

StRobA

Einfluss von Mikrobewegungen auf Steckverbinder und deren robuste Auslegung
Forschungsvorhaben Nr. 870 I
Heft 1570, 2023

Abschluss-
bericht

Die urheberrechtlichen Nutzungsrechte an diesem Bericht einschließlich aller Beiträge verbleiben bei uns.

Ohne schriftliche Genehmigung darf der Bericht weder kopiert noch vervielfältigt noch Dritten mitgeteilt oder zugänglich gemacht werden.

Die FVA übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter.



Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V.
Lyoner Straße 18, 60528 Frankfurt
Postfach 71 08 64, 60498 Frankfurt
Tel +49.69.6603-1515, Fax +49.69.6603-2515
info@fva-net.de, www.fva-net.de



Mitglied der Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen

StRobA

Thema: Einfluss von Mikrobewegungen auf Steckverbinder und deren robuste Auslegung**Überblick:**

Mikrobewegungen an Steckverbindern verursachen Reibverschleiß bzw. Reibkorrosion, was durch Hochohmigkeit der Schichten zum Ausfall des Systems führen kann. Ursächlich für diese Mikrobewegungen sind vorwiegend Vibrationen und die unterschiedliche thermische Ausdehnung von Materialien. Hierzu wurde der Einfluss der Einbaulage von Steckverbindern auf Reibverschleiß und Reibkorrosion untersucht. Es stellte sich heraus, dass die Einbaulage einen entscheidenden Einfluss hat. Ebenfalls haben die Belastung durch Vibration und thermische Ausdehnung unterschiedliche Auswirkungen auf das Verschleißverhalten von Steckverbindern.

Auf der Grundlage der Untersuchungsergebnisse wurde ein Leitfaden zur robusten Auslegung von Steckverbindern in Bezug auf Mikrobewegungen und der Auswahl und Prüfung von Steckverbindern entwickelt, der es Entwicklungsingenieuren erleichtert, durch Einbaulagen und andere konstruktive Maßnahmen eine Minimierung der Auswirkung von Mikrobewegungen bereits beim Design zu berücksichtigen und durch gezielte Prüfungen die Widerstandsfähigkeit von Steckverbindern genauer zu quantifizieren. Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

FVA-Arbeitskreis: Mechatronik
Obmann: Michael Schwab
Projektleiter: Johannes Schautzgy
FVA-Koordinator: Alexander Rassmann

Sachbearbeiter: TH OWL: Dirk Hilmert, Christian Koch, EMFT: Dominik Muß
Projektleiter: TH OWL: Prof. Dr.-Ing. Jian Song, EMFT: Prof. Dr. Christoph Kutter
Forschungsstelle: Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe (TH OWL)
Fraunhofer-Einrichtung für Mikrosysteme und Festkörper-Technologien (EMFT)

Bei AiF-Förderung:

Das IGF-Vorhaben 20139 N der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

1	FORSCHUNGSTHEMA	1
2	WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE UND WIRTSCHAFTLICHE PROBLEMSTELLUNG ...	1
2.1	Ausgangssituation	1
2.2	Stand der Forschung und Entwicklung.....	4
3	FORSCHUNGSZIEL / LÖSUNGSWEG / ERGEBNISSE	5
3.1	Forschungsziel.....	5
3.2	Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels.....	5
3.3	Forschungsergebnisse	7
3.3.1	Definition der Parameter und Auswahl der Prüflinge.....	7
3.3.2	Reib- und Anregungsrichtungen	10
3.3.3	Lastprofile und Messparameter.....	13
3.3.4	Reibverschleißprüfungen und Vibrationsprüfung mit Gleitsinusanregung	15
3.3.5	Vibrationsprüfung mit Rauschanregung	38
3.3.6	Korrelation der experimentellen Untersuchungen.....	51
3.4	Leitfaden	53
3.5	Gegenüberstellung der durchgeführten Arbeiten und des Ergebnisses mit den Zielen	53
4	ZUSAMMENFASSUNG	53
5	LITERATUR	55
6	ANHANG	57
6.1	Leitfaden zur robusten Auslegung von Steckverbindern in Bezug auf Mikrobewegungen	57
6.2	Messergebnisse Vibrationsprüfung mit Rauschanregung	65

Abkürzungen, Formelzeichen etc.

Abkürzungen:

AiF	Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie
ELA / ELD	Einzelleiter(ab)dichtung
EMFT	Fraunhofer-Einrichtung für Mikrosysteme und Festkörper-Technologien
FVA	Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V.
IGF	Industrielle Gemeinschaftsforschung
KMU	Klein- und Mittelständische Unternehmen
RFA	Röntgenfluoreszenzanalyse
TH OWL	Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe
TLF	Technischer Leitfaden
ZVEI	ZVEI e.V. (Verband der Elektro- und Digitalindustrie)
SG	Schärfegrad für Vibrationsbelastungstests

Bewegungen:

CH1	Vibrationsprüfung mit max. Freiheitsgrad des Leiters
CH2	Vibrationsprüfung ohne Freiheitsgrad des Leiters
d1	Stecken
d5	Nicken
d6	Gieren

Formelzeichen:

$a_{(eff)}$	(effektive) Beschleunigung
$E_{f,S(G,N)}$	Reibenergie eines Halbzyklus beim Stecken (oder Gieren, oder Nicken)
$F_{f,S(G,N)}$	maximale Tangentialkraft beim Stecken (oder Gieren, oder Nicken)
$h_{S(G,N)}$	Verschleißtiefe der Kontaktstelle nach der Prüfung in Steckrichtung (oder Gieren, oder Nicken)
$l_{S(G,N)}$	Länge der Kontaktstelle nach der Prüfung in Steckrichtung (oder Gieren, oder Nicken)
R	Ohm'scher Widerstand
V_w	Verschleißvolumen
$w_{S(G,N)}$	Breite der Kontaktstelle nach der Prüfung in Steckrichtung (oder Gieren, oder Nicken)

Elemente:

Ag	Silber
Al	Aluminium
Au	Gold
Ni	Nickel
O	Sauerstoff
Sn	Zinn

1 Forschungsthema

Einfluss von Mikrobewegungen auf Steckverbinder und deren robuste Auslegung

2 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

2.1 Ausgangssituation

Elektrische Stecksysteme sind die Schnittstelle zwischen den Baugruppen/Modulen mechatronischer bzw. elektrischer Systeme. Meist werden nur die elektrischen Eigenschaften aus dem Datenblatt für die Auswahl herangezogen ohne spätere mögliche Umweltbelastungen frühzeitig zu berücksichtigen. Dies ist eine komplexe Aufgabe, welche gerade für KMU schwer beherrschbar ist, da meist die Erfahrung im Kleinserienbereich keine Rückschlüsse auf extreme Belastungsarten zulässt. Auch Automobilhersteller sind von unerwarteten Belastungen von Stecksystemen betroffen, wie es z.B. ein Rückruf aus dem Jahr 2013 in den USA zeigt. Durch unvorhergesehene Korrosion, ausgelöst durch Vibrationsbelastungen, mussten Kabel und Stromverteiler ausgewechselt werden. Das Ziel des Forschungsvorhabens ist das Ausarbeiten von Leitfäden zur konstruktiven Auslegung sowie zur Auswahl und Prüfung von Steckverbindern.

Allgemein zugängliche und verbindliche Auslegungsrichtlinien, z.B. in Form eines Leitfadens, fehlen für robuste Steckverbinder im mechatronischen System. Insbesondere KMU sind weder zeitlich noch finanziell in der Lage, ausführlich Schadensanalyse zu betreiben und Rückschlüsse auf ursächliche Ausfallmechanismen zu ziehen. Speziell der Entwurf von allgemeingültigen Leitlinien ist von KMU kaum zu leisten. Da elektrische Kontakte in Stecksystemen zu den häufigsten Ausfallursachen gehören, stellt die korrekte Auslegung eine unabdingbare Notwendigkeit zur Absicherung der Zuverlässigkeit des Mechatroniksystems dar. Zwar existieren mit dem Technischen Leitfaden – TLF 0214 „Validierung von Automotive-Niedervolt-Steckverbindern“ [1] bzw. der LV214: „Elektrische und elektronische Komponenten in Kraftfahrzeugen bis 3,5 t“ [2] und der Prüf-Norm IEC 60512: „Steckverbinder für elektronische Einrichtungen“ [3] Prüfrichtlinien für Automobilhersteller, welche allerdings nicht belastungsspezifisch ausgelegt sind und selbst im Idealfall nur nachträgliche Auslegungsfehler aufdecken können. Während die natürliche Oxidation ein materialspezifisches Verhalten ist, sollen im Folgenden die Mikrobewegungen, welche oft die Hauptursache für das Versagen von Steckverbindungen sind, untersucht werden.

Zu einer Mikrobewegung der Kontaktpartner kommt es einerseits durch Vibrationen der Baugruppen und andererseits durch unterschiedliche thermische Ausdehnung auf beiden Seiten des Steckverbinders und des umgebenden Gehäuses. Die Charakteristik der Mikrobewegung und deren Einfluss auf das elektrische Verhalten des Steckverbinders werden in der einschlägigen Fachliteratur nur unzureichend oder nur teilweise behandelt. In Abbildung 2.1 sind mögliche Szenarien der Bewegung für einen Kontakt gezeigt.

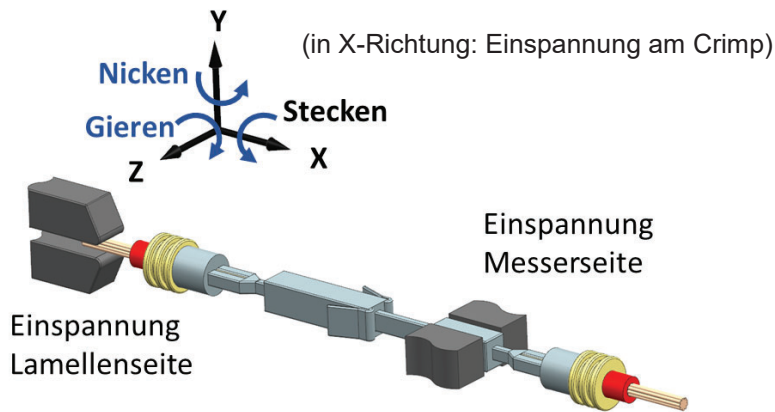


Abbildung 2.1: Darstellung der Bewegungsrichtungen für das Projekt

Die Vorhersage, welche Mikrobewegung zu welcher Art der Schädigung führt, gestaltet sich schwierig, da Mikrobewegungen vielfältigen Einflussfaktoren unterliegen. Diese sind z.B. die konstruktiven Merkmale, wie Größe und Gestaltung der Kontakte, Überfederkonstruktion, Flach- oder Rundkontakte, Lamellenanzahl und schwimmende Lagerung der Kontaktelemente.

Weitere wichtige Einflussfaktoren sind die Art der Bewegung, ob diese gleichmäßig erfolgt (z.B. ein gleichmäßig laufender Motor) oder unregelmäßig (z.B. Schlaglöcher einer Straße), sowie die Frequenz der anregenden Bewegungen und auftretenden Beschleunigungskräfte. Des Weiteren werden Steckverbindungen nicht lose verbaut, sondern werden durch Gehäuse an ihren Positionen fixiert. Die Verriegelungs- und Dichtelemente beeinflussen ebenfalls die Mikrobewegung der Kontaktpartner auf unterschiedliche Weise. Als letzten Punkt sei noch aufgenommen, dass an Steckverbindungen Leitungen angebracht werden, welche unterschiedliche Leitungsquerschnitte, Leitungslängen und auch unterschiedliche Materialien aufweisen. Insbesondere deren Fixierung und geometrische Verlegung muss bei Vibrationsbelastungen mitberücksichtigt werden. Die wichtigsten Einflussfaktoren sind in Tabelle 2.1 nochmals zusammengestellt:

Tabelle 2.1: Einflussfaktoren auf Mikrobewegungen in Steckverbindern

Konstruktive Merkmale	Leitungseinflüsse
<ul style="list-style-type: none"> Größe und Gestaltung der Kontakte 	<ul style="list-style-type: none"> Länge der Leitungsfixierung
<ul style="list-style-type: none"> Rund- oder Flachkontakte 	<ul style="list-style-type: none"> Leitungsquerschnitt
<ul style="list-style-type: none"> Beschichtungsmaterial (Ag, Sn, Ni, Au,...) 	<ul style="list-style-type: none"> Leitungsmaterial (Cu, Al)
<ul style="list-style-type: none"> Lamellenanzahl 	<ul style="list-style-type: none"> Leitungsichtung
<ul style="list-style-type: none"> Schwimmende Lagerung des Kontaktsystems (z.B. Lamellen oder Überfederkonstruktion) 	<ul style="list-style-type: none"> Geometrische Verlegung der Leitung
<ul style="list-style-type: none"> Geschmiert / trockene Kontaktoberfläche 	
<ul style="list-style-type: none"> Art des Basismaterials 	
Gehäusekonstruktion	Bewegungsmechanismen
<ul style="list-style-type: none"> Aktive / Passive Verriegelung 	<ul style="list-style-type: none"> Translatorische Bewegung
<ul style="list-style-type: none"> Gehäusedichtungen 	<ul style="list-style-type: none"> Kippbewegung
<ul style="list-style-type: none"> Abbau und Alterung des Kunststoffes 	<ul style="list-style-type: none"> Mechanische Vibration
<ul style="list-style-type: none"> Polzahl 	<ul style="list-style-type: none"> Mechanischer Schock
<ul style="list-style-type: none"> Masse 	<ul style="list-style-type: none"> Thermische Ausdehnung
<ul style="list-style-type: none"> Geometrische Steifigkeit 	

Steckverbindungen werden in unterschiedlichsten Wirtschaftszweigen eingesetzt. Allerdings werden in diesem Forschungsvorhaben vor allem Steckverbindungen untersucht, welche thermischen Einflüssen und Vibrationsbelastungen ausgesetzt sind, die zu Mikrobewegungen der Kontaktpartner der Steckverbindung führen. In diesem Zusammenhang sind vor allem die Wirtschaftszweige Maschinenbau und Herstellung von Kraftfahrzeugen sowie Kraftwagenteilen zu nennen. Besonders im zuletzt genannten sind KMU stark beteiligt. In diesen Zweigen sind eingesetzte Steckverbindungen besonders starken Beanspruchungen ausgesetzt. KMU aus anderen Wirtschaftszweigen, welche die Entwicklung und Anwendung von Steckverbindungen beinhalten, können aber ebenfalls ihren Nutzen ziehen. Die zuverlässige Entwicklung, Auswahl und Prüfung von Steckverbindungen ist somit entscheidend. Speziell die Neuentwicklung von Steckverbindern, aber auch die richtige Auswahl vorhandener Systeme ist sehr kostenintensiv und vor allem für KMU mit erheblichen Risiken verbunden. An dieser Stelle sollen die zu entwickelnden Leitfäden den KMU helfen, das Risiko von

Fehlentwicklungen und falscher Auswahl von Steckverbindungen zu minimieren und bereits während der Konstruktionsprozesse die Zuverlässigkeit elektrischer Verbindungen zu optimieren. Dies erhöht die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen und insbesondere von KMU, welche zum Teil auch nicht über die wissenschaftlichen Möglichkeiten großer Unternehmen verfügen.

2.2 Stand der Forschung und Entwicklung

Anforderungen an Materialien in der elektrischen Verbindungstechnik sind niedrige, stabile Widerstände und gegebenenfalls eine hohe Stromtragfähigkeit [4]. Um das Verhalten von Materialien bzw. Steckverbindern zu testen, werden im Laborbereich umfangreiche Prüfungen, wie elektrische Stresstests, Reibkorrosionsuntersuchungen, dynamische Beanspruchungen, Umweltsimulationen, Langzeitemperaturlagerungen und Stromerwärmung durchgeführt. Bei Reibverschleiß- und Reibkorrosionsuntersuchungen werden zwei Proben (entweder idealisiert Sphäre auf Platte oder Stecker und Buchse) relativ zu einander in einer Raumrichtung bewegt. Dabei ist der Hub meist sinusförmig mit einer Frequenz von 0,1 Hz bis 10 Hz und wenige Mikrometer bis einige hundert Mikrometer groß. Reibverschleiß- und Reibkorrosionstests eignen sich besonders gut für die Simulation von Mikrobewegungen aufgrund von thermischen Ausdehnungen, welche vor allem durch unterschiedliche Materialkombinationen entstehen. Dabei steht durch die niedrige Frequenz die Korrosion (Oxidation) der Materialien im Vordergrund [5–8]. Das Reibkorrosionsverhalten von Metallen wurde bislang in diversen Arbeiten untersucht [5, 9–12]. In der Literatur werden zwar bereits rotatorische Mikrobewegungen beschrieben, hier allerdings beschränkt auf idealisierte Zinn-Kontakte und ohne eine Betrachtung zum Reibverschleiß [13]. Hinsichtlich Rechenmodell der Verschleißentwicklung wurden bereits erste Versuche vorgestellt [14, 15]. Um die dynamischen Belastungen von elektrischen Steckverbindern zu berücksichtigen, werden Vibrationsprüfungen eingesetzt. In der Literatur werden dafür häufig beschleunigte Reibverschleißuntersuchungen bei 10 Hz bis 1000 Hz verwendet. Allerdings sind die durchgeführten Arbeiten meist auf eine konstante Frequenz, Amplitude und Raumrichtung begrenzt [16–18] oder es werden nur sehr vereinfachte Kontaktgeometrien verwendet [11, 19]. Eine genaue Unterscheidung zwischen rotatorischer und translatorischer Bewegung der Kontaktpartner, wie sie in diesem Vorhaben angestrebt ist, erfolgt nicht.

Die Auslenkung von Buchse und Stecker aus der koaxialen Ausrichtung durch rotatorische Kipp-Bewegung ist bei optischen Faser-Signalleitungen von enormer Bedeutung und wird dort seit längerem mit umfangreichen Vibrationstests untersucht [20].

Automobilhersteller führen schon lange Vibrationsprüfungen mit Vibrationsprofilen durch, welche eine Vielzahl an Frequenzen und Amplituden beinhalten. In der allgemein anerkannten Lieferantenvereinbarung LV124 und dem Technischen Leitfaden - TLF 0214 des ZVEI werden unterschiedliche Vibrationsprüfungen vorgeschrieben, welche realen Belastungen nachempfunden sind. Die LV124 legt Vibrationsprüfung allgemein für verbaute Module fest, wohingegen der TLF 0214 explizit auf Vibrationsprüfungen für Steckverbindungen eingeht. In den Prüfungen werden die Steckverbindungen Frequenzen von 10 – 2000 Hz, Beschleunigungen von bis zu 180 m/s^2 und zusätzlich Temperaturbelastungen bis zu 140 °C ausgesetzt. Durch diese Prüfungen werden extreme dynamische Belastungen simuliert, welche in einer höheren Hubamplitude und in einem größeren Verschleißschaden als bei der Reibkorrosionsprüfung resultieren [16]. Allerdings wird nicht der ebenfalls wichtige systematische Einfluss von einzelnen Frequenzen und Amplituden untersucht, sondern meist ein statistisches Breitbandrauschen induziert, wobei im Frequenzdurchgang von 10 – 2000 Hz die

mittlere Amplitude etwa an die realen Vibrationsbelastungen eines fahrenden Automobils angepasst sind [21]. Das Ausmaß der Schädigung ist hier bestimmt durch das Anregungsniveau der Schwingungen [22]. Die Einflüsse der Leitungen auf die Schädigung der Steckverbinder werden auch an anderer Stelle untersucht. Allerdings erfolgt die Betrachtung dort zumeist nur hinsichtlich einzelner Teilaspekte, wie z.B. dem Einfluss von Axialschwingungen auf den Reibverschleiß [23], dem Einfluss der Temperatur auf Abnutzung der Kontakte unter Vibrationsbelastung [24], welche Auswirkungen veränderte Umgebungsbedingungen (induktive Einflüsse) auf Steckverbindungen ausüben [25] oder welchen Einfluss Schwingungsmoden und Eigenschwingungen des Kabels auf die Mikrobewegung der Steckverbindungen ausüben [26]. Diese Untersuchungen beziehen sich zumeist auf einzelne Teilaspekte der Mikrobewegung von Steckverbindungen und orientieren sich nicht an real gegebenen Einbausituationen oder realen Vibrationsbelastungen. Bisher wird der Einfluss einzelner Frequenzen auf das Schadensbild von Steckverbindungen, inklusive Überlagerung und Amplituden, nicht berücksichtigt.

3 Forschungsziel / Lösungsweg / Ergebnisse

3.1 Forschungsziel

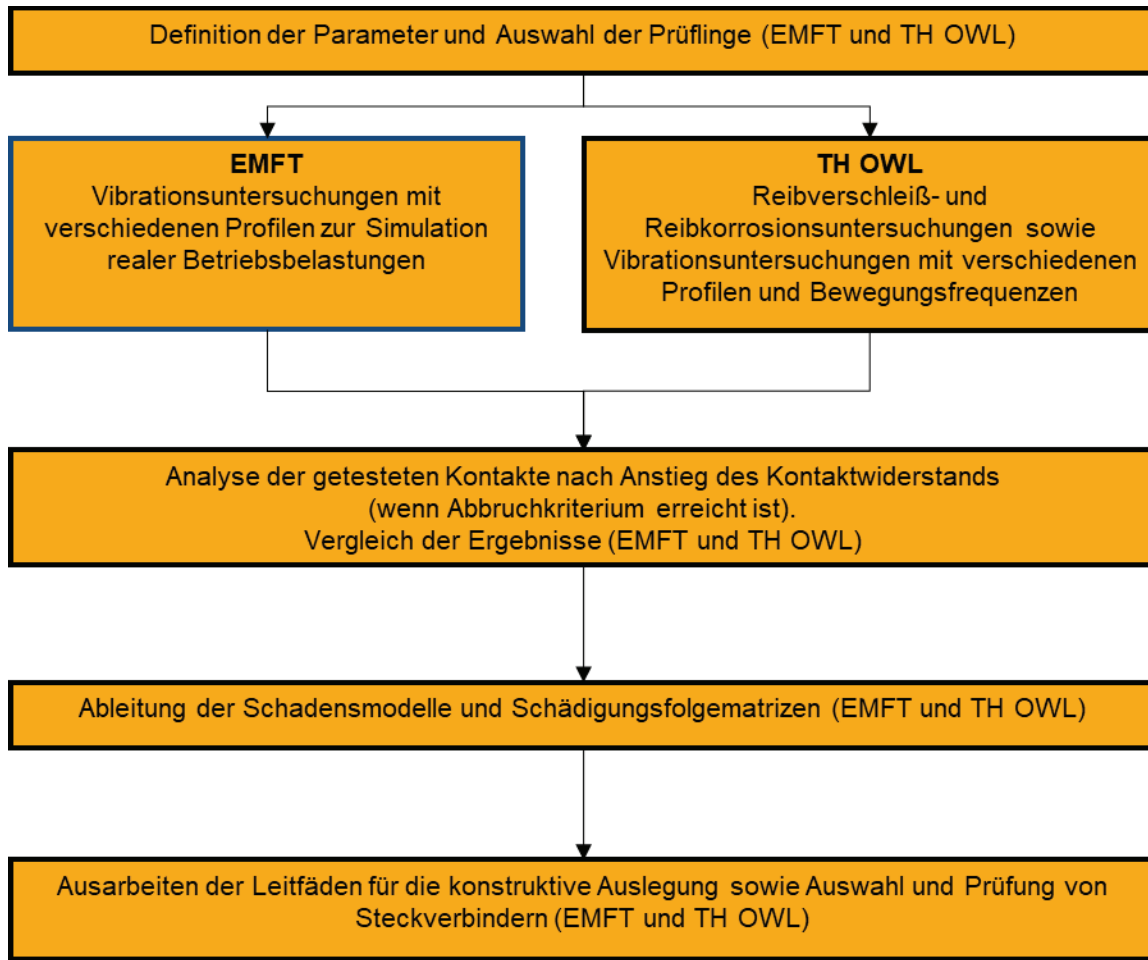
Während natürliche Oxidation ein materialspezifisches Verhalten ist, sollen in diesem Vorhaben die Mikrobewegungen, welche oft die Hauptursache für das Versagen von Steckverbindungen sind, untersucht werden. Ziel des Vorhabens ist das Herausarbeiten des Einflusses einerseits von unterschiedlichen Arten der Mikrobewegung (Rotation und Translation) und zum anderen von konstruktiven Merkmalen und der Leitungsverlegung auf das Schädigungs- und Alterungsverhalten von Steckverbindern. Aus den gewonnenen Erkenntnissen soll ein Leitfaden zur konstruktiven Auslegung sowie zur Auswahl und Prüfungen von Steckverbindern erstellt werden. Dieser Leitfaden soll es Entwicklungsingenieuren erleichtern, durch konstruktive Maßnahmen eine Minimierung möglicher Schadensbilder bereits beim Design zu berücksichtigen. Für Anwender von Steckverbindungen (Systemlieferanten, Maschinen- und Automobilhersteller) ermöglichen die entwickelten Vorschläge zur Auswahl und Prüfung von Steckverbindungen eine zielsichere Auswahl des richtigen Steckverbinders für die geforderte Aufgabe zu treffen, die Erprobungszeit von neuen Steckverbindungen zu verkürzen und eine Erhöhung der Zuverlässigkeit und Leistungsfähigkeit der Produkte zu erreichen. Der Nutzerkreis erstreckt sich auf die gesamte Elektronikbranche sowie auf die Antriebstechnik in Industrie und Fahrzeugtechnik. Das Hauptaugenmerk des Vorhabens liegt auf dem Einfluss konstruktiver Merkmale, zum einen der Metallkontakte, zum anderen aber auch des Gehäuses und der Leitungsführung.

3.2 Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels

Das übergeordnete Ziel des Vorhabens ist die Erstellung eines Leitfadens für elektrische Steckverbinder:

- für Konstruktionsanforderungen, welcher Entwicklungsingenieuren bei der konstruktiven Auslegung helfen, und mögliche schadensauslösende Effekte vermeiden soll
- für Anwender, welcher bei der Auswahl und Qualifikationsprüfung von Steckverbindungen für anwendungsspezifische Problemstellungen helfen soll.

Zur Erreichung der Ziele haben sich die Forschungsstellen mit den beteiligten Unternehmen auf folgende Arbeitsplanung verständigt:



Auf der experimentellen Seite werden parallel Untersuchungen zum Reibverschleiß-/Reibkorrosionsverhalten an der Technischen Hochschule Ostwestfalen-Lippe (Laborversuchsreihen) und vibrationsinduziert (betriebsnah) am Fraunhofer EMFT durchgeführt. Ersteres dient vornehmlich der phänomenologischen Unterscheidung zwischen Einflüssen rotatorischer und translatorischer Mikrobewegungen auf Steckverbinder, sowie der quantitativen Bestimmung des Verschleißablaufes. Die vibrationsinduzierten Belastungen decken hingegen den Einfluss konstruktiver Merkmale der Stecker und der Kabelführung ab, wobei hier, je nach Abschnitt, entweder durch statistische Überlagerung einer ganzen Bandbreite von Anregungsfrequenzen ein realitätsnahes Vibrationsprofil durchfahren oder durch eine Gleitsinusanregung einzelne Frequenzen angeregt werden können.

Die Ergebnisse sind die Grundlage für die Ableitung von Schadensmodellen und die weiterführende Entwicklung von Leitfäden. Dies erfolgt in Zusammenarbeit mit dem projektbegleitenden Ausschuss auf Basis fundierter analytischer Befunde der getesteten Steckverbinder. Die Leitfäden sollen KMU ermöglichen, die Kosten für Entwicklung, Auswahl und Prüfung von Steckverbindungen erheblich zu reduzieren.

3.3 Forschungsergebnisse

3.3.1 Definition der Parameter und Auswahl der Prüflinge

In diesem Forschungsprojekt werden verschiedene Flach- und Rundsteckverbinder zum Anschluss beweglicher Leitungen (Einzelleitungen oder Kabelbäume) für den primären Einsatz im Automotive Bereich untersucht. Der grundlegende Aufbau eines Steckverbinders ist schematisch in der Abbildung 3.1 dargestellt. Dieser besteht prinzipiell aus zwei Kontaktelementen nämlich aus einem Kontaktmännchen bzw. –stift (Male) und der Kontaktbuchse (Female) mit den jeweiligen Anschlussbereichen für die Leitungen. Die Kontaktbuchse besitzt je nach Form und Design mehrere Federelemente sowie Kontaktzonen. Die Federelemente gewährleisten hierbei die notwendige Anpresskraft (Kontaktnormalkraft) in der Kontaktzone für eine zuverlässige elektrische Übertragung. Der Gesamtdurchgangswiderstand eines Steckverbinders entspricht der Summe von Kontaktübergangswiderständen in der Kontaktzone, der Kontaktierung der Leitung sowie den Bahnwiderständen des Kontaktkörpers. Als Trägerwerkstoff für elektrische Steckverbinder dienen meistens Kupfer und seine Legierungen aufgrund der hohen elektrischen und thermischen Leitfähigkeit. Um eine Korrosionsbeständigkeit zu gewährleisten, werden die Kontaktstellen beschichtet. Als Diffusionsbarriere wird zwischen dem unedlen Basismaterial und der edlen Deckschicht in der Regel Nickel verwendet.

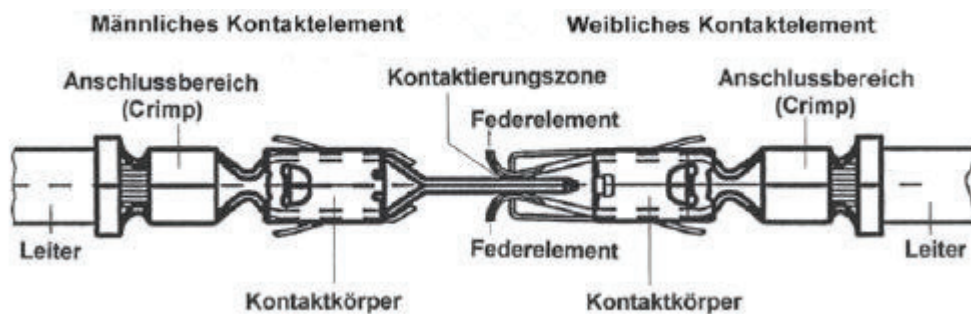


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung des prinzipiellen Aufbaus eines elektrischen Steckverbinders [4]

Für die Untersuchung werden insgesamt fünf verschiedene Typen von Flachsteckverbindern und zwei Typen Rundsteckverbinder ausgewählt. Diese sind dabei mit den industriell üblich verwendeten Beschichtungen Zinn, Silber und Gold beschichtet, sodass sich verschiedene Kombinationen aus Form und Beschichtungsmaterial ergeben. Hieraus ergeben sich 12 verschiedene Kombinationen, welche für die Prüfungen verwendet werden. Die definierten Parameter berücksichtigen die spätere Vergleichbarkeit zwischen Laboruntersuchungen und praxisnaher Vibrationsbelastung. Eine Übersicht der verwendeten Steckverbinder zeigt die Abbildung 3.2 sowie Tabelle 3.1. Für die Vibrationsbelastungen werden hierzu die herstellerspezifischen Steckverbindergehäuse genutzt. Dies ist in Abbildung 3.3 und Tabelle 3.2 dargestellt.



Abbildung 3.2: Übersicht der ausgewählten Steckverbinder
(von links nach rechts K11, K4/K5, K6, K7, K8, K1/K2, K8/9, K12, K3)



Abbildung 3.3: Übersicht der Steckverbinder zugehörigen Gehäuse
(von links nach rechts G9, G2, G1, G5, G4, G8, G3)

Tabelle 3.1: Tabellarische Übersicht der Steckverbindertypen (vgl. Abbildung 3.2)

Kontakt-system	Art	Schichtaufbau/ -dicke Stift	Schichtaufbau/ -dicke Steckhülse	Stiftdicke	Anzahl Kontakt- punkte
K1	Flachkontakt	Sn (6,2 µm) Ni (2 µm)	Sn (1,8 µm)	0,8 mm	2x4
K2	Flachkontakt	Ag (5 µm) Ni (1,8 µm)	Ag (4 µm)	0,8 mm	2x4
K3	Flachkontakt	Ag (6,2 µm) Ni (1,7 µm)	Ag (1,4 µm)	0,8 mm	2x7
K4	Rundkontakt	Sn (7,2 µm) Ni (2,9 µm)	Sn (3,1 µm)	∅1,5 mm	6
K5	Rundkontakt	Ag (5,8 µm) Ni (1,8 µm)	Ag (4,4 µm)	∅1,5 mm	6
K6	Flachkontakt	Sn (1,3 µm)	Sn (1,3 µm)	0,6 mm	2x2
K7	Flachkontakt	Au (0,8 µm) Ni (1,6 µm)	Au (0,8 µm) Ni (2,4 µm)	0,6 mm	2x2
K8	Flachkontakt	Sn (1,9 µm)	Sn (1,7 µm)	0,7 mm	2x2
K9	Flachkontakt	Ag (4,0 µm)	Ag (3,3 µm)	0,7 mm	2x2
K10	Flachkontakt	Sn (4,3 µm) Ni (1,5 µm)	Sn (1,6 µm)	0,5 mm	2x1
K11	Flachkontakt	Au (0,5 µm) Ni (1,5 µm)	Au (0,3 µm) Ni (1,0 µm)	0,5 mm	2x1
K12	Rundkontakt	Ag (2,9 µm)	Ag (2,7 µm)	∅3,8 mm	6

Tabelle 3.2: Tabellarische Übersicht der Gehäusetypen (vgl. Abbildung 3.3)

Gehäuse	Art	Polzahl	Anzahl der Reihen
G1	Reihe	3	1
G2	Reihe	2	1
G3	Rundstecker	16 (davon 14 bestückt)	Sternförmig angeordnet
G4	Reihe	2	1
G5	Reihe	8	2
G6	Reihe	2	1
G7	Reihe	4	2
G8	Reihe	6	2
G9	Reihenordnung	4	2

3.3.2 Reib- und Anregungsrichtungen

Da Steckverbinder in Fahrzeugen und elektrischen Maschinen in diversen Einbaupositionen und Einbaulagen zum Einsatz kommen, wirken von außen angeregte Schwingungen unterschiedlich auf die Steckverbinder ein. Ebenso ist der Einfluss des Kabels auf die Mikrobewegungen ein relevanter Faktor. Um dies weiterführend zu untersuchen, werden Lebensdauerprüfungen durch Reibverschleiß- und Vibrationstests in unterschiedlichen Einwirkrichtungen durchgeführt.

Anregung mit dem Shaker

In Anlehnung an den technischen Leitfaden 0214 (TLF 0214) des ZVEI, welcher aus Prüfvorschriften für Kfz-Steckverbinder von Automobilherstellern und Zulieferern entstanden ist, werden dazu die Richtungen X, Y und Z definiert, wie in Abbildung 3.4 dargestellt ist. Die X-Richtung stellt dabei die Belastung in der Steckrichtung dar.

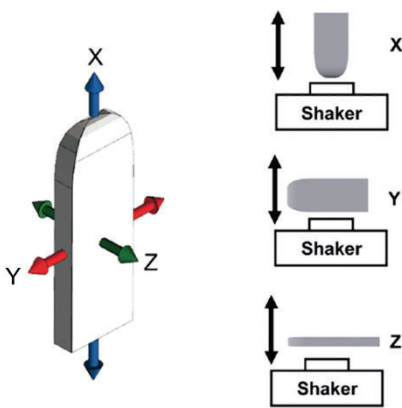


Abbildung 3.4: Darstellung der Anregungsrichtungen X, Y und Z am Shaker nach TLF 0214 (dargestellt wird ein Teil eines Kontaktsystems (Messer) ohne Gehäuse, X = Steckrichtung)

Anregung mit dem Reibkorrosions- und Reibverschleißprüfstand

Für die Reibverschleißprüfungen werden die Messerseiten der Steckverbinder an einer festen Einspannung fixiert. Ein Voice-Coil-Aktor leitet über die Lamellenseite eine definierte Bewegung in das System ein. Die Lamellenseiten wurden zum einen am Crimp selbst eingespannt (Abbildung 3.5, links). Zum anderen wird das Kabel direkt vor der Crimpverbindung eingespannt, um zusätzliche Bewegungsfreiheiten zu ermöglichen (Abbildung 3.5, rechts).

Durch eine Einspannung des Leitungscrimps in der Richtung 1, welche der X-Richtung der Vibration entspricht, wird eine translatorische Bewegung in der Steckrichtung hervorgerufen. Die Einspannung am elektrischen Leiter, wie im rechten Teil von Abbildung 3.5 dargestellt, führt zu einer rotatorischen Bewegung der Kontaktpartner zueinander. Dabei wird eine Drehung um die Achse 3, welche der Z-Achse der Vibration gleicht, als Richtung 6 definiert. Eine Rotation um die Achse 2, welche identisch mit der Y-Achse der Vibrationsprüfung ist, wird als Richtung 5 bezeichnet.

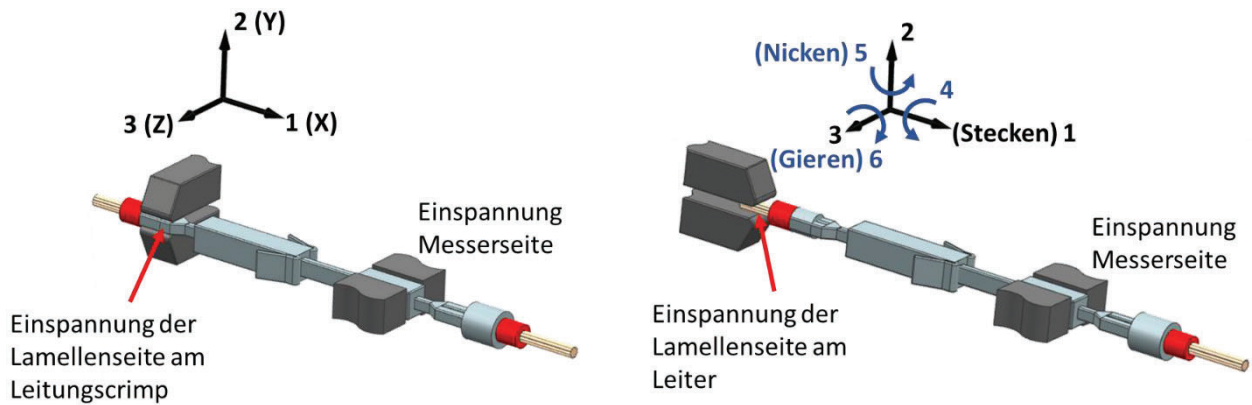


Abbildung 3.5: Beispielhafte Darstellung der unterschiedlichen Einspannungen an der Lamellenseite am Reibverschleißprüfstand

Durch die Art der Einspannung ergeben sich verschiedene Relativbewegungen, woraus folglich auch ein unterschiedlicher Verschleiß zu erwarten ist. Um diese Bewegungen näher zu betrachten, sind in Abbildung 3.6 theoretische Annahmen dargestellt. Dabei stellt die Richtung 1 das Reibverhalten in der Steck- und Ziehrichtung dar und die Kontaktpartner werden in dieser Ebene translatorisch zueinander bewegt. Die Richtung 6 ist ebenfalls mit einer Bewegung in der 1/2-Ebene abgebildet, jedoch werden hier die Kontaktpartner quer zur Kontaktfläche bewegt. Hieraus ergibt sich eine pendelnde, rotatorische Bewegung um den Kontaktpunkt welche das Gieren darstellt. In der Richtung 5 erfolgt die Bewegung hingegen orthogonal zur 1/2-Ebene in der 1/3-Ebene und die Kontakte werden auf und ab bewegt. Dabei bleibt das Messer starr, was zu einer Aufweitung der Lamellen und einer Rollbewegung der Kontaktpartner aufeinander führt. Dies stellt das Nicken dar. Somit werden jeweils unterschiedliche Bewegungen durch die Anregung von außen erzwungen. Dies lässt ein unterschiedliches Gleitverhalten je Richtung erwarten, wodurch auch die Verschleißbilder variieren sollten.

Im Gegensatz zu den Reibverschleißprüfungen, bei welchen die Bewegungen gezielt in verschiedenen Richtungen erzwungen werden, ist dies bei der Vibrationsprüfung nicht direkt möglich. Zwar werden die Steckverbinder so auf den Shaker aufgespannt, dass die Vibrationsrichtung jeweils in der entsprechenden Achse liegt, jedoch wird hier erwartet, dass sich eine Überlagerung der Relativbewegungen der Kontaktpartner bildet und nicht unmittelbar nur eine einzelne Relativbewegung erzeugt wird.

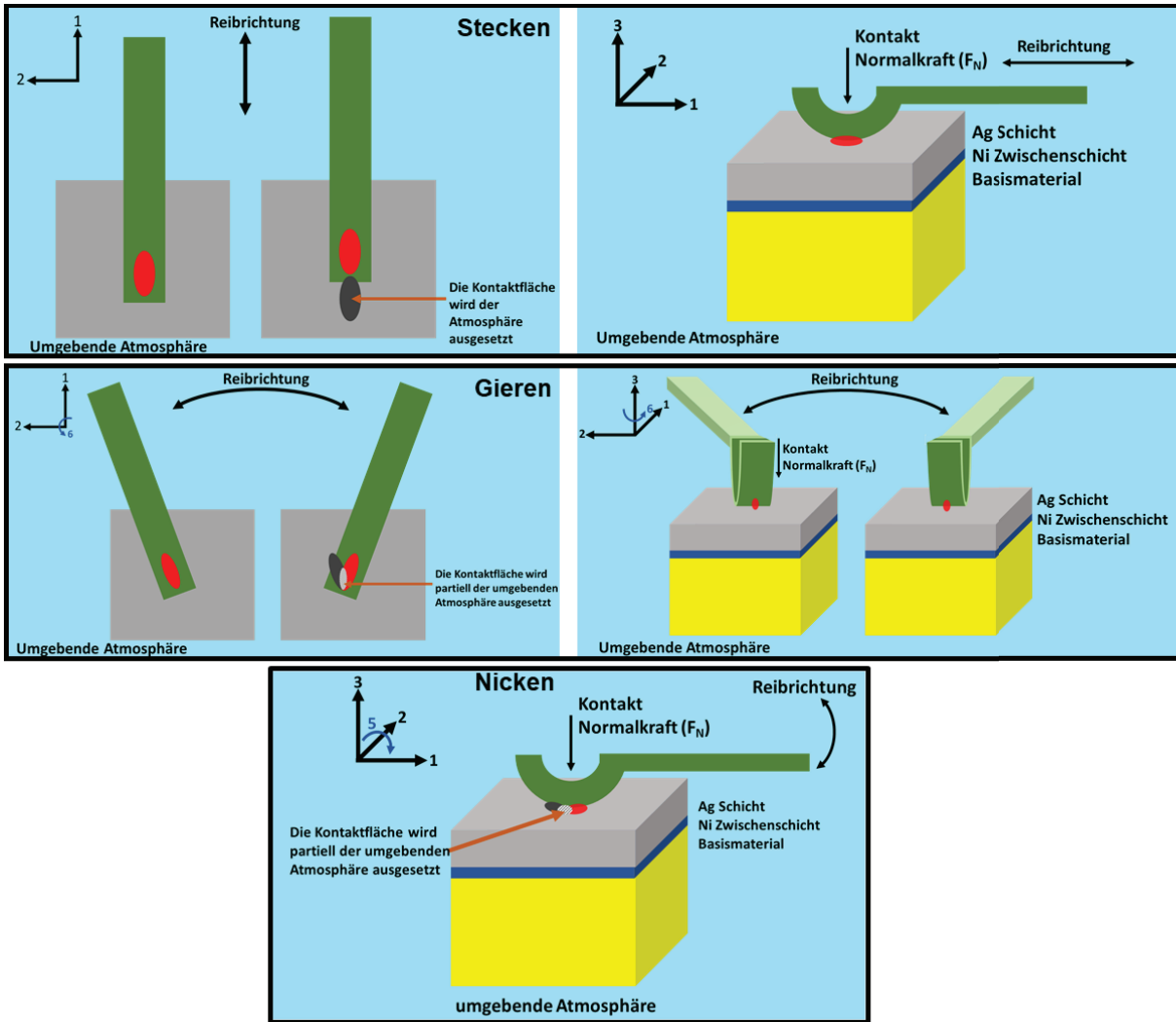


Abbildung 3.6: Darstellung der Bewegungsrichtungen der Reibverschleißprüfung

3.3.3 Lastprofile und Messparameter

Shaker-Versuche

Die Vibrationsuntersuchungen werden bei den Forschungsstellen in drei Anregungsrichtungen (X,Y und Z) mit Hilfe von elektrodynamischen Schwinganlagen (Shaker), in Anlehnung an die TLF 0214, durchgeführt. Die darauf erzeugten dynamischen Lasten können über einen geeigneten Aufbau direkt auf die Prüflinge übertragen werden. Um das Steckverbindersystem (Kontakt, Gehäuse, Leitung) in einem zeitlich überschaubaren Rahmen zum Ausfall zu führen (22 Stunden), werden beschleunigte Lebensdauertests mit Gleitsinus- und Breitbandrauschprofilen angewendet. Diese Lastprofile sollen dabei eine praxisnahe über die Lebensdauer auftretende Beanspruchung simulieren. Die Vibrationsklasse 4 aus der TLF 2014 (Tabelle 3.3), welches Belastungen von Motoranbauteilen an Verbrennungsmotoren mittels Gleitsinus- und Breitbandrauschlastprofilen nachbildet, wurde für das Forschungsvorhaben ausgewählt. Mit diesen Prüfprofilen werden die Steckverbindungen Beschleunigungen von bis zu 200 m/s² ausgesetzt, in einem Frequenzbereich von 10 – 2000 Hz. Für die spätere Vergleichbarkeit der experimentellen Ergebnisse aus den Schwingungsversuchen mit Rausch- und Gleitsinusanregung wurden vergleichbare Messbedingungen für die Vibrationsuntersuchungen definiert (Tabelle 3.4).

Tabelle 3.3: Lastprofile der Vibrationsklasse 4 (SG4) für die Vibrationsprüfung

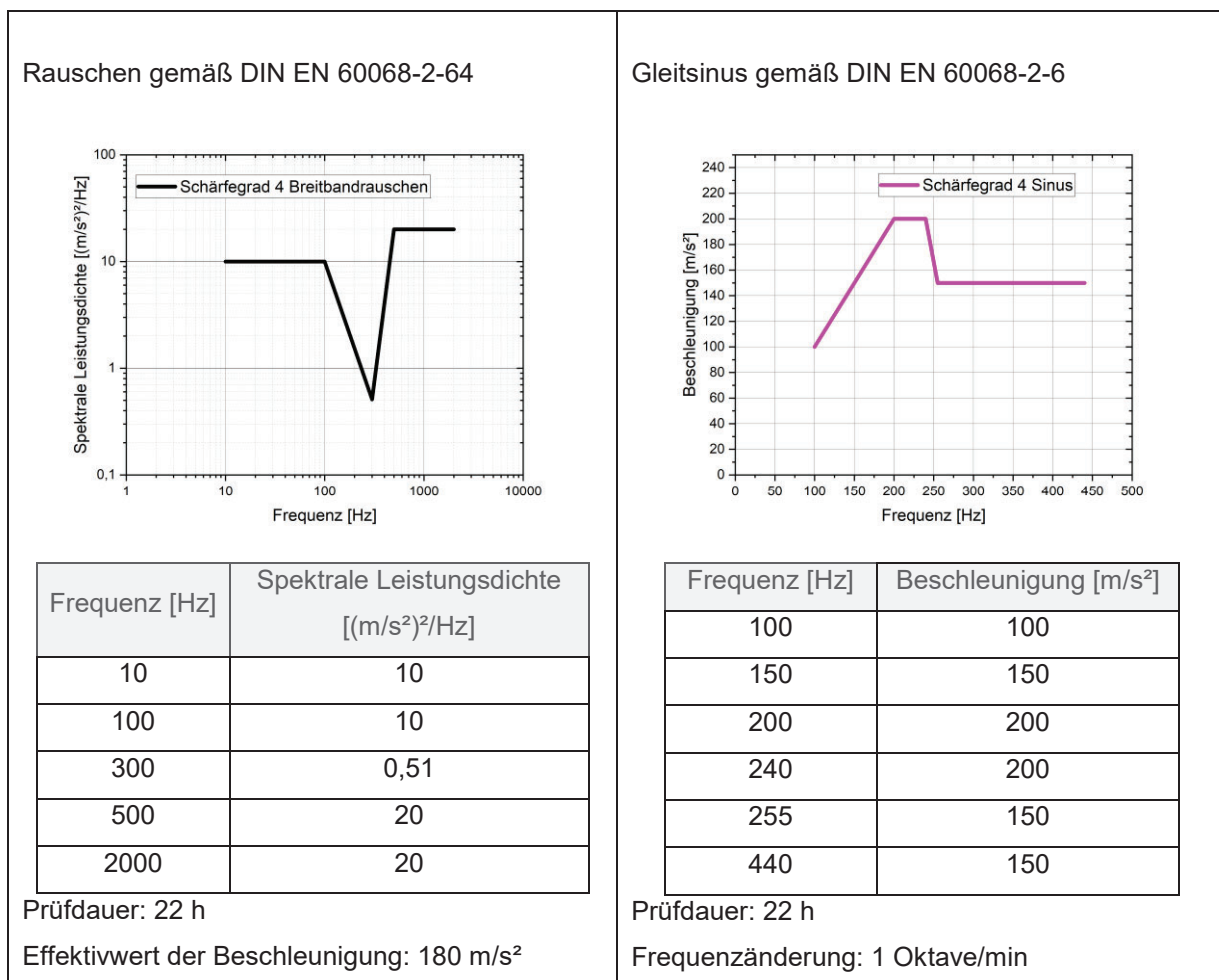


Tabelle 3.4: Messparameter der Vibrationsprüfungen

Durchgangswiderstand nach DIN EN 60512-2-1	Prüfstrom 100 mA
Messfrequenz	600 ms
Abbruchkriterium	$R \geq 300 \text{ m}\Omega$
Abstand Befestigungsoption der Leitung	100 mm
Temperatur	Raumtemperatur

Reibkorrosion/Reibverschleißprüfungen

Bei den Reibkorrosion/Reibverschleißprüfungen wird die Abriebfestigkeit sowie das Oxidationsverhalten der Oberflächenbeschichtung in Steckverbindern in Abhängigkeit einer Vorzugsrichtung untersucht. Hierzu werden spezielle Prüfstände verwendet, mit denen wesentliche Parameter wie Hub der Relativbewegung, Frequenz sowie Zyklenzahl eingestellt werden können. Im Vergleich zu den Vibrationsuntersuchen wird der Steckverbinder ohne Gehäuse geprüft. Das verwendete Lastprofil ist dabei ebenfalls an den technischen Leitfaden TLF 0214 angelehnt, wie in Tabelle 3.5 dargestellt ist. Hier wird die Prüfung mit einem Messstrom von 10 mA durchgeführt. Dabei führt der Motor einen definierten Hub aus und wiederholt diesen in einer Frequenz von 1 Hz. Die Prüfung wird dabei so lange durchgeführt, bis eine Widerstandsüberschreitung von 300 mΩ ermittelt wird oder die Testdauer von 100.000 Zyklen erreicht wird.

Tabelle 3.5: Messparameter der Reibverschleißprüfungen

Prüfstrom	10 mA
Bewegungsfrequenz	1 Hz
Messfrequenz	50 ms
Abbruchkriterium	$R \geq 300 \text{ m}\Omega$ oder Erreichen von 100.000 Zyklen
Hub (Spitze-Spitze)	Alle Prüflinge 50 µm und höher je nach Prüfling
Temperatur	Raumtemperatur

3.3.4 Reibverschleißprüfungen und Vibrationsprüfung mit Gleitsinusanregung

Versuchsaufbau und Durchführung

Zum besseren Verständnis des spezifischen Verschleißes, bezogen auf die Einbaulage, werden sowohl Reibverschleißprüfungen als auch Vibrationsprüfungen mit einer Gleitsinusanregung durchgeführt. Bei den Reibverschleißprüfungen werden, im Gegensatz zu den Schwingprüfungen, gezielt einzelne Bewegungsrichtungen in das Kontaktsystem eingebracht und können getrennt voneinander bewertet werden. Dies kann zum einen eine Vorzugsrichtung innerhalb der Verschleißdaten aus den Vibrationsprüfungen (Gleitsinus wie Rauschen) sein oder durch thermische Lasten entstehen, die aus unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Materialpaarungen resultieren. Die Vibrationsprüfungen mit Rauschanregung stellen die Gesamtheit der Vibrationsbelastungen aus allen möglichen Quellen dar. Die Prüfungen mit Rauschanregung werden im späteren Verlauf beschrieben. Die hier beschriebenen Vibrationen mit Gleitsinusanregung hingegen stellen zyklische Belastungen aus dem Inneren des Systems (z.B. des Motors) dar. Durch die Prüfung mit Gleitsinus- und Rauschanregung kann so die Wirkung beider Anregungsarten miteinander verglichen werden.

Für die Reibverschleißprüfungen werden vom Labor für Feinsystemtechnik eigens entwickelte Prüfstände verwendet, wie beispielhaft in Abbildung 3.7 dargestellt. Hierbei werden die Kontakte zwischen einem Voice-Coil Motor links und einer fixen Einspannung auf der rechten Seite befestigt. Dazu werden die Kontakte ohne Kunststoffgehäuse einzeln auf die Prüfstände eingespannt, wie in Abbildung 3.8 dargestellt ist. Die jeweilige Bewegungsform wird dabei dann durch die Richtung der Einspannung des Kontaktes in den Prüfstand vorgegeben, wodurch in diesem beispielhaften Fall eine Prüfung in Richtung 6 durchgeführt wird, welches ein Gieren der Kontaktpartner zueinander zur Folge hat. Bei den Prüfungen wird eine Seite des Kontaktsystems (Messenseite) fest eingespannt. Bei den Prüfungen in Steckrichtung werden die andere Seite des Kontaktsystems (Lamellenseite) direkt am Crimp eingespannt. Bei Erzeugung von Nick- und Gierbewegungen wird die Lamellenseite des Kontaktsystems 2 mm hinter dem Crimp an der elektrischen Zuleitung eingespannt (vgl. Abbildung 3.5). Dadurch werden Nick- und Gierbewegungen aus den Anregungsrichtungen durch die Gelenkfunktion des Leiters erzeugt.

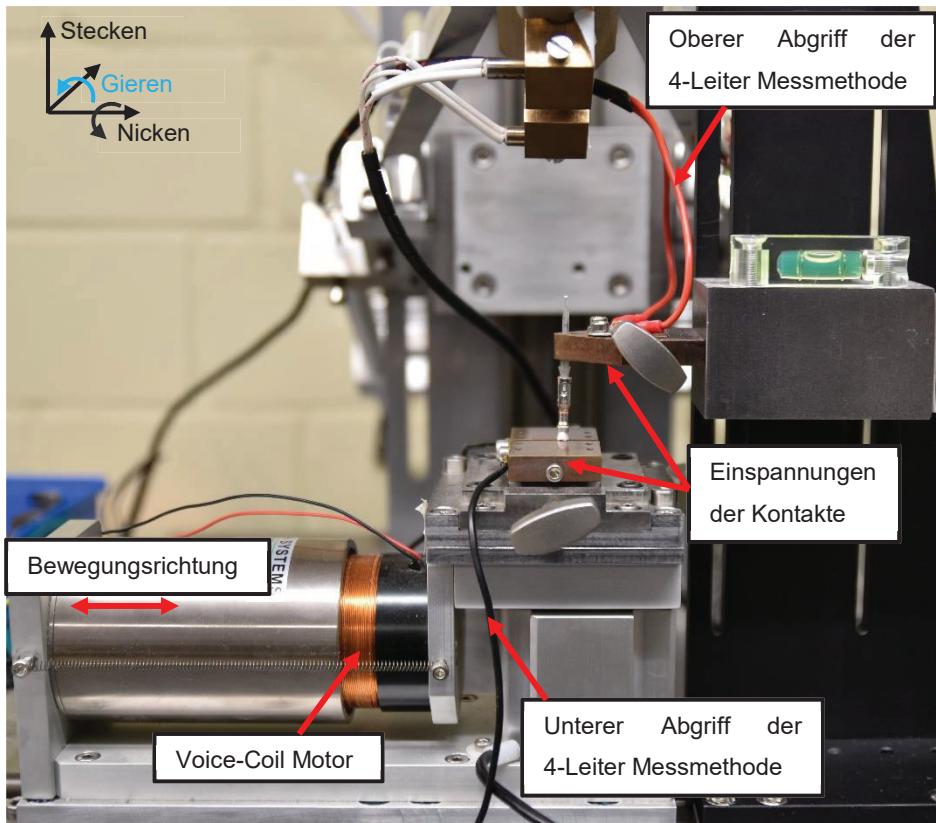


Abbildung 3.7: Darstellung des Reibverschleißprüfstandes mit eingespanntem Steckverbinder (Koordinatensystem bezogen auf den Steckverbinder)

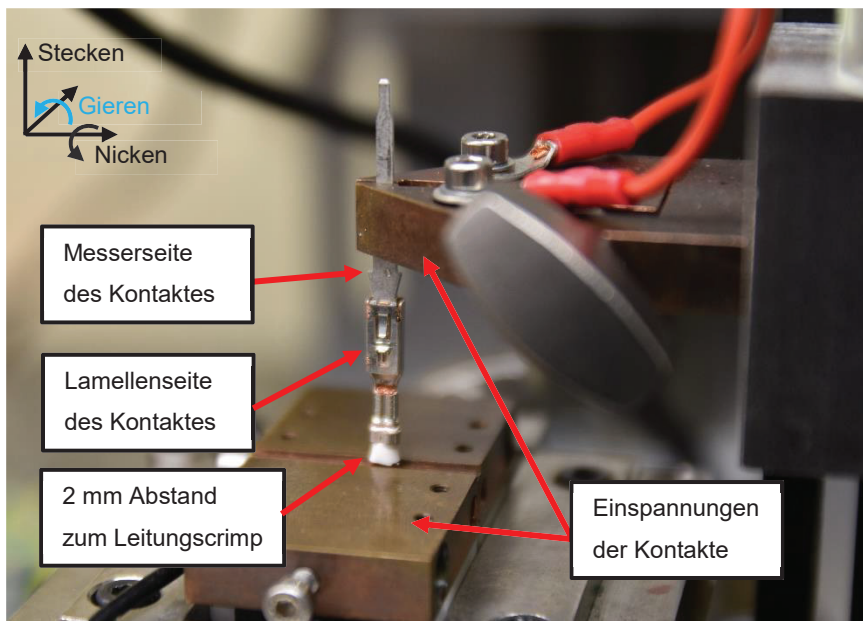
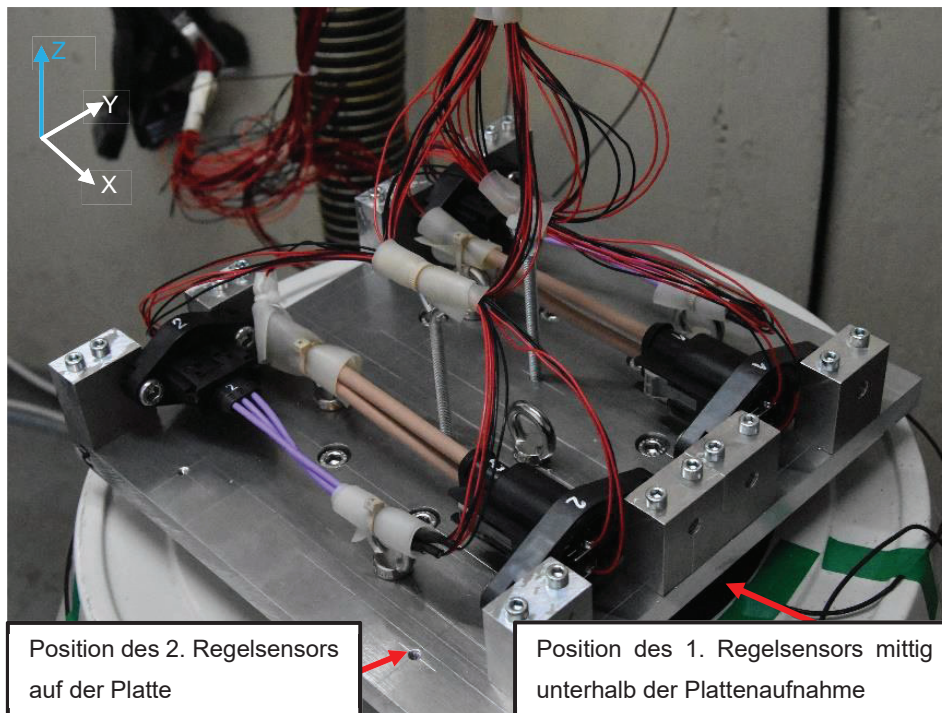


Abbildung 3.8: Zoom auf den Steckverbinder in der Einspannung aus Abbildung 3.7 (Koordinatensystem bezogen auf den Steckverbinder)

Neben den selbst entwickelten Prüfständen für die Reibverschleißprüfungen ist ebenfalls ein Schwingerreger, wie in Abbildung 3.9 dargestellt, an der Technischen Hochschule Ostwestfalen-Lippe vorhanden. Auf diesem werden dazu die Steckverbinder voll bestückt aufgespannt, sodass eine Fixierung der Steckkontakte im Inneren in einer bestimmten Lage erfolgt. Somit lassen sich die drei Anregungsachsen X, Y und Z, wie im TLF0214 beschrieben, prüfen. Hierzu werden die elektrischen Leitungen in einem Abstand von 100 mm ab

dem Ende des Gehäuses an Ringschrauben mit Kabelbindern fixiert, um die Belastung während der Vibrationsprüfungen möglichst realistisch zum realen Einbaufall in der Praxis zu halten.



**Abbildung 3.9: Fixierung der Steckverbinder in Z-Richtung auf dem Shaker (TH OWL)
(Koordinatensystem bezogen auf den Steckverbinder)**

Die mit diesen Prüfmethode untersuchten Kontaktsysteme sind in Tabelle 3.6 und Tabelle 3.7 dargestellt. Die Belastungsdauer beträgt je Prüfung 22 Stunden. So wurden an insgesamt 280 einzelnen Steckverbindern die Reibverschleißprüfungen auf den Reibverschleißprüfständen im Labor für Feinsystemtechnik durchgeführt. Bei der Vibrationsprüfung hingegen wurden insgesamt 54 vollbestückte Stecker auf den Shaker aufgespannt. Somit wurden Vibrationsprüfungen mit Gleitsinusanregung an 154 Einzelkontakten durchgeführt. Alle Prüflinge wurden im Anschluss in Hinblick auf das Schadensbild wie folgt weiterführend untersucht:

- Optische Untersuchung mittels digitalem Lichtmikroskop
- Untersuchung der Restschichtdicken mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)
- Ermittlung der detaillierten Verschleißtiefe mittels Konfokalmikroskopie
- Analyse der elementaren Zusammensetzung und Ermittlung von Oxidationsprodukten mittels Energiedispersiver Röntgenspektroskopie (REM, EDX)

Tabelle 3.6: Übersicht der geprüften Steckverbinder in den Reibverschleißprüfungen

Reibverschleiß	
Anzahl der geprüften Steckkontakte	280

Tabelle 3.7: Übersicht der geprüften Steckverbinder in den Vibrationsprüfungen mit Gleitsinusanregung

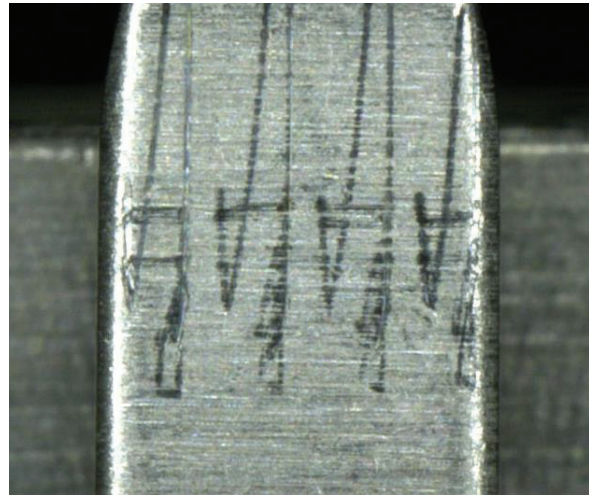
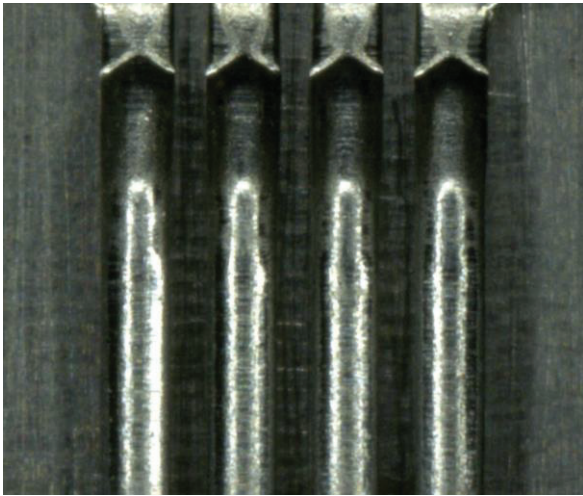
Vibration	
Anzahl der voll bestückten Steckverbinder	54
Anzahl der geprüften Steckkontakte	154

Schema für Verschleißbewertung / -kategorien

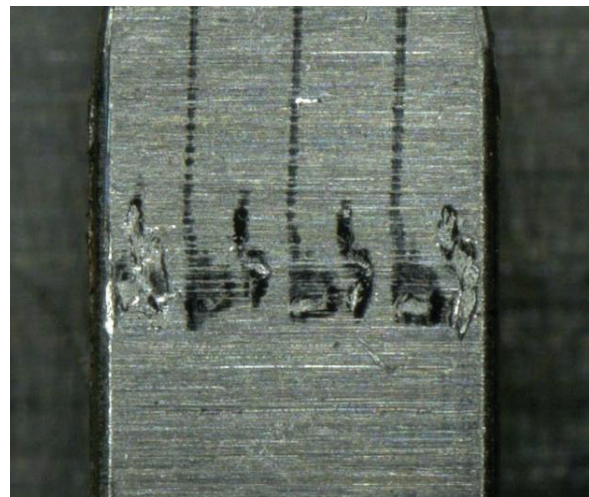
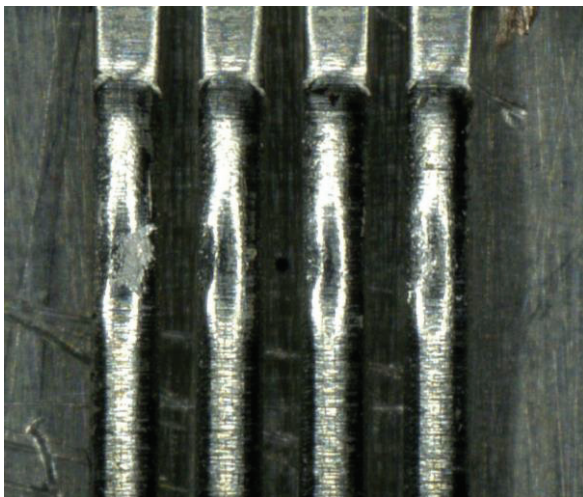
Da jedoch einige dieser Untersuchungsmethoden mit einem hohen Untersuchungs- und Zeitaufwand verbunden sind, wurden neben der optischen Untersuchung weitere Methoden nach Notwendigkeit eingesetzt, bis eine klare Aussage über den Zustand der Kontakte gewonnen werden kann.

Um ein besseres Verständnis für die abschließende Untersuchung zu gewinnen werden die Verschleißstellen dafür optisch nach Tabelle 3.8 bewertet. Hier ist zu erkennen, dass für die Kategorie 0 optisch kein sichtbarer Verschleiß zu Grunde gelegt wird. Bei Kategorie 1 wird bereits ein leichter Verschleiß mit relativ klein ausgeprägten Kontaktstellen detektiert. Die Kategorie 2 zeichnet sich durch stärkeren Verschleiß aus. Hier sind die Kontaktflächen bereits größer und weisen teilweise bereits dunkle Ablagerungen auf. Dabei ist die Kontaktfläche jedoch noch immer gut sichtbar. Dies ist anders bei Kategorie 3 bei der eine starke Oxidation durch dunkle Ablagerungen sichtbar ist. Dies ist vor allem für Sn-Beschichtungen ein Hinweis auf eine mögliche Reibkorrosion. Die Kategorie 4 zeichnet sich durch sichtbaren kupferfarbenen Durchrieb der Funktionsschicht aus. Die Kategorien 3 und 4 wirken sich auf die elektrische Stabilität des jeweiligen Kontaktsystems aus und sind als kritisch zu bewerten.

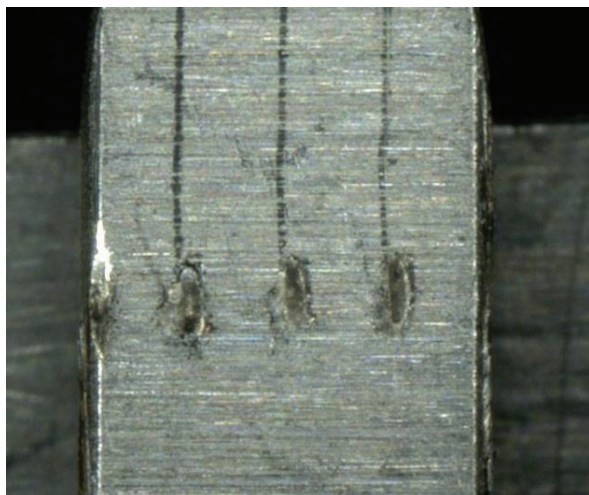
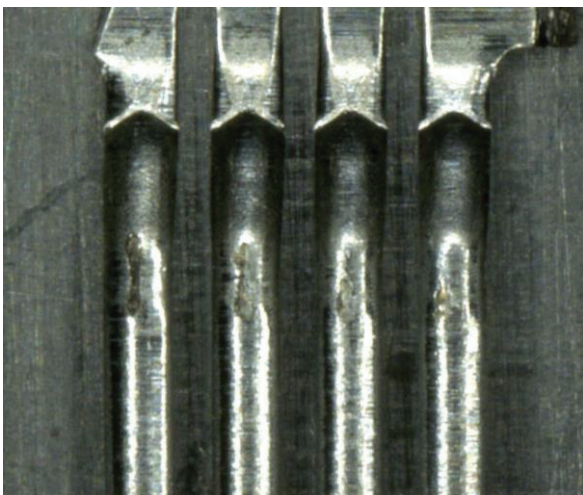
Tabelle 3.8: Beispiele (K1, K2) für die Bewertungskriterien der optischen Untersuchung

Kategorie 0

Merkmale: Optisch kein Verschleiß sichtbar: z.B. auch keine Unterscheidung zwischen Steckspur und Kontaktstelle

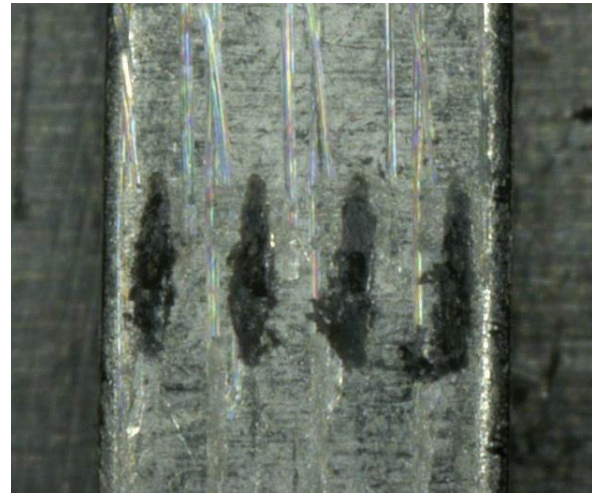
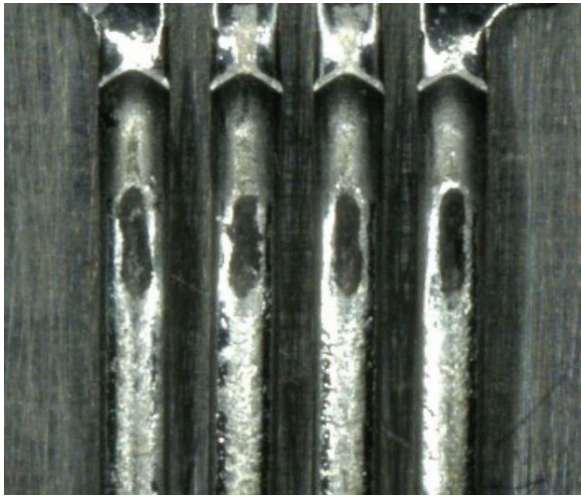
Kategorie 1

Merkmale: Optisch leichter Verschleiß: kleinere Kontaktfläche

Kategorie 2

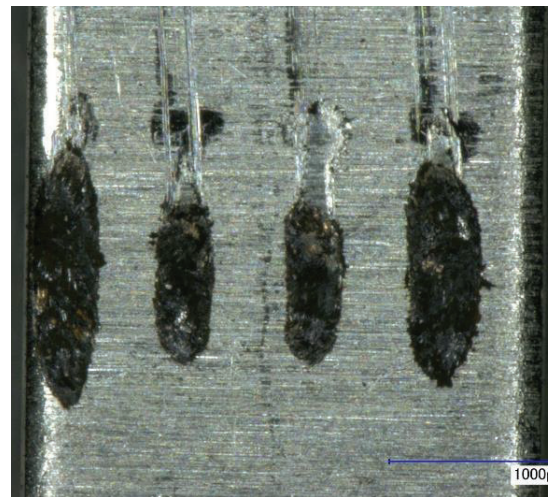
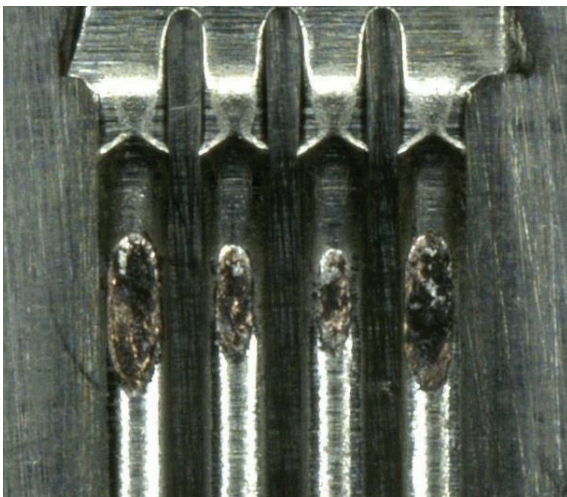
Merkmale: Optisch starker Verschleiß: größere Kontaktfläche; teilweise mit dunklen Ablagerungen (Oxid), Kontaktfläche aber noch sichtbar

Kategorie 3



Merkmale: Starke Oxidation durch dunkle Ablagerungen sichtbar (bei Sn-Beschichtung ein Hinweis auf mögliche Reibkorrosion)

Kategorie 4



Merkmale: Durchrieb der Funktionsschicht: Kupferfarbener Durchrieb

Mit diesen Kriterien ist es somit möglich, einen generellen Überblick zum Verschleißzustand der untersuchten Steckverbinder zu geben.

Hauptergebnisse

Vibrationsbelastung (Gleitsinusanregung)

In Abbildung 3.10 ist die Verteilung der Steckverbinder der Vibrationsprüfung mit Gleitsinusanregung von 100...440Hz laut Tabelle 3.3 nach der Prüfrichtung und der entsprechenden Kategorie dargestellt. Hier zeigt sich, dass für die Vibrationsprüfungen mit Gleitsinusanregung die Steckverbinder der X-Richtung generell keinen bzw. nur leichten Verschleiß aufweisen. Anders ist dies bei der Anregung in Y- und Z-Richtung. Hier sind für alle Verschleißkategorien Schadensbilder vorhanden, jedoch fällt auf, dass vor allem in der Y-Richtung die Kategorien 2 und 3 vermehrt auftreten. Somit kann hier abgeleitet werden, dass eine Richtungsabhängigkeit vor allem in der Y-Richtung, aber auch in der Z-Richtung vorliegt, wohingegen die Anregung in X-Richtung als eher unkritisch zu bewerten ist.

Ebenfalls kann in Abbildung 3.11 der Einfluss der Einzelleiterdichtungen (ELD) auf das Verschleißverhalten der Vibrationsprüfungen mit Gleitsinusanregung untersucht werden. Hier zeigt sich, dass die Mehrzahl der gedichteten sowie der ungedichteten Kontakte ein Verschleißbild der Kategorien 0 und 1 aufweisen. Auffällig ist jedoch, dass vor allem die ungedichteten Kontakte häufiger auch in Kategorie 3 eingeteilt werden. Die gedichteten Kontakte sind in dieser Hinsicht mit einem geringeren prozentualen Anteil vorhanden. Hinzu kommt, dass in der Kategorie 4 ausschließlich ungedichtete Kontakte vorhanden sind. Somit kann die Einzelleiterdichtung als positiver Faktor angesehen werden, um den Verschleiß bei den Vibrationsprüfungen zu reduzieren. Dies wird vor allem auf die dämpfende Eigenschaft hinsichtlich Vibrationen des angeschlossenen Leiters zurückgeführt.

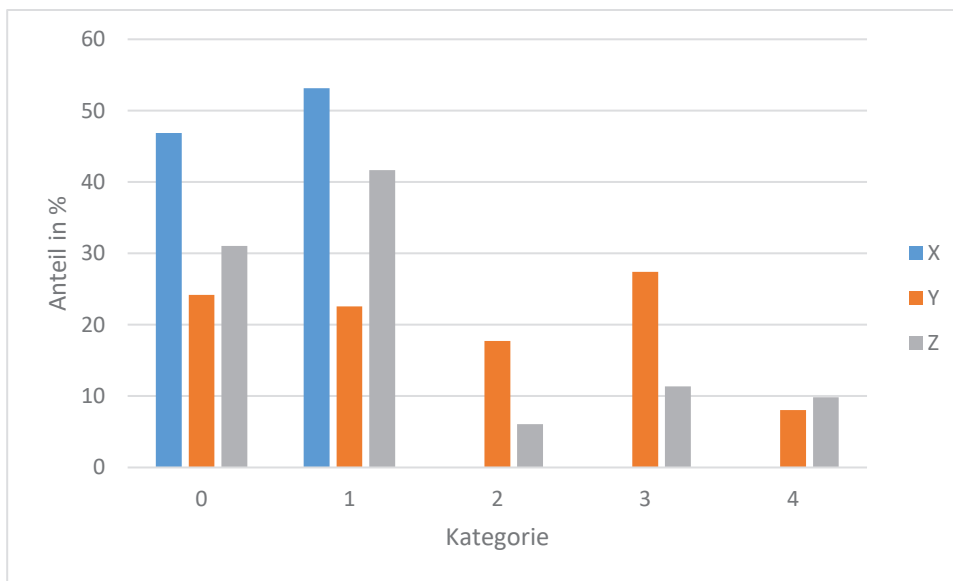


Abbildung 3.10: Prozentualer Anteil der Kontakte mit einem bestimmten Verschleißgrad (Kategorie 0-4) nach Vibrationserprobung mit Gleitsinusanregung, 22h Dauer, abhängig von der Schwingrichtung (alle Kontaktarten mit allen zugehörigen Gehäusetypen, vollbestückt)

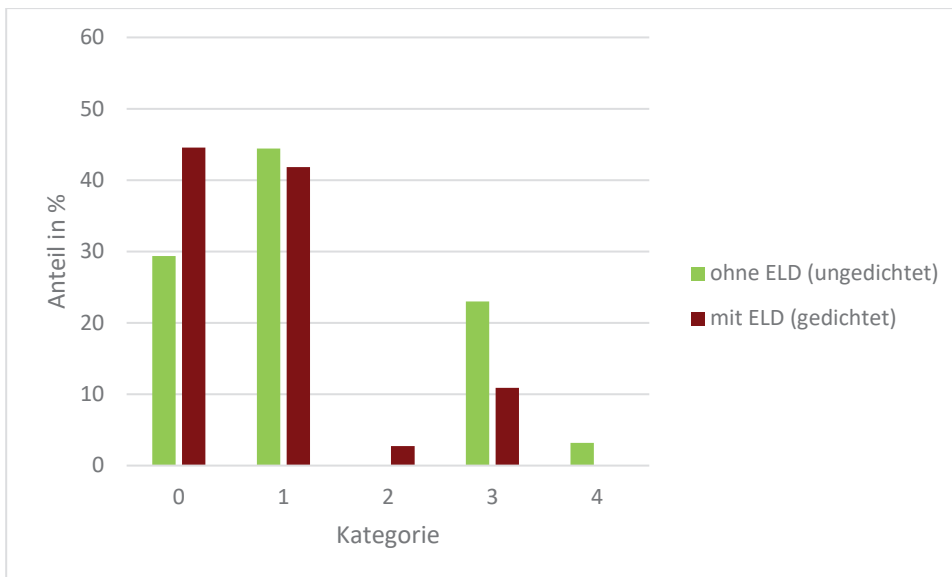


Abbildung 3.11: Prozentualer Anteil der Kontakte mit einem bestimmten Verschleißgrad (Kategorie 0-4) nach Vibrationserprobung mit Gleitsinusanregung, 22h Dauer, mit ELD (gedichtet) und ohne ELD (ungedichtet) (alle Kontaktarten mit allen zugehörigen Gehäusetypen, vollbestückt)

Reibverschleißprüfungen

Für die Reibverschleißprüfungen sind dazu ebenfalls die Kontakte bewertet worden und in Abbildung 3.12 bis Abbildung 3.14 nach der jeweiligen Beschichtung differenziert. Die Prüfung erfolgt ohne Gehäuse. Die Abbruchbedingungen dieser Prüfungen sind entweder ein Überschreiten des elektrischen Widerstands von 300 mΩ oder das Erreichen von 100.000 Bewegungszyklen. Hier zeigt sich für die mit Zinn beschichteten Kontakte, dass die Prüflinge welche in Steckrichtung bewegt wurden einen höheren Anteil an oxidierten Oberflächen aufzeigen als bei einer Gier- oder Nickbewegung.

Bei den Steckverbindern mit Silberbeschichtung hingegen ist vor allem in der Steckrichtung starker Verschleiß bis Durchrieb zu erkennen. Trotz alledem haben diese Steckverbinder nur selten den Widerstandsgrenzwert von 300 mΩ erreicht. Bei der Nickbewegung hingegen stellt sich keine Kategorie als dominant heraus und die Kontakte sind gegen diese Bewegung gut abgesichert.

Die Steckverbinder mit Goldbeschichtung hingegen weisen in der Steckrichtung auffällig hohem Verschleiß und starkem Durchrieb auf. Dabei ist die aufgetragene Goldschicht jedoch auch wesentlich geringer als die verwendeten Zinn- oder Silberschichten. Das Nicken und Gieren ist im Vergleich zum Stecken für die Steckverbinder mit Goldbeschichtung eher unauffällig mit keinem oder wenig Verschleiß.

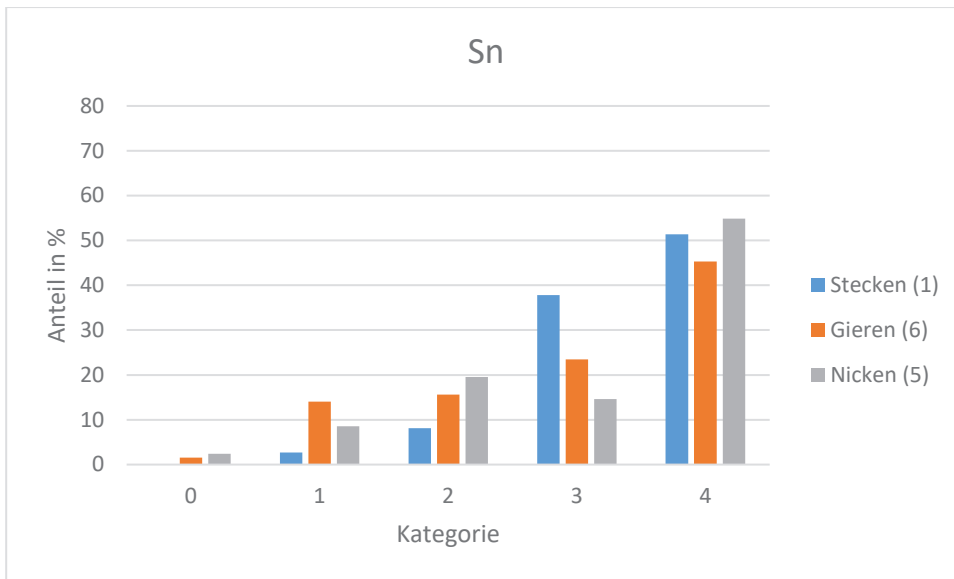


Abbildung 3.12: Prozentualer Anteil der Zinnkontakte mit einem bestimmten Verschleißgrad (Kategorie 0-4) nach Vibrationserprobung mit Gleitsinusanregung, 22h Dauer, abhängig von der Schwingrichtung (alle Sn Kontaktarten K1, K4, K6, K8, K10)

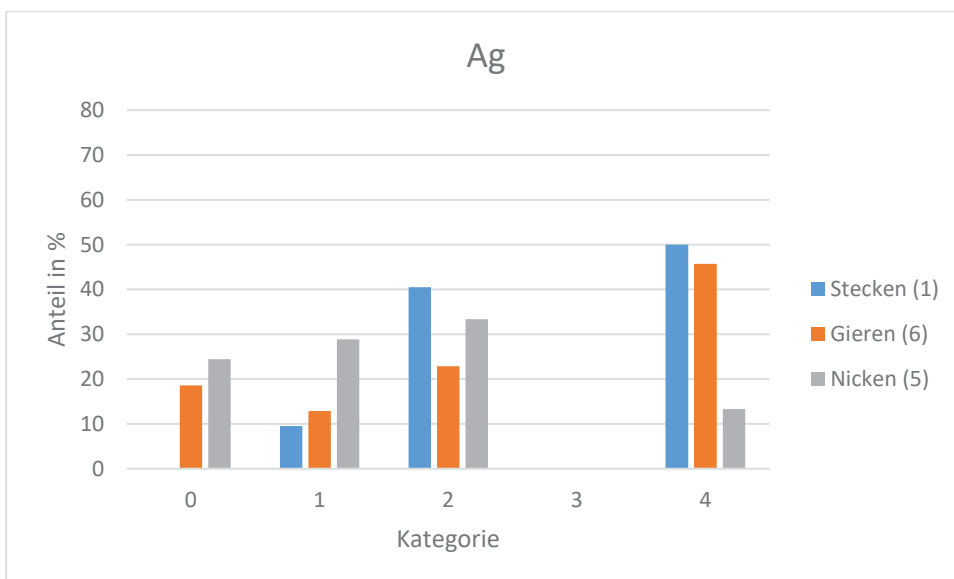


Abbildung 3.13: Prozentualer Anteil der Silberkontakte mit einem bestimmten Verschleißgrad (Kategorie 0-4) nach Vibrationserprobung mit Gleitsinusanregung, 22h Dauer, abhängig von der Schwingrichtung (alle Ag Kontaktarten K2, K3, K5, K9, K12)

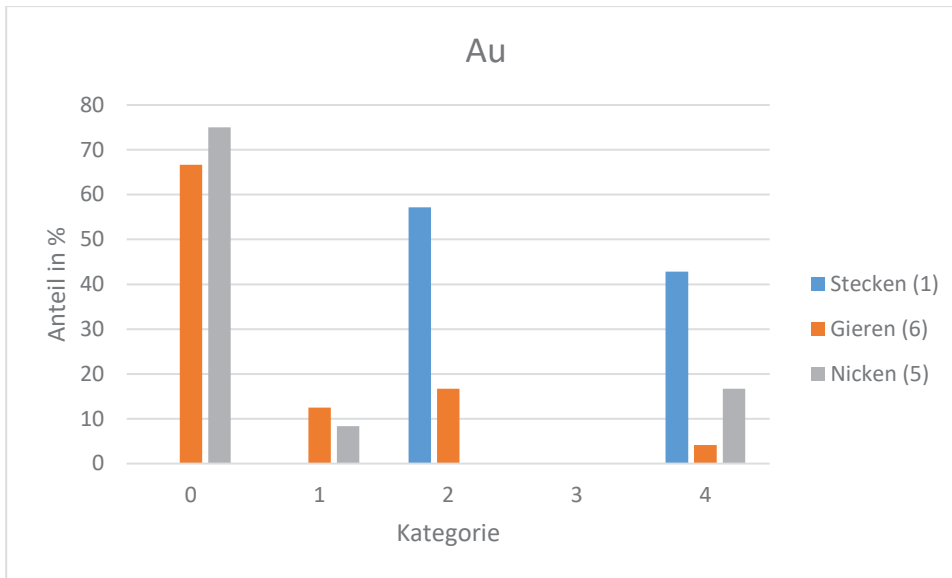


Abbildung 3.14: Prozentualer Anteil der Goldkontakte mit einem bestimmten Verschleißgrad (Kategorie 0-4) nach Vibrationserprobung mit Gleitsinusanregung, 22h Dauer, abhängig von der Schwingrichtung (alle Au Kontaktarten K7, K11)

Weitergehende Untersuchungen

Um diese Effekte weiterführend zu untersuchen, werden im Folgenden die Ergebnisse einiger wissenschaftlichen Studien dargestellt. Diese Untersuchungen wurden exemplarisch am Kontaktsystem K2 durchgeführt. Die Erkenntnisse aus den untersuchten Effekten sind prinzipiell auf andere Kontaktsysteme übertragbar. Konstruktionsbedingte quantitative Abweichungen sind jedoch zu erwarten.

A. Untersuchung der Korrelation zwischen Verschleißenergie und Verschleißvolumen

Durch die Ermittlung der Korrelation zwischen Verschleißenergie und Verschleißvolumen soll eine Abschätzung der Verschleißtiefe über die Verschleißenergie und Geometrie der Kontaktfläche betrachtet werden. Dazu wird in der ersten Untersuchung erwartet, dass aufgrund der unterschiedlichen Bewegungsrichtungen unterschiedliche Formen der Reibung auftreten [27]. So wird in der Steckrichtung hauptsächlich Gleitreibung erwartet, während beim Nicken hauptsächlich Rollreibung angenommen wird. Beim Gieren wird hier eine Mischform aus Gleit- und Rollreibung erwartet aufgrund der Querbewegung zur Steckrichtung. Um dies näher zu untersuchen und um die Verschleißenergien konkret zu ermitteln, werden Kraft-Weg-Messungen in den drei Richtungen (Stecken, Gieren, Nicken) durchgeführt. Diese Messungen werden an Kontakten mit einer Silberbeschichtung innerhalb der ersten Bewegungszyklen ermittelt und sind in Abbildung 3.15 dargestellt. Hier zeigt sich bereits, dass die Reibenergie, welche über die Fläche unter der Kurve dargestellt wird, in Steckrichtung am größten ist und auch die Kraft welche zur Auslenkung benötigt wird am größten ist. Im Gegensatz hierzu wird beim Nicken die geringste Energie bzw. die geringste Kraft benötigt. Die somit aus Abbildung 3.16 ermittelten Daten für die Reibenergie eines Halbzyklus sind in Tabelle 3.9 zusammengefasst. Hier wird ebenfalls deutlich, dass zwischen der Bewegung in Steckrichtung und dem Gieren bzw. Nicken ein Größenordnungsunterschied der Energien vorliegt.

Hierbei ist zu beachten, dass es sich bei der Reibenergie sich um die dissipierte Energie handelt, welche durch die eingeschlossene Fläche der Kurve abgebildet wird. Während der Prüfungen orthogonal zur Steckrichtung treten Deformationen der Leitung auf. Dies sind jedoch elastische Verformungen. Der Verlust ist nur durch den geringen Teil der Leitungsisolation begründet und stellt im Vergleich zur Gesamtenergie nur einen sehr geringen Anteil dar. Dieses sind in diesem Sinne keine Energieverluste und können daher vernachlässigt werden. Dies bestätigt sich zudem dadurch, dass der Verlust durch die Leitung beim Gieren und Nicken am größten sein müsste. Diese Bewegungen zeigen hier aber die geringsten Verlustenergien.

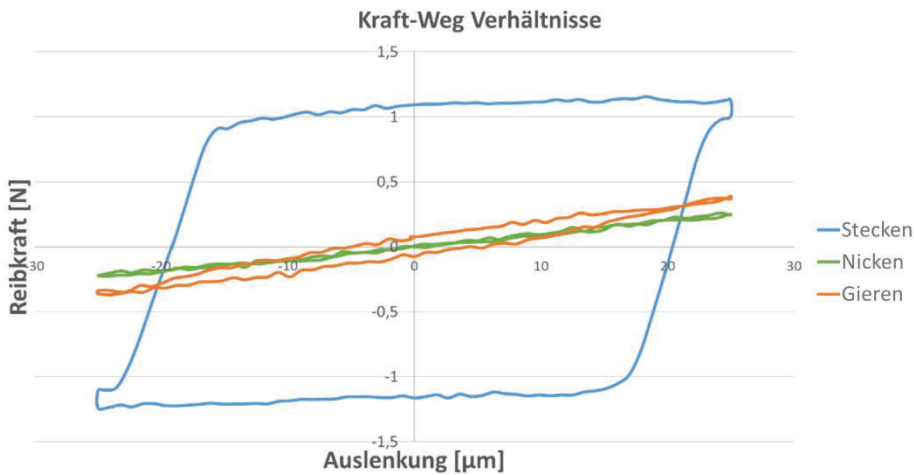


Abbildung 3.15: Kraft-Weg Verläufe für eine Auslenkung von 50 µm in den Reibrichtungen bei Kontaktsystem K2

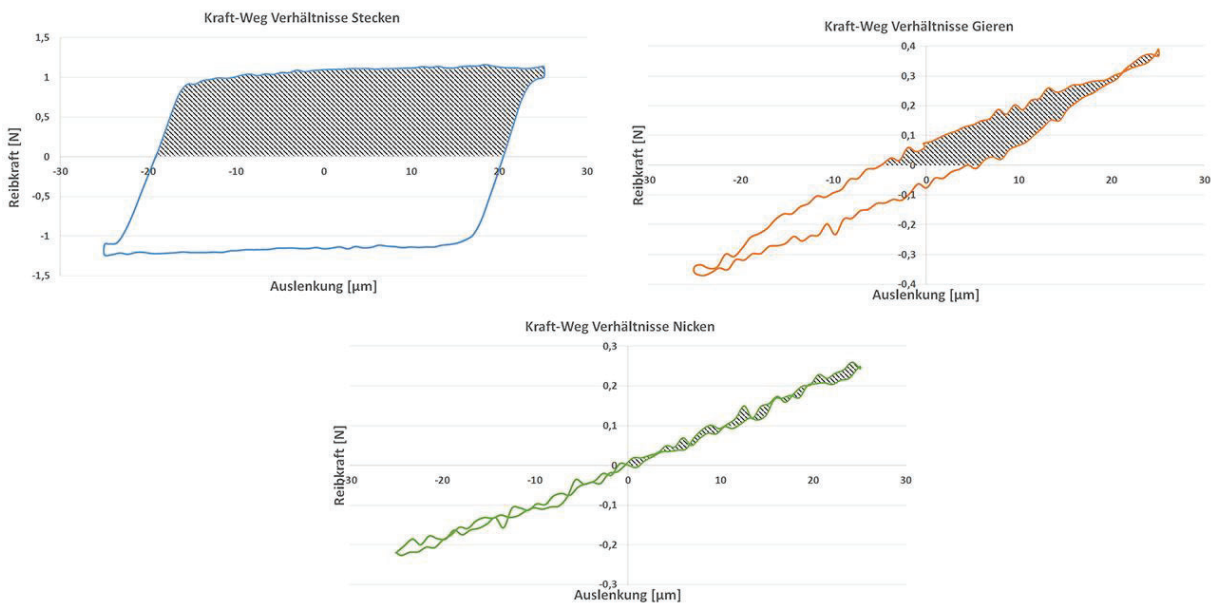


Abbildung 3.16: Schraffierte Darstellung der Reibenergien in Steckerichtung (blau), beim Gieren (orange) und Nicken (grün) aus Abbildung 3.15 bei Kontaktsystem K2

Tabelle 3.9: Ermittelte Reibenergien und Tangentialkräfte von Kontaktsystem K2

	Stecken	Gieren	Nicken
Reibenergie eines Halbzyklus E_f [J]	5,02E-05	8,21E-06	3,44E-06
Max. Tangentialkraft $F_{f\ max}$ [N]	1,01	0,5	0,26

Mittels eines vereinfachten Ansatzes für das Verschleißvolumen aus Gleichung (1) kann über die Archardgleichung und dem Verschleißmodell aus der Fleischer Gleichung eine Beziehung zwischen Reibenergie und Verschleißtiefe (2) hergeleitet werden. Zwar passt das Modell für das Verschleißvolumen in dieser Untersuchung nicht vollständig zu den tatsächlichen Gegebenheiten, jedoch kann es für eine überschlägige Berechnung verwendet werden.

$$V_w = h \cdot l \cdot w \quad (1)$$

$$h \propto \frac{E_f}{F_f \cdot l \cdot w} \quad (2)$$

Mit den Gleichungen (1) und (2) lassen sich somit die Verhältnisfunktionen (3) und (4) aufstellen. Hierbei wird zunächst der Vergleich der Verschleißhöhen in Steckrichtung und beim Gieren bzw. Steckrichtung und beim Nicken angestrebt.

$$\frac{h_S}{h_G} = \frac{\frac{E_{f,S}}{E_{f,G}}}{\frac{F_{f,S}}{F_{f,G}} \cdot \frac{l_S}{l_G} \cdot \frac{w_S}{w_G}} \quad (3)$$

$$\frac{h_S}{h_N} = \frac{\frac{E_{f,S}}{E_{f,N}}}{\frac{F_{f,S}}{F_{f,N}} \cdot \frac{l_S}{l_N} \cdot \frac{w_S}{w_N}} \quad (4)$$

Mit:

- V_w Verschleißvolumen
- E_f Reibenergie eines Halbzyklus'
- $h_{S,G,N}$ Verschleißstellentiefe
- $l_{S,G,N}$ Verschleißstellenlänge
- $w_{S,G,N}$ Verschleißstellenbreite

Zur letztendlichen Berechnung der Tiefenverhältnisse werden die benötigten Daten für die Länge, Breite, aber auch die Tiefe der realen Kontaktflächen mittels Konfokalmikroskop vermessen, wie in Abbildung 3.17 exemplarisch dargestellt ist. Hierzu haben die Prüflinge eine Prüfungsdauer von 100.000 Zyklen absolviert und haben den Widerstandsgrenzwert von 300 mΩ nicht überschritten.

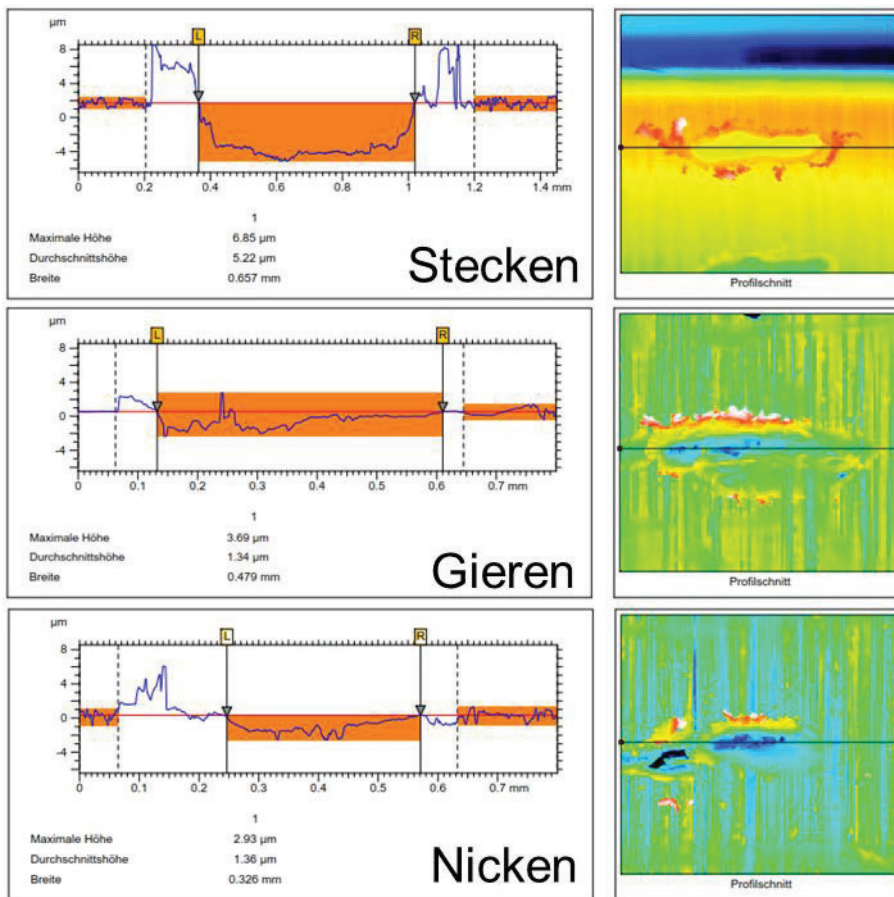


Abbildung 3.17: Darstellung von gemessenen Verschleißbildern aus den Reibverschleißprüfungen (Kontaktsystem K2) nach 100.000 Zyklen

Die somit ermittelten Daten sind in Tabelle 3.10 aufgeführt. So zeigt sich hier, dass die Verschleißtiefe in der Steckrichtung am größten ist und beim Nicken am geringsten. Das Gieren liegt dabei dazwischen, orientiert sich jedoch am Nicken, was bereits durch die Kraft-Weg-Messungen aufgefallen ist.

Tabelle 3.10: Mittelwerte der gemessenen Verschleißwerte aus den Reibverschleißprüfungen (Kontaktsystem K2) nach 100.000 Zyklen

	Mittelwert Stecken	Mittelwert Gieren	Mittelwert Nicken
Länge l [mm]	0,52	0,35	0,36
Breite w [mm]	0,22	0,16	0,16
Tiefe h [µm]	7,29	2,79	2,68

Mit den bestimmten Daten und den ermittelten Gleichungen lassen sich somit die Verhältnisse in Tabelle 3.11 berechnen. Hierbei wird zunächst der gemessene Tiefenwert in Steckrichtung jeweils mit den gemessenen Werten beim Gieren und Nicken verglichen. Im Vergleich zu den berechneten Daten zeigt sich hier jedoch eine Abweichung der Verschleißtiefenverhältnisse, welche unter anderem aus der Annahme des Verschleißvolumens als Quader (vgl. GL1) resultiert. Dennoch zeigen die Verhältnisse bereits qualitativ die richtige Tendenz, jedoch weichen sie quantitativ noch deutlich von den gemessenen Tiefenwerten ab. Diese Vorhersage sollte daher in zukünftigen Untersuchungen weiter untersucht und optimiert werden.

Tabelle 3.11: Gegenüberstellung der Verhältnisse der gemessenen Verschleißtiefe zu den berechneten Verhältnissen für Kontaktsystem K2 nach 100.000 Zyklen

	Verschleißtiefe h_S / Verschleißtiefe h_G	Verschleißtiefe h_S / Verschleißtiefe h_N
Gemessene Verhältnisse (tatsächliche Höhenwerte aus Abbildung 3.17)	2,6	2,7
Berechnete Verhältnisse (GL 3 und GL 4)	1,5	1,9

Mit den gemessenen Daten aus Tabelle 3.8 und Tabelle 3.9 kann mit der Verschleißenergie und dem Volumenmodell, wie in Abbildung 3.18 dargestellt, ein Modell für die Verschleißtiefe aufgestellt werden. Als Ausblick soll dieses dann weiterführend mit einem Modell für die Abschätzung der Restlebensdauer von Steckverbindern genutzt werden, welches in einem Promotionsverfahren bereits aufgestellt wurde [30]. Hierzu muss jedoch das Modell noch weiter präzisiert werden, da noch Abweichungen der gemessenen Verhältnisse zu den berechneten Verhältnissen bestehen.

Eine mögliche Ursache der Abweichung ist hier einerseits die Verwendung der maximalen Reibkräfte, wodurch die Gleichungen eine Ungenauigkeit erhalten können. Zum anderen wird ebenfalls klar, dass ein präziseres Modell der Verschleißstellengeometrie benötigt wird und es somit auch zu Ungenauigkeiten im berechneten Volumen kommt. Des Weiteren müssen auch die Reibkoeffizienten in den jeweiligen Richtungen genauer analysiert werden, da es zwischen Roll- und Gleitreibung deutliche Unterschiede gibt. Außerdem verhält sich der Silberabrieb sehr adhäsiv und bleibt in den Kontaktstellen anhaften. Die Menge variiert hier jedoch auch sehr stark, da die Auswurfmechanismen abhängig von den Bewegungsrichtungen sind.

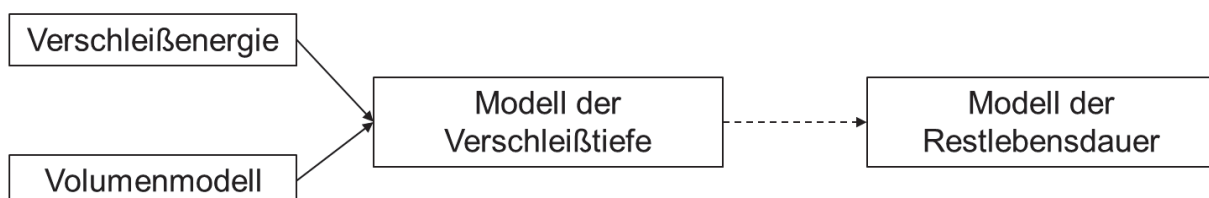


Abbildung 3.18: Systematische Darstellung der Vorgehensweise zur Modellbestimmung

B. Vergleichende Untersuchung der Verschleißbilder von Steckverbindern aus Reibverschleiß- und Vibrationsprüfungen mit unterschiedlichen Prüfrichtungen

Mit den Richtungen aus Abbildung 3.6 werden weiterführend Reibverschleiß und Vibrationsprüfungen durchgeführt [28]. Hierzu werden die Steckverbinder mit 50 μm Hub bei der Reibverschleißprüfung angeregt und als Ausfallkriterium der Prüfung ist das Überschreiten von 300 $\text{m}\Omega$ festgelegt. Dieses sowie das Erreichen von 100.000 Zyklen wird als Abbruchkriterium definiert. Für die Vibrationsprüfungen werden die Prüfungsbedingungen für die Vibrationsklasse 4 des TLF 0214 angewendet und ein Gleitsinusprofil zwischen 100 und 440 Hz abgefahren. Als Ausfallkriterium ist ebenfalls das Überschreiten von 300 $\text{m}\Omega$ festgelegt und als Abbruchkriterium dient das Erreichen von 22 h Prüfdauer. Die für diese Untersuchung genutzten

Steckverbinder mit Silberbeschichtung haben dabei jeweils das Abbruchkriterium der 100.000 Zyklen erreicht, ohne 300 mΩ zu erreichen. Sie sind somit nicht ausgefallen und werden folgend weiter untersucht.

Die Verschleißbilder der Reibverschleißprüfungen sind in Abbildung 3.19 dargestellt. Hier zeigt sich in der Steckrichtung das stärkste Verschleißbild. So sind die Kontaktflächen hier sowohl in Länge als auch Breite am stärksten ausgeprägt im Vergleich zu Gieren und Nicken. Auch ist ein leichter Durchrieb bereits an einigen Stellen zu erkennen. Das Nicken und Gieren der Kontakte hingegen zeigt ebenfalls deutlich eingrenzbare Verschleißspuren, jedoch sind diese nicht so stark ausgeprägt wie in der Steckrichtung. Somit kann rein optisch die Steckrichtung als kritische Richtung für die Reibverschleißprüfungen erfasst werden.

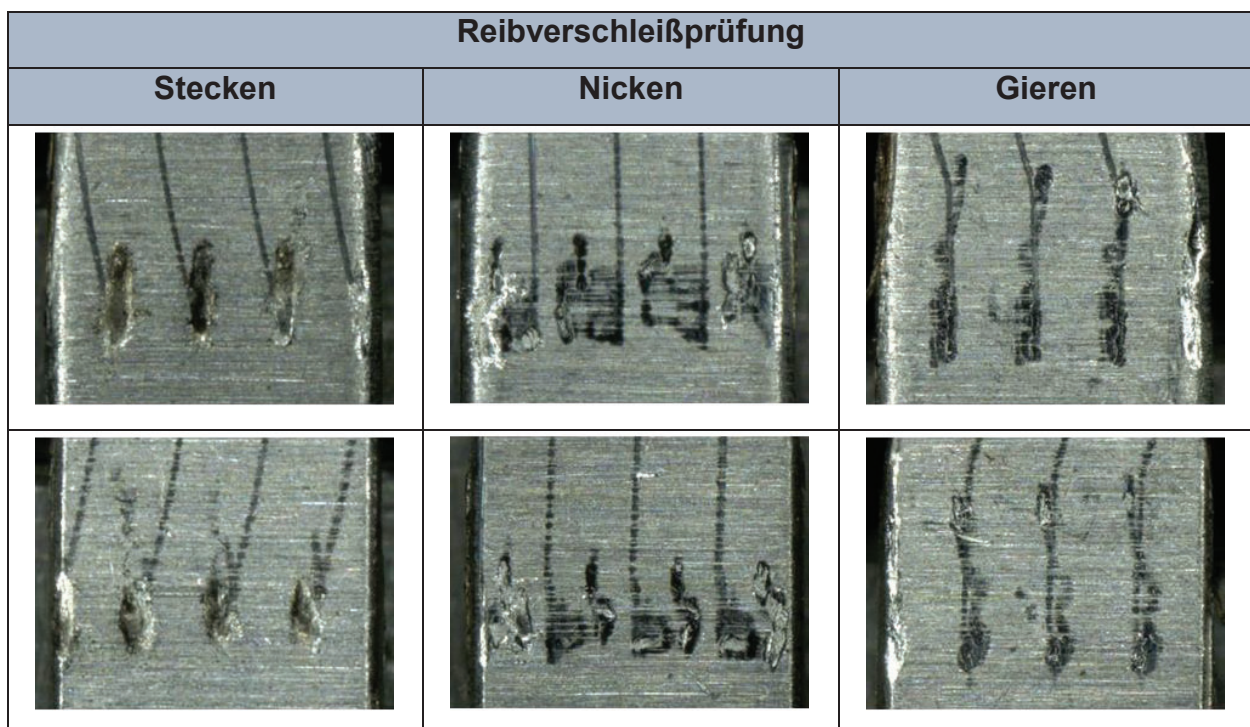


Abbildung 3.19: Exemplarische Kontaktflächen der Messer des Kontaktsystems K2 aus den Reibverschleißprüfungen nach 100.000 Zyklen

Die Verschleißbilder der Prüflinge aus der Vibrationsprüfung sind in Abbildung 3.20 dargestellt. Hier zeigt sich generell ein anderes Verschleißbild. So sind die Verschleißspuren hier generell geringer ausgeprägt. Beim Vergleich der unterschiedlichen Anregungsrichtungen fällt jedoch auch auf, dass in der Z-Richtung die stärksten Verschleißspuren vorliegen, während in der X-Richtung die geringsten Verschleißspuren zu erkennen sind. Die Y-Richtung zeigt dabei wie die Z-Richtung einen stärkeren Verschleiß als die X-Richtung. Somit können für die Vibrationsprüfungen die orthogonalen Anregungsrichtungen Y und Z als kritischere Richtungen herausgestellt werden.

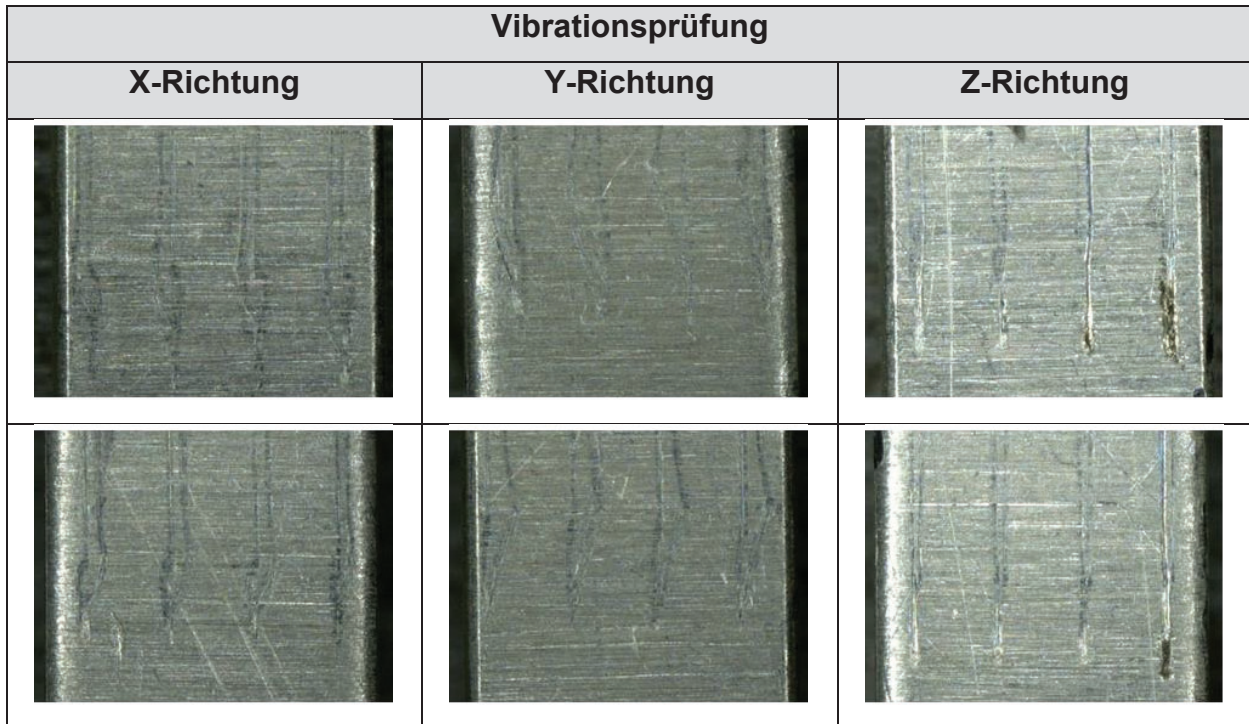


Abbildung 3.20: Exemplarische Kontaktflächen der Messer des Kontaktsystems K2 mit vollbestücktem Gehäuse G1 aus Vibrationsprüfungen nach 22h Prüfdauer

Diese Ergebnisse werden anschließend über die Messung der Restschichtdicken mittels Röntgenfluoreszenzanalyse weiter überprüft. Hierzu sind in Tabelle 3.12 die Schichtdicken der Prüflinge der Reibverschleißprüfung dargestellt. Auffällig ist dabei, dass die Schichtdicke in Steckrichtung am stärksten reduziert ist. Das Gieren und Nicken zeigt ebenfalls reduzierte Restschichtdicken auf, jedoch ist hier die Abnahme nicht so groß wie in der Steckrichtung. Somit wird die optische Analyse bestätigt und die Steckrichtung gilt weiterhin als kritische Richtung.

Tabelle 3.12: Schichtdickenwerte der Messer des Kontaktsystems K2 der Reibverschleißprüfungen aus Abbildung 3.19 nach 100.000 Zyklen

	Schichtdickenmessung Reibverschleißprüfung			
	Stecken	Nicken	Gieren	Neuteil
	Ag [μm]			
Mittelwert	1,49	5,11	4,21	5,53
Standardabweichung	0,44	0,55	1,54	0,16
Minimalwert	1,07	3,91	1,99	5,30

In Tabelle 3.13 sind die Restschichtdicken der Prüflinge aus der Vibrationsprüfung dargestellt. In dieser Teiluntersuchung zeigt sich, dass in der X- und Y-Richtung die geringsten Abnahmen auftreten, während in der Z-Richtung eine deutliche Reduktion der Schichtdicke auftritt. Dadurch lässt sich für die Vibrationsprüfungen die Z-Richtung als kritische Richtung bestätigen.

Tabelle 3.13: Schichtdickenwerte der Messer des Kontaktsystems K2 mit vollbestücktem Gehäuse G1 der Vibrationsprüfungen aus Abbildung 3.20 nach 22 h Prüfdauer

	Schichtdickenmessung Vibrationsprüfung			
	X-Richtung	Y-Richtung	Z-Richtung	Neuteil
	Ag [μm]			
Mittelwert	5,45	5,41	3,70	5,53
Standardabweichung	0,23	0,29	1,27	0,16
Minimalwert	5,23	5,15	2,33	5,30

Da jedoch die Röntgenfluoreszenzanalyse ein integratives Messverfahren darstellt, bei dem der Mittelwert eines Messflecks gebildet wird, können einzelne lokale Extrema nicht eindeutig erfasst werden. Somit können durch die Bildung des Mittelwertes Vertiefungen abgeschwächt dargestellt werden. Dennoch ist das Messverfahren der Röntgenfluoreszenzanalyse ein gutes Werkzeug, um einen Überblick zur Güte des Kontaktes zu erhalten.

Um jedoch auf die lokalen Extrema ebenfalls eingehen zu können, werden Konfokalmikroskopaufnahmen der Prüflinge durchgeführt, wie in Abbildung 3.21 zu erkennen ist. Hierzu sind auch die ermittelten Werte der Kontaktflächenausdehnung in Tabelle 3.14 dargestellt. Dabei zeigt sich in der 3-D Darstellung, dass für die Reibverschleißprüfungen die Steckrichtung die höchste Verschleißtiefe aufweist. Das Nicken ist dabei am geringsten verschlissen und das Gieren liegt dazwischen, wobei die Tiefe eher dem Nicken entspricht als dem Stecken. Somit kann für die Reibverschleißprüfungen die Steckrichtung als kritische Richtung identifiziert werden. Bei den Vibrationsprüfungen wird deutlich, dass in der X-Richtung keine eindeutige Kontaktfläche eingegrenzt werden kann und auch die Rauheit des Materials stellenweise tiefer als der Kontaktbereich ist. In dieser Teiluntersuchung hingegen zeigt die Z-Richtung eine deutlich tiefere Verschleißstelle auf. Somit können auch für die Vibrationsprüfungen die Ergebnisse der optischen Prüfung bestätigt werden und die orthogonalen Richtungen als kritischere Richtungen als die Steckrichtung identifiziert werden.

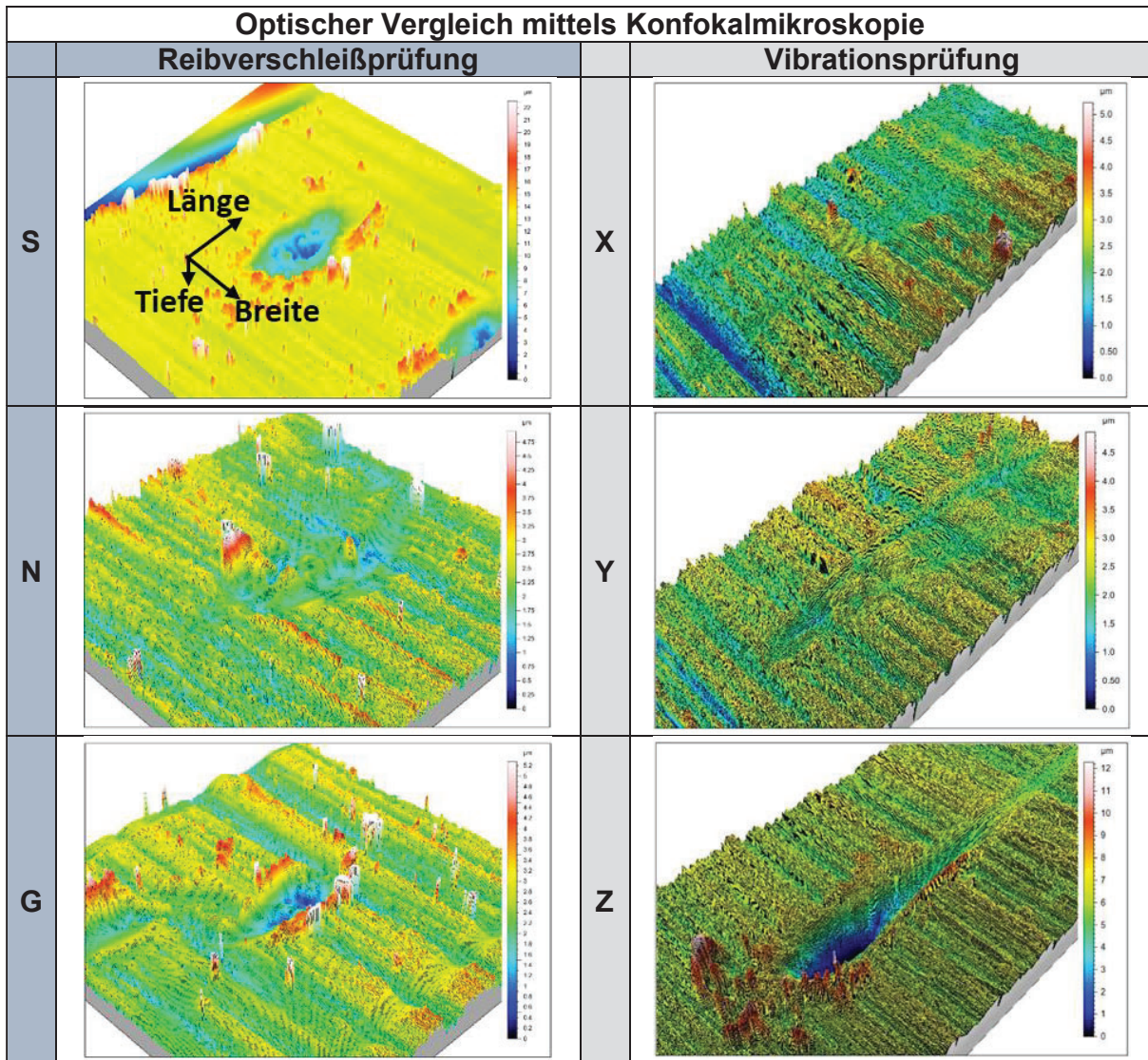


Abbildung 3.21: 3-D-Darstellung von Kontaktstellen der Messer des Kontaktsystems K2 mit vollbestücktem Gehäuse G1 aus den Reibverschleiß- und Vibrationsprüfungen aus Abbildung 3.19 und Abbildung 3.20 nach 100.000 Zyklen bzw. 22h Prüfdauer

Tabelle 3.14: Ausdehnung von Kontaktstellen der Messer des Kontaktsystems K2 mit vollbestücktem Gehäuse G1 aus den Reibverschleiß- und Vibrationsprüfungen aus Abbildung 3.19 und Abbildung 3.20 nach 100.000 Zyklen bzw. 22h Prüfdauer

Ergebnisse der Konfokalmikroskopie									
		Reibverschleißprüfung					Vibrationsprüfung		
Richtung		Länge [µm]	Breite [µm]	Tiefe [µm]	Richtung		Länge [µm]	Breite [µm]	Tiefe [µm]
Stecken	MW	825	267	7,11	X	MW	Nicht eindeutig abgrenzbar		< 0,3
	Stabw	237	47	1,44		Stabw			
Nicken	MW	449	207	1,28	Y	MW	184	101	0,80
	Stabw	223	87	0,57		Stabw	76	23	0,37
Gieren	MW	422	215	2,85	Z	MW	256	123	2,70
	Stabw	153	59	1,42		Stabw	147	47	1,99

C. Vergleich von gleichen Anregungsamplituden zu gleichen Kräften

Um zusätzlich den Einfluss des angeschlossenen elektrischen Leiters bei Vibrations- und Temperaturbelastungen zu untersuchen, wird eine weitere Studie erstellt [29]. Dabei werden silberbeschichtete Steckverbinder in die Reibverschleißprüfstände eingespannt und mit unterschiedlichen Auslenkungen belastet. Dazu werden die Steckverbinder zunächst in den Richtungen der Steck-, Gier- und Nickbewegung mit einem Hub von $50\ \mu\text{m}$ bewegt und die Kraft-Auslenkungskurven für 1000 Zyklen aufgenommen. Dieser Hub entspricht dabei einer üblichen Auslenkung zweier Kontaktpartner mit unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Durch diesen Unterschied entsteht eine Relativbewegung zwischen den Kontaktpartnern und ein Verschleiß der Beschichtung tritt auf. Dies wird in den üblichen Leitfäden und Prüfanweisungen mit einem Hub von $50\ \mu\text{m}$ abgebildet und entspricht im Zuge dieser Untersuchung einer gleichen Anregungsamplitude in allen Richtungen.

Somit kann aus den Kraft-Auslenkungskurven die dissipierte Reibenergie durch die Berechnung der Fläche innerhalb der Kurve ermittelt werden. Dies ist in Abbildung 3.22 beispielhaft für eine Bewegung in der Steckrichtung bei einem Hub von $50\ \mu\text{m}$ dargestellt. Hier zeigt sich eine flache Kurve mit einer deutlich ausgeprägten Hysterese, was auf ein „Gross-Slip-Verhalten“ der Kontakte schließen lässt. In Abbildung 3.23 sind neben der Kurve für den ersten Zyklus dazu noch die weiteren Kurven für die Zyklen 50 und 1.000 dargestellt. Hier wird deutlich, dass sich die Kurve von einer flachen Form mit deutlicher Hysterese über den Verlauf der Zyklen zu einer deutlich steileren Kurve mit einer weniger stark ausgeprägten Hysterese entwickelt. Hier wird ebenfalls deutlich, dass sich bereits durch die ersten Zyklen die Oberflächenrauigkeit ändert und eine andere Kontaktfläche sich entwickelt im Vergleich zum ersten Zyklus. Dies wird zum einen dadurch deutlich, dass die dissipierte Reibenergie sich deutlich verringert hat und zum anderen auch dadurch, dass die rückwirkende Kraft auf den Motor gestiegen ist. So ist die Kraft von ursprünglichen $1,2\ \text{N}$ auf ca. $6,7\ \text{N}$ angestiegen.

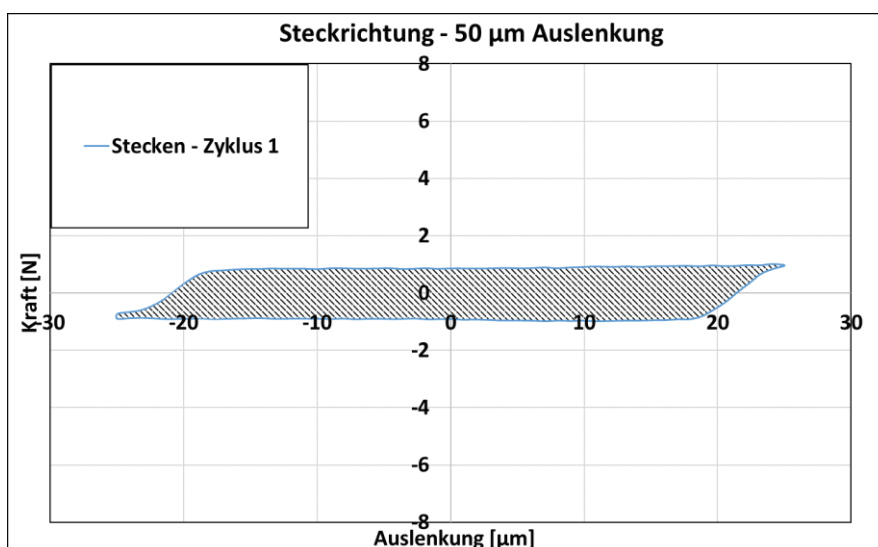


Abbildung 3.22: Kraft-Auslenkungskurve des Kontaktsystems K2 nach einem Zyklus in Steckrichtung

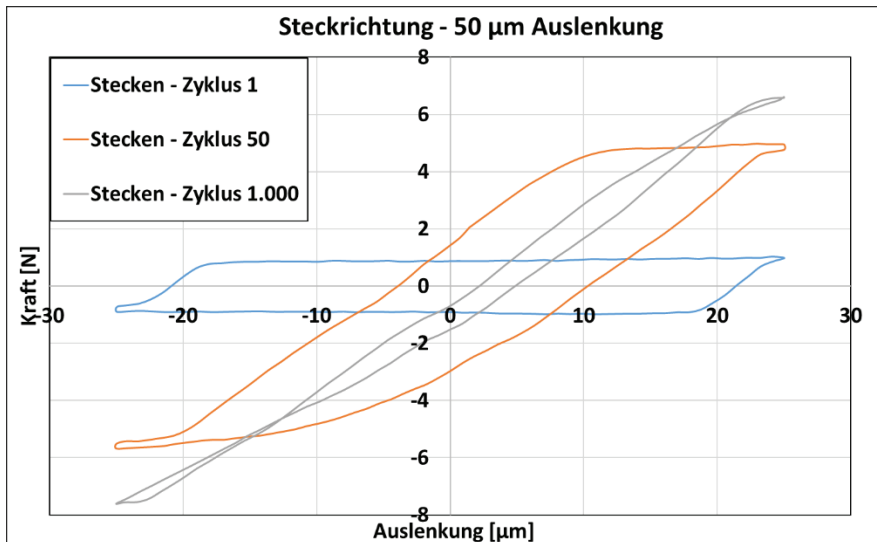


Abbildung 3.23: Kraft-Auslenkungskurve des Kontaktsystems K2 für eine Bewegung in der Steckrichtung nach 1, 50 und 1.000 Zyklen

Im Vergleich dazu werden auch die Gier- und Nickbewegung mit einer Auslenkung von 50 µm beaufschlagt. Die Kurven dazu sind in Abbildung 3.24 dargestellt und hier wird deutlich, dass in beiden Richtungen die Kurven eine deutlich weniger stark ausgeprägte Hysterese aufweisen. Somit ist die dissipierte Reibenergie für die Gier- und Nickbewegung geringer als für die Bewegung in Steckrichtung. Dabei ist in dieser Energie auch die Verformung des Leiters inbegriffen, die jedoch vernachlässigbar gering ist. Ebenfalls fällt hier auf, dass die aufgebrachten Kräfte generell geringer sind mit 0,4 N bzw. 0,8 N als bei der Steckbewegung mit 1,2 N. Dennoch ist auch hier zu erkennen, dass die Kurven sich im Laufe der 1.000 Zyklen verändern. Hier verschieben sich die Kurven hauptsächlich in der Kraftachse.

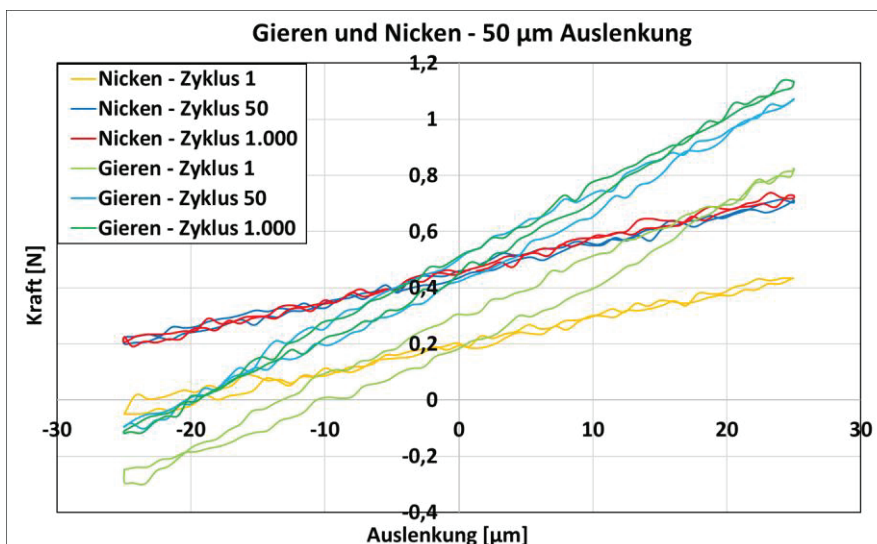


Abbildung 3.24: Kraft-Auslenkungskurve für die Gier- und Nickbewegung des Kontaktsystems K2 nach 1, 50 und 1.000 Zyklen

Im Gegensatz zum Einfluss der Temperaturbelastung, bei der die Auslenkung für alle Bewegungen gleich ist, stellt der angeschlossene elektrische Leiter bei Vibrationsbelastungen einen deutlich stärkeren Einfluss dar. Hier wirkt die gleiche Kraft von außen auf das Gesamtsystem der Steckverbinder ein, wodurch

unterschiedliche Einbaupositionen der Steckverbinder unterschiedliche Effekte hervorrufen können. Um dies weiterführend zu untersuchen, werden zunächst Auslenkungsversuche durchgeführt, wie in Abbildung 3.25 dargestellt ist. Hier werden bereits gesteckte Steckverbinder mit einer Steck-, Gier- und Nickbewegung beaufschlagt und die Kraft bei der jeweiligen Auslenkung gemessen. Hier wird deutlich, dass für die Steckbewegung eine Kraft von ca. 1,2 N benötigt wird um den Steckverbinder zu bewegen.

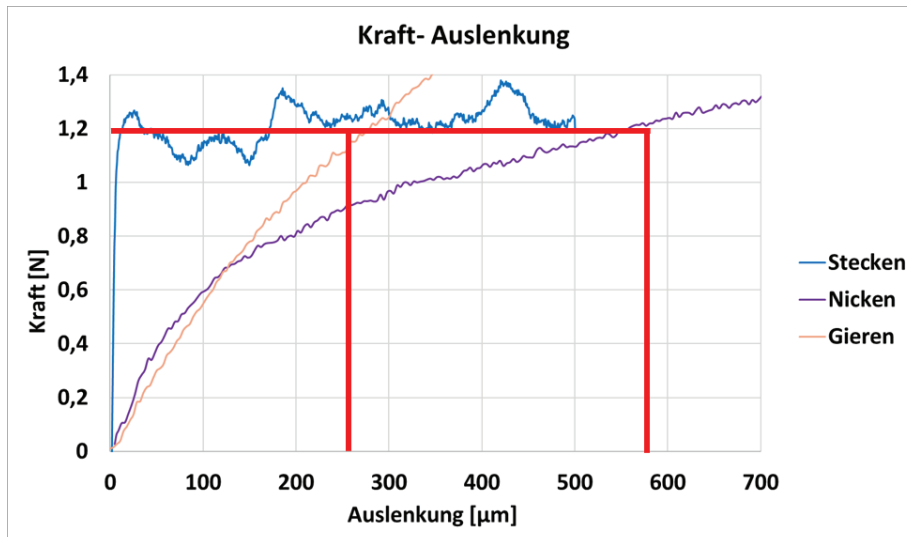


Abbildung 3.25: Ermittlung der auftretenden Kräfte bei der Steck-, Gier- und Nickbewegung des Kontaktsystems K2 nach einmaligem Stecken

Mit diesem Wert werden dann die Auslenkungen bei der Gier- und Nickbewegung abgeleitet, um eine gleich wirkende Kraft auf das System zu untersuchen. Hier wird deutlich, dass die ermittelte Kraft bei ca. 250 µm Auslenkung für die Gierbewegung auftritt und für die Nickbewegung eine Auslenkung von ca. 600 µm benötigt wird. Da dies jedoch nur die Hälfte eines Zyklus ausdrückt werden die tatsächlichen Auslenkungen 500 µm und 1.200 µm für die Gier- und Nickbewegung durchgeführt. Die Kraft-Weg-Kurven hierzu sind in Abbildung 3.26 dargestellt und zeigen eine deutlichere Hysterese als bei der Untersuchung der gleichen Auslenkung mit 50 µm. Somit ist auch deutlich, dass hier eine größere Energie dissipiert wird. Ebenfalls zeigt sich, dass sich die Kräfte über den Verlauf der Prüfung ebenfalls nach oben verschieben, die generelle Form bei diesen Prüfungen jedoch relativ gleichbleibt. Die Verschiebung der Kraft ist hier auch durch die veränderte Oberflächenrauigkeit zu begründen, aber auch durch den Fakt, dass die Prüfstände Weggesteuert sind. Somit wird die gleiche Amplitude für den gesamten Test gefahren und nicht die Kraft gleichgehalten.

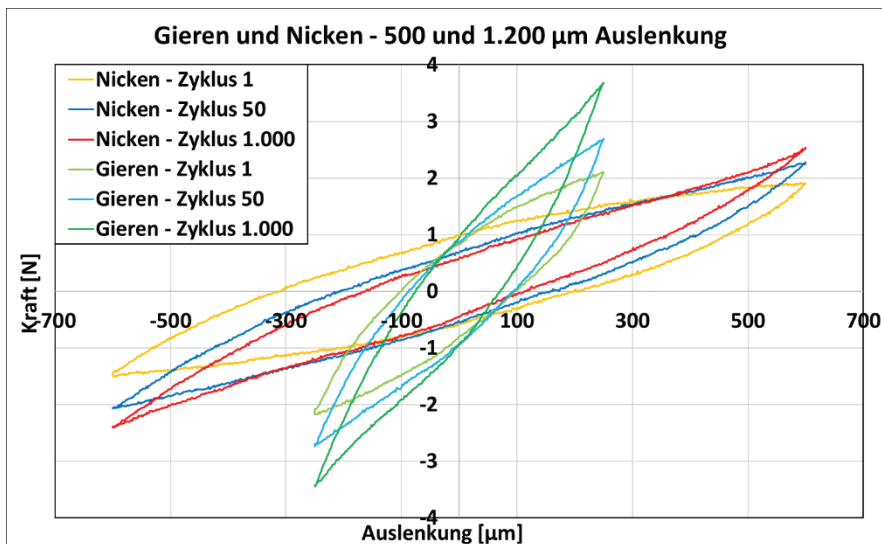


Abbildung 3.26: Kraft-Auslenkungskurve für die Gier- und Nickbewegung des Kontaktsystems K2 nach 1, 50 und 1.000 Zyklen mit erhöhtem Hub

Mit diesen Kurven lassen sich dementsprechend die Reibenergien berechnen, welche in Tabelle 3.15 aufgeführt sind. Hier zeigt sich, dass die dissipierten Energien über den Verlauf von 1.000 Zyklen bei fast allen Prüfungen und Bewegungen abnehmen. Dies weist auf das Einschleifen der Rauigkeitsspitzen hin. Ebenfalls wird deutlich, dass bei gleicher Amplitude die Steckrichtung die höchsten Energien aufweist, wodurch diese Richtung als kritische Richtung betrachtet werden kann in Bezug auf den Verschleiß und die Langlebigkeit der Steckverbinder. Hier zeigen im direkten Vergleich die Gier- und Nickbewegung eine deutlich geringere Energie, wodurch diese Richtungen als eher unkritisch betrachtet werden können. Bei der Prüfung der gleichen Kraft wird jedoch deutlich, dass hier die Nickbewegung die höchsten Energien aufweist. Hier ist zwar auch die Amplitude der Auslenkung am höchsten, jedoch muss somit diese Bewegung in Bezug auf Vibrationsbelastungen als kritisch angesehen werden. Gleiches gilt hier für die Gierbewegung, welche zwar eine geringere Energie im Vergleich zum Nicken aufweist, jedoch im Vergleich zur Bewegung in Steckrichtung deutlich höher liegt. Dies zeigt, dass der elektrische Leiter für die Vibrationsbelastungen einen erheblichen Einfluss aufweist und die Gier- und Nickbewegung hier als kritisch betrachtet werden sollten.

Tabelle 3.15: Reibenergiewerte für die Steck-, Gier- und Nickbewegung des Kontaktsystems K2 bei unterschiedlichen Auslenkungen auf Basis der Abbildung 3.23, Abbildung 3.24 und Abbildung 3.26

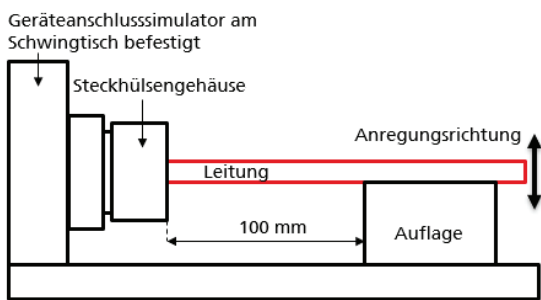
		Reibenergie [μJ]		
		Zyklen		
		1	50	1.000
Gleiche Anregungsamplitude (50 μm)	Stecken (d1)	76,9	75,6	41,1
	Nicken (d5)	0,3	0,2	0,3
	Gieren (d6)	3,1	2,4	1,5
Gleiche Anregungskraft	Stecken (d1) 50 μm	76,9	75,6	41,1
	Nicken (d5) 1.200 μm	1.320,5	1.049,0	822,7
	Gieren (d6) 500 μm	608,3	629,5	630,4

3.3.5 Vibrationsprüfung mit Rauschanregung

Versuchsdurchführung

Ziel der Rauschanregung ist es, praxisrelevante Relativbewegungen zwischen dem Steckergehäuse und verbautem Kontaktsystem auf dem Vibrationsprüfstand zu erzeugen und damit Ausfälle hervorzurufen. Von Motoren übertragene Vibrationen auf Gehäuseteile und Kabel oder Bewegung von Kabelbäumen durch Aktoren führen zu Mikrobewegungen im Kontaktbereich, wenn das Design des verwendeten Steckverbinders diese Bewegung erlaubt. Bei dieser Untersuchung steht der Einfluss überlagerter Frequenzen und Amplituden auf das Schadensbild von Steckverbindungen im Fokus. Ein wichtiger Parameter ist die Fixierung des Anschlusskabels. Durch definierte Freiheitsgrade können beim Vibrationstest die Kontaktbereiche je nach Achsenorientierung unterschiedlich belastet werden, da das Kabel aufgrund seiner Masse unterschiedlich in Bewegung gerät. Für die Vibrationsuntersuchungen mit Rauschanregung wurden zwei Befestigungsoptionen ausgewählt, die jeweils Randbedingungen repräsentieren.

Variante 1: Max. Freiheitsgrad (CH1)



Variante 2: kein Freiheitsgrad (CH2)

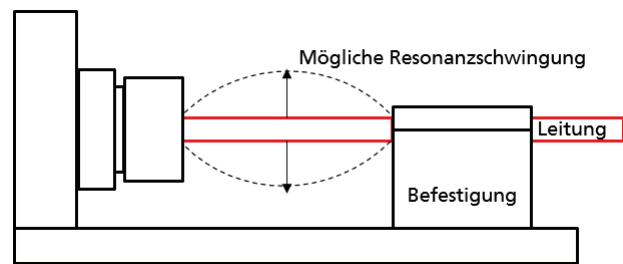


Abbildung 3.27: Schematische Darstellung der Bewegungsmöglichkeiten der Leitung im Abstand von 100 mm für beide Befestigungsoptionen. Variante 1: Max. Freiheitsgrad der Leitung CH1. Variante 2: Kein Freiheitsgrad der Leitung CH2

Bei der ersten Variante handelt es sich um eine Auflage, bei der die Leitung maximalen Freiheitsgrad (CH1) besitzt. Im Feldeinsatz würde diese eine lose unbefestigte Leitung entsprechen. Bei der zweiten Variante wird das Anschlusskabel fest eingespannt, damit die Leitung keinen Freiheitsgrad (CH2) besitzt. Es können sich jedoch wie in der Schwingungstechnik, Schwingungsmoden (transversal) im Resonanzfall ausbilden. Der gesamte Versuchsaufbau ist in der Abbildung 3.28 dargestellt. Als Aufspannvorrichtung wird ein Grundwürfel aus Aluminium für die Befestigung der Prüflinge in alle drei Raumrichtungen verwendet. Zur Befestigung der Prüflinge am Schwingtisch wird auf der Messerseite ein fester Prüfadapter verwendet. Dies dient zur Erhöhung der Reproduzierbarkeit und aufgrund der Tatsache, dass im Automobilbereich ca. 80 % der Steckkontakte mit einem festen Gegenstück verbaut sind. Der Abstand zwischen den beiden Befestigungsoption und Steckhülsegehäuse beträgt 100 mm. Es werden parallel beide Befestigungsoptionen geprüft. Des Weiteren wurden folgende Versuchsserien durchgeführt:

Bezeichnung	Erläuterung
S1	Bestückung und Prüfung von jeweils einem Kontaktsystem pro Steckhülsegehäuse
S2	Vollständige Bestückung des Steckhülsegehäuses und Prüfung aller Kontaktsysteme

Im ersten Durchlauf S1 wird das jeweilige Steckhülsegehäuse mit einem Kontakt bestückt und nach Erreichen der Prüfdauer (22 Stunden) oder des Abbruchkriteriums ($R \geq 300 \text{ m}\Omega$) die Verschleißprofile gezielt analysiert. Im zweiten Durchlauf S2 wird ein neues Steckhülsegehäuse des gleichen Typs voll bestückt, um die Wechselwirkungen der einzelnen Leitungen untereinander zu untersuchen.

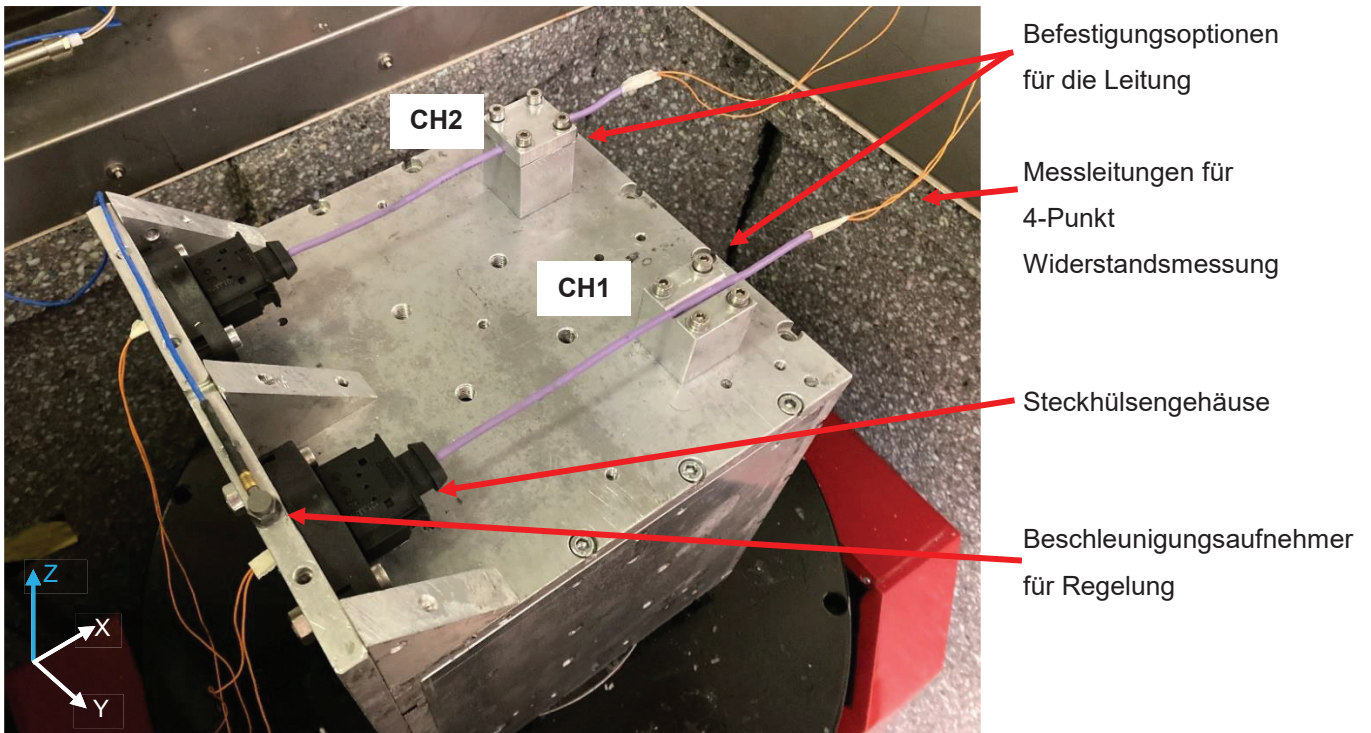


Abbildung 3.28: Versuchsaufbau am Beispiel für Einzelversuche S1 mit Befestigungsoption CH1 und CH2, Beschleunigungsaufnehmer sowie Zuleitungen für die 4-Punkt Messungen in der Z-Anregungsrichtung

Die folgende Tabelle 3.16 zeigt eine Übersicht der Kontaktsysteme, die bei der Vibrationsprüfung mit Rauschanregung am EMFT untersucht worden sind (Nomenklatur analog Tabelle 3.1 und Tabelle 3.2). Sie unterscheiden sich vor allem im Anwendungsbereich bzw. in der Endmetallisierung (Sn, Ag), Kontaktart (Rund oder Flachkontakt, Lamellen- oder Doppelfederkontakt, Kontaktzonen), Kontaktgröße, Kabelquerschnitt, maximaler Strombelastung sowie Steckergehäuse (Form, Pol-Zahl, ELD).

Tabelle 3.16: Untersuchte Kontaktsysteme bei den Vibrationsuntersuchungen mit Rauschanregung

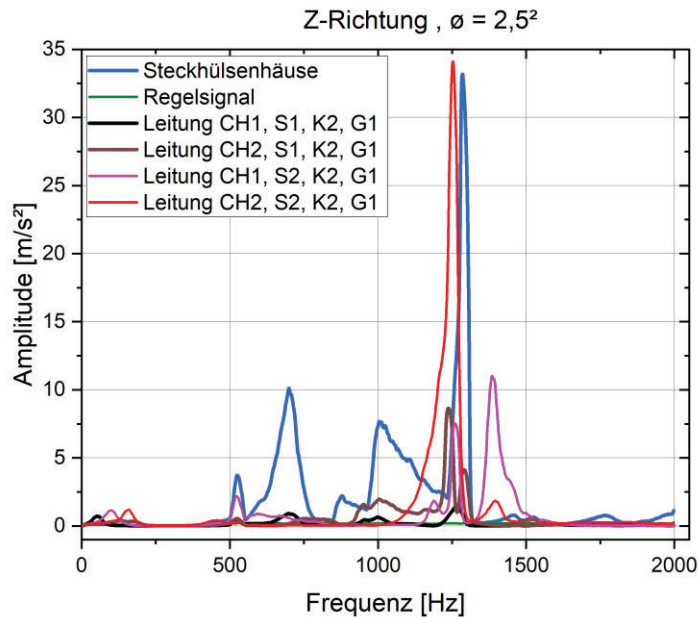
Kontaktsystem	Leitung [mm ²]	/ Unsealed	Finish	Gehäuse	Strombelastung [A]	Kontaktzonen	Versuchsserie
K1	2,5 ²	unsealed	Sn	G1	45	2x4	S1, S2
K2	2,5 ²	sealed	Ag	G1	45	2x4	S1, S2
K3	6,5 ²	sealed	Ag	G2	135	2x8	S1, S2
K4	6,5 ²	unsealed	Ag	G2	135	2x8	S1, S2
K5	2,5 ²	unsealed	Sn	G3	36	6	S1, S2
K6	2,5 ²	sealed	Ag	G3	38	6	S1, S2

Ergebnisse des dynamischen Verhaltens

Analog zum technischen Leitfaden TLF 0214 werden die Resonanzfrequenzen der Gehäuseteile des jeweiligen Kontaktsystems sowie Leitungen mittels Gleitsinus ($a = 10 \text{ m/s}^2$, 1 Okt/min) im Frequenzbereich von 10 – 2000 Hz für die jeweilige Befestigungsoption sowie Anregungsrichtung erfasst. Zusätzlich wird das Rauschprofil im Schärfegrad 4 aus Tabelle 3.3 in abgeschwächter Form ($a_{\text{eff}} = -20\text{dB}(180\text{m/s}^2)$) angewendet, um die Resonanzkurven auch bei dieser Anregungsart zu ermitteln. Die Schwingungsantwort wird mithilfe von Beschleunigungssensoren, die ein geringes Eigengewicht (0,5 g) besitzen, gemessen. Die Positionen der Beschleunigungssensoren für Regelung sowie Resonanzmessungen ist hierbei für alle Versuche gleich. Desweiteren wurden alle Versuche bei Raumtemperatur durchgeführt. Um den Einfluss von Steckhülsegehäuse, Kontaktsystem sowie das Gewicht der Leitung bezüglich Mikrobewegungen im Kontaktbereich und Rauschanregung abzuschätzen, werden die Schwingungsantworten von unbestückten Steckhülsegehäuse ebenfalls erfasst.

Bei den Hauptversuchen hat sich besonders die Z-Anregungsrichtung anfällig für die Amplitudenüberhöhung aufgrund von resonanter Anregung ergeben. Bei der unkritischen Y-Anregungsrichtung konnten ebenfalls Resonanzen bei Leitung und Steckhülsegehäuse festgestellt werden, allerdings mit deutlich geringeren Peak Intensitäten (Leitung) im Vergleich zur Z-Anregungsrichtung. In der X-Anregungsrichtung (Steckrichtung) konnten keine Resonanzen gemessen werden. Bei beiden Versuchsserien S1 und S2 besitzen die Leitungen in Abhängigkeit des Kabelquerschnitts, der Litzenanzahl sowie Isolierwerkstoffs unterschiedlich stark ausgeprägte Resonanzerscheinung im getesteten Frequenzbereich. Bei den unbestückten Steckhülsegehäuse sind ebenfalls Resonanzen zu erkennen, die je nach Gehäusekonstruktion (Dimension, Polzahl usw.) und den entsprechenden fertigungsspezifischen Toleranzen unterschiedlich stark ausgeprägt sein können. Die mögliche Übertragung von Mikrobewegungen in den Kontaktbereich kann somit immer als Interferenz von Leitung, Steckhülsegehäuse, konstruktiven Merkmalen des Steckverbinders (Female) und Messer (Male) angesehen werden. Die fest eingespannten Leitungen ohne Freiheitsgrad (CH2) zeigen generell für die geprüften Kontaktsysteme, eine deutlich höhere Tendenz zur Amplitudenüberhöhung wie frei schwingende Leitungen (CH1).

In der Abbildung 3.29 und Abbildung 3.30 sind exemplarisch die Resonanzanalysen der Versuchsserie S1 und S2 für Steckhülsegehäuse (G1 und G2) und Leitungen in der Z-Richtung (besonders kritisch) mit Rauschanregung von zwei Kontaktsystemen K2 und K3 mit unterschiedlichem Kabelquerschnitt ($2,5^2$, $6,5^2$) dargestellt. Bei den Kurven handelt es um berechnete Peak-Hold-Spektren aus den Messsignalen der eingesetzten Beschleunigungsaufnehmern. Die wesentlichen Resonanzerscheinungen bei Leitung sowie Steckhülsegehäuse beginnen bei etwa 500 Hz. Im Vergleich der Versuchsserien S1 und S2 ist auffällig, dass die Amplitudenintensität (CH1) sowie die Anzahl der Resonanzpeaks (CH1, CH2) bei den voll bestückten Kontaktsystem geringer ist. Somit scheint eine Mehrfachbestückung die Ausbildung von Resonanzpeaks zu behindern. Die Resonanzmessungen für die Gleitsinusanregung befinden sich im Anhang (Seite 70 - 71)



Beispielhafte Darstellung

Resonanzanalyse am Steckhülsegehäuse

Beschleunigungsaufnehmer für Regelung (Grün) und Steckhülsegehäuse (Blau)

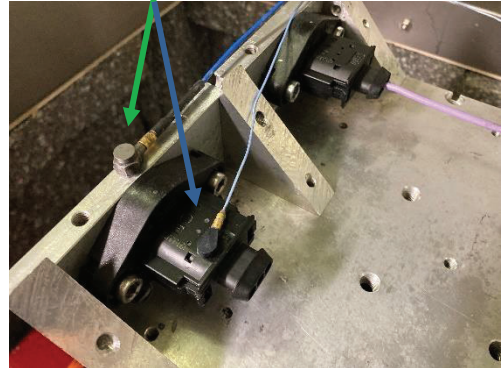
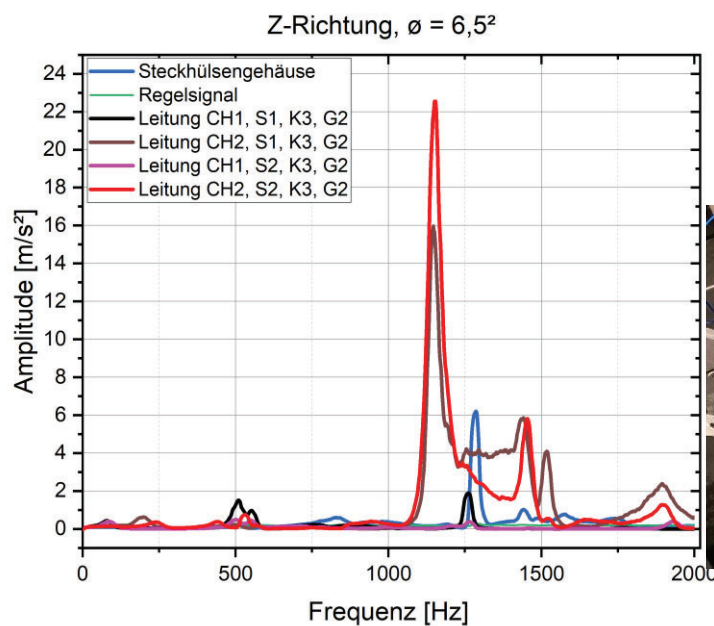


Abbildung 3.29: Peak-Hold-Spektren mit Rauschanregung aus Versuchsserie S1 und S2 ($a_{\text{eff}} = -20\text{dB}(180\text{m/s}^2)$) in Z-Anregungsrichtung am Beispiel Kontaktsystem K2 mit Gehäuse G1 und Leitungsquerschnitt $\varnothing 2,5^2$ mit Position Beschleunigungsaufnehmer für Regelsignal und Messsignal am Stückhülsegehäuse



Beispielhafte Darstellung

Resonanzanalyse an der Leitung (CH1)

Beschleunigungsaufnehmer Leitung (Braun)

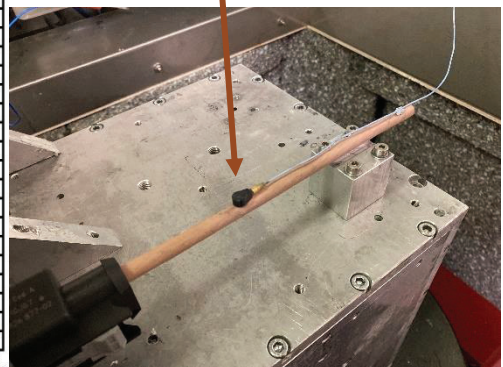


Abbildung 3.30: Peak-Hold-Spektren mit Rauschanregung aus Versuchsserie S1 und S2 ($a_{\text{eff}} = -20\text{dB}(180\text{m/s}^2)$) in Z-Anregungsrichtung am Beispiel Kontaktsystem K3 mit Gehäuse G2 und Leitungsquerschnitt $\varnothing 6,5^2$ sowie Position Beschleunigungsaufnehmer für Messsignal an der Leitung

Kontaktübergangswiderstand und Verschleißerscheinungsformen

Die zeitlichen Widerstandsverläufe der Vibrationsbelastungstests mit Rauschanregung können unabhängig vom verwendeten Kontaktsystems bzw. Beschichtung generell in drei Phasen (I - III) unterteilt werden (Abbildung 3.31). Die Einlaufphase (I) ist durch adhäsiven und abrasiven Verschleiß sowie einer kurzen Widerstandsanstieg gekennzeichnet. In der Phase II ist der adhäsive Verschleißbetrag geringer und der Widerstandsanstieg verhält sich über diesen Zeitraum weitgehend linear. In der Endphase III wird ein kritischer Verschleißbetrag des elektrischen Kontakts erreicht, wodurch der Widerstand exponentiell ansteigt.

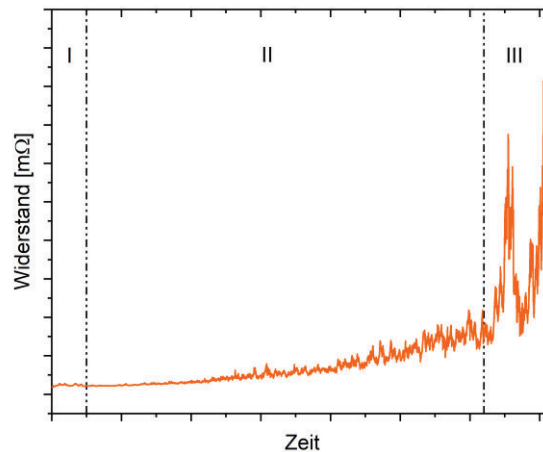


Abbildung 3.31: Exemplarischer Widerstandsverlauf eines elektrischen Kontakts mit Rauschanregung unterteilt in Phasen (I - III)

Im Anschluss an die durchgeführten Prüfungen werden die in den Steckverbindern integrierten Kontaktsysteme ausgebaut, zerlegt und mit unterschiedlichen Methoden analysiert. Um die chemische Zusammensetzung in der Verschleißspur der Kontaktsysteme zu analysieren, wird die energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX) verwendet. Die Kontaktschichten (Verschleißlänge, Breite, Tiefe) der Messer werden nach Testende (22 h) oder Erreichen des Abbruchkriteriums mithilfe eines Lasermikroskops (VK-x100) vermessen. Im Folgenden sind exemplarisch die zeitlichen Widerstandsverläufe der Versuchsserie von zwei baugleichen Steckverbindern (K1 und K2) mit den Beschichtungen Zinn und Silber (mit Dichtstopfen) für die Y-Anregungsrichtung dargestellt. Ein repräsentatives EDX-Überlagerungsbild der Kontaktschicht auf der Messerseite eines ausgewählten Prüflings ist ebenfalls enthalten. Je nach Kontaktsystem konnte folgendes Abriebverhalten festgestellt werden (Abb.3.34):

- Gleichmäßiger Abrieb aller Kontaktzonen (häufigste Verschleißart) 1
- Konischer- und einseitiger Abrieb 2
- Bei Rundkontakten mehrere Kontaktpunkte 3

Die topografischen Verschleiß- und Höhenprofile mit erfassten Mittelwerten der Kontaktschichten sowie die Verschleißbilder und Ausfälle sind exemplarisch für die silberbeschichteten Kontakte K2, K3 und K6 im Gehäusety G1, G2 und G3 mit der Befestigungsoption maximalem Freiheitsgrad (CH1) in den Abbildungen 3.35 – 3.37 dargestellt. Die vollständigen Verschleißmessungen mit numerischen Ergebnissen der

untersuchten Kontaktsysteme für die durchgeführten Vibrationsuntersuchungen mit Rauschanregung befinden sich im Anhang (65 - 67).

Widerstandsverläufe ausgefallene Kontaktsysteme K1 in Y-Anregungsrichtung von Versuchsserie S1

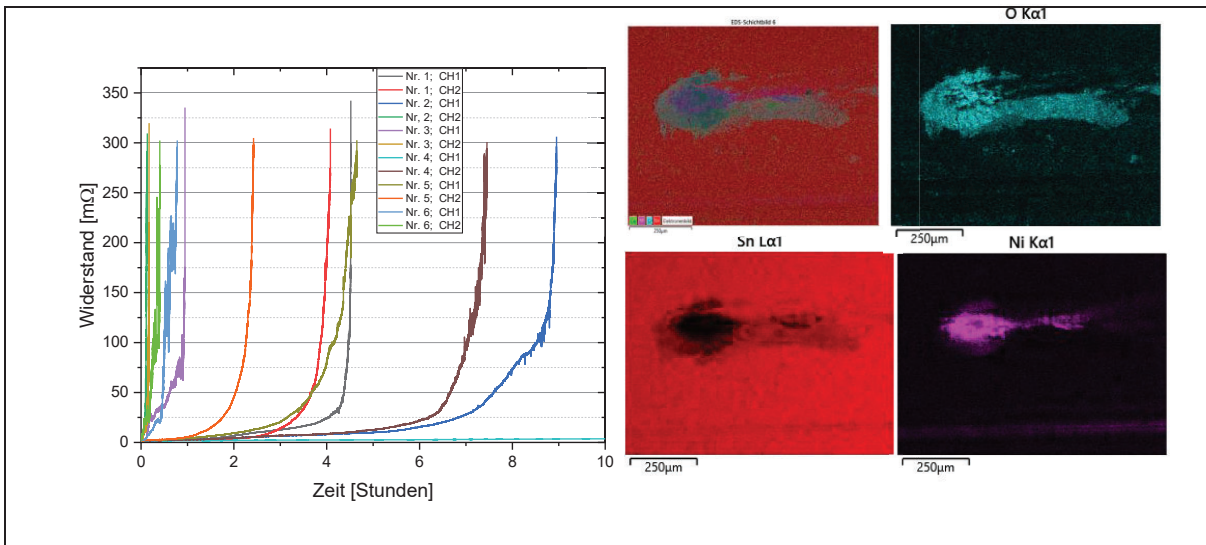


Abbildung 3.32: Links: Exemplarische zeitliche Widerstandsverläufe mit Rauschanregung (SG4) an ausgefallenen K1 Kontakte verbaut in G1 Gehäuseform in Y-Anregungsrichtung
Rechts: EDX Überlagerungsbild der Kontaktspur eines Prüflings mit stark oxidierte Kontaktzone.

Widerstandsverläufe nicht ausgefallene Kontaktsysteme K2 in Y-Anregungsrichtung von Versuchsserie S1

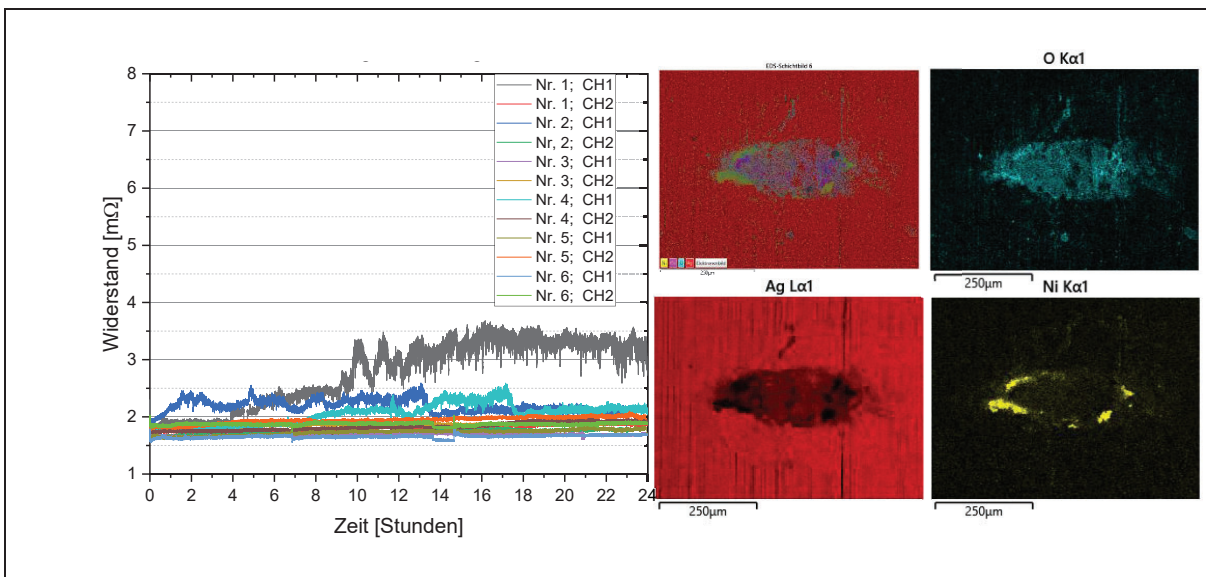


Abbildung 3.33: Links: Exemplarische zeitliche Widerstandsverläufe mit Rauschanregung (SG4) nicht ausgefallener K2 Kontakte verbaut in G1 Gehäuseform in Y-Anregungsrichtung.
Rechts: EDX Überlagerungsbild der Kontaktspur mit selektiv abgetragener Zwischenschicht (Nickel)

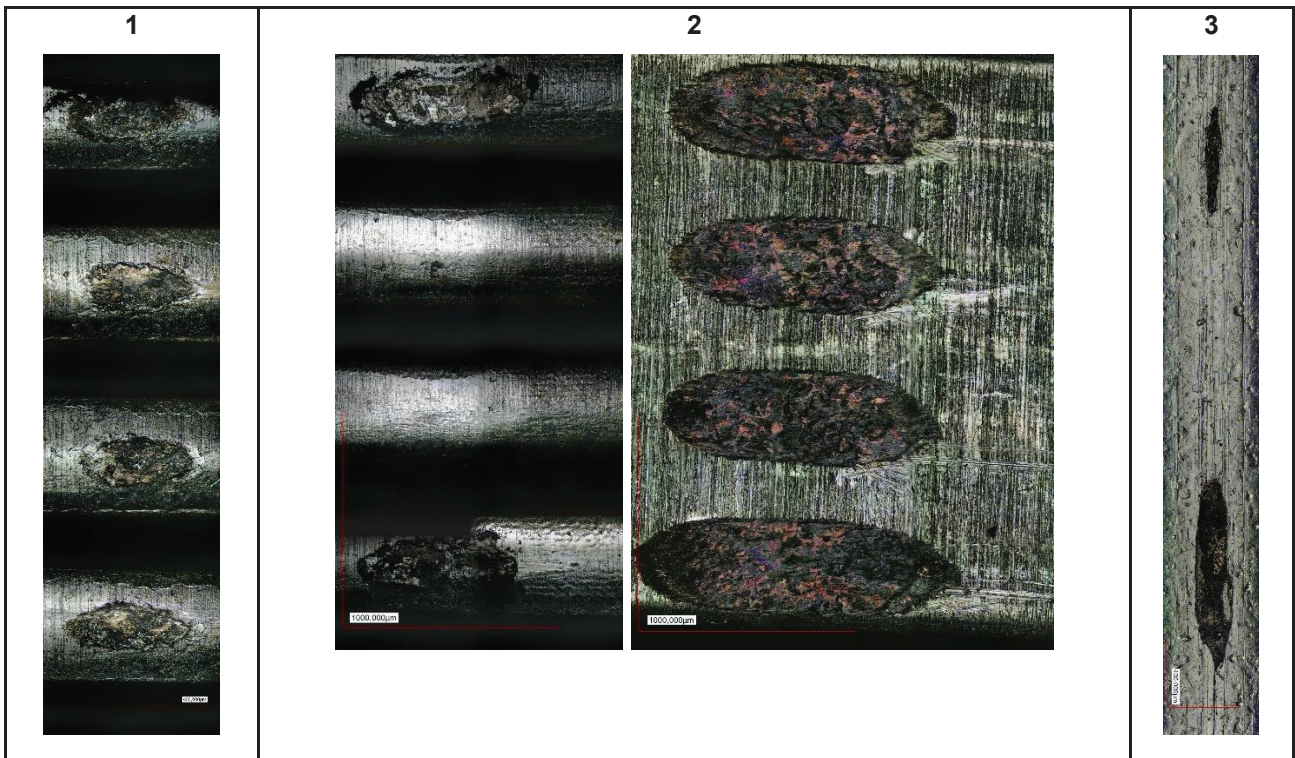
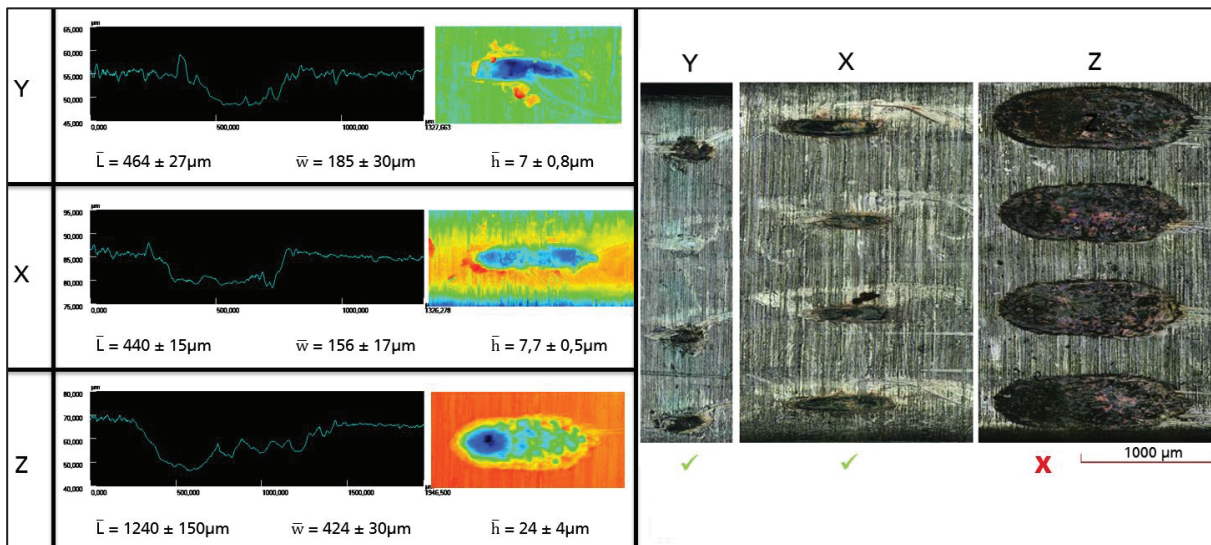


Abbildung 3.34: Abriebsverhalten der geprüften Kontaktsystem K1 – K3 aufgeteilt in Typ 1 - 3

Verschleißprofile Kontaktsystem K2 im Gehäusetyp G1 mit ELA (CH1)

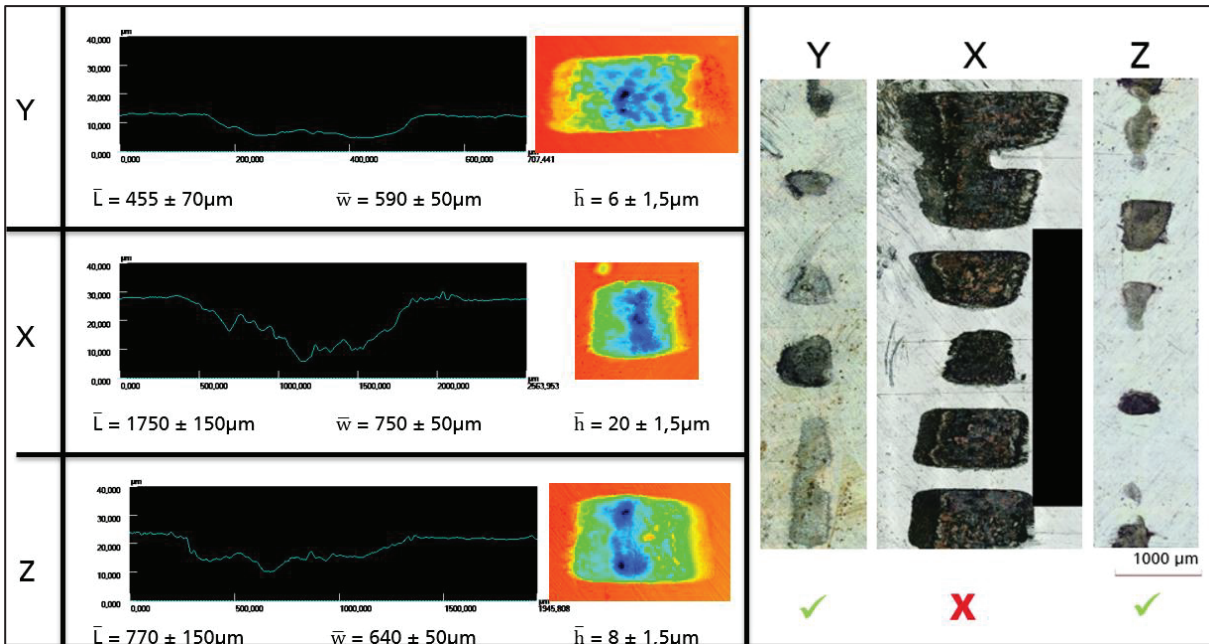


✓ kein Ausfall

✗ Ausfall

Abbildung 3.35: Topografischen Verschleiß- und Höhenprofile sowie die Verschleißbilder des Kontaktsystems K2 im Gehäusetyp G1 mit ELA (CH1)

Verschleißprofile Kontaktsystem K3 im Gehäusetyp G2 mit ELA (CH1)

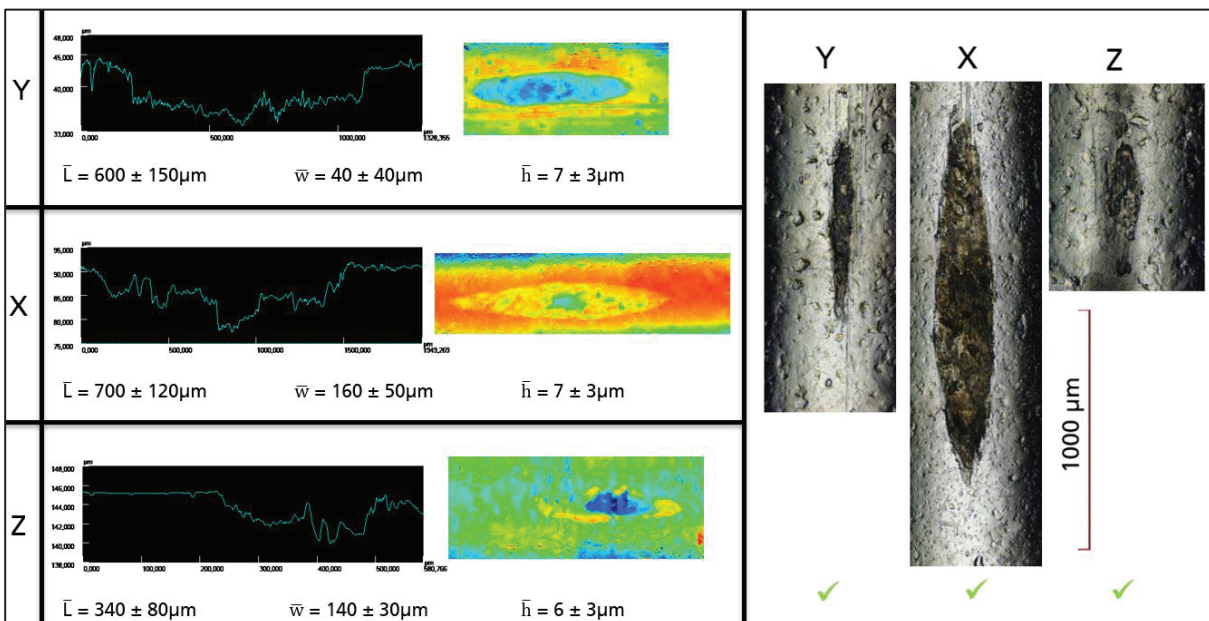


✓ kein Ausfall

✗ Ausfall

Abbildung 3.36: Topografischen Verschleiß- und Höhenprofile sowie Verschleißbilder des Kontaktsystems K3 im Gehäusetyp G2 mit ELA (CH1)

K6 Kontakte im Gehäusetyp G3 mit ELA (CH1)



✓ kein Ausfall

✗ Ausfall

Abbildung 3.37: Topografischen Verschleiß- und Höhenprofile sowie die Verschleißbilder des Kontaktsystems K6 im Gehäusetyp G3 mit ELA (CH1)

Bei den untersuchten verzinnnten Kontakten ist die Ausfallursache Reibkorrosion (fretting corrosion) aufgrund von Anhäufung oxidierter Reibpartikel im Zuge der Vibrationsbelastung in der Kontaktzone bzw. Bildung einer elektrischen isolierenden Fremdschicht. Die kritische Verschleißtiefe beträgt bei den verzinnnten Kontakten (Schichtdicke $\approx 6 \mu\text{m}$) etwa $4,5 \mu\text{m}$ bis zum Erreichen des Endwiderstandes von $300 \text{ m}\Omega$. Die getesteten Silberkontakte hingegen zeigen eine hohe Beständigkeit gegen Oxidation und Korrosion, daher ist die Ausfallursache Reibverschleiß bzw. Durchrieb bis zum unedlen Basismaterial und der anschließende tribochemische Verschleiß in Form von Reibkorrosion. Die kritische Verschleißtiefe beträgt bei den versilberten Kontakten (Schichtdicke Stift $\approx 6 \mu\text{m}$) etwa $20 \mu\text{m}$.

Verschleißprofile

Im Folgenden Abschnitt werden die gemessenen Verschleißprofile in Abhängigkeit der Lebensdauer sowie Belastungszeitraum für die drei Anregungsrichtungen analysiert. Dies erfolgt auf Basis der Abbildungen 3.35. bis 3.37, die exemplarisch die topografischen Verschleiß- und Höhenprofile von untersuchten Verschleißspuren zeigen. Im Gegensatz zu den Reibverschleißprüfungen, bei welchen die Bewegungen gezielt in verschiedenen Richtungen erzwungen werden, ist dies bei der Vibrationsprüfung nicht direkt möglich. Zwar werden die Steckverbinder so auf den Shaker aufgespannt, dass die Vibrationsrichtung jeweils in der entsprechenden Achse liegt, jedoch wird hier erwartet, dass sich eine Überlagerung der Relativbewegungen der Kontaktpartner bildet und nicht unmittelbar nur eine einzelne Relativbewegung erzeugt wird.

Y-Anregungsrichtung

Die Profilform ist leicht elliptisch bedingt durch eine Überlagerung von rotatorischen und translatorischen Mikrobewegungen. Allerdings sind die rotatorischen Bewegungen dominierend, mit Verschleißpartikelanhäufung außerhalb der Kontaktzone senkrecht zur Steckrichtung (Y-Richtung). Diese Anregungsrichtung zeigt überwiegend den geringsten Verschleiß und längste Lebensdauer mit beiden Befestigungsoptionen. Alle Kontakte mit Silberbeschichtung sind mit diesem Lastprofil Breitbandrauschen SG4 innerhalb von 22 Stunden nicht ausgefallen. Bei den ausgefallenen verzinnnten Kontakten ist die Lebensdauer in dieser Anregungsebene tendenziell am größten.

X-Anregungsrichtung

Die Verschleißprofile in Steckrichtung sind überwiegend translatorisch geprägt, mit einer schmalen elliptischen Topografie sowie Partikelanhäufung außerhalb der Kontaktzone längs zur Bewegungsrichtung. Die Kontakte mit der Befestigungsoption mit maximalem Freiheitsgrad CH1 zeigen in Steckrichtung eine deutliche stärkere Degradierung bis hin zu Ausfällen. Die maximale Tiefe der durchgeriebenen und ausgefallenen Silberkontakte beträgt $\approx 20 \mu\text{m}$. Bei den ausgefallenen verzinnnten Kontakten beträgt diese etwa $4\text{-}5 \mu\text{m}$. Des Weiteren besitzen die Kontakte mit dem größten Kabelquerschnitt ($6,5 \text{ mm}^2$) in Steckrichtung eine geringere Lebensdauer.

Z-Anregungsrichtung

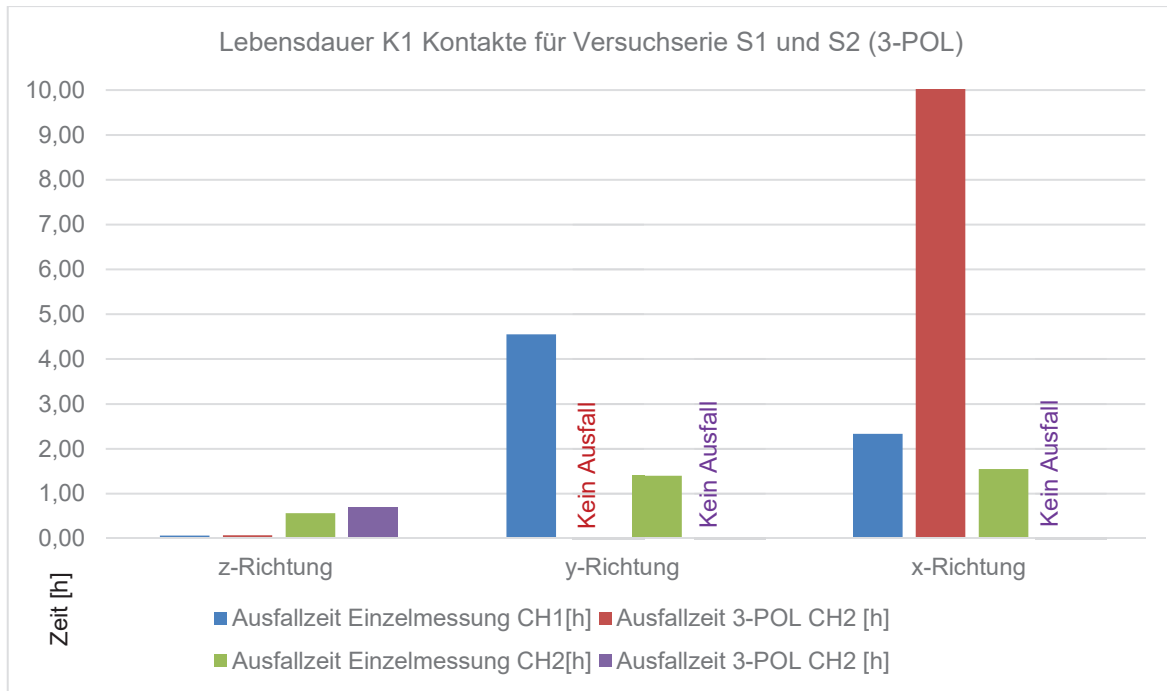
Anhand der ausgeprägten Verschleißprofile (Tiefe elliptische Gräben) in der Z-Anregungsrichtung kann daraus geschlossen werden, dass es sich um ein überlagertes Bewegungsmuster handelt, zusammengesetzt aus translatorischen, Kipp- und Taumelbewegungen. Die gemessene Verschleißbetrag ist im Vergleich zu der X- und Y- Anregungsrichtung am größten. Eigenresonanzen des Kontaktsystems (Gehäuse, Käfig, Messer usw.) insbesondere der befestigen Leitung können je nach Design des Kontaktsystems die Verschleißgeschwindigkeit erheblich negativ beeinflussen. Der Einfluss der Leitungsfixierung bezüglich Ausfallrate ist je nach Kontaktfamilie hier am deutlichsten, da ausgeprägte Schwingungsmoden der Leitung eine erhebliche Rolle spielen. Die Befestigungsoption CH2 (kein Freiheitsgrad des Anschlusskabels) neigt im Vergleich zu CH1 (max. Freiheitsgrad) sehr zu Amplitudenüberhöhung durch Resonanz.

Vergleich Lebensdauer einzel- und voll bestücktes Steckhülsegehäuse

In der der Versuchsserie S2 wurden die jeweiligen Steckhülsegehäuse G1 – G3 abhängig von den Kontakten K1 – K6 voll bestückt sowie der Kontaktübergangswiderstand kontinuierlich gemessen. Es konnte hierbei im direkten Vergleich zur Versuchsserie S1 im Allgemeinen folgendes festgestellt werden:

- Erhöhung der Lebensdauer vor allem in X- und Y-Anregungsrichtung
- Übertragung von Mikrobewegungen in den Kontaktbereich aufgrund störender überlagerter Resonanzen des Kontaktsystems in der Z-Anregungsrichtung können reduziert oder vermieden werden

Durch die Mehrfachbestückung der Steckhülsegehäuse ändert sich die Anzahl der potentiellen Quellen für Relativbewegungen und Übertragung in den Kontaktbereich. Allerdings können mögliche Resonanzen und Ausbildung von Schwingungsmoden der Leitungen sich auch destruktiv überlagern wodurch der Verschleißbetrag insgesamt reduziert wird. Abbildung 3.38 zeigt oben exemplarisch einen Vergleich der Lebensdauer an K1 Kontakten (Zinn Beschichtung) im Gehäusotyp G1 (3-POL Gehäuse) für die Versuchsserien S1 und S2 in Abhängigkeit der Anregungsrichtung sowie Befestigungsoptionen ohne Gehäusedichtung. Im unteren Teil der Abbildung sind die Verschleißbilder zweier Prüflinge der Versuchsserie S1 und S2 in Y-Anregungsrichtung nach 22 Stunden Belastung unter Rauschanregung (SG4) dargestellt. Die grafische Gegenüberstellung der Lebensdauer für die Versuchsserien S1 und S2 der restlichen Kontaktsysteme befinden sich im Anhang (68).



S1 Y-Anregungsrichtung CH1: Ausfall

S2 Y-Anregungsrichtung CH1: kein Ausfall



Abbildung 3.38: Oben: Diagramm Lebensdauer unter Rauschanregung (SG4) in Abhängigkeit der Anregungsrichtung und Befestigungsoption für Versuchsserie S1 und S2 mit G1 Steckhülsegehäuse am Beispiel der K1 Kontakte. Unten: Vergleich exemplarischer Verschleißprofile Versuchsserie S1 und S2 (3-POL) in Y-Anregungsrichtung

Einfluss Gehäusedichtung (ELA)

Bei den versilberten Powerkontakten (K3 und K4) mit Gehäusotyp G2 wurde in jeder Anregungsrichtung der Einfluss einer Gehäusedichtung bezüglich Verschleißes und Lebensdauer bei den Einzelmessungen S1 untersucht. Das folgende Diagramm zeigt den Median (jeweils 6 Prüflinge) der Ausfallzeiten für die Befestigungsoption CH1 und CH2 jeweils mit (K3) und ohne Gehäusedichtung (K4). Es zeigt sich, dass die Lebensdauer mittels Gehäusedichtung deutlich erhöht wird. Ein vollständiger Vergleich der Verschleißprofile ist im Anhang (68 - 70) dokumentiert.

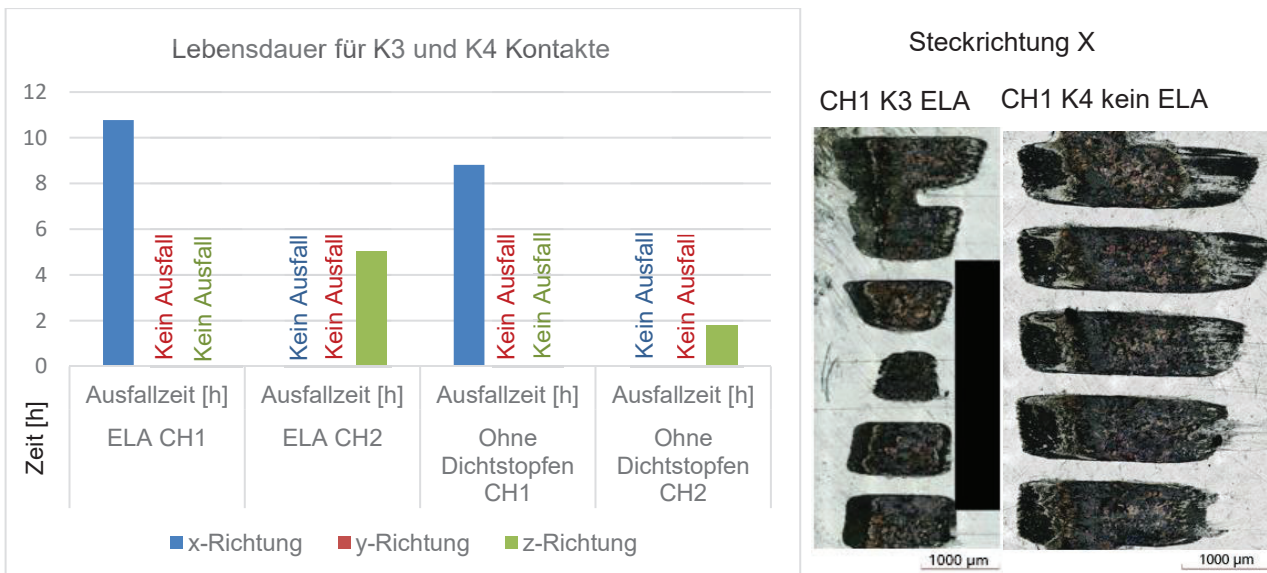


Abbildung 3.39: Ausfallzeiten für den Kontakt K3 und K4 in Abhängigkeit der Leitungsbefestigung in X, Y und Z-Richtung sowie Verschleißbilder in Steckrichtung

Zusammenfassung der Ergebnisse der Vibrationsuntersuchungen mit Rauschanregung (SG4)

Im Folgenden werden alle gesammelten Ergebnisse und Erkenntnisse bezüglich des Einflusses unterschiedlicher konstruktiver Merkmale und Leitungsverlegung auf das Schädigungsverhalten von Steckverbindern bewertet sowie stichpunktartig zusammengefasst. Für die Bewertung werden die Parameter Lebensdauer sowie Verschleißgrad der untersuchten Kontaktfamilien verwendet (Abbildung 3.40).

- Der geringste Verschleiß wurde in der Y-Anregungsrichtung gemessen. Zwischen den Befestigungsoptionen des Anschlusskabels (CH1, CH2) konnten keine wesentlichen Unterschiede im Schädigungsverhalten festgestellt werden
- Bei Anregungen in der X-Richtung können translatorische Bewegungen des Kontaktsystems in Steckrichtung durch eine Fixierung der Leitung sowie Gehäusedichtungen verringert werden.
- Die Verschleißanfälligkeit des Kontaktsystems steigt allgemein mit dem Leitungsquerschnitt bzw. Leitungsgewicht
- Bei Anregungen in der Z-Richtung neigt das Steckverbindersystem zur Übertragung von Mikrobewegungen aufgrund von ausgeprägten Eigenresonanzen von Leitung und Gehäuse. Eine feste Leitungsverlegung (CH2) zeigt eine deutlich höhere Tendenz zur Amplitudenüberhöhung.
- Mehrfach/Voll bestückte Steckhülsegehäuse wirken sich bei allen Anregungsrichtungen positiv auf die Lebensdauer der Kontaktsysteme aus, im Vergleich zur Einzelbestückung. Die Ausbildung von störenden Eigenschwingungen und Übertragung von Mikrobewegungen in den Kontaktbereich kann deutlich verringert oder verhindert werden. Die Z-Anregungsrichtung ist hierbei besonders kritisch.

Bewertung

K1 und K2 Kontaktfamilie, G1 Gehäuse	K1 S1		K1 S2		K2 S1		K2 S2	
	CH1	CH2	CH1	CH2	CH1	CH2	CH1	CH2
Y-Richtung	x	x	-	-	-	-	-	-
X-Richtung	x	x	x	-	x	-	-	-
Z-Richtung	xx	xxx	xx	xxx	xx	xxx	xx	xx

K3 und K4 Kontaktfamilie G2 Gehäuse	K3 S1		K3 S2		K4 S1		K4 S2	
	CH1	CH2	CH1	CH2	CH1	CH2	CH1	CH2
Y-Richtung	-	-	-	-	-	-	-	-
X-Richtung	xx	x	xx	-	xxx	x	xxx	x
Z-Richtung	x	xxx	x	x	x	xxx	xx	xx

K5 und K6 Kontaktfamilie, G3 Gehäuse	K5 S1		K5 S2		K6 S1		K6 S2	
	CH1	CH2	CH1	CH2	CH1	CH2	CH1	CH2
Y-Richtung	x	xx	-	-	-	-	-	-
X-Richtung	xx	xx	x	x	-	-	-	-
Z-Richtung	xxx	xxx	xxx	xxx	-	xx	-	x

xxx	sehr kritisch
xx	kritisch
x	gering
-	kein Einfluss

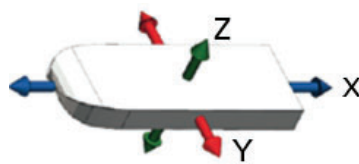


Abbildung 3.40: Allgemeine Bewertung des Verschleißes und Lebensdauer in Abhängigkeit der Anregungsrichtung und Befestigungsoptionen der Leitung für die geprüften Kontaktfamilien und Versuchsserien

Für die folgende Korrelation der Verschleißstärke mit den Gleitsinus Belastungsprüfungen sowie Reibverschleiß/Reibkorrosionsuntersuchungen (TH OWL) werden die Ergebnisse der Versuchsserie S2 (Voll bestück) mit der Befestigungsoption des maximalen Freiheitsgrads (CH1) verwendet. Diese Befestigungsoption stellt hierbei das Äquivalent dar zum befestigtem Kabelbaum mit Kabelbinder welches im Gleitsinusbelastungstest verwendet worden ist.

3.3.6 Korrelation der experimentellen Untersuchungen und Zusammenfassung der Erkenntnisse

Im Folgenden Abschnitt werden die gesammelten Ergebnisse der Reibverschleiß/Reibkorrosionsprüfung mit den Vibrationsuntersuchungen (Gleitsinus-, Rauschanregung) verglichen. Hierzu wurde die Schadenskorrelationsmatrix in Tabelle 3.17 erstellt, welche die Verschleißstäke in Abhängigkeit der Achsenorientierung (vgl. Abbildung 3.41) für die jeweilige Beschichtung bewertet. Die Klassifizierung der Verschleißstärke wird in der Abbildung 3.42 am Beispiel der Kontaktsysteme K1 und K2 veranschaulicht. Dabei wirken alle ermittelten Daten wie z.B. die Restschichtdicke, die Verschleißtiefe und die Elementzusammensetzung mittels EDX in die Bewertung ein.

Tabelle 3.17: Schadenskorrelationsmatrix der durchgeführten Prüfungen in Abhängigkeit der Anregungsrichtung

Prüfung		Verschleißstärke		
		Richtung		
		X/Stecken	Y/Gieren	Z/Nicken
Reibverschleiß	Sn	++++	+	+
	Ag	++	+	+
	Au	+++	+	+
Vibration Gleitsinus	Sn	+	++	++
	Ag	+	++	++
Vibration Rauschen	Sn	+++	++	++++
	Ag	++	+	+++

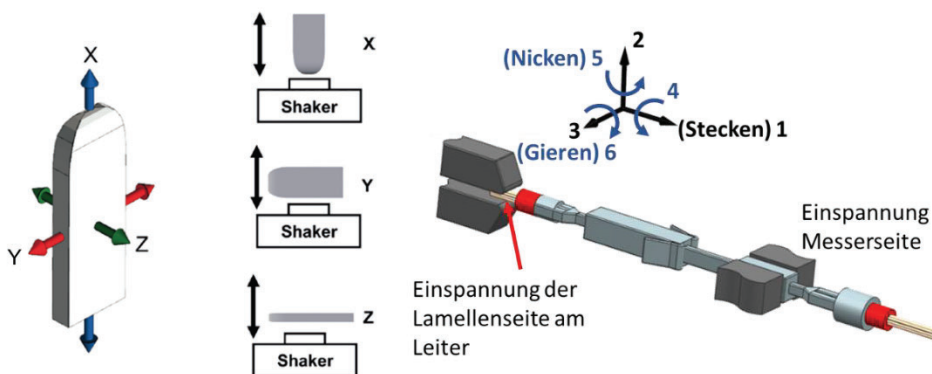
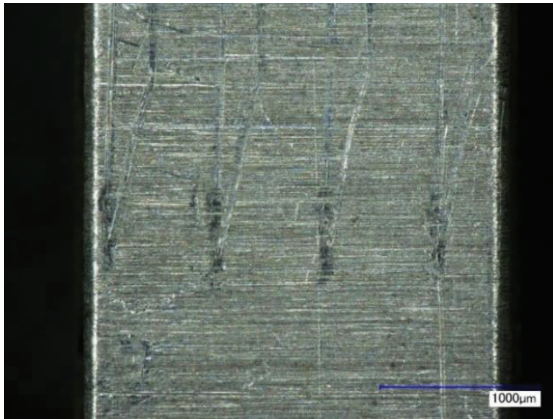
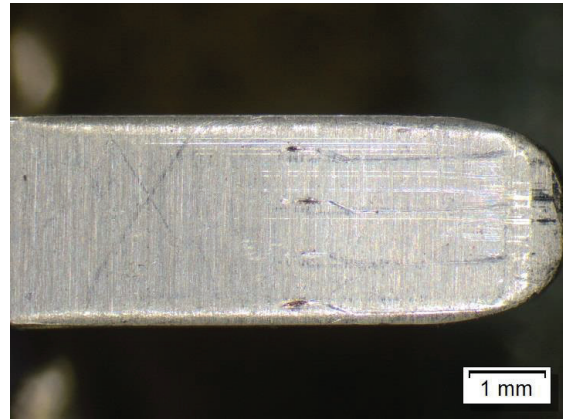


Abbildung 3.41: verwendetes Koordinatensystem

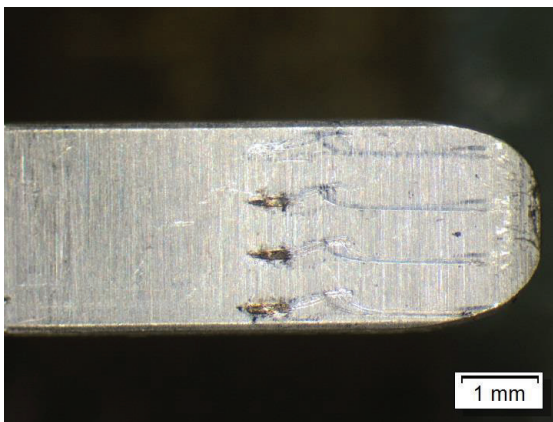
+ Geringer Verschleiß, kein Ausfall



++ Normaler Verschleiß, kein Ausfall



+++ Starker Verschleiß, Ausfall möglich



++++ Reibkorrosion, Ausfall

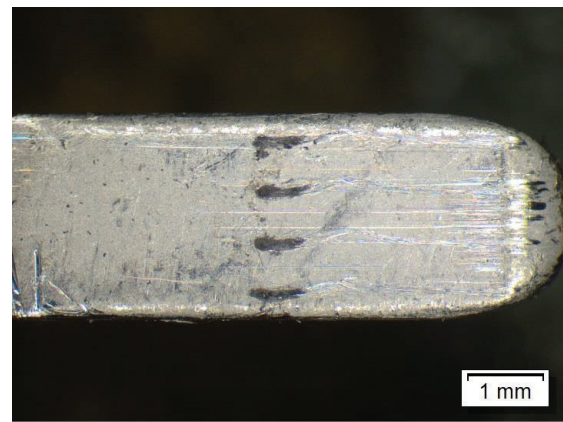


Abbildung 3.42: Klassierung der Verschleißstärke am Beispiel des Kontaktsystems K1 und K2

Die wichtigsten Erkenntnisse sind somit:

Verzinnete Steckkontakte zeigen im Allgemeinen einen stärkeren Verschleiß (mit und ohne Gehäusedichtung) aufgrund der Anfälligkeit gegen Reibkorrosion als die Varianten mit Endmetallisierung Silber oder Gold. Bei den Reibverschleiß- und Reibkorrosionsprüfungen wird die Wirkung durch die thermische Ausdehnung unterschiedlicher Materialien auf beiden Seiten eines Kontaktsystems abgebildet. Die Steckrichtung X stellt sich insgesamt als kritischste Richtung bei thermischer Ausdehnung heraus. Allerdings ist für Vibrationen in der Y (Gieren)- und Z-Richtung (Nicken) ein deutlich stärkeres Verschleißverhalten zu erkennen. Hierzu sei zu beachten, dass bei der Vibrationsuntersuchung mit Gleitsinus- und Rauschanregung Unterschiede bei der Verschleißstärke bzw. in der Bewertung festgestellt werden können. Die unterschiedlichen Resonanzbereiche der im Stecksystem befindlichen beweglichen Bauteile (Steckhülsegehäuse, konstruktive Merkmale Kontaktsystems, Leitungsfixierung) und deren potentielle Übertragung von Relativbewegung in den Kontaktbereich könnten für die Diskrepanz verantwortlich sein. Die Anregungsprofile Breitbandrauschen und Gleitsinus im Schräggrad 4 (Tabelle 3.3) unterscheiden sich hierbei deutlich. Breitbandrauschen besitzt einen größeren Frequenzbereich (5 - 2000 Hz) sowie simultane Anregung gemäß Leistungsdichtespektrum als der Gleitsinus, welches ein Frequenzintervall (100 – 440 Hz) mit verschiedenen Spitzenamplituden abfährt. Daher sollten die Übertragungen von Mikrobewegungen bei dem angewendeten Lastprofil mit Rauschanregung stärker auswirken.

Weitere Korrelation bzw. Erkenntnisse der Vibrationsprüfung sind im folgenden Stichpunktartig aufgeführt:

- Gedichtete Kontakte zeigen weniger Verschleiß sowie eine längere Lebensdauer, als ungedichtete Kontakte
- Durch eine Fixierung der Anschlusskabel kann der Verschleiß vor allem in Steckrichtung vermindert werden
- Die Verschleißanfälligkeit steigt allgemein mit dem Leitungsquerschnitt bzw. Leitungsgewicht
- Größere Kontakte zeigen mehr Verschleiß als kleinere Kontakte

Insgesamt stellt die Einbaulage von Steckverbindern zur Vibrationsrichtung einen entscheidenden Parameter dar, der bei der konstruktiven Auslegung stark zu beachten gilt.

3.4 Leitfaden

Im Zuge des Projektes ist ein externes Dokument als Leitfaden erstellt worden. Dieses trägt den Titel „Leitfaden zur robusten Auslegung von Steckverbindern in Bezug auf Mikrobewegungen - Einbaulage - Prüfung - konstruktive Maßnahmen - und Auswahl von Steckverbindern“ und ist in Anhang A dieses Dokuments eingefügt. Hier wurden auch Punkte erfasst, die nicht Hauptbestandteil der Untersuchungen waren und Spezialisten auf dem Gebiet hinlänglich bekannt sein sollten. Der Leitfaden dient aber auch als Information für Personen, die Steckverbinder einsetzen und als Konstruktionsleitfaden, wenn das Gegenstück eines Steckers konstruiert bzw. verbaut wird. Aus diesem Grund und der Vollständigkeit halber wurden auch allgemein bekannte Punkte mit aufgenommen.

3.5 Gegenüberstellung der durchgeführten Arbeiten und des Ergebnisses mit den Zielen

Ziel des Forschungsprojektes war die Untersuchung des Einflusses von Mikrobewegungen auf das Schädigungsverhalten von Steckverbindern. Dazu sollte ein Leitfaden entstehen für Konstruktionsanforderungen und für den Anwender der Steckverbinder.

Neben diversen anderen Veröffentlichungen ist der besagte Leitfaden entstanden und ist im Anhang dieses Abschlussberichtes enthalten. Somit sind die durchgeführten Arbeiten dem Ergebnis zielführend gewesen und ein besseres Verständnis für den Einfluss von Mikrobewegungen auf das Schädigungsverhalten von Steckverbindern wurde generiert.

4 Zusammenfassung

Mikrobewegungen an Steckverbindern verursachen Reibverschleiß bzw. Reibkorrosion, welches zum Ausfall des Systems führen kann. Ursächlich hierfür sind vorwiegend Vibrationen und die unterschiedliche thermische Ausdehnung von Materialien. Es wurde ein Leitfaden zur robusten Auslegung von Steckverbindern in Bezug auf Mikrobewegungen und der Auswahl und Prüfung von Steckverbindern entwickelt, der es Entwicklungsingenieuren erleichtert, durch Einbaulagen und andere konstruktive Maßnahmen eine Minimierung der Auswirkung von Mikrobewegungen bereits beim Design zu berücksichtigen und durch gezielte Prüfungen die Widerstandsfähigkeit von Steckverbindern genauer zu quantifizieren.

Es stellte sich heraus, dass die Einbaulage einen entscheidenden Einfluss auf den Reibverschleiß hat. Vibrationen in Steckrichtung sind unkritischer, als Vibrationen orthogonal zur Steckrichtung. Weiterhin zeigte sich, dass eine Einzelleiterdichtung und eine Fixierung der Leitung bei Vibrationen Vorteile bringt, da durch diese Maßnahmen die Relativbewegung in der Kontaktstelle reduziert wird. Außerdem schneiden kleine

Kontakte mit geringerer Masse besser ab als große Kontakte. Rundkontakte sind so beschaffen, dass Bewegungen in Richtungen orthogonal zu der Steckrichtung stark eingeschränkt werden und daher bei Vibrationsbelastungen Vorteile gegenüber Flachkontakte zeigen, die die relativen Bewegungen lediglich in einer Richtung einschränken.

Bei Relativbewegungen in der Kontaktstelle durch thermische Ausdehnungen zeigt sich, dass es am ungünstigsten ist, wenn diese Relativbewegung vorwiegend in Steckrichtung auftritt. Besser ist es, wenn diese orthogonal auf die Steckverbinder wirkt. Daraus resultiert ein Gieren und Nicken der Kontakte, welches bei Versuchen den Verschleiß im Vergleich zur Bewegung in Steckrichtung deutlich reduziert (Gleiten). Ein großes Taumelspiel, beziehungsweise eine schwimmende Lagerung sorgt dafür, dass weniger Bewegungen auf die Kontaktstelle übertragen werden. Allerdings wird die Bewegungsfreiheit des Kontaktes auch durch die angeschlossene Leitung und evtl. vorhandene Einzelleiterdichtung teilweise verhindert, die ebenfalls zu berücksichtigen sind. Bei der Auswahl des Materials für den Kontaktträger bzw. das Gehäuse sollten Materialpaarungen möglichst vermieden werden, bei denen die thermischen Ausdehnungskoeffizienten sehr unterschiedlich ausfallen.

5 Literatur

- [1] N.N.: Technischer Leitfaden – TLF 0214: Validierung von Automotive-Niedervolt-Steckverbindern, ZVEI, 2021.
- [2] N.N.: LV214: Kfz-Steckverbinder Prüfvorschrift, AUDI AG; BMW AG; Daimler AG; Porsche AG; Volkswagen Aktiengesellschaft, 2010
- [3] N.N.: DIN EN IEC 60512-1 VDE 0687-512-1:2019-09: Steckverbinder für elektrische und elektronische Einrichtungen – Mess- und Prüfverfahren, 2019
- [4] Vinaricky, E.: Elektrische Kontakte, Werkstoffe und Anwendungen: Grundlagen, Technologien, Prüfverfahren, 2. Auflage, Berlin [u.a.], Springer, 2002
- [5] Holm, R.: Electric contacts: Theory and applications, 4. Auflage, Berlin, New York, Springer, 2000
- [6] Song, J.; Koch, C. und Wang, L.: Correlation between Wear Resistance and Lifetime of Electrical Contacts, *Advances in Tribology*, 2012
- [7] Blauth, M.; Berger, F. und Song, J.: Analytical and experimental investigation of the electrical-thermal behaviour of electrical contact systems, *British Journal of Applied Science & Technology: BJUST* 4 (1), 2014, S. 18–39
- [8] Song, J.; Plett, E. und Wang, L.: Tribological Properties and Lifetime of Electrical Contacts, 8. – 13. September 2013, 5th World Tribology Congress Turin, Italien, 2013
- [9] Lawless, K. R.: The oxidation of metals, *Reports on Progress in Physics*, 1974, S. 231–316
- [10] Ren, W.; Wang, P.; Song, J. und Zhai, G.: Effects of current load on wear and fretting corrosion of gold-plated electrical contacts, *Tribology International* 70, 2014, S. 75–82
- [11] Ren, W.; Du, Y.; Cui, L.; Wang, P. und Song, J.: Research on fretting Regimes of gold-plated copper alloy electrical contact material under different vibration amplitude and frequency combinations, *Wear* 321, 2014, S. 70–78
- [12] Ren, W.; Wang, P.; Fu, Y.; Pan, C. und Song, J.: Effects of temperature on fretting corrosion behaviors of gold-plated copper alloy electrical contacts, *Tribology International* 83, 2015, S. 1–11
- [13] Mashimo, K.; Okuno, Y.; Kawata, S.; Nishikubo, H. und Ishimaru, Y.: Fretting analysis of tin-coated terminals under rotational motion, 12. - 15. Oktober 2014, IEEE 60th Holm Conference on Electrical Contacts New Orleans, LA, 2014, S. 7 ff
- [14] Song, J. und Schinow, V.: Correlation between Friction and Wear Properties and Electrical Performance of Silver Coated Electrical Connectors. *Wear*, 330-331(2015)400–405
- [15] Song, J.; Schinow, V. und Yuan, H.: The Influence of Coating Thickness on Linear Wear Rate in Silver Coated Contacts. *International Journal of Fracture Fatigue and Wear*, Volume 3, 2015, pp. 200-207
- [16] Fouvry, S.; Jedrzejczyk, P.; Chalandon, P. und Alquier, O.: From fretting to connector vibration tests: a "transfer function" approach to predict electrical contact resistance endurance, 22. - 26. Juni 2014, ICEC-The 27th International Conference on Electrical Contacts Dresden, Germany Dresden, Germany, 2014, S. 255–260
- [17] Mossouess, S.; Carvou, E.; Abdi, R. und Benjemaa, N., et al.: Analysis of temporal and spatial contact voltage fluctuation during fretting in automotive connectors, 22. - 26. Juni 2014, ICEC-The 27th International Conference on Electrical Contacts Dresden, Germany, 2014, S. 181–185
- [18] Noël, S. und Brézard-Oudot, A.: Electrical behavior of golden automotive connectors under vibration tests, 22. - 26. Juni 2014, ICEC-The 27th International Conference on Electrical Contacts Dresden, Germany Dresden, Germany, 2014, S. 85–90

- [19] Kharin, S. N.; Nouri, H. und Miedzinsky, B.: A comparative study of arc erosion at frequencies ranging 50–1000 Hz, 12. - 15. Oktober 2014, IEEE 60th Holm Conference on Electrical Contacts New Orleans, LA, 2014, S. 221–232
- [20] Takahashi, M.: Improved design of APC optical connectors with slanted angle of 12° for dispersion shifted optical fiber, *Journal of Lightwave Technology* 16 (4), 1998, S. 567–572
- [21] van Baren, J.: What is Random Vibration Testing? www.sandv.com/downloads/1202vanb.pdf, Zugriff am: 03.06.2015
- [22] Flowers, G. T.; Fei Xie; Bozack, M. und Malucci, R. D.: Vibration thresholds for fretting corrosion in electrical connectors, 21. - 23. Oktober 2002, Forty-Eighth IEEE Holm Conference on Electrical Contacts Orlando, FL, USA, 2002, S. 133–139
- [23] Yang, H. und Flowers, G.: Threshold of Axial Vibration Induced Fretting in Electrical Connectors, 22. - 25. September 2013, IEEE 59th Holm Conference on Electrical Contacts Newport, RI, USA, 2013, S. 215–224
- [24] El Abdi, R. und Benjemaa, N.: The effect of the temperature on the wear and resistance of automotive connectors subjected to vibration tests, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* 229 (2), 2015, S. 189–196
- [25] Tibebu, G.: Connectors and Vibrations – Damages in Different Electrical Environments: Master's Degree Thesis, Department of Mechanical Engineering Blekinge Institute of Technology Karlskrona, Sweden, 2013
- [26] Mashimo, K.; Katayama, H.; Nishikubo, H. und Ishimaru, Y.: Influence of vibration on connector sliding mode and amplitude, 12. - 15. Oktober 2014, IEEE 60th Holm Conference on Electrical Contacts New Orleans, LA, 2014
- [27] Hilmert, D.; Yuan, H. und Song, J.: Untersuchung der Korrelation zwischen Verschleißenergie und Verschleißvolumen an Kupferkontakten mit Silberbeschichtung, 23. - 24. März 2021, 8. Symposium Connectors 2021
- [28] Hilmert D, Krüger K, Song J.: Vergleichende Untersuchung der Verschleißbilder von Steckverbindern aus Reibverschleiß- und Vibrationsprüfungen mit unterschiedlichen Prüfrichtungen. In: Tagungsband der 62 Tribologie-Fachtagung 2021. 2021.
- [29] Hilmert D, Krüger K, Song J.: Wear of electrical contacts of equal motion amplitude and equal force in different directions, 25. - 27. Januar 2022, 23rd International Colloquium Tribology
- [30] H. Yuan, *Galvanic Plating of Electrical Contacts – Process and Properties*, Bd. 70, Aachen: Shaker Verlag, 2021

6 Anhang

6.1 Leitfaden zur robusten Auslegung von Steckverbindern in Bezug auf Mikrobewegungen

Basierend auf den Ergebnissen des IGF-Vorhabens „Einfluss von Mikrobewegungen auf Steckverbinder und deren robuste Auslegung“ (kurz: StRobA) wurde der folgende Leitfaden entwickelt. Hier wurden auch Punkte erfasst, die nicht Hauptbestandteil der Untersuchungen waren und Spezialisten auf dem Gebiet hinlänglich bekannt sein sollten. Der Leitfaden dient aber auch als Information für Personen, die Steckverbinder einsetzen und als Konstruktionsleitfaden, wenn das Gegenstück eines Steckers konstruiert bzw. verbaut wird. Aus diesem Grund und der Vollständigkeit halber wurden auch allgemein bekannte Punkte mit aufgenommen.

Leitfaden zur robusten Auslegung von Steckverbindern in Bezug auf Mikrobewegungen

1. Ausfallmechanismen durch Mikrobewegungen

Mikrobewegungen an Steckverbindern verursachen Reibverschleiß bzw. Reibkorrosion, welches, durch Anhäufung von Korrosionspartikeln, zum Ausfall des Systems führen kann. Ursächlich für die Mikrobewegungen sind vorwiegend Vibrationen und die unterschiedliche thermische Ausdehnung von Materialien. Die Ausprägung der Mikrobewegung wird stark von der Einbaulage von Steckverbindern und anderen konstruktiven Merkmalen beeinflusst. Dieser Leitfaden soll es Entwicklungsingenieuren erleichtern, durch konstruktive Maßnahmen eine Minimierung der Mikrobewegung bereits beim Design zu berücksichtigen.

1.1. Vibration

Vibrationen können unterschiedliche Ursachen haben. Bei Kraftfahrzeugen treten drei hauptsächliche Ursachen auf:

- Bewegung von außen, wie z.B. durch Fahrbahnunebenheiten
- Bewegung von innen (z.B. durch Bewegungen von Getriebe oder Kolben im Motor)
- Bewegung von Anbauteilen, wie z.B. Türen oder Klappen

Diese werden im Folgenden beschrieben. Je nach Aufbau und Konstruktion des Übertragungsweges kann die Richtung der Mikrobewegung beeinflusst werden.

1.1.1. Bewegung von außen

Die Bewegung von außen wird durch Fahrbahnunebenheiten dominiert. Diese Bewegungen führen zu einer zufälligen. Die Hauptvibrationsachse liegt in der Fahrzeughochachse (vgl. Abbildung 1-1).

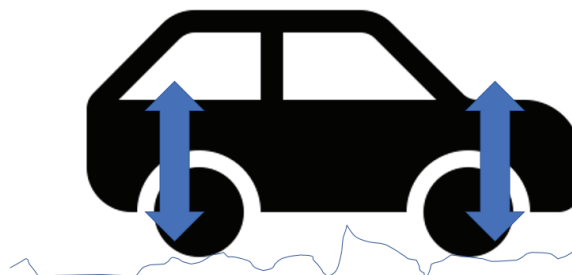


Abbildung 1-1: Vibration durch Fahrbahnunebenheiten

1.1.2. Bewegung von innen

Fahrzeugteile, die sich im Inneren des Autos bewegen, wie zum Beispiel Getriebe oder Kolben, bewegen sich in der Regel zyklisch. Die Richtung in der die Vibration auftritt, hängt hauptsächlich von der Geometrie und der Ausrichtung ab und variiert bei einem Motor zum Beispiel nach der Ausrichtung der Kolben, wie zum Beispiel in Abbildung 1-2 gezeigt wird.

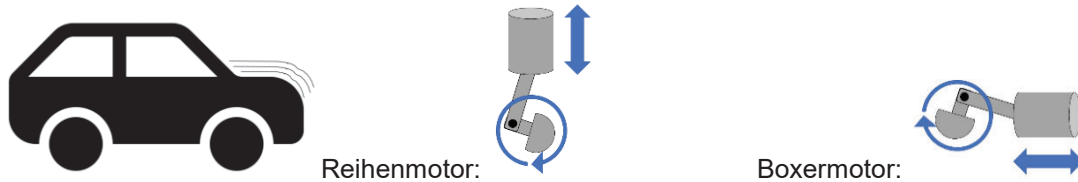


Abbildung 1-2: Vibrationen durch Innere Fahrzeugteile mit Beispiel der Ausrichtung

1.1.3. Bewegung von Türen und Klappen

Beim Öffnen und Schließen von Türen und Klappen entstehen impulsartige Stöße. Die Richtung ist dabei in Schließrichtung orientiert (vgl. Abbildung 1-3).

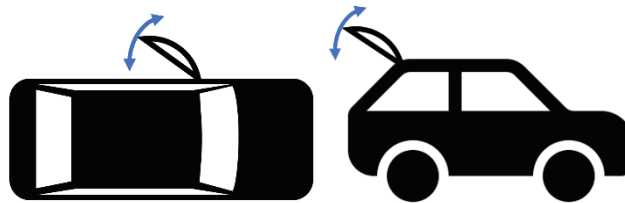


Abbildung 1-3: Schließrichtung einer Seitentür und der Heckklappe

1.1.4. Weitere zufällige Bewegungen

Gegebenenfalls wirken auch Seitenkräfte bei einer Kurvenfahrt, sowie Kräfte beim Beschleunigen und Bremsen auf die Komponenten ein. Diese Kräfte treten in Fahrzeugquer- beziehungsweise Fahrzeuglängsachse auf (vgl. Abbildung 1-4).

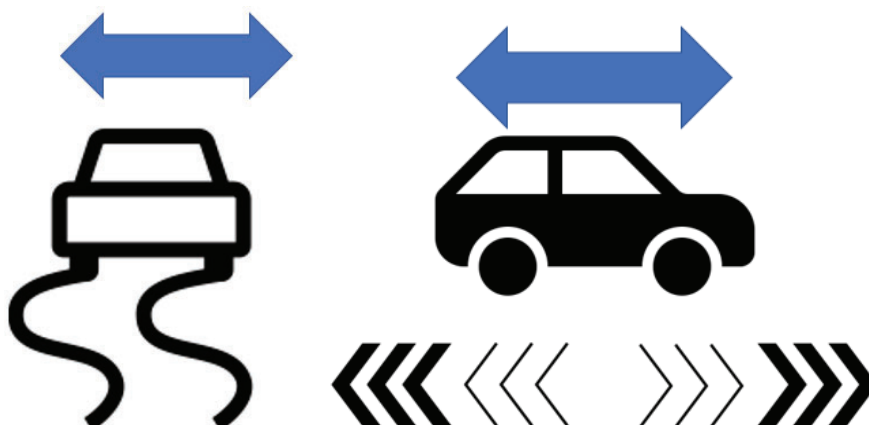


Abbildung 1-4: links: Seitenkräfte; rechts: Kräfte durch Beschleunigung und Bremsvorgänge

1.2. Thermische Ausdehnung

Steckverbinder in Automobilen sind in den jeweiligen Einsatzgebieten verschiedenen Temperaturen ausgesetzt. Zum einen entstehen durch den Unterschied vom stehenden, nicht eingeschalteten Zustand zum laufenden Betriebszustand (durch z.B. Motor, Abgasanlage, etc.) wechselnde Temperaturen. Zum anderen wirkt hier zusätzlich noch die Änderung der Umgebungstemperatur mit ein (z.B. Tag/Nacht).

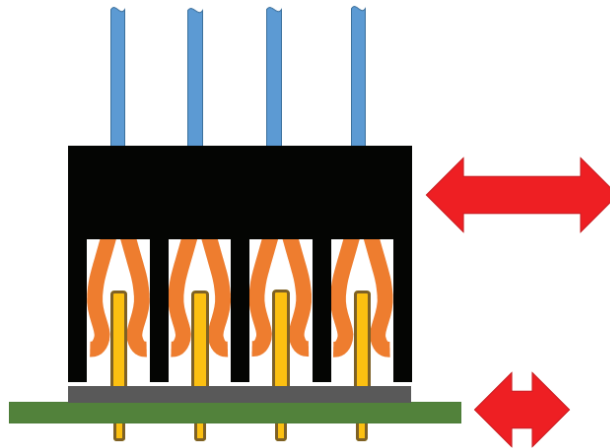


Abbildung 1-5: Beispiel für unterschiedliche thermische Ausdehnung

Durch unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten bei den auf beiden Seiten des elektrischen Kontaktes eingesetzten Materialien entstehen bei Temperaturänderungen unterschiedliche Längenausdehnungen (Abbildung 1-5). Diese können zu einer Relativbewegung in der Kontaktstelle führen.

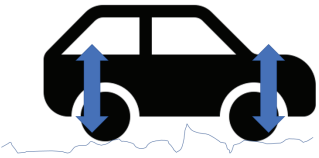

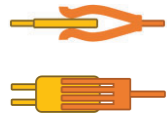
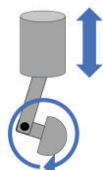

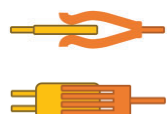



2. Einbaulage

Bei der Entstehung von Mikrobewegungen durch Vibration oder thermische Ausdehnungen stellte sich heraus, dass die Einbaulage einen entscheidenden Einfluss auf den Verschleiß hat. Dieser Einfluss der Einbaulage und weitere konstruktive Maßnahmen sind im Folgenden dargestellt.

2.1. Günstige Einbaulage hinsichtlich Vibration

Die Vibrationsversuche zeigten, dass eine Vibration in Steckrichtung unkritischer ist, als Vibrationen orthogonal zur Steckrichtung. Daher sollten die Steckverbinder mit der Steckrichtung am besten in Vibrationsrichtung ausgerichtet sein. Die Einbaulage in Bezug zu den Vibrationsquellen aus Kapitel 1.1 verdeutlicht Tabelle 1. Je nach Aufbau und Konstruktion des Übertragungsweges kann die Richtung der Mikrobewegung beeinflusst werden.

Tabelle1: Einbaulage in Bezug zur Vibrationsquelle

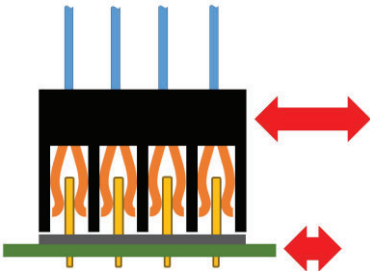
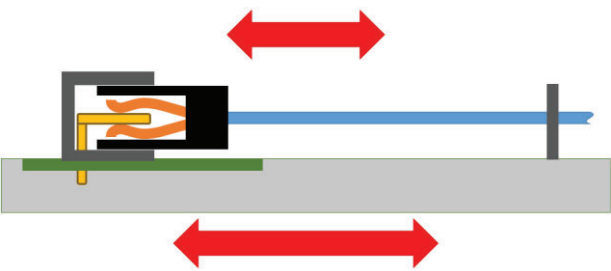
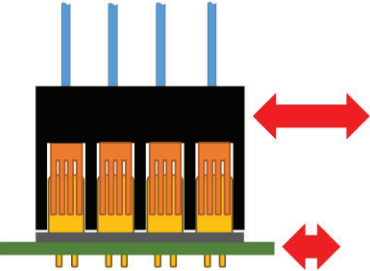
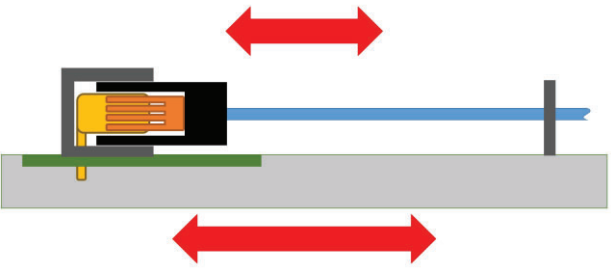
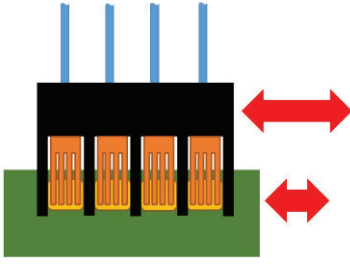
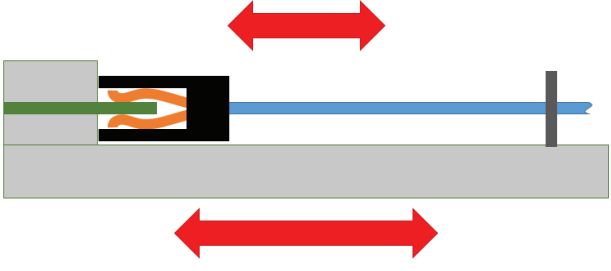
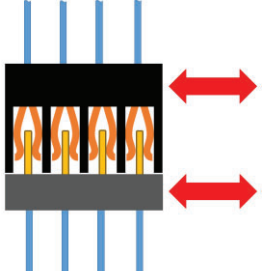
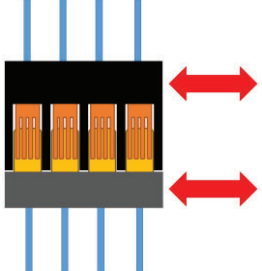
Ausrichtung der Vibrationsquelle	Einbaulage des Steckverbinders gut	Einbaulage des Steckverbinders ungünstig
		
		
		

2.2. Günstige Einbaulage hinsichtlich thermischer Ausdehnung

Relativbewegungen in der Kontaktstelle, welche durch unterschiedliche thermische Ausdehnungen auf beiden Seiten des elektrischen Kontraktes verursacht werden, lassen sich nicht immer vermeiden.

Am ungünstigsten ist es, wenn diese Relativbewegung vorwiegend in Steckrichtung auftritt. Besser ist es hier, wenn diese orthogonal auf die Steckverbinder einwirkt. Daraus resultiert ein Gieren und Nicken der Kontakte, welches bei Reibverschleißversuchen den Verschleiß im Vergleich zur Bewegung in Steckrichtung deutlich reduzierte. Die Tabelle 2 zeigt ein paar Beispiele für gute und ungünstige Einbaulagen.

Tabelle 2: Beispiele für Einbautagen mit Bewertung hinsichtlich Thermischer Ausdehnung

Gute Einbaulage	Ungünstige Einbaulage
 <p data-bbox="261 555 681 584">Gerader Steckverbinder auf Platine</p>	 <p data-bbox="845 555 1310 584">Gewinkelter Steckverbinder auf Platine</p>
 <p data-bbox="261 900 681 929">Gerader Steckverbinder auf Platine</p>	 <p data-bbox="845 900 1310 929">Gewinkelter Steckverbinder auf Platine</p>
 <p data-bbox="363 1234 580 1263">Direktstecktechnik</p>	 <p data-bbox="970 1234 1187 1263">Direktstecktechnik</p>
 <p data-bbox="347 1601 596 1630">Inline Steckverbinder</p>	
 <p data-bbox="347 1960 596 1989">Inline Steckverbinder</p>	

Analog zu den gezeigten Beispielen kann der Katalog mit den Szenarien nach dem oben genannten Prinzip noch deutlich erweitert werden.

3. Prüfung der Widerstandsfähigkeit von Steckverbindern gegen Mikrobewegungen

Die Widerstandsfähigkeit von Steckverbindern gegen Mikrobewegungen werden in der Reibverschleiß- und Reibkorrosionsprüfung sowie Vibrationsprüfung untersucht, die im technischen Leitfaden – TLF 0214 definiert sind. Jedoch ist eine gezielte Erweiterung der Untersuchungen bei den genannten Prüfungen sinnvoll.

3.1. Reibverschleiß- und Reibkorrosionsprüfung

Die Prüfung in der Steckrichtung stellt den kritischsten Fall (worst case) dar. Allerdings wird in der genannten Prüfung lediglich die Reibkorrosion durch die Überwachung des Kontaktwiderstands indirekt untersucht. Sinnvollerweise ist der Verschleiß bzw. Durchrieb im Fall von Edelmetalloberflächen wie z.B. Silber und Gold nach der Prüfung zu untersuchen, um den potentiellen Ausfall durch den zeitlich verzögerten Ausfall bei Durchrieb ausschließen zu können bzw. den Unterschied in der Gefährdung abschätzen zu können. Es gilt: Je geringer der Oberflächenverschleiß ist, umso höher ist die Widerstandsfähigkeit gegen Durchrieb aufgrund der Mikrobewegung und dadurch gegen die Reibkorrosion im Langzeitbetrieb.

3.2. Vibrationsprüfung

Die Vibrationsprüfung in der Y- bzw. Z-Richtung stellt den kritischsten Fall hinsichtlich Mikrobewegungen dar. Die Untersuchung des Verschleißes bzw. des Durchriebs im Fall von Edelmetalloberflächen wie z.B. Silber und Gold nach der Prüfung ist im Fall der Vibrationsprüfung im TLF 0214 bereits vorgesehen. Die Quantifizierung des Verschleißes ist hier ebenfalls zu nutzen, um den potentiellen Ausfall durch den zeitlich verzögerten Ausfall bei Durchrieb ausschließen zu können bzw. den Unterschied in der Gefährdung abschätzen zu können. Es gilt hier auch: Je geringer der Oberflächenverschleiß ist, umso höher die Widerstandsfähigkeit gegen Durchrieb aufgrund der Mikrobewegung und dadurch die Reibkorrosion im Langzeitbetrieb ist.

4. Auswahl von Steckverbindern – konstruktive Merkmale

Bei der Auswahl von Steckverbindern sind je nach Belastung und Einbaulage auch weitere konstruktive Merkmale zu berücksichtigen. Im Folgenden werden diese in Bezug auf Vibration und die thermische Ausdehnung getrennt betrachtet.

4.1. In Bezug auf Vibration

Hinsichtlich der Vibration sind positive Merkmale:

- Einzelleiterdichtungen
- Fixierung der Leitungen
- Kleine Kontakte mit wenig Masse
- Rundkontakte im Vergleich zu Flachkontakten

Einzelleiterdichtung und Fixierung

Es zeigte sich, dass eine Einzelleiterdichtung und eine Fixierung der Leitung bei Vibrationen Vorteile bringen, da durch diese Maßnahmen die Relativbewegung in der Kontaktstelle reduziert wird.

Größe und Masse

Kleine Kontakte mit geringerer Masse schneiden in der Vibrationsprüfung aufgrund geringerer Kräfte bei gegebenen Beschleunigungen besser ab als große Kontakte. Daher ist der Einsatz von maßgeschneiderten Größen von Steckverbindern zu empfehlen.

Flach- und Rundkontakte

Rundkontakte sind so beschaffen, dass Bewegungen in Richtungen orthogonal zu der Steckrichtung stark eingeschränkt werden und daher bei Vibrationsbelastungen Vorteile gegenüber Flachkontakten zeigen, die die relativen Bewegungen lediglich in einer Richtung einschränken. Natürlich ist der erhöhte Aufwand in der Fertigung und in den qualitätssichernden Maßnahmen für Rundkontakte mit in der Auswahl von Steckverbindern ganzheitlich zu betrachten.

Zu berücksichtigen ist noch die Leitungsrichtung in Bezug auf den Kontakt, die jedoch weiter zu untersuchen sind.

4.2. In Bezug auf thermische Ausdehnung

Hinsichtlich der unterschiedlichen thermischen Ausdehnung sind es folgende konstruktive Merkmale, die das Verhalten von Steckverbindern positiv verändern:

- Ein großes Taumelspiel zwischen Gehäuse und Kontakt
- Trägermaterialien der Steckverbinder auf beiden Seiten des Kontaktes mit möglichst ähnlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten

Taumelspiel

Ein großes Taumelspiel, beziehungsweise eine schwimmende Lagerung sorgt dafür, dass weniger Bewegungen auf die Kontaktstelle übertragen werden. Allerdings wird die Bewegungsfreiheit des Kontaktes auch durch die angeschlossene Leitung und die evtl. vorhandene Einzelleiterdichtung teilweise verhindert, welche ebenfalls zu berücksichtigen sind.

Thermische Ausdehnungskoeffizienten des Kontaktträgers bzw. des Gehäuses

Bei der Auswahl des Materials für den Kontaktträger bzw. das Gehäuse sollten Materialpaarungen möglichst vermieden werden, bei denen die thermischen Ausdehnungskoeffizienten sehr unterschiedlich ausfallen.

4.3. Kontaktoberflächenmaterial

Steckverbinder mit Silber- bzw. Gold-Schutzoberflächen zeigen eine eindeutige hohe Beständigkeit gegen Mikrobewegungen. Sie verhindern die Reibkorrosion dadurch, dass sie selbst nicht korrodieren und der Reibkorrosionsprozess erst nach dem Durchrieb der Schutzoberfläche startet und deswegen deutlich verzögert wird.

--- Ende Leitfaden (Anhang 1) ---

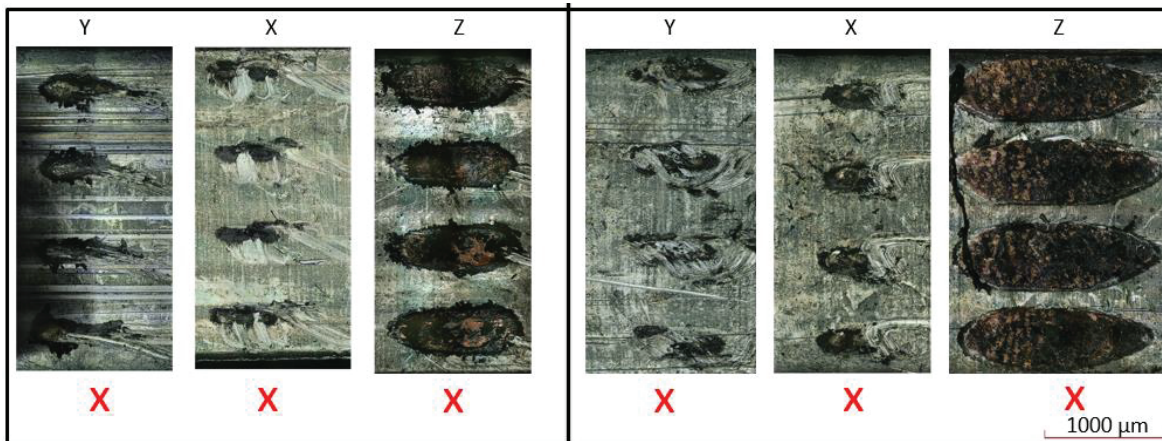
6.2 Messergebnisse Vibrationsprüfung mit Rauschanregung

Messergebnisse K1 Kontakte

Befestigungsoption	Median	Median	Median	Median	Median
Max. Freiheitsgrad	Ausfallzeit Einzelmessung [h]	Ausfallzeit 3-POL [h]	Länge l [μm]	Breite w [μm]	Höhe h [μm]
z-Richtung	0,07 \pm 0,05	0,07 \pm 0,02	1038 \pm 120	312 \pm 50	11 \pm 3
y-Richtung	4,6 \pm 2,5	kein Ausfall	587 \pm 60	225 \pm 25	4,7 \pm 0,5
x-Richtung	2,3 \pm 1,1	10,6 \pm 1,7	550 \pm 30	174 \pm 15	4,1 \pm 0,6
Kein Freiheitsgrad	Ausfallzeit Einzelmessung [h]	Ausfallzeit 3-POL [h]	Länge l [μm]	Breite w [μm]	Höhe h [μm]
z-Richtung	0,56 \pm 0,3	0,69 \pm 0,3	1900 \pm 500	510 \pm 80	24 \pm 6
y-Richtung	1,4 \pm 2,2	kein Ausfall	606 \pm 80	225 \pm 20	4,5 \pm 0,5
x-Richtung	1,55 \pm 0,8 [33 % Ausfaltrate]	kein Ausfall	571 \pm 40	186 \pm 15	4,5 \pm 0,5

CH1

CH2

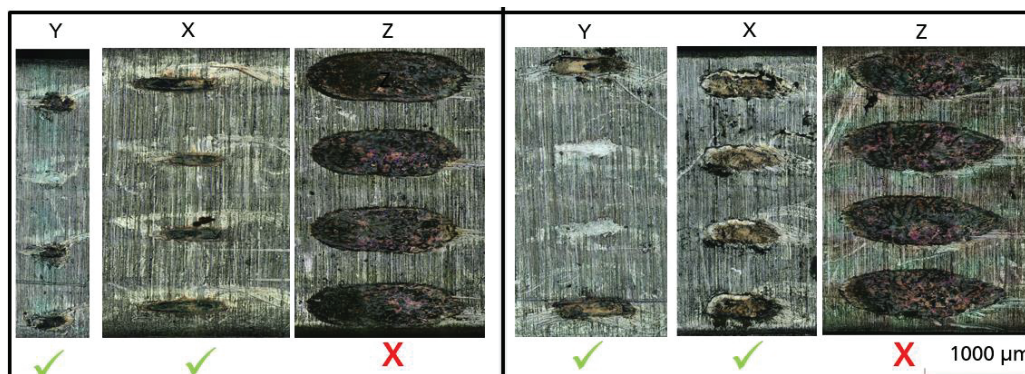


Messergebnisse K2 Kontakte

Befestigungsoption	Median	Median	Median	Median	Median
Max. Freiheitsgrad	Ausfallzeit Einzelmessung [h]	Ausfallzeit 3-POL [h]	Länge l [μm]	Breite w [μm]	Höhe h [μm]
z-Richtung	3,1 \pm 1,8	6,97 \pm 2,3	1240 \pm 150	424 \pm 30	24 \pm 4
y-Richtung	kein Ausfall	kein Ausfall	464 \pm 27	185 \pm 30	7 \pm 0,8
x-Richtung	kein Ausfall	kein Ausfall	440 \pm 15	156 \pm 17	7,7 \pm 0,5
Kein Freiheitsgrad	Ausfallzeit Einzelmessung [h]	Ausfallzeit 3-POL [h]	Länge l [μm]	Breite w [μm]	Höhe h [μm]
z-Richtung	0,6 \pm 0,09	2,85 \pm 1,1	1550 \pm 200	472 \pm 20	29 \pm 4
y-Richtung	kein Ausfall	kein Ausfall	540 \pm 35	158 \pm 25	8 \pm 0,6
x-Richtung	kein Ausfall	kein Ausfall	393 \pm 80	161 \pm 55	7 \pm 1

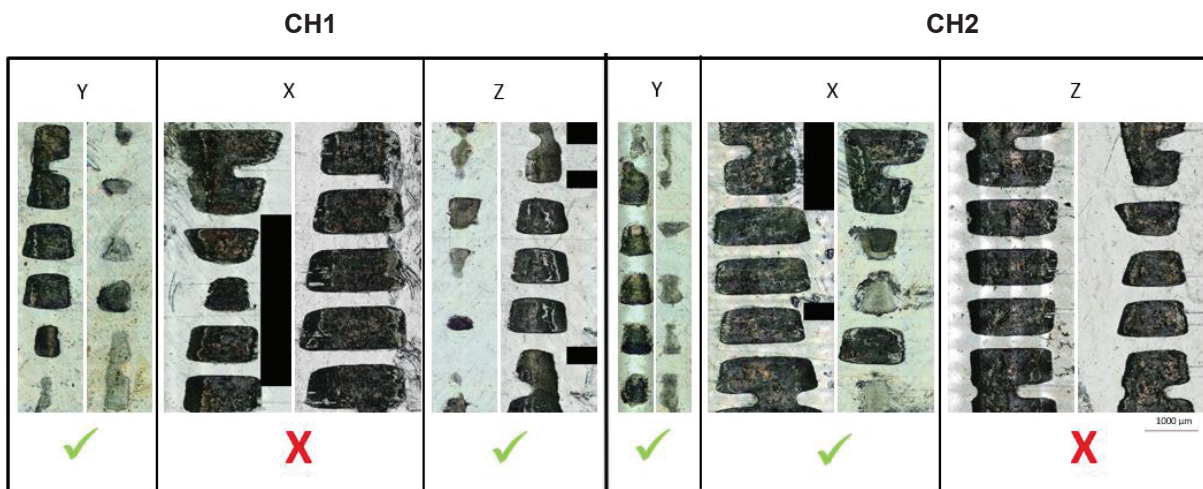
CH1

CH2



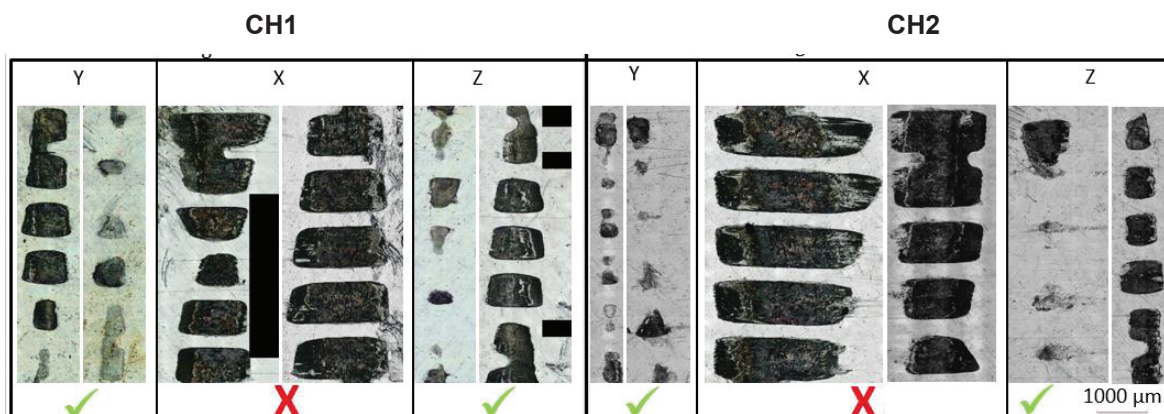
Messergebnisse K3 Kontakte

Befestigungsoption	Median	Median	Median	Median	Median
Max. Freiheitsgrad	Ausfallzeit [h]	Ausfallzeit 2-POL [h]	Länge l [μm]	Breite w [μm]	Höhe h [μm]
x-Richtung	10,8 \pm 3	12 \pm 2,2	1750 \pm 150	749 \pm 50	20 \pm 1,5
y-Richtung	keine Ausfälle	keine Ausfälle	455 \pm 70	590 \pm 50	5,9 \pm 1,5
z-Richtung	keine Ausfälle	keine Ausfälle	770 \pm 150	640 \pm 50	7,9 \pm 1,5
Kein Freiheitsgrad	Ausfallzeit [h]	Ausfallzeit 2-POL [h]	Länge l [μm]	Breite w [μm]	Höhe h [μm]
x-Richtung	keine Ausfälle	keine Ausfälle	750 \pm 150	640 \pm 50	9 \pm 1,5
y-Richtung	keine Ausfälle	keine Ausfälle	440 \pm 70	600 \pm 50	5,6 \pm 1,5
z-Richtung	5,0 \pm 3,4	keine Ausfälle	1500 \pm 120	750 \pm 50	20,4 \pm 1,5



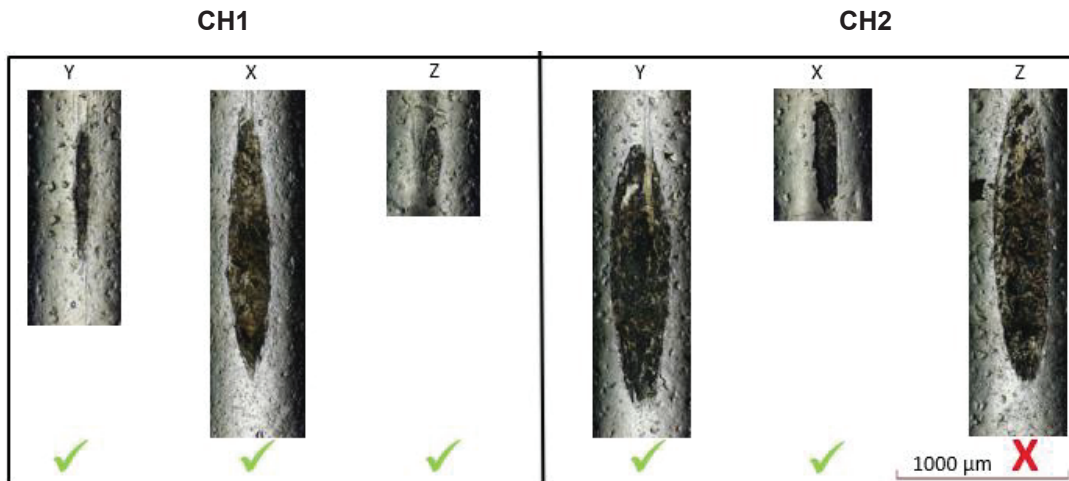
Messergebnisse K4 Kontakte

Befestigungsoption	Median	Median	Median	Median
Max. Freiheitsgrad	Ausfallzeit [h]	Länge [μm]	Breite [μm]	Höhe [μm]
x-Richtung	8,8 \pm 3	1748 \pm 400	756 \pm 60	20,2 \pm 4
y-Richtung	kein Ausfall	359 \pm 40	481 \pm 40	4,4 \pm 2
z-Richtung	kein Ausfall	647 \pm 10	625 \pm 10	7,9 \pm 2
Kein Freiheitsgrad	Ausfallzeit [h]	Länge [μm]	Breite [μm]	Höhe [μm]
x-Richtung	kein Ausfall	1085 \pm 150	734 \pm 10	12 \pm 1
y-Richtung	kein Ausfall	351 \pm 2	391 \pm 40	5,9 \pm 2
z-Richtung	1,2 \pm 0,1	2397 \pm 500	777 \pm 20	30,5 \pm 6,5

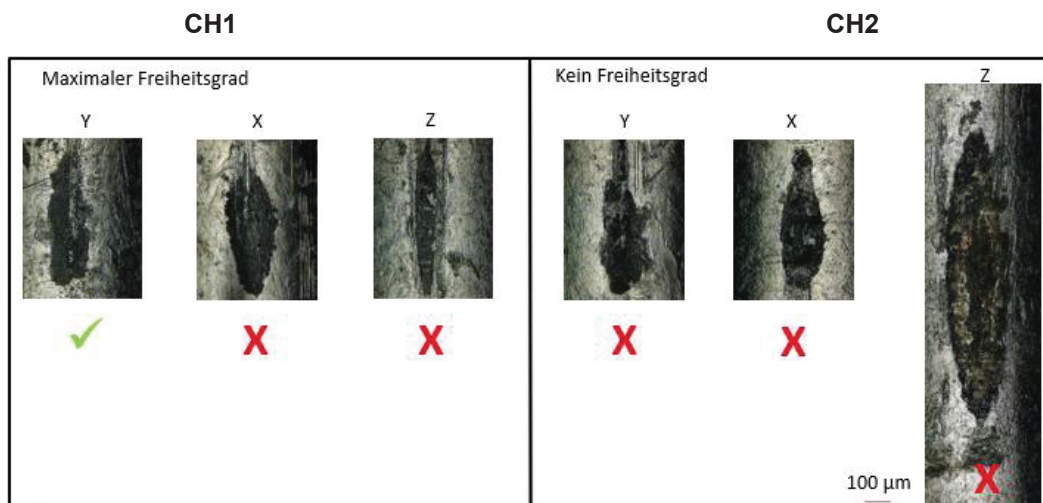


Messergebnisse K6 Kontakte

Befestigungsoption	Median	Median	Median	Median	Median
Max. Freiheitsgrad	Ausfallzeit [h]	Ausfallzeit 16-POL [h]	Länge l [μm]	Höhe h [μm]	Breite w [μm]
x-Richtung	x	x	697 \pm 250	7 \pm 6	162 \pm 50
y-Richtung	x	x	604 \pm 250	7 \pm 2	139 \pm 40
z-Richtung	x	x	333 \pm 90	6 \pm 6	133 \pm 40
Kein Freiheitsgrad	Ausfallzeit [h]	Ausfallzeit 2-POL [h]	Länge l [μm]	Höhe h [μm]	Breite w [μm]
x-Richtung	x	x	565 \pm 250	6 \pm 6	147 \pm 50
y-Richtung	x	x	1177 \pm 700	12 \pm 2	245 \pm 80
z-Richtung	17 \pm 5	x	1351 \pm 700	13 \pm 6	261 \pm 100

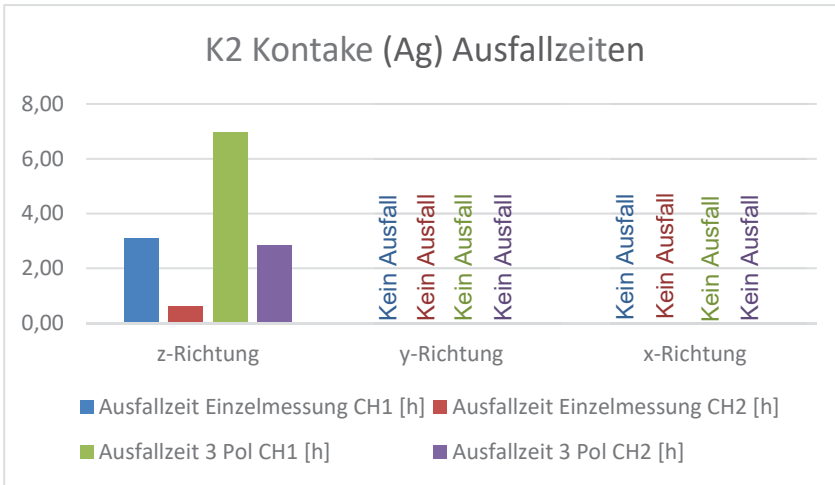
**Messergebnisse K5 Kontakte**

Befestigungsoption	Median	Median	Median	Median	Median
Max. Freiheitsgrad	Ausfallzeit [h]	Ausfallzeit 16-POL [h]	Länge l [μm]	Breite w [μm]	Höhe h [μm]
x-Richtung	2,8 \pm 2	x	630 \pm 100	222 \pm 30	5 \pm 1
y-Richtung	x	x	523 \pm 130	225 \pm 30	3,9 \pm 1
z-Richtung	0,38 \pm 0,1	2 \pm 0,1	511 \pm 240	172 \pm 30	5,7 \pm 1
Kein Freiheitsgrad	Ausfallzeit [h]	Ausfallzeit 16-POL [h]	Länge l [μm]	Breite w [μm]	Höhe h [μm]
x-Richtung	0,8 \pm 2	x	824 \pm 380	257 \pm 30	6 \pm 1
y-Richtung	0,25 \pm 0,1	x	729 \pm 130	200 \pm 30	4,9 \pm 1
z-Richtung	0,18 \pm 0,1	0,8 \pm 0,1	876 \pm 240	245 \pm 30	6,2 \pm 1

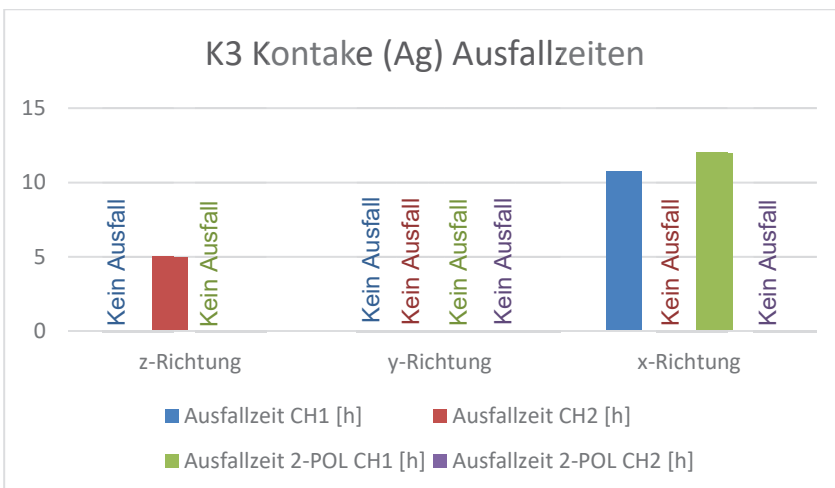


Vergleich Einzelbestückung (S1) / Vollbestückung (S2)

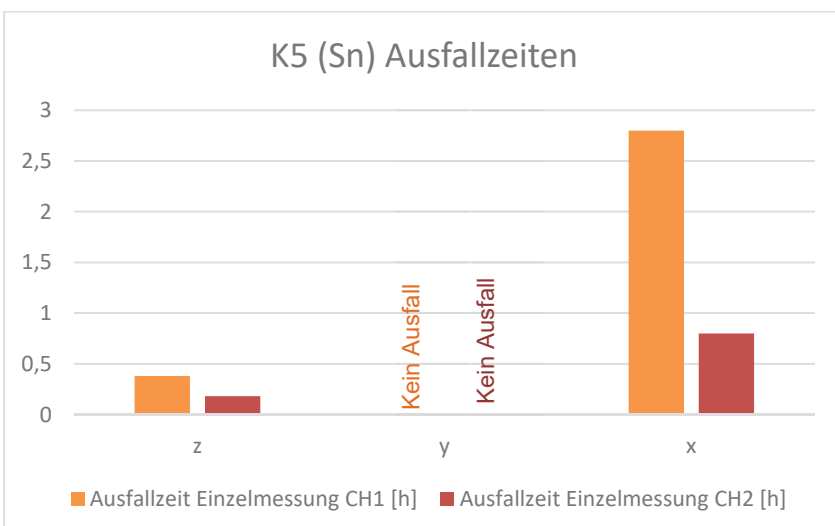
K2 Kontakte



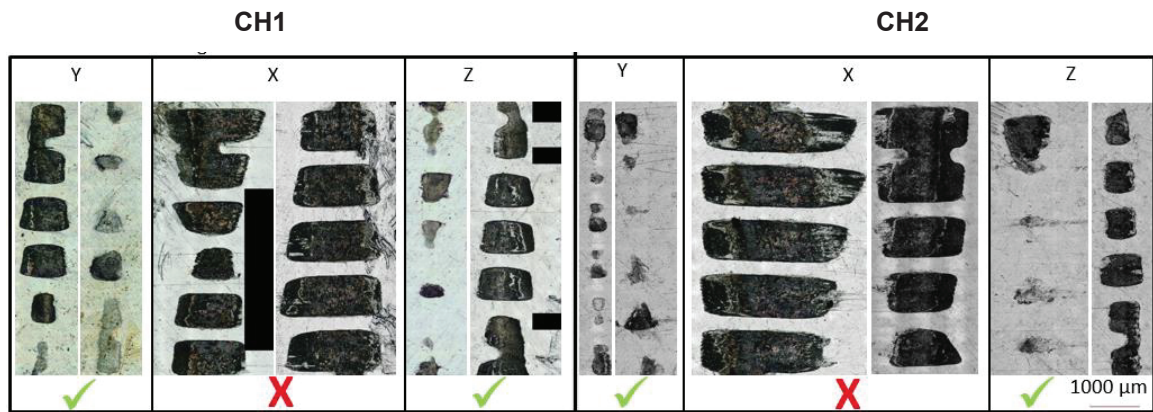
K3 Kontakte



K5 Kontakte

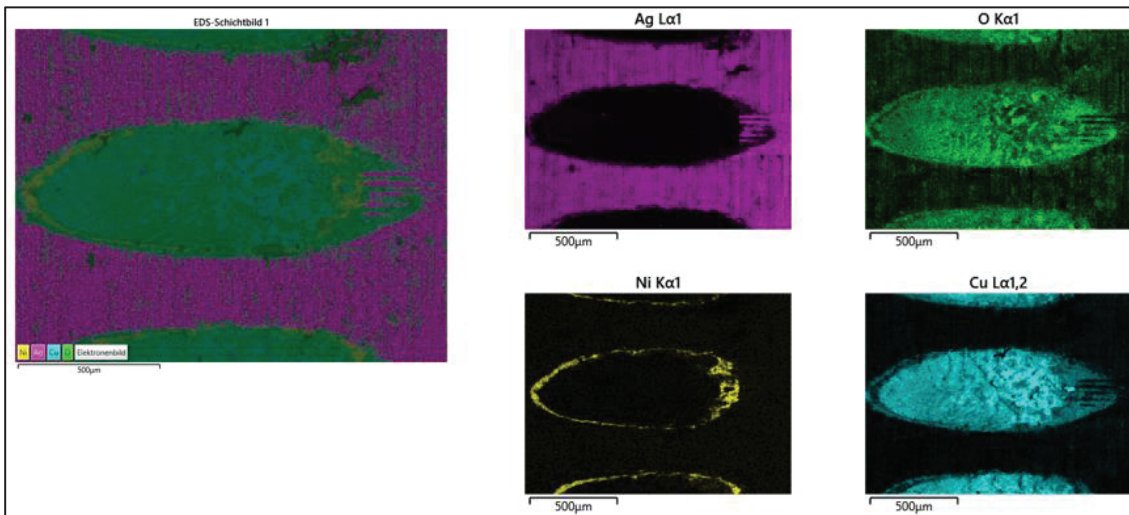


Vergleich K3 (ELA) und K4 (kein ELA) Kontakten

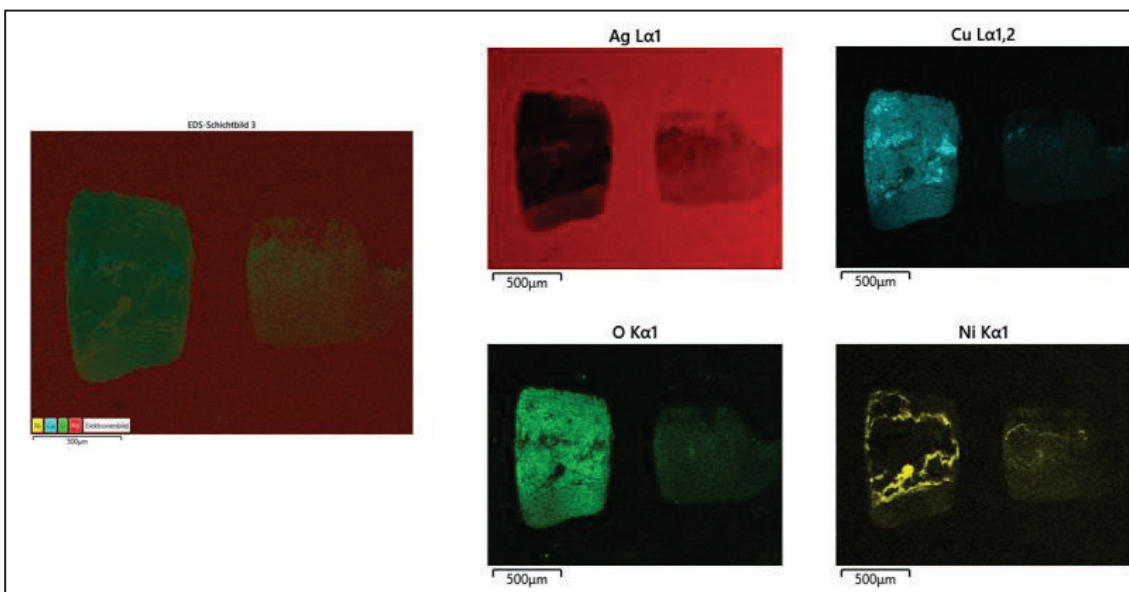


EDX Verteilungsbild ausgefallener nicht ausgefallener Kontakte

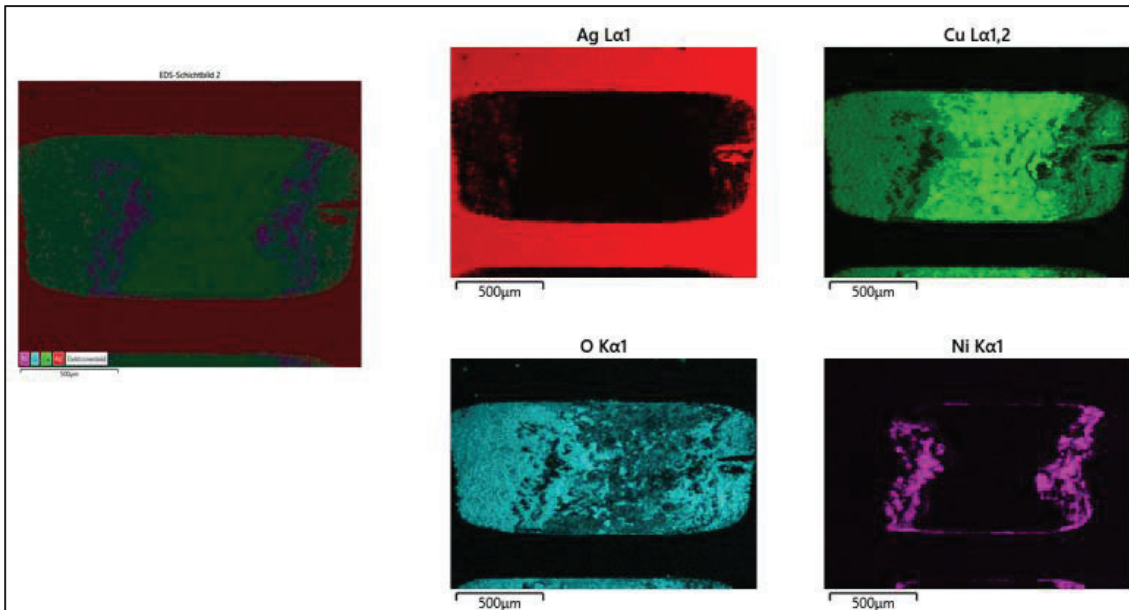
K2 Kontakte: Ausfall



K3 Kontakte: kein Ausfall



K3 Kontakte: Ausfall

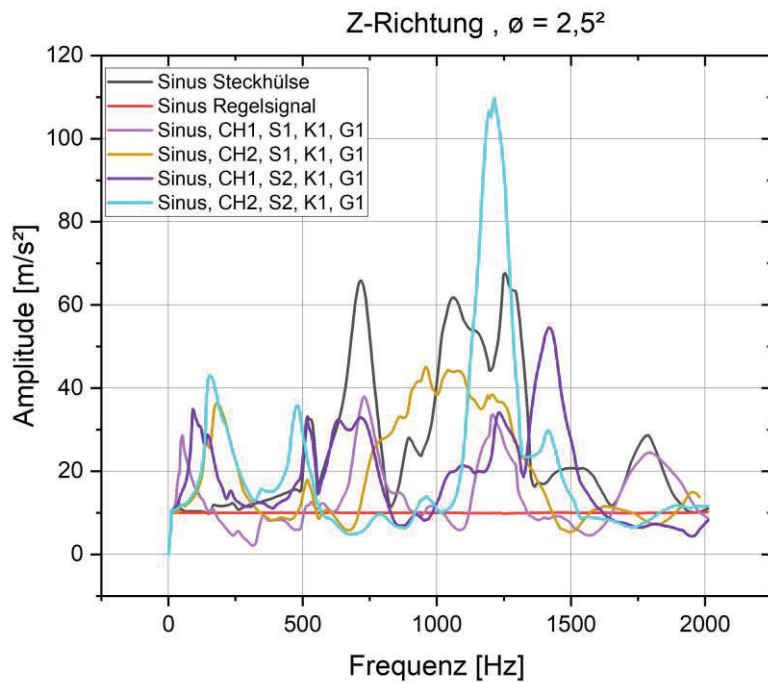


Resonanzanalyse für Kontakte K1 mit Gehäuse G1 und für Versuchsserien S1, S2

Anregungstyp: Gleitsinus

Beschleunigung a: 10 m/s²

Frequenzänderung: 1 Oktave/min

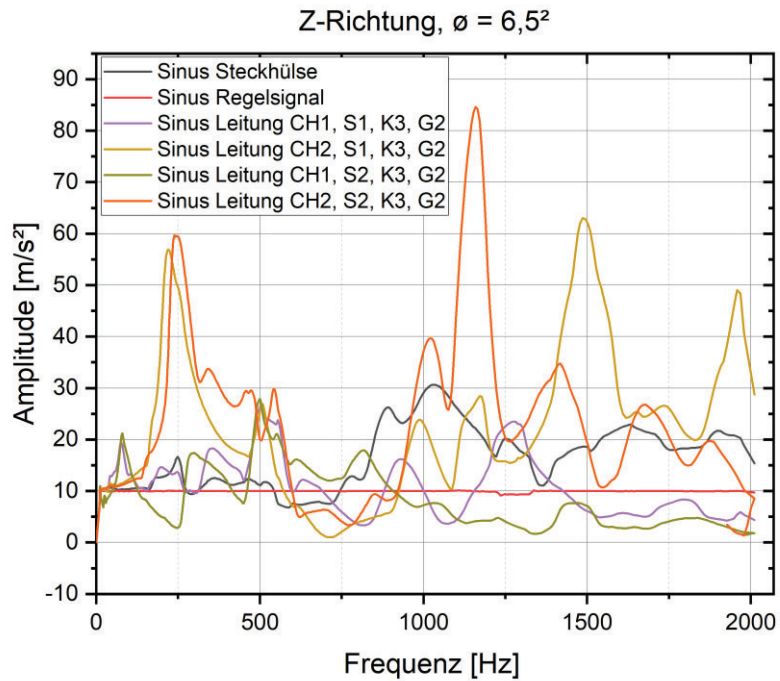


Resonanzanalyse für Kontakte K3 mit Gehäuse G2 für Versuchsserien S1, S2

Anregungstyp: Gleitsinus

Beschleunigung a: 10 m/s²

Frequenzänderung: 1 Oktave/min





Forschungsvereinigung
Antriebstechnik e.V.
Postfach 710864
60498 Frankfurt
Lyoner Straße 18
60528 Frankfurt

Tel +49.69.6603-1515
Fax +49.69.6603-2515

info@fva-net.de
www.fva-net.de