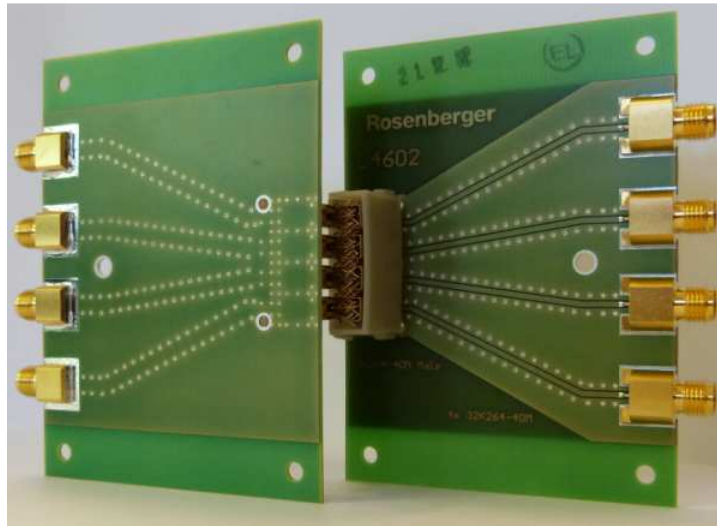


Auslegung und Produktabsicherung eines HF-Steckverbinders mit Hilfe einer gekoppelten Simulation HFSS-ANSYS Structural

Christian Dandl, Helmut Reiter

Rosenberger Hochfrequenztechnik GmbH & Co.KG



Summary

In this manuscript a project is presented where a new four-channel RF-connector was to be designed. Both sides of the connector should be mounted on printed circuit boards and are intended to connect two control boxes in an automotive application.

The general requirements are

- Available installation space is minimal
- Connector shall compensate for positioning uncertainty of ± 0.5 mm in all directions

These tight demands made it necessary to introduce a concept containing many contact fingers with a high grade of flexibility.

To validate the demanded properties, several mechanical simulations were run to analyze contact and mating forces for several maximum tolerance positions.

The so generated deformed models were exported to the 3-D-Field Solver HFSS to prove a good electrical performance for representative arrangements within the mechanical misalignment window.

The export was carried out by converting the deformed model in ANSYS Structural by using an APDL script. After that some additional rework was necessary in the Design Modeller before the single parts could be imported into HFSS finally.

Despite this process was complex and time consuming it proved to be a practical way to get a highly deformed 3-D-Model into HFSS.

Keywords

Geometrieexport, Board to Board Verbindung, Koaxialstecker, HFSS, ANSYS Structural, Verformte Geometrie

Motivation

Seit langem finden HF-Steckverbinder im Automobil Anwendung, um Trägerfrequenzsignale (z.B. AM- und FM-Radio) zwischen Antenne und Empfänger zu übertragen. Im Laufe der Zeit kamen weitere Dienste wie Mobilfunk, Satellitennavigation oder Wireless-LAN hinzu. Dadurch stiegen auch die Anforderungen an Bandbreite, Übersprechen und elektromagnetische Verträglichkeit (EMV). Es ist ein Trend zu Mehrfachsteckverbindern zu beobachten, die aufgrund eines gemeinsamen Umgehäuses weniger Raum beanspruchen.

Im Rahmen eines Projektes wurde die Firma Rosenberger Hochfrequenztechnik mit der Entwicklung eines Vierkanal-Board-to-Board-Verbinders beauftragt, der zwei abgeschlossene Module miteinander verbinden soll. Da die Module zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Fahrzeug montiert werden, sind ein großer Fangbereich und ein hoher Toleranzausgleich in allen Raumrichtungen notwendig.

Üblicher Aufbau eines HF-Steckverbinders für den Automobilbereich

Für die verschiedenen HF-Übertragungsstrecken in Fahrzeugen werden üblicherweise FAKRA-Steckverbinder (FAch-KReis-Automobil) verwendet. Diese sind in ISO 20860 standardisiert und koaxial sowie radial geschlossen aufgebaut. Dabei verfügt lediglich die Buchse über Federlaschen an Innen- und Außenleiter, der Stecker verfügt über keine federnden Elemente.

Alle FAKRA-Steckverbinder sind mit einem Kunststoff-Umgehäuse ausgestattet. Das Umgehäuse verriegelt die Kontaktelemente, ermöglicht deren axiale Führung und schützt das Stecksystem vor Fehlsteckungen. Der Fangbereich des Kuppler-Außenleiterkontakts ist so gewählt, dass sich dieser auf den Stecker-Außenleiter innerhalb der zulässigen Positionstoleranz ohne Beschädigung zentrieren kann. Erst nach dem Ausrichten der beiden Außenleiter berühren sich die Innenleiter, die sich aufeinander ausrichten und kontaktieren. Durch diese Reihenfolge beim Einsteckvorgang werden die Anforderungen an den notwendigen Toleranzausgleich von außen nach innen immer geringer.

Im hier beschriebenen Konstruktionsauftrag ist Rosenberger als alleiniger Lieferant für den Steckverbinder vorgesehen. Damit darf das Interface von der Norm abweichen.

Mechanische Anforderungen und konstruktive Umsetzung

Mechanische Anforderungen an das neue Stecksystem:

- Toleranzausgleich von $\pm 0,5$ mm in jeder Raumrichtung
- Sichere Kontaktierung auch bei mehrfachen Steckvorgängen mit unterschiedlichen Toleranzgrenzen
- Gesamtbreite des Steckverbinders geringer als 30 mm
- Möglichkeit einer Teilbestückung (2-fach, 3-fach)
- Ausreichende elektromagnetische Abschirmung
- Max. Steckkraft des Gesamtsystems kleiner als 30 N
- Konstante Steckkraft bei unterschiedlichen Toleranzlagen

Aus mechanischer Sicht konnten die Anforderungen durch eine offene, auf beiden Seiten nachgiebige Konstruktion umgesetzt werden. Den Kern der Konstruktion bildet eine Art Umklammerung des Stecker-Außenleiters durch drei Kontaktflaschen (siehe Fig. 1), welche abwechselnd von innen und außen kontaktieren. Die minimale Vorspannkraft wird durch das Überlappen der Kontaktfinger aufgebracht. Der Toleranzausgleich wird durch ein Verwinden der Stecker- und Kuppler-Bauteile erreicht. Durch diese Art der Konstruktion verringert sich die maximale Auslenkung der Federlasche auf + 0,5 mm Toleranzausgleich plus den Federweg zum Erreichen der minimalen Kontaktkraft. Zudem kann durch diese Konstruktion das Dielektrikum und das Umgehäuse als ein Bauteil ausgeführt werden. Dadurch reduzierten sich sowohl die Werkzeug- als auch die Montagekosten. Durch die unsymmetrische Anordnung können die Kanäle sehr kompakt angeordnet werden. Dabei überlappen sich die Massefedern mit den signalführenden Federn, was allerdings zu einem erhöhten Übersprechen zwischen den Kanälen führen kann. Dies wurde im Anschluss an die mechanische Bauteilauslegung im 3-D-Feldsimulator HFSS überprüft und optimiert.

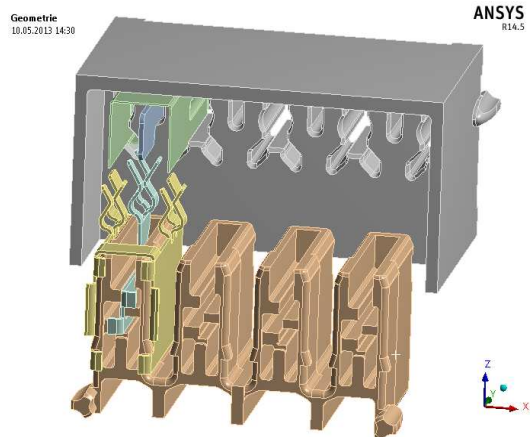


Fig. 1: Das Kontaktkonzept

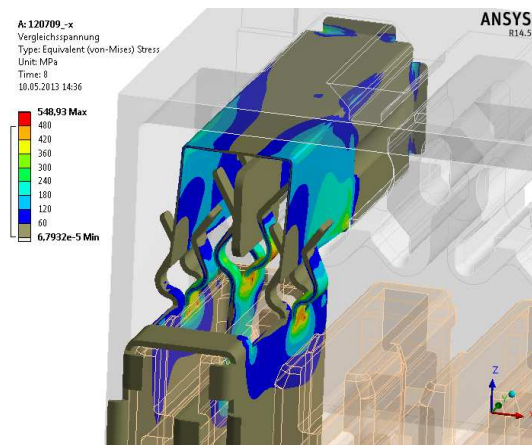


Fig. 2: Vergleichsspannung bei $X = -0,5$ mm, CuSn6

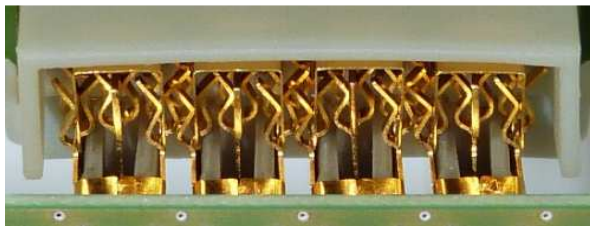


Fig. 3: Baugruppe gesteckt

Die Geometrie wurde in ProE vorkonstruiert und anschließend mit ANSYS Mechanical optimiert. Die Federlaschen, das Dielektrikum und der nachgiebige Steckeraufbau wurden so angepasst, dass die elastische Verformung des Steckers über den gesamten Steck- und Toleranzbereich den elektrischen Kontakt sicherstellte.

Mechanische Simulation: Kontaktkraft

Die ausreichend hohe Normalkraft der Kontaktlaschen ist die Grundlage für eine sichere und dauerhafte Signalführung. Ist die Kontaktkraft zu gering, so kann der Übergangswiderstand über die Lebensdauer ansteigen und zu ungewollten Resonanzen in der Signalübertragung führen. Bei zu großen Kontaktkräften kann die Oberfläche beim Stecken bzw. bei Vibration verschleifen. Der Verschleiß bewirkt das Durchreiben der Edelmetallschicht. Dadurch findet der elektrische Kontakt zwischen der unedlen Zwischenschicht (z.B. Ni) oder dem Basismaterial statt. Diese Materialien bilden Oxidationsschichten, die mitunter einen geschlossenen Kontaktpunkt unterwandern können. Infolge dieses Alterungsvorgangs steigt der Übergangswiderstand an. In sehr ungünstigen Fällen kann es zum totalen Ausfall einer Kontaktstelle kommen.

Für die gewählten Kontaktoberflächen wird eine minimale Kontaktkraft von 0,5 N gefordert, um das Altern des geschlossenen Kontakts zu vermeiden. Diese Kontaktkraft soll auch dann noch vorhanden sein, wenn der Kontakt in einer extremen Toleranzsituation und anschließend in der entgegengesetzten Toleranzlage gesteckt wird. In der Simulation wurde dies abgebildet indem der Kuppler zuerst um $X = -0,5$ mm verschoben und gesteckt wurde. Anschließend wurde der Kontakt in $X = +0,5$ mm bezüglich seiner idealen Mittenposition verschoben und erneut gesteckt. Um zu prüfen, ob der Kontakt wesentlich verformt wird, wurde dieser nochmals in der Position $X = -0,5$ mm gesteckt. In allen 3 Endpositionen wurde dann die Kontaktkraft ausgewertet. Wie in Fig. 5 zu sehen ist, ist die Kontaktkraft bei den Laschen AL 1, AL 3, AL 4, AL 6 nicht ausreichend. Um die Normalkräfte zu erhöhen, wurden diese Laschen um 0,2 mm weiter vorgespannt. Mit dieser Maßnahme konnte die Mindest-Kontaktkraft an allen Laschen und Positionen erreicht werden (Fig. 6).

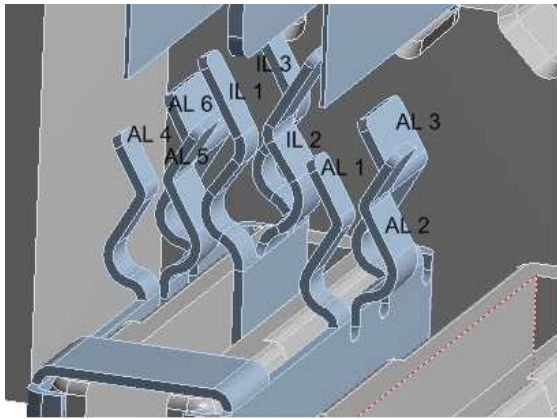


Fig. 4: Bezeichnung der Kontaktlaschen

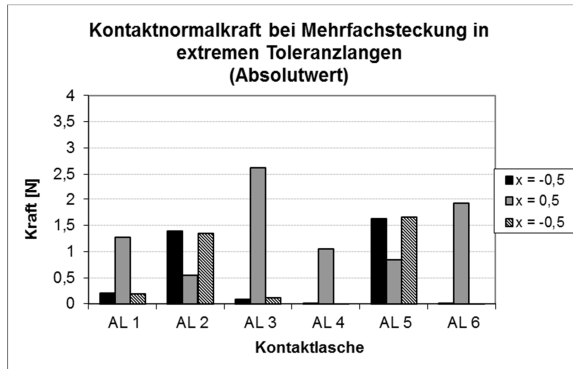


Fig. 5: Normalkräfte, Verschrängung nominal

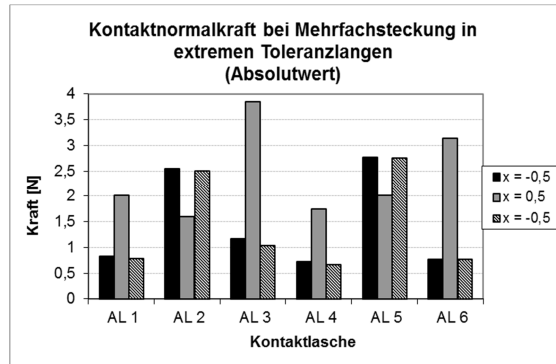


Fig. 6: Normalkräfte, Verschrängung +0,2mm

Mechanische Simulation: Steckkraft

Die Steckkraft des Board-to-Board-Verbinders wirkt sich auf die Montagekraft der Gesamtbaugruppe aus. Außerdem belastet die Montagekraft beim Steckvorgang teilweise die Lötstelle des Steckers bzw. des Kupplers. Deshalb sollte die Steckkraft möglichst klein und gleichmäßig sein. Beim Auslegen der Federeigenschaften wurde deshalb besonders auf diesen Aspekt geachtet.

Die Simulation hierzu wurde mit Volumenmodellen durchgeführt, da diese den Export der verformten Geometrie zufriedenstellend unterstützten. Das Material wurde multilinear definiert und große Verformungen eingeschaltet. Alle Kontakte wurden reibungsbehaftet mit einem Reibungskoeffizient $\mu = 0,15$ definiert. Um die Konvergenz beim ersten Auftreffen des Steckers auf die Kontaktlaschen zu ermöglichen, mussten Linienkontakte zwischen Federlaschen und Steckerbauteilen definiert werden. Diese führten beim Auswerten der Einschubkraft zu Abweichungen. Fig. 8 zeigt den Kraft-Weg-Verlauf von Messung und Rechnung. Der Vergleich der Montagekraft zeigt bereits eine sehr gute Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen, wenn das Modell an die tatsächlich vorliegende Geometrie angepasst wird.



Fig. 7: Versuch – Steckkraftprüfung unmontiert

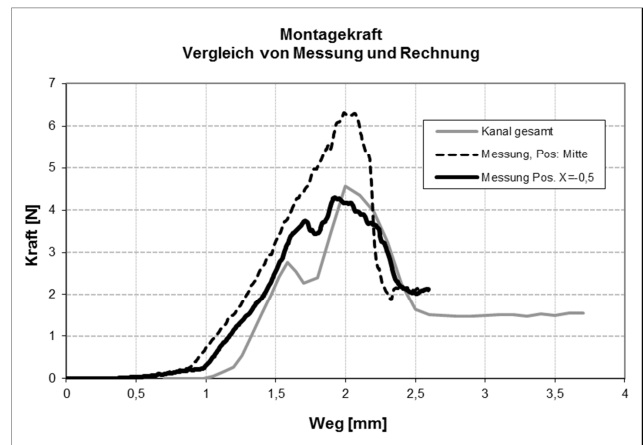


Fig. 8: Montagekraft eines Kanals

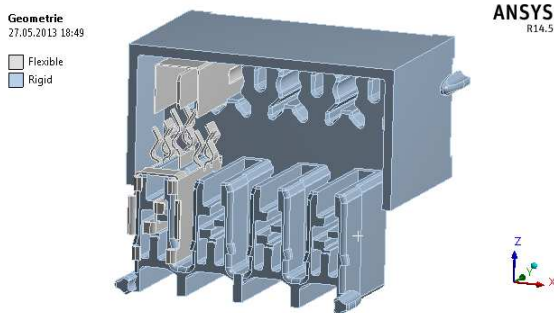


Fig. 9: Bauteilsteifigkeit

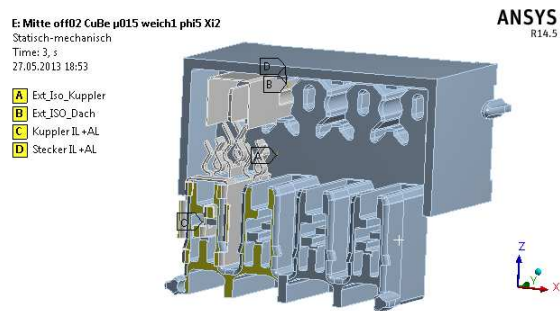


Fig. 10: Randbedingungen

Zur Absicherung der elektrischen Eigenschaften in den verschiedenen Toleranzlagen wurden aus ANSYS Mechanical die verformte Geometrie als Step-Modell exportiert und in HFSS eingelesen. Damit konnte auch die Einhaltung der FAKRA-üblichen Grenzwerte für Reflexion, Transmission und Übersprechen bzw Schirmung in verschiedenen Einbausituationen bewertet werden.

Export der verformten Geometrie

Workbench bietet die Möglichkeit, eine verformte Geometrie zu exportieren. Dazu wird das Ergebnis aus der statisch-mechanischen Analyse in ein APDL-Skript überführt. Im Mechanical APDL-Block wird der upgeom – Befehl ausgeführt. Dieser Befehl erzeugt ein neues FE-Netz, indem die Kantenposition der verformten Geometrie die Position der zukünftigen unverformten Geometrie wird. Das verformte FE-Netz wird nun in den Finite-Element-Modeller überführt, der mit Hilfe einer Parasolidschnittstelle eine verformte CAD-Geometrie erzeugt. Diese Geometrie kann dann anschließend im Design Modeller weiter verarbeitet werden.

Das beschriebene Verfahren funktioniert bei kleinen Verformungen und ohne Kontakte meist sehr gut. Im hier beschriebenen Projekt sind jedoch sehr große Verformungen und viele Kontakte berücksichtigt, so dass der Finite-Element-Modeller die Parasolid-Geometrie nicht in ausreichender Qualität für den Import in HFSS erstellen konnte.

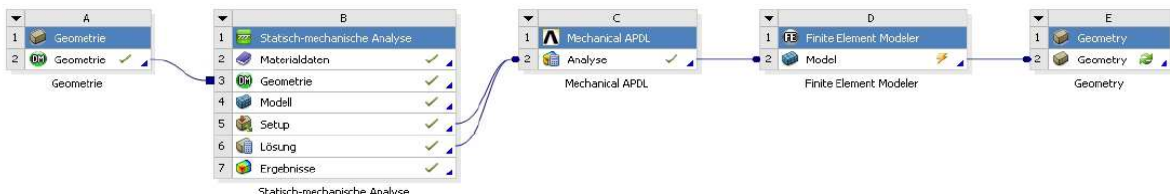


Fig. 11: Workflow in Workbench für den Geometrieexport mit Hilfe der Parasolid-Schnittstelle

Sehr viel erfolgreicher war der Geometrieexport mit Hilfe eines APDL-Skripts, das uns von CADFEM zur Verfügung gestellt und vom Autor angepasst wurde. Dieses Skript erzeugt auf der Oberfläche der Bauteile ein neues Netz mit MESH200 Elementen (Fig. 12). Diese Elemente werden anschließend in Flächen umgewandelt. Alle Flächen eines Körpers werden als Volumen zusammengefasst und als

Iges-Datei exportiert. Mit dem Design Modeller können die Einzelflächen eines Volumens mit dem Befehl „Merge“ beseitigt werden (siehe Fig. 13). Die so aufbereitete Geometrie kann in HFSS eingelesen und bearbeitet werden.

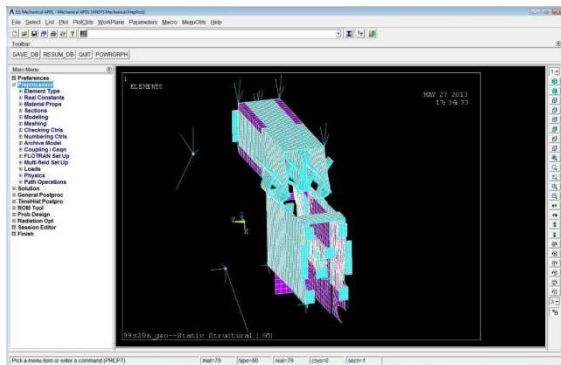


Fig. 12: Modellaufbereitung in ANSYS Classic

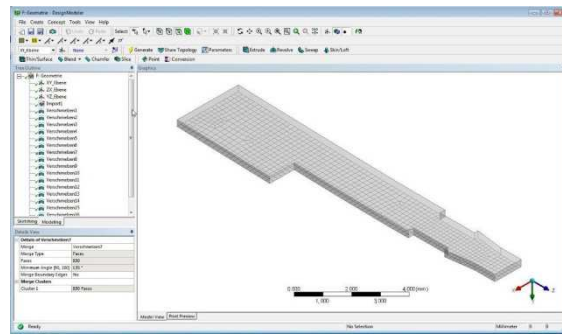


Fig. 13: Teilweise überarbeitete, verformte Geometrie

Überprüfung der elektrischen Eigenschaften mit HFSS

Für die HF-Simulation wurden für die Kontaktierung der importierten Steckverbinder noch die Platinen modelliert, um über Streifenleitungen (sog. Grounded Coplanar Waveguides) eine definierte Zuführung der elektromagnetischen Welle sicherzustellen.

Dabei entspricht das Platinenmodell exakt dem für die Praxistests entworfenen PCB, um zu verhindern dass unterschiedliche Landesituationen (Footprints) oder Lagenaufbauten (Stackup) die Vergleichbarkeit von Simulation und Praxis beeinflussen können.

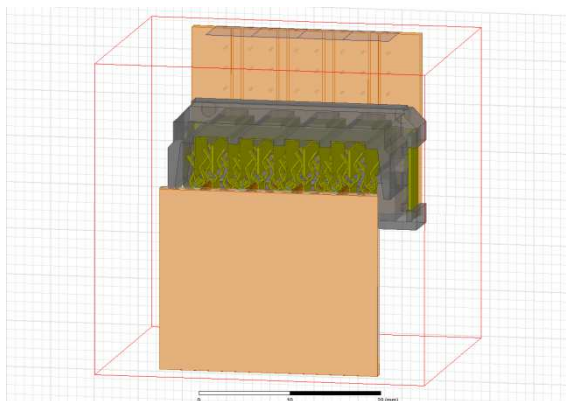


Fig. 14: HFSS-Simulationsmodell

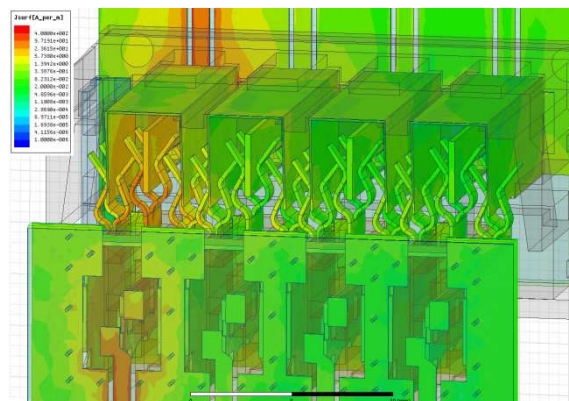


Fig. 15: Stromdichteverteilung bei Einspeisung einer Welle auf Kanal 1

Zum Einsatz kommt ein zweilagiges PCB aus FR-4 mit der Dicke 1,0 mm. Die gewählte Koplanar-Leitung ist 0,9 mm breit, der Abstand zu den Masseflächen beträgt 0,25 mm. Diese Art von Leitung verfügt über ein kleineres Streufeld als eine Mikrostreifenleitung und zeigt dadurch ein geringeres Übersprechen auf den Nachbarkanal. Das ist wichtig um zu verhindern dass ein hohes Eigenübersprechen der Platine das Übersprechmaß des Steckverbinders maskiert.

Reflexionen

Die 3-D-Feldsimulation zeigte, dass die unterschiedlichen Toleranzlagen nur einen marginalen Einfluss auf die Anpassung (Reflexion) des Stecksystems haben. Die resultierenden Kurven für eine Verschiebung in X-Richtung (Seitwärts-Bewegung) sind in Fig. 16 zusammengefasst. Die Messwerte unterscheiden sich kaum und liegen unter der ebenfalls dargestellten Grenzlinie für FAKRA-Steckverbinder.

Übersprechen

Die Werte für das Übersprechen unterscheiden sich ebenfalls kaum für verschiedene Toleranzlagen von Stecker und Buchse zueinander. In Fig. 17 sind die Werte für das Nebensprechen am nahen Ende (NEXT) auf einen direkten Nachbarkanal dargestellt.

Verlust mehrerer Kontaktpunkte

Bei hoher Verschiebung seitwärts wird der Anpressdruck einiger Kontaktflaschen geringer. Es ist denkbar, dass bei (unzulässig) hoher Verschiebung die Masse- und Signalkontakte auf einer Seite vom Gegenstück abheben und damit den elektrischen Kontakt verlieren.

Die Auswirkungen auf die Signalübertragungseigenschaften sind in Fig. 18 und Fig. 19 abgebildet. Die Reflexion nimmt in diesem Fall zu große Werte an. Auch das Übersprechen auf den Nachbarkanal nimmt (im höheren Frequenzbereich) um bis zu 20 dB zu.

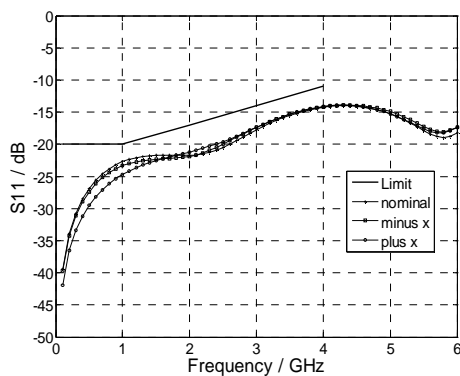


Fig. 16: Anpassung (Reflexion) bei verschiedenen Toleranzlagen

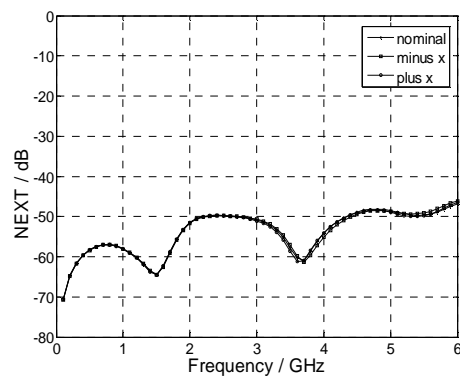


Fig. 17: (Nah-)Nebensprechen bei verschiedenen Toleranzlagen

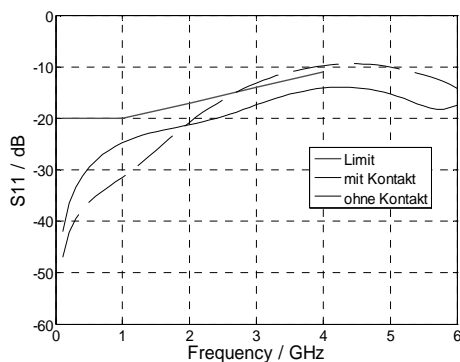


Fig. 18: Verhalten bei teilweisem Kontaktverlust

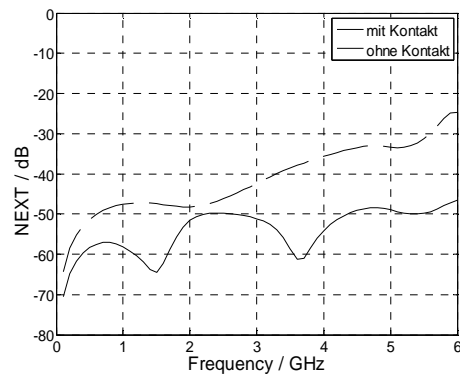


Fig. 19: (Nah-)Nebensprechen bei teilweisem Kontaktverlust

Absicherung der Simulation durch Messungen

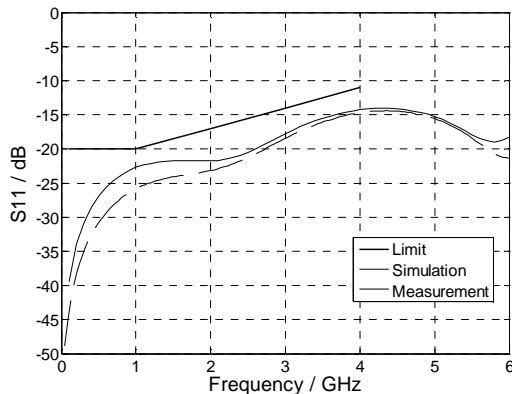


Fig. 20: Anpassung, berechnet und gemessen

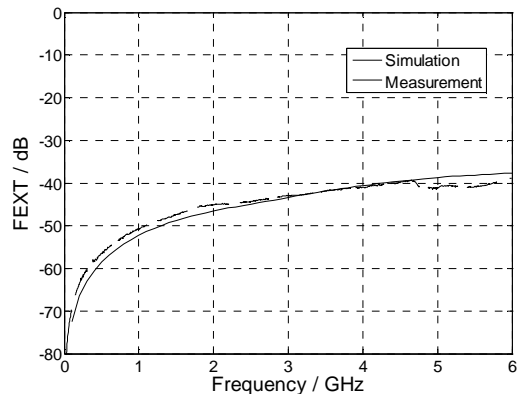


Fig. 21: Übersprechen am Fernen Ende, berechnet und gemessen

Die Messungen zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit der Simulation. Die Anpassungskurve in Fig. 20 zeigt eine hohe Ähnlichkeit mit dem berechneten Verlauf. Die dort abgebildete Messkurve wurde mit einem Netzwerkanalysator von Anritsu (Lightning 37269D) aufgenommen. Da die Platine längere Zuleitungen besitzt und außerdem die SMA-Stecker am Platinenrand mit in die Messung eingehen, wurde der gemessene Frequenzgang in den Zeitbereich transformiert. Durch das sog. Gating, also eine Filterung im Zeitbereich, konnte der Steckverbinder isoliert werden. Die gefilterte Sprungantwort ließ sich mit Hilfe der Fourier-Transformation wieder in den Frequenzbereich übertragen.

Somit gilt die Messkurve für ein Messobjekt, das in der Größe etwa den Ausmaßen des Simulationsmodells entspricht. Damit wird Messung und Simulation vergleichbar.

In Fig. 21 ist das Übersprechen eines Kanals auf den direkt benachbarten Signalpfad am fernen Ende gezeigt (FEXT). Da es sich um eine Transmissionsmessung handelte, konnte man hier kein Gating anwenden. Allerdings fällt die Dämpfung der Platine und der SMA im Gesamtergebnis nicht auf. Auch hier zeigt sich, dass berechnete und gemessene Kurven beinahe zusammenfallen.

Zusammenfassung und Ausblick

Das hier beschriebene Projekt, das Design eines mehrkanaligen Steckverbinders, stellte einige Herausforderungen an das Design. Die kleine Bauform und der hohe Toleranzausgleich machten eine sehr ungewöhnliche Kontaktform notwendig, bei der die Kontaktflaschen hohe Verformungen erfahren.

Die mechanischen Eigenschaften wurden mit ANSYS Structural bewertet. Im Vordergrund stand dabei, die Federlaschen im elastischen Bereich zu halten sowie einen ausreichenden Kontaktdruck zu gewährleisten.

Die dabei errechnete verformte Geometrie wurde exportiert, um sie im 3-D-Feldsimulator HFSS weiterverwenden zu können. So konnte das Hochfrequenz-Verhalten des Steckverbinders realitätsnah abgesichert werden.

Ein hoher Aufwand lag darin, das verformte Modell zu exportieren. Für kleine Verformungen, bei denen die geometrische Variation weniger als eine Meshzelle beträgt, kann eine direkte Verlinkung zu HFSS in der Workbench erstellt werden.

Für große Verformung, wie sie hier vorlagen, muss ein Umweg über ein APDL-Skript gegangen werden, mit dessen Hilfe aus den verschobenen Knoten wieder Flächen werden. Die anschließende Nachbearbeitung im Design Modeller und das Zusammensetzen der bereinigten Einzelteile in HFSS stellten sich als sehr aufwändig und zeitintensiv heraus.

Dennoch ist die Weitergabe einer verformten Geometrie an HFSS eine praktikable Möglichkeit, ein Produkt hinsichtlich der HF-Eigenschaften noch vor Beginn der Musterphase abzusichern. Die gute Übereinstimmung mit den Messungen zeigt auch, dass die Ergebnisse der Simulation verlässlich sind.