

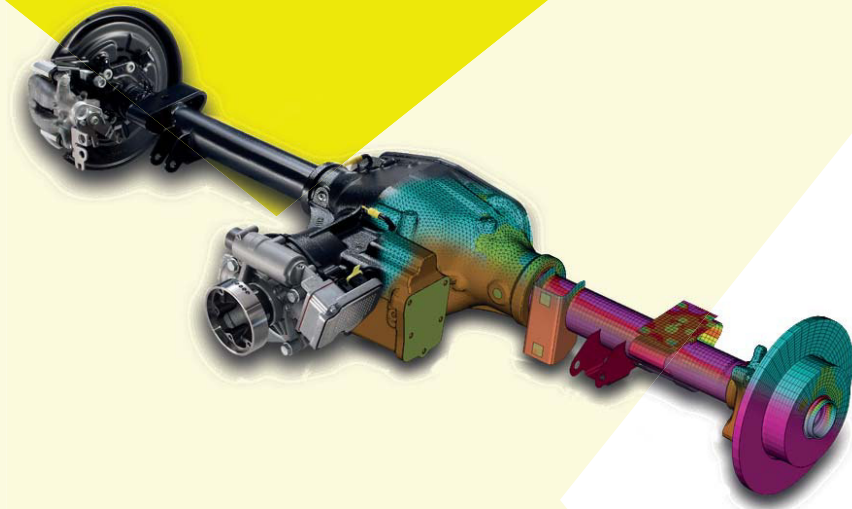


DVM

Deutscher Verband für
Materialforschung und -prüfung e.V.

43. Tagung des
DVM-Arbeitskreises Betriebsfestigkeit

Potenziale im Zusammenspiel von Versuch und Berechnung in der Betriebsfestigkeit



- ◆ Festigkeitsnachweis
- ◆ Auslegungs- und Absicherungsprozess
- ◆ Validierung von Berechnungsmodellen
- ◆ Neue Methoden für die Auslegung und Absicherung

UNTERSUCHUNGEN ZUR BETRIEBSFESTIGKEIT ELEKTRISCHER STECKKONTAKTE UNTER VIBRATIONSANREGUNG

A. Dörnhöfer*, N. Bauer**, P. Heuler**, S. Kinscherf***, M. Decker***

*) Audi Hungaria Motor Kft., Győr

***) Audi AG, Ingolstadt

***) IABG mbH, Ottobrunn

Zusammenfassung:

Elektrische Steckverbindungen besitzen eine elementare Bedeutung für die Funktion elektronischer Systeme und damit für die Zuverlässigkeit moderner Fahrzeuge. Sie unterliegen im Betrieb komplexen Belastungen und sind durch ihren kleinteiligen Aufbau einer Messung ohne Systembeeinflussung nur bedingt zugänglich. Im vorliegenden Beitrag werden die dimensionierenden Beanspruchungen, Einflussgrößen und Schädigungsmechanismen diskutiert. Am Beispiel der Vibrationsanregung von Komponenten und Leitungssatz werden Analyse-, Versuchs- und Simulationsmethoden aufgezeigt. Diese ermöglichen ein besseres Verständnis der Beanspruchungsverhältnisse und Vorgänge im Kontakt, der Beanspruchbarkeit sowie einen optimierten Nachweis der Betriebs- oder Dauerfestigkeit.

Stichwörter: Elektrischer Steckkontakt, Vibrationsanregung, Schädigungskette, Reibkorrosion, Betriebsfestigkeit

INVESTIGATIONS ON STRUCTURAL DURABILITY OF ELECTRICAL CONNECTORS UNDER VIBRATIONAL EXCITATION

Abstract:

Electrical connectors are of elementary importance for the operation of electronic systems and, therefore, for the reliability of modern vehicles. During operation they are subject to complex loads and due to their small-scale structure, measurement without interference is only partially accessible. In the present article, the dimensioning loads, influencing variables and damage mechanisms will be discussed. Using the example of vibrational excitation of components and wiring harness, analysis, experimental and simulation methods are presented. These enable a better understanding of the load conditions and processes in the contact, the load capacity as well as an optimized way of assessing the structural integrity and durability.

Keywords: Electrical Connector, Vibrational Excitation, Damage Chain, Fretting Corrosion, Structural Durability

1. Einleitung

Moderne Automobile verfügen über eine Vielzahl an Steuergeräten, Sensoren, Aktoren und Leitungsverbindungen. Im Bordnetz sind daher Leitungslängen bis ca. 6 km keine Seltenheit [RIC09]. Um alle Komponenten elektrisch sicher aber zugleich trennbar miteinander zu verbinden, kommen Steckverbindungen zum Einsatz. Gerade im Umfeld von Verbrennungsmotoren müssen diese hohe Anforderungen durch Vibrations- und Umweltbelastungen ertragen [ZIM16]. Vibrationsanregung kann z.B. über das Bauteil oder den Leitungssatz in den Steckkontakt eingeleitet werden und dort als mechanische Beanspruchung zu Gleitvorgängen, Kontaktverschleiß und letztlich einem elektrischen Ausfall der Verbindung führen.

Für die betriebsfeste Bemessung solcher elektrischer Steckkontakte ist ein geeigneter Beurteilungs- und Absicherungsprozess erforderlich, wobei die relevanten Einflussgrößen und ihre Auswirkungen auf die Vibrationsbeständigkeit zu berücksichtigen sind.

Die direkte Messung von Beanspruchungen in der Steckverbindung ohne Systembeeinflussung und eine daraus abgeleitete Festigkeitsbeurteilung sind nur äußerst schwer möglich. Mithilfe von Simulationsverfahren, Validierungsversuchen und Beanspruchbarkeitsanalysen auf mehreren Ebenen (Multilevel-Ansatz) sollen Systemverständnis aufgebaut, Einflussparameter identifiziert und der Absicherungsprozess optimiert werden.

In dem vorliegenden Beitrag werden Ergebnisse und Erkenntnisse aus eigenen mehrjährigen Untersuchungen im Hinblick auf grundlegende Problemstellungen und Lösungsansätze berichtet.

2. Aufbau und Komponenten des betrachteten Steckkontaktsystems

Der betrachtete 2-polige Kastenkontakt verfügt über eine Stiftbreite von 1,2 mm (Abbildung 1). Komponentenseitig befindet sich das Stiftgehäuse mit den Kontaktstiften/Pins und leitungssatzseitig das Kontaktgehäuse mit den Kontakten.

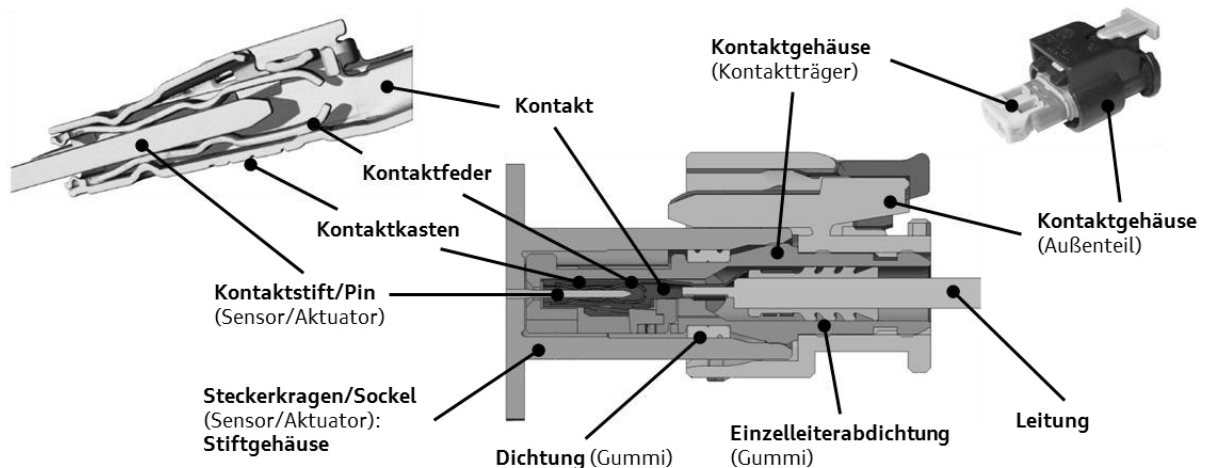


Abbildung 1: Aufbau der Steckverbindung mit Kastenkontakt

Figure 1: Internal structure of electrical connector with box contact

Während die Stifte meist fest im Stiftgehäuse der Komponente vergossen sind, befinden sich die Kontakte spielbehaftet in einer Kammer des Kontaktgehäuses,

fixiert durch einen Rastmechanismus. Zwei Dichtungen verhindern das Eindringen von Fremdkörpern in den Kontakt. Zum Ausgleich von Toleranzen liegt zwischen der Kammer und den Kontakten ein leichtes Spiel vor, welches insbesondere in axialer Richtung eine Relativbewegung zwischen Kontakt und Kontaktgehäuse ermöglicht. Dadurch ergeben sich unterschiedliche Anlagesituationen mit großem Einfluss auf möglichen Bewegungsformen im Betrieb sowie auf die Simulation.

Die elektrische Verbindung erfolgt bei diesem Kontaktsystem durch vier Kontaktfedern im Kontaktkasten, zwei auf der Ober- und zwei auf der Unterseite des Stifts. Durch den Steckvorgang werden die Federn vorgespannt und erzeugen eine Kontaktnormalkraft auf den Stift. Dadurch, dass jede Kontaktfeder wiederum an zwei Stellen auf dem Stift aufliegt, ergeben sich in Summe acht elektrische Kontaktpunkte. Dies dient der Robustheitssteigerung.

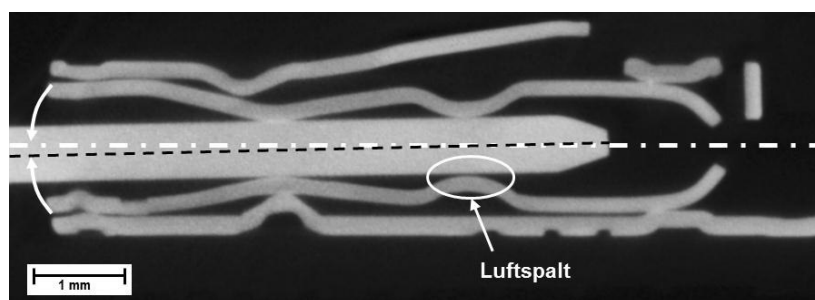


Abbildung 2: Schnittdarstellung des Steckkontakts, CT-Aufnahme

Figure 2: Cross section of electrical connector, CT scan

Die Bauteile im Kontaktsystem unterliegen Form- und Lagetoleranzen, wie z. B. einer Schiefstellung aus dem Crimpvorgang. Die Kontaktfedern werden im gesteckten Zustand somit nicht gleichmäßig belastet, es kommt zu unterschiedlichen Normalkräften an den Kontaktpunkten. Im Extremfall entsteht, sogar unter Einhaltung der für den Crimpvorgang zulässigen Toleranzen, bei einem Teil der Kontaktpunkte ein Luftspalt zwischen Feder und Stift (Abbildung 2). Auch wenn aufgrund der Redundanz der Kontaktpunkte zunächst keine Auswirkung auf den elektrischen Widerstand vorliegt, kann dies die Vorgänge innerhalb des Kontakts beeinflussen.

3. Belastungen auf Steckkontaktsysteme

Steckkontaktsysteme erfahren gerade im Motorumfeld viele Belastungen, wie z. B. durch Feuchtigkeit, Schmutz, Salz, Öl, Kraftstoff, Temperaturen sowie mechanische Vibrationen infolge von Straßen- und Motoranregung. Umfangreiche Prüfvorschriften tragen dem Rechnung [BAU10]. Im Folgenden liegt der Fokus auf Vibrationsbelastungen, die am Motor sehr breitbandig bis über 2.500 Hz auftreten können (Abbildung 3). Die Anregung setzt sich dabei aus harmonischen (verursacht z. B. durch Kurbel- und Ventiltrieb) und stochastischen Anteilen (z. B. aus Verbrennungsprozessen) zusammen. Auch am Motor verbaute Aktuatoren können lokale Schwingungsanregung verursachen. Impulsförmige Schaltvorgänge einer Kraftstoff-Hochdruckpumpe führen etwa zu breitbandiger Systemanregung mit Auswirkungen auf die Steckverbindung der Komponente.

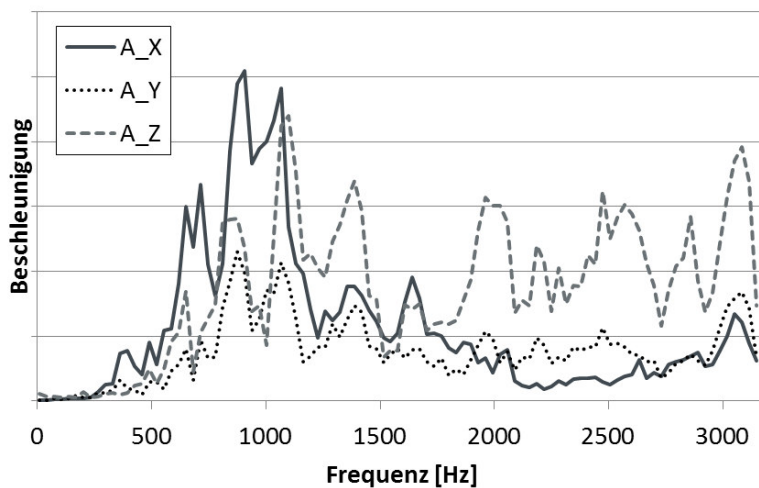


Abbildung 3: Amplitudenspektrum von Beschleunigungen (Peak-Hold-FFT), die auf dem Stiftgehäuse einer Komponente im gesamten Motordrehzahlbereich gemessen wurden

Figure 3: Amplitude spectrum of accelerations (peak hold FFT), measured on the pin housing of a component covering the entire engine speed range

Insbesondere bei Komponenten, die nicht direkt am Grundmotor, sondern an Motoranbauteilen verbaut sind, kann sich aus den einzelnen Transmissibilitäten der Bauteile eine sehr große Beschleunigungsüberhöhung vom Motor hin zur Steckverbindung ergeben. Zusätzlich zu Vibrationen auf der Komponentenseite führen auch Leitungsbewegungen zu Belastungen im Kontaktsystem. Grund dafür können Resonanzschwingungen der freien Leitungslänge oder Zwangsbewegungen der Leitung sein.

4. Mechanische Beanspruchung und Schädigungsmechanismen

Die an der Steckverbindung anliegende, äußere Belastung führt zu einer inneren mechanischen Beanspruchung in Leitung, Crimpverbindung und den Kontaktbereichen. Die zwischen den Kontaktpartnern wirkenden Kräfte und Spannungen können prinzipiell durch folgende Mechanismen induziert werden:

- a) von außen induzierte Zwangsbewegungen,
- b) von außen induzierte Schwingungen,
- c) Schwingungen von Bauteilen im Inneren der Steckverbindung,
- d) thermische Dehnungen der Bauteile der Steckverbindung.

Hier werden insbesondere die durch mechanische Belastungen hervorgerufenen Beanspruchungen betrachtet. Bei dem untersuchten Kontaktsystem ist darüber hinaus keine Auswirkung von Schwingungen im Inneren der Steckverbindung auf die Beanspruchungen erkennbar. Es findet daher eine Fokussierung auf die Mechanismen a) und b) statt.

Abweichend zu [DIJ98] wird auch der Steck-/Löseprozess der Verbindung außen vor gelassen. Dabei kommt es zwar auch zu systemimmanenten Schädigungen der Kontaktoberflächen, die Ursache für die dabei wirkenden Kräfte resultiert jedoch nicht aus Vibrationsbelastungen.

Effekte innerhalb der Leitung (z.B. Drahtbruch infolge mechanischer Belastungen) werden in dieser Untersuchung nicht betrachtet und müssen ggf. gesondert behandelt werden.

Hauptaufgabe eines elektrischen Steckkontakts ist die niederohmige elektrische Verbindung zweier Leiter. Eine Beurteilung der Funktionsfähigkeit der Steckverbindung erfolgt daher erstrangig über die Messung des elektrischen Widerstands. Nach [BAU10] ergibt sich z.B. für das untersuchte Kontaktsystem ein zulässiger Grenzwert von maximal 15 mΩ. Der gesamte Durchgangswiderstand der Verbindung setzt sich dabei aus der Reihenschaltung von Kontakt- und Crimpdurchgangswiderstand zusammen. In ersteren fließen die durch Werkstoffaufbau und Geometrie bedingten Widerstände der Kontaktpartner sowie der Übergangswiderstand dazwischen ein. Gedanklich lässt sich der Übergangswiderstand als eine Parallelschaltung von kontaktierten Spitzen der Oberflächenrauheit der Kontaktflächen verstehen.

Eine dynamische oder im Trend sichtbare Erhöhung des Übergangswiderstands ist prinzipiell durch zwei Mechanismen denkbar:

- a) Abheben der Kontaktpartner, d.h. Verringerung der Kontaktnormalkraft bis zur vollständigen Trennung der Oberflächen,
- b) Veränderung der Oberflächen durch Reibkorrosion bis hin zur Ausbildung einer trennenden, nichtleitenden Schicht.

Bei den hier durchgeführten Untersuchungen konnte kein Anhaltspunkt für eine Schädigung nach a) gefunden werden. Die Schadenskette für den Mechanismus b) stellt sich von der äußeren Vibrationsbelastung über die innere Beanspruchung zwischen den Kontaktpartnern bis hin zum elektrischen Ausfall gemäß Abbildung 4 dar.

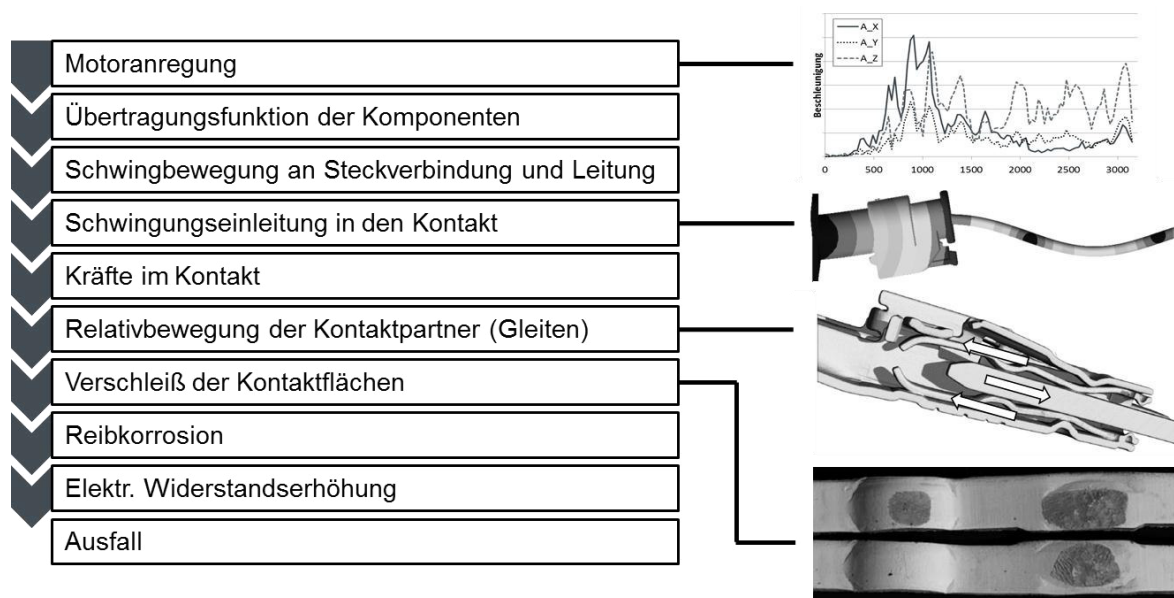


Abbildung 4: Schadenskette für elektrische Steckkontakte unter Vibrationsanregung

Figure 4: Chain of damage effects for electrical connectors under vibrational excitation

Entscheidend ist das Auftreten einer Relativbewegung zwischen den Kontaktpartnern. Durch ein Gleiten der Kontaktflächen kommt es zur Aufschiebung

und Umlagerung von Oberflächenmaterial, schließlich zum Abtrag und damit zum Verschleiß in Form von Reibkorrosion [VDI04]. Je nach Größe der Relativbewegung setzt das Gleiten jedoch nicht sofort ein. Kleinere Relativbewegungen werden durch die Elastizität in der Kontaktfeder kompensiert, die Oberflächen haften noch komplett. Dieser Effekt wird auch in [DIJ96] berichtet, wobei hier eine Grenze von ca. 1 µm genannt wird. Bis zu einer Relativbewegung von ca. 5-10 µm spricht man dann vom partiellen, darüber hinaus vom vollflächigen Gleitmodus [ANT99, DIJ02]. Durch die gebogene Oberfläche der Kontaktfedern kommt es im Kontaktbereich zwischen Feder und Pin zu einer über die Kontaktfläche nach außen hin abnehmenden Flächenpressung. Wird ein Gleiten nur bei Überschreitung der lokalen Haftbedingung

$$F_R = \mu \cdot F_N \quad (1)$$

mit Reibkraft F_R , Haftreibungszahl μ und Normalkraft F_N angenommen, so können im partiellen Gleitmodus bereits äußere Bereiche unter kleinerer Flächenpressung lokal gleiten, während das Zentrum der Kontaktfläche noch haftet.

Im vollflächigen Gleitmodus mit typischen Gleitwegen von ca. 10-100 µm verliert dann die gesamte Kontaktfläche ihre Haftung und die Kontaktpartner gleiten relativ zueinander. Für den Verschleiß der Kontaktflächen (fretting wear) wird insbesondere dieser vollflächige Gleitmodus als kritisch betrachtet [KIM13].

Abhängig vom Aufbau der Kontaktfedern bzw. des Kontaktstifts besteht das Grundmaterial häufig aus einer Cu-Ni-Si-Legierung. Daran schließen sich z. B. eine dünne Verbindungs-/Sperrschicht und dann das eigentlich Oberflächenmaterial (Sn, Ag oder Au) an. Bei Steckverbindungen unter Vibrationsanregung wird häufig das edle Ag verwendet, da es eine relativ große Robustheit gegenüber Abtrag durch Gleitbewegungen besitzt [ABD09].

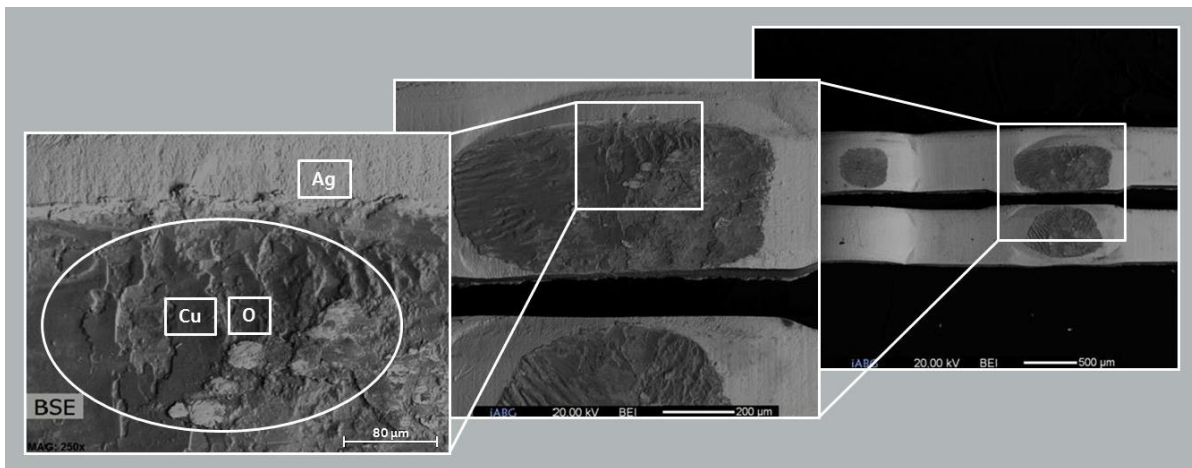


Abbildung 5: Mikroskopische Aufnahmen einer verschlissenen Kontaktfläche (REM, 20 kV) und detektierte chemische Elemente an der Oberfläche

Figure 5: Micrographs of a worn contact surface (SEM, 20 kV) and detected chemical elements on the surface

Wird durch Gleiten und Verschleiß das Oberflächenmaterial entfernt, so kommt nach der Verbindungsschicht das unedle Grundmaterial zum Vorschein. Dies wurde hier am Beispiel einer Ag-beschichteten Kontaktfeder in orts aufgelöster EDX-Analyse im

schadensrelevanten Kontaktbereich über die Detektion von Cu-Oxid festgestellt (Abbildung 5). In ungeschädigten Bereichen liegt weiterhin die Ag-Beschichtung vor.

Die nicht leitfähigen Cu-Oxide bilden eine elektrische Isolationsschicht [HOR04]. Deren Aufbau wird durch weitere Gleitvorgänge mit Materialabtrag begünstigt und als Reibkorrosion bezeichnet (fretting corrosion) [VDI04]. Dadurch kommt es zu einer elektrischen Widerstandserhöhung, zu Schadensmechanismus b) und schließlich zum Ausfall der Steckverbindung. Die Auswirkungen der Reibkorrosion auf die Beanspruchbarkeit sind komplex und neben der Lastwechselzahl z. B. auch stark von der Einwirkzeit abhängig, da es sich bei der Oxidation um einen zeitabhängigen Vorgang handelt. So ist bei Ebene 0-Versuchen (siehe Kapitel 9.3) bei [ABD09] ein Einfluss der Prüffrequenz feststellbar, da eine niederfrequente Prüfung bei gleicher Lastwechselzahl mehr Zeit zur Ausbildung isolierender Schichten gibt.

Ein Anstieg im elektrischen Durchgangswiderstand ist die relevante Größe für eine Schädigung der Steckverbindung. Die Widerstandserhöhung hängt dabei mit dem optischen Schadensbild der Kontaktflächen zusammen, korreliert aber oft nicht direkt, denn es existieren konstruktionsbedingt meist mehrere Kontaktflächen pro Steckverbindung. Diese sind elektrisch als eine Parallelschaltung zu sehen; erst bei einem Anstieg des Kontaktdurchgangswiderstands vieler Kontaktflächen kommt es zu einer merklichen Erhöhung des Durchgangswiderstands der gesamten Steckverbindung. Dies dient konstruktiv der Erhöhung der Robustheit der Verbindung, erschwert aber eine zerstörungsfreie Detektion fortschreitender Reibkorrosion während der Prüfung auf Basis einer elektrischen Widerstandsmessung.

Durch die optische Analyse der Verschleißspuren bei noch vorhandenem Oberflächenmaterial lassen sich auch Erkenntnisse über die vorherrschende Relativbewegung der Kontaktpartner gewinnen. Orientiert man sich an der Festigkeitsauslegung mechanisch beanspruchter Bauteile, kann auch für Steckkontakte unter Vibrationsanregung wie folgt unterschieden werden:

- I. **„Dauerfeste Auslegung“:** Äußere Belastungen und daraus resultierende Kräfte im Inneren führen nicht zu einem vollflächigen Gleitmodus in der Kontaktfläche. Dadurch werden Verschleiß, Reibkorrosion und elektrische Widerstandserhöhung verhindert. Die Steckverbindung ist „dauerfest“ und erträgt die mechanischen Vibrationen „unendlich lange“.

Auslegungsbasis: Haftgrenze der Kontaktpartner

- II. **„Betriebsfeste Auslegung“:** Äußere Belastungen und daraus resultierende Kräfte im Inneren verursachen zeitweise vollflächiges Gleiten. Dadurch entstehen Verschleiß und später auch Reibkorrosion. Neben der Lastspielzahl spielt auch die zeitliche Einwirkung eine Rolle für die elektrische Widerstandserhöhung. Die Steckverbindung ist „betriebsfest“ und erträgt die mechanischen Vibrationen „eine bestimmte Zeit“ mit entsprechendem Verschleiß.

Auslegungsbasis: Verschleißakkumulation

Vorteil der Auslegung nach (I) ist sicher die deutliche Reduktion der Komplexität, da zeitliche Vorgänge keine Rolle spielen, Reibkorrosion komplett vermieden und die Ermittlung zulässiger Beanspruchbarkeiten erleichtert wird [KIM14]. Dies wird jedoch

durch eine mögliche Überdimensionierung des Kontaktsystems erkauft, da auch Anregungen mit geringer Häufigkeit im Betrieb volle Berücksichtigung im Test finden.

5. Messungen am Kontaktsystem

Zur Bestimmung der Vibrationsbelastung auf eine Steckverbindung wird meist nur die Beschleunigung am Stiftgehäuse der Komponente mittels Beschleunigungssensor im Motorbetrieb gemessen. Dies ist einfach und reproduzierbar möglich. Die Auswertung der Messdaten und die Überführung in Beschleunigungs- und Prüfspektren kann im Zeit- oder Frequenzbereich erfolgen, wobei auf die schädigungsäquivalente Abbildung der Betriebsbelastungen zu achten ist [DEC09]. Viele Einflussfaktoren auf die Gesamtbelastung der Steckverbindung bleiben dabei jedoch unberücksichtigt. Die Schwingung der Anschlussleitung kann z. B. nur schwer gemessen werden, da übliche Messaufnehmer eine zu große Systembeeinflussung hervorrufen. Optische Messverfahren scheiden in der Praxis meist aufgrund zu hoher Komplexität und mangelnder Zuverlässigkeit für Messungen im Motorraum aus.

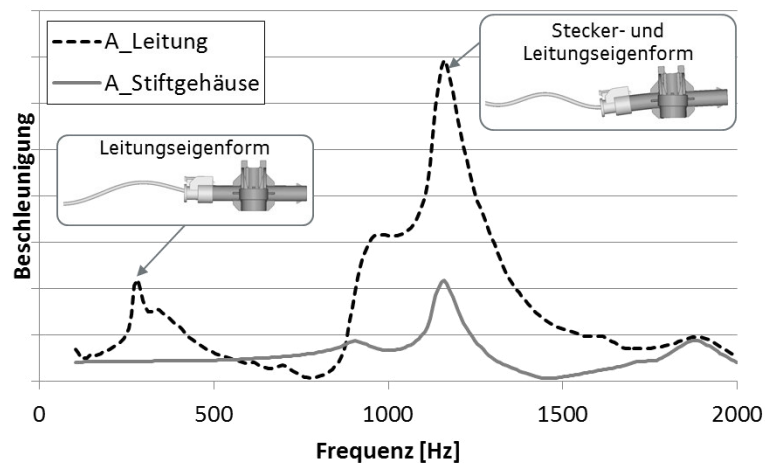


Abbildung 6: Frequenzverhalten der Beschleunigungen an Leitung (gestrichelt) und Stiftgehäuse (durchgezogen) bei Messung mit Laservibrometer auf dem Shaker (harmonischer Anregungssweep mit konstanter Beschleunigungsamplitude)

Figure 6: Frequency response of accelerations on wire (dashed) and pin housing (solid) measured with laser vibrometer on the shaker (sine sweep with constant amplitude of acceleration)

Unter Laborbedingungen wie etwa am Shaker lassen sich Gehäuse- und Leitungsbewegungen gut mittels Laservibrometer erfassen, ohne das Schwingungsverhalten des Systems zu beeinflussen. Ein besonderes Augenmerk muss dabei auf der Fixierung der Leitung des Kontaktsystems liegen, da z. B. axiale Einspannungen einen großen Einfluss auf das Schwingungsverhalten der freien Leitung besitzen. Abbildung 6 zeigt, dass verschiedene Leitungs- und Steckereigenformen auftreten, die von Steifigkeit und Dämpfung von Leitung, Kontakt- und Stiftgehäuse abhängen. Zudem besitzen die Leitungsart (Typ, Querschnitt, Isolation), die Leitungsverlegung und der Einsatz von Leitungsummantelungen (Glasseidenschlauch, Wickelband) und Designkappen einen Einfluss auf das Schwingungsverhalten.

6. Computertomografische Analysen

Die Messung des Schwingungsverhaltens eines Kontaktsystems mittels Beschleunigungssensoren oder optischer Verfahren beschreibt immer nur die von außen sichtbaren Belastungen. Dadurch kann bereits ein gewisser Rückschluss auf Beanspruchungen im Kontakt erfolgen, eine detailliertere Analyse der Vorgänge im Inneren ist jedoch nicht möglich. Für derartige Untersuchungen bieten sich computertomografische Analysen (CT) an, da bei diesen Verfahren keine Systembeeinflussung stattfindet. Abbildung 7 zeigt mittels CT gewonnene 2D- und 3D-Informationen über den exakten Aufbau und die Geometrie des Kontaktsystems. Dadurch wird es möglich, FE-Netze direkt aus Bauteilen auch ohne CAD-Daten abzuleiten und reale Maß- und Lagetoleranzen zu berücksichtigen.

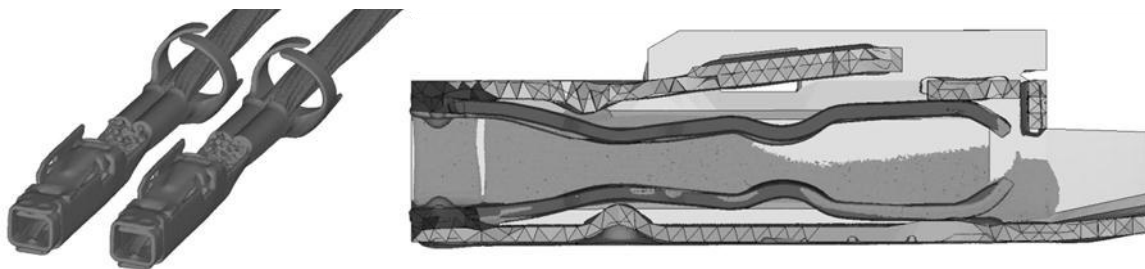


Abbildung 7: CT-Aufnahme realer Kontakte mit Leitungen (links) und Ableitung eines FE-Netzes aus CT-Geometriedaten (rechts, Schnitt durch den Kontakt, überlagert dargestellt)

Figure 7: CT scan of contacts with wires (left) and derivation of a FE model (right, superimposed view of FE model and CT cross section)

Die hochdynamische Untersuchung des höherfrequenten Schwingungsverhaltens eines Kontaktsystems ist aktuell im CT noch nicht möglich. Mittels In-situ-CT konnten jedoch Videos vom Inneren eines Kontaktsystems unter zyklischer Leitungsauslenkung mit bis zu 33 Bildern/s aufgezeichnet werden. Dazu werden die Leitungen durch eine servoangetriebene Vorrichtung in Querrichtung verschoben. Die Verformung orientiert sich an den in Grundlagenversuchen am Shaker mittels Laservibrometer bei höheren Frequenzen ermittelten Wegen. Die quasistatische Bewegung unter Wegvorgabe kann dann hinsichtlich Kinematik als vergleichbar mit der hochdynamischen angenommen werden; dies wurde mittels Simulationen bestätigt (vgl. Kapitel 8).

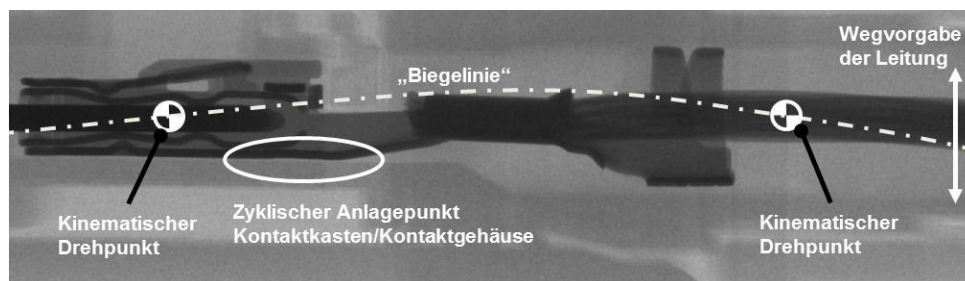


Abbildung 8: In-situ-CT-Aufnahme bei Wegvorgabe der Leitung (Biegelinie mit zwei kinematischen Drehpunkten, vollflächiges Gleiten zwischen Kontaktfedern und Kontaktstift)

Figure 8: In situ CT scan during lateral deviation of wire (bending line with two kinematical nodes, gross slip between contact springs and contact pin)

Beim untersuchten Kontaktsystem existiert also nur ein vernachlässigbarer Masseneinfluss der Bauteile im Kontakt. Der Fokus der Untersuchungen liegt auf der Detektion von beginnendem Gleiten der Kontaktpartner sowie von entstehenden Anlagepunkten zwischen Bauteilen.

Der Kontaktkasten und die Leitung bilden unterschiedliche Biege- und Torsionsbewegungen aus. Wie in Abbildung 8 erkennbar, wirken die Einzelleiterabdichtung der Leitung und die acht Kontaktpunkte zwischen Federn und Stift als kinematische Drehpunkte. Eine zyklische Bildung neuer Anlagepunkte ist z. B. zwischen Kontaktkasten und Kontaktgehäuse möglich, jedoch von der Toleranzlage abhängig.

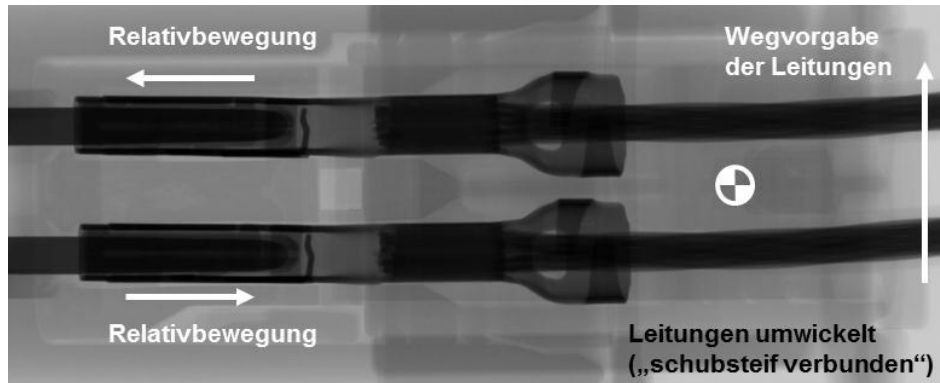


Abbildung 9: „Schubstangeneffekt“ bei verbundenen Leitungen

Figure 9: Push rod effect acting on connected wires

Der Einsatz von Leitungsummantelungen wie z. B. Wickelband verbindet die Leitungen bei einem mehrpoligen Steckkontakt schubsteif miteinander. Selbst bei geringer Querbewegung der Leitung kommt es aufgrund der Kinematik dann zu großen Längskräften an den Kontakten („Schubstangeneffekt“) und infolge dessen zu einer Relativbewegung zwischen Kontaktfedern und Kontaktstiften (Abbildung 9).

7. Messung der Vorgänge im Inneren des Kontakts

Mittels In-situ-CT ist es möglich, die Vorgänge im Inneren eines Kontakts quasistatisch in einem Ersatzversuch bildlich darzustellen (Abbildungen 8 und 9). Für die Bemessung eines Kontaktsystems gegenüber Vibrationsbeanspruchung müssen jedoch die Beanspruchungen im Kontakt quantitativ erfasst werden. Zu den großen Herausforderungen an ein geeignetes Messverfahren zählen die sehr geringe Systemgröße, die Systembeeinflussung durch präparierte Messteile, die oft schlechte Zugänglichkeit im Motorumfeld sowie die hochfrequente Dynamik vieler Vorgänge.

Eine Möglichkeit ist die Verwendung von Dehnmessstreifen mit kleinem Messgitter zwischen Crimp und Kontaktkasten. Über die Leitung eingeleitete Belastungen können insbesondere in axialer Richtung detektiert werden (z. B. beim Auftreten des „Schubstangeneffekts“, siehe Kapitel 6).

Ein vollflächiges Gleiten der Kontaktpartner beeinflusst den Durchgangswiderstand, dessen Messung jedoch nur bei unbestromter Steckverbindung möglich ist. Dadurch ist der Einsatz meist auf Ersatzversuche (z. B. am Shaker) beschränkt. Sehr kleine Widerstandsänderungen und eine hohe Störanfälligkeit gegenüber

elektromagnetischer Strahlung erschweren die hochdynamische Messung. Einfacher möglich ist die Messung des Trendwiderstands über 4-Leiter- oder Brückenmesstechnik, durch den ein bereits fortschreitender Verschleiß in der Steckverbindung detektiert werden kann [BAU10].

Im Rahmen der Arbeiten wurde ein neues Verfahren zur direkten optischen Messung einer Relativbewegung der Kontaktpartner entwickelt. Das Messprinzip ist in Abbildung 10 skizziert. Ein ungeordnetes Lichtleiterbündel wird durch eine kleine Bohrung im Stiftgehäuse so positioniert, dass sich das offene Ende über der Übergangsstelle zwischen Stift und Kontakt befindet, beide jedoch nicht berührt. Durch eine Schwarzfärbung des Kontakts besitzt dieser einen vom Stift abweichenden Reflexionsgrad.

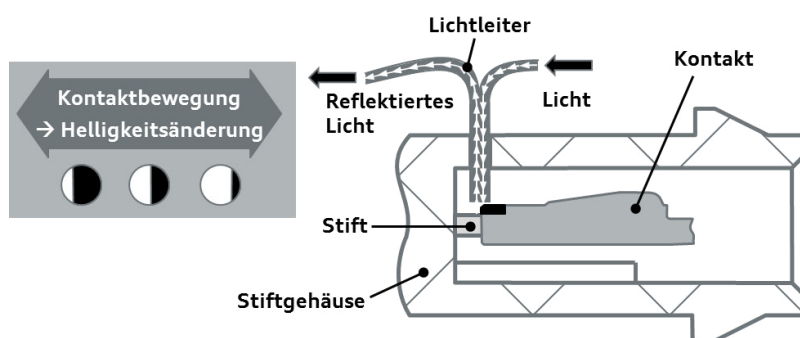


Abbildung 10: Messprinzip zur optischen Messung der Kontaktbewegung

Figure 10: Optical measurement of relative movement in contact area

Wird nun durch einen Teil der Lichtleiter Licht auf die Übergangsstelle geleitet, dann lässt sich der andere Teil der Lichtleiter zur Messung der Helligkeit des reflektierten Lichts nutzen. Der eingefärbte Kontakt wirkt wie eine Blende, die bei Bewegung eine Helligkeitsänderung hervorruft. Somit reagiert das Messsystem direkt auf eine Relativbewegung. Nachteilig an diesem Messverfahren ist die aufwändige Applikation des Stiftgehäuses, das durch die Einbringung der Öffnung und die Fixierung der Lichtleiter auch in seinem Schwingungsverhalten beeinflusst wird. Außerdem lassen sich nur axiale Bewegungen des Kontakts detektieren, da eine Drehbewegung quasi keine Helligkeitsänderung hervorruft.

8. Beanspruchungsermittlung durch Simulation

Da die messtechnische Beanspruchungsermittlung an Steckkontakten mit vielen Schwierigkeiten und Einschränkungen behaftet ist, besitzt die FEM-Simulation einen großen Stellenwert. Sowohl Untersuchungen zum grundlegenden Systemverständnis, zu Einflussgrößen und Toleranzauswirkungen als auch die indirekte Beanspruchungsermittlung aus externen Belastungsmessgrößen sind möglich. Je nach Fragestellung kommen unterschiedlich detaillierte Modelle inkl. Submodellen in nichtlinearen Kontakt- bzw. modalen Antwortanalysen zum Einsatz. Die FE-Netze sind aus CT-Aufnahmen realer Kontaktsysteme abgeleitet (siehe Kapitel 6). In einem ersten Schritt werden die Bildung von Kontakten zwischen Dichtungen und Gehäuseteilen sowie der Aufsteckvorgang der Kontaktfedern auf den Kontaktstift im FE-Modell abgebildet. Unsere Untersuchungen zeigen, dass die so in Abhängigkeit von Bauteiltoleranzen berechneten Kontaktnormalkräfte gut mit Messungen übereinstimmen.

Aufbauend darauf folgen in einem zweiten Schritt nichtlineare Analysen im Zeitbereich und modal basierte Antwortanalysen, aus denen sich Erkenntnisse über das Schwingungsverhalten des Systems gewinnen lassen (Abbildung 11).

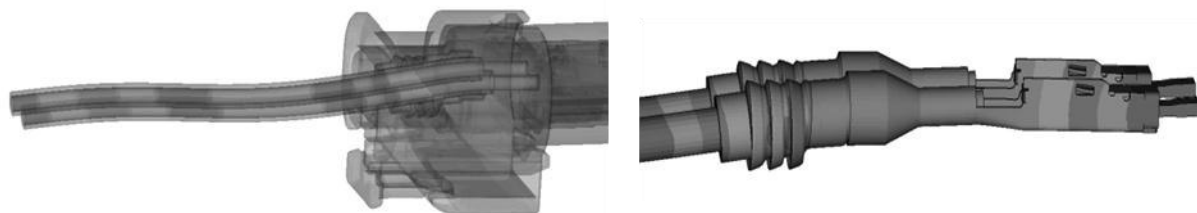


Abbildung 11: FEM-Simulation der Schwingung von Leitung (links) und Kontakt (rechts)

Figure 11: FEM simulation of the vibration of wire (left) and contact (right)

Die dazu benötigten dynamischen Eigenschaften der Bauteile (Steifigkeit, Dämpfung) wurden durch experimentelle Modelanalysen am Shaker ermittelt. Die Dämpfung ist in den Modellen als Materialdämpfung berücksichtigt, wobei für jedes Material ein individueller Dämpfungswert definiert wird. Eine Validierung der Simulationsergebnisse mit Messungen am Shaker und am Motor zeigt gute Übereinstimmungen (Abbildung 12).

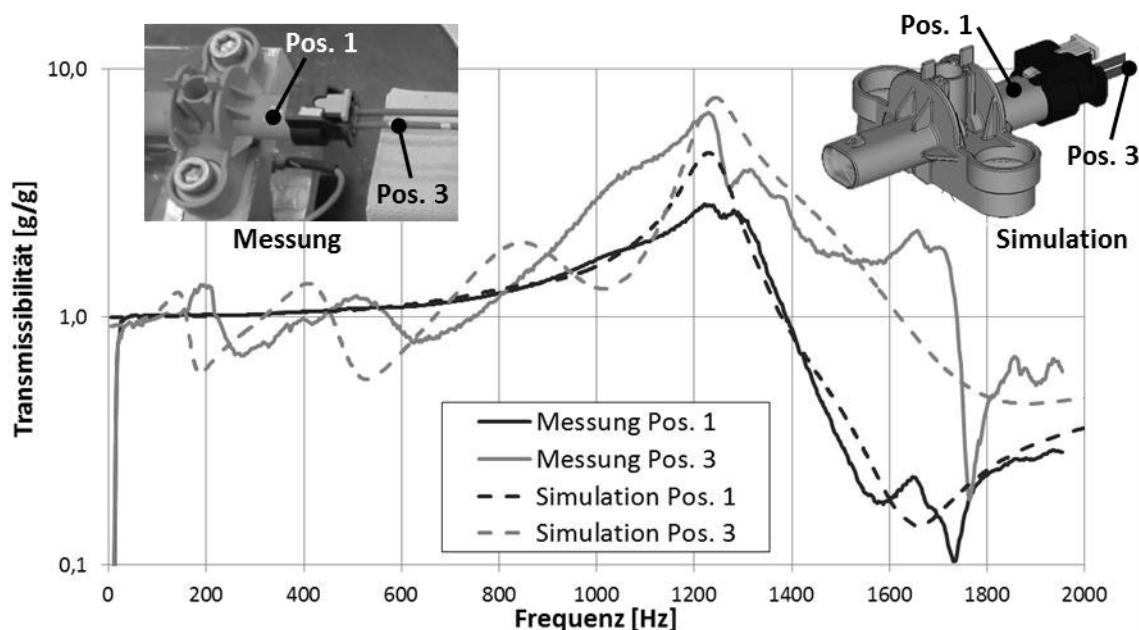


Abbildung 12: Vergleich der Transmissibilitäten aus Messung (durchgezogen, Frequenzganganalyse auf Shaker) und Simulation (gestrichelt) an Stiftgehäuse (schwarz) und Leitung (grau)

Figure 12: Comparison of transmissibilities from measurement (solid, frequency response analysis on shaker) and simulation (dashed) on pin housing (black) and wire (gray)

Die Ermittlung von Kontaktreaktionskräften an den acht elektrischen Kontaktpunkten der Kontaktfedern erfolgt in modal transienten Antwortanalysen mittels virtueller Sensorbalkenelemente. Die dort entstehenden Schub- bzw. Tangentialkräfte lassen sich den Kontaktnormalkräften gegenüberstellen. Unter Berücksichtigung der Haftreibungszahl kann so eine Überschreitung der Haftreibung detektiert („dauerfeste Auslegung“) bzw. per Zählverfahren für eine bestimmte Betriebsdauer gezählt

werden („betriebsfeste Auslegung“). In den Simulationen wurden auch unterschiedliche Anregungen von Stiftgehäuse und Leitung betrachtet. Hier geht die Empfehlung in Richtung einer Worst-Case-Abschätzung, da die benötigten Eingangsgrößen oft nicht zur Verfügung stehen.

Ein Vergleich mit Ergebnissen aus CT-Analysen und Versuchen auf unterschiedlichen Ebenen (siehe Kapitel 9.2) zeigt gute Übereinstimmungen. So können die Beanspruchungen im Inneren des Kontakts unter Berücksichtigung der Randbedingungen auf Basis äußerer Belastungsmessungen vorhergesagt und die Auswirkungen von z.B. Toleranzen und Varianten qualitativ und teils sogar quantitativ beurteilt werden. Eine wichtige Erkenntnis aus den Simulationen ist der große Einfluss der Leitung auf die Beanspruchungen im Kontakt. Leitungsschwingungen pflanzen sich beim untersuchten Kontaktsystem nur wenig gedämpft in das Innere fort und führen teils zu hohen Beanspruchungen. Durch Optimierung der Kontaktsysteme hinsichtlich Leitungsklemmung im Kontaktgehäuse könnten diese Beanspruchungen deutlich reduziert werden. Freie Schwingungen im Inneren des Kontaktes spielen beim untersuchten Kontaktsystem hingegen keine Rolle.

9. Ermittlung der Beanspruchbarkeit

9.1 Standardisierte Freigaberversuche und Tests am Motor

Zur Bemessung des elektrischen Steckkontakts gegenüber mechanischen Vibrationen sind auch Informationen über die Beanspruchbarkeit notwendig. Abhängig davon, ob als Auslegungsbasis die Haftgrenze der Kontaktpartner („dauerfeste Auslegung“) oder eine Verschleißakkumulation („betriebsfeste Auslegung“) herangezogen wird (siehe Kapitel 4), wird Beanspruchbarkeit als das Einsetzen einer Relativbewegung der Kontaktflächen (Auftreten von vollflächigem Gleitmodus) bzw. über die Auswirkungen von Relativbewegungen auf den Verschleiß und die Reibkorrosion (Schädigung) definiert. Bisherige Freigaben basieren meist auf Versuchen des Steckkontakts unter standardisierten Aufbau- und Anregungsbedingungen („Normtests“) [BAU10]. Dabei wird das Kontaktsystem in einer idealisierten Umgebung mit originalem Kontaktgehäuse und vereinfachtem Leitungsdummy sowie Test-Stiftgehäuse auf einem Shaker platziert und mit synthetischen Signalen angeregt. Als beschreibende Größe des Normtests sowie als Mess- und Vergleichsgröße in realen Einbau- und Belastungssituationen dient dabei die Beschleunigung des Stiftgehäuses. Durch starke Überhöhung der Anregung kann zwar meist die sichere Bemessung eines Systems unter realen Einbau- und Lastbedingungen sowie unter Berücksichtigung großer möglicher Streuungen erzielt werden. Nachteilig erweist sich aber häufig die dadurch bedingte Überdimensionierung für manche konkreten Belastungssituationen. Auch können vereinzelt besonders kritische Einbausituationen unter Umständen nicht ausreichend abgeprüft werden. Detailaussagen, Einflussanalysen oder die Ermittlung genauer Beanspruchbarkeitskennwerte sind nur schwer möglich.

Im Gegensatz zu diesen standardisierten Freigaberversuchen können in Applikationsversuchen auf dem Motorprüfstand oder im Fahrzeug alle Einflussgrößen und Wechselwirkungen berücksichtigt werden. Die begrenzte Anzahl solcher Tests im Laufe eines Entwicklungsprozesses, die fehlende Möglichkeit zur

Überhöhung der Anregung, die lange Dauer und die hohen Kosten dieser Versuche erweisen sich aber als nachteilig. Möchte man noch genauere Beanspruchbarkeitskennwerte ermitteln, so besteht die eigentliche Herausforderung in der großen Anzahl an Einflussparametern auf das Gesamtsystem, damit verbunden in der großen Streuung der Ergebnisse sowie in der Messung der direkten Beanspruchung während des Versuchs. Detaillierte Systemkenntnisse über die Vorgänge im Kontaktsystem zu erwerben ist so fast unmöglich, es bleibt bei einer „Black Box“.

9.2 Multilevel-Ansatz zur Beanspruchbarkeitsanalyse

Um die Komplexität der Versuche und die Anzahl der Einflussgrößen schrittweise zu reduzieren und eine reproduzierbare Aufbringung auch erhöhter Lasten zu ermöglichen, wurde ein Multilevel-Ansatz mit fünf Ebenen entwickelt, der in Tabelle 1 am Beispiel der Beanspruchbarkeitsanalyse von Steckkontakten dargestellt ist.

Versuche auf Ebene 0 können Grundlagenwissen über das Verschleiß- und Reibkorrosionsverhalten eines Kontakts und die Beanspruchbarkeit in Abhängigkeit von Basisgrößen wie Reibweg, Reibkraft oder Normalkraft erschließen (siehe Kapitel 9.3). Die in Kapitel 9.1 beschriebenen, standardisierten Freigabeversuche am Shaker finden sich in Ebene 2 wieder. Dauerlauftests am Motorprüfstand oder unter realen Bedingungen im Fahrzeug entsprechen der Ebene 4. Wie auch in [JER07] für Versuche auf den Ebenen 0 und 2 diskutiert, können je nach Aufgabenstellung Tests auf allen verschiedenen Ebenen kombiniert werden.

Tabelle 1: Ebenen des Multilevel-Ansatzes zur Beanspruchbarkeitsanalyse von Steckkontakten unter Vibrationsbeanspruchung („+“ = zusätzlich zur niedrigeren Ebene)

Table 1: Levels of multiscale approach for load capacity analysis of connectors under vibrational excitation (“+” = additional to lower level)

Ebene	Berücksichtigte Bauteile	Beschreibung	Lastaufbringung	Schwingungseffekte	Anzahl Einflussgrößen
0	Kontakt und Stift	Reibversuche mit Zwangsbewegung zwischen Kontakt und Stift	z. B. Piezoaktuator, Linearmotor, dyn. Zugprüfmaschine	Keine	Gering z. B. Toleranzen von Kontakt und Stift
1	+ Leitung + Kontaktgehäuse + vereinfachtes Stiftgehäuse	Zwangsbewegung der Leitung bzw. hochfrequente Schwingungen (je nach Frequenzbereich). Dadurch: freie Bewegung zwischen Kontakt und Stift	z. B. Shaker mit angeregtem Stiftgehäuse und ortsfest montiertem Leitungsende	Durch Gehäuse und Leitung	Mittel + Leitungseigensch. + Verhalten und Toleranzen der Gehäuse + dyn. Verhalten von Kontakt und Stift (bei höheren Frequenzen)
2	Siehe Ebene 1	Nur hochfrequente Schwingungen an allen Bauteilen	z. B. Shaker mit Anregung Stiftgehäuse und Leitungsende (phasengleich, vgl. Freigabeversuche)	Durch Gehäuse und Leitung	Mittel bis hoch + komplexes dyn. Leitungsverhalten
3	+ Originalkomponente mit Stiftgehäuse + Leitung in Originalverlegung	Siehe Ebene 2	z. B. Shaker mit angeregter Originalkomponente und angeregtem Leitungsende in Originalverlegung (phasengleich)	+ durch Übertragungsverhalten der Komponente	Hoch + Übertragungsverhalten der Komponente
4	Siehe Ebene 3	+ evtl. Zwangsbewegung der Leitungsenden + Umwelteinflüsse	z. B. Motor mit angeregter Originalkomponente und angeregtem Leitungsende in Originalverlegung (evtl. nicht-phasengleich)	+ durch unterschiedl. Anregung der Leitungsenden	Sehr hoch + reale, unabhängige Anregung der Leitungsenden in 6 DOF + evtl. Zwangsbeweg. + Umwelteinflüsse

Im Rahmen eigener Untersuchungen wurden viele Tests auf Ebene 1 auf elektromagnetischen Shaker-Prüfständen durchgeführt. Ein vereinfachtes Ersatz-Stiftgehäuse sowie ein originales Kontaktgehäuse mit zwei Kontakten und Leitungen sind dabei auf dem Shaker montiert und können uniaxial mit synthetischen Signalen angeregt werden. Das zweite Leitungsende ist direkt neben dem Shaker ortsfest montiert (Abbildung 13, links). Messungen der Beschleunigungen, Schwingwege (mittels Beschleunigungssensoren und optisch mittels Laservibrometer) und der Durchgangswiderstände, aber auch direkte Messungen der Relativbewegungen der Kontaktpartner bzw. von Dehnungen am Kontaktkasten wurden mit einem derartigen Versuchsaufbau durchgeführt (siehe Kapitel 5 und 7).

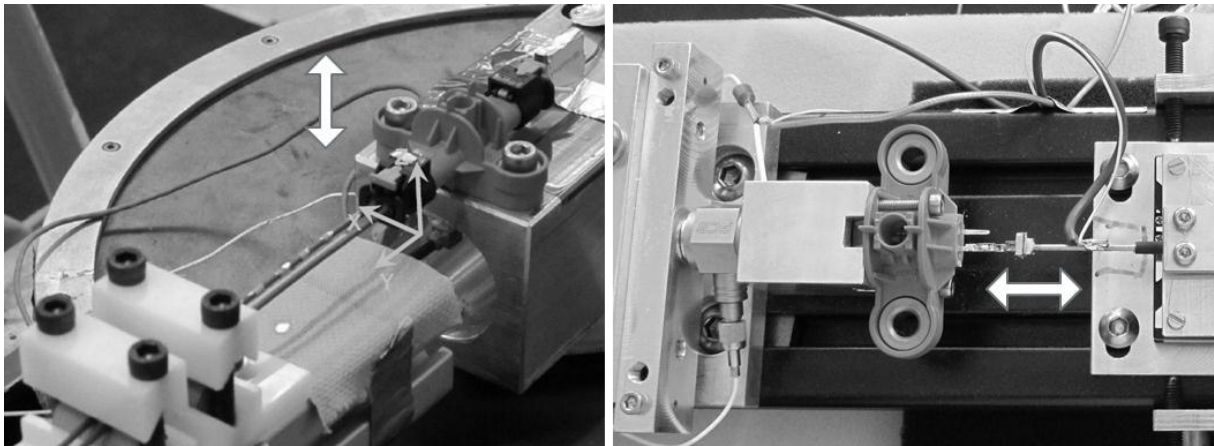


Abbildung 13: Versuchsaufbau für Beanspruchbarkeitsanalysen auf Ebene 1 mit Shaker (links) und Ebene 0 mit Linearmotor (rechts)

Figure 13: Experimental setup for load capacity analysis at level 1 with shaker (left) and level 0 with linear actuator (right)

Im Unterschied zu einem Ebene 2-Versuch, bei dem auch das zweite Leitungsende auf dem Shaker montiert ist und immer gleichphasig mit angeregt wird, kann die Lasteinbringung bei einem Ebene 1-Versuch je nach Anregungsfrequenz von Zwangsbewegung der Leitung (Wegvorgabe bei niedriger Frequenz, ca. 20 Hz) über Leitungsresonanz (mittlere Frequenzen, ca. 50-600 Hz) bis hin zu Resonanzen des Stift- und Kontaktgehäuses (höhere Frequenzen, ca. 800-2.000 Hz) flexibel variiert werden. Dadurch wird eine gezielte Einstellung der Einflussgrößen möglich.

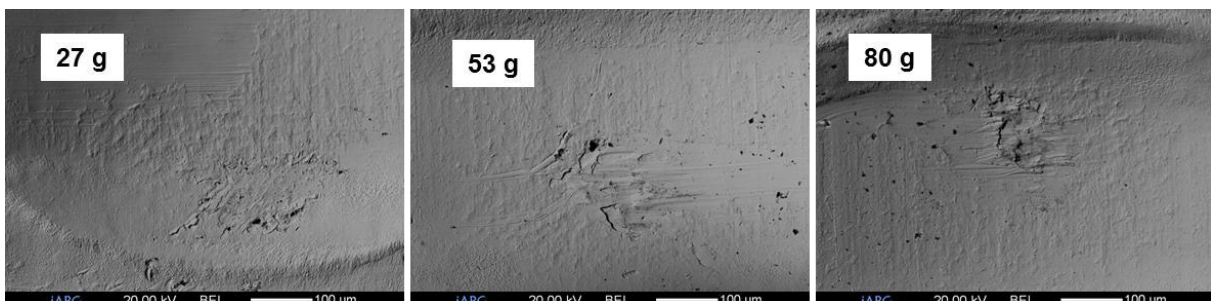


Abbildung 14: Kontaktoberflächen nach Ebene 1-Versuchen (Sinus-Sweep $\pm 4\%$ um Eigenfrequenz Stiftgehäuse, unterschiedliche Anregungspegel, REM-Aufnahmen nach 1 Mio. Zyklen)

Figure 14: Contact surfaces after level 1 tests (sine sweep $\pm 4\%$ of resonance frequency of pin housing, different excitation levels, SEM pictures after 1 million cycles)

Mit Ebene 1-Versuchen lassen sich die Schadensbilder von Ebene 4-Versuchen am Motorprüfstand oder im Fahrzeug (= „Realität“) gut reproduzieren. Auch sind Ebene 1-Versuche ein wichtiges Mittel zur Validierung von Berechnungsergebnissen (siehe Kapitel 8). Die berechneten Richtungen der Relativbewegungen der Kontaktpartner können so z.B. auch in Oberflächenanalysen der Kontakte erkannt werden. Es zeigt sich mit zunehmender Last bzw. Anregung zunächst ein Aufschieben bzw. Verschmieren der Ag-Beschichtung (Abbildung 14). Dies deutet auf das Auftreten des vollflächigen Gleitmodus hin. Ab einer bestimmten Lastwechselzahl kommt es dann zum Durchbruch der Beschichtung, der Cu-Grundwerkstoff liegt offen und ist Reibkorrosion ausgesetzt. Dass es erst ab einer bestimmten Grenzanregungshöhe zu einem vollflächigen Gleiten, damit zu einer Relativbewegung und dann zu Verschleiß und Reibkorrosion kommen kann, bestätigt das nichtlineare Systemverhalten von Steckkontakten gegenüber Vibrationsanregung.

Die Grenzen von Ebene 1- bzw. Ebene 2-Versuchen werden durch die gewünschte Anregungshöhe und damit die Leistungsfähigkeit des elektromechanischen Shakers gesetzt. Um die Beanspruchbarkeit eines Kontaktsystems gegenüber einer bestimmten Frequenz bzw. einer bestimmten Lasteinleitung zu bestimmen, sind teilweise sehr hohe Beschleunigungsanregungen notwendig. So kann z.B. der Einfluss von Stiftgehäusesteifigkeiten nur durch die Shaker-Beschleunigung selbst und nicht etwa durch Zwangsverschiebungen oder Schwingwege untersucht werden. Systemveränderungen wie angebrachte Zusatzmassen haben bisher bei Ebene 2-Versuchen nicht zum gewünschten Erfolg geführt.

Hier kommen dann Ebene 3-Versuche zum Einsatz, die statt mit vereinfachten Ersatz-Stiftgehäusen mit originalen Komponenten inkl. Stiftgehäuse durchgeführt werden. Die Komponente (z.B. ein Sensor oder Aktuator) verfügt oft über ein Eigenschwingungsverhalten, das bei einer bestimmten Frequenz zu einer großen Beschleunigungsüberhöhung am Kontaktsystem führt. Nachteilig an diesem Versuchsaufbau ist dabei die nur schmalbandige Überhöhung und die Fokussierung auf nur ein einziges System Komponente/Kontakt. Um dies zu umgehen, ist aktuell ein neuartiger Versuchsaufbau ohne reale Komponente mit einem mechanischen Resonanzverstärker mit einstellbarer Steifigkeit/Dämpfung in der Entwicklung. Abgesehen davon werden Ebene 3-Versuche aber auch noch zur Nachstellung realer Leitungssatzverlegungen und zur Untersuchung von Schädigungsmechanismen in konkreten Einbausituationen verwendet. Ein Beispiel ist die Resonanzschwingung eines Rails, die zu einer Zwangsbewegung einer auf ihm montierten Leitung und damit zu einer Lasteinleitung in die Steckkontakte der Injektoren führt.

9.3 Grundlagenversuche mit Linearaktuator und weitere Schritte

Die Anzahl der Einflussgrößen bei Ebene 1-Versuchen kann gegenüber einer realen Einbausituation (Ebene 4) deutlich verringert werden. Dadurch sinkt auch die Streuung in den Versuchsergebnissen und das Systemverständnis steigt. Trotzdem verfügen auch Ebene 1-Versuche noch über zahlreiche Bauteile, wie Kontakt- und Stiftgehäuse sowie die Leitungen, die jeweils über Toleranzen und Schnittstellen verfügen und zu Einflüssen führen können. Daher liegt der Fokus bei zukünftigen Grundlagenuntersuchungen auf Ebene 0-Versuchen. In diesen werden nur Kontakt

und Stift verwendet; massenverursachte Resonanzschwingungen und Schnittstellen sowie Anlageflächen zwischen den Bauteilen haben keinen Einfluss. Auf das Kontaktsystem werden Zwangsbewegungen aufgegeben und Reibweg, Kontaktkräfte und elektrischer Widerstand detektiert.

Zur Umsetzung von Ebene 0-Versuchen kommt ein Linearmotor zum Einsatz, der die geringen Relativbewegungen zwischen Stift und Kontakt von 1-1.000 µm genau und reproduzierbar zyklisch aufgeben kann. Bei dem in Abbildung 13, rechts dargestellten Aufbau erfolgen die Kraft- und Wegmessung über Kraftmessdose und Laserweggeber. Der Kontakt ist an einem Stift und nicht an einer Leitung fixiert, um eine ausreichende axiale Steifigkeit des Aufbaus zu gewährleisten. Mithilfe dieser Ebene 0-Versuche sollen Beanspruchbarkeitskennwerte u. a. in Abhängigkeit von Oberflächenpaarungen, Reibwegen, Kontaktkräften sowie Maß- und Lagetoleranzen ermittelt werden.

Ziel ist es in einem ersten Schritt, Beanspruchungsgrenzen bei einer Auslegung auf die Haftgrenze der Kontaktpartner festzulegen. Es darf dabei zu keiner vollflächigen Gleitbewegung kommen („dauerfeste Auslegung“, siehe auch [KIM13]). Als bestimmende Beanspruchungsgröße für die Bemessung kommt die Kontaktreaktionskraft zum Einsatz, die indirekt über die Simulation des Kontaktsystems aus der Lastgröße Beschleunigung und aus den Systemrandbedingungen wie Geometrie, Übertragungsverhalten und Einbausituation bestimmt wird. Ein Festigkeitsnachweis erfolgt damit über eine Kombination aus Messung und Simulation. In einem zweiten Schritt ist geplant, als Auslegungsbasis die Verschleißakkumulation heranzuziehen („betriebsfeste Auslegung“) und damit zeitweise auch vollflächiges Gleiten in der Kontaktfläche zuzulassen.

10. Zusammenfassung

Die Absicherung von elektrischen Steckkontakten gegenüber Vibrationsbelastungen stellt wegen des kleinteiligen Innenaufbaus, der komplexen Beanspruchungssituation und der zahlreichen Einflussgrößen eine herausfordernde Problemstellung dar. Am Beispiel eines 2-poligen Kastenkontakts im Motorbereich wurden Schädigungsmechanismen und Schädigungskette aufgezeigt. Durch von außen induzierte Zwangsbewegungen und Schwingungen kommt es zu Beanspruchungen im Inneren des Kontakts. Wird die lokale Haftbedingung zwischen den Kontaktpartnern überschritten, so setzt eine Relativbewegung ein, die schließlich in Oberflächenverschleiß resultiert. Zeitabhängige Reibkorrosionsvorgänge führen dann zu einer elektrischen Widerstandserhöhung und somit zum Ausfall des Kontaktsystems.

Die Bemessung von Steckkontaktsystemen unter Vibrationsanregung orientiert sich im Grunde an der betriebs- oder dauerfesten Auslegung mechanisch beanspruchter Bauteile. Mittels In-situ-CT, Widerstands- und Vibrometermessungen sowie der Anwendung eines neuen faseroptischen Messsystems konnten zunächst Kenntnisse über die Vorgänge im Inneren des Kontakts gewonnen werden. Erst durch die Kombination von äußerer Belastungsanalyse und FE-Simulation wird die quantitative Ermittlung von Beanspruchungen im Kontakt ohne Systembeeinflussung ermöglicht. Die Ermittlung der Beanspruchbarkeit folgt einem Multilevel-Ansatz, der von Grundlagenversuchen bis hin zu realen Motortests reicht. Am Beispiel von Schwingprüfungen auf einem uniaxialen Shaker wurden Versuchsaufbauten, Ergebnisse, Einflussgrößen und Einsatzgrenzen näher diskutiert.

Die in den Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse führten u.a. bereits zur Entwicklung einer neuen, vibrationsbeständigeren Kontaktgeneration [ZIM16] sowie zu Konstruktionsempfehlungen hinsichtlich Komponenten- und Leitungssatzdesign.

11. Literatur

- [ABD09] El Abdi, R.; Benjemaa, N.: Mechanical Wear of Automotive Connectors during Vibration Tests. In: U.P.B. Sci. Bull., Series C, Vol. 71 (2), S. 167-180, 2009
- [ANT99] Antler, M.: Contact Fretting of Electronic Connectors. In: IEICE Trans. Electron, Vol. E-82-C, S. 3-12, 1999
- [BAU10] Bauer, H.; Eckhardt, I.: VW 75174, Prüfvorschrift Kfz-Steckverbinder. Interne Konzernnorm Volkswagen AG, Ausgabe 2010-04
- [DEC09] Decker, M.; Rödling, S.: FatiRAN – Optimized Generation of Spectra for Random Vibration Testing. In: Materials Testing, Vol. 51 (7-8), S. 444-455, 2009
- [DIJ96] van Dijk, P.; van Meijl, F.: A Design Solution for Fretting Corrosion. In: Proc. 42. IEEE HOLM Conf. on Elect. Contacts, Chicago, 1996
- [DIJ98] van Dijk, P.: Contacts in Motion. In: Proc. 19. Int. Conf. on Elect. Contacts, ICEC, Nürnberg, 1998
- [DIJ02] van Dijk, P.; Kassman Rudolphi, Å.; Klaffke, D.: Investigations on Electrical Contacts Subjected to Fretting Motion. In: Proc. 21. Int. Conf. on Elect. Contacts, ICEC, Zürich, 2002
- [HOR04] Horn, J.; Kourimsky, F.; Baderschneider, K.; Lutsch, H.: Avoiding Fretting Corrosion by Design. In: AMP Journal of Technology, Vol. 4, 1995
- [JER07] Jernberg, G.: Development of new method to detect fretting movements in electrical contacts. Examensarbeit, Universität Uppsala, UPTec Q07 005, Uppsala, 2007
- [KIM13] Kimpel, T.; Jauernig, U.; Becker, R.; Wagener, R.; Kaufmann, H.; Sonsino, C. M.: Betriebsfeste Bemessung von Steckverbindern in Steuergeräten. In: Materials Testing, Vol. 55 (7-8), S. 561-568, 2013
- [KIM14] Kimpel, T.: Entwicklung eines Verfahrens zur betriebsfesten Bemessung von Einpressverbindungen in Leiterplatten für elektronische Steuergeräte der Fahrzeugtechnik. Dissertation, TU Darmstadt, LBF-Bericht FB-243, Darmstadt, 2014
- [RIC09] Richter, H.: Elektronik und Datenkommunikation im Automobil. Technical Report Ifl-09-05, TU Clausthal, 2009
- [VDI04] VDI Richtlinie 3822 Blatt 5, Schadensanalyse, Schäden durch tribologische Beanspruchungen. Ausgabe 01-1999, Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 1999
- [ZIM16] Zimmermann, S.: High Performance Kontaktierung. In: 4. Internationaler Fachkongress Bordnetze im Automobil, Ludwigsburg, 2016