniaturisierung immer stärker aus. Die erforderliche Positionsgenauigkeit eines SMD-Bauteils von beispielsweise 50 µm ist per Hand nicht zuverlässig einzuhalten. Befinden sich die Bauteile in der Paste nicht exakt an der richtigen Stelle (x, y und Höhe), ergeben sich mangelhafte Lötstellen mit Fehlerraten von häufig 20 bis 30 Prozent.
Die Bestückung erfolgt üblicherweise auf Musterbaumaschinen. Datenformate, Prozesse und technische Parameter unterscheiden sich daher von den Serienmaschinen. Trotz der erfolgreichen Inbetriebnahme eines traditionell hergestellten Prototypen ergeben sich durch die größer werdenden Unterschiede zwischen Prototypen- und Serienfertigung nach der Prototypenphase steigende Entwicklungsaufwände. Deshalb empfiehlt der EMS-Dienstleister die Fertigung von Prototypen bereits auf High-End-SMD-Bestückungsautomaten. Hier werden Anforderungen wie Design for Manufacturing (DfM), Design for Testability (DfT) und Design for Cost (DfC) bereits an die Erstellung von Prototypen gestellt. Das hat zur Folge, dass bereits vor der Nullserie alle Vorbereitungen der Serienproduktion abgeschlossen sind. Es kann also ein ganzer Prozessschritt eingespart werden und der doppelte Aufwand für die Vorbereitung der Prototypen- und der Serienfertigung entfällt.

Kürzere Durchlaufzeiten in der Fertigung

Verbesserte Prozessabläufe und effektive Technologien sorgen heutzutage für immer kürzere Durchlaufzeiten in der Fertigung. „In der herkömmlichen Fertigung hat ein Produkt bis zur Auslieferung eine Gesamtdurchlaufzeit von Wochen, obwohl die reine Wertschöpfungszeit nur Minuten beträgt. Mit dem Fluss-Prinzip haben wir den Produktionsdurchlauf bei Ihlemann auf wenige Stunden reduziert“, berichtet Richter. Weitere Verbesserungen haben Technologien wie der Lötprozess unter Stickstoff, Verfahren wie „Pin in Paste“ und „Package on Package“ gebracht.

„Noch vor zehn Jahren fehlte es an Verfahren wie dem Selektivlöten oder dem Einsatz einer Stickstoff-Atmosphäre beim THT-Löten. So gab es viele Probleme mit fehlerhaften Lötstellen und störende Flussmittelrückstände“, so Richter. Durch die Verwendung von Stickstoff als Schutzgas in Wellenlötmaschinen und Reflow-Öfen wird der Sauerstoffgehalt in der Prozesskammer so weit reduziert, dass das flüssige Lot und die erwärmten Oberflächen der Bauteile und Leiterkarten nicht weiter oxidieren können. Im Ergebnis verbessert sich das Benetzungsverhalten; zudem wird weniger Flussmittel eingesetzt und die Lötprozesse werden sicherer sowie fehlerfreier.

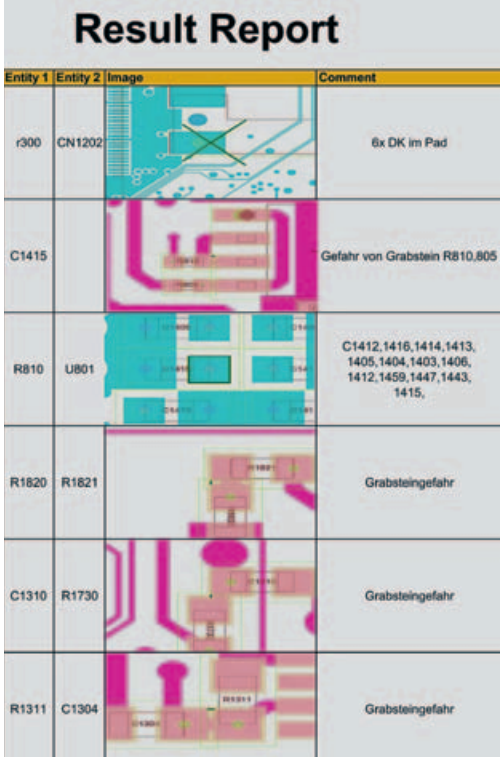


Bild 1. Nach der virtuellen Bestückung des PCB-Layout erstellt der Fertigungs-Dienstleister einen ausführlichen Report und gibt Hinweise zur Beseitigung der festgestellten Probleme und zur Fertigungsoptimierung. (alle Bilder: Ihlemann)

THT-Bauteile automatisiert bestücken

Die Bestückung von THT-Bauteilen ist nach wie vor eine qualitative und prozesstechnische Herausforderung. Die weitgehend manuellen Abläufe dauern erheblich länger und sind deutlich fehleranfälliger. Einige Teilschritte wie das Selektivlöten oder die AOI-Kontrolle indes wurden bereits automatisiert. Für Baugruppen mit wenigen THT-Bauteilen kann der Einsatz des Pin-in-Paste-Verfahrens sinnvoll sein, so der Dienstleister.

„Pin in Paste“ bzw. die Through-Hole-Reflow-Technologie (THR) ist ein seit 15 Jahren bekanntes Verfahren, das aber wegen der in der Vergangenheit eingeschränkten technologischen Beherrschbarkeit nur begrenzt eingesetzt wurde. Diese Sichtweise habe sich aber

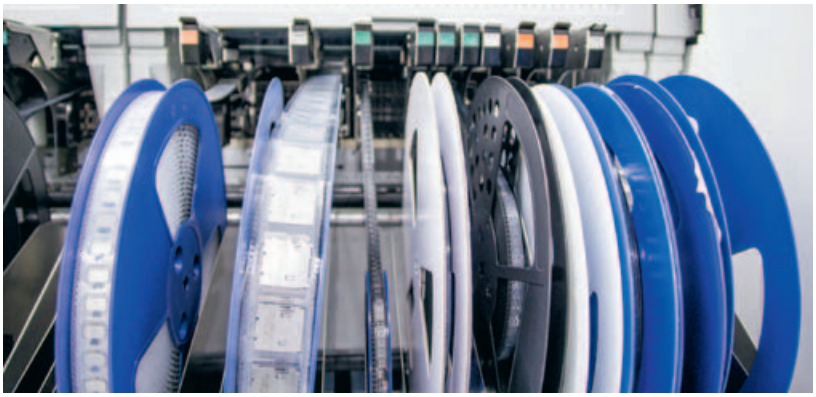


Bild 2. Durch die gemeinsame Verarbeitung von SMD- und THR-Bauteilen wird ein kompletter, stark manuell bestimmter Arbeitsgang (THT) eingespart.

durch Fortschritte bei den Bauteilen und den eingesetzten Hilfsstoffen inzwischen geändert, betont der Fertigungs-Dienstleister.

Bei Projekten, in denen das „Pin in Paste"-Verfahren nicht zum Einsatz kam, mussten zunächst die SMD-Bauteile bestückt und danach Reflow-gelötet werden. THT-Bauteile wie Steckverbinder und Stecker wurden dann in einem zusätzlichen Arbeitsgang manuell eingesetzt und wenn möglich wellengelötet. Im Falle des „Pin in Paste"-Verfahrens indes werden bedrahtete Bauelemente wie SMD-Bauteile behandelt und ebenfalls automatisiert bestückt. Dafür werden Bohrungen auf der Leiterkarte mit Lotpaste gefüllt, die Pins der THT-Bauteile durch den Bestückautomaten in die mit Paste gefüllten Bohrungen eingesetzt und dann im Reflow-Ofen gelötet. Beim Einsetzen des bedrahteten Bauteils wird die Paste in der Bohrung nach unten gedrückt und hängt als Tropfen am Pin. Beim Aufschmelzen im Ofen zieht sich das Zinn nach oben und sorgt so für die Füllung der Durchkontaktierung.

Dies verlief in der Vergangenheit oft nicht reibungslos, weil die Lotpaste zu schnell austrocknete, als Tropfen nach unten fiel und eine offene Lötstelle hinterließ. Verbesserte Pasten sind inzwischen prozesssicher und verfügen über ein besseres Benetzungsverhalten. Darüber hinaus haben die Bauteilhersteller auch spezielle temperaturstabile THR-Produktvarianten entwickelt, die wie SMD-Bauelemente für die automatisierte Bestückung auf Gurten geliefert werden.

Durch die gemeinsame Verarbeitung von SMD- und THR-Bauteilen (**Bild 2**) wird ein kompletter, stark manuell bestimmter Arbeitsgang eingespart. Das verbessert die Qualität, reduziert die Kosten, verkürzt die Verarbeitungszeit und ermöglicht zudem geringere Bauteil- und Lötstellenabstände zwischen den Bauteilen, die mit verschiedenen Fertigungsverfahren montiert werden.

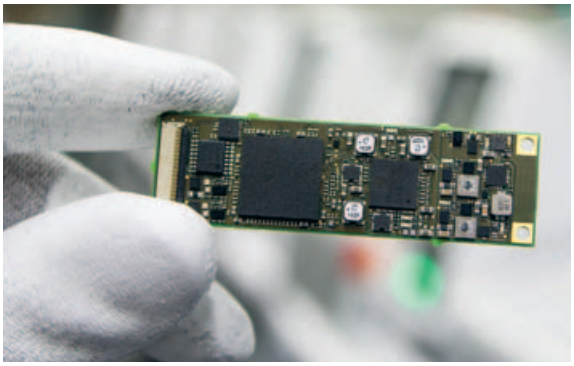


Bild 3. Die Package-on-Package-Technologie kommt auch bei Industriebaugruppen zum Einsatz. Dabei werden zwei oder mehr BGA-Chip-Gehäuse platzsparend übereinander angeordnet.

Bestückung von Bauteil auf Bauteil (Package on Package)

Der EMS-Dienstleister zitiert als Beispiel für den weithin bekannten Miniaturisierungs-Trend eine Industriebaugruppe mit 350 Bauelementen auf einer Leiterkarte mit nur 60 × 16 mm² Fläche. Um diese Integrationsleistung zu erreichen, kommen beispielsweise Mikro-BGAs mit einem Pitch-Abstand von 0,4 bis 0,6 mm und die Package-on-Package-Technologie (PoP) zum Einsatz.

Bei der PoP-Bestückung (**Bild 3**) wird ein zweites Bauteil exakt auf ein erstes Bauteil aufgesetzt. Der Fertigungsspezialist verwendet für die PoP-Bestückung eine moderne SMD-Linie. Hier werden die BGA-Gehäuse zunächst direkt bestückt. Das zweite BGA wird vor der Bestückung in ein Flussmittel eingetaucht. Dafür ist ein spezieller Feeder mit einem Flussmittelbehälter ausgerüstet. Wenn der Automat jetzt den zweiten BGA auf das erste Bauteil platzieren will, wird der BGA zunächst in das Flussmittel eingetaucht. Die gelartige Flussmittelpaste sorgt nun dafür, dass der BGA auf dem ersten Bauteil zuverlässig haften bleibt.

Damit auch der zweite BGA genau und sicher platziert wird, verfügt die SMD-Linie über ein präzises Kamerasystem und eine messgenaue Sensorik. Diese Sensorik misst beim Platzieren die Aufsetzkraft des zweiten BGA. Der Sensor überwacht, dass auch bei kleinsten Bauteilen von 0,15 × 0,3 mm² (03015) der Aufsetzdruck nicht zu gering und auch nicht zu groß wird.

Mit der Röntgenprüfung werden in Stichproben der fehlerfreie Lötprozess und die gleichmäßige Ausführung der Lötstellen bei PoP-Bestückungen sichergestellt. Die Ist-Position und die Höhe der verlöteten BGAs werden für die Serienfertigung als Sollvorgaben festgelegt und durch eine 3D-AOI (**Bild 4**) automatisiert überprüft.

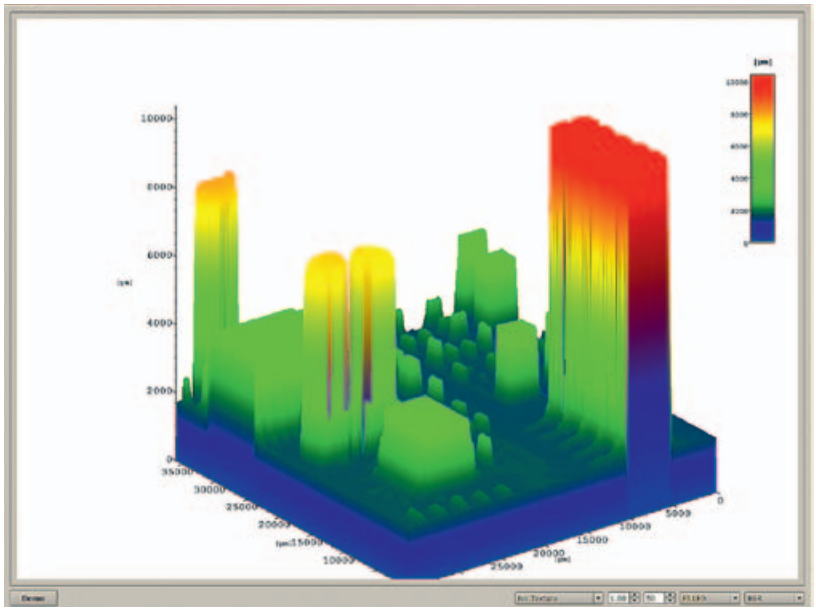


Bild 4. Die 3D-AOI-Prüfung wird bei verdeckten Lötstellen von BGAs, QFNs und Steckern eingesetzt. Mit der 3D-Vermessung wird erkannt, ob die Bauteile richtig verlötet sind und gleichmäßig flach auf der Leiterplatte aufliegen.

Kreativität auch bei der Montage gefragt

Die bestehende Miniaturisierungs-Trend verändert zudem auch die Gerätemontage. Bei kleineren Gehäusen werden beispielsweise eingeklemmte Antennen- oder Lüfterkabel zu einer neuen Fehlerquelle. Wenn optische Module

zusammenschrumpfen, stellen sich neue Herausforderungen u.a. bei der Justierung der Linsen.

Neue Geräte-Generationen werden aber nicht nur kleiner und kompakter. Bei einem aktuellen Projekt des EMS-Spezialisten ersetzt eine eng bestückte Leiterkarte in einem Diagnosegerät die bisher sechs montierten Platinen, und die onboard implementierte Software übernimmt zusätzliche Funktionen. Hier stellt sich die neue Anforderung, die Software bis kurz vor der Auslieferung noch zu aktualisieren und einen Run-in-Test zu integrieren.

Permanente Veränderungen sind nach den Erfahrungen des Ihlemann-Managements inzwischen der Alltag in Fertigung und Montage: „Entscheidend ist, wie die Mitarbeiter diese neuen Anforderungen selbst effektiv lösen können. Wir haben unsere Arbeitsprozesse deshalb vollkommen neu justiert. Für die Mitarbeiter ist es inzwischen völlig normal, ihre Arbeitsschritte jeden Tag mehrmals anzupassen und zu verbessern. Wir sind so in der Lage, die heutigen schnelllebigen und unsicheren Verhältnisse produktiv zu nutzen“, erläutert Bernd Richter.

Die Mitarbeiter in der Fertigung und Montage verwenden hierbei selbst entwickelte Hilfsmittel und Vorrichtungen, mit denen sie Arbeitsprozesse einfacher und effizienter gestalten können. Ein Beispiel ist das Montieren eines Lüfterkabels im jetzt kleiner gewordenen Gerät. Das Kabel soll verdrillt werden, doch ohne Hilfsmittel ist dieser Arbeitsschritt zu langwierig. Das Montageteam hat also die bestehenden Arbeitsabläufe analysiert und aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse eine erste Idee für eine Vorrichtung entwickelt. Die Idee wurde von den Mitarbeitern gemeinsam geprüft und nochmals geändert, denn die Konstruktion funktionierte im Prinzip, war aber noch nicht rund. Der zweite Ideenansatz passte dann schon deutlich besser, sodass der Vorrichtungsbau des EMS-Dienstleisters darauf aufbauend ein Muster erstellte. Das Hilfsmittel (**Bild 5**) wurde überprüft, verbessert und innerhalb eines Tages in mehreren kleinen Verbesserungszyklen so weit entwickelt, dass es einsetzbar war. Der bislang problematische Montageschritt ließ sich nun verbessern und das Verdrillen der Kabel ging fortan ergonomisch und effizient vonstatten. Mit Verbesserungsschritten nach diesem Muster wurde gemeinsam mit dem Hersteller zudem auch eine neue Lösung für die staubfreie Justierung der Linsen gefunden.

Variable Testkonzepte verbessern die Fehlererkennung

Jeder elektrische Netzknoten sollte für spätere Qualitätskontrollen mit einem Testpunkt versehen werden. Entwickler verzichten aber zunehmend auf die Einrichtung von solchen Punkten, weil

es häufig am Platz für die Test-Pads fehlt. Ohne diese Testpunkte sind In-Circuit-Tests (ICT) zur Prüfung der elektrischen Funktionen aber nicht möglich. Die fertigen Produkte können also vom Hersteller erst unmittelbar vor der Auslieferung intensiv geprüft werden. Werden dann bei den bereits komplett montierten Geräten Fehler in den elektrischen Eigenschaften der Bauteile entdeckt, müssen ganze Fertigungschargen geöffnet und Bauteile ausgetauscht werden. Dies ist ein immenser Aufwand.

Eine Alternative zu ICT sind Flying Probe Tests (FPT, **Bild 6**), die der Fertigungsdienstleister auch in großem Umfang nutzt. Letztere können gegenüber herkömmlichen Funktionstests mit starren Nadeladaptern mit etlichen Vorteilen aufwarten: Die Testnadeln sind beweglich und können die zu prüfenden Positionen flexibel ansteuern. Damit können auch bei Baugruppen ohne vordefinierte Testpunkte Funktionsprüfungen durchgeführt werden. Auch sehr kompakte Baugruppen mit engen Bauteilabständen < 0,3 mm lassen sich so prüfen, weil die Testnadeln sehr präzise navigiert werden können. Ein weiterer Vorteil von FPT – gegenüber ICT – ist der relativ geringe Aufwand für die Prüfungsvorbereitung.

ICT hingegen erweist sich bei kleinen Losgrößen und häufigen Änderungen als zu aufwändig und unflexibel. Gleiches gilt für Prototypen. Flying Probes hingegen sind in der Prototypenfertigung eine gute Testalternative und können die Entwicklungsverifikation ergänzen. Da bei frühen Prototypen die Fehlerquellen häufig sehr vielfältig sind und die Fehleranalyse entsprechend aufwändig ist, kann man FPTs auch gut zur Fehlereingrenzung verwenden. Die notwendigen Prüfprogramme für Prototypen sind mit den richtigen Daten (ODB++) relativ einfach und schnell erstellt. Sie ermöglichen, dass mit geringem Aufwand Bauteilwerte vermessen, Spannungen geprüft oder Messreihen durchgeführt und so Baugruppenfehler schneller erkannt werden können.

Bild 5. Mitarbeiter in der Fertigung und Montage nutzen selbst entwickelte Hilfsmittel und Vorrichtungen, um Arbeitsprozesse einfacher und effizienter zu machen.

Bild 6. Auch sehr kompakte Baugruppen mit engen Bauteilabständen von unter 0,3 mm lassen sich mit Flying Probe Tests (FPT) prüfen, weil die Testnadeln sehr präzise navigiert werden können.

Fertigung, Montage und Funktionstests besser koordinierbar

Mit komplexer werdenden Software-Funktionen wird auch die Übertragung von Firmware auf fertige Baugruppen wichtiger. Da während der Prototypenphase oft noch keine fertige Firmware vorliegt, muss dies nach der Null-Serienfertigung erfolgen. Beim EMS-Dienstleister wurde dieser Arbeitsschritt mit in den FPT integriert. So konnte ein ganzer Arbeitsschritt eingespart werden.

Software-Änderungen sind bekanntermaßen bis kurz vor der Auslieferung möglich. Damit kann es aber auch sein, dass mit der Firmware-Anpassung eine Aktualisierung der Test-Software erforderlich wird. Durchführen lässt sich dies durch Fernwartungs- und Teleserviceverbindungen zum Hersteller.

In der Vergangenheit wurden beim EMS-Dienstleister Geräte gefertigt, montiert, getestet, verpackt und zum Hersteller geschickt. Hier wurden die Geräte wieder ausgepackt und Funktions- oder Run-in-Tests unter Feldbedingungen durchgeführt. Auf diese Weise entsteht allerdings auch eine unnötige Zeitschleife.

Der Fertigungsspezialist hat solche ergänzenden Tests in die eigenen Prüfungen integriert – so zum Beispiel auch Funktionstests für Relais. Für Hersteller, die eine mehrmalige Beschaltung des Relais vor der Erst-Inbetriebnahme empfehlen, wird im FPT beispielsweise ein fünfmaliger Schaltvorgang durchgeführt. Eine ähnliche Anforderung gilt für Netzteile, die vor der Auslieferung unter Spannung gesetzt und deren Spannungswerte überprüft werden sollen.

Für andere Kunden werden an fertigen Geräten 24-stündige Run-in-Tests unter Echtbedingungen durchgeführt. Anschließend werden die Geräte verpackt und direkt an die Endkunden ausgeliefert.

nach Unterlagen von Ihlemann / go