

Automatisierte Kontaktierungsverfahren für flachleiterbasierte Pkw-Bordnetzsysteme

Der Technischen Fakultät der
Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg
zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Michael Spahr
aus Treuchtlingen

Als Dissertation genehmigt von
der Technischen Fakultät der
Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen Prüfung:	tbd. xx.xx.2017
Vorsitzender des Promotionsorgans:	Prof. Dr.-Ing. R. Lerch
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. J. Franke Prof. Dr.-Ing. K. Helmreich

Michael Spahr

Automatisierte Kontaktierungsverfahren für flachleiterbasierte Pkw-Bordnetzsysteme

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

Mein Dank gilt...

Erlangen, im xx 2017

Michael Spahr

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung.....	1
2	Herausforderungen der Bordnetzproduktion durch den technischen Wandel des Automobils	4
2.1	Spezifische Herausforderungen an Komponenten, Prozesse und Systeme der heutigen Bordnetzproduktion und -montage	6
2.1.1	Bordnetzkomponenten	7
2.1.2	Entwicklung und Produktion von Kabelbäumen	9
2.1.3	Kabelbaummontage	10
2.1.4	Fehler bei der Kabelbaummontage	12
2.2	Wandel der Bordnetzarchitektur	13
2.2.1	Zukünftige Fahrzeugfunktionen.....	13
2.2.2	Zukünftige Bordnetzentwicklung und -produktion	16
2.2.3	Handlungsfelder durch die Anforderungen an das zukünftige Bordnetz	19
2.3	Innovative Signal- und Leistungsnetzwerke im Automobil	20
2.3.1	Additiv generierte Leiterstrukturen	21
2.3.2	Zentrale Massivleiter	23
2.3.3	Flex-Wiring-Verbindungstechnologien	24
2.3.4	Potentiale durch den Einsatz innovativer Leiterstrukturen	28
2.4	Potentiale flachleiterbasierter Bordnetzsysteme	31
2.4.1	Aktuelle Anwendungen im Automobil.....	31
2.4.2	Ansätze zur automatisierten Konfektionierung und Montage von Flachleiterkabelsätzen	32
2.5	Kontaktierungstechnologien für flexible Flachleiter.....	34
2.5.1	Prozesse zum Entfernen der Isolationsschicht	35

2.5.2	Stoffschlüssige Kontaktierverfahren.....	36
2.5.3	Kraft- und formschlüssige Verbindungsverfahren	38
2.6	Ableitung des Forschungsbedarfs und Lösungsweg der Arbeit.....	40
3	Flexibel einsetzbare und automatisierungsgerechte Kontaktierungsverfahren für Flachleiter	43
3.1	Einbauortabhängige Anforderungen an die Kontaktierungstechnologie durch die Teilkomponenten des Kontaktsystems.....	44
3.1.1	Flexible Flachleiter als Leiterstruktur des Bordnetzes	47
3.1.2	Trägersubstrat als Montageplattform	48
3.1.3	Elektronikkomponente mit integriertem Kontaktelement	50
3.2	Automatisierungseignung bekannter Kontaktierungsverfahren für flexible Flachleiter	53
3.2.1	Anforderungen an das Kontaktierungsverfahren.....	54
3.2.2	Evaluation bekannter Kontaktierungsverfahren	55
3.2.3	Ableitung von Handlungsfeldern für die Erforschung einer automatisierungsgerechten Kontaktierungstechnologie.....	57
3.3	Verfahrensprinzip der Feder-Klammer-Direktkontaktierung.....	58
3.3.1	Funktionsweise und Verfahrensvarianten	58
3.3.2	Verkürzung der bisherigen Produktions- und Montagekette von Kabelsätzen	62
3.3.3	Anwendungsbeispiele der neuartigen Kontaktierungstechnologie.....	63
4	Prozesseinflussgrößen der Feder-Klammer-Direktkontaktierung	65
4.1	Grundlegende Prozessbeschreibung.....	66
4.1.1	Phasen des Kontaktierungsprozesses	68
4.1.2	Numerisches Modell zur Beschreibung der Kraftkomponenten ...	71
4.1.3	Analytisches Modell zur Beschreibung der Kraftkomponenten	73

4.1.4	Analytische Betrachtung des Kontaktwiderstandes	80
4.2	Einfluss des Kontaktelements auf das Kontaktierungsverfahren	82
4.2.1	Anstellwinkel	83
4.2.2	Schneidengeometrie	85
4.2.3	Federsteifigkeit.....	88
4.3	Mechanische Eigenschaften des Flachleiters.....	90
4.3.1	Durchtrennkraft von Isolation und Leiter	90
4.3.2	Schälfestigkeit und Leiterhaftsitz.....	93
4.3.3	Zugfestigkeit des Isolationswerkstoffs.....	96
4.4	Einfluss des Gehäuses und des Trägersubstrats auf das Kontaktsystem	97
4.4.1	Geometrie des Gehäuses	98
4.4.2	Steifigkeit des Trägersubstrates.....	99
4.5	Verfahrensgrenzen des Kontaktierungsprozesses	102
5	Langzeitzuverlässigkeit der Feder-Klammer-Direktkontaktierung	105
5.1	Schädigungsmechanismen elektrischer Klemmkontakte.....	106
5.1.1	Mechanische Schadensarten.....	108
5.1.2	Elektrische Schadensarten	108
5.1.3	Chemische Schadensarten	109
5.2	Belastungsartabhängige Widerstandserhöhung	110
5.2.1	Temperaturschock	110
5.2.2	Vibration.....	116
5.2.3	Überlagerte Belastungen	120
5.3	Schadensbilder der Kontaktflächen	125
5.3.1	Fremdschichten	126
5.3.2	Mechanischer Verschleiß.....	129
5.3.3	Kontaktierungsfehler	131

5.4	Anwendung von Raffungsmodellen zur Vorhersage der lastabhängigen Ausfallwahrscheinlichkeit	132
5.4.1	Theoretische Ansätze der angewandten Raffungsmodelle	135
5.4.2	Vergleichende Bewertung der Raffungsmodelle	137
5.5	Anwendungspotentiale für eine zuverlässige Verbindungstechnologie im Kfz	139
6	Hochfrequenz-Eigenschaften der Feder-Klammer-Direktkontaktierung ..	144
6.1	Anforderungen an die Übertragung hoher Datenraten.....	144
6.1.1	Moderne Bussysteme im Kraftfahrzeug	144
6.1.2	Hochfrequenztechnische Störgrößen koplanarer Leiter	146
6.1.3	Messtechnische und simulative Untersuchung der Verbindungstechnologie	148
6.2	Einflüsse der Feder-Klammer-Geometrie auf die Übertragungseigenschaften	152
6.2.1	Längenänderung der Federklammersegmente	153
6.2.2	Anstellwinkel, Federdicke und –breite.....	154
6.2.3	Vergleichende Bewertung der geometrischen Einflussgrößen...	155
6.3	Potentiale bei der Übertragung hoher Datenraten	156
7	Zusammenfassung und Ausblick	158
8	Summary.....	162
9	Abkürzungsverzeichnis	165
10	Nomenklatur	167
11	Anhang.....	170
12	Literaturverzeichnis	177

1 Einleitung und Zielsetzung

Fahrzeugsicherheit, -effizienz und -ausstattung gehören zu den wesentlichen Entscheidungskriterien für den Neukauf eines Automobils. In allen Bereichen beruht der technologische Fortschritt zumeist auf Funktionen, die mittels elektronischer Komponenten realisiert werden. Diese Entwicklung spiegelt sich auch in dem stetig steigenden Komplexitätsgrad von Bordnetzsystemen wider, der trotz des verstärkten Einsatzes fortschrittlicher Bussysteme an Gewicht und Bauraum mehr und mehr zunimmt [1].

Problemstellung

In der Konsequenz ist das Bordnetz zu einer der schwersten und teuersten Komponenten in modernen Fahrzeugen geworden. Neben dem steigenden Elektrikeinsatz sind hierbei insbesondere die manuelle Konfektionierung und Montage des Kabelbaumes für die hohen Kosten verantwortlich, da aufgrund der großen Variantenvielfalt und der aufwendigen Handhabung eine Automatisierung auf Basis herkömmlicher Technologien bis heute wirtschaftlich nicht umgesetzt werden konnte [2]. Vor diesem Hintergrund wurden Entwicklungen zu neuartigen Leiterstrukturen vorangetrieben, die vor allem eine deutlich einfachere Handhabung mit automatisierten Systemen und eine bessere Integrierbarkeit in das heutige Fahrzeug versprechen.

Der Einsatz von flexiblen Flachleitern (Flexible Flat Cable: FFC) weist hierbei enorme technologische Möglichkeiten auf. Die Ergebnisse unterschiedlicher Forschungsansätze belegen dabei, dass eine automatisierte Konfektionierung und Montage von flachleiterbasierten Kabelsätzen nach heutigem Stand der Technik bereits möglich ist [3; 4; 5]. Um das Potenzial dieser innovativen Leiterstrukturen nutzen zu können, fehlt jedoch bislang eine geeignete Kontaktierungstechnologie, die dazu befähigt, Elektronikkomponenten automatisiert in ein flachleiterbasiertes Bordnetzsystem zu integrieren.

Dieser Zustand begründet die bisher nur geringe Marktdurchdringung von Flachleitern für Bordnetzstrukturen, da der wesentliche Baustein einer universellen und automatisierten Kontaktierung für diese an sich gut automatisiert montierbare Leiterart derzeit nicht zur Verfügung steht. Insgesamt fehlt bis heute eine fundierte wissenschaftliche Grundlage, auf der unter Berücksichtigung der jüngsten Forschungsergebnisse im Bereich flexibler Flachleiter, tragfähige Kontaktierungslösungen erarbeitet werden können [3; 4; 5].

Zielsetzung und Vorgehensweise

Vor diesem Hintergrund ist die übergeordnete Zielstellung der vorliegenden Dissertation, Kontaktierungsverfahren zu erarbeiten und grundlegend zu

qualifizieren, mit denen eine automatisierbare Anbindung von elektronischen Komponenten an flachleiterbasierte Bordnetzstrukturen möglich wird. Hierbei sollen insbesondere Kontaktierungs- und Automatisierungslösungen erforscht werden, mit denen eine elektrische Anbindung von Elektronikkomponenten direkt im Einbauort des Automobils (z.B. Türmodul, Dachhimmel, Armaturenbrett, Innenraumboden, Motorraum oder Fahrwerk) möglich wird, um das Potenzial von Flachleitern als Leiterstuktur für eine ganzheitlich automatisierte Bordnetzproduktion und –montage vollumfänglich auszuschöpfen.

Um die zu entwickelnde Kontaktierungstechnologie in unterschiedlichen Einbauorten des Automobils einsetzen zu können, liegt ein besonderer Fokus auf der Analyse der einbauortabhängigen Anforderungen an die elektrische Verbindungstechnologie im Kfz. Neben bauraumspezifischen und funktionalen Themenstellungen, wie der Pinanzahl, oder dem anzuschließenden Leiterquerschnitt sollen hierbei auch die stark vom Einbauort abhängigen Umweltaforderungen in die Überlegungen mit einbezogen werden [6].

Ziel ist es hieraus die Lösung für ein universell einsetzbares Kontaktierungsverfahren abzuleiten, welches sowohl den geometrischen und werkstofftechnischen Anforderungen, als auch den Zuverlässigkeitsanforderungen im Kfz gerecht werden kann und eine hohe Flexibilität in der Anwendung verspricht.

Ausgehend von der Darstellung des aktuellen Standes der Forschung und Entwicklung im Bereich der Kontaktierungstechnologien für FFC, werden die vorgestellten Kontaktierungsverfahren auf Basis der definierten Anforderungen hinsichtlich Flexibilität, Komplexität und Zuverlässigkeit vergleichend bewertet. Aus den Ergebnissen wird ein geeignetes Verfahren ausgewählt, welches das höchste Potenzial verspricht, einbauortübergreifend als flexible Kontaktierungstechnologie für Elektronikbaugruppen in flachleiterbasierten Bordnetzsysteme fungieren zu können.

Zur Bestimmung der Prozesseinflussgrößen im Kontext des Forschungsziels dieser Arbeit steht zu Beginn die exakte Prozessbeschreibung mithilfe numerischer, analytischer und messtechnischer Methoden. Randbedingungen der Untersuchung sind dabei die definierten einbauortabhängigen Anforderungen des Kfz. Diese methodische Vorgehensweise soll neben der Bestimmung der Prozesseinflussgrößen gleichzeitig die Universalität des Kontaktierungsverfahrens in Bezug auf die Anwendbarkeit in unterschiedlichen Einbauorten nachweisen.

Für die Erforschung der Langzeitzuverlässigkeit der Kontaktierungstechnologie werden umfangreiche Dauerbelastungstestreihen durchgeführt. Als Basis hierfür dienen die definierten einbauortabhängigen Umweltaforderungen, beschrieben durch geltende Prüfnormen und Lieferantenvorschriften für Steckverbinder und Elektronikkomponenten im Kfz. Die durchgeführten Lebensdaueruntersuchungen sollen in geraffter Form gezielt Degradationsmechanismen in der Kontaktstelle

hervorrufen und die Analyse spezifischer Schädigungsmechanismen zulassen. Neben thermisch induzierten Alterungsmechanismen sollen auch die Ergebnisse aus Vibrationsbelastungen Forschungsgegenstand dieser Arbeit sein. Darüber hinaus soll die Anwendbarkeit von analytischen Raffungsmodellen zur Lebensdauervorhersage der elektrischen Verbindung in Abhängigkeit des Belastungsgrades vorgestellt werden.

Da auch die Anforderungen an die Signalübertragung moderner Kommunikations- und Bussystemen im Kfz immer weiter ansteigen, sollen ebenfalls die Hochfrequenzeigenschaften der zu erforschenden Kontaktierungstechnologie thematisiert werden. Messtechnische, aber auch numerische Studien dienen dabei dem Nachweis, hohe Datenraten verlustarm über die elektrische Verbindung führen zu können.

Die vorliegende Dissertation soll einen Lösungsweg für die charakterisierten Zielstellungen beschreiben und eine Kontaktierungstechnologie vorstellen, die dazu befähigt, Elektronikkomponenten in ein auf Flachleitern basierendes Bordnetzsystem automatisiert zu integrieren.

2 Herausforderungen der Bordnetzproduktion durch den technischen Wandel des Automobils

In der Literatur wird das System Bordnetz als Sammelbegriff für die Gesamtheit aller elektrischen und elektronischen Komponenten in einem Fahrzeug verstanden [7]. Das Bordnetz umfasst somit neben dem Kabelbaum, welcher alle zur Signalübertragung und Energieversorgung notwendigen Leitungen beinhaltet, auch alle Elektronikkomponenten (Steuerungs- und Regelungseinheiten) im Kfz [8; 9]:

Bordnetz: Kabelbaum und Elektronikkomponenten

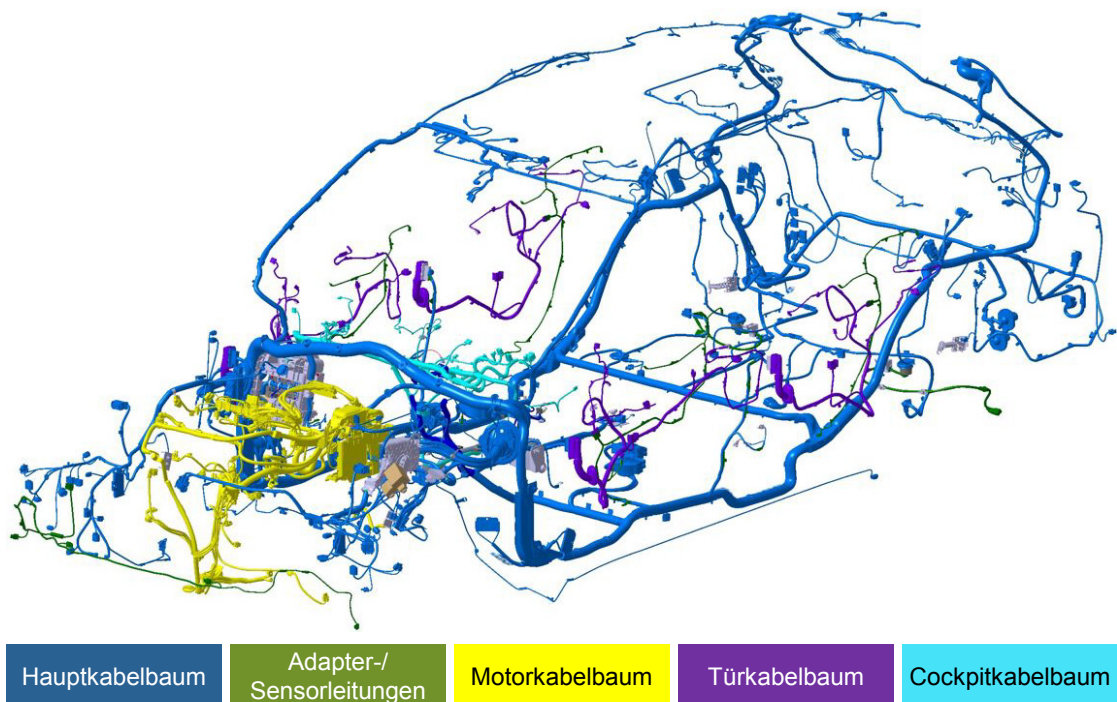


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Teilmodule eines Kabelbaums¹

Der Kabelbaum setzt sich aus mehreren einzelnen Kabelsätzen zusammen, die für unterschiedliche Bauräume, wie z.B. Cockpit, Dachhimmel, Frontend, Heckklappe und Türen, modular ausgeführt sind und eine flexible Montage des Kabelbaums im Automobil ermöglichen (Abbildung 1) [10; 11]:

Kabelbaum: Modular ausgeführte Kabelsätze

Jeder einzelne Kabelsatz besteht dabei neben den Leitungen zur Signal- und Leistungsführung aus einer Vielzahl an Teilkomponenten wie Stecker, Kontaktelemente, Clips und Bandagen [12]:

Kabelsatz: Leitungen und Stecker, Kontaktelemente, Clips und Bandagen

¹ Kabelbaumstruktur eines BMW X1 der Fa. LEONI Bordnetz-Systeme GmbH

Das Bordnetz ist eine der schwersten und teuersten Komponenten im Kfz, in seiner Gesamtheit gleichzeitig aber auch das komponentenübergreifende Übertragungssystem zur Sicherstellung aller Fahrzeugfunktionen. Die zentralen Innovationen durch neue elektronische Funktionen werden durch die Komplexität und Vielfalt üblicher Bordnetze erheblich beeinflusst. Obwohl das Bordnetz nicht im unmittelbaren Einflussbereich des Anwenders liegt, ist es hinsichtlich der Qualität und Zuverlässigkeit des Gesamtsystems Fahrzeug von entscheidender Bedeutung. Seine Struktur bildet sowohl das Signal- als auch das Leistungsnetzwerk im Fahrzeug ab.

Die fortschreitende Digitalisierung und der vermehrte Einsatz echtzeitfähiger Überwachungssysteme erfordert die Verarbeitung immer größerer Datenraten von 25 Mbit/s und mehr [13]. Die Signalebene des Bordnetzes besteht deshalb aus komplexen Kabelsystemen zur Übertragung elektrischer und optischer Signale von Sensoren, Aktoren und Steuerungen [14].

Da auch die elektrische Energie der Aktoren sowie Beleuchtungs- und Informationssysteme über Kabelnetze leistungsgerecht zur Verfügung gestellt wird, stellt das Bordnetz auch die Energieebene für alle elektrischen und elektronischen Verbraucher dar. Die zunehmende Elektrifizierung der Mobilität durch ökologische, politische und gesellschaftliche Veränderungen lässt die zu führende elektrische Leistung kontinuierlich wachsen und stellt dadurch die Bordnetzproduktion vor große technologische Herausforderungen [15]. Die Signal- und Leistungsvernetzung bestimmt in entscheidendem Maße Funktionalität und Zuverlässigkeit, Baugröße und -gewicht, aber vor allem auch die Wertschöpfung des Automobils. Bordnetzproduzenten nehmen im für Deutschland essenziellen Automotivesektor daher eine entscheidende Rolle ein und konnten in den vergangenen Jahren ihre Technologieposition, aber auch das Umsatzwachstum und die Beschäftigungszahlen weiter ausbauen. [16]

Dem technischen Wandel in der Automobilindustrie stehen zukünftig schwerwiegende Herausforderungen in der Bordnetzproduktion bevor. Um der steigenden Komplexität durch mehr und mehr elektrische Funktionen im Automobil begegnen zu können, müssen die heute eingesetzten Produktionsverfahren weiterentwickelt und neue technologische Wege beim Aufbau des Bordnetzes beschritten werden.

Kapitel 2 dieser Arbeit erläutert die spezifischen Herausforderungen, welche an Komponenten, Prozesse und Systeme zur Fertigung und Montage heutiger Bordnetze gestellt werden und leitet gleichzeitig Anforderungen, aber auch Handlungsfelder, die sich aus den zukünftigen Entwicklungstrends der Bordnetzarchitektur ergeben, ab. Mit der Vorstellung innovativer Lösungsansätze für moderne Signal- und Leistungsnetzwerke und der Darstellung ihrer Potenziale, werden technologische Lösungsansätze aufgezeigt, aus denen sich der aktuelle Forschungsbedarf für die zukünftige Bordnetzproduktion ableiten lässt.

2.1 Spezifische Herausforderungen an Komponenten, Prozesse und Systeme der heutigen Bordnetzproduktion und -montage

Grundsätzlich kann mit dem Stufenkabelbaum (SKB) und dem kundenspezifischen Kabelbaum (KSK) zwischen zwei Produktionsstrategien des Kabelbaums unterschieden werden. Stufenkabelbäume haben ca. 20-70 Varianten, ein KSK theoretisch unendlich viele [7].

Der **Stufenkabelbaum** stellt die herkömmliche Kabelbaumtechnik dar. Er wird abhängig von der Ausstattung oder Länderausführung des Fahrzeugmodells zusammengestellt und fasst die für Premiumfahrzeuge üblichen Sonderausstattungen zu Paketen zusammen. Angefangen bei der Minimal- bis hin zur Maximalausstattung nehmen die Stufen an Umfang zu, d.h. für bestimmte Ausstattungskonfigurationen durch den Kunden muss die nächsthöhere Ausstattungsstufe des Kabelbaums im Kfz verbaut werden. Ein Vorteil des SKB ist, dass er unabhängig von der Kundenkonfiguration des Fahrzeugs im Vorfeld produziert werden kann. Der wesentliche Nachteil ergibt sich aus dem Stufensystem selbst. Bestimmte Konfigurationen erfordern den Einsatz einer höheren Ausbaustufe des Kabelsatzes, wodurch es zum Verbau von sogenannten Blindleitungen, d.h. nicht angeschlossene Leitungen, im Kfz kommen kann.

Der **kundenspezifische Kabelbaum** wird auf das jeweilige Fahrzeug und dessen Ausstattungsgrad spezifisch ausgelegt und gefertigt. Aufgrund des großen und frei kombinierbaren Ausstattungsangebots moderner Fahrzeuge ergibt sich daraus ein gewichts- und ressourcenoptimaler Kabelsatz. Da der KSK jedoch nicht vorproduzierbar ist, werden gleichzeitig hohe Anforderungen an die Produktions- und Logistikabläufe gestellt, um eine fristgerechte Lieferung zum Endmontageort gewährleisten zu können. Die Ausstattungskonfiguration von Fahrzeugmodellen, bei denen ein KSK verbaut wird, kann in der Regel bis zu 14 Tage vor Produktionsstart geändert werden. In dieser Zeit muss der Auftrag an den Bordnetzproduzenten übermittelt, der Kabelsatz ausgelegt, konfiguriert, produziert und schließlich zum Produktionsstandort des OEM² transportiert werden. [17]

Die Produktion von Kabelsätzen erfolgt meist nicht am Produktionsstandort des Automobils, sondern ist in Niedriglohnländer, wie Rumänien, Polen oder Tunesien, ausgelagert. Die Variantenvielfalt des Kabelbaums verdeutlicht somit nicht nur die Komplexität des individuellen Bordnetzes, sondern zeigt ebenfalls auf, dass eine zuverlässige, schnelle und dennoch kostengünstige Produktion mit einem sehr hohen logistischen Aufwand verbunden ist. [15][2]

Das Gewicht des Kabelsatzes am Beispiel des Mittelklassefahrzeugs Audi A4 B8 beträgt je nach Ausstattungsvariante zwischen 30 – 50 kg. Etwa die Hälfte des

² Original Equipment Manufactur (engl.); Erstausrüster, bzw. in diesem Kontext Automobilhersteller

Gesamtgewichts ergibt sich dabei aus den Leitungen. Gehäuse, Kontaktelemente, Clips und Bandagen rufen die übrigen 50 % des Gesamtgewichts hervor. Bei Betrachtung der zeitlichen Entwicklung der verbauten Einzelkomponenten für die Baureihen B6 (Produktionsjahre 2000 - 2004) und B8 (Produktionsjahre 2007-2015) wird der zunehmende Umfang des Bordnetzes deutlich (Abbildung 2). [1]

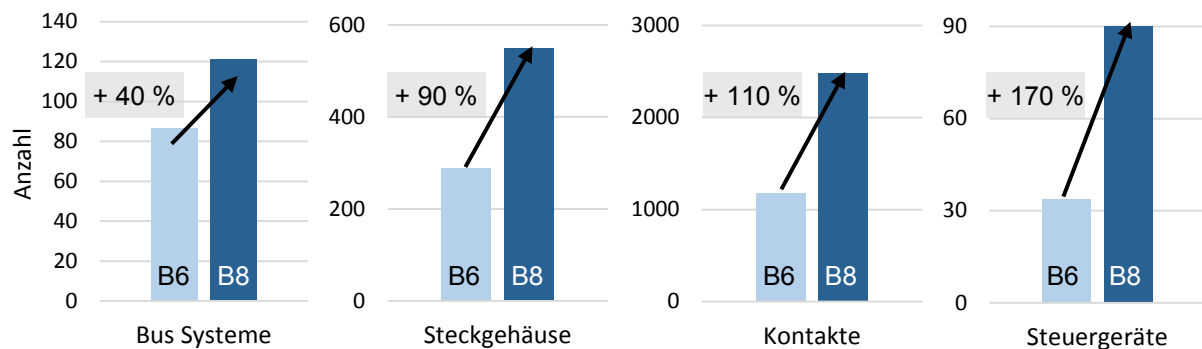


Abbildung 2: Steigende Bordnetzkomplexität am Beispiel des Modells Audi A4 in Anlehnung an [1]

Durch die stetig anwachsende Komplexität ergeben sich spezifischen Herausforderungen an Komponenten, Prozesse und Systeme in der heutigen Bordnetzproduktion und -montage. Unterschiedliche Stellgrößen für die Optimierung des Bordnetzes, wie z.B. Variantenreduzierung, Reduzierung von Gewicht und Volumen oder neue Fertigungs- und Montageprozesse sind hierbei Adressaten aktueller und zukünftiger Forschungsaktivitäten.

2.1.1 Bordnetzkomponenten

Die elektrischen und elektronischen Komponenten im Kfz, welche durch die modularen Kabelsätze miteinander vernetzt sind, lassen sich nach ihrer Funktion in Sensoren und Eingabegeräte, Aktoren und Ausgabegeräte beziehungsweise Steuergeräte untergliedern [9]. Dabei setzen sich die beiden Integrationsebenen des Kabelbaums und der E/E-Komponenten aus unterschiedlichen Teilkomponenten zusammen und bilden gemeinsam das physische Bordnetz ab (Abbildung 3).

Leiter und Fixierungselemente

Generell können die Leitungen des Kabelbaums in signal- und leistungsführende Strompfade unterteilt werden. Für leistungstechnische Anwendungen kommen primär flexible Litzenleiter zum Einsatz, die sich aus bis zu 4000 Einzelleitern zusammensetzen und dadurch eine flexible Montage im Bauraum des Kfz ermöglichen. Neben der Leistungsübertragung dienen Litzenleiter zusätzlich auch als Signalleitungen bei niedrigen Frequenzen von bis zu 2,8 MHz [18]. Bei der Übertragung höherer Datenraten, z.B. bei der Vernetzung von Radar- oder Funksystemen, finden Koaxialleiter oder verdrehte, sogenannten Twisted-Pair-Leitungen ein breites Anwendungsfeld. Ein zunehmender Trend zeichnet sich durch

den Einsatz von Lichtwellenleitern ab, mit denen sehr hohe Datenströme z.B. von Multimedia-Komponenten übertragen werden können. Da Kabelsätze meist aus unterschiedlichen Ästen mit mehreren parallel verlaufenden Einzelleitungen bestehen, werden Kabelsätze mithilfe von Bandagen gebündelt. Weiterhin dienen Kabelkanäle, Clips und andere Befestigungselemente als zusätzliche Teilkomponenten des Kabelsatzes, um eine definierte, ortsfeste Montage im Kfz sicherzustellen.


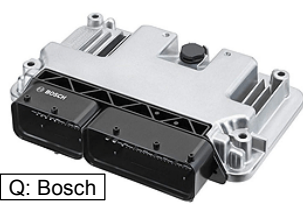
Kabelsatz				E/E-Komponente
				
(a) Leiter <ul style="list-style-type: none"> ▪ Litzenleiter ▪ Massivleiter ▪ Twisted-Pair-Leiter ▪ Koaxialleiter ▪ Lichtwellenleiter 	(b) Fixierungselement <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bandagen ▪ Clips ▪ Befestigungselemente ▪ Wellrohre und Kabelkanäle 	(c) Kontaktelement <ul style="list-style-type: none"> ▪ Flachsteckkontakt ▪ Rundsteckkontakt ▪ Modulsteckkontakt 	(d) Steckergehäuse <ul style="list-style-type: none"> ▪ Wire-to-Wire-Stecker ▪ Board-to-Wire-Stecker ▪ Gerätestecker 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sensoren und Eingabegeräte <ul style="list-style-type: none"> – Luftmassensensor – Tastelemente ▪ Aktoren und Ausgabegeräte <ul style="list-style-type: none"> – Fensterheberantrieb – Display ▪ Steuerungsgeräte <ul style="list-style-type: none"> – Motorsteuerung – ESP – ABS

Abbildung 3: Teilkomponenten des Bordnetzes

Kontaktelemente und Steckergehäuse

Um sowohl die Montage- als auch die Reparaturfähigkeit des Bordnetzes zu gewährleisten, sind deutlich über 95 % der elektrischen Verbindungsstellen des Kabelsatzes als Klemmverbindung ausgeführt [3]. Die Kontaktelemente werden in der Regel über Crimpverbindungen an die Enden der unterschiedlichen Leitertypen angeschlagen. Neben Flachsteck- und Rundsteckkontakten kommen auch Modulsteckkontakte zum Einsatz, die jeweils als Male- oder Female-Kontakte fungieren. Steckergehäuse dienen nicht nur der Aufnahme der Male- und Female-Klemmkontakte an den einzelnen Kabelsatzenden. Vielmehr gewährleisten sie durch ihre Geometrie eine Verstecksicherheit, fungieren durch integrierte Dichtelemente als Abschirmung gegenüber Medien, leiten Wärme in der Kontaktstelle nach außen und stellen über integrierte Verriegelungssysteme die dauerhafte und zuverlässige Positionierung der Klemmverbindung sicher. Durch das breite Aufgabenfeld von Steckverbindern ist ihr Aufbau oftmals komplex und die Herstellungskosten hoch [19]. Neben Wire-to-Wire-Steckern zur Verbindung von Kabelsätzen untereinander kommen Board-to-Wire-Steckverbindungen beim Anschluss von Leiterplatten zum Einsatz. Bei Gerätesteckverbindern ist eine Steckerseite zum

Anschluss der unterschiedlichen E/E-Komponenten integraler Bestandteil des „Gerätes“ [15].

2.1.2 Entwicklung und Produktion von Kabelbäumen

Die Änderungswahrscheinlichkeit des Kabelsatzes über den gesamten Entwicklungsprozess hinweg ist sehr hoch. Dennoch müssen zu einem frühen Zeitpunkt bereits Aussagen bezüglich der Architektur des Leitungssatzes getroffen werden. Für eine flexible und effiziente Entwicklung wird der Kabelsatz rechnergestützt ausgelegt.

Entwicklung von Kabelbäumen

Die erste Entwicklungsstufe basiert auf einer heuristischen Netzknotenanalyse, bei der simulationsgestützt analysiert wird, in welchen Einbauorten Stromverteiler im Fahrzeug positioniert werden können [1]. Aufgrund der Wechselwirkungen innerhalb dieses umfangreichen Lösungsraums mit anfangs variablen Eingangsdaten werden bereits frühzeitig spezifische Randbedingungen der Architektur definiert, um die Anzahl möglicher Varianten einzugrenzen [20]. Diese Ergebnisse werden anschließend in eine Routing-Simulation eingespeist. Ziel ist es hierbei, die überschaubare Anzahl an Lösungsvarianten in eine fahrzeugähnliche Umgebung zu übertragen. Der Entwicklungsschritt berücksichtigt bereits die Vernetzung, die Verschaltung und die Geometrie des Leitungssatzes, um spätere Verlegewege realisieren zu können [2].

Die zahlreichen systemübergreifenden Schnittstellen und der Umfang des Bordnetzes bedingen während des Konstruktionsprozesses Kollisionsuntersuchungen mit allen benachbarten Baugruppen. Darüber hinaus werden in diesem frühen Entwicklungsstadium für spezielle Montagesituationen in der Produktionslinie Ergonomiesimulationen der Leitungssatzmontage durchgeführt [21]. Neben der mechanischen Auslegung des Leitungssatzes finden in dieser Entwicklungsstufe ebenfalls eine elektrische Auslegung der Verbindungslogik, Übertragungstechnologien und Leitungsattribute statt. Aus dem detaillierten CAD-Modell leiten sich alle relevanten Fertigungsdaten, wie Stücklisten und Leitungslängen sowie die Verlegebrett-Zeichnung für die manuelle Montage der Leitungssätze ab. Mit der Definition des Fertigungskonzepts und der Arbeitsplanerstellung kann der Kabelbaum schließlich produziert werden.

Produktion von Kabelbäumen

Die gesamte Produktionskette der Leitungssatzherstellung ist durch unterschiedliche Teilprozesse gekennzeichnet. Nach dem Wareneingang der Teilkomponenten des Kabelsatzes beginnt die Vormontage des einzelnen Kabelsatzes (Abbildung 4). Die Vormontage beinhaltet die Fertigungsschritte Ablängung, Abisolierung und Kontaktierung der Einzeladern.

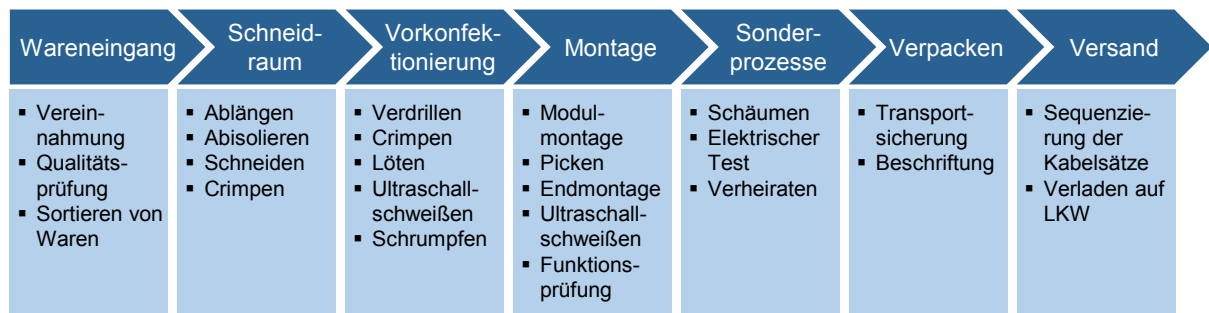


Abbildung 4 - Prozessschritte der Kabelsatzproduktion³

Nach Abschluss der Leitungsverarbeitung folgt die Vorkonfektionierung. Hierbei werden die Stecker und Anschlussklemmen teilautomatisiert mit den Einzelleitern verbunden [7]. Am Ende der Vorkonfektionierung steht das Bündeln und Verdrillen der Leitungssätze entsprechend ihrer Modulzugehörigkeit. Bis zu diesem Arbeitsschritt haben Bordnetzhersteller ca. 25 % der fertigungstechnischen Wertschöpfung umgesetzt [22]. Der erste Fertigungsschritt der Montage am Verlegetisch beinhaltet das manuelle Verlegen des Leitungsbündels und das Einstecken der Steckverbindungen in die vormontierten Buchsen. Das Leitungsbündel nimmt bereits hier die Ausrichtung und Orientierung des finalen Leitungssatzmoduls an [23].

Um die Kabelbündel zu fixieren und zusätzlich vor mechanischen Beanspruchungen zu schützen, folgt das Bandagieren der Leitungen. Nicht nur das Konfektionieren, sondern auch das Bandagieren der zusammengestellten Leitungssätze erfolgt fast ausschließlich manuell. Vor allem das Bandagieren der Kabelbäume ist ein besonders zeitintensiver Arbeitsgang, der hohe Rationalisierungspotenziale birgt. [24]

Etwa 30 % der Montagezeit für einen Kabelbaum entfallen auf diesen Prozessschritt [3]. Zur Funktionskontrolle und Qualitätssicherung wird der fertig konfektionierte Kabelbaum abschließend einer automatisierten Prüfung unterzogen und danach für den Versand zum OEM vorbereitet. Trotz der jahrzehntelangen Erfahrung in der industriellen Fertigung von Bordnetzen werden Leitungssätze bis heute weitestgehend manuell gehandhabt und produziert [2]. Als wesentliche Gründe hierfür sind komplexe Fügevorgänge durch die Forminstabilität der Leitungen sowie die zahlreichen unterschiedlichen, kundenspezifischen Varianten zu nennen, die ein deutliches Hindernis für die Einführung automatisierter Fertigungskonzepte darstellen [25].

2.1.3 Kabelbaummontage

Bordnetzhersteller beliefern den OEM nach dem Just-in-time-Prinzip. Der Kabelbaum wird in der Regel nur wenige Tage am Endmontagestandort des OEM gelagert,

³ Produktionskonzept des Kabelbaums am Beispiel der LEONI AG

bevor er im Fahrzeug montiert wird [26]. Die Montage beginnt mit dem Handling des spezifischen Kabelbaums und dem Transport vom Endlager an das Fertigungsband. Am Band nutzt der Mitarbeiter ein Handlinggerät, um den in einer Transporttasche verpackten, bis zu 60 kg schweren Kabelbaum in den Fahrzeuginnenraum zu positionieren. Im nächsten Schritt wird der Kabelbaum vom Werker aus der Transporttasche entnommen und im Fahrzeuginnenraum ausgebreitet. Nachfolgend arbeiten bis zu fünf Mitarbeiter gleichzeitig an einem Fahrzeug, um die einzelnen Leitungssätze zu befestigen und Komponenten wie Sicherungskästen und Stromverteiler zu montieren. [27]

Anschließend folgt die sogenannte Schwenkmontage, bei der die Karosserie um die Längsachse gedreht wird. Neben dem Einbau diverser Leitungen, wie beispielsweise der Bremsleitung oder Kraftstoffleitung und ersten Karosserieteilen, dient dieser Prozessschritt vor allem der Montage der Leitungssätze der Heckklappe und des Unterbodens und dem Anschluss mehrerer Steuergeräte. Rund 80 – 90 % des Kabelbaums werden bereits vor der Fahrwerks- und Antriebsmontage verlegt bzw. vorverlegt. Ein Großteil der restlichen 10 – 20 % noch zu verlegenden Komponenten des Kabelbaums entfallen hauptsächlich auf die Montage des Motorkabelsatzes nach dem Einbau des Aggregats. [19]

Die Kabelbaummontage lässt sich nicht ausschließlich auf einen Bereich der Fahrzeugmontage begrenzen. Nahezu alle Montagebereiche schließen Prozessschritte der Kabelbaummontage mit ein. Die Gesamtmontage des physischen Bordnetzes kann grundsätzlich in zwei Aufgabenbereiche unterteilt werden: Die Verlegung und Unterbringung der Kabelsätze im Bauraum des Kfz einerseits und die Anbindung der Leitungssätze an die E/E-Komponenten des Bordnetzes andererseits. Beide Aufgabenbereiche sind dabei weitgehend durch manuelle Montageschritte in der Fertigungslinie des Kfz geprägt. [28]

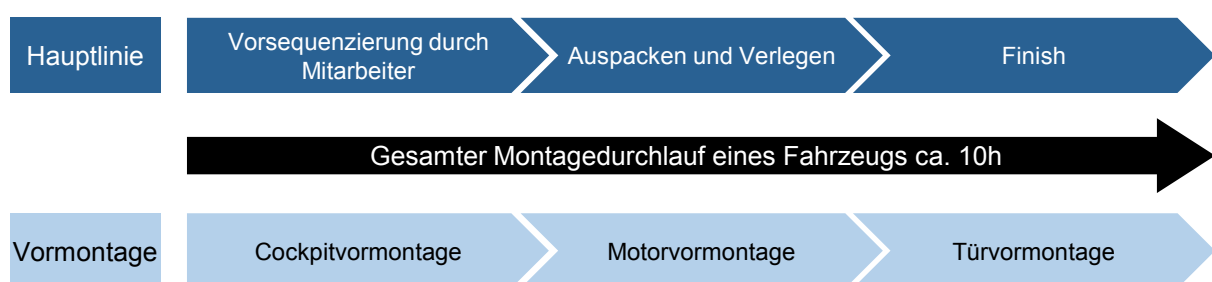


Abbildung 5: Schritte der Kabelbaummontage am Beispiel des BMW-Werks in Regensburg

Abbildung 5 veranschaulicht schematisch den Montageablauf des Kabelbaums, am Beispiel des BMW-Werks in Regensburg. Abgebildet sind die Hauptmontagestationen des Bordnetzes. Neben der zentralen Montage an der Karosserie in der Hauptlinie werden unterschiedliche Module des Fahrzeugs (z.B. Türmodule und das Cockpit) in getrennten Linien vormontiert.

Die durchschnittliche Montagedurchlaufzeit eines Fahrzeugs am Beispiel der vorgestellten Montagelinie liegt bei ca. zehn Stunden. Dabei entfallen durchschnittlich 41 Minuten bzw. ca. 7 %, auf die manuelle Montage des Bordnetzes.

2.1.4 Fehler bei der Kabelbaummontage

Trotz umfassendem Qualitätsmanagement und exakt aufeinander abgestimmter Prozesse sind Fehler bei der Bordnetzmontage nicht auszuschließen. Die eng getakteten Montageschritte für das physische Bordnetz führen dazu, dass fehlerhafte Komponenten nicht schnell und flexibel ausgetauscht werden können. Dadurch ist eine vom eigentlichen Montageprozess losgelöste Nacharbeit am verlegten Kabelsatz erforderlich, um die hohen Qualitätsanforderungen im Automotivesektor erfüllen zu können. Die Abläufe der Fehlerbehebung werden in- oder offline durchgeführt und beziehen sich darauf, ob Ausbesserungen noch während des laufenden Fertigungsprozesses in der Linie durchgeführt werden können, oder erst, nachdem das Fahrzeug bereits vollumfänglich montiert ist.



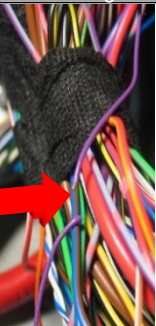



	Türstecker: Pin beschädigt		Türstecker: Gehäuse beschädigt		Türstecker: Kabel/Leitung beschädigt		Kraftstoffpumpe: Stecker beschädigt		Motorraum: Kabel/Stecker beschädigt		Airbag: Stecker/ Kabel beschädigt	
Fehlerbild												
Häufigkeit / Woche	Inline	Offline	Inline	Offline	Inline	Offline	Inline	Offline	Inline	Offline	Inline	Offline
	34	2	21	2	0	5	13	1	0	10	0	1
Nacharbeits- aufwand / Fzg.	10 Min.	110 Min.	10 Min.	100 Min.	n/a	140 Min.	5 Min.	180 Min.	n/a	120 Min.	n/a	440 Min.
Nacharbeits- Kosten / a	23k €	15k €	14k €	14k €	0 €	48k €	5k €	12 k€	0 €	82k €	0 €	30k €

Tabelle 1: Fehler in der Bordnetzmontage⁴

Durch kontinuierliche Kontrollen, wie Sicht- und Durchgangsprüfungen, wird versucht Montagefehler bereits in der Linie zu detektieren und auszubessern, da Offline-Nacharbeiten einen deutlich erhöhten zeitlichen Aufwand hervorrufen. Der zeitliche Unterschied lässt sich damit begründen, dass trotz der verbauten fehlerhaften Komponente alle weiteren Montageschritte ausgeführt wurden und eine Demontage diverser Fahrzeugkomponenten in der Offline-Nacharbeit erforderlich machen, um

⁴ Die aufgeführten Fehlerbilder sind die Ergebnisse der Auswertung von Einbaufehlern des physischen Bordnetzes in der gesamten Fertigungslinie im BMW-Werk Regensburg in einem Zeitraum von August 2015 bis Februar 2016.

den Mangel beheben zu können [14]. Die Ursachen, die zu Montagefehlern im Bordnetz führen, sind vielseitig. Beginnend bei der Bordnetzproduktion durch den Verbau von Falschteilen über transportbedingte Schädigungen aufgrund der langen Lieferketten der Kabelsätze aus Osteuropa oder Nordafrika, bis hin zu nicht ausgeführten Steckprozessen oder Verschraubungs- oder Verrastungsfehlern durch den Werker in der Produktionsline sind die Fehlerquellen vielschichtig. Analysen der Bordnetzmontage am Beispiel des BMW-Werks in Regensburg zeigen mehr als 20 unterschiedliche Fehlerbilder. Die Häufigkeit des Auftretens und der zeitliche Aufwand der nötigen Nacharbeit variieren dabei deutlich (Tabelle 1). Neben verbogenen Kontaktpins und gebrochenen Steckergehäusen sind beschädigte Leitungen typische Einbaumängel. Als äußerst kritisch sind vor allem Beschädigungen an sicherheitskritischen Systemen, wie am Airbag-Kabelbaum, zu sehen. Die im Rahmen dieser Arbeit nachgewiesenen Fehlerbehebungsmaßnahmen zeigen auf, dass aus der In- und Offline-Nacharbeit zusätzlich jährliche Kosten in Höhe von rund 450.000 € entstehen.

2.2 Wandel der Bordnetzarchitektur

Neue Verbrauchs-, Emissions- und Sicherheitsanforderungen, sich ändernde Kundenwünsche in Form individueller Mobilitätsansprüche und die fortschreitende Vernetzung im Kfz bedingen einen Wandel der heutigen Bordnetzarchitektur. Der aktuelle Entwicklungsvorstand der BMW AG rechnet damit, dass sich das Automobil in der nächsten Dekade stärker verändern wird als in den letzten fünfzig Jahren zuvor [29]. Der zu erwartende weitere Anstieg der Komplexität des physischen Bordnetzes stellt dabei hohe Anforderungen an zukünftige Produktionstechnologien und macht eine Weiterentwicklung bestehender Produktionsprozesse zwingend erforderlich.

2.2.1 Zukünftige Fahrzeugfunktionen

Mit der starken Verbreitung von Smartphones und den Möglichkeiten der Internetnutzung wird eine „Seamless Connectivity“, d.h. eine kompatible und schnelle Kommunikation zwischen Fahrer und Fahrzeug gefordert [13]. Damit nimmt das Bordnetz eine Schlüsselfunktion bei der Einführung von neuen Funktionen ein, da es die Energie zur Versorgung der Aggregate und Datenströme bis 10 Gbit/s übertragen muss und maßgeblich durch weitere Themenfelder wie

- autonomes-Fahren,
- IT-Sicherheit und
- neue Spannungsebenen und Elektromobilität

zusätzlich beeinflusst wird [2].

Autonomes Fahren

Durch moderne elektronische Sicherheitssysteme im Automobil, wie Abstandsradar, Spurhalte-Assistent, Totwinkel-Assistent oder Kollisionsbremsassistent, um nur einige zu nennen, wurden mehr und mehr Aufgaben vom Fahrer an das Auto abgegeben [30]. Ein potenzieller Sprung von einem teilautomatisierten Fahrzeug zu einem hochautomatisierten, autonom fahrenden Kfz wird in Bezug auf die Signal- und Leistungsübertragung zukünftig einen Paradigmenwechsel hinsichtlich der gesamten Bordnetzarchitektur hervorrufen.

Abbildung 5 zeigt einen Zeitplan, der die stufenweise Einführung immer neuer Fahrzeugfunktionen beschreibt, dessen Ende durch ein autonom fahrendes Fahrzeug gekennzeichnet ist. Die Einführung immer neuer Assistenzsysteme erfordert dabei eine reibungslose Kommunikation der Sensorik und Aktuatorik im Fahrzeug. [31]

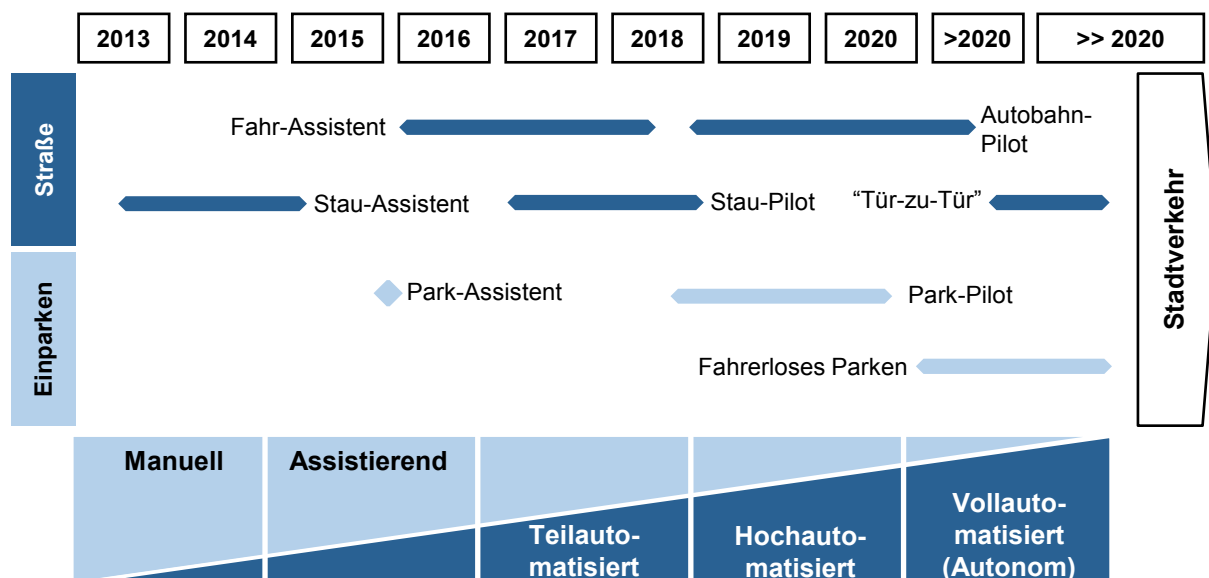


Abbildung 6: Entwicklungsstufen zum autonom fahrenden Automobil in Anlehnung an [32]

In heutigen Fahrzeugen wird ein „Fail-Safe“-Verhalten verwendet. Hierbei fährt im Falle einer Störung das betroffene System in einen definierten Zustand. Sicherheitsrelevante Bauteile wie die Lenkung oder die Bremse sind über mechanische Redundanzen abgesichert [2].

Der Insasse autonom gesteuerter Fahrzeuge wird sich zukünftig auf die Zuverlässigkeit der Fahrzeugfunktionen verlassen. Ein Ausfall sicherheitsrelevanter Funktionen ist dabei nicht tolerierbar [33]. Das Fahrzeug und dessen Bordnetz müssen „fail-operational“ und operativ reagieren. Im Fehlerfall müssen Teilnetze für eine definierte Zeit weiterhin funktionieren. Erreicht wird dies durch diverse Redundanzen und Diversitäten sowie Systeme, die Störungen überbrücken [34]. Die Vielzahl der bereits verwendeten und zukünftig eingesetzten Assistenzsysteme

stellen dabei ganz neue Anforderungen an die Datenübertragungsrate und letztlich der dafür notwendigen Leiterarchitektur, sodass Ethernet als schnelles Bussystem mehr und mehr Einzug halten wird [2].

IT-Sicherheit

Die „Fahrzeug zu Mensch“-Beziehung ermöglicht die Benutzung von digitalen Inhalten wie Wettervorhersagen im Infotainmentsystem⁵ sowie Softwareupdates der Steuergeräte über mobile Netzwerke. Seit mehr als vier Jahren nutzt z.B. Google die Bewegungsdaten seiner Smartphone-Nutzer, um in Echtzeit das Verkehrsaufkommen zu analysieren und Verkehrsvorhersagen zu treffen. Diese „Handy zu Handy“-Kommunikation wird sich zukünftig ebenfalls auf das Fahrzeug übertragen und bei der „Fahrzeug zu Fahrzeug“-Beziehung zukünftig zu rasanten Entwicklungen führen, gleichzeitig aber auch neue Herausforderungen an die gesamte Automobilbranche adressieren. [35]

Die zunehmende Vernetzung bietet Hackern völlig neue Möglichkeiten für Angriffe auf die Fahrzeugelektronik. Funksysteme ermöglichen den externen Zugriff auf die Softwareebene des Fahrzeugs. Fast fünf Jahre lang konnten Hacker mit einfachen technischen Mitteln per Mobiltelefon einen BMW öffnen und starten, bis die Lücke im BMW Connected-Drive-System schließlich Ende 2014 veröffentlicht und durch BMW bei über zwei Millionen Fahrzeugen über ein Softwareupdate behoben wurde. [36]

Eine besondere Gefahr birgt der Einzug des Internets in das Kfz. Mit dem Einbau von Webbrowsern als Infotainmentanwendungen gelangen Softwareprogramme in Fahrzeuge, die aktuell das Hauptangriffsziel von Hackern sind. Potenziellen Angreifern wird dadurch der Zugriff auf die internen Steuerbefehle des Kfz ermöglicht [37]. Die Entdeckung von Angriffen erfordert eine ständige Überwachung der Kommunikation im Fahrzeug z.B. über neuartige Algorithmen, die echtzeitfähig die Fahrzeugkommunikation analysieren. Grundsätzlich gilt für die künftigen Fahrzeugsysteme, dass sie nicht nur im Kontext der funktionalen Sicherheit, sondern auch im Kontext der IT-Sicherheit von Grund auf entwickelt werden müssen. Gerade im Hinblick auf die Entwicklungen hin zum selbstfahrenden Auto wird IT-Sicherheit in Bordnetzen deshalb kontinuierlich an Bedeutung gewinnen [38].

Neue Spannungsebenen und Elektromobilität

Bereits mit dem heutigen Funktionsumfang gerät das klassische 12-V-Bordnetz an seine Grenzen. Um die stetig zunehmende Anzahl an E/E-Komponenten im Fahrzeug über das Energie-Bordnetz zu vernetzen, werden bei gleichbleibender 12-Volt-Netzspannung immer höhere Ströme notwendig. Der Effekt der Stromerwärmung macht dabei den Einsatz immer größerer Leiterquerschnitte erforderlich. Eine

⁵ Infotainment ist eine Kombination der englischen Begriffe Information und Entertainment.

Erhöhung der Bordnetzspannung ermöglicht dabei eine Erweiterung der bisherigen Leistungsgrenzen, ohne dabei die Leiterquerschnitte zu erhöhen. [31]

Bereits seit Anfang der neunziger Jahre wird über eine Erhöhung der Bordnetzspannung diskutiert. Ziel war es, ein 42-V-Bordnetz mithilfe eines internationalen Konsortiums weltweit zu etablieren. Die erwartete, aber nicht eingetretene Markteinführung von Systemen mit hohem Leistungsbedarf, aber auch die Mehrkosten, die durch eine gesteigerte Bordnetzspannung verbunden waren, führten dazu, dass von der Einführung abgesehen wurde. Vielmehr planen die Automobilhersteller aktuell mit einem 48-V-Netz als sogenannte „Enabler-Technologie“. Hierbei wird das 48-V-Netz als Ergänzung zum 12-V-Netz verstanden, jedoch nicht als Substitutionstechnologie. Elektrische Verbraucher mit hohem Leistungsbedarf sollen hierbei über das 48-V-Netz betrieben werden. [39]

Die technologische Entwicklung geht einher mit der immer stärker werdenden Nachfrage nach Hochvoltlösungen für Fahrzeuge mit alternativen Antrieben. Die Elektromobilität steht auf der Schwelle zum Marktdurchbruch und spannt im Bordnetz eine weitere Spannungsebene für den Antrieb von Hybrid- und Elektrofahrzeugen auf. Für eine tief greifende Marktdurchdringung ist die aktuelle Herausforderung die Elektromobilität kostengünstiger zu gestalten. Neben den notwendigen technologischen Ansätzen in den Bereichen Energiespeicher, Traktionsantrieb und intelligenten Prozessketten wird gleichzeitig durch politische Maßnahmen, z.B. Förderungen im wissenschaftlichen, aber auch wirtschaftlichen Sektor versucht dem Kostendruck zu begegnen. Eine erfolgreiche Umsetzung der Elektrifizierung des Antriebsstrangs wird sich letztlich auch auf die Bordnetzarchitektur auswirken und den Einsatz neuer Produktionstechnologien in Zukunft erforderlich machen. [40]

2.2.2 Zukünftige Bordnetzentwicklung und -produktion

Um den beschriebenen Entwicklungstrends des Kfz begegnen zu können, beschreiten Automobilhersteller und -zulieferer, gemeinsam mit Forschungseinrichtungen unterschiedlichen Ansätze:

- Multi-physikalische FE-Simulation
- Zusammenfassung der Entwicklungsebenen des Bordnetzes
- Automatisierte Kabelsatzproduktion
- Automatisierte Kabelsatzmontage

Multi-physikalische FE-Simulation

Der Entwicklungsprozess von Bordnetzsystemen wird zukünftig durch unterschiedliche Simulationsanalysen unterstützt. Optimierungen hinsichtlich Powermanagement, Bordnetzstabilität oder Ladebilanzierung werden dabei über die Kopplung mechanisch-thermisch-elektrischer FE-Simulationen bereits im Entwicklungsstadium

umgesetzt. Die simulationsgestützte Analyse unterschiedlicher Lastzustände ermöglicht eine Optimierung bezüglich Materialauswahl und Gewicht [41].

Zusammenfassung der Entwicklungsebenen des Bordnetzes

Ein wesentlicher Entwicklungstrend wird jedoch sein, das Bordnetz in Zukunft als ganzheitlichen E/E-Architekturentwurf des Kfz anzusehen. Die bislang nach Disziplinen orientierte Architekturentwicklung wird zukünftig zu einer multidisziplinären Optimierungsaufgabe, bei der einzelne Fachbereiche wie Elektronikentwicklung, Karosseriekonstruktion und Bordnetzentwicklung zusammenarbeiten müssen. Hilfreich für diese Aufgaben werden multiphysische Simulationsmethodiken sein, mit denen die numerische Beschreibung von mechanischen, thermischen und elektrischen Effekten möglich ist [42]. Neben der Entwicklung müssen zukünftig jedoch auch die Produktionsprozesse der Kabelsätze grundlegend optimiert werden.

Automatisierte Kabelsatzproduktion

Kapitel 2.1.2 hat gezeigt, dass nur die ersten Arbeitsschritte der Kabelsatzproduktion, wie das Ablängen und das Kontaktieren der Einzelleiter vollautomatisiert sind. Alle anschließenden Prozessschritte der Kabelbaumfertigung erfolgen noch immer manuell an Montagebrettern. Bezeichnend hierfür ist die Aussage des Vorstandsvorsitzenden der Leoni AG, Dr. Klaus Probst, nach der alle Versuche, die Kabelbaumfertigung ganzheitlich zu automatisieren bisher gescheitert sind [43]. Ansätze zur Automatisierung wurden bereits in den 1980er Jahren intensiv verfolgt, haben jedoch zu sehr komplexen und teuren Maschinen geführt. Parallel dazu setzte die Verlagerung der Produktionsstätten in Niedriglohnländer ein, so dass aus überwiegend wirtschaftlichen Gründen trotz aller Prozessrisiken die manuelle Fertigung beibehalten wurde [28].

Lediglich sehr einfache Kabelsatztopologien können heute automatisiert hergestellt werden. Die aufwandsstärksten Prozesse, die in Gänze manuell erfolgen, sind hierbei die Kabelsatzmontage inklusive Steckerbestückung mit 39 % und die Ummantelung des Kabelbaums, welche 22 % der Gesamtfertigung ausmachen (Abbildung 7). Die genannten Prozesse bieten somit großes Potenzial zur Automatisierung und sind Gegenstand unterschiedlicher Forschungsarbeiten. [7; 22]

Obwohl zahlreiche Forschungsarbeiten angestoßen wurden, die gegenwärtige Kabel- und Steckerkonfektionierung kosteneffizient zu automatisieren, ergeben sich nach heutigem Stand der Technik letztlich noch keine geeigneten Lösungen [16]. Als deutliches Hemmnis der Entwicklung stehen gravierende Investitionen, die bei steigender Prozess- und Aufgabenkomplexität sprunghaft ansteigen [44].

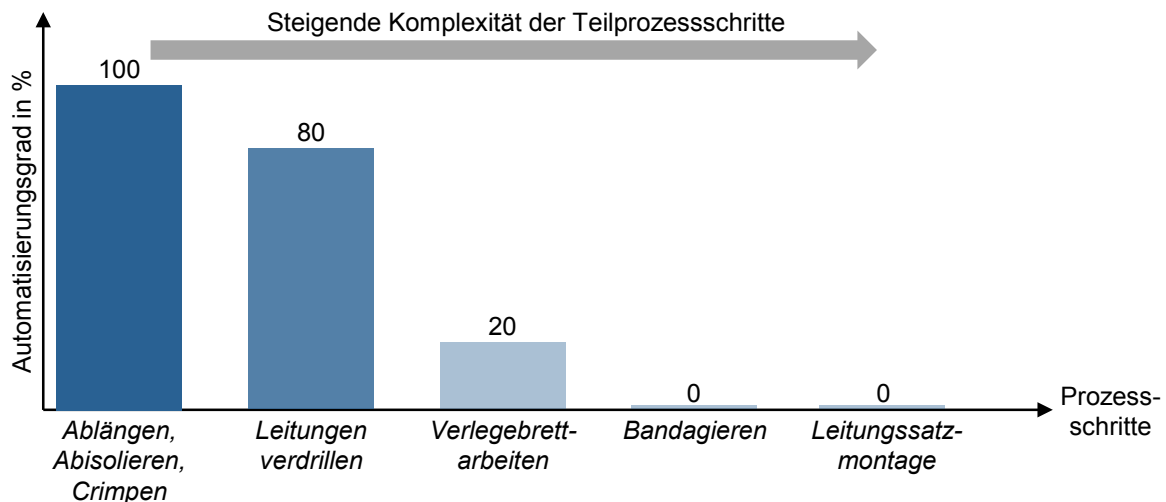


Abbildung 7: Automatisierungsgrad in der heutigen Bordnetzfertigung [27; 41]

Neben den nur schwer durch Robotersysteme zu handhabbaren, biegeschlaffen Kabelsätzen liegt der Hauptgrund für das Scheitern in der hohen Variantenvielfalt im Automobilbau, welche durch individuelle Konfigurationsmöglichkeiten vor allem kundenspezifischer Kabelsätze entstehen. Für viele Kabelsatzhersteller ist daher die Reduktion der Komplexität und Variantenvielfalt eines der wichtigsten Entwicklungsziele zur Steigerung der Automatisierung in der Kabelsatzproduktion. So streben beispielsweise mehrere Kabelsatzhersteller in einem Arbeitskreis eine Vereinheitlichung von Toleranzen und die Standardisierung von Kabelfarben an. [2]

Automatisierte Kabelsatzmontage

Ein weiterer Forschungsschwerpunkt fokussiert neben der erläuterten automatisierten Kabelsatzproduktion die automatisierte Kabelsatzmontage durch den Einsatz neuer Leitertechnologien, wie z.B. Flachleitern, oder additiv, direkt auf Verkleidungselemente aufgebrachte Leiterstrukturen [3]. Vorteile dieser Technologien liegen in der einfacheren Handhabbarkeit mit flexiblen Montagessystemen und einer besseren Bauraumausnutzung im Automobil. Auch die genau definierte Lage der Einzelleiter im Hinblick auf hochfrequenzoptimierte Leitungsnetze und neue Kontaktierungsmöglichkeiten bieten ein hohes technologisches Potenzial [4]. Die neuen Ansätze befinden sich erst im Anfangsstadium ihrer Entwicklung, können jedoch in den nächsten Jahren erheblich zur Optimierung von Kabelsätzen und deren Produktion beitragen [45].

Eine vollständige Substituierung des heutigen, primär auf Rundleiterstrukturen basierenden Bordnetzes durch neue Leiterstrukturen wird auf absehbare Zeit dennoch nicht verwirklicht werden. Vielmehr bietet sich der Einsatz dieser Technologie in flächigen, gut zugänglichen Bauräumen des Fahrzeugs als Ergänzung zu heutigen Leitersystemen an [46].

2.2.3 Handlungsfelder durch die Anforderungen an das zukünftige Bordnetz

Durch die beschriebenen Technologietrends Vernetzung, Autonomie und Elektrifizierung des Kraftfahrzeugs steigt die Anzahl an Signal- und Stromversorgungsleitungen sowie Steuergeräten weiter an. Gleichzeitig wird dem größer werdenden physischen Bordnetz nicht mehr Bauraum im Fahrzeug bereitgestellt. Es ist eher eine gegenteilige Entwicklung zu verzeichnen, in der der immer kleiner werdende Foot-Print der Fahrzeuge dazu führt, dass sämtliche Funktionalitäten bei geringerem Bauraum zur Verfügung gestellt werden müssen. [1]

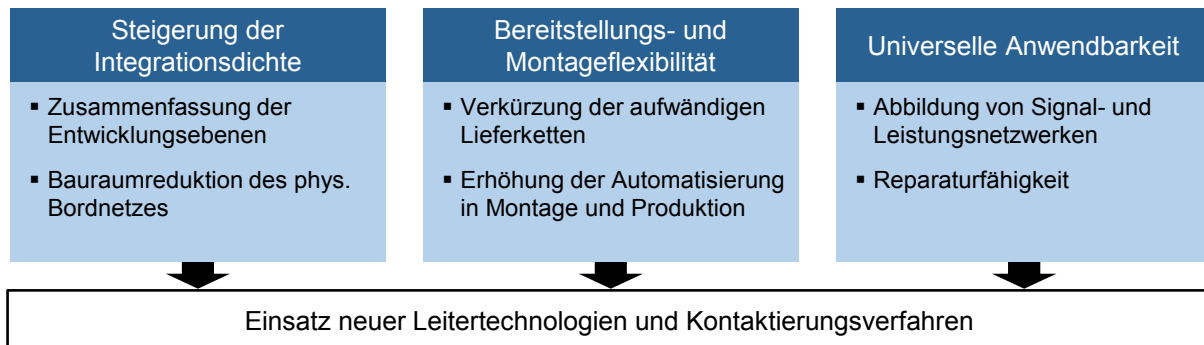


Abbildung 8: Handlungsfelder für zukünftige Bordnetzsysteme

Um die Entwicklungstrends der Automobilindustrie wirtschaftlich umsetzen zu können müssen neue Prozesse, Leiterstrukturen und Kontaktierungslösungen gefunden werden, die eine automatisierte Produktion und Montage des Bordnetzes ermöglichen. Dem zukünftigen Bordnetz stellen sich drei Handlungsfelder (Abbildung 8).

Steigerung der Integrationsdichte

Momentan werden die verschiedenen Produkttopologien (Leiterstruktur, E/E-Komponente und Karosserie/Verkleidung) voneinander losgelöst entwickelt. Dabei steht die funktionale Auslegung der Einzelkomponente im Vordergrund. Zwar werden Schnittstellenanschlüsse definiert, um den Montageprozess der Teilkomponenten zu einem Gesamtsystem sicherzustellen, eine Optimierung findet heutzutage jedoch primär für die Teilkomponente statt, jedoch nicht für das Gesamtsystem Bordnetz. Nach Meinung vieler Experten bietet die Integration dieser Produkttopologien durch eine gesamtheitliche Entwicklung des Bordnetzes zukünftig das größte Potenzial, um den Automatisierungsgrad zu steigern und gleichzeitig Bauraum und Gewicht einzusparen [1; 2; 16; 19]. Dabei sollen zukünftig alle Teilkomponenten des Bordnetzes in ein makromechatronisches System integrieren werden, um Prozesse zu vereinfachen und Produktschnittstellen zu optimieren [3]. Die damit mögliche Reduktion der Teilezahl und der Verbindungsstellen kann die Zuverlässigkeit steigern und gleichzeitig Kosten und Komplexität des Bordnetzes senken.

Bereitstellungs- und Montageflexibilität

Der bisherige hohe manuelle Fertigungsgrad von Kabelsätzen bedingt lange Lieferketten von Niedriglohnländern zum Produktionsstandort und führt zu hohen Kosten für den OEM. Gleichzeitig stellt der ebenfalls stark manuell geprägte Montageprozess der Leitungssätze einen hohen Kostenfaktor dar und ist von vielen Einbaufehlern geprägt. Ziel bisheriger und zukünftiger Forschungsarbeiten ist es deshalb den Automatisierungsgrad sowohl in der Produktion, als auch in der Montage zu steigern. Komplexe Lieferketten können dadurch aufgelöst werden, wodurch letztlich die Bereitstellungs- und Montageflexibilität heutiger Bordnetzstrukturen deutlich ansteigt.

Universelle Anwendbarkeit

Nicht nur die Zunahme von Verbrauchern mit einer hohen Leistungsaufnahme, sondern auch die vermehrte Anwendung von Infotainment-Ausstattungsmerkmalen und Fahrzeugfunktionen, die zukünftig zum autonomen Fahren befähigen, führen dazu, dass neue Technologien auf unterschiedliche technische Randbedingungen universell anwendbar sein müssen. Sie müssen dabei sowohl Signal- als auch Leistungsnetzwerke abbilden, um den stetig anwachsenden Umfang des Bordnetzes beherrschen zu können. Weiterhin wird eine hohe Integrationsdichte der einzelnen Produkt-Topologien gefordert, um den immer kleiner werdenden Bauraum im Kfz optimal nutzen zu können. Dennoch müssen die hohen Anforderungen an Automotive-Komponenten bezüglich ihrer Reparaturfähigkeit nach wie vor erfüllt werden. Neue Technologien müssen deshalb einen durchgängigen und einfachen Austausch fehlerhafter Komponenten ermöglichen.

Durch die Struktur aktueller Kabelsätze stoßen die bisher eingesetzten Technologien der Aufbau- und Verbindungstechnik an ihre Grenzen, wodurch der Bedarf nach völlig neuartigen Konzepten und Verfahren entsteht. Um den aufgeführten Anforderungen zu genügen, müssen neue, automatisierungsgerechte Leitungstechnologien eingesetzt werden, die die biegeschlaffen und dadurch schwer handhabbaren klassischen Rundleiter des aktuellen Bordnetzes substituieren. Gleichzeitig muss auch eine geeignete Kontaktierungstechnologie als Bindeglied zwischen E/E-Komponenten und Leitungsnetzwerk gefunden werden, um den kommenden Anforderungen der Bordnetzarchitektur genügen zu können.

2.3 Innovative Signal- und Leistungsnetzwerke im Automobil

Durch die Kombination des Einsatzes innovativer Leiterstrukturen, flexibler Kinematiken und intelligenter Sensoren wird die Möglichkeit geschaffen, weitergehende Funktionen in einem deutlich gesteigerten Integrationsgrad in das Bordnetz einzubinden. Dies kann im einfachsten Fall durch die Nutzung von Flachkabeln, z.B. auf Basis parallel angeordneter Kabelsysteme oder folienbasierten Schaltungen, realisiert werden, die über flexible, mehrachsige Handhabungsgeräte

automatisiert mit der Trägerstruktur verbunden werden können [3]. Aber auch thermische Spritzverfahren, 3D-MID-Technologien⁶ oder zentrale Massivleiter bieten gute Automatisierungsmöglichkeiten und finden bereits in unterschiedlichen Anwendungen im Automotive-Sektor Verwendung [47]. Eine Marktdurchdringung als standardisierte Leiterstruktur des Bordnetzes ist bei den konservativ arbeitenden Bordnetzlieferanten jedoch bislang noch nicht eingetreten.

Flex-Wiring-Technologie	Zentrale Massivleiter	Thermische Spritzverfahren	3D-MID
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Flexible Schaltungsträger ▪ Flexible Flachbandleitungen, laminiert & extrudiert 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Einlagige Massivleiter ▪ Mehrlagige Massivleiter 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Flamecon® ▪ Plasmacoat® ▪ Plasmadust® 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aerosol-Jet-Verfahren ▪ Ink-Jet-Druck ▪ Laserdirektstrukturierung
Isolierte Einzelleiterstrukturen		Additive aufgebrachte Leiterstrukturen auf Trägersubstrat	

Abbildung 9: Innovative Leiterstrukturen für automatisierungsgerechte Bordnetze

Die in Abbildung 9 aufgeführten Leitertechnologien werden nach heutigem Stand der Technik vielmehr in anderen Anwendungsfeldern, wie der Mobilkommunikation, dem Flugzeugbau, der Medizintechnik oder im Maschinenbau eingesetzt. Deren Potenziale für eine Anwendung als Leiterstruktur des modernen Kabelbaums werden nachfolgend genauer erläutert.

2.3.1 Additiv generierte Leiterstrukturen

Additive Fertigungstechnologien gewinnen nicht nur im Prototypenbau zur Herstellung komplexer Grundkörper an Bedeutung, sondern werden vermehrt auch zur elektrischen Funktionalisierung von Substratmaterialien eingesetzt. Fortschritte in den Bereichen der Prozessstabilität und Aufbaugeschwindigkeit, aber auch der Materialqualität haben dazu geführt, dass auch in der Serienproduktion vermehrt generative Fertigungsverfahren aus bislang automobilfremden Technologiefeldern wie der 3D-MID-Technologie oder thermische Spritzverfahren zum Einsatz kommen (Abbildung 10). [47; 48]

Technologien der 3D-MID

Das Aerosol-Jet-Verfahren und der Ink-Jet-Druck zählen zu den wichtigsten Vertretern aus dem Bereich der tintenbasierten Drucksysteme zur additiven Metallisierung von flexiblen oder dreidimensionalen Substratmaterialien. Ein breites Spektrum an Tintensystemen (leitfähig, halbleitend, isolierend, lichtleitend) und die nahezu unbegrenzte Vielfalt an bedruckbaren Substratmaterialien (Thermoplaste, Duroplaste, Keramiken, Halbleiter, Gläser, Textilien) ermöglichen den Einsatz in den

⁶ Molded interconnect devices (engl.)

unterschiedlichsten Anwendungsbereichen [49]. Vor allem in der Telekommunikation und der Konsumelektronik findet das Verfahren Verwendung. Applikationen im Automotive-Sektor sind nach heutigem Stand der Technik jedoch nicht bekannt. Die Serientauglichkeit bei gleichzeitig nur begrenzter 3D-Fähigkeit des Ink-Jet-Drucks, führen primär zu Anwendung bei großen, planaren Strukturen [50].

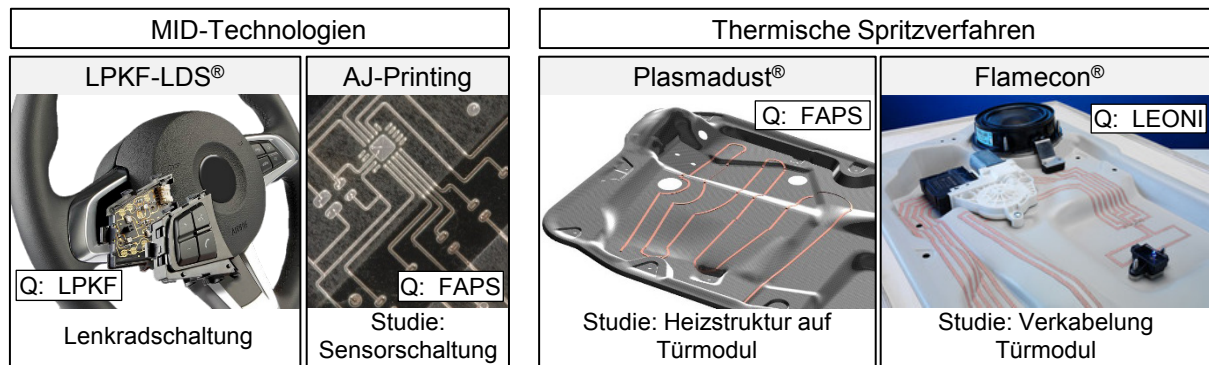


Abbildung 10: Anwendungsbeispiele für additiv generierte Leiterstrukturen für Automotive-Applikationen

Das Verfahren der Laserdirektstrukturierung der Firma LPKF (LPKF-LDS®) erlaubt die räumliche Strukturierung von Kunststoffbauteilen, welche in einem Folgeprozess chemisch metallisiert werden. Flexible Kinematiken ermöglichen dabei die Strukturierung dreidimensionaler Substrate, z.B. MID. Die Laserstrahlführung ermöglicht eine großserientaugliche Strukturierung komplexer Geometrien für unterschiedlichste Anwendungsfelder. Anwendungen der Druckverfahren und der Laserdirektstrukturierung beschränken sich nach heutigem Stand der Technik jedoch vor allem auf Schaltungssysteme und sensorische Komponenten, da die erzielbaren Leiterquerschnitte, bedingt durch die niedrige Aufbaurate der generativen Leiterauftragung, zu gering für leistungselektronische Applikationen sind [47].

Thermische Spritzverfahren

Dieser Mangel hat dazu geführt, dass in den letzten Jahren Verfahren im Bereich der Plasmatechnik (thermische Spritzverfahren) zur strukturierten additiven Metallisierung von Substratoberflächen intensiv weiterentwickelt wurden. Flamecon® [51], Plasmacoat® [52] und Plasmadust® [53] stellen die wichtigsten Vertreter aus dem Bereich der Atmosphärenplasmen dar, deren Vorteil in der hohen erzielbaren Leiterschichtdicke von 100 µm oder mehr liegt. Die damit realisierbaren Leiterquerschnitte lassen dadurch auch den additiven Aufbau leistungselektronischer Anwendungen zu [54].

Die Grenzen der Verfahren liegen jedoch in der Miniaturisierung und der thermischen Belastung der Substratoberflächen durch das Plasma. Das Unternehmen Leoni AG verfolgte bei der Entwicklung einer automatisierten, thermokinetischen Metallisierungslösung, dem sogenannten Flamecon®-Verfahren, das Ziel, Kabelbaumstruktu-

ren partiell zu substituieren. Auch die additive Aufbringung von Heizstrukturen direkt auf Verkleidungselemente des Türmoduls mithilfe des Plasmadust®-Verfahrens erscheinen in Zukunft möglich (Abbildung 10). Die wesentlichen Vorteile der vorgestellten additiven Herstellungsverfahren liegen letztlich in ihrer hohen Flexibilität der Leitungspfadführung bei einer gleichzeitig guten Automatisierbarkeit der Produktionsprozesse und der direkten Metallisierbarkeit vorhandener Verkleidungselemente zur Integration der Leiterstrukturen in bereits bestehende Trägerstrukturen.

2.3.2 Zentrale Massivleiter

Ein weiterer innovativer Ansatz den Automatisierungsgrad in der Bordnetzproduktion und -montage zu steigern, ist die Einführung von sogenannten Backbones, d.h. zentralen Stromschienen (Abbildung 11). Diese werden bereits in der Automatisierungstechnik eingesetzt, um die direkte Verbindung jeder einzelnen Energiequelle, jedes Verbrauchers, Sensors und jeder Steuerung zu substituieren. Im Premiumfahrzeugbereich werden bereits seit 2008 einlagige rechteckige Massivleiter, sogenannte Energy-Backbones⁷, in Serie eingesetzt [55]. Daneben finden Multischienen, die aus mehreren Einzellagen geringeren Querschnitts zusammengesetzt sind, ebenfalls Verwendung [56].

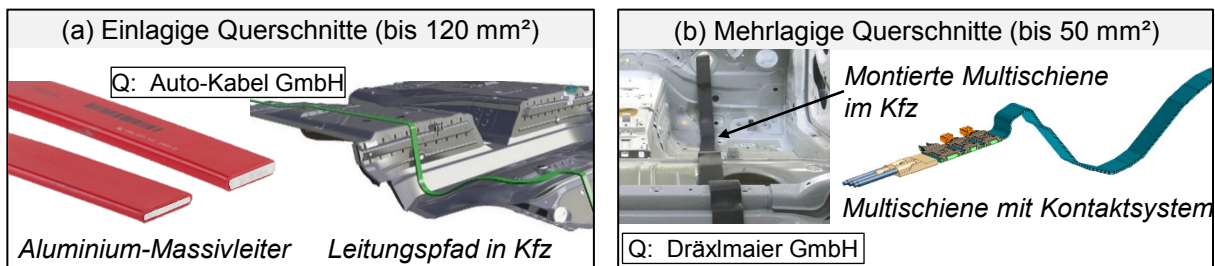


Abbildung 11: Zentrale Massivleiter als Leiterstruktur des Bordnetzes

Als Leiterwerkstoff dient wegen der großen Leiterquerschnitte durch die zentrale Leitungsführung vorwiegend Aluminium. Aufgrund der unedlen Eigenschaften, der geringen Festigkeit, sowie der Neigung zum Kriechen und dem Vorhandensein einer schlecht leitenden Oxidschicht sind langzeitstabile Verbindungen von Aluminiumleitern jedoch nur mit erhöhtem Aufwand herzustellen [57; 58]. Für zentrale Massivleiter werden daher primär stoffschlüssige, nichtlösbare Schweißverbindungen eingesetzt [59; 60].

Einlagige Massivleiter

Beim Energy Backbone handelt es sich um einen starren Aluminiumflachleiter, der für den Anschluss von elektrischen Verbrauchern mit hohen Leistungen entwickelt wurde und als Leiterstruktur der neuen 48-V-Spannungsebene vorgesehen ist (Abbildung 11 a). Für kleine Stückzahlen erfolgt die Fertigung einlagiger

⁷ Der Begriff wird hauptsächlich im Zusammenhang mit zentralen Massivleitern der Fa. Auto-Kabel GmbH verwendet.

Massivleiter im One-Piece-Flow. Hierbei wird das gesamte Leitungssystem mit allen Anschlusselementen in unterschiedlichen Prozessschritten konfektioniert, umgeformt, kontaktiert und anschließend an den OEM geliefert. Nach der Endkonfektion werden die Aluminiumflachleitungen für den Versand verpackt. Aufgrund der dreidimensionalen Struktur und der massiven, unflexiblen Gestalt erhöht sich die Packungsdichte und letztlich auch der logistische Aufwand deutlich gegenüber konventionellen flexiblen Leitern. Der Transport erfolgt meist in speziellen Behältern, um den Massivleiter vor Transportschäden zu schützen. [55]

Mehrlagige Massivleiter

Im Vergleich zum Energy Backbone hat die Multischiene zwei wesentliche Anwendungsunterschiede. Einerseits wurde das System für die klassische 12-V-Spannungsebene entwickelt. Andererseits ist die Leiterstruktur mehrlagig, zumeist dreilagig aufgebaut. Eine dreischichtige Multischiene ersetzt das gesamte 12-V-Versorgungsnetzwerk, das in Fahrzeugen in der Regel als Baumstruktur angelegt ist, ausgehend vom Batterieverteiler bis hin zu den im Fahrzeug dezentral angeordneten Stromverteilern. Vorteilhaft bezüglich der elektrischen Stabilität des Bordnetzes erweist sich bei dieser Technologie die axialsymmetrische Ausrichtung der Einzelleiter, da es hierbei annähernd zu einer Auslöschung der elektromagnetischen Störfelder kommt. Als Kontaktsysteme der Stromschiene werden ebenfalls primär Schweißverbindungen eingesetzt. Einlagige und mehrlagige zentrale Massivleiter ermöglichen durch die zentrale Anordnung und der daraus resultierenden Reduzierung der Lastpfadlänge eine Gewichtsreduzierung des Leitungssatzes um bis zu 14 % bezogen auf den traditionellen rundleiterbasierenden Kabelsataufbau. [56]

Die in Kapitel 2.2 vorgestellten Entwicklungen wie Autonomie und Elektromobilität des Fahrzeugs werden in der Bordnetzarchitektur dazu führen, dass aufgrund sicherheitsrelevanter Aspekte redundante Leitungen und Energiespeicher notwendig werden. Eine intelligente Energieverteilung über den Einsatz zentraler Massivleiter als Ringleitung kann dabei als schlanke und redundante Leiterebene dienen. Die Marktdurchdringung zentraler Massivleiter ist momentan jedoch noch gering. Anwendung findet die Technologie z.B. als zentrale Masseverteilung in Fahrzeugen aus elektrisch nichtleitenden Karosseriewerkstoffen, z.B. CFK. Hierbei werden unisolierte Aluminiumstromschienen als Masserückführung in die Karosserie eingeklebt.

2.3.3 Flex-Wiring-Verbindungstechnologien

Bei Flex-Wiring-Verbindungstechnologien wird im Allgemeinen zwischen flexiblen Flachleitern (engl.: Flexible Flat Cables, FFC) und folienbasierten flexiblen Schaltungsträgern (engl.: Flexible Printed Circuits, FPC) unterschieden. Letztere können sowohl ein reiner Kabelersatz in Form von gedruckten, folienbasierten Verbindungen für dauernde Biegebeanspruchung sein, als auch eine flexible

Alternative für starre Leiterplatten (engl.: Printed Circuit Board, PCB), z.B. auf Basis von Polyimid- oder Polyesterfolien. [61]

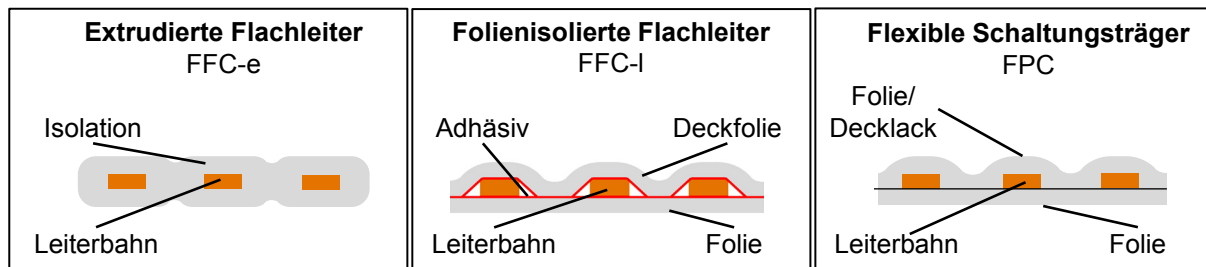


Abbildung 12: Schematischer Aufbau von Flex-Wiring Leiterstrukturen in Anlehnung an [31]

Ein Vorteil beider Technologien ist, dass aufgrund der genau kalkulierbaren Lage und Geometrie der Einzeladern, im Vergleich zu konventionellen Rundleiterstrukturen, die Durchführung von EMV-Berechnungen und EMV-Optimierungen wesentlich vereinfacht wird. Auch die höhere Stromtragfähigkeit durch eine bessere Entwärmung des Leiters und die einfachere automatisierbare Handhabung sprechen für diese Leitungstechnologie. Darüber hinaus ist die Leiterstruktur wegen ihres größeren Verhältnisses von Umfang zu Querschnittsfläche hinsichtlich der Führung hochfrequenter Signale aufgrund des Skin效ekts als vorteilhaft anzusehen. [62]

Flexible Schaltungsträger (FPC)

Verglichen mit klassischen, starren Schaltungsträgern sind flexible Schaltungsträger als kostenintensiv aber auch als äußerst platzsparend einzuordnen. Aufgrund der faltbaren flexiblen Trägerstruktur können FPCs in engsten Bauräumen eingesetzt werden. FPCs lassen sich mit einem hohen Automatisierungsgrad fertigen, konfektionieren und kontaktieren. Sie können mit einer Größe von bis zu 600 mm x 1.500 mm hergestellt sowie mit aktiven und passiven Bauelementen bestückt werden. Dabei besitzen sie eine sehr hohe Funktionsdichte und gegenüber Rundleitern das höchste Potenzial zur Gewichtsreduktion aller elektrischen Verbindungstechniken [63; 64].

Als Grundlage für diese Art von Schaltungsträgern dient eine flexible Basisfolie, auf die mithilfe eines produktspezifischen Klebstoffsystems mehrere Leiterbahnen aus einem Leitermaterial aufgetragen werden. Die übliche Kupferfolienstärke in der Automobilbranche beträgt hierbei 18 µm. Die Herstellung der Leiterbahnstruktur erfolgt ähnlich den Prozessen zur Herstellung starrer Leiterplatten, durch Druck- und Ätzzvorgänge aus einem vollflächigen Kupferlaminat. Die Art der Leiterbahngenerierung lässt die Abbildung von komplexen zweidimensionalen Leiterstrukturen zu. [65]

Eine ebenfalls durch ein Klebstoffsystem fixierte, flexible Deckfolie oder ein Decklack fungieren als Isolierung. Neben der Ausführung als einlagige flexible Leiterplatte können auch doppel- oder mehrlagige Leiterplatten hergestellt werden. FPC werden

dabei aufgrund der beschränkten Leiterschichtdicken von deutlich unter 100 μm hauptsächlich zur Signalübertragung eingesetzt. [66]

Flexible Flachleiter (FFC)

Als flexibler Flachleiter werden mehradrige Flachbandkabel mit einem rechteckigen Leiterquerschnitt bezeichnet. Die einzelnen Leiterbahnen verlaufen ausschließlich parallel zueinander und werden von einer Isolationsschicht umgeben [3]. Sie besitzen aufgrund größerer Leitungsquerschnitte höhere Stromtragfähigkeiten und sind als Meterware besonders zur Überwindung großer Strecken mit 1:1-Verbindungen geeignet [67]. Aufgrund des breiten Spektrums verarbeitbarer Leiterdicken zwischen 35 μm und 500 μm können FFCs sowohl zur Leistungs- als auch zur Signalübertragung genutzt werden, wobei die Leiterdicken für Leistungsanwendungen typischerweise über 100 μm liegen [63]. Durch die Verwendung einsatzspezifischer Polymerwerkstoffe als Isolationsschicht kann das Leitersystem dabei auf spezielle Anforderungen wie z. B. eine geringe Feuchteaufnahme, erhöhte Temperaturstabilität oder die Eignung für das Laserdurchstrahlschweißen zur Fixierung auf Substratoberflächen eingestellt werden. FFCs werden in ihren unterschiedlichen Ausprägungen bereits in einzelnen Pkw-Modulen, wie im Lenkrad verbauten Spring Clocks oder als Sensor in der Stoßstange serienmäßig eingesetzt. Abhängig vom eingesetzten Herstellungsprozess wird zwischen laminierten (FFC-I) und extrudierten Flachleitern (FFC-e) unterschieden. [5]

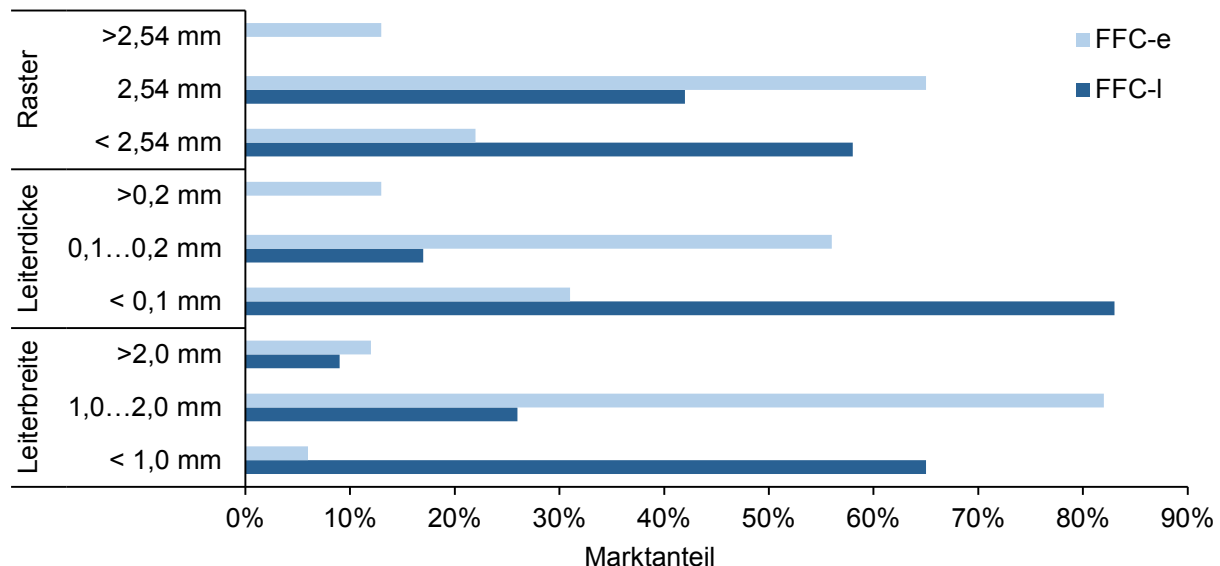


Abbildung 13: Eingesetzte Flachleitergeometrien am Markt [5; 4]

Die Querschnitte der am Markt verfügbaren laminierten Flachleiter sind im Vergleich zu extrudierten Leitern geringer. Gängige Leiterbreiten bewegen sich typischerweise unter 1 mm und die Leiterdicken sind meist geringer als 0,1 mm. Eingesetzt werden laminierte Flachleiter daher vorwiegend für signalführende Leitungen (Abbildung 13).

Extrudierte Flachleiter

FFC-e finden durch das breitere am Markt verfügbare Querschnittsspektrum neben der Signalführung auch bei der Leistungsübertragung Anwendung. Bei der klassischen Herstellung von extrudierten Flachleitern (FFC-e) werden die Leiterbahnen im Kunststoffextrusionsverfahren vom aufgeschmolzenen Isolationswerkstoff umschlossen. Das Fertigungsverfahren ermöglicht die Herstellung gleichmäßiger Isolationswandstärken. Beim Extrusionsverfahren kann auf eine Vielzahl an durch die Automobilindustrie freigegebenen Isolationswerkstoffe zurückgegriffen werden, deren Einsatz sich bereits für klassische Rundleitersysteme bewährt hat (Tabelle 2). Vorteilhaft ist somit das vorhandene Know-how bei der Verarbeitung, aber auch dem Einsatz dieser Isolationsmaterialien. Typische Materialien sind vor allem wärmebeständiges Polyvinylchlorid (PVC-P), Polypropylen (PP) und thermoplastisches Polyester (TPE-U und TPE-E). [3; 4]

Werkstoffeigenschaften	Isolationswerkstoffe FFC-I				Isolationswerkstoffe FFC-e			
	PET	PEN	PETF	PI	PP	PVC (-P)	TPE-U	TPE-E
Zugfestigkeit in N/mm ²	47	70	25	75	20	25	40	25
Reißdehnung in %	50	60	350	4	555	300	500	800
Gebrauchstemperatur								
Kurzzeitig in °C	200	250	300	400	150	140	150	150
Maximal in °C	100	155	250	260	125	125	125	90
Minimal in °C	-20	-40	-200	-200	-40	-40	-40	-40

Tabelle 2: Werkstoffeigenschaften häufig eingesetzter Isolationsmaterialien für flexible Flachleiter [3; 68; 69; 70]

Laminierte Flachleiter

Die Herstellung von FFC-I erfolgt durch ein Laminierverfahren, bei dem der Verbund zwischen Isolationsschicht und Kupferleiter durch ein Klebstoffsystem erfolgt. Hierbei werden die Isolationsfolien mit Klebstoff beschichtet und in einem Fertigungsprozess zusammengeführt. Eingesetzte Klebstoffsysteme sind aufgrund der chemischen Resistenz und elektrischen Isolationseigenschaft vorwiegend Acryl-, Fluorpolymere-, Polyester- und modifizierte Epoxidklebstoffe, die einen präzise gesteuerten und aufwändigen Produktionsprozess bedingen, der z.B. durch einen zusätzlichen Aushärteschritt für photoaktive Klebstoffe gekennzeichnet ist [4]. Die eingeschränkte Werkstoffauswahl des Isolationssystems und die Gefahr der Delamination schränken eine Anwendung im Kfz zusätzlich ein [71]. Zur Qualifizierung für den Einsatz im Automobil müssen aufwändige Spezifikationstests und Dauerbelastungstest unter mechanisch-thermischer Last durchgeführt und bestanden werden. Heutzutage werden hauptsächlich Polyethylenterephthalat- (PET) und Polyetrafluorethylen (PTFE) eingesetzt, wobei zukünftig der verstärkte Einsatz von Polyethylenaphthalat (PEN) zu erwarten ist [4].

Extrudierte und laminierte Flachleiter im Vergleich

Der Extrusionsprozess zur Herstellung extrudierter Flachleiter ist aufgrund der gleichzeitig notwendigen Kupferdrahtpositionierung und dem Einschließen dieser Drähte mit dem Isolationswerkstoff im Vergleich zum Laminierverfahren deutlich komplexer. Vor allem das Aufschwimmen des Kupferleiters in der Kunststoffschmelze ist bezüglich der Prozessführung als problematisch anzusehen [72]. Angesichts der Komplexität und der höheren erreichbaren Verarbeitungsgeschwindigkeiten, bietet sich dieses Verfahren vor allem in der Massenerstellung an (Tabelle 3). Das beschriebene Produktionsverfahren erreicht einen guten Haftsitz zwischen Leiter und Isolationsmaterial und verhindert eine Delamination. Gleichzeitig wird durch den Endlosprozess der Isolationsextrusion eine homogene Isolierung ohne schadigungsanfällige Nahtstellen erreicht. Durch den Verzicht auf ein Klebstoffsystem zwischen Isolations- und Leiterstruktur wird ein rückstandsfreies Abisolieren der Leiterbahnen in späteren Verarbeitungsprozessen ermöglicht [46].

	FFC-I	FFC-e
Materialauswahl Isolation	gering	groß
homogene Isolation	nein	ja
Verarbeitungsgeschwindigkeit	5 - 12 m/min	> 20 m/min
Nachbehandlung	Aushärtung (10 h bei 120°C)	keine
Haftsitz	sehr hoch	gering - hoch
typische Leiterdicke	35 - 200 µm	100 - 200 µm
typische Isolationswandstärke	25 - 50 µm Folienstärke 20 - 50 µm Klebstoffdicke	100 - 200 µm

Tabelle 3: Verarbeitungseigenschaften von Flachleitern [3]

Als vorteilhaft erweist sich bei der Produktion von FFC-I die geringe Leiterdicke, die hohe Flexibilität im Prozessablauf sowie die Kombination unterschiedlicher Einzelleiter und die hohe Biegegewichseigenschaft der laminierten Leiterstrukturen [71]. Letztlich bietet im Vergleich zu FFC-e das Herstellungsverfahren von FFC-I in Bereichen mit hohem Typen- und Variantenspektrum sowie in Kleinserien aufgrund der günstigen Werkzeuge wesentliche Vorteile [5]. Aufgrund des Einsatzes eines adhäsiven Klebsystems als Verbindung von Isolationsfolie und elektrischen Leiter gestaltet sich der Abisolierprozess als aufwendiger, da der Haftsitz der Isolation im Vergleich zu extrudierten Systemen deutlich höher ist [4].

2.3.4 Potentiale durch den Einsatz innovativer Leiterstrukturen

Um die Potentiale der neuartigen Leiterstrukturen bewerten zu können, werden die einzelnen Technologien bezüglich der in Kapitel 2.2.3 abgeleiteten Anforderungs- und Handlungsfelder für die zukünftige Bordnetzproduktion und –montage diskutiert. Für eine Automatisierung der Produktions- und Montagelinie des Bordnetzes müssen neuartige Leiterstrukturen sowohl Signal- als auch Leistungsnetzwerke flexibel

abbilden können. Abbildung 14 zeigt die mit den vorgestellten Leitertechnologien, erzielbaren Leiterquerschnitte.

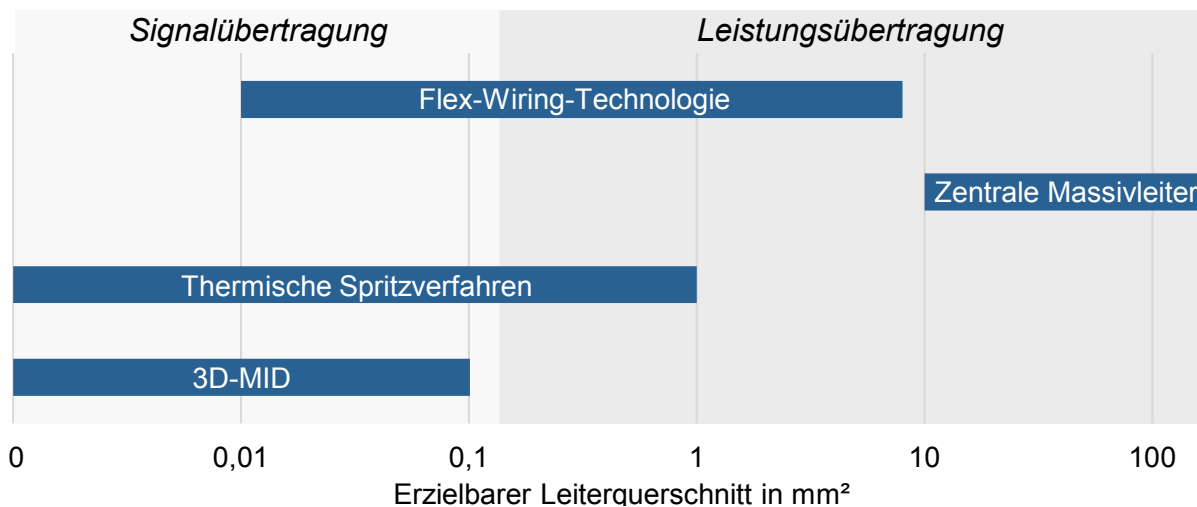


Abbildung 14: Erzielbare Leiterquerschnitte innovativer Leitertechnologien

Die additive Generierung von Leiterstrukturen findet aufgrund der geringen Aufbauraten primär als Aufbautechnologie von Signalleitungen mit Querschnitten bis zu 1 mm² Anwendung. Zwar ermöglichen thermische Spritzverfahren im Vergleich zu tintenbasierten Drucksystemen die Herstellung höherer Schichtdicken und Querschnitten von 1 mm², jedoch können die hohen Schichtstärken nur durch einen mehrfachen Schichtauftrag erzielt werden. Neben der Prozesszeit der Leiterbahnstrukturierung steigt damit auch die thermische Belastung des Trägersubstrats erheblich an [47]. Der additive Aufbau der Leiter ermöglicht die Leiterbahngenerierung direkt im Einbauort des Automobils in der Produktionsline des OEM. Aufwendige Lieferketten durch eine dezentrale Bordnetzfertigung, ggf. im Ausland, durch den Kabelsatzkonfektionär können durch den Einsatz aufgelöst werden. Wesentliche Vorteile liegen in der hohen Flexibilität der Leitungspfadführung und der direkten Metallisierung des Trägersubstrates durch den additiven/semiadditiven Materialauftragsprozess. Nachteilig sind zusätzlich erforderliche Prozessschritte bei der Aufbringung von Passivierungs- bzw. Isolationsschichten [47]. Gleichzeitig führt die direkte Aufbringung der Leitungspfade dazu, dass metallische Trägerstrukturen, z.B. blanke Karosseriebauteile, nicht ohne isolierende Zwischenschicht strukturiert werden können.

Der breiteste Querschnittsbereich kann nach heutigem Stand der Technik durch den Einsatz kaltgewalzter Rechteckleiter dargestellt werden. Flexible Flachleiter decken Leiterquerschnitte im Bereich zwischen 0,01 mm² und 6 mm² ab [4], erzielbare Querschnitte zentraler Massivleiter liegen zwischen 10 mm² und 120 mm² [55]. Mit beiden Leitertechnologien können Signal- und Leistungsströme zuverlässig geführt werden. Die hohe Biegesteifigkeit zentraler Massivleiter führt zu einer erschwerten Handhabung, vor allem bei der Montage des starren Leitungssystems. Zusätzlich

bedingt die dezentrale Fertigung und die hohen Packungsdichten der Massivleiter einen erhöhten logistischen Aufwand bei der Bereitstellung beim OEM [55].

Flachleiter eignen sich aufgrund ihrer Flexibilität und der flachen, rechteckigen Struktur gut für automatisierte Handhabungsprozesse. Unterschiedliche Forschungsansätze können eine vollautomatisierte Konfektionierung und Montage belegen, (siehe Kapitel 2.5.2). Die Herstellung der Leiterstrukturen basiert dabei auf bekannten Produktionsverfahren klassischer Rundleitersysteme und erreicht einen hohen Automatisierungsgrad. Gleichzeitig sind die eingesetzten Leiterstrukturen und -materialien bereits für die hohen Automotive-Anforderungen qualifiziert. Die Flexibilität und flache Bauweise von Flachleitern erlauben zudem hohe Packungsdichten, z.B. durch das Aufrollen als Meterware.

	3D-MID	Thermische Spritzverfahren	Zentrale Massivleiter	Flex-Wiring-Technologien
Steigerung der Integrationsdichte	+	+	++	+
Bereitstellungs- und Montageflexibilität	++	+	0	+
Universelle Anwendbarkeit	-	-	+	++

Tabelle 4: Automatisierungspotentiale innovativer Leitertechnologien

Tabelle 4 zeigt die Bewertungsmatrix der neuartigen Leitungstechnologien für Bordnetzanwendungen hinsichtlich einer universellen Anwendbarkeit und der Bereitstellungs- und Montageflexibilität nach den definierten Anforderungen aus Kapitel 2.2.3. Das höchste Potenzial den Anforderungen zukünftiger Bordnetzsysteme in den Bereichen Produktion, Logistik, Montage aber auch Werkstoffe gerecht zu werden, bieten letztlich flexible Flachleiter. Sie können sowohl als Signal- und Leistungsnetzwerk fungieren und sind durch ihre flexible, rechteckige Struktur mit automatisierten Handhabungssystemen gut verarbeitbar. Ihre Struktur lässt zudem eine hohe Integrationsdichte im Kfz zu und ermöglicht eine bauraumoptimierte Darstellung des physischen Bordnetzes.

Für eine gesamtheitliche Automatisierung der Bordnetzproduktion und -montage über die bestehenden Schnittstellen hinweg muss jedoch ebenfalls eine Kontaktierungstechnologie der Leiterstruktur eingesetzt werden, die den elektrischen Anschluss flachleiterbasierter Bordnetzsysteme und E/E-Komponenten zulässt. Ferner werden auch hierfür hohe Anforderungen an eine gute Automatisierbarkeit und flexible Anwendbarkeit im Bauraum des Automobils gestellt. Eine Übersicht der am Markt eingesetzten Kontaktierungslösungen für flexible Flachleiter und deren Eignung für den Einsatz zur Vernetzung neuartiger Bordnetzarchitekturen werden deshalb in den nachfolgenden Kapiteln vorgestellt.

2.4 Potentiale flachleiterbasierter Bordnetzsysteme

Durch die Struktur des Flachleiters eignet sich deren Einsatz vor allem in flächigen Einbauräumen mit einfachen Topologien zur Überwindung langer Distanzen. Vor allem Hohlräume zwischen Verkleidungselementen im Innenraum, die nur einen geringen Bauraum für die Verlegung des Kabelsatzes zur Verfügung stellen, können zukünftig mithilfe von FFCs effektiv vernetzt werden. Hohlräume, wie sie beim Einsatz klassischer Rundleiterkabelsätze geometriebedingt erforderlich sind, können auf ein Minimum reduziert werden. Durch den geringen notwendigen Bauraum erhöht sich gleichzeitig auch der gestalterische Freiraum der Verkleidungselemente und deren Anschlusskomponenten.

2.4.1 Aktuelle Anwendungen im Automobil

Die speziellen Eigenschaften des Flachleiters ermöglichen die Anwendung als Funktionselement oder die Substitution des konventionellen Rundleiter-Kabelsatzes (Abbildung 15).

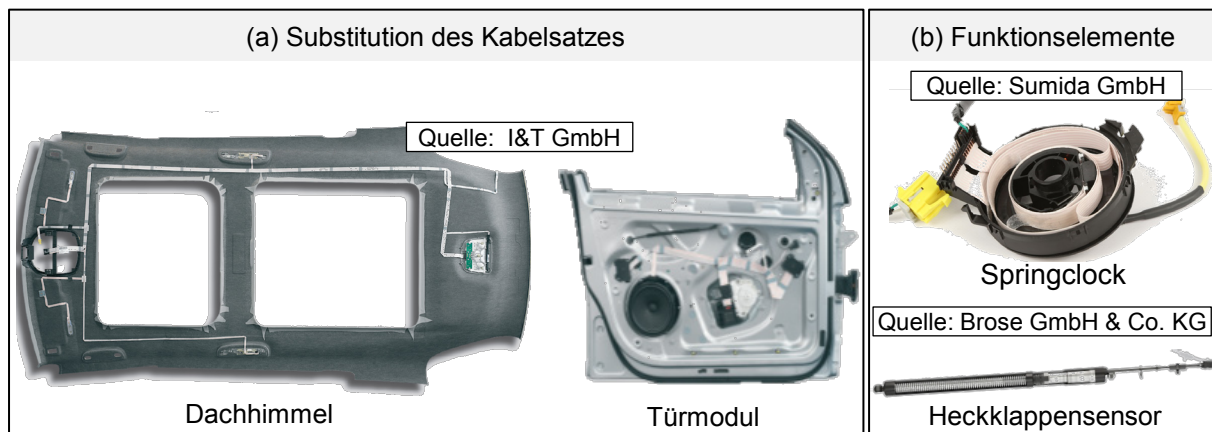


Abbildung 15: Anwendungsbeispiele von Flachleitern im Automobil

Substitution des Kabelsatzes

Vor allem im Bereich des Dachhimmels kommen daher bereits seit mehreren Jahren Flachleiter serienmäßig zum Einsatz, um die darin verbauten Funktionselemente wie die Innenraumbelichtung, die Dachantenne oder das dritte Bremslicht zu vernetzen. In Fahrzeugmodellen von Daimler, Nissan, Renault und VW wurden mit Flachleiterkabelsätzen in der Dachverkabelung bereits Gewichtseinsparungen von bis zu 15 % realisiert [71]. Abbildung 15 (a) zeigt die Verbauseite des Dachhimmels einer Mercedes M-Klasse [73]. Die Herstellung der Flachkabelstruktur erfolgt durch Vorkonfektionierung der Leiter, Gehäusebestückung, Verbindungsschweißen der einzelnen Kontakte und Bandagieren. Neben der serienmäßigen Substitution des

Kabelsatzes im Dachhimmel zeigen Konzeptstudien⁸, dass auch andere Bauräume, wie das Türmodul (Abb. 15b) für den Einsatz flexibler Flachleiter geeignet sind.

Funktionselemente

Die hohe Biegeweichselfestigkeit der Leiterstruktur ermöglicht zudem den Anschluss dynamisch belasteter, nicht ortsfester Komponenten. Eine am Markt etablierte Serienanwendung von FFC im Kraftfahrzeug findet sich in Wickelfederkassetten zur Anbindung von Lenkstockschaltermodulen. Die Leiterstruktur stellt dabei das Bindeglied zwischen den im Lenkrad verbauten elektronischen Komponenten wie Airbag, Kontrolltasten, Lenkwinkelsensoren oder die Lenkradheizung und dem Hauptbordnetz her und gewährleistet eine zuverlässige elektrische Verbindung des rotierenden Lenkrads. Auch die Verkabelung von Schiebetüren ist ein typisches Anwendungsfeld der biegeweichselfesten Leiterstruktur [74].

Die flächige Struktur des Flachleiters kann neben der elektrischen Verbindung von E/E-Komponenten zudem als kapazitiver Sensor dienen. Seit mehreren Jahren bieten Automobilzulieferer flachleiterbasierte Heckklappenschalter am Markt an. Hierbei fungiert ein extrudierter einadriger Flachleiter als Sensor unterhalb des Stoßfängers. Dieser reagiert auf eine einfache Fußbewegung im Heckklappenbereich, wodurch die Heckklappe berührungslos geöffnet werden kann. [75; 76]

2.4.2 Ansätze zur automatisierten Konfektionierung und Montage von Flachleiterkabelsätzen

Aufgrund der neuen Möglichkeiten, die insbesondere aus den rechteckigen Querschnitten der Flachleiter resultieren, haben sich verschiedenen Forschungsinstitute frühzeitig mit der jungen Technologie der neuartigen Bordnetzstrukturen beschäftigt. Hierbei wurden sowohl die Konfektionierung und Montage der Kabel als auch Kontaktierungsverfahren für eine automatisierte, flachleiterbasierte Kabelsatzproduktion untersucht.

Automatisierte Konfektionierung von Flachleiterkabelsätzen

In [4] wird ein durch den Einsatz von Industrierobotern automatisierter Prozess zur Konfektionierung von folienisolierten Flachleitern vorgestellt. Die entwickelte Pilotanlage ermöglicht die Handhabung und Kontaktierung von Folienleitern. Dem System müssen abgelängte Leiter und Steckverbindersysteme mit integrierten Leiter-Pierce-Crimpverbindungen zugeführt werden. Das kinematische System positioniert Folienleiter und Steckverbinder automatisiert in speziellen Konfektioniereinheiten und verbindet die Leiterstrukturen über ein kraftgesteuertes Kontaktierwerkzeug. Das beschriebene Montagekonzept erlaubt die automatisierte Kontaktierung von Steckverbindern mit Folienleitern zur Herstellung von einfachen Teilkabelsätzen.

⁸ Bei den in Abbildung 15 (a) dargestellten Beispielen handelt es sich um Anwendungen der Fa. I&T GmbH.

Durch den Einsatz spezieller Montagewerkzeuge gestaltet sich dieses Verfahren jedoch als wenig flexibel bezüglich der Konfektionierung alternativer Leitungspfade. Gleichzeitig erfordert die Herstellung der Teilkabelsätze nach dem beschriebenen Prinzip weiterhin eine aufwendige und fehleranfällige manuelle Montage im Einbauraum des Kfz.

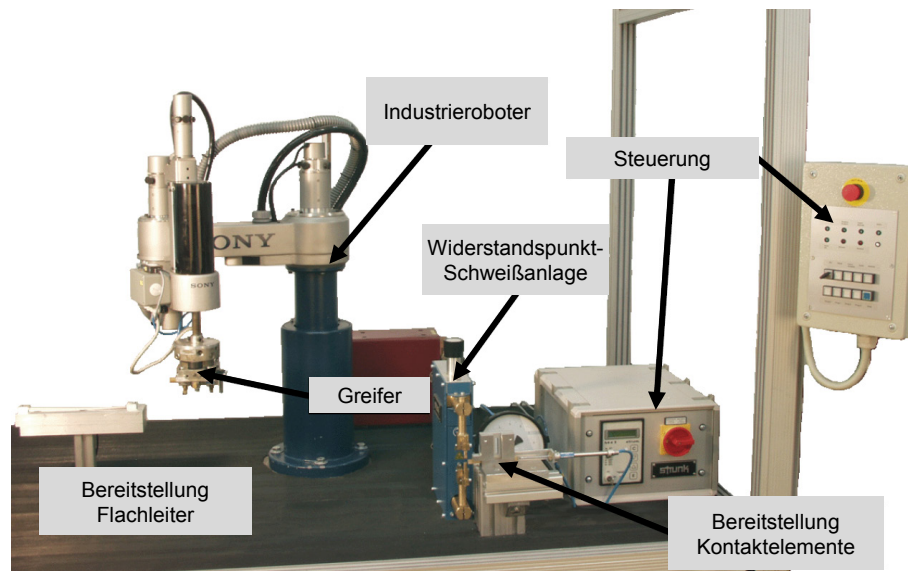


Abbildung 16: Montagezelle zur automatisierten Konfektionierung von folienisolierten Flachbandkabeln [5]

[5] beschreibt einen ähnlichen Lösungsansatz zur automatisierten Konfektionierung von Teilkabelsätzen aus folienisolierten Flachbandkabeln. Im Gegensatz zu [4] kommt hierbei zur Verbindung des Leiters jedoch keine kraftschlüssige Pierce-Crimpverbindung zum Einsatz, sondern ein stoffschlüssiges Widerstandspunktschweißverfahren. Abbildung 16 zeigt den Aufbau der Montagezelle der Leitungssätze. Über einen SCARA⁹-Roboter werden bereits abgelängte und abisolierte Flachleiter der Widerstandsschweißanlage zugeführt und mit Kontaktelementen über einen Schweißprozess verbunden. Auch mit diesem Ansatz werden lediglich Teile der Produktionskette von Kabelsätzen automatisiert und erfordern weiterhin vor- und nachgelagerte teilautomatisierte Prozessschritte bis zur Endmontage des Leitungssatzes im Kfz.

Automatisierte Montage von Flachleiterkabelsätzen

Einen grundsätzlich neuen Ansatz, der nicht darauf aufbaut etablierte teilautomatisierte Prozessschritte der klassischen Bordnetzproduktion für flachleiterbasierte Leitungssätze zu nutzen und gesamtheitlich zu automatisieren, beschreibt [3]. Hierin wird aus den Möglichkeiten, die sich aus der Struktur des Flachleiters ergeben, ein angepasstes neuartiges Montagekonzept entwickelt. Die Machbarkeitsstudie zur

⁹ Selective Compliance Assembly Robot Arm (engl.), horizontaler Gelenkarmroboter

automatisierten Handhabung und Montage von flexiblen Flachleiterkabeln beschreibt einen Produktionsprozess zur Verlegung von FFC-Meterware, der es ermöglicht, mehradrige Flachleiterkabel auf dreidimensionalen, flächigen Modulen robotergeführt zu verlegen und zu fixieren (Abbildung 17). Das System verarbeitet dabei auf Rollen gelagerte Meterware von Flachbandleitungen und längt diese entsprechend der gewünschten Pfadlänge innerhalb eines Verlegewerkzeugs ab.

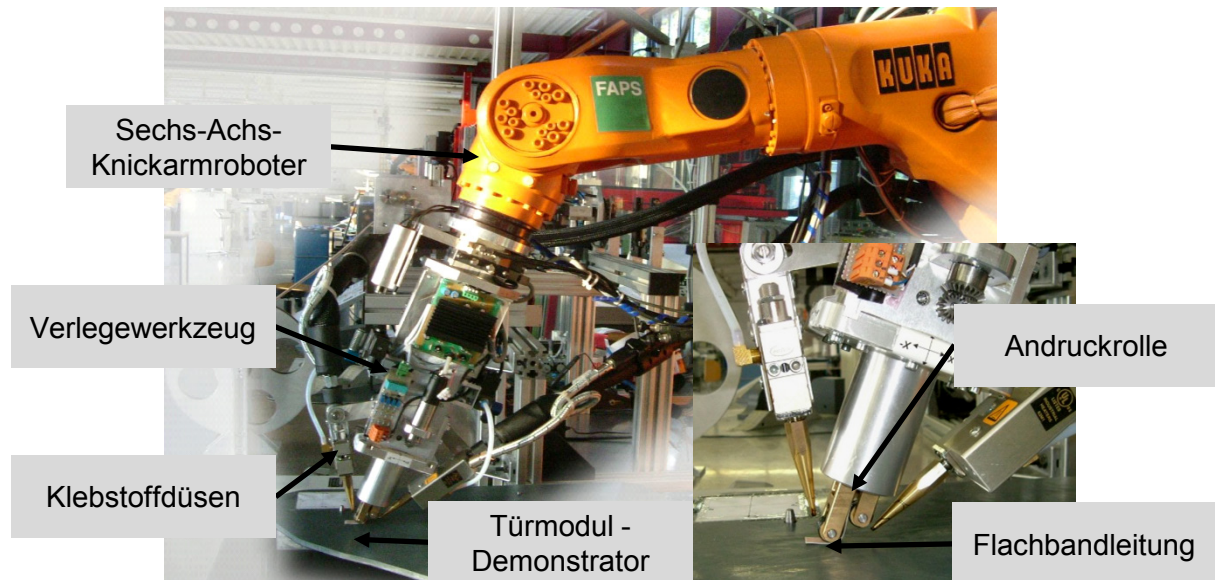


Abbildung 17: Montagezelle zur automatisierten Montage von Flachbandleitungen [3]

Die realisierten Konzepte der Verlegewerkzeuge basieren auf unterschiedlichen Fügeworkprinzipien der Flachleiter und erlauben die flexible Montage unterschiedlicher Flachleitersysteme auf dem Trägersubstrat. Gute Festigkeitswerte, die den hohen Anforderungen im Automobil gerecht werden, weisen vor allem die in das Verlegewerkzeug integrierten Prozesse Schmelzkleben sowie Laserdurchstrahlschweißen auf. Der fertigungstechnische Ansatz zur automatisierten Montage von Flachleiterkabeln auf Fahrzeugmodule zeigt, dass sich die Montageprozesskette der Leiterstrukturen für Pkw-Türmodule vollständig automatisieren lässt.

2.5 Kontaktierungstechnologien für flexible Flachleiter

Um das Potenzial der neuen Flachleitertechnologie hinsichtlich Konfektionierung und Montage nutzen zu können, wurden in den vergangenen Jahren ebenfalls Kontaktierungsverfahren für FFCs weiterentwickelt. Verfahren, die zur Kontaktierung von FFCs befähigen, können grundsätzlich in direkte und indirekte Kontaktierungsverfahren gegliedert werden. Indirekte Kontaktierungsverfahren kennzeichnen sich durch einen vorgelagerten Prozessschritt zum Entfernen der Isolationsschicht vor dem eigentlichen Fügeverfahren zur Herstellung der elektrischen Verbindung. Beim Einsatz direkter Kontaktierungsverfahren kann auf diesen vorgelagerten Prozessschritt verzichtet werden. Abhängig vom physikalischen Wirkprinzip der

elektrischen Verbindungsstelle, wird zwischen kraft-, form- und stoffschlüssigen elektrischen Kontakten unterschieden.

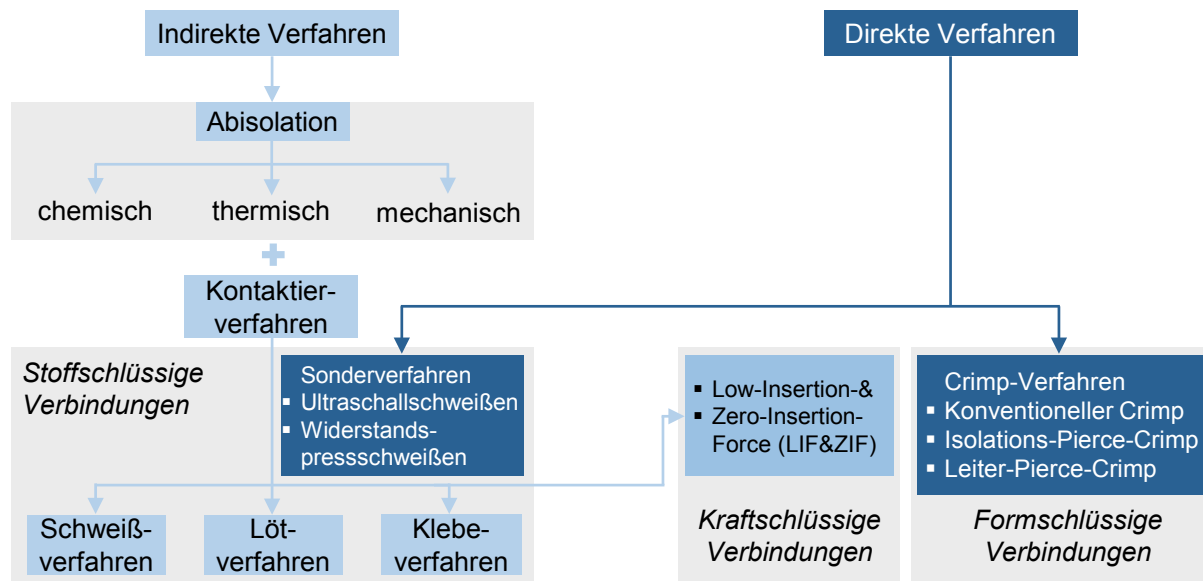


Abbildung 18: Verfahrenseinteilung von Kontaktierungstechnologien für flexible Flachleiter

Abbildung 18 zeigt eine Einteilung der bekannten Kontaktierungstechnologien und ordnet sie den jeweiligen physikalischen Wirkprinzipien zu. Nachfolgend werden die einzelnen Verfahren bezüglich ihrer Wirkprinzipien detailliert erläutert und deren wesentliche Prozesspotentiale für eine universell einsetzbare und gut automatisierbare Kontaktierungstechnologie für flachleiterbasierte Bordnetze beschrieben.

2.5.1 Prozesse zum Entfernen der Isolationsschicht

Der Prozess der Abisolierung von Flachleitern kann mechanisch, thermisch oder chemisch erfolgen.

Chemische Verfahren

Chemische Prozesse haben sich in der Praxis durch die Verwendung von Säuren oder Laugen als ungeeignet herausgestellt. Der Einsatz ermöglicht zwar die Auflösung der Esterketten des polymeren Isolationsmaterials, jedoch reagieren die aggressiven Medien ebenfalls mit der Kupferoberfläche und bilden aufgrund der Kapillarwirkung zwischen Leiter und Isolation keine definierte Abisolierkante, wodurch es zu Qualitätsschwankungen der elektrischen Verbindungsstelle kommt [71]. Zudem ist die Prozessführung ätzender Flüssigkeiten nur mit erhöhten Sicherheitsmaßnahmen serientauglich umzusetzen [77].

Mechanische Verfahren

Die mechanische Entfernung der Isolationsschicht kann durch Schleifen, Fräsen und Schneiden erfolgen. Beim Schleifen erfolgt der Materialabtrag mittels Schleifschei-

ben, die längs oder quer zur Leitungsrichtung angeordnet sind. Um ein Verkleben der Schleifscheiben durch die abgetragene Isolationsschicht zu vermeiden, kommen geschlitzte Schleifscheiben oder Fächerschleifwalzen zum Einsatz [78].

Der spanbildende Abtrag der Isolation kann durch unterschiedliche Fräskopfgeometrien erfolgen. Die flexible Prozessführung erlaubt das Einbringen von Isolationsfenstern an unterschiedlichen Stellen des Flachleiters. Scharfe Fräskanten des Isolationsfensters führen jedoch bei einer mechanischen Belastung des Flachleiters in der Grenzschicht zwischen Isolation und Leiter zur Spannungserhöhung, wodurch eine Delamination der Isolationsschicht hervorgerufen werden kann [3]. Ein weiteres, bereits automatisiertes Abisolierverfahren ist das Schneiden, bei dem ein oder mehrere Schneid- oder Formmesser in einem bestimmten Schnittwinkel in das unter ihnen laufende Kabel eindringen und über ihre Schneidkante die Isolation vom Kupferleiter abschälen. Das Abschneiden des auf diese Weise erzeugten Polymerspans erfolgt durch leichtes Anheben der Schneidkante [79].

Verfahrensbedingte Kontaktstellenfehler wie die unvollständige Entfernung der Isolationschicht oder die Beschädigung der Leiterbahn machen eine umfassende Prozesskontrolle der mechanischen Abisolierverfahren notwendig, um die Zuverlässigkeit der elektrischen Verbindung sicherzustellen.

Thermische Verfahren

Bei thermischen Abisoliertechniken hat sich aufgrund der geforderten hohen Präzision das CO₂-Laserstrahlverfahren durchgesetzt, bei dem die laserlichtabsorbierende Isolation des Kabels in einer Tiefe von ca. 5 - 10 µm schlagartig erhitzt wird, ablatiert und sich dabei von der Kupferschicht löst [79]. Das Laserstrahl-Abisolieren ermöglicht als selektives Abtragsverfahren eine ortsflexible Bearbeitung der Flachleiterkabel. Zudem ist das Verfahren durch hohe Abtragraten im Bereich von 0,25 – 0,50 m²/min und damit sehr kurzen Prozesszeiten gekennzeichnet. Die Prozessanlagen sind beim Einsatz von Laserisolationszellen im Vergleich zu mechanischen Abisolierzellen als aufwendig und kostenintensiv anzusehen. Neben der Einrichtung von Absaugungsanlagen der toxischen Dämpfe durch die Verdampfung der Isolation müssen umfangreiche Strahlenschutzmaßnahmen getroffen werden [80].

2.5.2 Stoffschlüssige Kontaktierverfahren

Nachdem der Isolationswerkstoff aus der Kontaktzone entfernt ist, kann der Flachleiter z. B. durch stoffschlüssiges Fügen verbunden werden. Der Fügepartner des Flachleiters kann dabei sowohl ein Kabel als auch ein Kontaktelement für eine konventionelle Anschlussstruktur sein. [81]

Auch ein direktes Fügen von flexiblen Flachleitern auf Leiterplatten ist denkbar. Stoffschlüssige Verbindungsverfahren können in

- Klebeverfahren,
- Lötverfahren und
- Schweißverfahren

unterteilt werden. Die Anlagen und Apparaturen für stoffschlüssige Fügeverfahren basieren auf konventionellen Schweiß-, Löt- und Klebeanlagen und sind nicht speziell für Flachleiter ausgelegt [3].

Klebeverfahren

Während für die Leistungsübertragung vor allem Schweiß- und Lötverfahren als Fügeprozesse zum Einsatz kommen, sind zur Signalübertragung auch elektrische Verbindungen mittels Leitleben möglich [71]. Leitlebverbindungen werden im Wesentlichen zum Anschluss von Leiterplatten sowie der Kontaktierung von LCD-Displays¹⁰ oder ähnlichen niederstromigen Komponenten eingesetzt.

Lötverfahren

Bei Lötverbindungskontakten wird zwischen der Durchsteckmontage und der Oberflächenmontage unterschieden. Durchgesteckte Kontakte benötigen Aussparungen in der Isolierung der Flachleiter und werden anschließend per Hand- oder Wellenlöten mit dem Leiter verbunden. Bei der Kontaktierung auf der Oberfläche können, wie bei SMDs¹¹, Reflow-Lötverfahren zum Einsatz kommen [3]. Das Bügel- sowie Kolbenlöten findet bei der stoffschlüssigen Kontaktierung von Flachleitern die größte Anwendung. Dabei besitzt das Bügellöten durch seinen Vorteil der Mehrfachkontaktierung die größte Marktdurchdringung bei der Stecker- und Stanzgitterkontaktierung. Auch das Löten bietet aufgrund des geringen elektrischen Übergangswiderstands an der Kontaktstelle die Möglichkeit höhere Ströme zu übertragen [82].

Prinzipiell handelt es sich beim Einsatz der Löttechnik um nicht lösbare Verbindungen, da sie nur durch Zerstörung des Lotes aufhebbar sind. Durch den Einsatz des geometrienausgleichenden, formbaren Lotwerkstoffs ist es möglich, eine Kontaktierung von Litzen und Rundleitern mit Flachleitern zu realisieren [83]. Die Fügepartner müssen hierfür jeweils an den Kontaktstellen abisoliert sein. Als Vorteile sind die gasdichte Verbindung und die hohe mechanische Belastbarkeit der Verbindung, die sich in der Serienproduktion reproduzierbar herstellen lässt, zu nennen. Der höhere Aufwand der Automatisierbarkeit durch die erforderliche Handhabung des Lots sowie

¹⁰ Liquid crystal display (engl.), Flüssigkristallbildschirm

¹¹ Surface mounted devices (engl.), oberflächenmontierte Bauelemente

die Gefahr der Isolationsbeschädigung aufgrund des erheblichen Wärmeeintrags sind jedoch als nachteilig anzusehen [31].

Schweißverfahren

Schweißkontakte werden über Widerstandsspaltschweißverfahren, Widerstandspunktschweißverfahren, Ultraschallschweißverfahren sowie Laserschweißverfahren hergestellt [63]. Mit Schweißverbindungen können die höchsten mechanischen Festigkeitswerte bei der elektrischen Verbindung von FFC erzielt werden. In Versuchen konnten an Kontaktierungen, die im Widerstandsschweißverfahren hergestellt wurden, Zugfestigkeiten von bis zu 45 N pro Kontakt gemessen werden [79].

Widerstandsschweißverfahren zeichnen sich durch geringere Investitionskosten, hohe Verfügbarkeit und kurze Rüstzeiten aus. Im Vergleich liegen die Vorteile des Ultraschallschweißens in einer kürzeren Prozesszeit und einer höheren Standzeit des Werkzeugs. Während das Kabel beim Widerstandsschweißen beidseitig abisoliert werden muss, ist dies für das Ultraschallverfahren, bei dem die Kontaktflächen unter Druck in einer oszillierenden Bewegung kalt verschweißt werden, nicht zwingend erforderlich. Alle Schweißverfahren besitzen gegenüber dem Löten die Vorzüge, dass kein zusätzliches Material und kein Flussmittel zur Reinigung der Kontaktstelle benötigt werden, was sich letztlich in einer einfacheren automatisierten Prozessführung äußert. Allgemein liegen die Vorteile der Schweißverfahren in der hohen erzielbaren Prozesssicherheit, einer konstanten Fertigungsqualität, einem stabilen Langzeitverhalten sowie einer schnell zu fertigenden elektrischen und mechanischen Verbindung. [5]

Ein generelles Problem bei den stoffschlüssigen Verbindungstechniken resultiert aus der hohen Wärmeeintragung in die Fügestelle. Werden keine wärmeableitenden Maßnahmen unternommen, führen die hohen Temperaturen zur Schädigung des Kontaktsystems oder der Leiterisolation. Weiterhin sind die bislang am Markt verfügbaren Schweiß- und Lötanlagen nicht für Flachleiterkabel optimiert, sondern auf Basis von konventionellen Apparaturen aufgebaut [84]. Trotz Anpassung der Anlagen und Einrichtungen ist z.B. das Einlegen und Positionieren der folienisolierten Flachleiter sowie des Steckverbinders eine manuelle Tätigkeit. Neben dem hohen Wärmeeintrag ist zudem die schlechte Reparaturfähigkeit von stoffschlüssigen Verbindungsstellen anzuführen, wodurch sich vor allem im Automobilbereich der Aufwand beim Austausch von fehlerhaften Komponenten deutlich erhöht [4].

2.5.3 Kraft- und formschlüssige Verbindungsverfahren

Die Verbindungsverfahren bei denen zusätzliche Kontaktierungselemente zum Einsatz kommen, sind durch eine große Vielfalt an Ausprägungen gekennzeichnet und schwerpunktmäßig in den Normen DIN 41611 und DIN 60352 sowie in zahlreichen Patentschriften beschrieben [85]. Die zwei am häufigsten am Markt

eingesetzten Verbindungstechnologien für Flachleiter sind dabei Crimp-Verfahren und LIF¹²- und ZIF¹³-Verbindungen [4].

Crimp-Verfahren

Bezogen auf klassische Rundleitersysteme konnte sich unter den kraft- und formschlüssigen Verbindungstechniken im Automobilbau bislang nur die Crimptechnologie durchsetzen. Die Technologie wurde für flexible Flachleiter weiterentwickelt und ist am Markt weit verbreitet. Im Allgemeinen werden bei der Crimptechnologie an das Flachleiterende Kontaktbuchsen oder Kontaktstifte angeschlagen, über die eine Steckverbindung hergestellt werden kann. Die Kontaktierungstechnologie kann dabei einerseits in die klassische Crimpverbindung unterteilt werden, welche einen mechanischen Kontakt mit dem zuvor abisolierten Leiter eingeht und somit einem indirekten Kontaktierungsprozess entspricht.

Die Pierce-Crimptechnologie ist den direkten Kontaktierungsverfahren zugeordnet und ermöglicht die direkte Kontaktierung des Flachleiters ohne den vorgelagerten Prozessschritt des Abisolierens. Pierce-Crimpverbindungen können als Isolations-Pierce-Crimp oder als Leiter-Pierce-Crimp ausgeführt werden. Der Isolations-Pierce-Crimp umschließt den Leiter seitlich, wohingegen der Leiter-Pierce-Crimp den Leiter tatsächlich durchstößt. [86]

Beim Crimp-Verfahren werden sowohl der Flachleiter als auch das Kontaktierungselement plastisch verformt, wodurch eine nicht zerstörungsfrei lösbare Verbindung zwischen Leiter und Verbindungselement entsteht. Die Einzelleiter werden durch Kontaktkrallen von außen umschlossen und zusammengepresst. Der Kontaktierungsprozess erfolgt in der Regel in speziellen Crimp-Pressen und wird oftmals kraftgesteuert überwacht. Konventionelle Crimpverbindungen stellen eine gasdichte Verbindung zum Leiter her und sind aufgrund der geringen Anfälligkeit bezüglich der Fremdschichtbildung in der gasdichten Kontaktzone als sehr zuverlässig anzusehen [84].

Nachteile bei der Anwendung der Isolations-Pierce-Crimptechnologie liegen einerseits in der, im Vergleich zum klassischen Crimpverfahren, kleineren erzielbaren Kontaktfläche zwischen Leiter und Crimp, wodurch nur geringe Ströme übertragen werden können. Andererseits werden bei der Isolations-Pierce-Crimptechnologie hohe Anforderungen an die Ausrichtung des Flachleiters zur Crimpanschlussstelle gefordert. Beim Leiter-Pierce-Crimp ist die Positionierung von geringerer Bedeutung. Die Prozesskraft ist hierbei jedoch aufgrund des Durchstechens im Vergleich zu anderen Verfahren deutlich höher [77].

¹² Low-insertion-force-Steckverbinder

¹³ Zero-insertion-force-Steckverbinder

LIF- und ZIF-Verbindungen

Weitere Klemmverbindungstechnologien, bei denen eine vorgelagerte Abisolierung stattfinden muss, sind die sogenannten LIF- und ZIF-Steckverbinder. Bei der LIF-Verbindung schließt die zu kontaktierende Baugruppe durch das Drücken einer schwenkbaren Federleiste den eigentlichen Kontakt. [87]

Im Falle des Zero-Insertion-Force-Steckverbinders wird zuerst der biegeschlaife Folienleiter in ein Anschlussgehäuse hineingeschoben. Erst danach wird die Kontaktkraft aufgebracht, beispielsweise durch das Schließen des Gehäuses. Beide Kontaktierungsmethoden zeichnen sich durch einen geringen Verschleiß der Kontaktfläche aus und eignen sich besonders für Anwendungen, bei denen eine hohe Anzahl an Steckzyklen gefordert ist. [88]

Im Bereich der Leiterplattenkontaktierung mit folienisolierten Flachleitern werden hauptsächlich reibschlüssige LIF- und ZIF-Steckverbinder eingesetzt, die ihrerseits auf den jeweiligen Leiterplatten mit den üblichen Applikationsverfahren befestigt werden, jedoch eine geringe mechanische Belastbarkeit aufweisen. Anwendungsgebiete sind neben dem Anschluss von Leiterplatten, die Kontaktierung von LCD-Displays [71]. Marktstudien zeigen, dass für den Bereich der Signalübertragung der Großteil der Verbindungen mit LIF-/ZIF-Steckverbindern (40%) ausgeführt wird, während die Leitlebetechnologie nur zu einem Anteil von 4% eingesetzt wird [4].

Lösbaren elektrischen Kontaktierungen kommen gerade für dezentral angeordnete mechatronische Module eine besondere Bedeutung zu. Aktuelle Entwicklungen erfordern grundlegend neue Lösungsansätze für die Anbindung der Leiter an die verteilte Elektronik. Gerade die geänderten Geometriebedingungen durch den Einsatz innovativer, flächiger Leiter, wie Flachleiterkabel, Massivleiter oder additiv aufgebrachte Strukturen erfordern neue Denk- und Lösungsansätze für lösbare Verbindungstechniken. Durch die Reduktion der Bauteilanzahl gegenüber herkömmlichen Steckverbindern zeigen insbesondere Direktkontaktierungen ein großes Potenzial zur Senkung der Herstell- und Montagekosten.

2.6 Ableitung des Forschungsbedarfs und Lösungsweg der Arbeit

Die automatisierte Verlegung der Kabelstrukturen am späteren Einsatzort stellt letztlich einen Paradigmenwechsel gegenüber der klassischen Bordnetzherstellung dar, bei der die größtenteils manuelle Kabelbaumfertigung sowie die manuelle Kabelbaummontage räumlich unabhängig voneinander und zeitlich nacheinander durchgeführt werden kann. Dies ermöglicht die Aufhebung der aktuell strikten Trennung von Kabelbaumfertigung und –montage und führt zu einer drastischen Änderung der heutigen Bordnetzproduktion. Lange Lieferketten aus europäischen oder afrikanischen Niedriglohnländern nach Deutschland können aufgelöst werden. Die flexible Montage der Leiterstrukturen kann in der Nähe der Produktionsstandorte der Automobilhersteller stattfinden.

Letztlich werden Bordnetzproduzenten zu Kabellieferanten oder Modulhersteller zu Bordnetzproduzenten, da die heutige manuelle Montage der Einzelleitungen zu komplexen Kabelsätzen durch eine automatisierte Montage von mehradrigen Flachbandleitungen substituiert werden kann. Das fehlende Bindeglied zwischen den zu vernetzenden E/E-Komponenten und der neuen, automatisiert verlegbaren Leiterstruktur ist jedoch eine zuverlässige und automatisierbare elektrische Verbindungstechnologie.

Die technischen Entwicklungen der Bordnetzproduktion weisen darauf hin, dass gerade diese fehlende Universalität und die meistens stark eingeschränkte Automatisierbarkeit, insbesondere hinsichtlich der Kontaktierung direkt im Einbauort des Automobils, der verfügbaren FFC-Kontaktierungsverfahren als Hauptgründe für die bislang vergleichsweise niedrige Marktdurchdringung der Flachleitertechnologie in der Massenproduktion zu betrachten sind. Mit den beschriebenen Lösungen ist es grundsätzlich möglich geworden, einzelne Kabelbaummodule mittels Flachleitertechnologie aufzubauen. Hierbei bleibt bislang jedoch ein Großteil des Potenzials der Flachleitertechnologie ungenutzt, da lediglich eine Adaption bestehender Fertigungs- und Kontaktierungstechniken für spezielle Anforderungen stattgefunden hat. Letztlich bleibt die Prozesskette insbesondere zur Herstellung von lösbaren Steckverbindern unverändert lang und ist vor allem von teilautomatisierten Prozessschritten und manuellen Montageoperationen geprägt. Auch sind die bisherigen Kontaktierungslösungen zumeist nur für eine spezielle Leitertechnologie ausgelegt. Dieser Zustand begründet auch die bisher nur geringe Verwendung von Flachleitern bei Bordnetzstrukturen, da der wesentliche Baustein einer universellen und automatisierten Kontaktierung dieser an sich gut automatisiert verlegbaren Leiterart derzeit nicht zur Verfügung steht.

Auch die fortschreitenden Entwicklungen hin zu hybriden Bordnetzstrukturen mit unterschiedlichen, dem Bauraum und dem Einsatzfall angepassten Leitertechnologien werden die aktuellen Technologien und Prozesse nicht oder nur unzureichend gerecht. Zusätzliche Herausforderungen an Bordnetze ergeben sich durch die zunehmende Nutzung von „Infotainment-Systemen“ in Kraftfahrzeugen. Den hohen Anforderungen hinsichtlich übertragbarer Datenraten und der Signalqualität bei diesen Systemen müssen die verwendeten Leiterbahnstrukturen zum einen und die Kontaktierungen der verschiedenen E/E-Module zum anderen gerecht werden. Durch die Nutzung einer angepassten Automatisierung in diesem Bereich kann die notwendige hohe Zuverlässigkeit und reproduzierbare Qualität erreicht werden.

Insgesamt fehlt eine, unter Berücksichtigung der jüngsten Forschungsergebnisse im Bereich der Leitertechnologien fundierte wissenschaftliche Grundlage zu diesem Thema, auf deren Basis tragfähige Lösungen erarbeitet werden können.

Diese Dissertation soll im Kontext des aufgezeigten Forschungsbedarfs folgende Forschungsfragen beantworten, um die zukünftige Bordnetzarchitektur durch den

Einsatz neuartiger Leiterstrukturen und Kontaktierungslösungen mit einem deutlich gesteigerten Automatisierungsgrad fertigen zu können:

1. Wie muss eine Kontaktierungstechnologie aufgebaut sein, um eine flexible Kontaktierung von Elektronikkomponenten mit automatisiert verlegten Flachleitern direkt im Einbauort des Automobils zu gewährleisten?
2. Kann die Kontaktierungslösung den geltenden Zuverlässigkeitsanforderungen heutiger Klemmkontakte im Kfz genügen?
3. Ermöglicht die neuartige Kontaktierungstechnologie neben der Verbindung von Leistungsnetzwerken ebenfalls die zuverlässige Anbindung von Signalpfaden?

Zur Beantwortung der vorgestellten Forschungsfragen gliedert sich die Dissertation in folgende Punkte, die gleichzeitig den Lösungsweg der Arbeit beschreiben:

- Ableitung von Anforderungen an eine flexibel einsetzbare und automatisierungsgerechte Kontaktierungslösung
- Evaluierung bekannter Kontaktierungsverfahren bezüglich der definierten Anforderungen
- Auswahl eines geeigneten, universell einsetzbaren Kontaktierungsverfahrens
- Analytische Beschreibung des Kontaktierungsprozesses
- Untersuchung der Prozesseinflussgrößen des Kontaktierungsprozesses
- Analyse der Langzeitzuverlässigkeit des neuartigen Kontaktierungsverfahrens
- Untersuchung der Hochfrequenzeigenschaften der Kontaktierungslösung

3 Flexibel einsetzbare und automatisierungsgerechte Kontaktierungsverfahren für Flachleiter

Die in [3] beschriebene Lösung ermöglicht es, einzelne Kabelbaummodule mittels kinematischer Systeme automatisiert mit Flachleitern aufzubauen. Dabei können komplexe Leitungspfade auf dreidimensionalen Trägersubstraten montiert werden. Das fehlende Bindeglied zwischen den zu vernetzenden E/E-Komponenten und der flachleiterbasierten Leiterstruktur ist jedoch eine zuverlässige und automatisierbare elektrische Verbindung.

Ziel dieser Arbeit ist die Lösungsdarstellung für eine universell einsetzbare und auf unterschiedliche Einbauszenarien anwendbare Kontaktierung für Elektronikbaugruppen. Der Ansatz einer gesamtheitlichen Automatisierung der Bordnetzmontage soll dabei die bislang getrennten Entwicklungsebenen aus E/E-Komponente, Leitungssatz und Montageplattform zu einem mechatronischen System vereinen. Das Kontaktsystem als vernetzende Komponente der Entwicklungsebenen setzt sich dabei aus den Teilkomponenten Flachleiter, Elektronikkomponente und dem Trägersubstrat als Montageplattform zusammen (Abbildung 19).

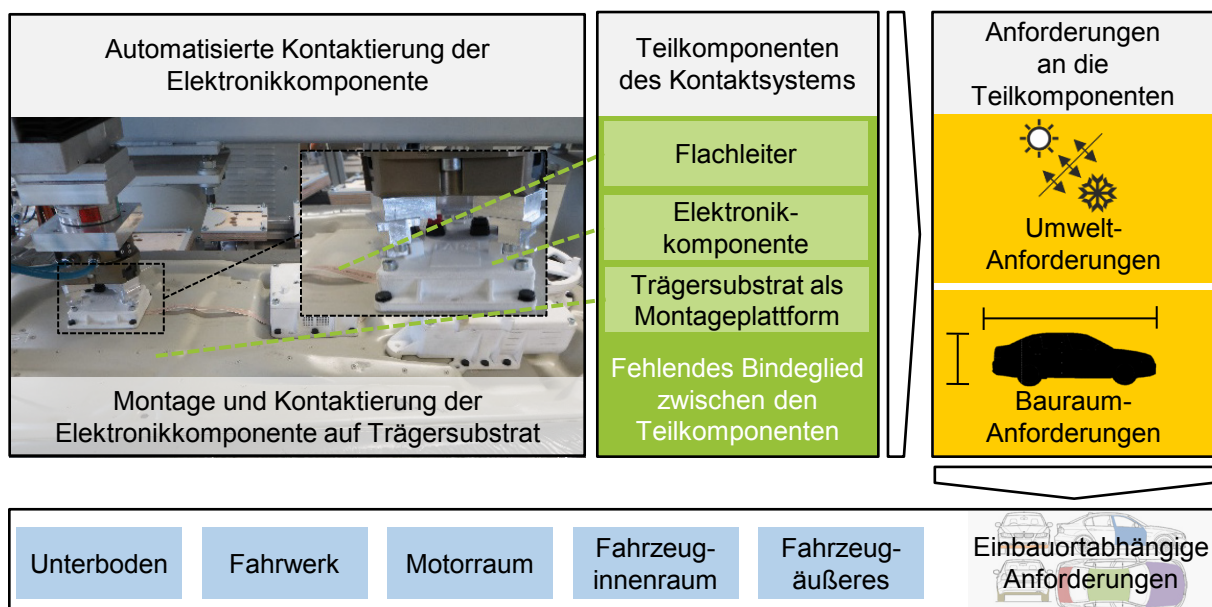


Abbildung 19: Anforderungen an die Teilkomponenten des Kontaktsystems

Die Konzeption und Erforschung eines universell einsetzbaren und automatisierbaren Kontaktierungsverfahrens für flexible Flachleiter erfordert dabei Kenntnisse bezüglich den Anforderungen, die an die jeweilige Teilkomponente gestellt werden. Hierbei kann zwischen Umwelt- und Bauraumanforderungen unterschieden werden.

Kapitel 3 stellt die einbauortabhängigen Anforderungen dar, die sich durch die Teilkomponenten des Kontaktsystems der elektrischen Verbindungstechnologie stellen. Auf Basis der definierten Anforderungen werden bekannte Kontaktierungs-

technologien für flexible Flachleiter evaluiert und daraus Handlungsfelder für eine optimale Kontaktierungslösung abgeleitet. Darauf basierend schließt Kapitel 3 mit der Vorstellung eines neuartigen Kontaktierungsverfahrens, welches dazu befähigt Elektronikkomponenten automatisiert mit flachleiterbasierten Pkw-Bordnetzsystemen zu verbinden.

3.1 Einbauortabhängige Anforderungen an die Kontaktierungstechnologie durch die Teilkomponenten des Kontaktsystems

Die Anforderungen, welche an eine Bordnetzkomponente gestellt werden, divergieren stark mit ihrer Position im Fahrzeug. Grundsätzlich kann zwischen Umweltaforderungen und Bauraumanforderungen an die Komponente unterschieden werden.

- **Umweltaforderungen:** Sie werden durch die im und um das Kfz herrschenden Umgebungseinflüsse bestimmt und können thermischer, mechanischer oder chemisch-medialer Natur sein. Basierend auf jahrzehntelangen Erfahrungen die sich aus der Feldbelastung des Automobils ergeben, hat sich dabei ein komplexer Raum aus Prüfvorschriften und Prüfnormen entwickelt, in welchen die geforderten Spezifikationen und zu testenden Prüfbedingungen der Komponenten definiert sind. Die Lieferantenvorschrift LV 214¹⁴ [89] fasst unterschiedliche Prüfnormen zur Untersuchung der Lebensdauer von Kfz-Steckverbindern zusammen und wird von allen deutschen Automobilherstellern angewendet. Aus der geltenden Liefervorschrift können letztlich die werkstofftechnischen Anforderungen an die Teilkomponenten des Bordnetzes definiert werden.
- **Bauraumanforderungen:** Sie werden an die Teilkomponente des Kontaktsystems gestellt und lassen sich aus den fahrzeugspezifischen Randbedingungen ableiten. Wesentliches Merkmal sind die geometrischen Abmessungen der spezifischen Komponente, wodurch funktionale Anforderungen wie Leitungsquerschnitte und -anzahl, das Rastermaß aber auch Leitungs- und Kontaktelementmaterialien festgelegt werden.

Sowohl Umwelt-, als auch Bauraumanforderungen sind sehr stark von der Position der Komponente im Fahrzeug abhängig. Um das divergierende Anforderungsfeld von Bordnetzkomponenten zu beschreiben, kann das Kfz nach [90] in fünf Haupteinbauorte gliedern werden: Motorraum, Fahrwerk und Unterboden, Fahrzeugäußeres, Fahrzeuginnenraum und Kofferraum teilen das Gesamtsystem Fahrzeug hierbei in fünf Haupteinbauorte auf. Der Kabelbaum moderner Bordnetzsysteme ist in

¹⁴ Die Prüfvorschrift für Kfz-Steckverbinder wurde von Vertretern der Automobilhersteller AUDI AG, BMW AG, Daimler AG, Porsche AG und VW AG erarbeitet und gilt als Standardwerk bei der Qualifizierung von Kfz-Steckverbindern.

Teilkabelsätze unterteilt um, für den Werker eine flexible Montage innerhalb der definierten Einbauorte zu gewährleisten. Im Hinblick auf die Erforschung eines automatisierbaren Kontaktierungsverfahrens für flachleiterbasierte Bordnetzsysteme werden im Rahmen dieser Arbeit die Einbauorte heutiger Bordnetzsysteme definiert.

Die Einbauorte moderner Bordnetzkomponenten orientieren sich dabei an den Haupteinbauorten des Kfz, sind jedoch auf weitere Ebenen verteilt:

- Türmodul (TM)
- Dachhimmel (DH)
- Heckklappe (HK)
- Innenraumboden (IRB)
- Kofferraum (KR)
- Motorraum (MR)
- Fahrwerk & Unterboden (FW)





Einbauorte Bordnetz	Einbauortabhängige Anforderungen				Anforderungs- Matrix
Türmodul (TM)	 Umwelt- Anforderungen	Thermisch	Mechanisch	Medial	 Prüf- Matrix
Dachhimmel (DH)		<ul style="list-style-type: none">▪ Schärfegrad 1▪ Schärfegrad 2▪ Schärfegrad 3▪ Schärfegrad 4	<ul style="list-style-type: none">▪ Schärfegrad 1▪ Schärfegrad 2▪ Schärfegrad 3▪ Schärfegrad 4	<ul style="list-style-type: none">▪ Feuchte Wärme▪ Salzsprühnebel▪ usw.	
Heckklappe (HK)					
Innenraum- Boden (IRB)					
Kofferraum (KR)	 Bauraum- Anforderungen	Geometrie		Werkstoff	 Parameter- Matrix
Motorraum (MR)		<ul style="list-style-type: none">▪ Leiterab- messungen▪ Substrat- stärken	<ul style="list-style-type: none">▪ Pinanzahl▪ Rastermaß	<ul style="list-style-type: none">▪ Leiter▪ Isolation▪ Trägermodul▪ E/EKomponente	
Fahrwerk/ Unterboden (FW)					

Abbildung 20: Einbauortabhängige Prüf- und Parametermatrix des Bordnetzes [90]

Aus der Gliederung des Kfz in unterschiedliche Einbauorte kann die einbauortspezifische Prüfmatrix und Parametermatrix abgeleitet werden.

- Die **Prüfmatrix** definiert dabei die Bedingungen der Zuverlässigkeitsuntersuchungen um thermische, mechanische und mediale Belastungszustände im Kfz zu simulieren. Der Grad der Zuverlässigkeitsuntersuchung wird dabei mit dem sogenannten Schärfeegrad beschrieben. Je höher der Schärfeegrad der Untersuchung ist, desto stärker wird die zu testende Komponente beansprucht und desto höher sind letztlich die Umwelтанforderungen an die zu prüfende Komponente.
- In der **Parametermatrix** werden die geometrischen Hauptabmessungen der Bordnetzkomponenten beschrieben, z.B. Leiterabmessungen, Pinanzahl oder

Rastermaß. Darüber hinaus ermöglicht die Matrix die Darstellung der einbauortspezifischen Werkstoffe für Leiter, Isolation, Trägerkomponente und E/E-Komponente, die je nach einbauortspezifischen Belastungszustand unterschiedlichen Anforderungen genügen müssen.

Die festgelegten Anforderungen innerhalb der Prüf- und Parametermatrix ermöglichen die Entwicklung geeigneter Prüfstrategien für die spätere Validierung der Zuverlässigkeit der Kontaktierungstechnologie und die Definition der wesentlichen geometrischen und werkstofftechnischen Parameter der Bordnetzkomponenten. Die Anforderungsdarstellung der einbauortspezifischen Randbedingungen in Matrixform erlaubt eine eindeutige Vergleichbarkeit und die Identifizierung möglicher Parallelitäten in den Anforderungen. Ziel ist es, durch diese methodische Vorgehensweise einen Lösungsraum für ein Kontaktierungsverfahren zu identifizieren, der bei möglichst wenig unterschiedlichen Anforderungen an das Kontaktierungsverfahren möglichst viele Wirkungsorte beinhaltet.

<div> <div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: flex-start; gap: 5px;"> <div> Schärfegrad 1</div> <div> Schärfegrad 2</div> <div> Schärfegrad 3</div> <div> Schärfegrad 4</div> </div> </div>	Thermische Beanspruchung	Mechanische Beanspruchung	Mediale Beanspruchung	
	Tmin bis Tmax [°C]	Effektivwert der Beschleunigung bei Rauschen [m/s²]	Relative Feuchte	Salznebel
Türmodul (TM)				
Innenraum	-40 +85	19,7	85°C/85% rel. F. 810 h	35°C/24h
Außenraum	-40 +125	19,7		35°C/96h
Dachhimmel (DH)				
Innenraum	-40 +85	19,7	85°C/85% rel. F. 810 h	35°C/24h
Außenraum	-40 +125	19,7		35°C/96h
Heckklappe (HK)				
Innenraum	-40 +105	19,7	85°C/85% rel. F. 810 h	35°C/24h
Außenraum	-40 +125	19,7		35°C/96h
Innenraumboden (IRB)				
Innenraum	-40 +85	19,7	85°C/85% rel. F. 810 h	35°C/24h
Außenraum	-40 +125	181		35°C/96h
Kofferraum (KR)	-40 +85	19,7	85°C/85% rel. F. 990h	35°C/96h
Motorraum (MR)				
Nahe Motor/Getriebe	-40 +125	27,8	85°C/85% rel. F. 631 h	35°C/96h
An Motor/Getriebe	-40 +155	105,5		
Fahrwerk/Unterboden(FW)				
Von Wärmequelle entf.	-40 +85	181	85°C/85% rel. F. 631 h	35°C/96h
Nahe Wärmequelle	-40 +155	181		

Tabelle 5: Bauraumabhängige Prüfmatrix für Bordnetzkomponenten [89]

Tabelle 5 zeigt die einbauortübergreifende Prüfmatrix und stellt die Hauptanforderungen der Lebensdauertests für Bordnetzkomponenten nach [89] dar. Sie bietet aufgrund der Vielzahl an erforderlichen Einzeltests für die Zuverlässigkeitsuntersuchung von Bordnetzkomponenten keine gesamtheitliche Darstellung der Prüfebene, sondern soll vielmehr die Grundbeanspruchungsarten in Form von thermischen, mechanischen und medialen Belastungen in Abhängigkeit des Einbauorts abbilden.

Die minimale und maximale Prüftemperatur der thermischen Last ergibt sich aus den Temperaturklassen nach ISO 6722. Als mechanische Referenzwerte der Vibrationsbelastung dienen die Effektivwerte der spektralen Beschleunigungsdichte eines Rauschprofils. Die mediale Beständigkeit von Kontaktsystemen kann über feuchte Wärme Untersuchungen oder Salznebeltests in geraffter Form simuliert werden. Aufgrund der Aggregatsnähe und der witterungsungeschützten Position treten die höchsten Umweltaanforderungen im Motorraum oder im Fahrwerk- und Unterbodenbereich auf. Geeignete Strukturen für die automatisierte Flachleitermontage sind v.a. flächige Bereiche im Automobil. Hierfür kommen die Bereiche Türmodul, Dachhimmel, Heckklappe, Innenraumboden und Kofferraum infrage. Umweltaanforderungen, in diesen Bereichen sind nach Tabelle 5 primär Beanspruchungen bei niedrigen bis mittleren Schärfegraden (S 1 - S 2). Dieser Zusammenhang ist bei der Auswahl eines geeigneten Kontaktierungsverfahrens im weiteren Verlauf der Arbeit zu berücksichtigen und spielt vor allem bei der Zuverlässigkeitsuntersuchung des Kontaktierungsverfahrens in Kapitel 5 eine wesentliche Rolle. Auf Basis der vorgestellten Zuverlässigkeitsmatrix werden für die Teilkomponenten des Kontaktsystems in den folgenden Kapiteln die Parametermatrizen definiert.

3.1.1 Flexible Flachleiter als Leiterstruktur des Bordnetzes

Die in Tabelle 5 zusammengefassten einbauortabhängigen Umweltaanforderungen gelten auch für die Leiterstrukturen der Kabelsätze. Am Markt stehen daher eine Vielzahl unterschiedlicher Isolationsmaterialien und Leiterquerschnitte zur Verfügung.

Mit der Analyse der verwendeten Leiterstrukturen können häufig eingesetzte Isolationsmaterialien und gängige Kabelquerschnitte definiert und den festgelegten Einbauorten zugeordnet werden. Grundlage der Parametermatrix des Leitungssystems sind die Spezifikationen von Leitungssätzen der aktuellen Baureihen¹⁵ F20, F21, F30, F33, F55, F56, F57, F80 und F83 (BMW) der Kabelsatzhersteller *LEONI AG*, *DRÄXLMAIER GmbH* und *Nexans autoelectric GmbH*.

Relevante Hauptmerkmale der Leiterstruktur sind der Leiterquerschnitt und der eingesetzte Isolationswerkstoff. Die Auswahl des Isolationswerkstoffs wird im Wesentlichen von der thermischen Gebrauchstemperatur im Kfz bestimmt. Aus der elektrischen Anwendung der zu verbindenden Komponente, d.h. ob die Leitung zur

¹⁵ F20-21: BMW 1er; F30: BMW 3er; F33: BMW 4er; F55-57: BMW MINI; F80 BMW M3; F83: BMW M4

Signal- oder Leistungsübertragung befähigen soll, ergibt sich letztlich der Leiterquerschnitt. Um eine manuelle Montage der Leiter im Kfz zu gewährleisten, kommen nach heutigem Stand der Technik primär flexible Litzenleiter zum Einsatz.

	Werkstoffeigenschaften				Geometrische Eigenschaften	Einbauort													
Isolationswerkstoff	Gebrauchstemperatur in °C	Zugfestigkeit in MPa	Reißdehnung in %	Medienbeständigkeit 0:schlecht 10: gut	Typische Leiterquerschnitte in mm²														
						TM		DH		HK		IRB		K R	MR An Motor	FW Entfernt WQ	FW Nahe WQ		
						Innenraum	Außenraum	Innenraum	Außenraum	Innenraum	Außenraum	Innenraum	Außenraum						
TPE-U (11Y)	90	>30	>400	5	0,22; 0,35; 0,5														
PVC-P (Y)	100	>10	>150	2	0,22; 0,35; 0,5														
TPE-E (12Y)	110	>25	>400	7	0,35; 0,5; 0,75														
PVC-P (YW)	125	>15	>150	2	0,35; 0,5; 0,75														
ETFE (7Y)	180	>30	>200	10	0,35; 0,5; 0,75														
FEP (6Y)	210	>15	>200	10	0,35; 0,5; 0,75														

Tabelle 6: Parametermatrix der Leiterstrukturen

Werkstoffe

Obwohl nach DIN 76722 alleine 24 Polymere als Isolationswerkstoffe für Fahrzeugleitungen definiert sind, werden bei einer gesamtheitlichen Betrachtung der Kabelsatzarchitektur im Automobil oftmals nur bestimmte Isolationswerkstoffe eingesetzt. In thermisch und medial hoch beanspruchten Einbauorten, z.B. Motorraum und Fahrwerk, kommen primär die Fluorpolymere ETFE und TEP zum Einsatz, die sich durch eine hohe Gebrauchstemperatur und eine sehr gute Medienbeständigkeit gegenüber aggressiven Medien (z.B. Säuren oder Laugen) auszeichnen. In thermisch gering beanspruchten Einbauorten findet vor allem der Thermoplast PVC-P und das thermoplastische Elastomer TPE-E Verwendung.

Geometrische Eigenschaften

Obwohl im Fahrzeugbereich Anwendungen von Verbrauchern mit einer hohen Leistungsaufnahme steigen, die Leitungsquerschnitte von 1,5 mm² oder mehr erfordern, sind typische Leitungsquerschnitte heutiger Bordnetzsysteme dennoch deutlich geringer und liegen heutzutage zwischen 0,22 mm² und 0,75 mm².

3.1.2 Trägersubstrat als Montageplattform

Für die Verlegung von Flachleitern im Automobil eignen sich flächige Strukturen wie beispielsweise das Türmodul, der Dachhimmel oder der Innenraumboden [72]. Aufgrund der gestiegenen Gewichts- und Sicherheitsanforderungen ist die Fahrzeugkarosserie, aber auch der Innenraum in einer Mischbauweise aus unterschiedlichen Metallen und Polymeren aufgebaut. Bezogen auf das

Gesamtgewicht des Autos besteht der Hauptteil mit etwa 82 % aus Stahl, Leichtmetallen (Aluminium- und Magnesiumlegierungen) sowie thermoplastischen und duroplastischen Kunststoffen. [91; 92]

Wichtige Kennzahlen der Strukturelemente sind ihre mechanischen und thermischen Eigenschaften, die in Abhängigkeit des Einbauraums unterschiedlichsten Anforderungen genügen müssen. Mechanisch werden die zum Einsatz kommenden Werkstoffe im Wesentlichen durch den Elastizitätsmodul und die Zugfestigkeit beschrieben. Wichtige thermische Kennwerte sind die Warmformbeständigkeit und der Längenausdehnungskoeffizient.

Substrat- material	Werkstoffeigenschaften					Geometrische Eigenschaften	Einbauort							
	Fasergehalt in %	Formbeständigkeit in °C nach ISO 75-1 (HDT)	Elastizitätsmodul in Fließrichtung in Mpa	Zugfestigkeit in Fließrichtung in MPa	Ausdehnungs- koeffizient 10^{-6} in 1/K	Typische Substratstärke in mm								
							TM	DH	HK	IR	B	KR	M	F
ABS	0-50%	90-107	2150-11400	40-110	12,6-65	2-4								
PP	0-50%	55-158	1450-11000	33-107	13,6-150	2-4								
TPU	0-50%	70-96	1200-15100	25-203	14-155	2-4								
PA	0-50%	70-225	2100-17.500	40-250	15-120	2-4								
EnAW6082	-	120	70000	>310	23,4	0,5-1,2								
22MnB5	-	>250	210000	>1.400	11	0,3-1								

Tabelle 7: Parametermatrix des Trägersubstrats nach [91; 92; 69; 93; 70]

Tabelle 7 zeigt Kunststoffe, die für konventionelle Verkleidungs- und Strukturelemente eingesetzt werden. Vor allem die thermoplastischen Polymere ABS, PP, TPU und PA finden häufig Anwendung. Daneben sind zwei typische metallische Legierungen aus dem Karosseriebau (Stahl und Aluminium) aufgeführt.

Werkstoffe

Strukturbauteile aus Kunststoff werden oftmals mit unterschiedlichen Faserarten verstärkt, um den geforderten mechanischen und thermischen Anforderungen im Kfz zu genügen. Lang- und endlosfaserverstärkte Systeme bestehen neben Naturfasern (z.B. Hanf oder Flachs) oftmals aus E-Glasfasern (Aluminium-Bor-Silikat) [70]. Der Faseranteil hat dabei einen entscheidenden Einfluss auf die mechanischen aber auch die thermischen Eigenschaften des Substrats. Mit steigendem Faseranteil nehmen die Warmformbeständigkeit, der Elastizitätsmodul und die Zugfestigkeit zu, wohingegen der thermische Ausdehnungskoeffizient abnimmt. Moderne hochfeste Stähle (z.B. 22MnB5) kommen vor allem an hoch belasteten und sicherheitsrelevanten

ten Stellen des Kfz zum Einsatz (z.B. Dachstruktur, Seitenschweller und A- und B-Säule) [93]. In der Fahrzeugstruktur werden vorwiegend hochfeste AlMgSi-Aluminiumlegierungen (z.B. EnAW6082) verwendet. Sie dienen als Profilwerkstoffe für Crashbauteile oder für Verleindungselemente der Karosserie [91].

Geometrische Eigenschaften

Die Substratstärke s_{TR} des Trägersubstrats liegt bei metallischen Karosserieanbauteilen durchschnittlich zwischen 0,6 mm und 1,4 mm [92]. s_{TR} hängt von der Steifigkeit des eingesetzten Werkstoffs und dem Belastungszustand ab. Aufgrund der geringeren Steifigkeit im Vergleich zu metallischen Werkstoffen befinden sich Schichtstärken polymerischer Substrate im Bereich von 2 mm bis 4 mm [91]. Neben der Schichtstärke unterscheiden sich Kunststoffe ebenfalls durch den deutlich höheren thermischen Ausdehnungskoeffizienten gegenüber herkömmlichen Stahl und Aluminiumlegierungen. Je nach Faseranteil kann dieser um den Faktor 15 höher sein und in Abhängigkeit der Werkstoffkombination des Kontaktsystems dabei zu hohen Relativbewegungen zwischen den einzelnen Kontaktkomponenten führen. Dieser Zusammenhang muss bei der Auslegung des Kontaktsystems beachtet werden.

3.1.3 Elektronikkomponente mit integriertem Kontaktelement

Um die Anschlussstellen der Leitungen vor äußeren Einflüssen zu schützen und eine sichere manuelle Montage zu gewährleisten, weisen elektrische Steckverbindungen Gehäuse auf. Die Anforderungen welche das Gehäuse erfüllen muss sind vielfältig. Umweltfestigkeit, mechanische Stabilität, geometrische Genauigkeit, elektrische Abschirmung von elektromagnetischen Störfeldern oder eine gute Verarbeitbarkeit im spezifischen Herstellungsprozess (z.B. Spritzguss) sind dabei nur einige Kriterien bei der Auswahl des Gehäusewerkstoffs [31]. Die wesentlichen Werkstoffeigenschaften der Steckerwerkstoffe werden durch die mechanischen Kennwerte Elastizitätsmodul und Zugfestigkeit und die thermischen Kennwerte Formbeständigkeit und Wärmeausdehnungskoeffizient beschrieben.

Werkstoffe

In Automotive-Anwendungen sind vor allem Formmassen aus der Gattung der Polyamide gebräuchlich (z.B. PA 6, PA 612, PA10T PA 12), die zu den Hochleistungskunststoffen zählen (Tabelle 8). Gleichzeitig findet auch der technische Kunststoff (PBT) in vielen, thermisch gering belasteten Bereichen Anwendung. Beide Kunststoffgattungen weisen gute Werkstoffeigenschaften auf, sind kostengünstig und lassen sich gut verarbeiten (v.a. Spritzguss).

Zur Gewährleistung der mechanischen und thermischen Stabilität kommen in Abhängigkeit des Bauraums gefüllte Kunststoffe mit bis zu 60 % Füllstoffanteil zum

Einsatz. Hierbei werden vorwiegend spritzgusstaugliche Kurzfasern aus E-Glasfasern verwendet.

Gehäuse- material	Werkstoffeigenschaften						Geometrische Eigenschaften		Einbauort											
	Fasergehalt in %	Formbeständigkeit in °C nach ISO 75-1 (HDT)	Elastizitätsmodul in Fließrichtung in Mpa	Zugfestigkeit in Fließrichtung in MPa	Wasseraufnahme Sättigung bei 23°C	Ausdehnungskoeffi- zient 10^{-6} in 1/K	Typische Pinanzahl	Typisches Rastermaß [mm]												
PBT unverst.	0	65	2.500	57	0,4	130-160	1-10	1,54	TM	DH	HK	IR	B	KR	R	F				
PBT GF 15	15	185	6.000	95	0,4	50-60														
PBT GF 30	30	205	9.800	120	0,4	20-60														
PA unverst.	0	70	2.100	40	2,5-3,1	70-100														
PA GF 15	15	180	6.000	130	2,3-2,9	30-35														
PA GF 30	30	220	9.500	190	1,9-2,1	20-30														
PA 6T, PA 10T	15-60	280-290	7100- 23000	160- 240	0,4-1,5	18-30														

Tabelle 8: Parametermatrix der Elektronikkomponente [68; 85; 91]

Geometrische Eigenschaften

Zwar werden in heutigen fahrzeugtechnischen Anwendungen hochpolige Komponenten, wie Steuermodule, oder der Türstecker mit bis zu 150 Kontaktstellen an das Bordnetz angebunden [14]. Die Analyse der Kabelsätze unterschiedlicher Modellreihen des Automobilherstellers BMW zeigt jedoch, dass Polzahlen für E/E-Komponenten deutlich unter diesem Wert liegen und typischerweise Steckkontakte mit maximal zehn Polen verbaut werden. Gleichzeitig zeigt die Analyse, dass die in Tabelle 8 zusammengefassten Leiterquerschnitte häufig im Bereich zwischen $0,22 \text{ mm}^2$ bis $0,75 \text{ mm}^2$ liegen und vor allem ein Rastermaß von 1,54 mm oder ein vielfaches davon für die Pinbelegung in Kfz-Steckverbindersystemen eingesetzt wird.

Kontaktelementwerkstoff

Auch wenn Kupfer hervorragende elektrische und thermische Eigenschaften besitzt, sind seine mechanischen Eigenschaften für viele Anwendungsfälle, v.a. bei Klemmverbindungen im Kfz, nicht ausreichend. Durch die gute Legierungsbildung können die physikalischen Eigenschaften des Kupfers jedoch gezielt optimiert werden. Neben der elektrischen Leitfähigkeit sind vor allem folgende mechanische und thermodynamische Kenngrößen relevante Werkstoffeigenschaften für Klemmkontakte:

- Die **Federbiegegrenze** gibt an, bei welcher Randbiegespannung in einem Material eine plastische Verformung von 50 µm auftritt [88]. Sie wird vom Werkstoffzustand beeinflusst und hängt vom Verformungsgrad und der Walzrichtung der meist in Blechform verfügbaren Legierungen ab [84].
- Die **Spannungsrelaxation** gilt als Maß für die Beschreibung des zeitlichen Abfalls der Biegespannung. Federkontakte die in Steckverbindern eingesetzt werden, müssen ihre Klemmkraft über ihre gesamte Lebensdauer aufrechterhalten. Spannungsrelaxationsvorgänge im Material führen dazu, dass elastische Dehnungen in irreversible plastische Verformungen umgewandelt werden. Die Vorgänge der Spannungsrelaxation laufen unter erhöhter Temperatur exponentiell schneller ab, sodass vor allem thermisch hoch belastete Klemmkontakte zum Klemmkraftabbau neigen. [84]
- Die **Entfestigungstemperatur** beschreibt das Entfestigungsverhalten des Kontaktelementwerkstoffs. Neben der Spannungsrelaxation können thermische Lastzustände des Werkstoffs auch zu einer Änderung des Werkstoffgefüges führen. Eine vorhergegangene Ausscheidungshärtung oder Kaltumformung kann so fast vollständig wieder abgebaut werden und zu einer Erweichung des Werkstoffs führen. Die Entfestigungstemperatur gibt an, bei welcher Temperatur der Werkstoff nach 500 h 10 % seiner Festigkeit verloren hat. [94]

Tabelle 9 zeigt gängige Kupferlegierungen für den Einsatz als federnde elektrische Kontaktstellen im Kfz und ihre relevanten Werkstoffeigenschaften.

Kontakt-Legierung	Spezifische elektr. Leitfähigkeit in MS/m	Federbiegegrenze in Mpa	Spannungsrelaxation in %	Entfestigungstemperatur in °C
	bei 20°C	in Walzrichtung	3000h bei 125°C	nach 40% Kaltverformung
CuNiSi	35	500 - 700	82%	400 - 500
CuBe2	16	500 - 1000	72%	300 - 470
CuFe2P	37,5	200 - 400	78%	450 - 500
CuSn6	9	380 - 580	70%	240 - 270
CuZn30	16	240 - 580	50%	280 - 310

Tabelle 9: Werkstoffeigenschaften gängiger Kontaktfeder-Legierungen

Die gestiegenen werkstofftechnischen Anforderungen an Federelemente für Kfz-Steckverbinder und der zunehmende Trend zur Miniaturisierung haben zu einem Generationswechsel bei den Werkstoffen geführt. Bewährte Kupferlegierungen, wie CuZn30 und CuSn6, werden dabei mehr und mehr durch CuNiSi-Legierungen ersetzt. Weiterhin sind die Kontaktelementhersteller bestrebt, etablierte CuBe-Legierungen mit ihren herausragenden Werkstoffeigenschaften für Steckverbinder durch umweltfreundliche und nicht gesundheitsschädliche Werkstoffe zu ersetzen. [84]

3.2 Automatisierungseignung bekannter Kontaktierungsverfahren für flexible Flachleiter

Die in Kapitel 3.1 definierten einbauortabhängigen Parameter-Matrizen dienen als Grundlage für die Evaluierung bestehender Kontaktierungsverfahren zur automatisierten Anbindung von Elektronikkomponenten an flexible Flachleiter. Die in Abbildung 21 dargestellte Übersicht dient im weiteren Verlauf dieser Arbeit als Basis für die Analyse der Prozesseinflussgrößen und dem Nachweis eines universell einsetzbaren Kontaktierungsverfahrens.

		Werkstoff			Geometrie			Anforderungen an den Kontaktierungsprozess	
Flachleiter	Isolation	TPE-U	PVC	PP	Leiterquerschnitt	0,12 mm ² (0,1x1,2) mm	0,15 mm ² (0,1x1,54) mm	0,31 mm ² (0,2x1,54) mm	<ul style="list-style-type: none">▪ Einseitige Kontaktierung▪ Abisolierung während des Kontaktierungsprozesses▪ Geringe thermische Belastung der Kontaktstelle▪ Niedrige Kontaktierungskraft
	Lam. Extr.	PET							
	Leiter	Cu-ETP1							
Trägermodul	Kunststoff	ABS	PA (6/12)	PP (GF47)	Substratstärke	2 mm	4 mm		<ul style="list-style-type: none">▪ Niedrige Kontaktierungskraft▪ Geringe thermische Belastung
	Metall	Aluminium EN AW – 6082T6				0,5 mm	0,8 mm		
E/E-Komponente	Gehäuse	PA (12)			Pinzahl	1 bis 10			<ul style="list-style-type: none">▪ Niedrige Kontaktierungskraft▪ Reparaturfähigkeit▪ Belastbarkeit der elektrischen Kontaktstelle
	Kontakt-element	CuNiSi (KHP 102)			Rastermaß	1,54 mm			

Abbildung 21: Anforderungsmatrix der Teilkomponenten des Kontaktsystems

Sie ist das Ergebnis der vorangegangenen Einbauortanalysen aus Kapitel 3.1 und fasst die einbauortspezifischen Randbedingungen der Teilkomponente des Kontaktsystems zusammen. Darin aufgeführten sind Werkstoffe und geometrische Randbedingungen der Teilkomponenten des Kontaktsystems, welche vor allem in Bauräumen zu finden sind, die für ein auf Flachleitern basierendes Bordnetzsystem geeignet sind (TM, DH; HK, IRB, KR). Neben den werkstofftechnischen und geometrischen Kennzahlen lassen sich darüber hinaus die Anforderungen an den Kontaktierungsprozess selbst ableiten, welche als Bewertungsschema für die Evaluation der Automatisierungseignung der Kontaktierungsverfahren dienen. Hierbei stehen nicht nur funktionale Anforderungen im Fokus, sondern auch Fragestellungen, die den gesamten Produktlebenszyklus betreffen.

3.2.1 Anforderungen an das Kontaktierungsverfahren

Voraussetzung für die Auswahl der Bewertungskriterien ist eine vorausgegangene automatisierte Montage des FFC auf dem Trägersubstrat nach [3].

Verfahrensflexibilität	Verfahrenskomplexität	Zuverlässigkeit
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Einseitige Kontaktierung ▪ Abisolierung während des Kontaktierens 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kontaktkraft ▪ Komplexität der Prozessführung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Belastbarkeit der elektr. Kontaktstelle ▪ Thermische Belastung des Kontaktsystems ▪ Reparaturfähigkeit

Abbildung 22: Anforderungen an automatisierbare Kontaktierungsverfahren für FFC

Hieraus lassen sich Anforderungsmerkmale an die Kontaktierungstechnologie ableiten, die sich in die drei Kategorien Verfahrensflexibilität, Verfahrenskomplexität und Zuverlässigkeit gliedern (Abbildung 22).

Verfahrensflexibilität

Durch das Forschungsziel dieser Arbeit ist vor allem die Verfahrensflexibilität ein wesentliches Bewertungskriterium, um in möglichst vielen Bauraumsituationen die Kontaktierungstechnologie einsetzen zu können.

- **Einseitige Kontaktierung:** Die in [3] entwickelte Montagetechnik für flexible Flachbandleitungen bedingt lediglich eine einseitige Zugänglichkeit des Leiters aufgrund der flächigen Verlegung des FFC auf dem Trägersubstrat. Die automatisiert durchzuführende Verbindung der Elektronikkomponente muss somit auf der Oberseite des Flachleiters erfolgen.
- **Abisolierung während der Kontaktierung:** Vorgelagerte Abisolierungsprozesse, z.B. durch die Fenstertechnik während des Produktionsprozesses der Flachbandkabel, schränken den späteren Einsatz des vorkonfektionierten Leitersatzes ein und erschweren eine Anbindung unterschiedlicher Elektronikkomponenten. Die Abisolierung während des Kontaktierprozesses ist deshalb ein wichtiges Kriterium für den Einsatz direkt im Einbauort des Automobils.

Verfahrenskomplexität

Komplexe Montageprozesse, bedingt durch das Kontaktierungsverfahren, verringern den Handlungsspielraum für die gesamte Montageprozesskette des Bordnetzes und führen gleichzeitig zu Hemmnissen bei der Einführung einer neuen Technologie in die Serienproduktion. Es ist daher anzustreben, eine Verbindungstechnologie mit einer geringen Verfahrenskomplexität einzusetzen.

- **Kontaktkraft:** Für eine einfach zu automatisierende Kontaktierungstechnologie ist eine möglichst geringe Prozesskraft anzustreben. Einerseits

bedingen hohe Kontaktierungskräfte einen erheblichen Steuerungsaufwand des kinematischen Montagesystems, andererseits müssen die wirkenden Kräfte durch das Trägersubstrat aufgenommen werden. Geringe Prozesskräfte verschlanken den Fertigungsprozess und erhöhen gleichzeitig den flexiblen Einsatz in unterschiedlichen Einbauszenarien.

- **Komplexität der Prozessführung:** Zusätzlich notwendige Teilprozesse wie z.B. separate Abisoliervorgänge, die Absaugung von Dämpfen oder die Entfernung von Isolationsrückständen verringern die Flexibilität der Verbindungstechnik. Eine weitere Zielgröße ist somit durch einen einfachen und gut beherrschbaren Prozess gegeben, um das Potential einer vollautomatisierten Bordnetzmontage ausnutzen zu können.

Zuverlässigkeit

Die hohen Anforderungen, welche sich an die Zuverlässigkeit elektrischer Verbindungen im Kfz stellen, müssen auch durch die neue Kontaktierungstechnologie erfüllt werden. Grundvoraussetzung für den Einsatz eines flexiblen Kontaktierungsverfahrens für Elektronikkomponenten ist deshalb deren Zuverlässigkeit im Feld.

- **Belastbarkeit der elektrischen Kontaktstelle:** Thermische, mechanische aber auch mediale Einwirkungen können zu hohen Belastungszuständen im Kontaktsystem führen. Vor allem im Kfz werden daher Verbindungstechnologien verwendet, die einen robusten Einsatz ermöglichen.
- **Thermische Belastung des Kontaktsystems:** Da die E/E-Komponente direkt am Einbauort mit dem Modulträger und dem Flachleiter elektrisch verbunden werden soll, kann eine thermische Belastung des Kontaktsystems während des Kontaktierens zu Schäden des Leiters, aber auch des darunter befindlichen Substrats und der Elektronikkomponente führen.
- **Reparaturfähigkeit:** Fehlerhafte oder im Feld ausgefallene Komponenten müssen durch eine sichere und nachträglich in der Werkstatt umsetzbare Reparatur wieder instand zu setzen sein. Die eingesetzte Verbindungstechnologie muss daher eine schnelle und flexible Reparatur ermöglichen.

3.2.2 Evaluation bekannter Kontaktierungsverfahren

Die in Kapitel 2.5 vorgestellten Kontaktierungsverfahren sind nach heutigem Stand der Technik die am Markt verfügbaren Verbindungstechnologien für flexible Flachleiter. Tabelle 10 zeigt die vergleichende Bewertung bekannter Technologien durch das festgelegte Bewertungsschema nach [95], um deren Eignung für eine universell einsetzbare Kontaktierungslösung zu prüfen.

	Verfahrensflexibilität		Verfahrens- komplexität		Zuverlässigkeit			Automatisierungs- eignung
0: unbefriedigend 1: gerade noch tragbar 2: ausreichend 3: gut 4: sehr gut	Einseitige Kontaktierung	Abisolierung während Kontaktierprozess	Kontaktierkraft	Komplexität der Prozessführung	Belastbarkeit der elektrischen Kontaktstelle	Thermische Belastung des Kontaktsystems	Reparaturfähigkeit	
Widerstandsschweißen	0	0	0	0	4	0	0	0,40
Ultraschallschweißen	0	4	0	0	4	1	0	1,30
Laserstrahlschweißen	4	4	4	0	4	0	0	2,60
Löten	2	0	4	0	3	1	0	1,40
Kleben	2	0	4	0	2	3	0	1,50
Crimpen	3	3	0	2	3	3	1	2,20
LIF & ZIF	2	0	3	1	1	4	4	1,90
Gewichtung	0,20	0,20	0,15	0,15	0,10	0,10	0,10	

Tabelle 10: Bewertungsmatrix der Automatisierungseignung bekannter Kontaktierungsverfahren für FFC

Das Laserstrahlschweißen und die Pierce- bzw. Durchgangscrimptechnologie bieten das höchste Automatisierungspotenzial. Beide Kontaktierverfahren kombinieren die Entfernung der Isolationsschicht und das Kontaktieren des Leiters in einem Prozessschritt. Zusätzlich befähigen beide Verfahren zur einseitigen Kontaktierung des Leiters. Die starke thermische Belastung des Kontaktsystems und die komplexe Prozessführung der Lasersystemtechnik führen jedoch zu Nachteilen beim Einsatz einer optischen Kontaktierungstechnologie. Die massive Verformung der Durchdringungskontakte beim Einsatz der Crimptechnologie ruft hohe Prozesskräfte hervor, wodurch es zu Einschränkungen in der Anzahl gleichzeitig herzustellender Kontakte kommt und den Komplexitätsgrad der Anlagentechnik steigert. Widerstands- und Ultraschallschweißverfahren zeigen aufgrund der nötigen Zuführung des Schweißwerkzeugs zur Kontaktstelle bezüglich der Verfahrensflexibilität deutliche Automatisierungshemmnisse in der Fertigungslinie. Klebe- und Lötverbindungen sind vor allem durch die notwendige Zufuhr eines Verbindungsmediums und dem daraus resultierenden Prozessaufwand als nachteilig anzusehen. Auch hier müssen Zuführsysteme direkten Zugang zur Kontaktstelle haben. Gleichzeitig sind die dauerhaften, mediengebundenen Kontaktstellen nur zerstörend lösbar. Die lösbaren Low-Insertion-Force und Zero-Insertion-Force Klemmverbinder ermöglichen die geforderte Reparaturfähigkeit, zeigen jedoch durch ihre Komplexität der Klemmverbindung und der erforderlichen beidseitigen Zugänglichkeit beim Herstellen des Klemmkontakts Nachteile bei der Automatisierung.

Um die Reparaturfähigkeit nach der Montage von Elektronikkomponenten zu gewährleisten, scheiden stoffschlüssige Verbindungstechniken als Kontaktierungstechnologie aus. Kraftschlüssige Klemmverbindungen bieten die größte Eignung bzgl. einer flexibel umsetzbaren und auch nachträglich durchführbaren Reparatur, z.B. beim Austausch einer E/E-Komponente. Dennoch ergeben sich aus der vergleichenden Bewertung der am Markt eingesetzten Kontaktierungstechnologien für flexible Flachleiter folgende Defizite:

- Hohe thermische und mechanische Belastung der Kontaktstelle
- Schlechte Reparaturfähigkeit der Kontaktstelle
- Vorgelagerte Abisolierung des FFC notwendig
- Beidseitige Zugänglichkeit des FFC erforderlich
- Aufwendige Prozessführung

3.2.3 Ableitung von Handlungsfeldern für die Erforschung einer automatisierungsgerechten Kontaktierungstechnologie

Letztendlich sind alle am Markt vorhandenen Kontaktierungstechnologien für dezentrale Kontaktierungen und getrennt von Montageoperationen entwickelt worden. Der Einsatz für die Kontaktierung an automatisiert montierten Flachleitern wäre lediglich eine Adaption bestehender Kontaktierungstechniken, die den speziellen Anforderungen für die automatisierte Anbindung von E/E-Komponenten im Einbauort des Automobils nicht in allen Gebieten gerecht werden kann. Bei der Konzipierung einer zukünftigen Kontaktierungstechnologie müssen deshalb vor allem die nachfolgenden Handlungsfelder berücksichtigt werden:

- **Integration des Kontaktierungsprozesses in den Montageprozess der Elektronikkomponente**

Die Verbindungstechnologie muss die Kontaktierung eines einseitig zugänglichen Flachleiters ermöglichen, um die vollautomatische Montage der Flachleiterstruktur und der E/E-Komponente zu gewährleisten. Dabei sollen keine zusätzlichen Teilprozessschritte integriert werden müssen, um eine hohe Flexibilität der Gesamtmontage aufrecht zu halten.

- **Einsatz einer Schneid-Klemm-Verbindung**

Mit der Entwicklung einer Schneidklemm-Verbindung ergibt sich die Möglichkeit durch die Montagebewegung der E/E-Komponente die Teilprozessschritte Abisolierung, Kontaktierung und Montage zusammenzufassen und vorgelagerte Prozessschritte zu vermeiden. Die Zusammenfassung mehrerer Prozessschritte verschlankt die gesamte Prozesskette und erhöht die Verfahrensflexibilität. Gleichzeitig ermöglicht eine Schneid-Klemm-Verbindung einen ortsflexiblen Anschluss des Flachleiters und eine gute Reparaturfähigkeit des Kontaktsystems. Um hohe Prozesskräfte zu vermeiden, muss der plastische

Verformungsgrad des Flachleiters beim Kontaktierungsprozess möglichst gering sein, um dadurch mehrere Kontakte gleichzeitig herstellen zu können und den Umfang der Anlagentechnik zu minimieren.

- **Integration des Kontaktelements in das Gehäuse der Elektronikkomponente**

Das Gehäuse der E/E-Komponente soll gleichzeitig als Steckergehäuse fungieren. Der Verzicht auf aufwendige Steckergehäuse mit geometrischen Codierungen, Rastverbinder- und Dichtsystemen reduziert dabei den Umfang heutiger Kabelsätze deutlich. Typische Einbaufehler und –schäden wie in Kapitel 2.1.3 aufzeigt, können durch die Integralbauweise vermieden und Kosten erheblich reduziert werden.

3.3 Verfahrensprinzip der Feder-Klammer-Direktkontaktierung

Ziegler et al. beschreiben in [96] eine neue Kontaktierungstechnologie, die sogenannte Feder-Klammer-Direktkontaktierungsmethode (FKD). Sie befähigt dabei auf Basis der entwickelten automatisierten Montage flexibler Flachleiter Elektronikkomponenten automatisiert mit der Flachleiterstruktur zu kontaktieren [3]. Das beschriebene Kontaktierungsverfahren ist auf die gegebenen Randbedingungen der automatisierten Flachleitermontage angepasst und kann flexibel auf unterschiedliche Einbauszenarien angewendet werden. Nachfolgend wird das Prinzip des Kontaktierungsverfahrens vorgestellt und ebenfalls hinsichtlich der Eignung für eine universell einsetzbare Kontaktierungstechnologie bewertet.

3.3.1 Funktionsweise und Verfahrensvarianten

Hinter dem Konzept der Feder-Klammer-Direktkontaktierung steht die Grundidee, ein federndes Kontaktierungselement einzusetzen, das die Isolationsschicht während des Kontaktierungsprozesses durchsticht und dadurch eine direkte elektrische Klemmverbindung zum Flachleiter herstellt.

Abbildung 23 stellt die schematischen Grundprozessschritte des Kontaktierungsverfahrens und deren Wirkprinzip dar. Die Spitze der Federklammer ist mit einer Schneide versehen, die unter Kraffteinwirkung durch eine lineare Zustellbewegung des Kontaktelements in x-Richtung die Isolationsschicht des Flachleiters durchdringt. Aufgrund der daraus resultierenden Verformung des Kontaktelements stellt sich gleichzeitig eine Relativbewegung zwischen elektrischem Leiter und Kontaktelement ein. Weiterhin führt die Relativbewegung zwischen beiden Kontaktpartnern dazu, dass die obere Isolationsschicht vom Leiter gelöst wird und sich die Federklammer zwischen die obere Isolationsschicht und den Leiter schiebt. Hierbei formt sich ein elektrischer Kontakt zwischen beiden Kontaktpartnern aus. Die Geometrie der Federklammer muss dahin gehend angepasst werden, dass die obere Isolationschicht durchtrennt und zuverlässig von Leiter abgelöst wird. Eine Kontaktierung nach dem Prinzip der FKD mit einem Federbein nach Abbildung 23 ruft eine

asymmetrische Kraftkomponentenverteilung am Flachleiter hervor. Die in z-Richtung wirksame Kraftkomponente führt dazu, dass der Flachleiter beim Aufdrücken der Feder zum Verschieben neigt. Weiterhin erfordert die asymmetrische Kraftverteilung durch die notwendige Aufnahme der Führungskräfte zur Zentrierung des Kontaktmoduls einen erhöhten Aufwand bei der Montage.

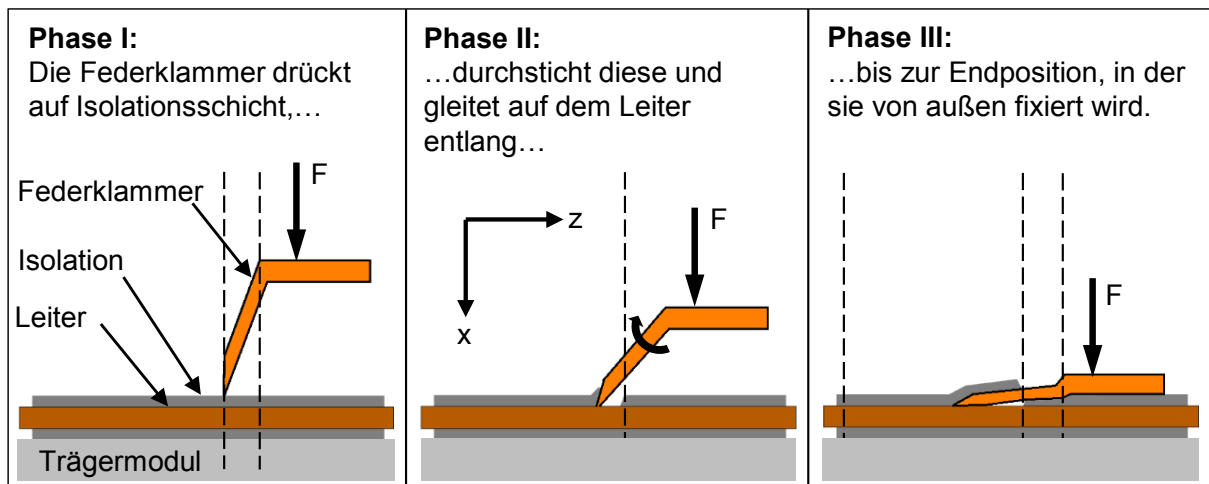


Abbildung 23: Funktionsprinzip der Feder-Klammer-Direktkontaktierung in Anlehnung an [3]

Eine Achsenspiegelung der einbeinigen Kontaktierungslösung führt zu einem klammerförmigen, symmetrischen Kontaktelement und zur Selbstzentrierung des Kontaktsystems Flachleiter/Kontaktelement während des Fügevorgangs (Abbildung 24). Im Hinblick auf eine einfache Prozessführung wird das dargestellte Verfahrensprinzip daher gespiegelt und die Kontaktfeder durch eine Federklammer ersetzt.

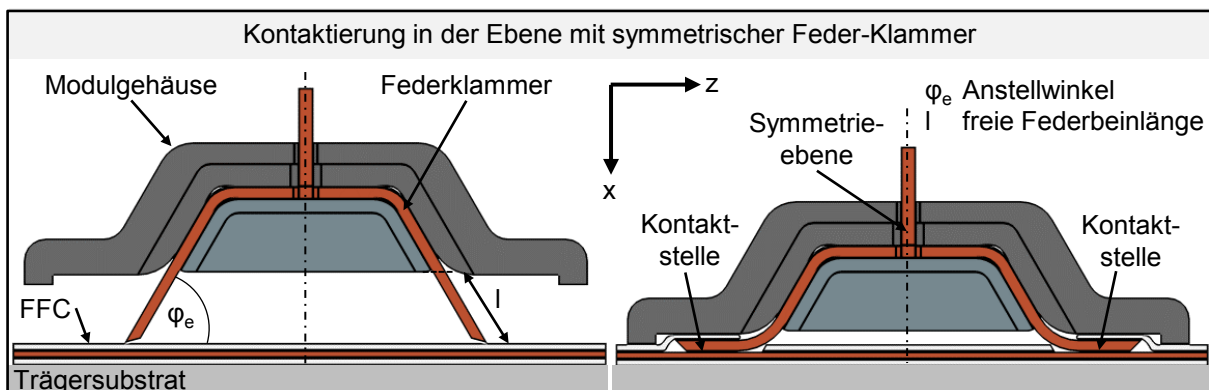


Abbildung 24: Funktionsprinzip der Feder-Klammer-Direktkontaktierung in der Ebene

Der symmetrische Aufbau lässt die Kraftkomponenten in z-Richtung an beiden Federklammerbeinen entgegenwirken und bewirkt eine Selbstzentrierung der Kontaktierungseinheit. Die dadurch erreichte Redundanz verdoppelt die wirksame Kontaktfläche und erhöht gleichzeitig die Zuverlässigkeit der elektrischen

Verbindungsstelle. Für ein Abgleiten der Feder-Klammer auf der Leiteroberfläche muss beim Kontaktierungsvorgang eine Kraftkomponente in z-Richtung erzeugt werden. Beim Grundverfahren der Feder-Klammer-Direktkontaktierung ist der Flachleiter auf einem ebenen Träger flach verlegt. Um die Kraftkomponente in Längsrichtung des Leiters beim Kontaktiervorgang zu erzeugen, ist die Federklammer um einen definierten Anstellwinkel φ_e zur Leiterebene geneigt.

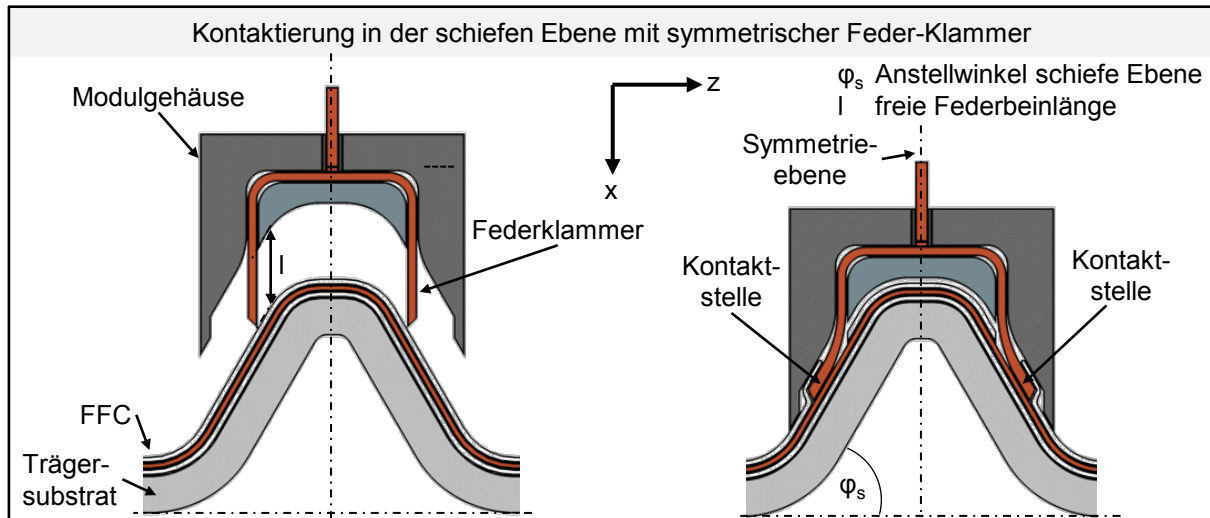


Abbildung 25: Funktionsprinzip der Feder-Klammer-Direktkontaktierung in der schiefen Ebene

Eine Abwandlung des Grundverfahrens und eine weitere Möglichkeit, eine Kraftkomponente in Leiterlängsrichtung zu erzeugen, liegt in der Neigung des Flachleiters zum Kontaktelement (Abbildung 25). Hierbei wird der Flachleiter in der schiefen Ebene mit dem Anstellwinkel φ_s verlegt.

Das Grundverfahren der Kontaktierung eines eben liegenden Flachleiters stellt das prozesstechnisch einfachste Verfahren der vorgestellten Varianten dar. Einerseits ist eine ebene Verlegung des Flachleiters kinematisch einfacher durch Robotersysteme umzusetzen, andererseits ist der Kontaktiervorgang in seiner Positionierung flexibler, da das Kontaktelement an einer beliebigen Stelle entlang des Leiterpfades an das Flachbandkabel angebunden werden kann. Auch kann in Hinblick auf den immer geringer werdenden Bauraum für Bordnetzstrukturen beim Einsatz des Grundverfahrens auf das Einbringen von schiefen Ebenen in den Verkleidungselementen verzichtet werden.

Als nachteilig sind die höheren Prozesskräfte des Kontaktiervorgangs zu nennen, die aus den größeren Verformungen des Kontaktelements resultieren. Die höheren Kräfte müssen dabei über den Einsatz von steiferen Trägerelementen oder der Verwendung von Montageaufnahmen beim Einbau aufgenommen werden. Die zu erwartenden plastischen Verformungen des Kontaktelements aufgrund der größeren

Verformungen der Federklammer stellen zudem ein Hemmnis für eine Mehrfachkontaktierung des FFC dar.

Insgesamt zeigt die Bewertung nach dem festgelegten Schema aus Kapitel 3.2.2, dass eine Kontaktierung in der Ebene im Vergleich zur Kontaktierung in der schiefen Ebene dennoch ein höheres Potenzial für die Anwendung in unterschiedlichen Bauräumen aufweist (Tabelle 11).

	Verfahrensflexibilität		Verfahrenskomplexität		Zuverlässigkeit			Automatisierungseignung
	Einseitige Kontaktierung	Abisolierung während Kontaktierprozess	Kontaktierkraft	Komplexität der Prozessführung	Belastbarkeit der elektrischen Kontaktstelle	Thermische Belastung des Kontaktsystems	Reparaturfähigkeit	
0: unbefriedigend 1: gerade noch tragbar 2: ausreichend 3: gut 4: sehr gut								
FKD in der Ebene	4	4	3	4	2	4	4	3,65
FKD am Kontaktberg	4	4	4	2	2	4	4	3,50
Gewichtung	0,2	0,2	0,15	0,15	0,10	0,10	0,10	

Tabelle 11: Bewertungsmatrix der Automatisierungseignung der Feder-Klammer-Direkt-Kontaktierung

Vor allem die konstruktiv vorzusehende schiefe Ebene im Verkleidungselement führt zu Nachteilen hinsichtlich der Bauraumausnutzung und einer ortsunabhängigen Kontaktierung der Elektronikkomponente mit dem Flachleiter. Trotz der höheren zu erwarteten Prozesskräfte durch die stärkere Verformung des Kontaktelements bietet die FKD in der Ebene somit das höchste Potenzial für ein automatisierbares Kontaktierungsverfahren für Elektronikkomponenten zur flexiblen Integration in flachleiterbasierte Bordnetzsysteme.

Zwar beschreibt [3] die Methode der Feder-Klammer-Direktkontaktierung in der schiefen Ebenen und analysiert für dieses Kontaktierungsverfahren die grundlegenden Prozesseinflüsse. Da der Fokus der Arbeit jedoch auf der Montage der Flachleiter liegt, fehlt insgesamt eine tief greifende, wissenschaftliche Analyse der Prozesseinflussgrößen und eine Untersuchung der bauraumabhängigen Zuverlässigkeitsanforderungen, für den Nachweis einer universell einsetzbaren Kontaktierungslösung. Gleichzeitig existieren für das flexiblere Verfahren der Kontaktierung in der Ebene keinerlei Forschungsergebnisse.

Nachfolgend soll die vorliegende Arbeit deshalb die beiden Verfahrensvarianten grundlegend charakterisieren und deren Zuverlässigkeit im Kontext der gestellten Prüfanforderungen im Automobil umfassend analysieren.

3.3.2 Verkürzung der bisherigen Produktions- und Montagekette von Kabelsätzen

Der Einsatz flachleiterbasierter Bordnetzsysteme ermöglicht eine deutliche Verkürzung der bisherigen Produktionskette der heutigen Kabelsatzfertigung und -montage. Abbildung 26 stellt die gegenwertige Prozesskette und die Prozesskette eines auf Flachleitern basierenden Bordnetzsystems mithilfe einer automatisierten Kontaktierung von E/E-Komponenten durch die FKD dar.

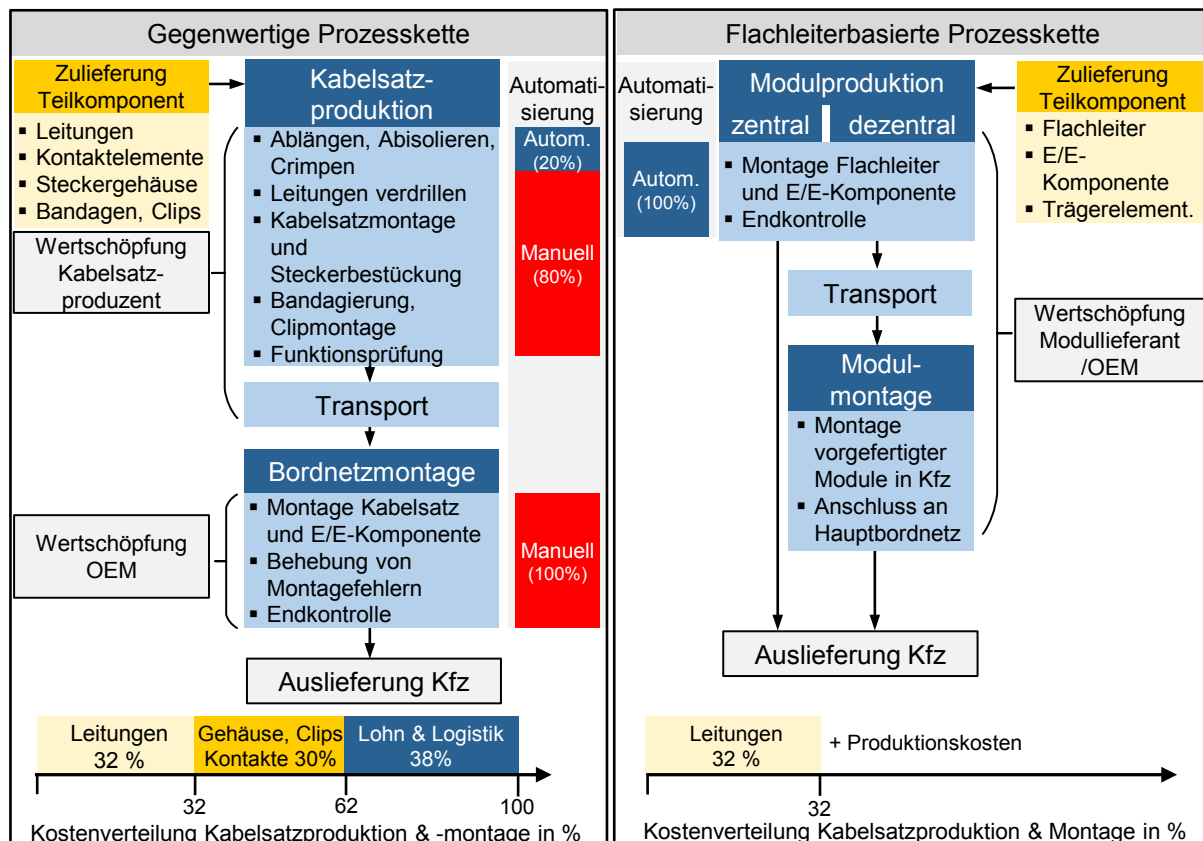


Abbildung 26: Prozesskette der heutigen und einer flachleiterbasierten Kabelsatzproduktion und -montage

Die heutige Bordnetzproduktion ist von vielen Teilprozessschritten geprägt, um die unterschiedlichen Einzelkomponenten (Leiter, Crimp, Steckergehäuse, Clips, Bandagen etc.) zu einem Leitungssatz zu montieren. Die Fertigung ist hierbei trotz fortschreitender Automatisierung und Vernetzung noch immer sehr stark von manuell durchgeführten Arbeitsschritten geprägt. Die dezentral in Niedriglohnländern angesiedelte Kabelsatzproduktion bedingt zusätzlich hohe Anforderungen an die Logistik, um den Leitungssatz termingerecht zu den deutschen Produktionsstätten zu liefern. Auch die Montage der Leitungssätze im Kfz erfolgt noch fast ausschließlich manuell in der Produktionslinie der Automobilhersteller.

Die komplexe Produktions-, Logistik- und Montagekette von Bordnetzen führt letztlich zu einem sehr hohen Kostenfaktor für die OEMs. Unterschiedliche Veröffentlichun-

gen sprechen hierbei von bis zu 12 % der Einkaufssumme aller Zukaufteile für die Fahrzeughersteller, wodurch der Kabelbaum dadurch zur teuersten Komponente im Fahrzeug wird [16; 19; 41]. Insgesamt liegen die Materialkosten eines modernen Kabelbaums bei etwa 62 Prozent, die Kosten für Lohn (Produktion) und Logistik bei rund 38 Prozent [16]. Durch den Einsatz von Flachleitern als Leiterstruktur und der FKD als Kontaktierungstechnologie der E/E-Komponenten kann die gesamte Produktions- und Montagekette des Bordnetzes durchgängig automatisiert werden. Die Modulmontage der Teilbordnetze (z.B. Türmodul, Dachhimmel, Heckklappe) kann zentral am Produktionsstandort durch den OEM selbst oder dezentral durch die Produktion von Modulzulieferern erfolgen. Flexible Handhabungssysteme ermöglichen die prozesssichere Montage unterschiedlicher Bordnetzarchitekturen durch verschiedene Ausstattungskonfigurationen des Kfz oder neue Baureihen. Das Kontaktierungsverfahren der Feder-Klammer-Direktkontaktierung ermöglicht die Reduktion der eingesetzten Schnittstellen- bzw. Kontaktierungstechnologien und vereint die Montage und Kontaktierung der E/E-Komponente.

Der Einsatz der FKD schafft damit die Voraussetzung für ein deutliches Rationalisierungspotenzial in der Bordnetzproduktion gegenüber herkömmlichen technologischen Ansätzen. Die Anzahl kostenintensiver Komponenten heutiger Kabelsätze, die eine manuelle Montage im Bauraum des Kfz ermöglichen, z.B. Steckergehäuse, Kontaktelemente, Bandagen, Clips usw. können deutlich reduziert werden oder entfallen vollständig. Letztlich ergeben sich aus dem Einsatz dieser neuen Technologien (FFC und FKD) drastische Veränderungen in der bisherigen Wertschöpfungskette des aktuellen automobilen Bordnetzes. Bordnetzproduzenten können in diesem Szenario von Kabellieferanten und Herstellern von E/E-Komponenten substituiert werden.

3.3.3 Anwendungsbeispiele der neuartigen Kontaktierungstechnologie

Das Funktionsprinzip der Feder-Klammer-Direktkontaktierung kann grundsätzlich in vielen Einbauorten im Automobil zur Anwendung gebracht werden. Im Folgenden werden anhand von Demonstratoren Beispiele für die Montage eines Pkw-Tür-Aggregateträgers gegeben. Basis der aufgebauten Demonstratorzelle ist eine Portalkinematik mit integriertem Greifersystem. Eine Beschreibung des genauen Aufbaus der Zelle kann Anhang 3.1 entnommen werden.

Die Funktionskomponenten des Türmoduls (Lautsprecher, Fensterheberantrieb, Bedienpanel und dezentrales Steuergerät) sind mit additiv gefertigten Montagegehäusen eingehaust und mit Feder-Klammer-Modulen ausgestattet. Das Greifersystem des Portalsystems positioniert die E/E-Komponenten und setzt sie mit einer vertikalen Fügebewegung auf das Türmodul auf. Über Klemmverbindungen, wie sie auch in der Türmodulfertigung als Serienprozess Verwendung finden, werden die Funktionskomponenten mit dem Verkleidungselement des Türmoduls verbunden.

Das Feder-Klammer-Direktkontaktierungsverfahren erlaubt dabei die gleichzeitige Montage und Kontaktierung der E/E-Demonstratoren mit den flexiblen Flachleitern.

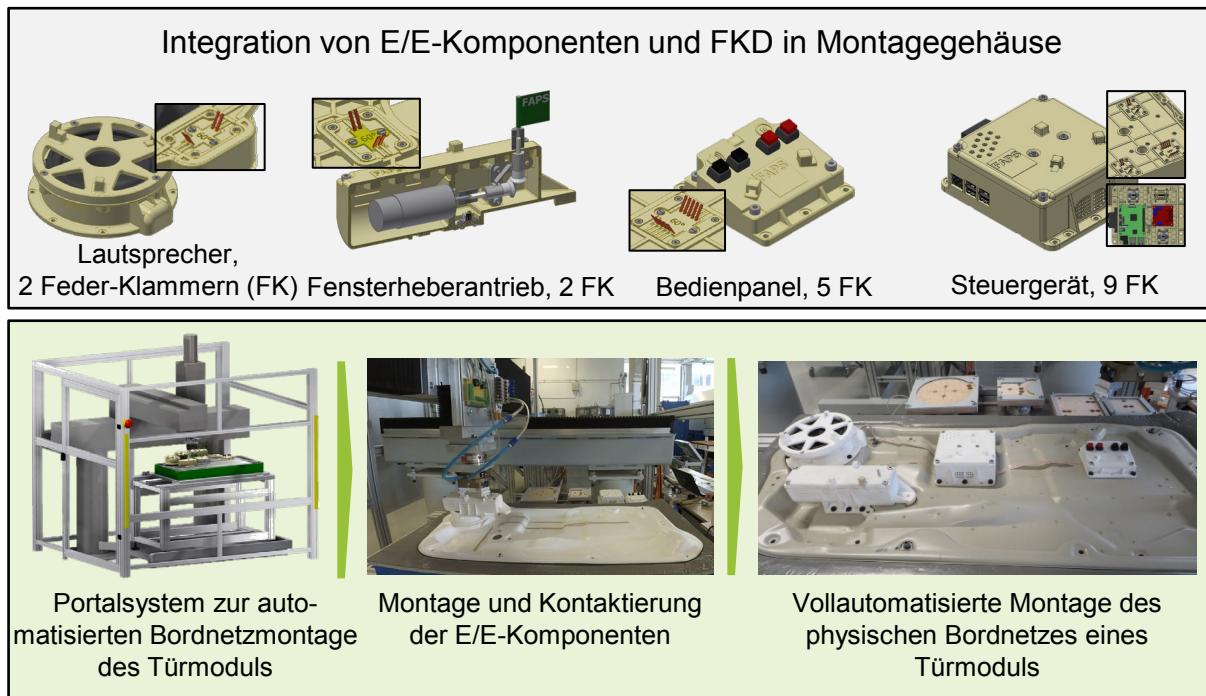


Abbildung 27: Beispielhafter Montageablauf für die automatisierte Kontaktierung von Elektronikkomponenten

Das Fügen der Funktionskomponenten am Türmodul bewirkt dabei einen dauerhaften Anpressdruck der Kontaktierungseinheit und erzeugt die für eine zuverlässige Kontaktierung erforderliche, konstante Kontaktkraft. In diesem Anwendungsbeispiel werden maximal neun Feder-Klammer-Kontakte (FK) bei der Montage des dezentral angeordneten Steuermoduls gleichzeitig hergestellt. Die durchgängig automatisierte Prozesskette ermöglicht durch einen kraftgesteuerten Fügeprozess eine In-Line-Kontrolle der Komponentenmontage. Die fehlerhafte Ausbildung einer elektrischen Kontaktstelle oder andere Montagefehler werden durch sich ändernde Kraftkennlinien im Montageprozess sofort erkannt. Die vollautomatische Prozessgestaltung kann zudem die durch Transport und manueller Montage verschuldeten Einbaufehler der Leitungssätze erheblich reduzieren.

4 Prozesseinflussgrößen der Feder-Klammer-Direktkontaktierung

Das Kontaktsystem der Feder-Klammer-Direktkontaktierung setzt sich aus den Teilkomponenten

- Kontaktelement,
- Flachleiter,
- Gehäuse und Trägersubstrat

zusammen. Alle Komponenten stehen zueinander in Wechselwirkung und beeinflussen das Kontaktierungsergebnis und die Zuverlässigkeit der elektrischen Verbindungsstelle. Neben werkstofftechnischen Randbedingungen, wie dem eingesetzten Werkstoff des Kontaktelements oder des Trägersubstrats, wird der Kontaktierungsprozess maßgeblich durch die Geometrie der jeweiligen Teilkomponente bestimmt (Abbildung 28).

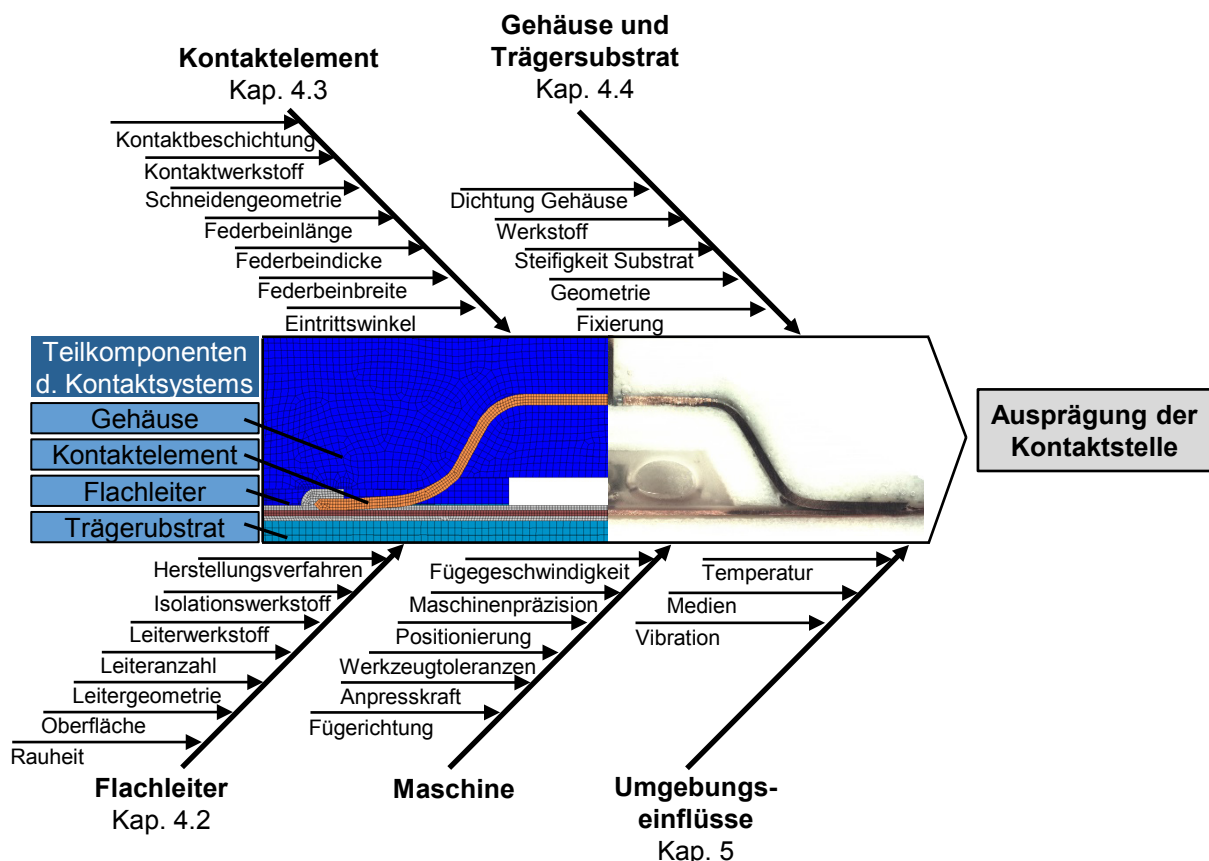


Abbildung 28: Prozesseinflussgrößen der Feder-Klammer-Direktkontaktierung

Kapitel 4 stellt die Prozesseinflussgrößen der FKD vor. Neben der Beschreibung der wesentlichen Prozessparameter wird auch deren Einfluss auf die Kontaktstellen-ausprägung diskutiert. Zum grundlegenden Prozessverständnis dienen neben einem in dieser Arbeit entwickelten analytischen Ansatz zur Berechnung der Kontaktie-

rungskraft auch messtechnische Analysen des Kontaktierungsprozesses selbst. Validiert und erweitert wird das mathematische Modell durch parametrisierte, explizite FE-Simulationen des Kontaktierungsprozesses und den Ergebnissen aus umfangreichen experimentellen Messreihen. Die messtechnische, simulative und analytische Betrachtung der neuen Kontaktierungstechnologie ermöglicht eine flexible Parameteranalyse der einzelnen Einflussgrößen. Am Ende des Kapitels werden die grundlegenden Verfahrensgrenzen in Abhängigkeit der untersuchten Prozesseinflussgrößen aufgezeigt.

4.1 Grundlegende Prozessbeschreibung

Der Begriff „Elektrischer Kontakt“ beschreibt einen Zustand, der durch die stromführungsfähige Berührung zweier Bauteile entsteht [84]. Die FKD beruht auf dem Prinzip eines lösbaren elektrischen Kontakts. Dabei bestimmt die mechanische Struktur der Kontaktfläche in hohem Maße die elektrische Leistungsfähigkeit der Verbindung [97]. Die wesentlichen Einflüsse auf die elektrische Verbindungsqualität eines lösbaren Kontakts werden basierend auf den theoretischen Grundlagen der Kontaktphysik elektrischer Verbindungen im Folgenden erläutert.

Modellvorstellung eines elektrischen Kontakts

Makroskopisch betrachtet stehen beiden Kontaktflächen eines elektrischen Kontakts über die scheinbare Kontaktfläche A_s miteinander in Kontakt [98]. Mikroskopisch betrachtet besteht die Kontaktfläche aufgrund der immer vorhandenen Oberflächenrauheit aus einzelnen Rauheitsspitzen oder Unebenheiten (engl. Asperities). Werden zwei imperfekte Rundkörper miteinander in Kontakt gebracht, berühren sich zuerst die Rauheitsspitzen beider Partner in sogenannten Asperitiy-spots (A-spots) (Abbildung 29 a).

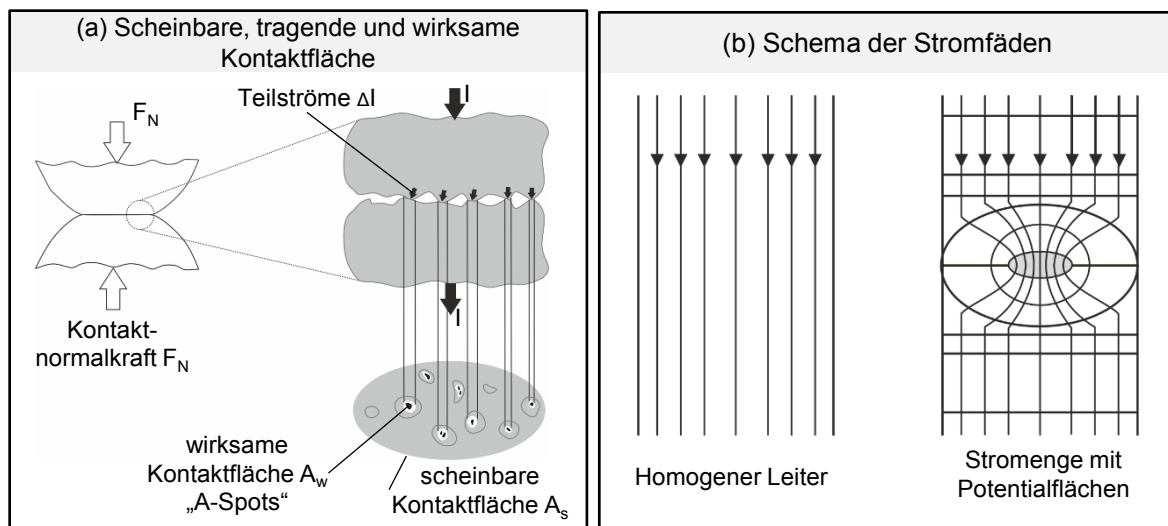


Abbildung 29: Modellvorstellung zur Kontaktphysik elektrischer Kontakte in Anlehnung an [31]

Eine weitere Annäherung führt zu einer steigenden Verformung der Asperities und einer Zunahme der A-spot-Anzahl. Die wirksame Kontaktfläche A_w vergrößert sich dabei. Der beschriebene Vorgang setzt sich so lange fort, bis ein Gleichgewicht zwischen äußeren und inneren Kräften herrscht [97]. Die Werkstoffeigenschaften der Kontaktpartner beeinflussen diesen Vorgang maßgeblich. Elastizitätsmodul und Härte, aber auch topographische Kenngrößen wie die Höhe, der Kuppenradius und der Scheitelwinkel der Mikrospitzen und die Umgebungstemperatur sind bestimmende Einflussfaktoren eines elektrischen Klemmkontakts [88].

Bei Betrachtung der Stromfäden eines homogenen Leiters mit einer Stromenge wird deutlich, dass Strom nur über die beschriebenen A-Spots fließen kann (Abbildung 29 b). Die Mikroflächen führen zu einer Einengung der Stromfäden, da nur ein Teil der scheinbaren Kontaktfläche A_s der wirksamen Kontaktfläche A_w entspricht. Die geometrische Stromeinengung erhöht den elektrischen Widerstand des Kontaktsystems und resultiert im sogenannten Engewiderstand R_e . [97]

Teilwiderstände eines elektrischen Kontakts

R_e ist von der Anzahl, der Größe und der Verteilung der A-Spots abhängig, wobei alle drei Parameter, wie beschrieben, wiederum von den Materialeigenschaften des Kontaktelements abhängen. Gleichzeitig wird der Engewiderstand auch von der Kontaktnormalkraft F_k , die senkrecht zur Kontaktfläche steht, beeinflusst. In der Literatur werden unterschiedliche theoretische Kontaktmodelle beschrieben. Die Modellvorstellungen nach *Holm* und *Greenwood&Williamson* sind darin die am häufigsten diskutierten. Nach dem *Holmschen* Kontaktmodell verformen sich die A-Spots gemäß der *Hertzschen* Pressung elastisch wie Halbkugeln auf einer starren Unterlage [99]. Laut *Greenwood und Williamson* vergrößert sich mit zunehmender Kontaktkraft sowohl die Fläche der A-Spots, als auch die Anzahl miteinander in Kontakt stehender Mikrospitzen [100]. In Kombination mit einer *Gaußschen* Verteilung der A-Spots lässt sich hieraus der Engewiderstand R_e ableiten.

In beiden Modellen besteht ein exponentieller Zusammenhang zwischen der Kontaktnormalkraft F_k und dem Engewiderstand R_e . Für F_k gilt im Bereich von 1 N bis 80 N die verallgemeinerte Formel als experimentell abgesichert [84]:

$$R_e \sim F_k^{-m} \quad (R_e \text{ in } \mu\Omega) \quad (4.1)$$

In Abhängigkeit der Werkstoff- und Oberflächeneigenschaften des Kontaktsystems betragen Werte für den Exponent m zwischen 0,9 und 1,0. Dabei gelten Werte für $m < 0,9$ als Anzeichen für vorhandene Fremdschichten [98]. Abbildung 30 zeigt den exponentiellen Zusammenhang zwischen dem Engewiderstand R_e und der Kontaktnormalkraft F_k nach (4.1) für unterschiedliche Exponenten m .

Bei der Beschreibung des Kontaktsystems muss neben dem Engewiderstand R_e , welcher der Kontaktmechanik zugrunde liegt, mit dem Fremdschichtwiderstand R_f ein

weiterer Teilwiderstand berücksichtigt werden. Die Ursachen der Ausbildung von Fremdschichten sind vielschichtig und oftmals sehr komplex in ihrer Entstehung. In der Praxis ist die Bildung von Fremdschichten zwischen den Kontaktflächen jedoch unvermeidbar.

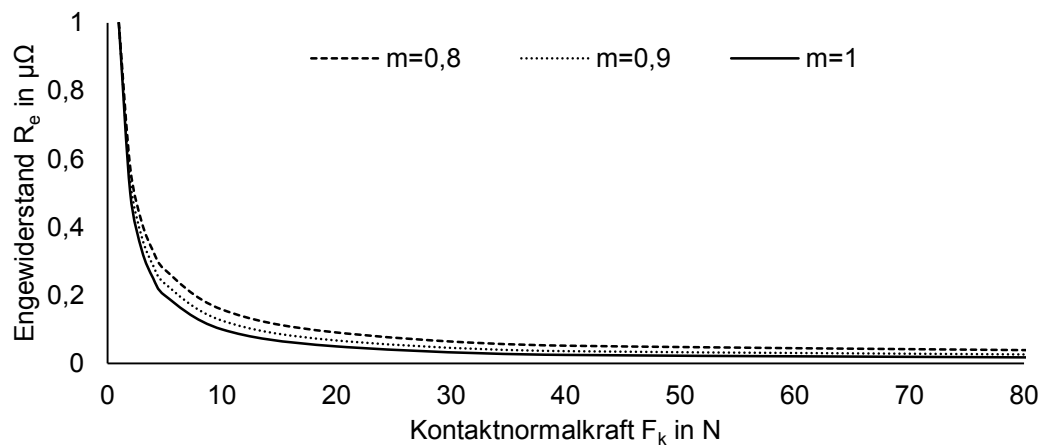


Abbildung 30: Engewiderstand in Abhängigkeit der Kontaktnormalkraft

Typische Auslöser bei nicht gasdichten Verbindungen im Kfz sind Reaktionen des Kontaktelementwerkstoffs mit der Atmosphäre unter Bildung von Oxid- oder Sulfidschichten, aber auch der Niederschlag von Ölen oder anderen Flüssigkeiten im Kontaktsystem können Fremdschichten hervorrufen. R_f dient dabei als elektrische Kenngröße für die Beschreibung dieser Störschichten [88]. Nach *Holm* beschreibt die Summe aus Engewiderstand R_e und Fremdschichtwiderstand R_f den Kontaktflächenwiderstand R_k (oder Übergangswiderstand). Für den Fall $R_e \gg R_f$ kann R_k näherungsweise durch die spezifischen Widerstände $\rho_{w1/2}$ der beiden Kontaktpartner, der Kontaktnormalkraft F_k und der Meyershärte H_c des weicheren Kontaktpartners beschrieben werden [101]:

$$R_k = \frac{\rho_{w1} + \rho_{w2}}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{H_c}{F_k}\right)} \quad (4.2)$$

Der Kontaktflächenwiderstand ist eine wichtige Kenngröße, um Veränderungen der elektrischen Leistungsfähigkeit des Kontaktsystems z.B. durch Schädigungen in der Kontaktstelle zu beschreiben. Im Forschungsfeld der Zuverlässigkeitsuntersuchungen elektrischer Kontaktstellen ist R_k daher das bestimmende Maß zur Detektion eines ausgefallenen Kontakts. (4.2) zeigt, dass R_k (für $R_e \gg R_f$) neben den werkstofftechnischen Kenngrößen der Kontaktpartner nur von der wirksamen Kontaktnormalkraft F_k abhängig ist. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird dieser Zusammenhang noch mehrmals diskutiert.

4.1.1 Phasen des Kontaktierungsprozesses

Aufbauend auf den beschriebenen theoretischen Grundlagen wird der Prozess der FKD anhand der Kontaktierungskraft zur Herstellung der elektrischen Verbindung

und dem Kontaktflächenwiderstand beschrieben. Zur Diskussion der Effekte, die zum typischen Kraftverlauf des Kontaktierungsprozesses führen, wird der Grundprozess eines eben verlegten Flachleiters gewählt.

Methodik

Für die grundlegende Analyse des Kontaktierungsprozesses dienen die Ergebnisse aus parametrischen FE-Simulationen des Kontaktierungsvorgangs für unterschiedliche Kontaktelementgeometrien. Neben Parameterstudien der Kontaktelementgeometrie ermöglicht die numerische Analyse des Kontaktsystems vor allem die Untersuchung der Spannungs- und Dehnungszustände und die Ableitung von wegabhängigen Kraftvektoren am Kontaktelement während des Kontaktierungsprozesses. Auch die Ableitung der kontaktierungswegabhängigen scheinbaren Kontaktfläche A_s und der Kontaktdruckverteilung lässt die numerische Analyse zu.

Der stark nichtlineare Prozess des Kontaktierens aufgrund von Materialversagen, Plastizität, Reibung und großen Verformungen wird mit einem optimierten Simulationsmodell durch einen expliziten Solver gelöst [102]. Die Ergebnisse der simulativen Prozessbeschreibung werden durch messtechnisch erfasste Versuchsdaten validiert. Die Vorgehensweise, auf simulative und messtechnische Ergebnisse zurückzugreifen, erlaubt letztlich eine grundlegende Prozessbeschreibung der FKD und vereint die Vorteile beider Ansätze, einer exakten messtechnischen Prozessbeschreibung und der Ableitung von numerisch ermittelten Prozesskennwerten. Der Aufbau zur Messung der Kontaktierungsmessgrößen kann Anhang 4.1 entnommen werden. Weiterhin zeigt Anhang 4.2 die Randbedingungen des expliziten Simulationsmodells in ANSYS-Workbench-LSDYNA [103].

Ergebnisse aus Messung und Simulation

Der Prozess der Feder-Klammer-Direktkontaktierung teilt sich in drei Prozessphasen. Abbildung 31 (a) zeigt Verformungsbilder der jeweiligen Phasen, ermittelt aus expliziten FE-Simulationen und messtechnischen Versuchsreihen. Abbildung 31 (b) zeigt die Kontaktierungskraft F_k über den Kontaktierweg x . Abgebildet sind die Mittelwertskurve aus Kontaktierungsversuchen und die Ergebnisse der expliziten FE-Simulation. Abbildung 31 (c) zeigt den gemessenen Kontaktflächenwiderstand R_k über x und den aus der gemessenen Kontaktnormalkraft mithilfe des analytischen Ansatzes nach Holm (4.2) ermittelten Verlauf für R_k . Gleichzeitig ist die scheinbare Kontaktfläche A_s zwischen Kontaktelement und Kupferleiter dargestellt.

In **Prozessphase I** durchdringt die Federklammer die obere Isolationsschicht des Flachleiters. Über eine Zustellbewegung in x -Richtung der Leiterebene trifft die Schneide auf die Isolationsschicht des Flachleiters. Das Federbein des Kontaktelements wird durch die entstehende Reaktionskraft zwischen Federklammer und Isolation elastisch verformt und baut eine Klemmkraft auf. Mit ansteigendem Kontaktierweg nimmt die Kontaktkraft zu, bis die spezifische Trennkraft der

Isolationsschicht erreicht ist und durch die induzierte Scherbelastung der Schneide versagt. Für das diskutierte Kontaktsystem tritt ab einem Kontaktierweg von 0,5 mm eine vollständige Durchtrennung der Isolationsschicht ein.

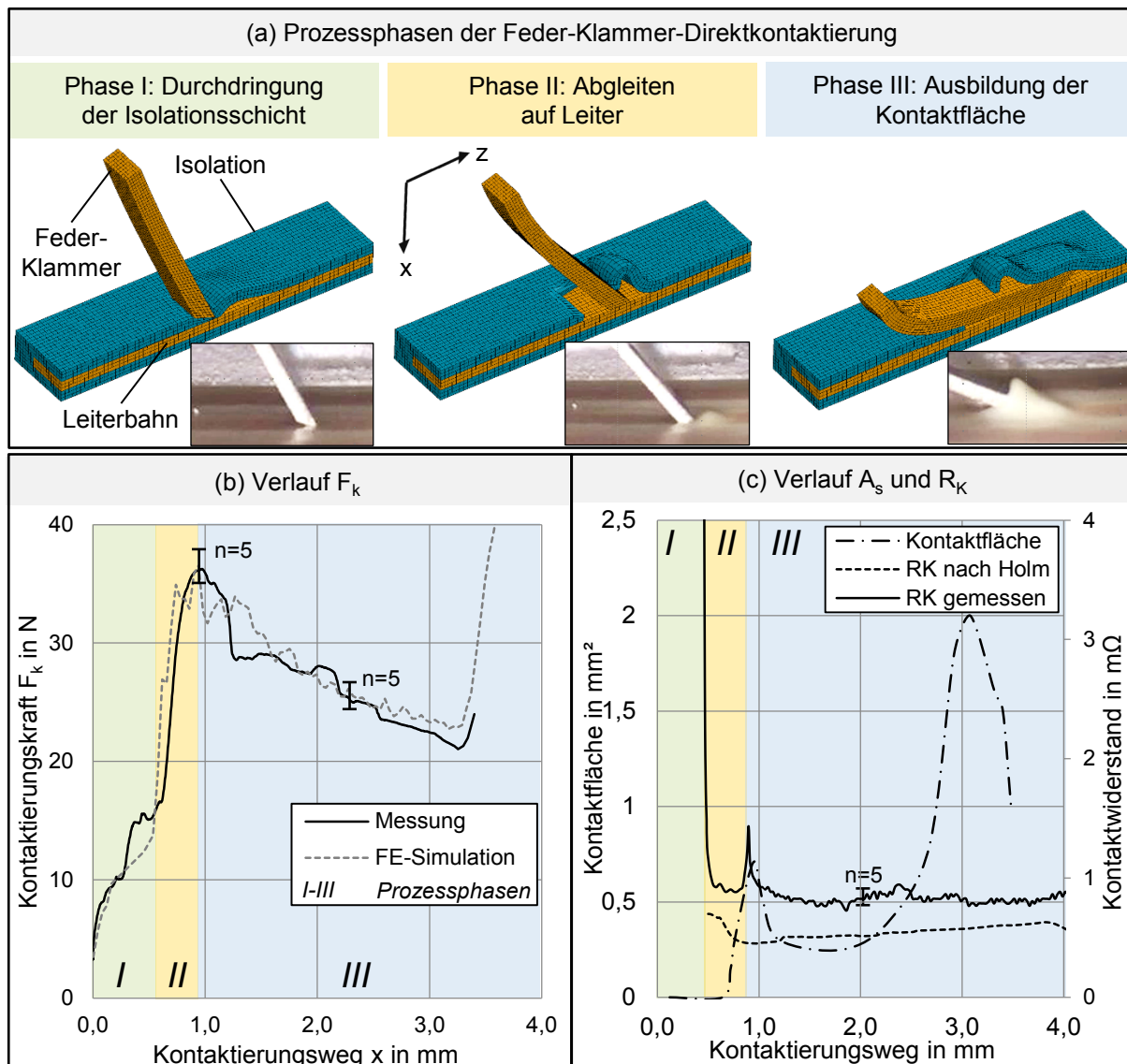


Abbildung 31: Kontaktierungskraft, Kontaktfläche und Kontaktflächenwiderstand in Abhängigkeit des Kontaktierungswegs

Bei einer Isolationswandstärke der untersuchten FFC-Probe von 0,2 mm resultiert aus der Kraftreaktion am Schneidkeil eine Durchbiegung der Feder-Klammer von 0,3 mm in x-Richtung. Die dabei aufgebaute Federkraft verhält sich rein elastisch. Die entstehende elektrische Verbindung führt bei angelegter Spannung zwischen FK und FFC zum Stromfluss, wodurch es zu einem schlagartigen Abfall des Kontaktflächenwiderstand R_k kommt der sich im weiteren Verlauf des Kontaktierungsprozesses asymptotisch einem Grenzwert von 0,8 m Ω annähert. Der gemessene Verlauf von R_k bildet dabei in guter Näherung das Verhalten der Wurzelfunktion nach (4.2) für den analytischen Ansatz nach Holm ab.

Prozessphase II wird durch das Abgleiten der Schneidfläche auf dem Leiter beschrieben. Der anfängliche Linienkontakt zwischen Schneidkeil und Flachleiter bildet sich mit steigendem Kontaktierweg zu einem Flächenkontakt der gesamten Stirnfläche der Federklammer aus. Die scheinbare Kontaktfläche A_s der Klemmverbindung steigt. Gleichzeitig führt die ansteigende Biegebelastung der Klemmverbindung zu einem deutlichen Anstieg von F_k . Ihr Maximum wird bei einem Kontaktierweg von 1,0 mm erreicht, bei dem die Schneidfläche eben auf dem Flachleiter liegt. Die Zunahme wird durch ein gehemmtes Abgleiten der FK auf dem Kupferleiter verstärkt. Ursächlich hierfür sind einerseits der höhere Gleitreibungskoeffizienten der Kupfer/Kupfer-Paarung ($\mu=0,6$ für Kupfer/Kupfer und $\mu=0,2$ für Kupfer/Isolierung) und andererseits ein Aufrauen des Kupferleiters durch die FK.

Der zunehmende Kontaktierweg in **Prozessphase III** führt zu einer ansteigenden Verformung der Federklammer. Plastisches Fließen im Einspannbereich des freien Federbeins ist die Folge, wodurch die Kontaktierkraft wieder absinkt. Die Stirnkante der Schneide gleitet zwischen Kupferleiter und Isolation und bildet dabei eine Isolationstasche aus. Hierbei verringert sich der Eintrittswinkel φ_e bis die Außenfläche der Federklammer am Leiter des FFC anliegt. Die Kontaktfläche nimmt durch den entstehenden flächigen Kontakt zu und erreicht ihr Maximum bei einem Kontaktierungsweg von $x = 3$ mm. Bei weiterer Zustellung in x-Richtung legt sich die Kontaktfläche der Federklammer an die obere Isolationschicht an, wodurch es zum Abheben der Klemmfläche am Kupferleiter kommt und die scheinbare Kontaktfläche A_s wieder deutlich absinkt. Gleichzeitig steigt durch die Komprimierung der oberen Isolationschicht die Kontaktierungskraft stark an. Diese „Überkontaktierung“, durch einen zu langen Kontaktierungsweg in x-Richtung, muss durch eine geeignete Prozesssteuerung oder geometrische Anpassungen des Kontaktsystems vermieden werden, um eine definierte Kontaktstellenausprägung sicherzustellen.

4.1.2 Numerisches Modell zur Beschreibung der Kraftkomponenten

Die Ergebnisse der expliziten Analyse dienen neben der vorangegangenen Erläuterung der Prozessphasen I-III ebenfalls der Ableitung der wegabhängigen Kraftkomponenten in x- und z-Richtung. Die Simulationsstudien berücksichtigen alle geometrischen und werkstofftechnischen Haupteinflussgrößen des Kontaktierungsverfahrens [102].

Numerisch ermittelte Kraftkomponenten des Kontaktierungsprozesses

Abbildung 32 zeigt die Vektordarstellung der Kraftkomponenten in x- und z-Richtung für die Kontaktierungsvarianten in der Ebene (a) und in der schiefen Ebene (b). Um eine Vergleichbarkeit beider Verfahrensvarianten sicherzustellen, entspricht der Eintrittswinkel der Kontaktierung in der Ebene φ_e dem Neigungswinkel $\varphi_s=60^\circ$ der schiefen Ebene. Die geometrischen und werkstofftechnischen Randbedingungen des Kontaktelements sind identisch. Die Auftragung der Kraftvektoren in Abhängigkeit

des Kontaktierwegs ermöglicht die Darstellung der Änderung der Kraftangriffswinkel der Reaktionskräfte, hervorgerufen durch die Verformung des Kontaktelements während des Kontaktierprozesses und werden im Folgenden diskutiert.

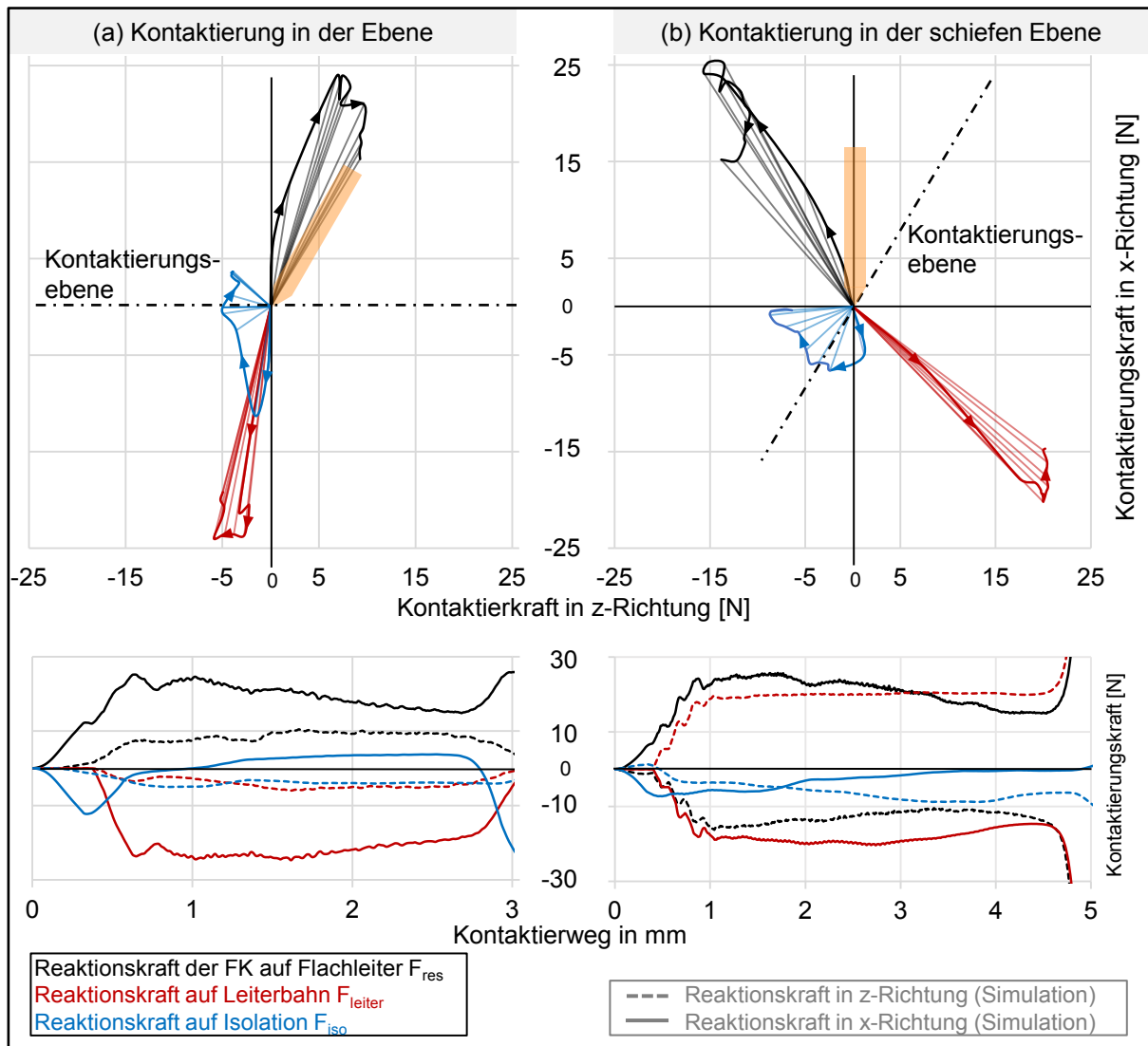


Abbildung 32: Numerische ermittelter Kraftkomponentenverlauf für die Kontaktierung in der Ebene und in der schiefen Ebene

Die an der Feder-Klammer wirksame Kontaktierungskraft F_{res} setzt sich aus der Kraftreaktion auf die Isolationschicht F_{iso} und den Leiter F_{leiter} zusammen. Die drei Kraftvektoren lassen sich jeweils in x- und z-Komponenten zerlegen. Für den Kraftvektor F_{res} gilt allgemein folgender Zusammenhang:

$$\vec{F}_{res} = \vec{F}_{iso} + \vec{F}_{leiter} \quad (4.3)$$

Bei einer **Kontaktierung in der Ebene** (Index e) steht die Reaktionskraft $F_{res,e}$ zu Beginn des Kontaktierungsprozesses senkrecht zur Kontaktierebene, ändert jedoch mit zunehmendem Kontaktierweg x seine Orientierung und flacht ab. Ursächlich für die Richtungsänderung ist der Kraftvektorverlauf der Reaktionskraft $F_{iso,e}$, der von

Prozessphase I (Durchtrennung der Isolationsschicht) hin zu Prozessphase II und III (Abgleiten auf Leiter) seine Orientierung ändert.

Die Betrachtung der jeweiligen Kraftkomponenten in x- und z-Richtung lässt die Ableitung leiterspezifischer Belastungszustände zu. $F_{\text{ziso,e}}$ ist ein Maß für die Schälffestigkeit der Isolation bzw. des Leiterhaftsitzes. Die Kraftkomponente $F_{\text{zleiter,e}}$ wird durch die Reibkraft zwischen Federklammer und Kupferleiter bestimmt. Die Summe aus $F_{\text{ziso,e}}$ und $F_{\text{zleiter,e}}$ ergibt die Kraftreaktion $F_{\text{zres,e}}$ und ist letztlich ein Maß für die Schubbelastung des Flachleiters. Durch die spiegelsymmetrische Geometrie der Federklammer stehen die an beiden Federbeinen wirkenden Kraftreaktionen $F_{\text{zres,e}}$ entgegen und heben sich auf. Dieser Zusammenhang führt zu einer Selbstzentrierung der Federklammer beim Kontaktieren und verhindert gleichzeitig ein Verschieben des Flachleiters. $F_{\text{xres,e}}$ beschreibt die Druckbelastung des Flachleiters und entspricht der messtechnisch erfassbaren Kontaktierungskraft F_K bei der Kontaktierung der Federklammer. Die Kraftkomponente hängt maßgeblich von der Reaktionskraft $F_{\text{xleiter,e}}$ ab, welche der Kontaktnormalkraft F_N nach Holm (4.2) entspricht.

Die **Kontaktierung in der schiefen Ebene** (Index s) wird durch die gleichen mechanischen Effekte beschrieben wie in der Ebene. Vergleicht man die wirksamen Kraftkomponenten beider Verfahren, verhalten sich die Kraftverläufe in x-Richtung über den Kontaktierweg ähnlich. Die geneigte Kontaktierebene führt jedoch zu einem Anstieg der Kraftkomponenten in z-Richtung und verursacht eine Änderung der Kraftvektoren $F_{\text{iso,s}}$ und $F_{\text{leiter,s}}$ in Betrag und Richtung. Gleichzeitig unterscheiden sich beide Verfahren hinsichtlich ihrer Zustellrichtung des Kontaktelements zur Kontaktierungsebene. Beim Prinzip der flachen Kontaktierung verläuft die Wirkrichtung senkrecht zur Kontaktierebene, in der schiefen Ebene hingegen unter einem Winkel von $90^\circ - \varphi_s$. Die flachere Anstellung der Federklammer bei einer Kontaktierung in der schiefen Ebene führt zu einer geringeren Verformung des Kontaktelements. Bei gleicher Kontaktelementgeometrie steigt gleichzeitig der Kontaktier- und Gleitweg am Flachleiter an. Die Folge sind geringere Prozesskräfte in der messbaren x-Richtung.

4.1.3 Analytisches Modell zur Beschreibung der Kraftkomponenten

Die in Kapitel 4.1.2 erläuterten Kontaktierungskraftverläufe sind die Ergebnisse numerischer Simulationen unter Berücksichtigung aller nichtlinearen Effekte des Kontaktierungsprozesses, wie Plastizität, Materialversagen, große Verformungen oder Reibungseffekte der Werkstoffpaarung Flachleiter/Kontaktelement. Die iterative Lösung des Gleichungssystems einer geometrischen Variante bedarf einen hohen zeitlichen Berechnungsaufwand von etwa 10 h auf einer modernen Simulationsworkstation [102]. Aufbauend auf den vorgestellten simulativen Ergebnissen wird daher ein analytisches Berechnungsmodell entwickelt, das eine exakte Beschreibung der Kontaktierkraft F_K erlaubt und zudem den Berechnungsaufwand deutlich minimiert.

Methodik

Das analytische Berechnungstool erlaubt bereits in einer frühen Phase der Kontaktgeometrieauslegung eine näherungsweise Betrachtung der zu erwartenden Kontaktierungskräfte. Gleichzeitig können die beiden Verfahrensvarianten hinsichtlich der auftretenden Prozesskräfte, bzw. der geometrischen und werkstofftechnischen Einflüsse verglichen werden. Vorabanalysen bezüglich der Werkstoffwahl, aber auch die Variation des Eintrittswinkels, ermöglichen letztlich eine effiziente Versuchsplangestaltung im relevanten Prozessfenster der unterschiedlichen Prozessparameter.

Darüber hinaus wird der analytische Ansatz im weiteren Verlauf dieser Arbeit zur Erläuterung unterschiedlicher prozessparameterspezifischer Effekte genutzt. Die folgende Beschreibung bei der Entwicklung der analytischen Ansatzfunktionen dient neben der Schilderung der mathematischen Herangehensweise zur Lösung des nichtlinearen Problems ebenfalls dem besseren Prozessverständnis der Feder-Klammer-Direktkontaktierung.

Den Prozessphasen der Durchtrennung der oberen Isolationsschicht (Phase I) und dem Abgleiten der Federklammer auf dem Kupferleiter (Phase II und III) liegen unterschiedliche mechanische Effekte zugrunde (I: Durchtrennen, II und III: Abgleiten und Abschälen). Die analytische Betrachtung von F_K erfordert daher zwei getrennte Ansatzfunktionen für die Lösung des mechanischen Problems.

Analytische Ansatzfunktion für Prozessphase I

Die freie Federbeinlänge l der Federklammer kann idealisiert als einseitig fest eingespannter Biegebalken betrachtet werden.

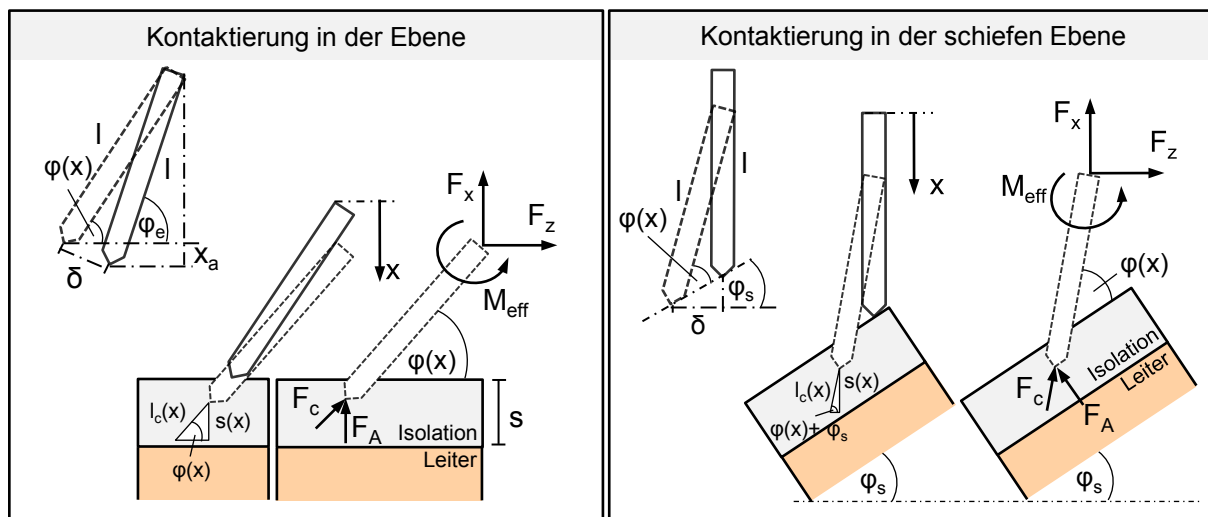


Abbildung 33: Kraft- und Momentenreaktion an der Federklammer für Prozessphase I

Für die beiden in Abbildung 33 dargestellten Kontaktierungsfälle ergeben sich im Freikörperbild am Kontaktelement wirksame Reaktionskräfte und -momente. Die in Federbeinrichtung wirkende Durchtrennkraft der Isolation F_c und die aufgrund der induzierten Biegebelastung des Federbeins resultierende Auflagerkraft F_A verursachen im Einspannbereich die Momentenreaktion M_{eff} und die Auflagerkraftkomponenten F_x und F_z . Der Kontaktierungsprozess führt zu großen Verformungen der Federklammer und einer Verringerung des Eintrittswinkels. Um die Änderung der geometrischen Randbedingungen zu berücksichtigen, wird der vom Kontaktierweg x abhängige Anstellwinkel $\varphi(x)$ beschrieben. Mithilfe trigonometrischer Ansatzfunktionen ergeben sich für die beiden Kontaktierfälle folgende Zusammenhänge:

In der Ebene

$$\sin(\varphi) = \sin(\varphi_e) - \frac{x_a}{l} \quad (4.4)$$

In der schiefen Ebene

$$\sin(\varphi) = \sin(\varphi_s) \left(1 - \frac{x_a}{l}\right) \quad (4.5)$$

Hierbei sind φ_e und φ_s die verfahrensvariantenspezifischen Winkel des Kontaktiervorgangs im unverformten Zustand, x_a die resultierende Einfederhöhe der Federklammer und l die freie Federbeinlänge.

In der Ebene & in der schiefen Ebene

$$x_a = x - s(x) \quad (4.6)$$

Da in der ersten Prozessphase die Isolationsschicht durchdrungen wird, entspricht x_a der Differenz aus dem Kontaktierweg x und der durchdrungenen Isolationsschichtstärke $s(x)$. Es wird angenommen, dass das Verhältnis aus $s(x)$ und der Isolationsschichtstärke s_1 gleich dem Verhältnis des Kontaktierwegs x und dem Kontaktierweg x_1 zur Durchdringung der oberen Isolationsschicht entspricht:

$$s(x) = s_1 \frac{x}{x_1} \quad (4.7)$$

$$s(x) = \frac{s_1}{\cos \varphi_s} \frac{x}{x_1} \quad (4.8)$$

$$l_c(x) = \frac{s(x)}{\sin \varphi(x)} \quad (4.9)$$

$$l_c(x) = \frac{s(x)}{\sin \varphi(x) + \varphi_s} \quad (4.10)$$

Aus der Gleichung für die Länge einer Kreissehne kann die effektive Durchbiegung der Federklammer $\delta(x)$ berechnet werden:

$$\delta(x) = \sin\left(\frac{\varphi(x) - \varphi_e}{2}\right) \cdot 2l \quad (4.11)$$

$$\delta(x) = \sin\left(\frac{\frac{\pi}{2} - \varphi(x) - \varphi_s}{2}\right) \cdot 2l \quad (4.12)$$

Aus dem Kräftegleichgewicht in x -Richtung kann die Kontaktierungskraft F_{xI} bestimmt werden, die sich aus der Durchdringung der oberen Isolationschicht ergibt:

$$F_{xI} + \sin \varphi(x) \cdot F_c + F_A = 0 \quad (4.13) \quad F_{xI} + \cos \varphi(x) \cdot F_c + \sin(\varphi(x) + \varphi_s) \cdot F_A = 0 \quad (4.14)$$

Die Durchtrennkraft $F_c(x)$ wird durch die Schnittlänge $l_c(x)$ und dem Schneidfaktor F_{c0} beeinflusst. F_{c0} ist vom Isolationsmaterial abhängig und lässt sich messtechnisch bestimmen. Die Schnittlänge $l_c(x)$ ist abhängig vom Eintrittswinkel. Die Auflagerkraft F_A wird durch das wirksame Biegemoment M_{eff} an der Einspannstelle beeinflusst und hängt von der Hebelarmlänge l_x ab.

$$F_c(x) = l_c(x) \cdot F_{c0} \quad (4.15)$$

$$F_A = \frac{M_{eff}}{\cos(\varphi(x)) \cdot l_z} \quad (4.16)$$

Die Verformung der Federklammer während des Kontaktierungsprozesses ruft plastisches Fließen im Bereich der Einspannstelle hervor. Über die Betrachtung des resultierenden Biegemoments M_{eff} im Einspannbereich kann das nichtlineare werkstofftechnische Verformungsverhalten dabei berücksichtigt werden. Im elastischen Bereich verhält sich M_{eff} linear zur effektiven Durchbiegung δ . Mit steigendem δ bilden sich ausgehend von der Randfaser des Federklammerquerschnittes plastische Zonen aus, die mit zunehmender Biegebelastung wachsen. Im vollplastischen Zustand ist der gesamte Querschnitt plastifiziert und die Querschnittstragfähigkeit erreicht. In der Mechanik wird hierbei von der Ausbildung eines plastischen Gelenks gesprochen, bei dem die anfänglich starre Einspannung kein Moment mehr aufnehmen kann. Im vollplastischen Fall wird die feste Einspannung deshalb als Gelenklagerung betrachtet.

Das sogenannte vollplastische Moment M_{pl} gibt somit das maximal aufnehmbare Biegemoment an und ist abhängig von der Querschnittsform des Kontaktelements (Abbildung 34 (a)). Als Ansatzfunktion für das plastische, nichtlineare Materialverhalten des Federklammerwerkstoffs wird vereinfachend eine Rampenfunktion gewählt, die sich aus zwei linearen Teilverläufen zusammensetzt (b). Das bilineare Materialmodell beschreibt dabei M_{pl} .

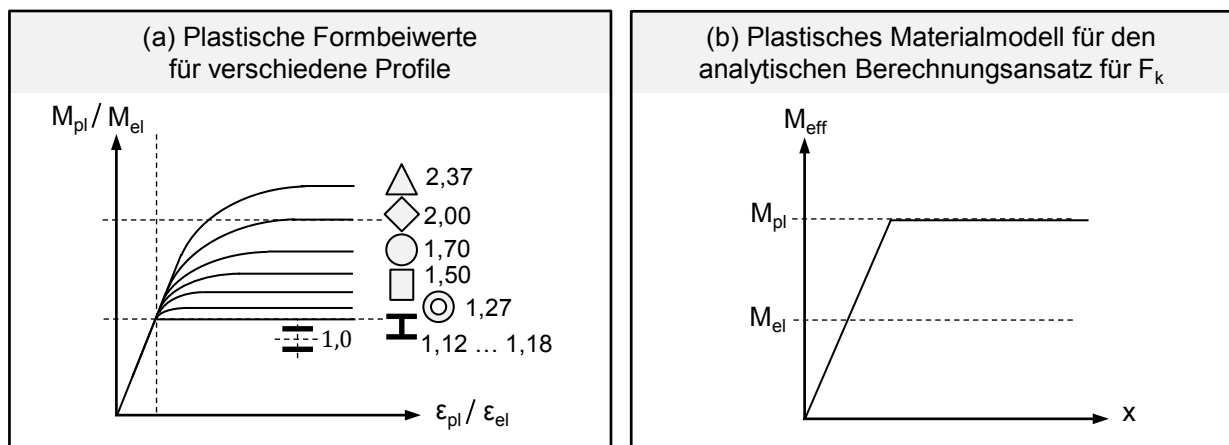


Abbildung 34: Formbeiwerte und Materialmodell für plastische Biegung der Federklammer in Anlehnung an [104]

Für den Rechteckquerschnitt der FK gilt folgender Zusammenhang zwischen dem rein elastischen Biegemoment M_{el} und M_p [104]:

$$M_{el} = \frac{b \cdot d^2}{6} \cdot R_m \quad (4.17)$$

$$M_{pl} = \frac{3}{2} \cdot M_{el} \quad (4.18)$$

In (4.17) beschreibt R_m die Streckgrenze des Kontaktelementmaterials. Für Rechteckquerschnitte, wie der Querschnitt der Feder-Klammer ergibt sich aus [104] ein Formbeiwert von 1,5. Im vollplastischen Fall ist M_{pl} somit um den Faktor 1,5 höher als M_{el} . Das im Einspannbereich der FK effektiv wirksame Biegemoment M_{eff} lässt sich aus der Federsteifigkeit c , der freien Federbeinlänge l und der effektiven Durchbiegung $\delta(x)$ ableiten. Dieser Zusammenhang gilt für $M_{eff} \leq M_{pl}$.

$$M_{eff} = c \cdot l \cdot \delta(x) \quad (4.18)$$

$$\text{für } M_{eff} \leq M_{pl} \text{ sonst } M_{eff} = M_{pl} \quad (4.20)$$

Aus (4.13) und (4.14) folgt mit (4.15) und (4.16) für die Kontaktkraft während der Isolationsdurchdringung F_{xl} folgender Zusammenhang:

In der Ebene

$$F_{xl,e} = \sin \varphi(x) \cdot l_c(x) \cdot F_{c0} + \frac{M_{eff}}{\cos \varphi(x) \cdot l} \quad (4.21)$$

In der schiefen Ebene

$$F_{xl,s} = \sin(\varphi(x) + \varphi_s) \cdot l_c(x) \cdot F_{c0} + \cos \varphi_s \cdot \frac{M_{eff}}{\cos \varphi(x) \cdot l} \quad (4.22)$$

Analytische Ansatzfunktion für Prozessphase II und III

Für die Prozessphase des Abgleitens auf dem Kupferleiter muss ein neuer analytischer Ansatz gewählt werden, da sich nach dem Durchdringen der Isolation die Gleitebene nicht mehr in x -Richtung verschiebt und gleichzeitig keine Schnittkraft F_c am Kontaktelement wirkt. Abbildung 35 zeigt die angreifenden Kraftkomponenten beim Kontaktieren in der Ebene und in der schiefen Ebene für die Prozessphasen II und III.

Es gelten die bereits definierten trigonometrischen Winkelansätze von (4.4) bis (4.10). Durch Rotation des Koordinatensystems für die Kontaktierung in der schiefen Ebene kann für beide Kontaktierfälle die gleiche Ansatzfunktion gewählt werden. Hierbei wird das Koordinatensystem des Kontaktierungsprozesses um den Neigungswinkel der schiefen Ebene φ_s rotiert und nach Ermittlung der Kraftkomponenten $F_{x'}$ und $F_{z'}$ wieder rücktransformiert.

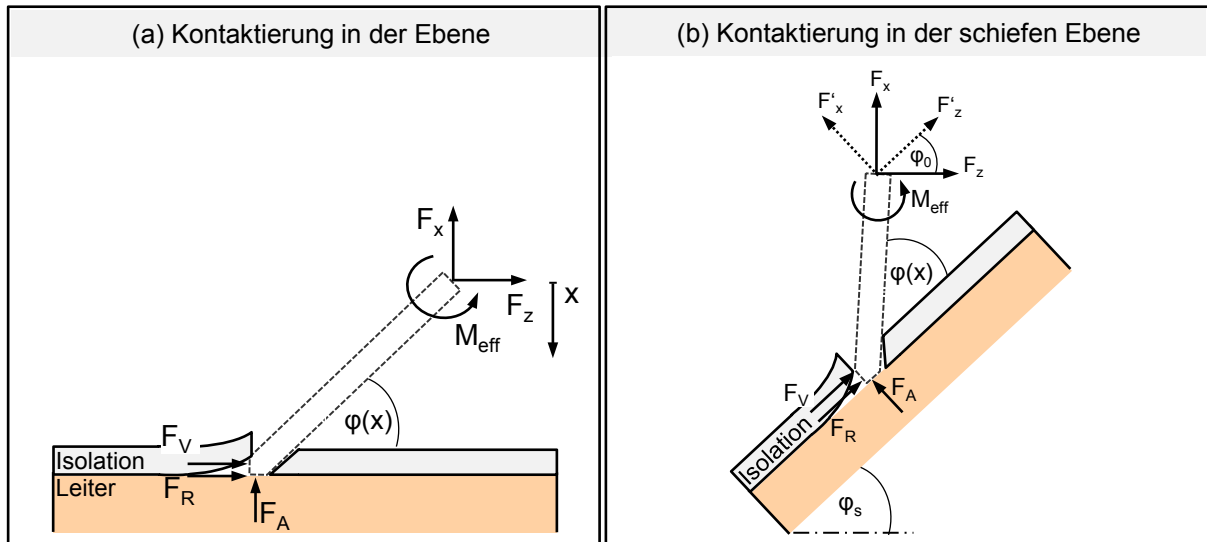


Abbildung 35: Kraft- und Momentenreaktion an der Federklammer für die Prozessphasen II und III

Die Reibkraft F_R zwischen Kontaktelement und Kupferleiter ergibt sich aus der senkrecht zur Gleitebene stehenden Auflagekraft F_A und ist vom Gleitreibungskoeffizienten μ der Kontaktpartner abhängig. F_V wirkt ebenfalls entgegen der Gleitrichtung der Federklammer entlang der Kontaktierebene und wird durch die Schälffestigkeit des Isolationsmaterials beschrieben. Aus dem statischen Kräftegleichgewicht in x -Richtung und dem Momentengleichgewicht um den Drehpunkt des plastischen Gelenks lässt sich die Kontaktkraft während des Abgleitens der Federklammer auf dem Kupferleiter ermitteln:

$$\begin{aligned}
 (0) \quad & F_V + F_R = F_z \\
 (I) \quad & F_A = F_x \\
 (II) \quad & F_R = \mu \cdot F_A \\
 (III) \quad & (F_R + F_V) \cdot l_x - F_A \cdot l_z = M_{eff}
 \end{aligned} \tag{4.23}$$

Aus (I) und (II) in (III) folgt F_{xII} für die Prozessphasen II und III:

$$F'_{xII,s} = \frac{F_v \cdot l_x - M_{eff}}{l_z - \mu \cdot l_x} \tag{4.25}$$

$$F'_z = \mu \cdot F'_{xII,s} + F_v \tag{4.26}$$

$$F_{xII,e} = \frac{F_v \cdot l_x - M_{eff}}{l_z - \mu \cdot l_x} \tag{4.24}$$

$$F_{xII,s} = \cos \varphi_0 \cdot F'_{x2} + \sin \varphi_s \cdot F'_z \tag{4.27}$$

Vergleich des analytischen Modells mit experimentellen Messungen

Abbildung 36 stellt die Ergebnisse messtechnisch ermittelter Kontaktierungskraftverläufe analytisch berechneten gegenüber. Der analytische Ansatz der betrachteten

Verfahrensvarianten kann den nichtlinearen Verlauf der Kontaktierkraft in Abhängigkeit des Anstellwinkels in guter Näherung abbilden. Als Eingangswerte dienen die Werkstoffkennwerte der Kontaktelementhersteller. Gleichzeitig liegen für die Kraftkomponente F_v in Leiterrichtung die Ergebnisse der numerischen Simulation zugrunde. Der Schneidfaktor F_{c0} konnte aus Durchtrennversuchen der Isolation ermittelt werden (Kap. 4.3.1).

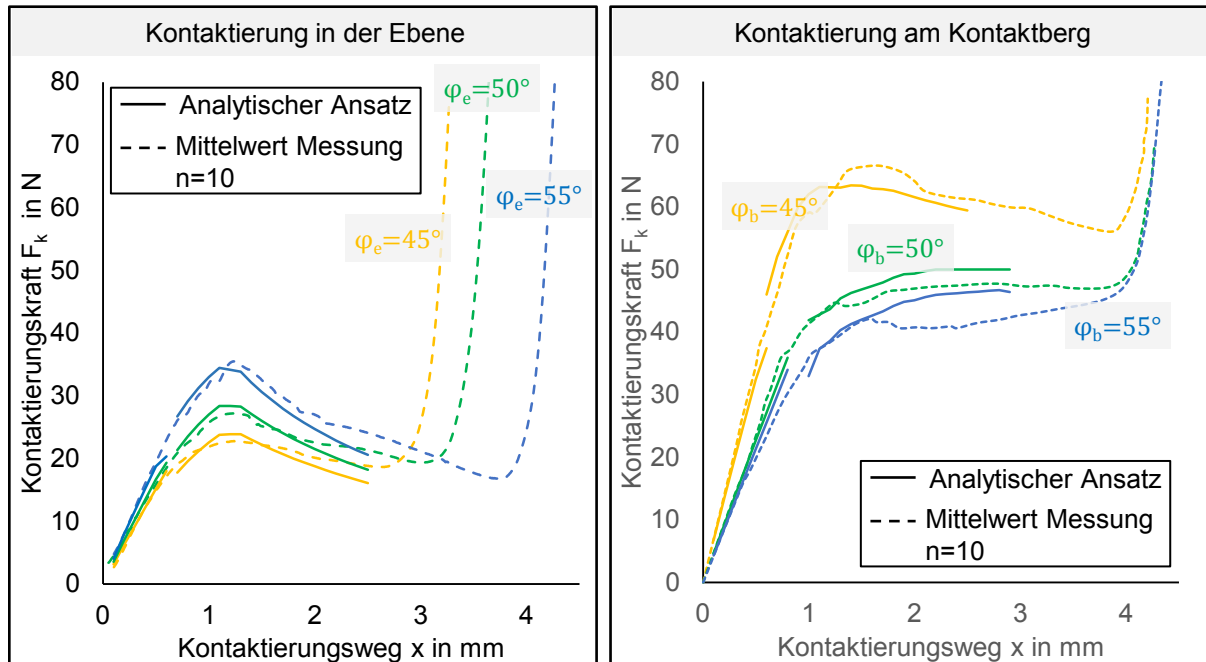


Abbildung 36: Vergleich der analytisch ermittelten Kontaktierkraftverläufe mit messtechnisch erfassten

Vergleicht man die errechneten mit den gemessenen Kraft-Weg-Kennlinien für unterschiedliche Winkel φ , kann eine gute Übereinstimmung festgestellt werden. Die Abweichung der analytisch ermittelten Werte zu den gemessenen Kraft-Weg-Kennlinien beträgt maximal 12 %. Die gemessenen Kurvenverläufe bilden den gesamten Kontaktierungsprozess mit dem Anschlagen des Kontaktierungsmoduls auf das Trägersubstrat ab, wodurch es zu einem starken Kraftanstieg am Ende des Kontaktierungsprozesses für $x > 3$ mm kommt. Das analytische Berechnungstool berücksichtigt diese Randbedingungen nicht, sodass die Kennlinien bis zu einem maximalen Kontaktweg von 2,5 mm dargestellt sind. Ursächlich für die Abweichungen zwischen den berechneten und gemessenen Werten sind Ungenauigkeiten im Messsystem und -aufbau, aber auch unberücksichtigte Randbedingungen im Berechnungsansatz. Neben geometrischen Abweichungen der Prüfkörper, variierenden Werkstoffeigenschaften und Messungenauigkeiten müssen an dieser Stelle deshalb ebenfalls nicht berücksichtigte Effekte in der analytischen Herangehensweise, wie die Deformationen des Leiters und der unteren Isolations-schicht genannt werden.

4.1.4 Analytische Betrachtung des Kontaktwiderstandes

Beim Feder-Klammer-Direktkontakt handelt es sich um eine kraftschlüssige elektrische Verbindung. Der Durchgangswiderstand R_d des Kontaktsystems setzt sich nach den kontaktphysikalischen Grundlagen aus mehreren Teilwiderständen zusammen, deren Verschaltung schematisch als Ersatzschaltbild (Abbildung 37) dargestellt werden kann.

Widerstandsmodell

R_d setzt sich aus statischen und veränderbaren Teilwiderständen zusammen. Die Leiterwiderstände des FFC (R_{L1} und R_{L2}) und der elektrische Widerstand des Kontaktelements selbst (R_N , R_{KI} und R_{Fb}) können idealisiert als statische Werte angesehen werden, die nur vom Werkstoff und der Umgebungstemperatur abhängen. Veränderungen der Kontaktnormalkraft oder die Bildung von Fremdschichten hingegen können den Kontaktflächenwiderstand R_k irreversibel erhöhen, weshalb R_k als variabel anzusehen ist.

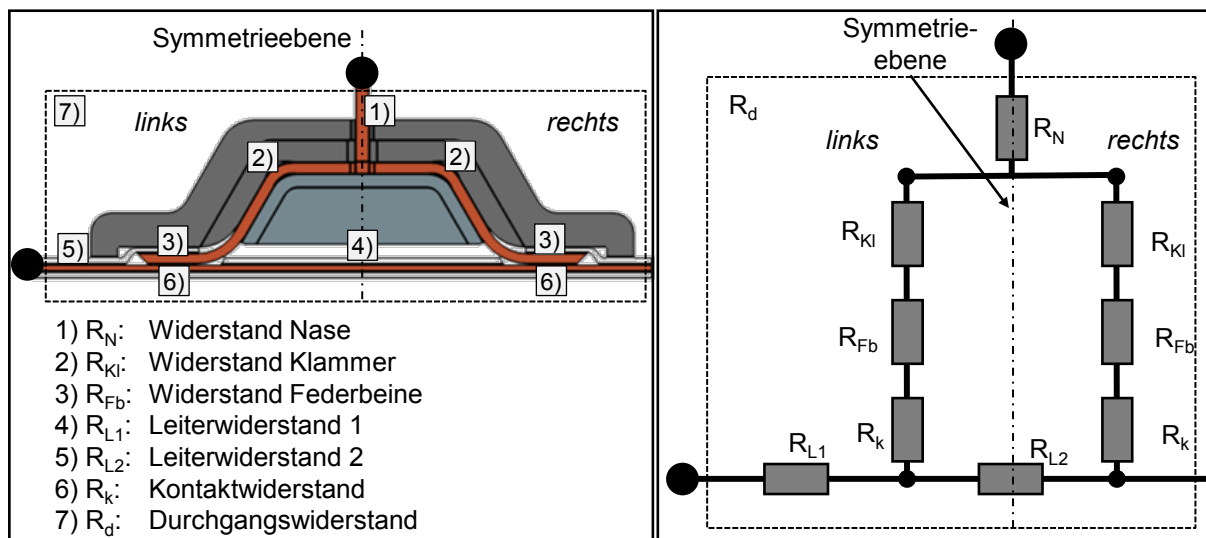


Abbildung 37: Teilwiderstände der Kontaktsystems der Feder-Klammer-Direktkontaktierung

In [89] ist definiert Prüflinge über die Messung des Durchgangswiderstand R_d zu beschreiben. Das Ausfallkriterium eines elektrischen Kontakts wird somit durch den Wert von R_d bemessen. Eine irreversible Änderung von R_d durch die Ausbildung von Fremdschichten auf der elektrischen Funktionsfläche hat seine Ursache in der Erhöhung des Kontaktflächenwiderstands R_k und nicht, wie erläutert, in der Änderung seiner statischen Teilwiderstände.

Analytische Betrachtung des Widerstandsmodells

Die vorgestellte analytische Herleitung soll deshalb den Zusammenhang von R_k und R_d anhand des Feder-Klammer-Direktkontakts aufzeigen und gleichzeitig ein Berechnungsschema zur Bestimmung von R_d liefern. Für die analytische

Beschreibung wird von einem in seinen Teilwiderständen symmetrisch aufgebauten Kontaktsystem ausgegangen. Idealisiert betrachtet sind die statischen Widerstände in der linken und rechten Kontaktsystemhälfte und die Kontaktflächenwiderstände somit identisch. Unter der Anwendung der Gesetzmäßigkeiten für Parallel- und Reihenschaltungen von elektrischen Widerständen kann der Durchgangswiderstand R_d in Abhängigkeit der Teilwiderstände beschrieben werden. Es ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$R_d = R_{L1} + \frac{(R_k + R_{Fb} + R_{Kl}) \cdot (R_{L2} + R_k + R_{Fb} + R_{Kl})}{(R_k + R_{Fb} + R_{Kl}) + (R_{L2} + R_k + R_{Fb} + R_{Kl})} + R_N \quad (4.28)$$

Die einzelnen Widerstände können unter der Voraussetzung, dass bei Gleichstrom eine konstante Stromdichte im Kontaktsystem herrscht bestimmt werden. Die für die Berechnung der Teilwiderstände angewandten Gleichungen und zugeordneten Abmessungen können Anhang 4.3 entnommen werden. Die Auflösung von (4.28) nach dem Kontaktflächenwiderstands R_k führt zur einen quadratischen Gleichung mit folgender Lösung:

$$R_{k1,2} = R_d - R_{L1} - R_N - R_{Fb} - R_{Kl} - \frac{R_{L2}}{2} \pm \sqrt{\frac{R_{L2}^2}{4} + (R_d - R_{L1} - R_N)^2} \quad (4.29)$$

Ergebnisse der analytischen Betrachtung

Abbildung 38 zeigt die aus (4.29) resultierenden Lösungsfunktionen für die Kontaktelementwerkstoffe CuNiSi (a) und CuSn6 (b), basierend auf der Werkstoffauswahl nach Kapitel 3.1. Beide Legierungen unterscheiden sich maßgeblich in ihrer spezifischen elektrischen Leitfähigkeit (CuNiSi: 35 MS/m; CuSn6: 9 MS/m).

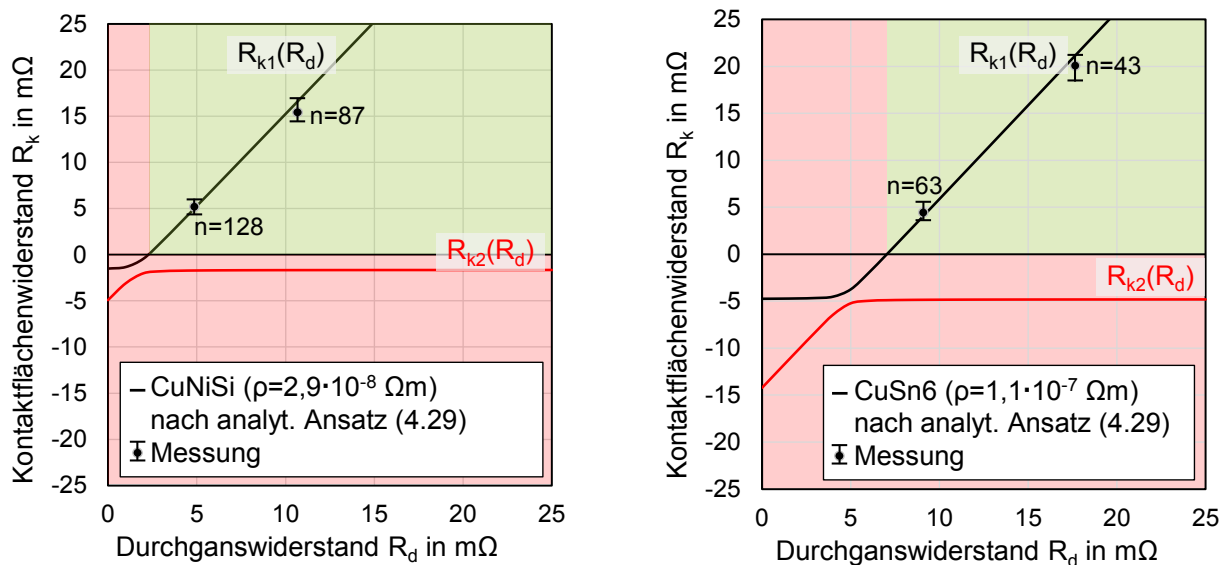


Abbildung 38: Kontaktflächenwiderstand R_k in Abhängigkeit des Durchgangswiderstands R_d

Die Funktionen der physikalisch richtigen Lösungen sind schwarz hinterlegt. Für beide Lösungsfunktionen ergeben sich die niedrigsten Durchgangswiderstandswerte für $R_k = 0$. Abbildung 38 zeigt, dass der Kontaktflächenwiderstand durch die Zusammenschaltung der Teilwiderstände des Kontaktsystems der FKD schneller ansteigt als der Durchgangswiderstand. Eine Grenzwertbetrachtung von $R_{k1}(R_d)$ macht diesen Effekt deutlich und liefert die Steigung $R_{k1} = 2R_d$:

$$\lim_{R_{ges} \rightarrow \pm\infty} (R_{k1,2}) \Rightarrow R_{k1} = R_{ges} + R_{ges} + C_1 = 2R_{ges} + C_1 \quad (4.30)$$

Der effektiv wirksame Kontaktflächenwiderstand R_k kann somit größer sein als der messtechnisch aufgenommene Durchgangswiderstand R_d , welcher nach [89] den Ausfall eines Kontakts bestimmt.

4.2 Einfluss des Kontaktelements auf das Kontaktierungsverfahren

Kapitel 4.1 hat gezeigt, dass der Kontaktierungsprozess der Feder-Klammer-Direktkontaktierung stark von der Kraftkomponentenverteilung am Schneidkeil beeinflusst wird. Maßgeblichen Einfluss auf die Kraftverhältnisse haben

- der Anstellwinkel φ zwischen Federklammer und Flachleiter,
- die Federsteifigkeit c der freien Beinlänge der Federklammer und
- die Schneidengeometrie (Form A, B, C) des Kontaktelements.

Abbildung 39 stellt die drei Haupteinflussgrößen des Kontaktelements auf das Kontaktierungsverfahren schematisch dar.

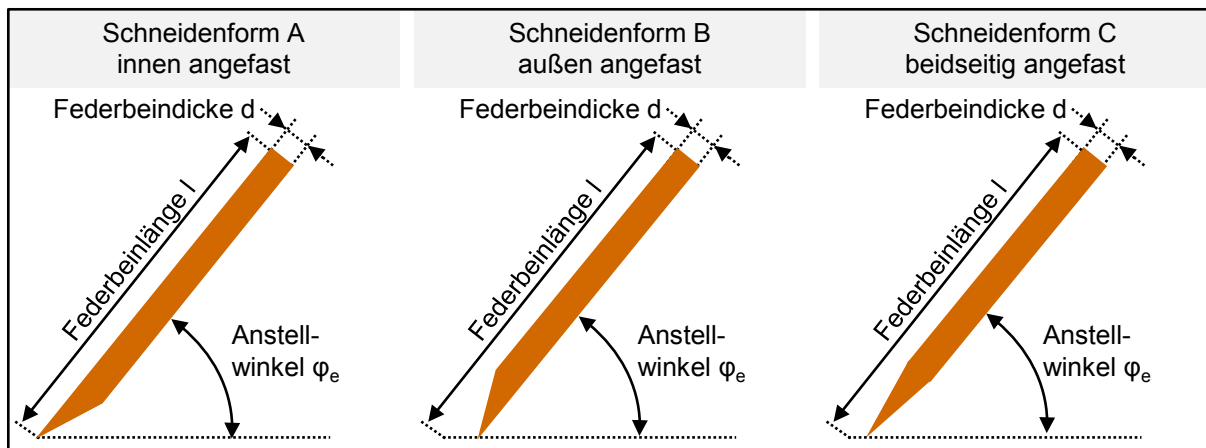


Abbildung 39: Schematische Darstellung der Haupteinflussgrößen des Kontaktelements auf das Kontaktierungsverfahren

Zur Untersuchung der Haupteinflussgrößen auf das Kontaktierungsergebnis wird die Kontaktelementgeometrie variiert und in umfangreichen Messreihen empirisch getestet. Maßgebliche Messgröße ist die Kontaktierungskraft F_k . Die Herstellung der Kontaktelemente erfolgt durch ein prototypisches Schneid-Biegewerkzeug, welches

im Rahmen des DFG-Forschungsprojektes „Kontaktierungsverfahren für Elektronikbaugruppen an neuartige Bordnetzsysteme“ entwickelt worden ist. Das Werkzeug ermöglicht das Einstellen eines variablen Anstellwinkels φ durch Umformung eines Kontaktelementrohlings. Die Aufbringung der innenliegenden (Form A), außenliegenden (Form B) und beidseitigen Schneidenphase (Form C) erfolgt mittels einer Prägevorrüstung mit wechselbaren Einsätzen (Anhang 4.4). Zur Herstellung von Kontaktelementen mit varianter Federsteifigkeit c kommt der Laserstrahlschneidprozess zum Einsatz. Das Fertigungsverfahren wird vor allem für Kleinserien von Kontaktelementen eingesetzt und erlaubt die Verarbeitung unterschiedlicher Kontaktelementwerkstoffe und Blechstärken, wodurch die flexible Herstellung von Kontaktelementrohlingen mit variablen Hauptabmessungen (l , d , b) ermöglicht wird.

4.2.1 Anstellwinkel

Die nachfolgenden Kapitel diskutieren die Haupteinflussfaktoren auf die Prozessphasen I-III und zeigen die Verfahrensgrenzen durch den Einfluss des Kontaktelements auf.

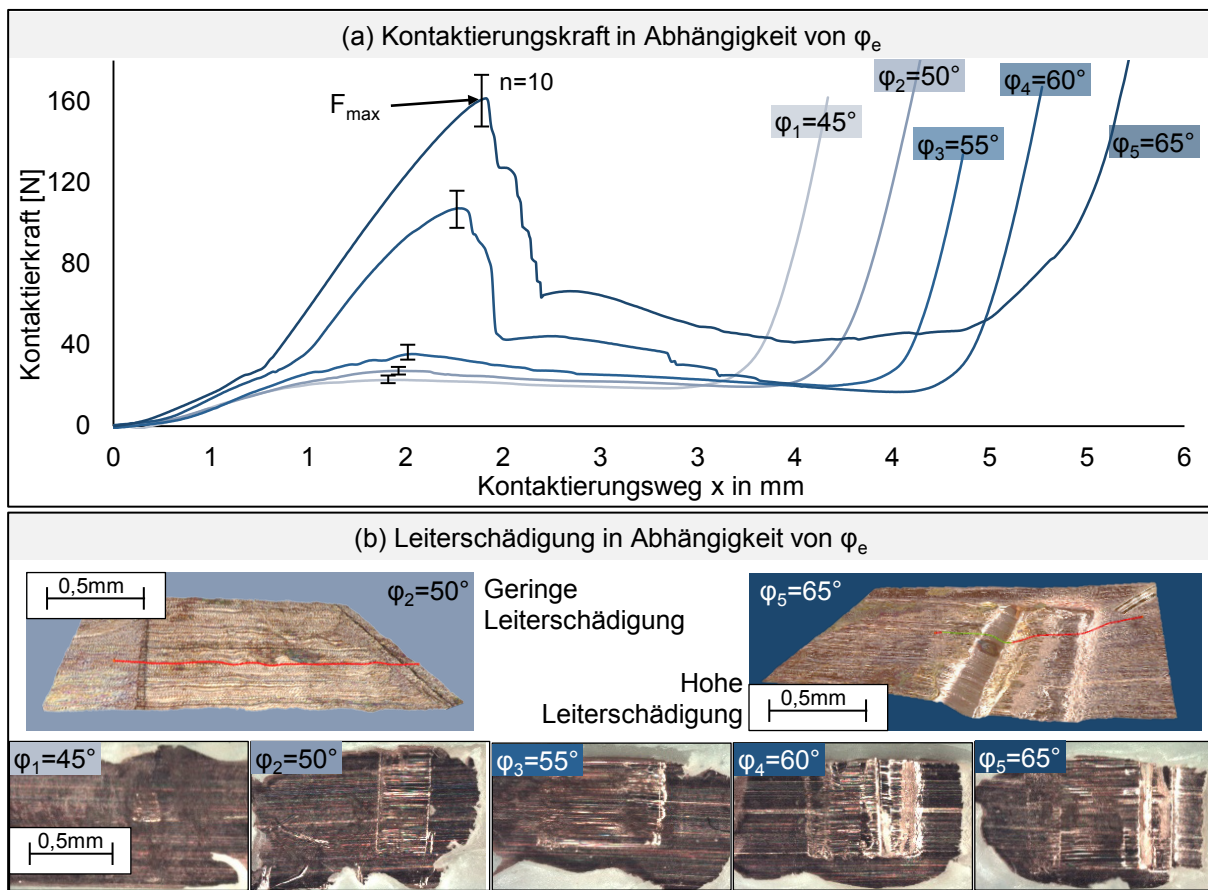


Abbildung 40: Ergebnisse der messtechnischen Untersuchung des Einflusses des Anstellwinkels auf die Kontaktierungskraft

Messergebnisse

Abbildung 40 zeigt Kraft-Weg-Verläufe des Kontaktierprozesses für verschiedene φ_e . Der Kontaktierungskraftverlauf (a) wird maßgeblich durch die Winkelstellung des Kontaktelements beeinflusst. Steigt φ_e , nimmt sowohl F_{\max} als auch $F_k(x)$ zu. Der Kraftanstieg verhält sich dabei nicht linear zur Änderung von φ_e . Vielmehr zeigen Anstellwinkel von $\varphi_e = 60^\circ$ deutliche überhöhte Werte von F_{\max} . Dieser Effekt lässt sich auf die mechanische Schädigung des Leiters durch das Abgleiten der Federklammer zurückführen (Abbildung 40 b).

Kontaktstellenausprägung

Die im Vergleich zum Kupferleiter hohe mechanische Härte und Festigkeit des verwendeten Kontaktelementwerkstoffs (CuNiSi) führt beim Abgleiten zur Oberflächenaufrauhung des Leiters. Lichtmikroskopaufnahmen der Kontaktzone des Leiters zeigen ab einen Eintrittswinkel von $\varphi_e = 60^\circ$ neben der Ausbildung von Längsriefen entlang der Gleitzone eine deutliche Kerbenausbildung quer zum Flachleiter. Die Messungen zeigen, dass die Kerbenausbildung ein Abgleiten der Federklammer verhindert und gleichzeitig zu einem überproportionalen Kontaktierungskraftanstieg führt. Analysen des Kontaktsystems verdeutlichen jedoch ebenfalls, dass höhere Kontaktierungskräfte zur Reduzierung von Isolationsrückständen im Kontaktbereich beitragen können und durch die induzierte Oberflächenaufrauhung die elektrischen Funktionsflächen an Kupferleiter und Federklammer gereinigt wird. Die Folge sind gesteigerte Zuverlässigkeitskennwerte der hergestellten elektrischen Verbindung bei anschließenden Dauerbelastungstests.

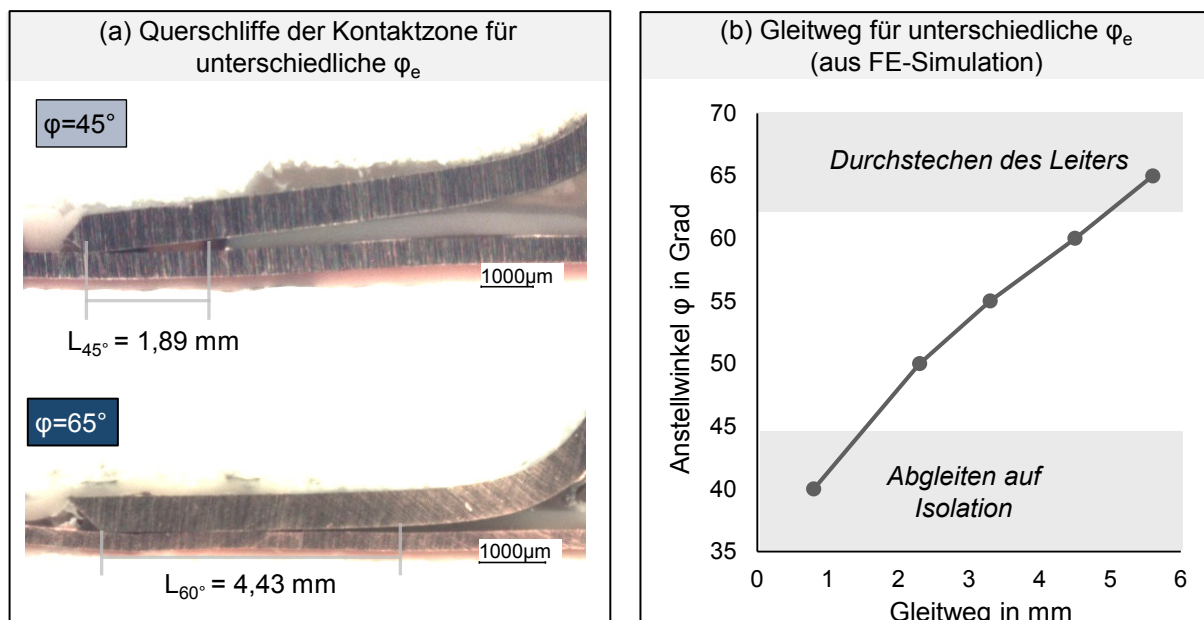


Abbildung 41: Einfluss des Anstellwinkels auf die Kontaktstellenausprägung

Steilere Anstellwinkel führen weiterhin zu einer Erhöhung des notwendigen Kontaktierungswegs x . Der Gleitweg am Kupferleiter, aber auch die scheinbare Kontaktfläche A_s , nehmen dadurch zu. Querschliffe von Kontaktsystemen mit einem Anstellwinkel von $\varphi_1 = 45^\circ$ und $\varphi_2 = 60^\circ$ weisen deutliche Unterschiede in der Kontaktstellenausprägung auf (Abbildung 41 a).

Aus den beschriebenen Mechanismen leitet sich ein Prozessfenster für φ_e ab (b). Einerseits nimmt mit höheren φ_e die mechanische Belastung des Kupferleiters zu, wodurch es in der Folge zu massiven Schädigungen des Kupferleiters kommen kann. Andererseits steigt mit φ_e auch die Kontaktlänge der Klemmverbindung und es kommt zur besseren Entfernung von Fremd- und Isolationsschichten im Kontaktbereich. In der Anwendung muss daher ein Kompromiss zwischen der Kontaktlänge und der mechanischen Schädigung des Leiters gefunden werden, um ein optimales Kontaktierungsergebnis zu erzielen. $\varphi_e = 60^\circ$ hat sich im Rahmen der durchgeführten Zuverlässigkeitsanalysen als ein geeigneter Winkel herausgestellt, der geringe Leiterschädigungen und gleichzeitig hohe Lebensdauern erzielt.

4.2.2 Schneidengeometrie

Analog zu den klassischen Trennverfahren nach DIN 8580 beeinflusst die Schneidengeometrie der Feder-Klammer die Scherspannungsverteilung am Schneidkeil im hohen Maße. Die Folge ist ein unterschiedliches Durchtrennverhalten des Werkstücks, oder wie im Fall der FKD, der oberen Isolationsschicht.

Analytische Betrachtung

Die Schneidenform der Federklammer muss zwei Aufgaben erfüllen. Einerseits muss sie die obere Isolationschicht durchtrennen und die Isolation entlang der Kontaktzone vom Leiter lösen. Andererseits muss durch ihre Form sichergestellt werden, den darunter befindlichen Kupferleiter nicht zu beschädigen. Um den Einfluss der Schneidengeometrie auf das Kontaktierungsverhalten zu diskutieren, werden in dieser Arbeit drei geometrische Ausprägungen nach Abbildung 42 betrachtet.

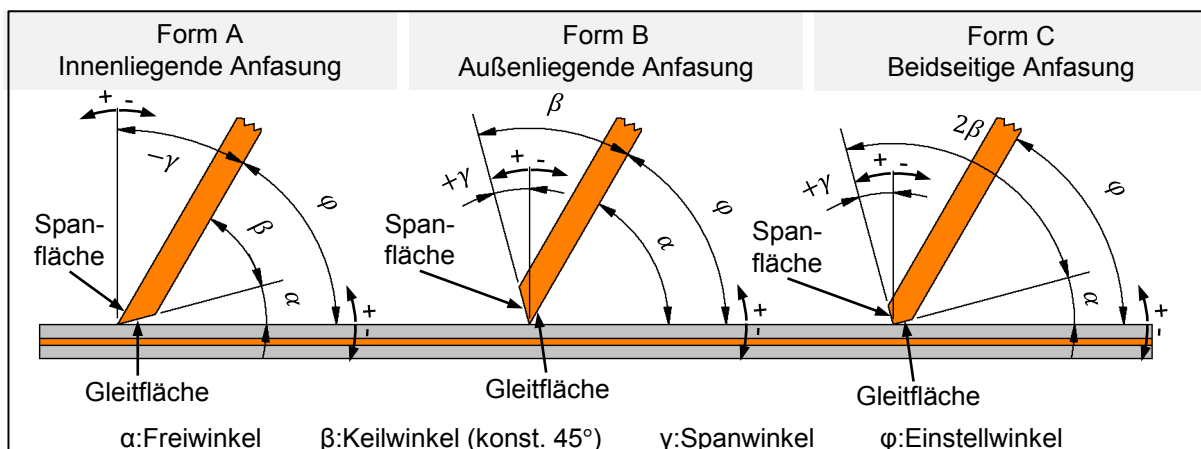


Abbildung 42: Schneidwinkel an der Feder-Klammer

In Anlehnung an die Geometrie am Schneidkeil nach DIN 6580 und DIN 6581 können für die Winkel der FK-Schneide der Freiwinkel α , der Keilwinkel β und der Spanwinkel γ definiert werden. Der Eintrittswinkel φ und der Keilwinkel β sind direkt beeinflussbar. α und γ ergeben sich aus φ und β . Der Keilwinkel β wird im Rahmen dieser Arbeit nicht variiert und ist mit 45° als konstant anzusehen.

Die beiden Schneidflächen können in Span- und Gleitfläche aufgeteilt werden. Die Spanfläche führt die Isolation während des Durchtrenn- und Abgleitvorgangs (I und II). Die Gleitfläche dient dem Abgleiten auf dem Kupferleiter. Für α und γ ergeben sich folgende Zusammenhänge:

Form A	Form B	Form C	
$\alpha_A = \varphi - \beta$	$\alpha_B = \varphi$	$\alpha_C = \varphi - \beta$	(4.31-33)
$\gamma_A = 90^\circ - (\alpha_A + \beta)$	$\gamma_B = (\alpha_B + \beta) - 90^\circ$	$\gamma_C = (\alpha_C + 2\beta) - 90^\circ$	(4.34-36)

Abbildung 43 stellt (4.31) bis (4.36) graphisch dar. Gleichzeitig sind für die drei Schneidengeometrien die obere und untere Prozessgrenze hervorgehoben (Durchstechen und Abgleiten).

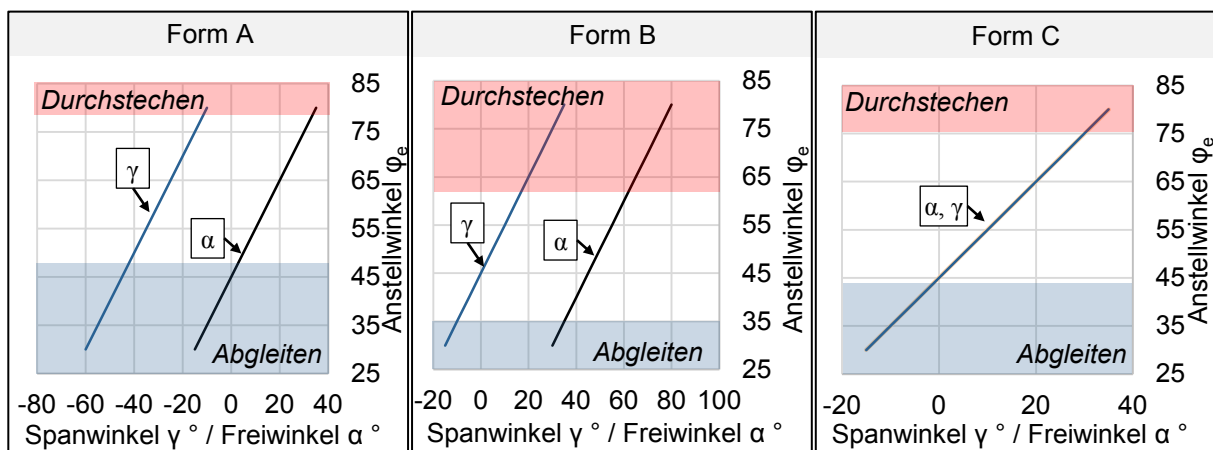


Abbildung 43: Schneidwinkel in Abhängigkeit des Anstellwinkels und der Schneidenform

α beeinflusst die Stellung der Gleitfläche zum Flachleiter. Schneiden mit großen α neigen dabei zum Durchstoßen des Leiters. Als unterer Grenzwert für α kann 0° angesehen werden, da dann die Gleitfläche parallel zum Flachleiter steht. Die innenliegende Fase der Schneidenform A führt dazu, dass α_A um den Keilwinkel β niedriger ist als α_B (vgl. (4.31) und (4.32)). Schneiden mit der Form B neigen deshalb bereits bei deutlich geringeren Anstellwinkel zum Durchstechen des FFC. Der Spanwinkel γ beeinflusst die Stellung der Spanfläche. Sie führt die Isolationsschicht während des Kontaktierungsprozesses und ist für die Ausbildung der Isolations-tasche verantwortlich. Hohe γ reduzieren die Neigung der Federklammer auf der Isolationsschicht abzugleiten und verbessern gleichzeitig das Abschälverhalten der

Isolation durch die Keilwirkung der Schneide. Ein Aufreißen der Isolationstasche während II und III wird gleichzeitig verhindert. Schneidenform B neigt erst bei niedrigeren Anstellwinkel zum Abgleiten auf der Isolationsschicht. Form C vereint die Vorteile von Schneiden A und B. Sie ermöglicht im breitesten Winkelbereich des Eintrittswinkels φ eine Kontaktierung nach dem Prinzip der FKD. Aufgrund des symmetrischen Schneidenaufbaus sind die Winkel α_C und γ_C gleich und lassen sich aus den Winkelbeziehungen für α_A und γ_B ableiten.

Messergebnisse und Kontaktstellenausprägung

Die spezifischen Eigenschaften der Schneidengeometrien führen zu Unterschieden im Kontaktierungskraftverlauf und in der Streuung der Kraftwerte (Abbildung 44 a).

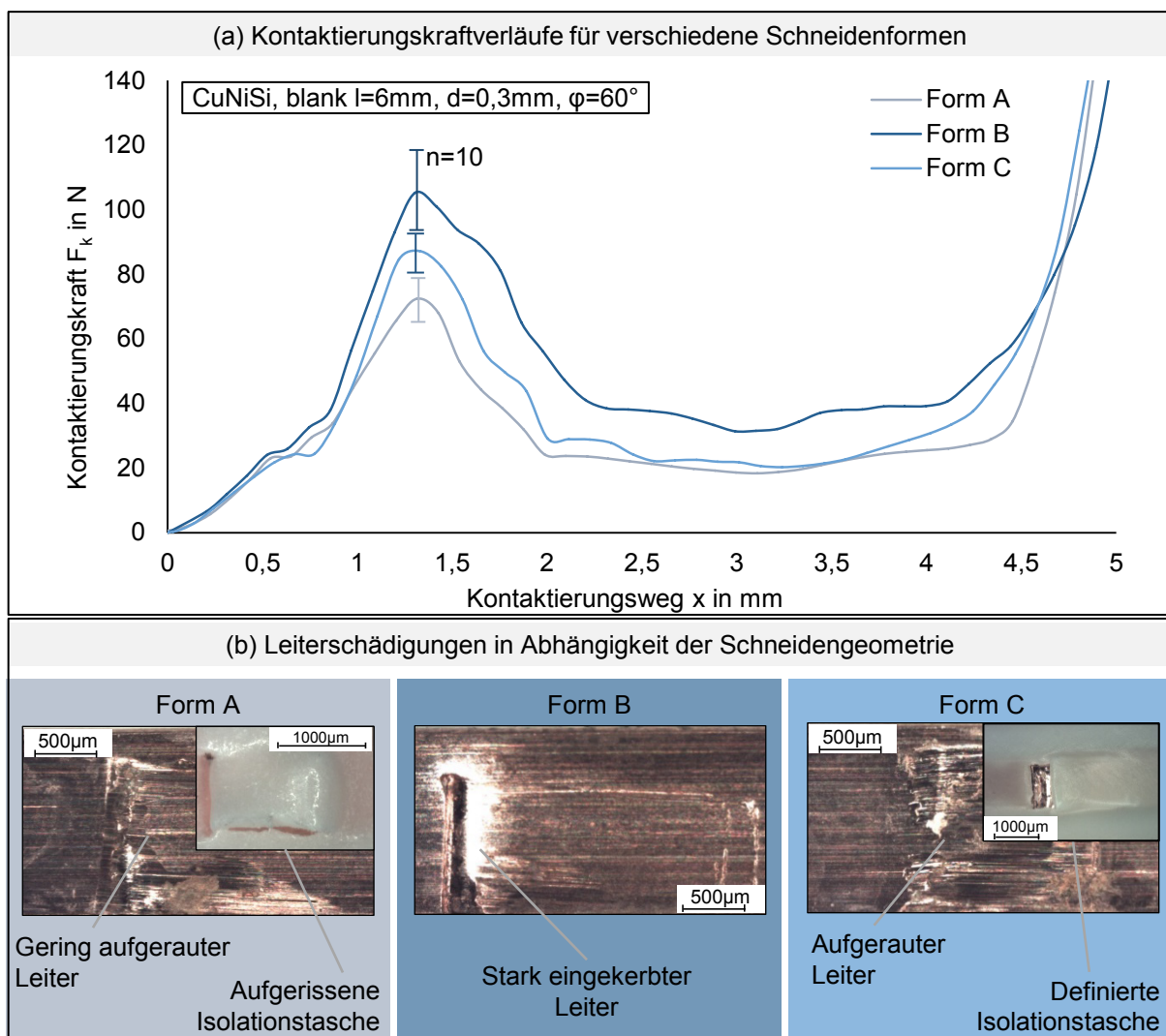


Abbildung 44: Kontaktierungskraft in Abhängigkeit des Anstellwinkels

Analog zu den in Kapitel 4.2.1 beschriebenen Zusammenhängen für steile φ kommt es zu einer ausgeprägten maximalen Kontaktierkraft F_{\max} . In Abhängigkeit der schneidenspezifischen Höhe von F_{\max} kann deshalb auf den Grad der Leiterschädigung zurückgeschlossen werden (Abbildung 44 b). Auch im Kraftverlauf und den

Schadensbildern stellt sich Form C als Kombination der Formen A und B dar. Die symmetrische, keilförmige Schneidengeometrie C führt zu einer definierten Ausbildung der Isolationstasche und einem verbesserten Ablöseverhalten der Isolationsschicht beim Kontaktieren (Abbildung 44 b). Schneidengeometrie C ermöglicht somit letztlich im breitesten Winkelbereich φ_e eine Kontaktierung des Flachleiters.

4.2.3 Federsteifigkeit

Analytische Betrachtung

Analog zum analytischen Ansatz zur Bestimmung der Kontaktierungskraft, dient zur Ermittlung der Federsteifigkeit des Kontaktelements die idealisierte Betrachtung als einseitig fest eingespannter Biegebalken. Für eine Federklammer mit der freien Einspannlänge l , der Dicke d und der Breite b folgt aus der linearisierten Differentialgleichung der technischen Balkenbiegelehre für die notwendige Kraft F , um die Kontaktfeder auszulenken, folgender Zusammenhang:

$$F = \frac{3EI}{l^3} x \quad (4.37)$$

$$I = \frac{bd^3}{12} \quad (4.38)$$

Wobei E der Elastizitätsmodul und I das Flächenträgheitsmoment des Rechteckquerschnitts des Kontaktelements ist. Aus (4.37) und (4.38) lässt sich mithilfe der allgemeinen Federgleichung $F = c \cdot x$ die Federsteifigkeit c bestimmen.

$$c = \frac{bd^3E}{4l^3} \quad (4.39)$$

Die Federsteifigkeit c des Kontaktelements gilt für den rein elastischen Fall, sowie für kleine Durchbiegungen und dient als Ersatzsteifigkeitskennwert der unverformten Struktur. Da l und d jeweils mit der dritten Potenz eingehen, bestimmen beide Parameter maßgeblich den Steifigkeitswert. Für die nachfolgende Diskussion des Einflusses auf den Kontaktierungsprozess wird der lineare Einfluss der Federbeinbreite b daher als konstant ($b = 1,25 \text{ mm}$) angenommen.

Messergebnisse

Trägt man die maximale Kontaktierkraft F_{\max} über der elastischen Federsteifigkeit c auf, erhält man in Abhängigkeit von d die in Abbildung 45 dargestellten Kennlinien. Neben den Funktionen der Kennlinien aus dem analytischen Ansatz nach Kapitel 4.1.3 sind Vergleichsmessungen und deren Streuung für $n = 10$ dargestellt. Abbildung 45 zeigt, dass gleiche elastische Federsteifigkeiten c bei größeren Federdicken d zu höheren maximalen Kontaktierungskräften F_{\max} führen. Dieser Effekt beruht auf der höheren Querschnittstragfähigkeit größerer d im teil- und vollplastischen Bereich. Die maximale Querschnittstragfähigkeit wird durch das vollplastische Moment M_{pl} beschrieben:

$$M_{pl} = \frac{b \cdot d^2}{4} \cdot R_m \quad (4.40)$$

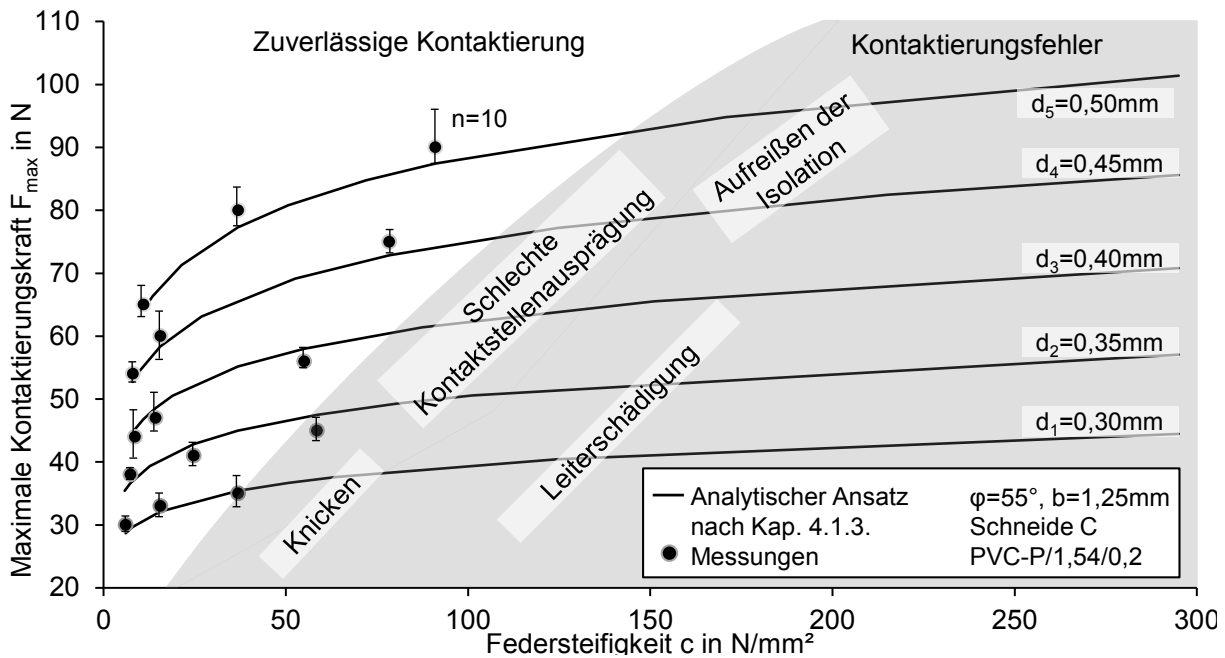


Abbildung 45: Einfluss der Federbeindicke auf die maximale Kontaktierungskraft

Bei der Betrachtung des analytischen Ansatzes setzt sich F_{\max} neben dem wirksamen Biegemoment M_{pl} nur aus längenabhängigen Kraftkomponenten zusammen. Durch die Quotientenbildung von $F_{\max,d1}$ und $F_{\max,d2}$ ($d_1 \neq d_2$) gilt:

$$\frac{F_{\max,d2}}{F_{\max,d1}} = \frac{d_2^2}{d_1^2} \quad (4.41)$$

Bei gleichen φ_e und l folgt demnach der Versatz der Kennlinien nach Abbildung 45 dem Ausdruck d^2 .

Kontaktstellenausprägung

Neben der Leiterschädigung durch zu hoch gewählte Steifigkeitswerte der Federklammer führen die von c abhängigen Parameter zu weiteren Schädigungsmechanismen. So haben die Ergebnisse aus den Kontaktierungsversuchen variabler Kontaktelementgeometrien gezeigt, dass mit sinkender Beinlängen l die steigende Federsteifigkeit den Leiter stärker schädigt, jedoch der negative Effekt einer zu kurzen Kontaktstellenausprägung aufgrund niedriger l deutlich überwiegt.

Die Messungen zeigen, dass es bei Beinlängen für $l < 3$ mm, analog zu den in Kapitel 4.2.1 thematisierten Effekten zu flacher Eintrittswinkel φ_e , zu kritischen Kontaktstellenausprägungen kommt. Vor allem bei Kontakten mit geringen d und l tritt dieser Effekt vermehrt auf und wird zusätzlich durch das erhöhte Risiko des Abknickens der Federklammer verstärkt. Die Zusammenhänge führen letztlich dazu, dass das Prozessfenster mit sinkendem d kleiner wird. Umgekehrt führen steigende

d dazu, dass die obere Isolationsschicht während des Kontaktierungsprozesses zum Aufreißen neigt. Hohe Isolationsschichtstärken lassen hierbei höhere Federbeindicken zu. Die komplexen geometrischen Einflüsse auf das Kontaktierungsergebnis erfordern es letztlich die Federklammer mit dem zu kontaktierenden Flachleistersystem abzustimmen, um eine leistungsfähige und zuverlässige elektrische Verbindung herzustellen.

4.3 Mechanische Eigenschaften des Flachleiters

Die Durchdringung der oberen Isolationsschicht und das Abgleiten auf dem Kupferleiter durch die Federklammer beschreiben mechanische Vorgänge nach dem Prinzip der FKD (Abbildung 46). Die mechanischen Eigenschaften des Flachleiters beeinflussen dabei den Kontaktierungsprozess maßgeblich. Die drei wesentlichen Kenngrößen zur Qualifizierung flexibler Flachbandleitungen für das Verfahren nach dem Prinzip der FKD sind

- die erforderliche Kraft zum Durchtrennen von Isolations- und Leiterwerkstoff,
- der Leiterhaftsitz zwischen Isolation und Leiter
- und die Zugfestigkeit des Isolationsmaterials.

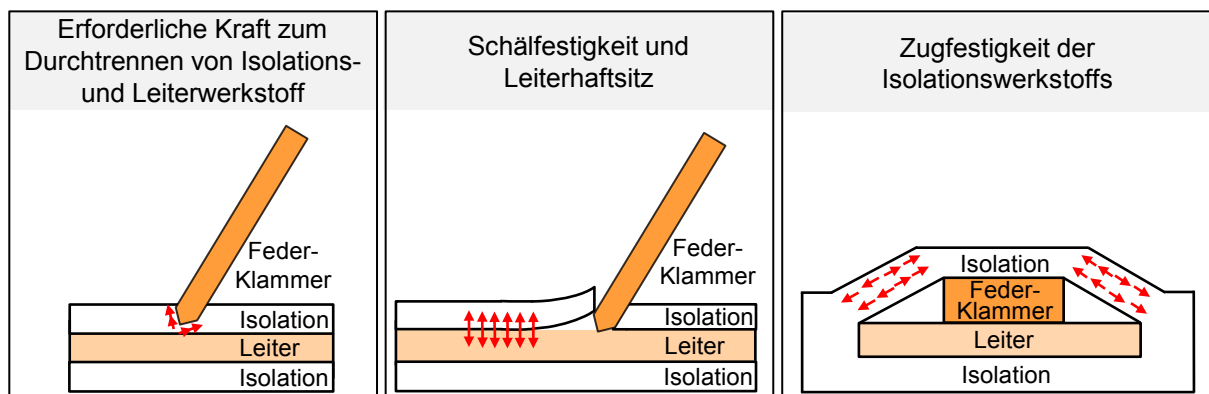


Abbildung 46: Mechanische Kenngrößen des Flachleiters zur Qualifizierung für das Verfahren der FKD

Zum Nachweis eines universell einsetzbaren Kontaktierungsverfahrens werden die in Kapitel 3.1 definierten Randbedingungen der Anforderungsmatrix für flexible Flachleiter gewählt.

4.3.1 Durchtrennkraft von Isolation und Leiter

Für die Herstellung eines Kontakts nach dem Prinzip der FKD, muss die maximale Kontaktierkraft in einem Kraftbereich liegen, deren untere Grenze der Durchtrennkraft der Isolation entspricht und nach oben durch die erforderliche Kraft zum Durchtrennen des Leiters begrenzt ist.

Messprinzip

Für die Beschreibung der Durchtrennkraft von Isolation und Leiter werden die Ergebnisse von Durchtrennversuchen flexibler Flachleiter mit einer Schneidenschrägstellung von $\varphi_e = 60^\circ$ dargestellt. Die Schneidengeometrie beeinflusst sowohl die Höhe der Durchtrennkraft, als auch den Kraftverlauf, wodurch die drei Grundformen der Schneiden nach Kapitel 4.2.2 getrennt betrachtet werden.

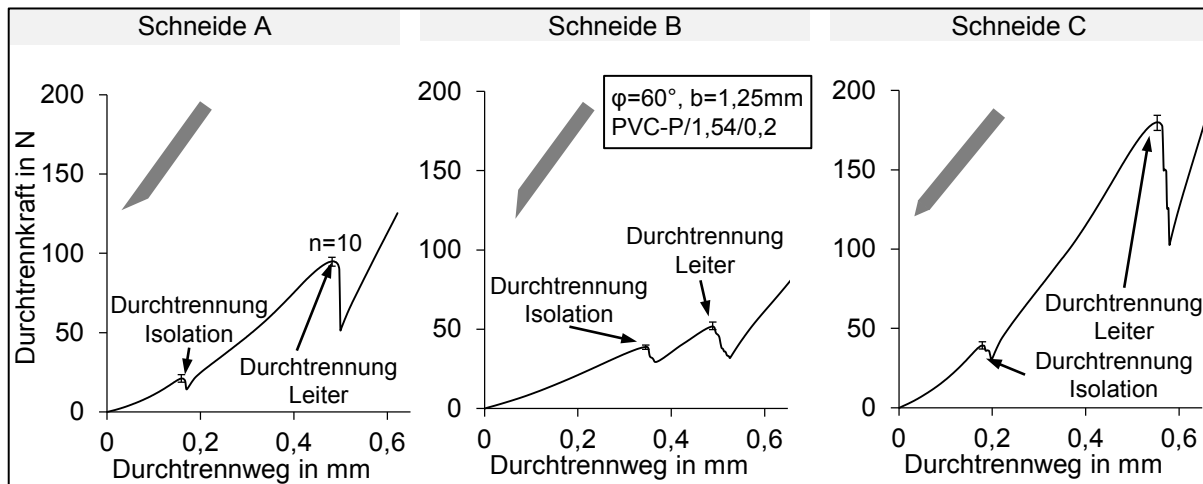


Abbildung 47: Durchtrennkraft in Abhängigkeit der Schneidenform

Abbildung 47 zeigt die gemessenen Durchtrennkraftverläufe für die Schneidenformen A, B und C. Die Kraftkennlinien weisen ausgeprägte Kraftplateaus auf, welche die spezifischen Durchtrennkraften der Isolationsschicht und des Leiters beschreiben. Die unterschiedlichen Schneidengeometrien führen dazu, dass die Kraftkomponentenverteilung am jeweiligen Schneidkeil variieren. Die Folge sind verschiedenartige Scherbelastungszustände des Isolations- und Leiterwerkstoffs und unterschiedliche spezifische Durchtrennkraften in Abhängigkeit der Schneidengeometrie. Zur Untersuchung der Kontaktierungseignung werden die Messergebnisse aus Durchtrennversuchen für unterschiedliche Flachleitertypen diskutiert.

Messergebnisse

Abbildung 48 a zeigt die Ergebnisse der Durchtrennversuche und den daraus abgeleiteten Kraftbereichen für fünf unterschiedliche Flachleitertypen. Das Säulendiagramm stellt die obere (rot) und untere (blau) Kraftgrenze und das jeweilige Prozessfenster (grün) der gemessenen Leiter dar. Position und Größe des Prozessfensters der betrachteten Leiterstrukturen hängen im hohen Maße von der gewählten Schneidengeometrie ab. Die Versuche zeigen, dass Schneidengeometrie C im größten Kraftbereich eine zuverlässige Kontaktierung ermöglicht. Die Ursachen für das verbesserte Kontaktierungsverhalten aufgrund der spezifischen Schneidengeometrien werden in Kapitel 4.2.2 ausführlich diskutiert.

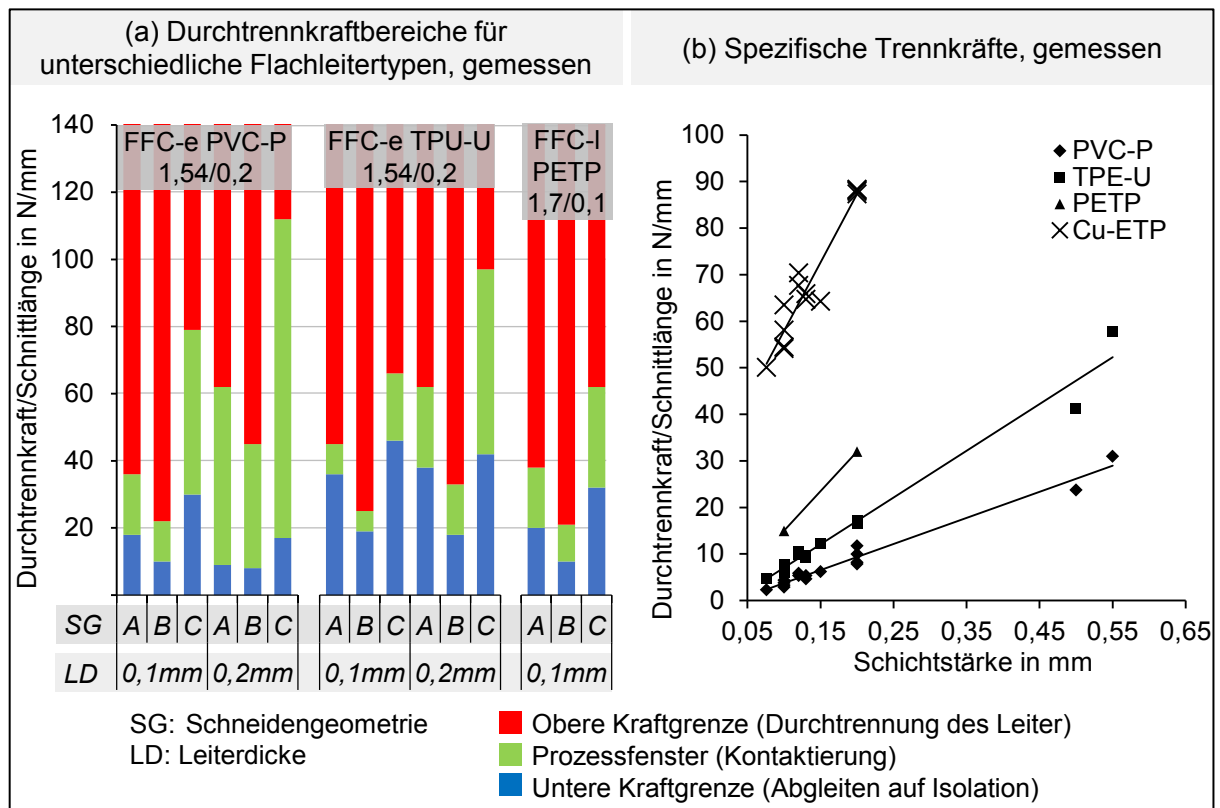


Abbildung 48: Einfluss der Durchtrennkräfte auf den Kontaktierungsprozess

Kontaktstellenausprägung

Neben der geometrischen Ausprägung der Schneide liegt der wesentliche Einfluss auf das Prozessfenster in der Leiterdicke a des untersuchten Flachleiters. Größere Leiterdicken führen zu einer höheren erforderlichen Durchtrennkraft und erweitern das Kraftfenster entsprechend nach oben. Die Untersuchungen zeigen, dass die erforderlichen Durchtrennkräfte der Isolation bei gleicher Isolationswandstärke von der Leiterdicke a abhängen. Für $a = 0,2$ mm liegt die erforderliche Durchtrennkraft der Isolation rund 15% unterhalb der Durchtrennkraft eines FFC-Typs mit einer Leiterdicke von $a = 0,1$ mm. Dieser Effekt kann auf die stabilisierende Wirkung des im Vergleich zur Isolation deutlich steiferen Leiterwerkstoffs zurückgeführt werden, der einem Eindrücken der unteren Isolationsschicht während des Kontaktierungsprozesses entgegenwirkt.

Beim Vergleich der betrachteten Isolationsmaterialien zeigt der Werkstoff PVC-P das größere Prozessfenster. Ursächlich für das sich daraus ergebende bessere Kontaktierungsverhalten ist die geringere spezifische Trennkraft, die benötigt wird, um die Isolationsschicht zu durchtrennen. Abbildung 48 b stellt die spezifischen Durchtrennkräfte F_c der Isolationsmaterialien und des Kupferleiters Cu-ETP in Abhängigkeit der Schichtstärke gegenüber. Zur allgemeinen Betrachtung der spezifischen Trennkraft basieren die Kennlinien auf den Ergebnissen aus Durchtrennversuchen unter einen Eintrittswinkel unter 90° und der Schneidengeo-

metrie C. Durch die Winkelstellung des Trennwerkzeugs sind die gemessenen Durchtrennkräfte niedriger als im Flachleiterverbund, da der schichtweise Aufbau des Flachleiters eine erhöhte Nachgiebigkeit der Einzelschichten aufweist und der steilere Anstellwinkel zudem die Trennkraft minimiert. Die Ermittlung der spezifischen Trennkräfte F_c bestätigt, dass geringe Trennkräfte das Prozessfenster, in dem der jeweilige Flachleiter kontaktiert werden kann, vergrößern.

Folglich kann durch die Wahl der Leiterdicke a und des Isolationsmaterials die Größe des Prozessfensters hinsichtlich der Prozessanforderung gezielt eingestellt werden. Darüber hinaus beeinflusst die Schneidengeometrie die Lage des Prozessfensters bezüglich der aufzuwendenden Kraft. Schneidenform C bietet auch im Hinblick auf die Durchtrennkraft von Isolation und Leiter das größte Potential für eine robuste Kontaktierung.

4.3.2 Schälfestigkeit und Leiterhaftsitz

Die in Leiterrichtung wirkende Kraftkomponente F_v resultiert aus der Grenzflächenhaftung zwischen Isolation und Leiter und ist ein Maß für den Widerstand, um die obere Isolationsschicht zu lösen und eine Isolationstasche auszubilden (Abbildung 49).

Messprinzip

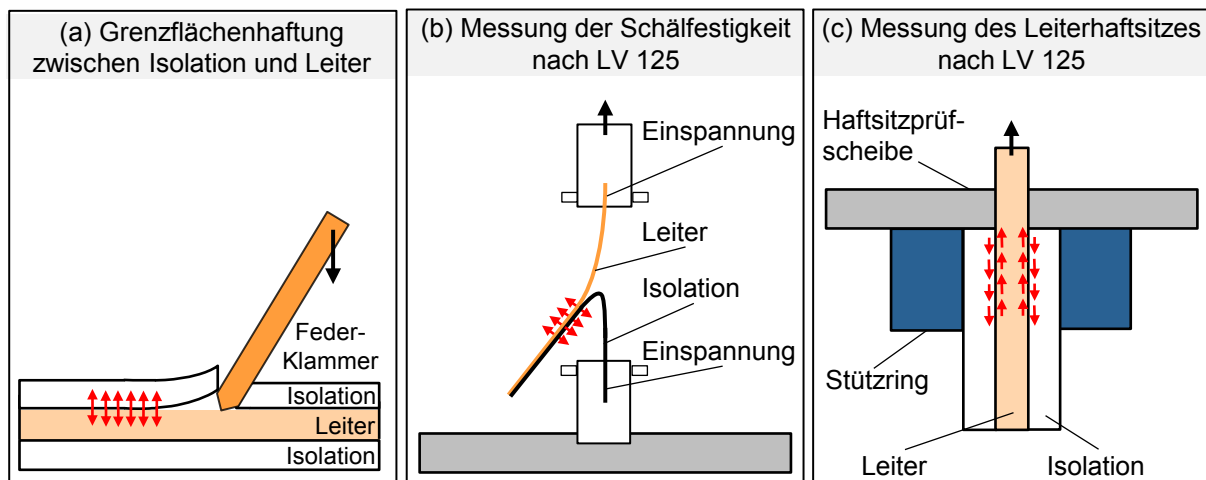


Abbildung 49: Messprinzipien der Schälfestigkeit und des Leiterhaftsitzes

Die technischen Anforderungen an mehradrige, ungeschirmte, flexible Flachleitungen im Kfz werden in der Lieferantenvorschrift 125 beschrieben. Zur Bestimmung der Grenzflächenhaftung schlägt die LV zwei Prüfmethoden vor. Hierbei wird zwischen der Messung der Schälfestigkeit und dem Leiterhaftsitz der Leitung unterschieden. Beide Kenngrößen stellen dabei ein Maß für die Beschreibung der Grenzflächenhaftung zwischen Isolation und Leiter dar, unterscheiden sich jedoch wesentlich in ihrem zugrundeliegenden Wirkprinzip. Abbildung 49 stellt schematisch die Messaufbauten zur Bestimmung der Schälfestigkeit und des Leiterhaftsitzes dar. Nach LV 125 wird

die Grenzflächenhaftung von FFC-I und FPC dabei durch die Schälfestigkeit beschrieben. Zur Ermittlung der Kenngrößen werden die freien Enden des Leiters und der Isolation in einer Zugprüfmaschine eingespannt und die Isolation einseitig vom Kupferleiter abgeschält (Abbildung 49 b).

Die Qualifizierung extrudierter Flachleiter erfolgt hingegen über die Messung des Leiterhaftsitzes, wobei der Flachleiter aus der oberen und unteren Isolationsschicht gezogen wird. Ein Stützring dient dabei zur Führung des Prüflings (Abbildung 49 c).

Beide Methoden lassen die Ableitung der normierten Schälkraft F_s bzw. der normierte Haftsitz F_H aus der gemessenen Kraft-Weg-Kurve zu. Durch die unterschiedlichen Wirkprinzipien der Messanordnungen sind die daraus ermittelten Messwerte jedoch nur bedingt miteinander vergleichbar, da in Abhängigkeit einer Schäl- bzw. Scherbelastung unterschiedlich hohe Kräfte erforderlich sind, um die Isolationsschicht vom Leiter zu lösen.

Verdeutlicht werden kann dieser Effekt am Beispiel des Haftklebstoffs, dessen Scherfestigkeit mit steigendem Vernetzungsgrad zunimmt, wohingegen die Schälfestigkeit abnimmt. Das umgekehrte Verhalten beim Abschälen kommt dadurch zustande, dass durch die Belastung im Versuch das Verformungsverhalten des Klebstoffs geprüft wird, jedoch weniger dessen Festigkeit. Die dahinter stehenden bruchmechanischen Vorgänge im Klebstoff führen dazu, dass Schälversuche nur zu vergleichenden Zwecken eingesetzt werden sollten, jedoch nicht um die wirksame Grenzflächenhaftung zwischen beiden Verbindungspartnern zu beschreiben. [105]

Auch die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten FE-Simulationen, deren Eingangswerte empirisch ermittelte Grenzflächenhaftungswerte für die Kontaktdefinition Isolation/Kupfer sind, haben gezeigt, dass die Werte der Grenzflächenhaftung, ermittelt aus Schälversuchen, deutlich zu niedrig ausfallen. Das Resultat waren, im Vergleich zum messtechnischen Versuch, verfälschte Kraft-Weg-Kennlinien der Kontaktierung [102]. Zur Sicherstellung einer vergleichenden Bewertung beider Leitersysteme wird deshalb aufgrund der beschriebenen Zusammenhänge sowohl für extrudierte als auch für laminierte Leiter die Grenzflächenhaftung der Isolation nach der Prüfmethode zur Bestimmung des Leiterhaftsitzes angewandt.

Messergebnisse

Abbildung 50 a zeigt den über die Leiterbreite normierten Leiterhaftsitz in Abhängigkeit des Abziehwegs für unterschiedliche Isolationswerkstoffe. Vor allem der im Laminierverfahren hergestellte Flachleiter weist im Vergleich zu den untersuchten extrudierten Leitertypen sehr hohe Haftfestigkeitskennwerte auf. Ursächlich für den deutlichen Unterschied sind die verschiedenen zugrundeliegenden Herstellungsverfahren der betrachteten Leitertypen.

Bei FFC-I wird die Isolationsschicht über einen Haftvermittler bzw. Klebstoff mit dem Leiter adhäsiv verbunden. Das Haftprinzip der Isolationsschicht extrudierter Flachleiter basiert im Vergleich auf einem Mikroformschluss zwischen Isolation und Leiter, wodurch deutlich geringere Werte für den Leiterhaftsitz erzielt werden.

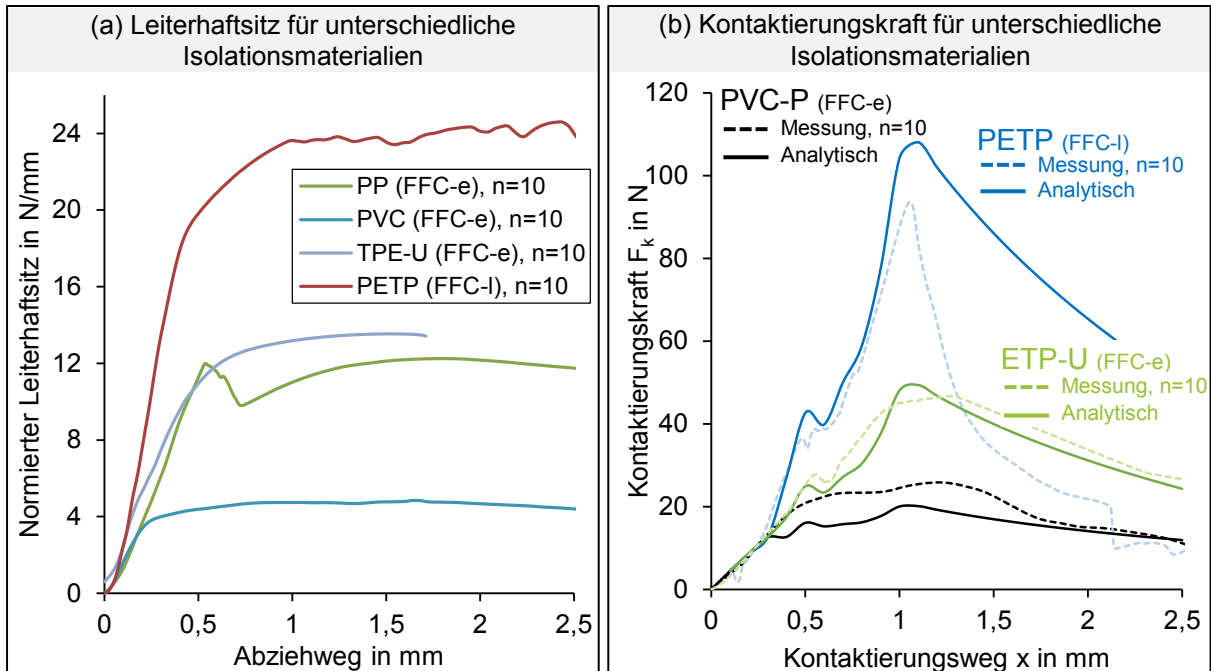


Abbildung 50: Einfluss des Leiterhaftsitzes auf die Kontaktierbarkeit des Flachleiters

Kontaktstellenausprägung

Die Haftfestigkeit des Leitersystems beeinflusst vor allem das Abgleiten der Federklammer auf dem Kupferleiter (I und II) und dadurch die Ausbildung der Isolationstasche. Abbildung 50 b zeigt die Kontaktierkraft-Weg-Verläufe für Flachleiter mit geringer (PVC-P), mittlerer (TPE-U) und hoher Haftfestigkeit (PETP). Hohe Werte für F_H verhindern ein Abgleiten und erhöhen die aufzuwendende Kontaktierungskraft F_k . Die Untersuchungen haben darüber hinaus gezeigt, dass steigende Werte für F_H zu vermehrten Isolationsrückständen in der Kontaktzone führen und sich gleichzeitig die Gefahr des Abknickens der Federklammer erhöht.

Die hohe Haftfestigkeit des laminierten Flachleiters führt zum Ausknicken der Federklammer und verursacht einen starken Einbruch von F_k in der gemessenen Kraft-Weg-Kennlinie im Vergleich zum idealisierten analytischen Kraftverlauf. Zwar ist der Flachleiter elektrisch verbunden, jedoch führt die undefinierte Verformung der Federklammer zu einer schlechten Ausbildung des Kontaktbereichs und letztlich zu einer unzuverlässigen elektrischen Verbindung.

Die Ergebnisse der Messungen zeigen, dass hohe Haftfestigkeitswerte zwischen Isolationsmaterial und Leiter zu Kontaktierungsfehlern führen können. Vor allem

laminierter Flachleiter stellen durch den Einsatz eines Haftvermittlers im Leiterverbund einen nur schwer zu kontaktierenden Leitertyp dar. Extrudierte Flachleiter mit geringen bis mittleren Haftfestigkeitskennwerten zeigen dagegen im Versuch eine deutlich verbesserte Kontaktierungseignung.

4.3.3 Zugfestigkeit des Isolationswerkstoffs

Die Ausbildung der Isolationstasche durch das Abgleiten der Federklammer auf dem Leiter bedingt eine Dehnung des Isolationsmaterials. Abhängig von der Federklammerbreite und -dicke, wird die obere Isolationsschicht dabei unterschiedlich stark gedehnt (Abbildung 51).

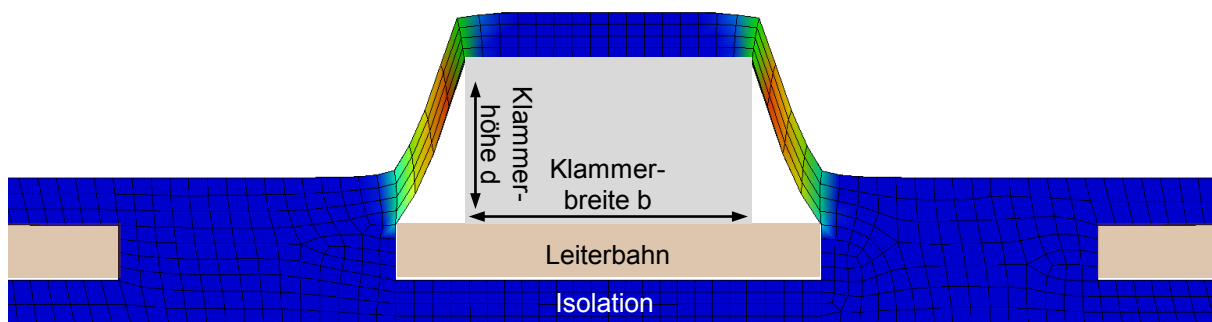


Abbildung 51: Dehnung der oberen Isolationsschicht durch die Geometrie der Feder-Klammer

Hohe Zugfestigkeiten und geringe Dehnraten des Isolationswerkstoffs verhindern den Abgleitprozess der Federklammer auf dem Flachleiter und können zum Aufreißen der Isolationsschicht längs des Flachleiters führen. Die undefinierte Materialtrennung erhöht zusätzlich das Risiko einer Ablagerung von Isolationspartikeln oder -lappen in der Kontaktzone und mindert die Dauerhaltbarkeit der elektrischen Verbindungsstelle deutlich.

Messergebnisse

Abbildung 52 a zeigt die Ergebnisse aus Zugversuchen für unterschiedliche Isolationsmaterialien nach DIN 53504¹⁶ und Auflichtmikroskopiebilder von Isolationstaschen kontaktierter Flachleiter mit verschiedenen Isolationssystemen. Isolationsmaterialien extrudierter Flachleiter weisen im Vergleich zum Werkstoff PETP der Isolationsfolie deutlich höhere Reißdehnungen auf.

Die geringe Elastizität von PETP führt im Versuch dazu, dass während der Kontaktierung die Reißdehnung des Isolationsmaterials überschritten wird und die Isolation entlang des Kontaktbereichs aufreißt (Abbildung 52 b). Kontaktierungen extrudierter Flachleiter zeigen hingegen eine ausgeprägte Isolationstasche, ohne Schädigungen längs der Leiterstruktur.

¹⁶ Prüfung von Kautschuk und Elastomeren - Bestimmung von Reißfestigkeit, Zugfestigkeit, Reißdehnung und Spannungswerten im Zugversuch.

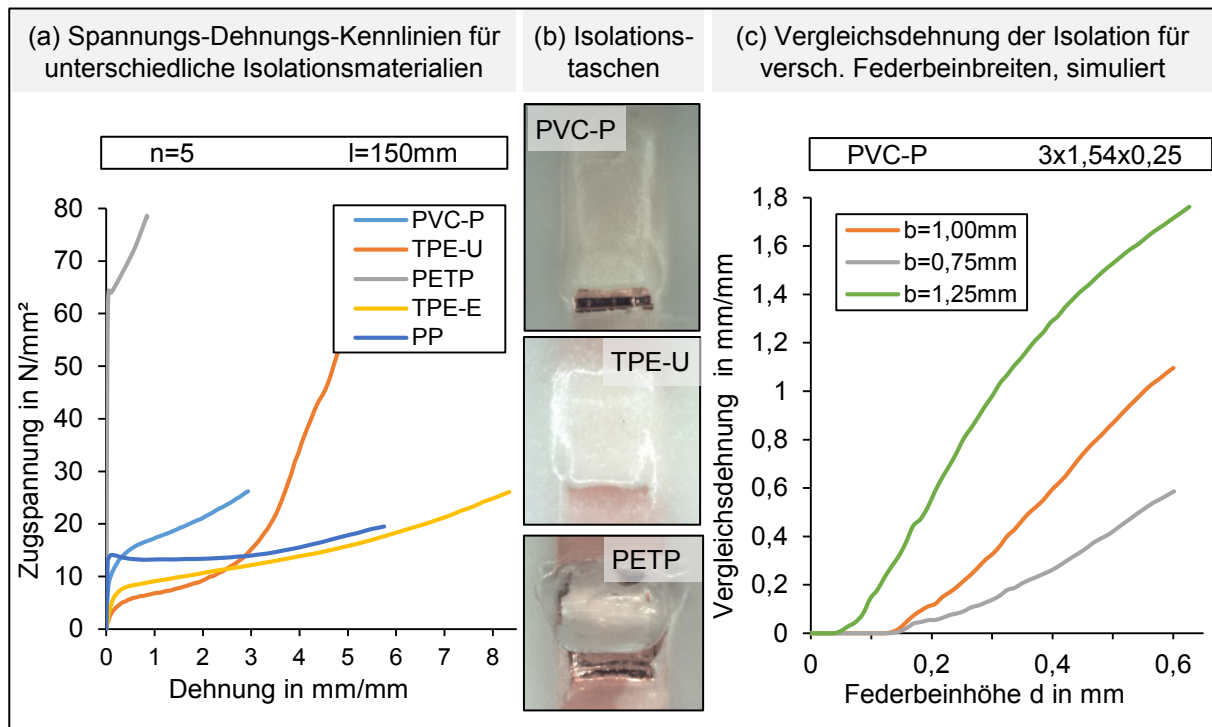


Abbildung 52: Dehnverhalten unterschiedlicher Isolationsmaterialien

Kontaktstellenausprägung

Zur Bestimmung des Einflusses der Kontaktelementabmessungen auf die maximale Dehnung der Isolation zeigt Abbildung 52 c die Ergebnisse aus parametrischen Simulationsstudien mit variabler Federklammerdicke d und Federklammerbreite b . In Abhängigkeit des gewählten Federklammerquerschnitts (b und h) treten stark unterschiedliche maximale *Mises*-Vergleichsdehnungswerte im Isolationsmaterial auf. Die Spannungskonzentration findet aufgrund des einschnürenden Effekts der hyperelastischen Isolationsmaterialien im Bereich entlang der Federklammer statt. Hohe Reißdehnungswerte, v.a. von Isolationssystemen extrudierter Flachleiter, zeigen in den Kontaktierungsversuchen ein deutlich verbessertes Kontaktierungsverhalten, wodurch es zur Ausbildung ausgeprägter Kontakttaschen kommt (Abbildung 52 b).

4.4 Einfluss des Gehäuses und des Trägersubstrats auf das Kontaktsystem

Die direkte Integration des Kontaktelements in das Kontaktierungsmodul und der einseitige Anschluss des Flachleiters führen zu völlig neuen Anforderungen eines nach dem Prinzip der FKD vernetzten Bordnetzsystems. Aufgaben, die in konventionellen Bordnetzsystemen der Stecker übernimmt, müssen zukünftig durch das Gehäuse der Elektronikkomponente und dem Trägersubstrat als Montageplattform, erfüllt werden. Durch die Teilkomponenten Gehäuse und Trägersubstrat kommt es dadurch auch zur Beeinflussung des Kontaktierungsergebnisses. Vor allem die

Geometrie des Gehäuses und die Steifigkeit des Trägersubstrats wirken sich auf die Kontaktstellenausprägung aus und werden nachfolgend diskutiert. Der Aufbau des in allen Untersuchungen eingesetzten Testgehäuses kann dabei Anhang 4.5 entnommen werden.

4.4.1 Geometrie des Gehäuses

Der kontinuierliche, einseitige Druck der Federklammer auf die Leiterbahn des Flachleiters führt zu Fließvorgängen im Isolations- und Trägermaterial. Zusätzlich rufen Spannungsrelaxationsvorgänge im Kupferwerkstoff einen Federkraftabbau des Klemmkontakts hervor. Thermische Beanspruchungen durch induzierte Belastungen im Feld beschleunigen dabei beide Effekte. Die dadurch hervorgerufene Minderung der Kontaktnormalkraft macht die Kontaktierungsstelle anfällig für die Bildung von Fremdschichten. Die Folge ist ein steigender Durchgangswiderstand und eine sinkende Zuverlässigkeit der elektrischen Verbindungsstelle.

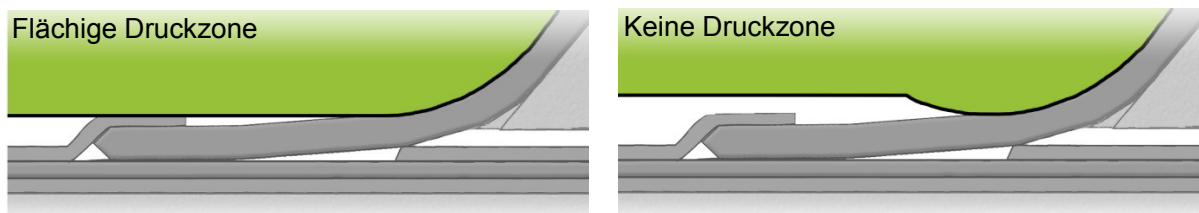


Abbildung 53: Schematische Darstellung der Druckzonenausprägung

Durch Einbringung eines Andruckelements oder einer Andruckzone in das Gehäuse kann die wirksame Kontaktnormalkraft und -fläche gesteigert werden (Abbildung 53). Diese Methode wird bereits in unterschiedlichen Ausführungen in diversen Patenten beschrieben. Vor allem bei Klemmkontakten für Leiterbahnen kommen zusätzliche Andruckzonen im Gehäuse zur Steigerung der Zuverlässigkeit der elektrischen Verbindungsstelle zum Einsatz [106]. Auch das Einbringen von zusätzlichen Federelementen in das Gehäuse ist denkbar.

Messergebnisse und Kontaktstellenausprägung

Abbildung 54 a zeigt Querschliffe von Kontaktgehäusen mit und ohne Andruckzone. Bei gleicher Kontaktelementgeometrie beider Verbindungsstellen resultiert durch den Einsatz einer Druckzone eine deutlich vergrößerte scheinbare Kontaktfläche. Nach (4.2) ist der Kontaktübergangswiderstand von der wirksamen Kontaktnormalkraft abhängig. Über die Messung des Durchgangswiderstands kann indirekt auf die Wirkung einer gesteigerten Kontaktnormalkraft durch die eingebrachte Druckzone geschlossen werden. Abbildung 54 b zeigt die Boxplots gemessener Kontaktdurchgangswiderstände für Gehäuse mit und ohne Druckzone. Dabei verdeutlichen die Messungen, dass der Einsatz einer Druckzone neben einer Verringerung des Durchgangswiderstandes ebenfalls zur Minimierung der Streuungen der Widerstandswerte führt.

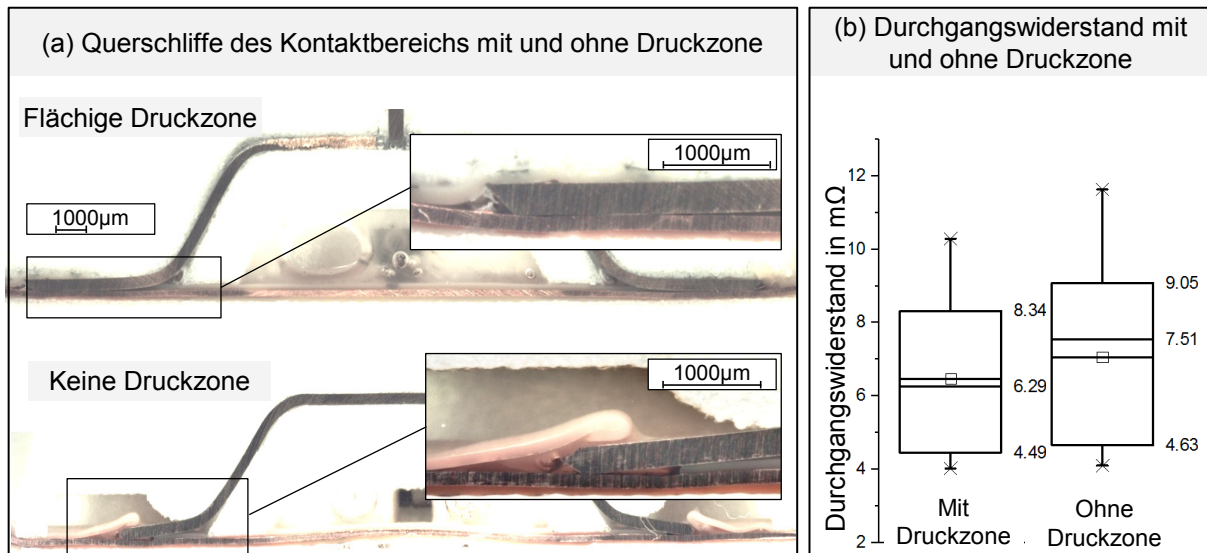


Abbildung 54: Einfluss der Druckzone auf die Ausprägung der Kontaktstelle

Beide Effekte lassen sich dabei auf die steigende Kontaktnormalkraft durch die eingebrachte Druckzone zurückführen. Umfassende Zuverlässigkeitsuntersuchungen haben ebenfalls gezeigt, dass die Verwendung von Druckzonen im Kontaktsystem der Feder-Klammer-Direktkontaktierung zu gesteigerten Lebensdauern in Langzeittests führen und sich somit positiv auf die Haltbarkeit der elektrischen Verbindungsstelle auswirken.

4.4.2 Steifigkeit des Trägersubstrates

In Abhängigkeit der Zugänglichkeit des Einbauortes innerhalb des Kfz, ist eine Abstützung durch Montagehilfen zur Vermeidung von Durchbiegungen des Trägersubstrats nicht immer gegeben. Durch die direkte Kontaktierung des Flachleiters bei der Montage des Funktionselements muss die entstehende Kontaktierungskraft deshalb durch das Trägersubstrat als Montageplattform aufgenommen werden, wodurch es in Abhängigkeit der Trägersubstratsteifigkeit und der aufgetragenen Kontaktierungskraft zu einer Durchbiegung des Trägersubstrats kommt (Abbildung 54).

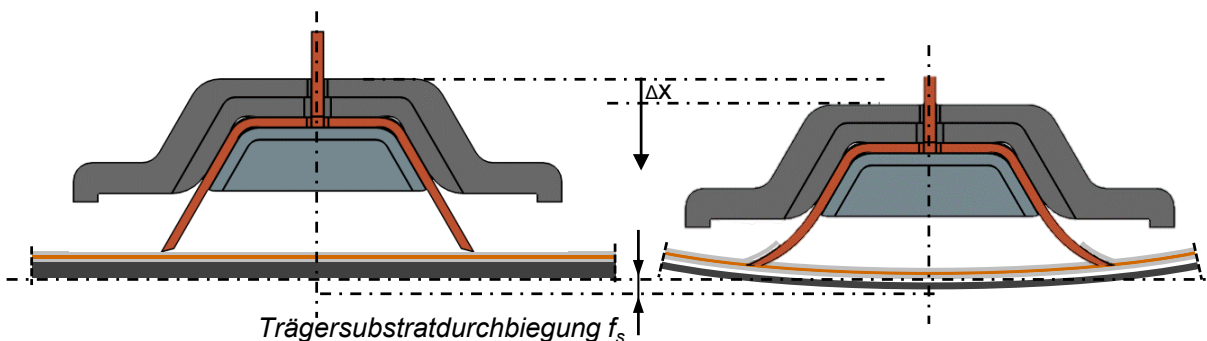


Abbildung 55: Schematische Darstellung des Effekts der Trägersubstratdurchbiegung

Abbildung 55 zeigt schematisch den Effekt der Trägersubstratdurchbiegung, der sich durch die induzierte Montagekraft einstellt. Die wirksame Kontaktierungskraft ruft dabei eine Trägersubstratdurchbiegung f hervor. Die Steifigkeit c_T des Trägersubstrats, die maximale Kontaktierungskraft F_{\max} und die Anzahl n der gleichzeitig zu verbindenden Kontakte beeinflussen dabei die Höhe von f . Neben der Durchbiegung f kommt es zu einer Krümmung der Kontaktierungsebene. Das Resultat sind sich ändernde Angriffswinkel an der Schneide der Federklammer und eine variierende Kraftkomponentenverteilung während des Kontaktierungsprozesses. Die Krümmung der Kontaktierungsebene hemmt die Federklammer dabei beim Abgleiten auf der Leiterbahn und führt zu ansteigenden Kontaktierkräften senkrecht zur Kontaktierebene. Die Folge sind eine stärkere mechanische Belastung der Leiterbahn und eine erhöhte Gefahr der Leiterschädigung. Dieser Effekt wird mit zunehmender Durchbiegung des Trägersubstrats weiter verstärkt und kann bis zur Durchtrennung des Leiters führen.

Analytische Betrachtung

Für die grundlegende Analyse des zulässigen Durchbiegungsgrenzwertes f_{zul} wird die Trägersubstratsteifigkeit variiert und der Einfluss auf die Kontaktstelle untersucht. c_T kann durch die Lage der Befestigungspunkte (Lagerung), den Einsatz von Versteifungselementen oder die Trägersubstratsteifigkeit (Geometrie) und das verwendete Material (Werkstoff) beeinflusst werden. Allgemein lässt sich die Trägerelementsteifigkeit c_T deshalb als eine Funktion der Geometrie, des Werkstoffes und der Lagerung definieren:

$$c_T = f(\text{Geometrie}, \text{Werkstoff}, \text{Lagerung}) \quad (4.42)$$

Nach Kapitel 3.1.2 können eine Vielzahl unterschiedlicher Trägerelementwerkstoffe und -stärken im Kfz Verwendung finden, deren Aufhängungs- bzw. Lagerungspunkte gleichzeitig anwendungsspezifisch definiert sind. Um eine grundlegende Beschreibung der Trägersubstratsteifigkeit zu ermöglichen, wird im Rahmen dieser Arbeit eine allgemeine Beschreibung der Steifigkeit angewandt, die geometrische, werkstofftechnische und lagerungsspezifische Randbedingungen vergleichend bewerten lässt. Als Ansatz dient die linearisierte Differentialgleichung der technischen Balkenbiegungslehre, mit der last- und lagerabhängige Biegelinien ermittelt werden können. Darin enthalten ist das Flächenträgheitsmoment I_y des Trägersubstratquerschnitts als geometrische Steifigkeitskenngröße und der Elastizitätsmodul E als Werkstoffkennwert.

$$\frac{w''(x)}{1 + w'^2(x)^{2/3}} = -\frac{M_b(x)}{EI_y(x)} \quad (4.43)$$

In Abhängigkeit der Lagerbedingungen lässt (4.43) die Ableitung spezifischer Trägersubstratsteifigkeiten c_T zu. Mithilfe der allgemeinen Federgleichung $F = c \cdot x$

und unter Annahme homogener Materialeigenschaften kann für ein beidseitig gelagertes, statisch bestimmtes Trägerelement mit dem Elastizitätsmodul E , der Länge l und der Stärke s die allgemein die Trägerelementsteifigkeit c_T beschrieben werden:

$$F = \underbrace{\frac{48 \cdot E \cdot l}{s^3}}_{c_T} \cdot f \quad (4.44)$$

Messergebnisse

Abbildung 56 zeigt die Kennlinien des Kontaktierungskraftverlaufs für unterschiedliche Trägersubstratsteifigkeiten c_T . Geringere c_T führen zu größeren Durchbiegungen und verbreitern die Kraft-Weg-Kennlinie dabei entsprechend um den Wert f . Die steigende mechanische Belastung, durch Änderungen des Kraftangriffspunkts am Schneidkeil, führt gleichzeitig zu höheren Scherbelastungen des Flachleiters durch das Schneidelement. In diesem Beispiel kommt es ab einer Durchbiegung von $f=14$ mm aufgrund des beschriebenen Effekts zu einer vollständigen Durchtrennung der Leiterbahn. Der Prüfaufbau zur Messung der der Trägersubstratdurchbiegung ist in Anhang 4.6 abgebildet.

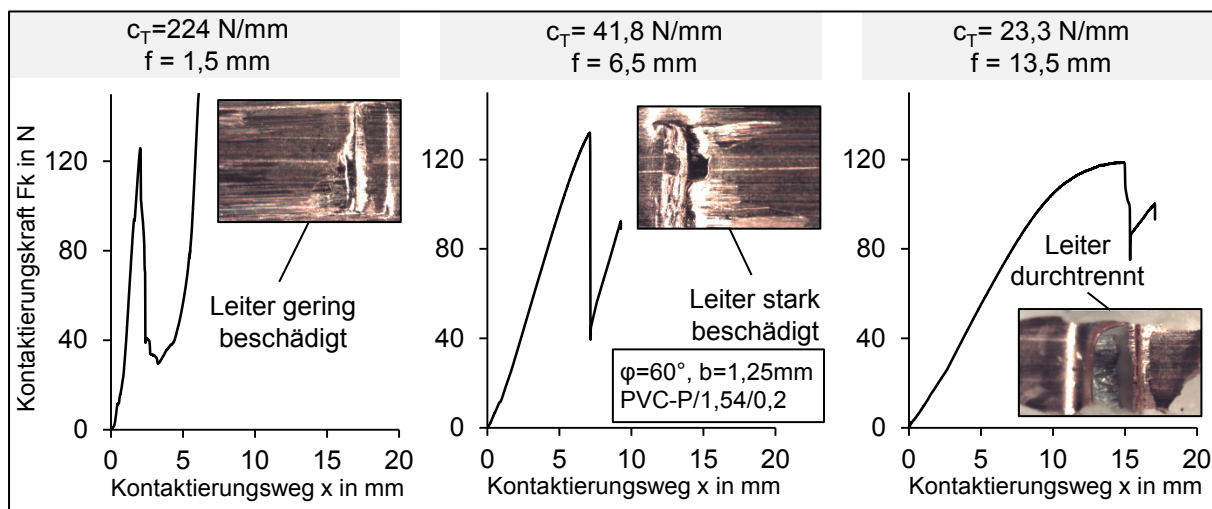


Abbildung 56: Einfluss der Trägersubstratsteifigkeit auf den Kontaktierungskraftverlauf

Kontaktstellenausprägung

Auf Basis der in Abbildung 21 (Kap. 4.2) festgelegten Trägersubstratwerkstoffe und -stärken, die typischerweise im Kfz-Bereich Verwendung finden, wurden Kontaktierungsversuche an beidseitig gelagerten Trägersubstratplatten unterschiedlicher Materialien und Trägersubstratstärken durchgeführt. Abbildung 57 zeigt die gemessene Durchbiegung verschiedener Trägersubstrate in Abhängigkeit der Trägersubstratsteifigkeit c_T und die nach (4.44) beschriebene analytische Ansatzfunktion für $f(c_T)$. Die Messungen zeigen, dass sich ab einer Durchbiegung

von $f_{zul} = 6 \text{ mm}$ massive Leiterschädigungen einstellen. Der Grenzwert kann dabei werkstoffübergreifend als Richtwert für die maximal zulässige Trägersubstratdurchbiegung angenommen werden, der nur von der Feder-Klammergeometrie abhängt.

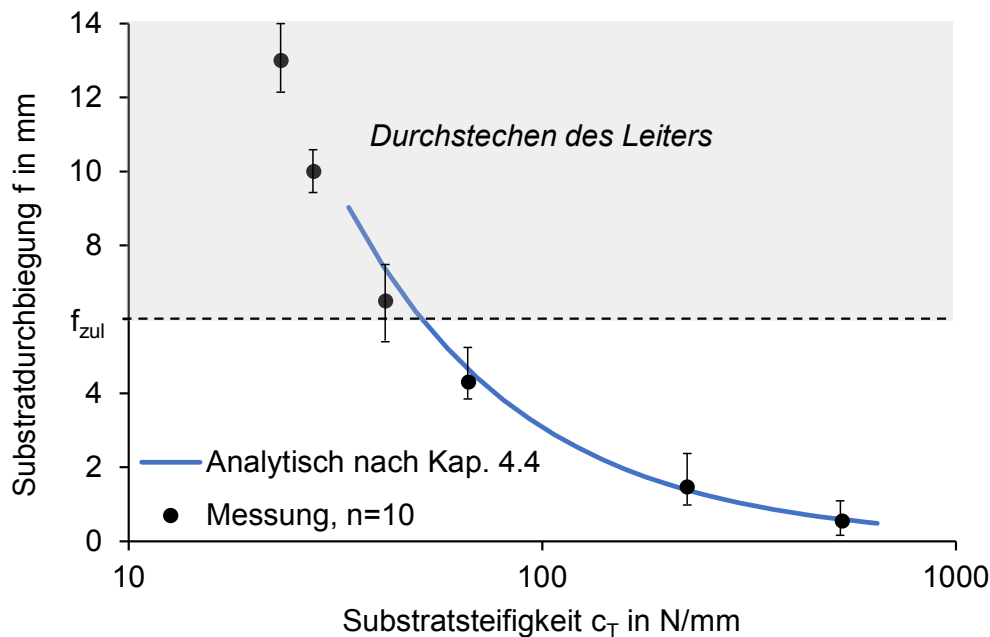


Abbildung 57: Trägersubstratdurchbiegung in Abhängigkeit der Trägersubstratsteifigkeit

In Abhängigkeit der bauraumspezifischen Lagerbedingungen und der Anzahl gleichzeitig zu kontaktierender Leiterbahnen muss die Trägersubstratsteifigkeit dahingehend angepasst werden den Grenzwert bei der Kontaktierung nicht zu überschreiten.

4.5 Verfahrensgrenzen des Kontaktierungsprozesses

Die in Kapitel 4 vorgestellten Messergebnisse haben gezeigt, dass das Kontaktierungsverfahren der FKD durch seine in Wechselwirkung stehenden Teilkomponenten aus Kontaktelement, Flachleiter und Trägersubstrat maßgeblich beeinflusst wird. Die durchgeführten Versuchsreihen zum Nachweis eines universell einsetzbaren Kontaktierungsverfahrens basieren dabei auf der einbauortübergreifenden Parametermatrix (Abbildung 21, Kap. 3.2).

Auswirkungen der Einflussparameter auf die Kontaktstellenausprägung

Wie die Untersuchungsergebnisse zeigen, ist der Kontaktierungsprozess durch eine Reihe von Einflussparametern gekennzeichnet, deren Auswirkungen auf die Kontaktstellenausprägung in Tabelle 12 zusammenfassend gegenübergestellt sind. In Abhängigkeit der gewählten Parameterkombination des Kontaktsystems können gezielt die Kontakteigenschaften der elektrischen Verbindungsstelle eingestellt werden. Gleichzeitig kann der spezifische Aufbau des Kontaktsystems aber auch zu

Kontaktierungsfehlern führen, welche die Verfahrensgrenzen der Kontaktierungstechnologie beschreiben.

					Formelzeichen	Einfluss	Einheit	Kontaktkraft	Kontaktlänge	Übergangswiderstand	Abgleiten auf Isolation	Leiterbeschädigung	Abknicken der Federklammer	Isolationsrückstände	Kontaktstellenausprägung
Kontakt-element	Anstellwinkel	φ	(steigt)	°				↑	↑	↓	↓	↑	↑	↓	+
	Schneiden-geometrie	G	A	-				↓	•	•	↑	↓	↓	↑	+
			B	-				↑	•	•	↓	↑	↑	↓	-
			C	-				•	•	•	↓	↓	↓	↓	+
	Federsteifigkeit	c_F	(steigt)	N/mm				↑	↓	↓	↓	↑	↓	↓	-
Flachleiter	Trennkraft Isolation	$F_{Trenn,i}$	(steigt)	N				↑	•	•	↑	↑	↑	•	-
	Trennkraft Leiter	$F_{Trenn,L}$	(steigt)	N				↓	•	•	•	↓	↓	•	+
	Leiterhaftsitz	L_H	(steigt)	N/mm ²				↑	↓	•	•	↑	↑	↑	-
	Reißdehnung Isolation	$\epsilon_{m,iso}$	(steigt)	N/mm ²				•	•	•	•	•	•	↓	+
Träger	Gehäuse-druckzone	D	mit ohne	- -				↑ ↓	↑ ↓	↓ ↑	• •	• •	• •	• •	+ -
	Substrat-steifigkeit	c_T	(steigt)	N/mm				↓	•	•	↑	↓	•	•	+

Tabelle 12: Tendenzielle Auswirkungen der Veränderung von Einflussparametern auf das Kontaktierungsergebnis

Die hier aufgezeigten Tendenzen sollen potenzielle Anwender bei der Auslegung eines optimalen Kontaktierungssystems unterstützen und die Zusammenhänge zwischen den Prozesseinflussgrößen und der Kontaktstellenausprägung aufzeigen.

Verfahrensgrenzen der FKD

Wesentliche Herausforderung der FKD ist durch die Wahl der Federklammergeometrie und des zu verbindenden Kontaktsystems eine Kontaktierungskraft zu erzeugen, mit der die obere Isolationsschicht durchtrennt wird, ohne dabei den darunter befindlichen Kupferleiter zu beschädigen. Im Wesentlichen kann die Breite dieses Kraftfensters durch das gewählte Flachleitersystem und die Schneidengeometrie eingestellt werden. Eine Anpassung der Hauptabmessungen der Federklammer ermöglicht es schließlich innerhalb dieser Kraftgrenzen einen zuverlässigen Kontakt herzustellen. Das Kontaktelementgehäuse und das Trägersubstrat beeinflussen den eigentlichen Kontaktierungsprozess dabei nur indirekt. Abbildung 58 zeigt die Ergebnisse aus den Versuchsreihen eines Flachleiters mit geringem Leiterhaftsitz

und einer hohen Reißdehnung des Isolationsmaterials, welcher dadurch eine gute Kontaktierbarkeit aufweist.

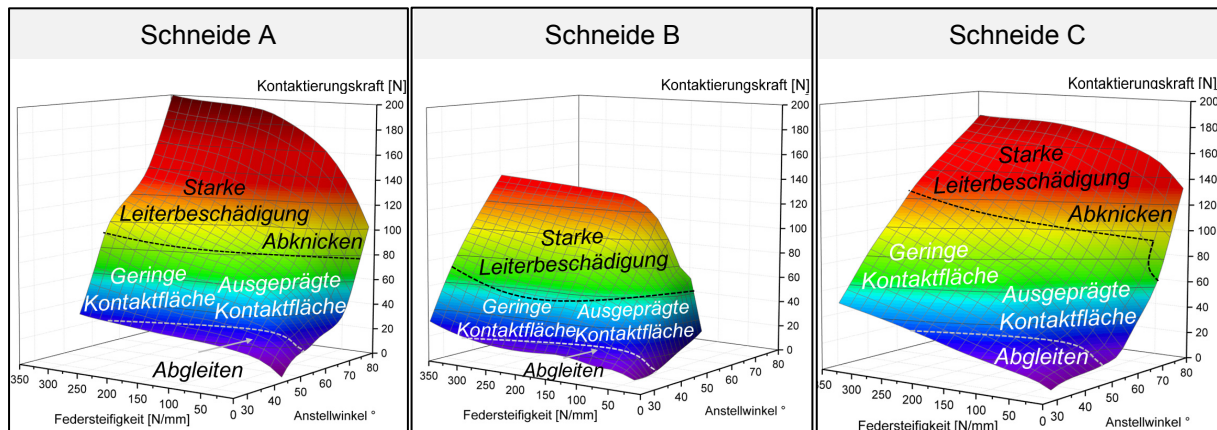


Abbildung 58: Prozessfenster in Abhängigkeit der Schneidengeometrie am Beispiel eines gut kontaktierbaren Flachleitertyps

Aufgrund der diskutierten Winkelzusammenhänge ermöglicht der Einsatz der Schneidengeometrie C eine zuverlässige Kontaktierung im größten Prozessbereich. Durch Variation der Federsteifigkeit c und des wirksamen Anstellwinkes φ_e des Kontaktelements kann innerhalb des Prozessbereichs die Kontaktstellenausprägung und dadurch die Leistungsfähigkeit bzw. deren Zuverlässigkeit beeinflusst werden. Vor allem die Federsteifigkeit c des Kontaktelements, der Anstellwinkel φ_e und die Schneidengeometrie stellen bei der Feder-Klammer-Direktkontaktierung die Haupteinflussfaktoren des Prozesses dar.

5 Langzeitzuverlässigkeit der Feder-Klammer-Direktkontaktierung

Gerade lösbare Kontaktierungen werden hinsichtlich ihrer Langzeitzuverlässigkeit als kritisch eingestuft. Es ist demzufolge essenziell, das Kontaktierungsverfahren der Feder-Klammer-Direktkontaktierung grundlegend bezüglich der Auswirkungen von mechanischen und thermischen Belastungszuständen zu charakterisieren [107; 108]. Dieses Kapitel soll deshalb die Einflüsse unterschiedlicher physikalischer Belastungszustände auf die Lebensdauer der elektrischen Verbindungsstelle diskutieren (Abbildung 59). Grundlage der Zuverlässigkeitsuntersuchungen sind die in Tabelle 5 (Kap. 3) festgelegten einbauortübergreifenden Anforderungsprofile.

Kapitel 5.1 leitet mit der Vorstellung relevanter Schädigungsmechanismen von Klemmkontakten im Kfz ein, bevor die Ergebnisse der Zuverlässigkeitsuntersuchungen diskutiert werden. Der Nachweis einer universell einsetzbaren Kontaktierungstechnologie erfordert die Betrachtung des Einflusses verschiedener Schärfegrade der jeweiligen Lebensdauertests auf die Zuverlässigkeit der elektrischen Verbindungsstelle. Die untersuchten Schärfegrade beschreiben dabei die einbauortabhängigen Prüfanforderungen und lassen die Eignungsanalyse der neuartigen Kontaktierungsmethode für unterschiedliche Bauräume im Kfz zu.

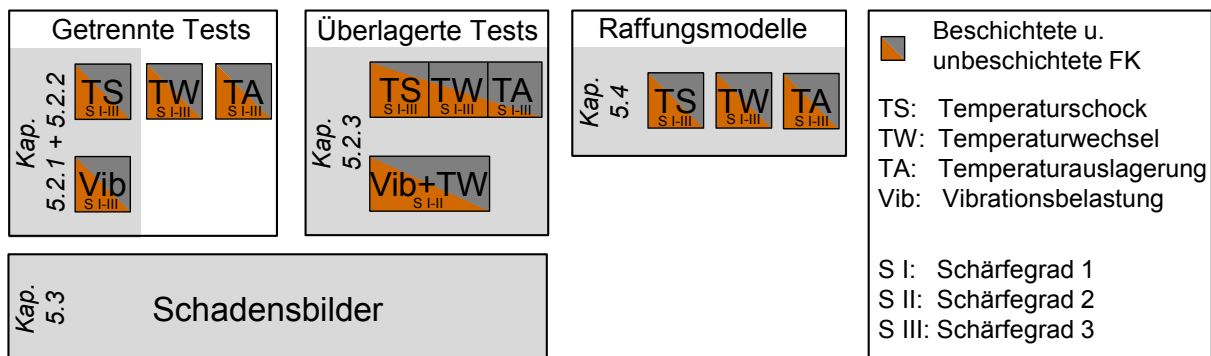


Abbildung 59: Übersicht der durchgeführten Zuverlässigkeitsuntersuchungen

Kapitel 5.2 beschreibt die Versuchsergebnisse der Grundbelastungsarten (Temperaturschock, -wechsel und -auslagerung bzw. Vibration) und die Auswirkungen bei einer Überlagerung der jeweiligen Einzeltests auf das Kontaktsystem der FKD. Kapitel 5.3 zeigt die im Rahmen dieser Arbeit nachgewiesenen Schadensbilder in Folge der durchgeführten Lebensdauertests. Die dabei simulierten Degradationsmechanismen sind lastartspezifisch und abhängig vom Aufbau des Kontaktsystems. Basierend auf den Ergebnissen der Lebensdauertests stellt Kapitel 5.4 die Anwendung verschiedenartiger analytischer Raffungsmodelle zur Vorhersage der lastabhängigen Ausfallwahrscheinlichkeit dar und vergleicht diese mit empirisch gemessenen Ausfallzeiten, um deren Eignung für die neuartige Verbindungstechnologie zu diskutieren.

5.1 Schädigungsmechanismen elektrischer Klemmkontakte

Thermische, mechanische und mediale Beanspruchungen im Kfz aktivieren Schädigungsmechanismen in der Kontaktfläche, die auf unterschiedliche physikalische Prozesse zurückzuführen sind. Die hervorgerufenen Mechanismen können so vielfältig sein, wie die Belastungsarten, welche in den geltenden Prüfnormen für E/E-Komponenten zugrunde gelegt sind. In der Literatur sind dabei eine Vielzahl unterschiedlicher Schadensarten beschrieben, die ein komplexes Feld der Schadensanalyse elektrischer Kontakte beschreiben [31; 84; 100; 101]. Abbildung 60 bietet eine Übersicht unterschiedlicher Schadensarten, die im Rahmen dieser Arbeit als relevant für die FKD anzusehen sind, und gliedert sie nach ihrem physikalischen Wirkprinzip in mechanisch, chemisch und elektrisch aktivierte Schadensbilder.

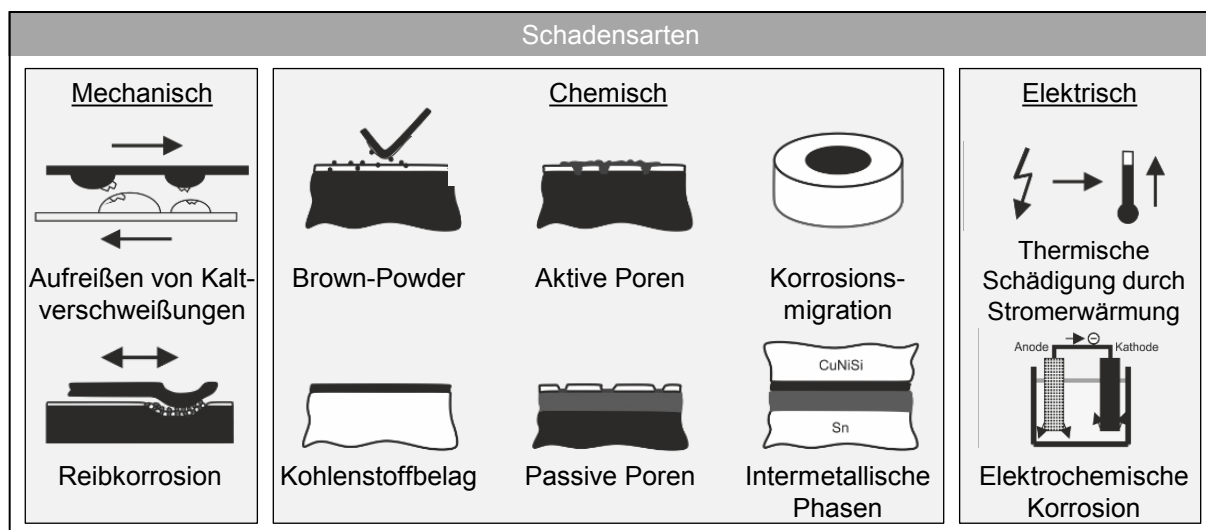


Abbildung 60: Schadensarten der FKD, eingeteilt in deren Wirkprinzipien

Die belastungsartspezifischen Degradationsmechanismen in der Kontaktzone führen zur Ausbildung von Fremdschichten und zu einer Erhöhung des Fremdschichtwiderstandes R_f . Die Ausbildung der Fremdschichten ist neben den Umgebungsbedingungen vom Kontaktsystem selbst abhängig und kann durch die Werkstoffwahl, vor allem aber auch durch die Beschichtungsstrategie der Klemmflächen beeinflusst werden.

Da bei Klemmkontakten generell eine geringe Kontaktnormalkraft F_k angestrebt wird, der Fremdschichtwiderstand R_f jedoch mit sinkendem F_k zum maßgeblich bestimmenden Faktor des Kontaktdurchgangswiderstandes R_d wird, sind Beschichtungen elektrischer Kontakte bei ausgeprägten Fremdschichten dringend erforderlich. Für Beschichtungssysteme kommen Werkstoffe zum Einsatz, die eine hohe Beständigkeit gegenüber Korrosion und Verschleiß aufweisen und gleichzeitig Fremdschichten ausbilden, die sich während des Steckvorgangs leicht entfernen lassen. [109]

Typische Beschichtungen von Kfz-Steckverbinder sind unternickelte Zinnbeschichtungssysteme. Die Nickelschicht des zweilagigen Aufbaus dient als Diffusionssperre zwischen der Zinnfunktionsfläche und dem Kupferbasismaterial des Klemmkontaktlements. Zinn bildet dünne Fremdschichten aus, die bereits durch einen geringen Kontaktdruck durchdrungen werden können. Das weiche Zinn wird hierbei plastisch verformt und bildet eine geschlossene Verbindung mit dem Kontaktpartner unter dem Ausschluss von Sauerstoff aus. Ferner ist sowohl die hohe Duktilität, als auch die sehr gute chemische Beständigkeit von Zinn von großem Nutzen. [110]

Typischerweise fungieren Male-Female Kontakte als elektrische Steckverbindungen im Kfz. Die elektrische Verbindung wird hierbei über zwei beschichtete Kontaktelemente (i.d.R. Zinn) geschlossen. Es resultiert eine Zinn/Zinn-Kontaktpaarung. Die FKD basiert auf der Methode, Flachleiterstrukturen ohne einen vorhergehenden Prozessschritt kontaktieren zu können. Durch die direkte Verbindung des blanken Kupferleiters kommt es jedoch zu einer Kupfer/Zinn-, oder Kupfer/Kupfer-Paarung, je nachdem welche Beschichtungsstrategie für das Klemmelement gewählt wird. Zwar gibt es Technologien, bei denen analog zur FKD eine lösbare Klemmverbindung direkt über einen blanken Kupferleiter hergestellt wird. Basierend auf den geltenden Prüfnormen existiert nach heutigem Stand der Technik jedoch keine wissenschaftliche Grundlage für die Zuverlässigkeit von Kupfer/Zinn-Kontakten in Kfz-Anwendungen. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Zuverlässigkeitsuntersuchungen sind deshalb die Ergebnisse verzinnter und blanker Kupferklemmkontakte an Kupfer-Flachbandleitungen.

Die Vielzahl an heutzutage verfügbaren Dichtsystemen für Kfz-Steckverbindingssystemen ermöglicht es, medialen Einflüssen der elektrischen Verbindungsstelle konstruktiv zu begegnen. Auch die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Forschungsarbeiten konnten durch den Einsatz klassischer Dichtelemente einen effektiven Schutz gegen Medieneinflüsse (Betauung, feuchte Wärme) nachweisen. Zwar führen die medienbedingten Einflüsse zu einer Erhöhung des Übergangswiderstands. Jedoch ist der Grad der Widerstandserhöhung verglichen mit thermisch oder mechanisch induzierten Schädigungen nur gering ausgeprägt. Die Diskussion der Zuverlässigkeit der FKD fokussiert deshalb auf die Entstehung von Schädigungen, welche durch thermische und mechanische Effekte induziert werden und nicht direkt durch konstruktive Maßnahmen abschirmbar sind. Ergebnisse aus Betauungstests oder Feuchte-Wärme-Untersuchungen sind daher nicht Teil der folgenden Ausführungen.

Die nachfolgend vorgestellten Schädigungsmechanismen sollen für das spezifische Kontaktsystem der FKD (beschichtet und unbeschichtet) ein grundlegendes Verständnis der sich einstellenden Schadensbilder geben und dabei auf mechanisch und thermisch induzierte Schädigungsmechanismen fokussieren.

5.1.1 Mechanische Schadensarten

In der Praxis kommen keine rein statischen Kontakte vor. Unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten der Materialien des Kontaktsystems rufen thermomechanische Effekte und Relativbewegungen bei Temperaturänderungen hervor. Auch äußere Einflüsse wie mechanisch induzierte Schwingungen führen zu Gleitbewegungen im Klemmkontakt. Die Reibwege variieren dabei zwischen wenigen μm bis hin zu mehreren 100 μm . [31]

Kaltverschweißung

Ist der Kontakt geschlossen, kann es zu Mikrokaltverschweißungen der A-Spots kommen [101]. Durch die starke Annäherung der Kontaktoberflächen gehen die Oberflächenatome beider Kontaktpartner eine atomare Bindung ein. Mechanisch oder thermisch induzierte Reibrelativbewegungen können die atomaren Bindungen wieder aufreißen und führen mit steigender Zyklenzahl zur Oberflächenzerrüttung des Kontakts. Der Mechanismus kann die Klemmstelle dabei vollständig zerstören. Vor allem weiche Materialien wie Zinn neigen dabei zur Kaltverschweißung.

Reibkorrosion

Atmosphärische Bedingungen führen dazu, dass der Effekt der Kaltverschweißung mit oxidativen Prozessen überlagert wird und die Schadensart der Reibkorrosion hervorgerufen werden kann [97]. Metalloberflächen neigen beim Kontakt mit Luft zur Bildung von Korrosionsschichten aus Oxiden, Sulfiden und anderen Verbindungen. Durch den Mechanismus der Mikrokaltverschweißung können Partikel aus der Kontaktfläche gerissen werden, die beim Kontakt mit Luft oxidieren. Überlagert sich dieser Prozess durch oszillierende Bewegungen der Kontaktpartner, bildet sich eine isolierende Fremdschicht aus. Für unedle Oberflächen, wie beispielsweise verzinnnte Kontakte, stellt die Reibkorrosion in der Anwendung den häufigsten Schädigungstyp dar [31].

5.1.2 Elektrische Schadensarten

Fließt bei angelegter Spannung über die Kontaktstelle mit dem Durchgangswiderstand R_d elektrischer Strom, kommt es nach dem ersten *Jouleschen* Gesetz zur Umwandlung von elektrischer Energie in Wärmeenergie. Die angeregte Temperaturerhöhung durch Stromfluss kann zur Schädigung der Kontaktstelle führen. Vor allem im Kontaktbereich des Klemmkontakts führen die mikroskopischen Kontaktflächen (A-Spots) zu eingeeengten Strompfaden und lokalen Temperaturerhöhungen. Die dadurch hervorgerufene Erweichung der Mikrospitzen im Kontaktinterface vergrößert dabei die wirksame Kontaktfläche A_w und verringert gleichzeitig den Kontaktflächenwiderstand F_k . Fremdschichten an den Kontaktpunkten werden verdrängt. Der Prozess der Widerstandseniedrigung während des Einsatzes wird als Fritten bezeichnet [31]. Zwar kann der Mechanismus bei einem ausgefallenen

Kontakt wieder zum Stromfluss führen, die einhergehende lokale und thermisch stark ausgeprägte Belastung der Kontaktstelle ruft jedoch andere, sich überlagernde Schädigungseffekte hervor. Lokale Aufschmelzungen, Diffusionsvorgänge, die Bildung von Mischzonen oder korrosive Effekte destabilisieren die Verbindungsstelle und beschleunigen gleichzeitig die Alterung des Kontakts deutlich [111]. Die Definition von zulässigen Stromstärken und Maximaltemperaturen soll in der Praxis Fritting vermeiden.

5.1.3 Chemische Schadensarten

Eine Oberflächenbeschichtung des Kontaktelements kann die negativen Auswirkungen der Ausbildung von Fremdschichten reduzieren und damit die Langzeitzuverlässigkeit des Kontaktsystems erhöhen. Durch den Metallverbund unterschiedlicher Werkstoffe, kann es jedoch zur Ausbildung schädigender intermetallischer Phasen kommen.

Intermetallische Phasen

Eine intermetallische Phase beschreibt eine homogene chemische Verbindung aus zwei Metallen. Sie zeigt im Vergleich zu Legierungen Gitterstrukturen, die sich von konstituierenden Metallen unterscheidet und kann dadurch andere physikalische Eigenschaften aufweisen. Intermetallische Phasen entstehen durch Diffusionsvorgänge von Metallatomen [111]. Der natürlich ablaufende physikalische Prozess gleicht dabei Konzentrationsunterschiede der reinen Ausgangsmetalle durch Wanderung der Atome in das Metallgitter unter dem Eingehen einer chemischen Verbindung mit dem zweiten Metall aus. Die Diffusion verläuft in der Regel einseitig ab. Das Wachstum der intermetallischen Phase ist eine Funktion der Zeit, des Drucks und der Temperatur, wobei die Temperatur die Wachstumsgeschwindigkeit exponentiell beschleunigt. In Experimenten an dünnen Bi-Metall-Schichten zwischen Kupfer und Zinn beschreibt Tu in [112] die Entstehung intermetallischer Verbindungen. Dabei entsteht in einem Temperaturbereich von -2 °C - 60 °C die intermetallische η' -Phase (Cu_6Sn_5) und oberhalb von 60 °C die ε -Phase (Cu_3Sn). Die metallischen Phasen weisen eine ähnliche spezifische elektrische Leitfähigkeit wie reines Zinn auf, sind jedoch deutlich härter [113]. Kritische Schichtdicken sind ab $2\text{ }\mu\text{m}$ erreicht und führen durch die hohe Sprödigkeit zu einer geringen mechanischen und elektrischen Belastbarkeit der elektrischen Funktionsfläche. Relativbewegungen der Kontaktflächen führen durch die harten Phasen zudem zu deutlich beschleunigten abrasiven Vorgängen im Kontakt [114].

Brown Powder und Kohlenstoffbelag

Neben Schädigungen durch das Kontaktelement selbst kann es auch zu Alterungsprozessen kommen, die durch umgebende Kunststoffbauteile hervorgerufen werden. Erhöhte Umgebungstemperaturen können bei Komponenten wie Gehäusen, Trägersubstraten oder Isolationsmaterialien das Entweichen von

organischen Dämpfen hervorrufen. Weichmacher oder andere Füllstoffe technischer Kunststoffe, schlagen sich dabei auf der Kontaktoberfläche als Fremdschicht nieder. Relativbewegungen im Kontakt führen unter der katalytischen Wirkung des Kontaktwerkstoffes dabei zur Bildung eines Polymerisationsproduktes. Der braune Niederschlag wird als Brown Powder bezeichnet und wirkt als nicht- oder halbleitende Fremdschicht.

Ähnlich wie Kohlenstoffbeläge, die vorwiegend bei schaltenden Kontakten und ebenfalls durch die Ablagerung organischer Ausdampfungen auf der Kontaktfläche entstehen, führen sowohl intermetallische Phasen, als auch Brown-Powder-Niederschläge zu einer Erhöhung des Fremdschichtwiderstandes. [115]

5.2 Belastungsartabhängige Widerstandserhöhung

In Abhängigkeit der Belastungsart in Form von Temperaturschock- und -wechseltests, oder Vibrationsbelastungen bzw. der Überlagerung der beschriebenen Lastzustände, stellen sich schädigungsspezifische Änderungen des Durchgangswiderstandes ein, deren Ursprung und Auswirkung auf die FKD nahfolgend diskutiert werden.

5.2.1 Temperaturschock

Die vorgestellten Prüfergebnisse basieren auf den vorgeschriebenen Prüf- und Messbedingungen nach [89] zur Qualifizierung von Kfz-Steckverbindern. Der Aufbau und die Funktionsweise des im Rahmen dieser Arbeit aufgebauten Messsystems kann Anhang 5.2 entnommen werden.

Messbedingungen

Abbildung 61 a stellt die schematischen Temperaturschockprofile in Abhängigkeit der Schärfegrade 1-3 dar.

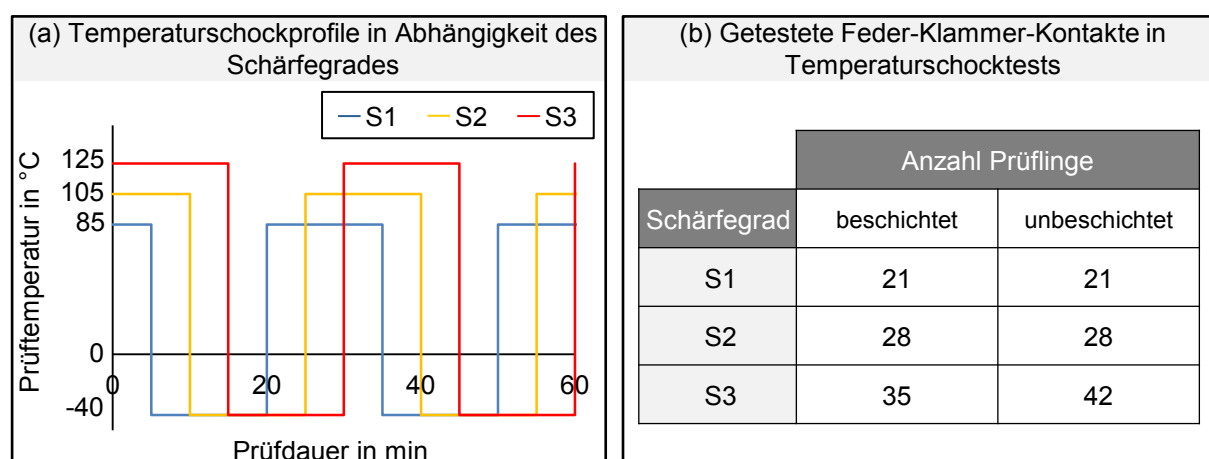


Abbildung 61: Prüfprofile und Probenanzahl der Temperaturschocktests

Gleichzeitig abgebildet ist die Anzahl der getesteten Prüflinge für beschichtete und unbeschichtete FKD-Kontaktsysteme (Abbildung 61 b), welche die Grundlage der

nachfolgenden Diskussion bezüglich dem Alterungsverhalten der FKD sind. Die Prüfdauern der Testreihen wurden an den online gemessenen Durchgangswiderstand R_d angepasst.

Messergebnisse

Der Durchgangswiderstand R_d setzt sich in den Messreihen aus zwei Teilverläufen zusammen: Einen zeitlich langanhaltenden Trendverlauf, der durch kurze periodische Widerstandsänderungen überlagert wird. Da R_d temperaturabhängig ist, resultiert aus der zyklischen Änderung der Warm-Kalt-Phasen eine periodische Widerstandsänderung, die dem zeitlichen Verlauf der Temperatur folgt. Der induzierte thermische Stress führt zu Alterungseffekten in den elektrischen Funktionsflächen und ruft eine langanhaltende Änderung des gemessenen Durchgangswiderstands hervor. Diesem Verhalten liegen verschiedenartige Schädigungsmechanismen zugrunde, welche sich in Abhängigkeit der thermischen Randbedingungen überlagern können. Die Untersuchungen zeigen für die betrachteten Temperaturschocktests insgesamt vier unterschiedliche Trendverläufe für R_d :

- **Kategorie 0:** Kein oder geringer Anstieg des Widerstands über die Prüfdauer
- **Kategorie 1:** Stetiger Widerstandsanstieg der Kalt- und Warmphase
- **Kategorie 2:** Anstieg des Widerstandes mit anschließendem Wiederabsinken
- **Kategorie 3:** Proportional stärkerer Anstieg des Kaltwiderstandes mit „Überholen“ des Warmwiderstandes

Die Kategorisierung der Verläufe von 0 - 3 soll in der Diskussion eine Unterscheidung zwischen dem Einfluss des Schärfegrades und der Beschichtungsstrategie auf die Schadensausbildung in der Kontaktfläche ermöglichen.

Kategorie 0: Durchgangswiderstände, die sich über die gesamte Versuchsdauer hinweg nicht oder nur geringfügig erhöhen, stellen den Idealfall bezüglich der Zuverlässigkeit der elektrischen Verbindungsstelle dar. Eine exemplarische Messkurve für R_d bildet Abbildung 62 a ab. Warm- und Kaltwiderstände verlaufen während der gesamten Prüfdauer auf einem konstanten Niveau. Kontaktsysteme, deren Widerstandsverläufe im Temperaturschock der Kategorie 0 zugeordnet werden können, zeigen im Versuch keine oder nur geringe Alterungseffekte in der Kontaktstelle.

Kategorie 1: Die zugrundeliegenden Schädigungsmechanismen, die einen steten Anstieg des Warm- und Kaltwiderstandes hervorrufen (Abbildung 62 b), lassen sich durch die Vorgänge der Reibkorrosion erklären. Dabei bilden sich Fremdschichten aus, die durch Relativbewegungen zwischen den Kontaktflächen abgerieben werden und sich kontinuierlich in der elektrischen Funktionsfläche ansammeln. Durch die Fremdschichtausbildung kommt es zum allmählichen Anstieg von R_d . Widerstands-

verläufe der Kategorie 1 sind typisch für bereits bekannte und eingehend untersuchte Kontaktierungstechnologien. Die Effekte konnten bei Klemm- oder Pressfitverbindungen unter zyklischer thermischer Last bei niedrigen bis mittlerer Schärfegraden nachgewiesen werden [111; 116].

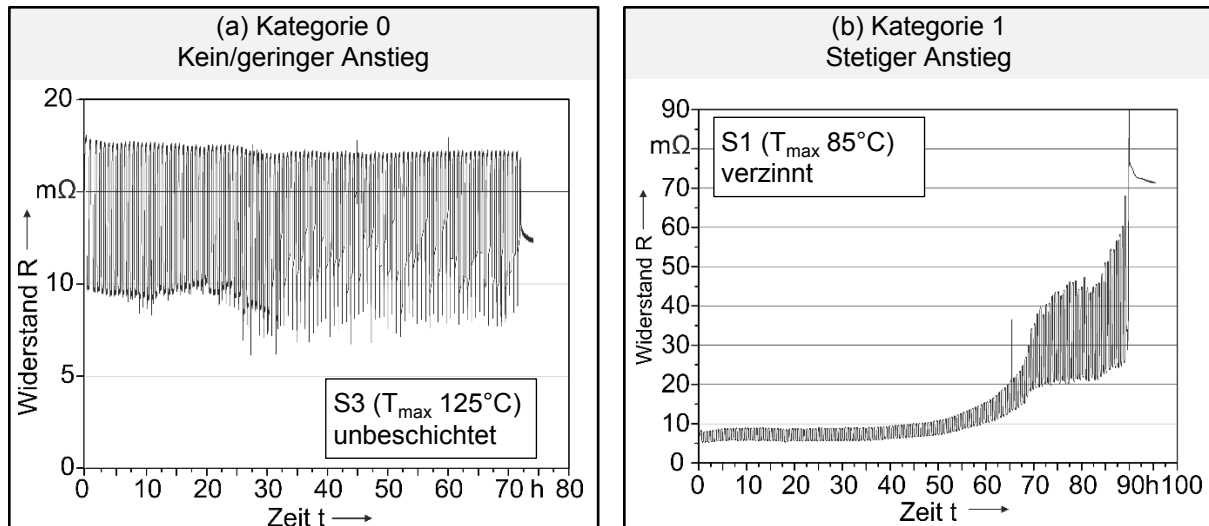


Abbildung 62: Durchgangswiderstandsprofil der Kategorie 0 und 1

Kategorie 2: Das Schadensbild in Abbildung 63 a wird durch eine Erhöhung und das Wiederabsinken des Kontaktwiderstands beschrieben. Gagnon et al. erläutern den Effekt in [117] anhand der Modellvorstellung für thermisch wechselnd beanspruchte Klemmkontakte. Die kontinuierliche Erhöhung des Kontaktwiderstands resultiert aus der Fremdschichtbildung durch oxidative oder sulfidische Reaktionen mit der Atmosphäre. Das vorhandene Spannungspotential zwischen den Kontaktpartnern kann dabei die isolierende Schicht lokal durchbrechen und wird als A-Fritting bezeichnet.

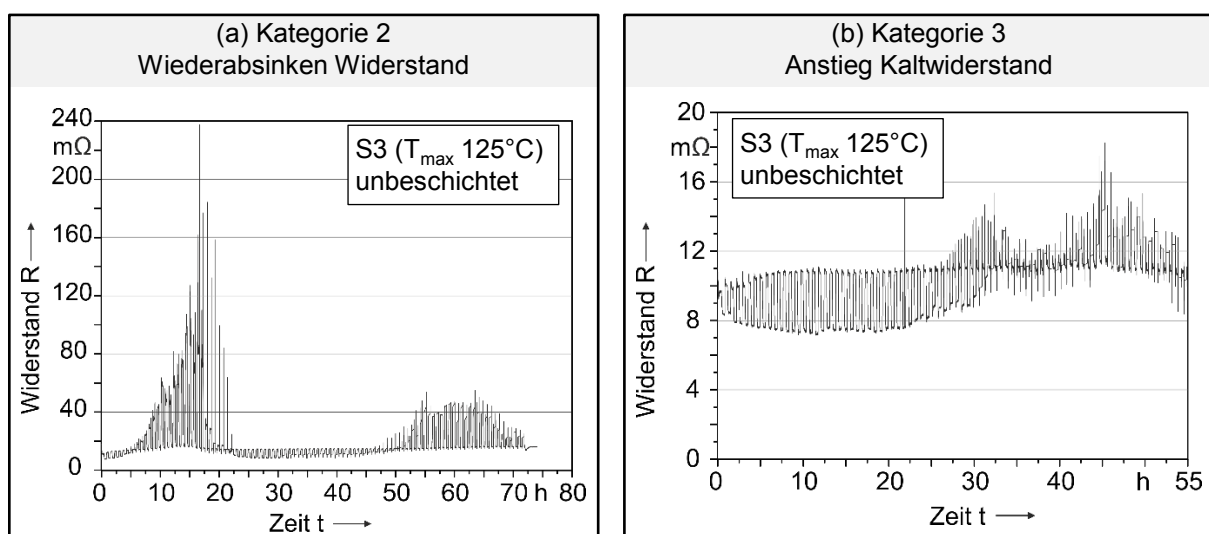


Abbildung 63: Durchgangswiderstandsprofil der Kategorie 2 und 3

Dabei fällt R_d wieder ab. Dennoch kommt es an den lokal zerstörten Bereichen der Fremdschicht zu Schädigungen, da hohe Stromdichten des lokalen Phänomens Metallbrücken zwischen den Kontaktpartnern ausbildet (B-Fritting) und durch die zyklische thermische Last wieder aufgerissen werden [118].

Kategorie 3: Abbildung 63 b zeigt eine allmähliche Erhöhung des Kaltwiderstands, bei konstantem Warmwiderstand. Im Testverlauf kommt es dadurch zum „Überholen“ des Kaltwiderstands. Eine Begründung für den zeitlichen Widerstandsverlauf lässt sich anhand der in Abbildung 64 a dargestellt Modellvorstellung für einen FKD-Klemmkontakt ableiten. Die Modellvorstellung beruht auf den Ergebnissen von FE-Simulationen, durchgeführt in ANSYS-Workbench. Die Randbedingungen der Simulationsstudien erläutert Anhang 5.3.

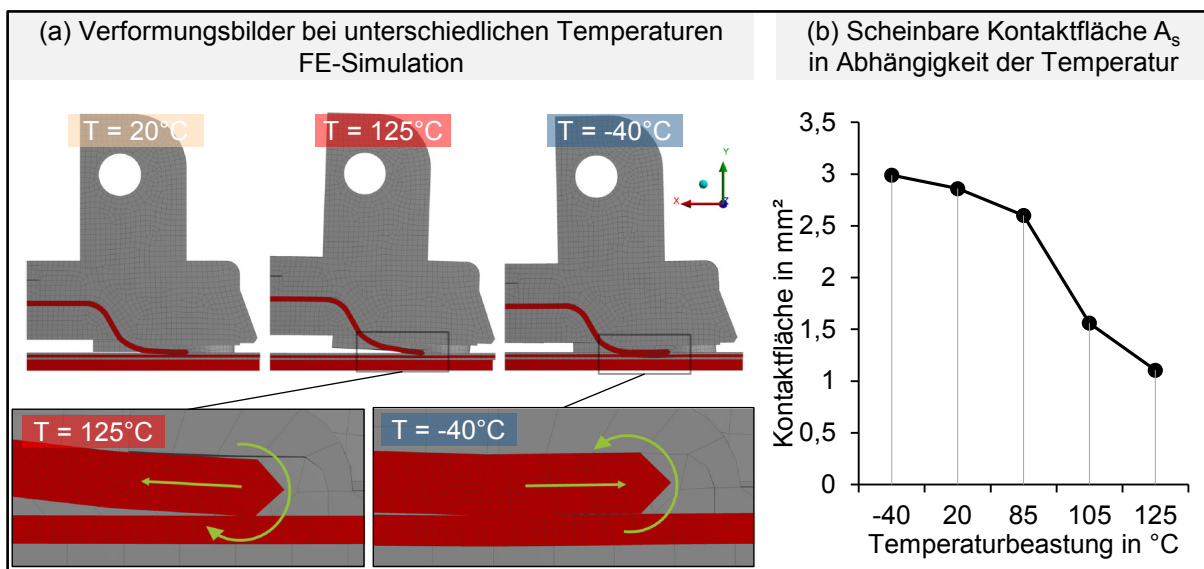


Abbildung 64: Thermische Ausdehnungseffekte durch Temperaturschock, ermittelt aus FE-Simulationen

Die stark unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten zwischen dem Federklammergehäuse (PA12) und dem Kupferleiter (CuNiSi) führen in der Warmphase des Schocktests dazu, dass die Federklammer vom Kupferleiter abhebt und sich gleichzeitig entlang der Leiterbahn verschiebt. Bereiche des nun teilweise geöffneten Kontakts können temperaturbeschleunigt Oxidschichten ausbilden. Beim Übergang in die Kaltphase legt sich die Federklammer wieder an den oxidierten Bereich des Kupferleiters an. Die ausgebildete Fremdschicht führt letztlich zu einem ansteigenden R_d -Wert in der Kaltphase.

Die Wirkung wird mit zunehmender Maximaltemperatur bei höheren Schärfegraden durch zwei Effekte verstärkt. Einerseits steigt die Reaktionsgeschwindigkeit von Oxidationsprozessen mit zunehmender Umgebungstemperatur. Gleichzeitig erhöht sich die Relativbewegung im Kontaktsystem mit steigender Maximaltemperatur,

wodurch die gasdichte Kontaktfläche im Warmbereich sinkt und die oxidierte Fläche immer weiter zunimmt (Abbildung 64 b).

Obwohl Oxidschichten sehr leicht abgerieben werden können, wie in [119] an korrodierten Kupferkontakten untersucht, können auch Abriebprodukte von Oxidschichten, die in die Kontaktzone gelangen, zu einer Widerstandserhöhung führen. Zusätzlich wird nicht die gesamte Oxidschicht durch eine Relativbewegung entfernt, sondern nur Teile von ihr [120]. Wie Abbott zusätzlich feststellt, können Abriebprodukte in die Kontaktzone eingearbeitet werden. Vor allem bei rückwärts gerichteten Wischbewegungen wurde eine Verschlechterung des Kontaktwiderstands ermittelt [120].

Die simulativen Untersuchungen des Kontaktsystems (Abbildung 64) haben gezeigt, dass ein Zusammenziehen durch das starke Abkühlen der Materialien in der Kältekammer dieser Wischbewegung entspricht und dieselben Effekte hervorrufen kann, wie sie Abbott beschreibt.

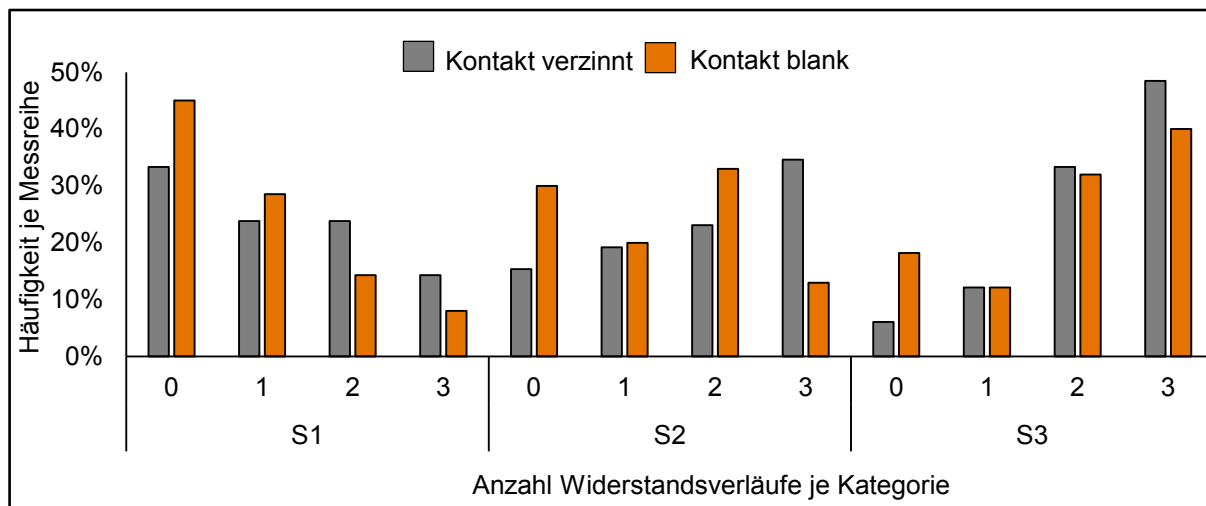


Abbildung 65: Widerstandshäufungen der Kategorien 0-3 in Abhängigkeit des Schärfegrads des Schocktests

Die durchgeführten Messreihen haben gezeigt, dass die vorgestellten Kategorien der Durchgangswiderstandsverläufe den Prüflingen nicht immer eindeutig zuzuordnen sind. Letztlich führen die thermisch induzierten Relativbewegungen zu mehreren sich überlagernden Schadensfällen. Dennoch zeigt die Auswertung der Testergebnisse einen deutlichen Trend bei der Verteilung der jeweiligen Kategorien in Abhängigkeit des getesteten Schärfegrads und der Beschichtungsstrategie.

Abbildung 65 gliedert die Ergebnisse der durchgeführten Temperaturschocktests in die vorgestellten Kategorien der Durchgangswiderstandsverläufe (0 - 3) für die Schärfegrade S1 - S3. Gleichzeitig werden die Resultate beschichteter und unbeschichteter Kontaktsysteme getrennt betrachtet.

Schädigungsmechanismen

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass sich mit zunehmendem Schärfegrad die Widerstandsverläufe von K0 und K1 hin zu K2 und K3 verschieben. In Abhängigkeit der maximalen Prüftemperatur dominieren somit unterschiedliche Schädigungsmechanismen.

Überwiegt bei S1 vor allem der mechanische Verschleiß in Form von reiboxidativen Prozessen im Kontaktbereich FFC/FKD, führen S2 und S3 zunehmend zu Fritting-Effekten und der Oxidschichtausbildung durch sich öffnende Klemmstellen (Abbildung 66).

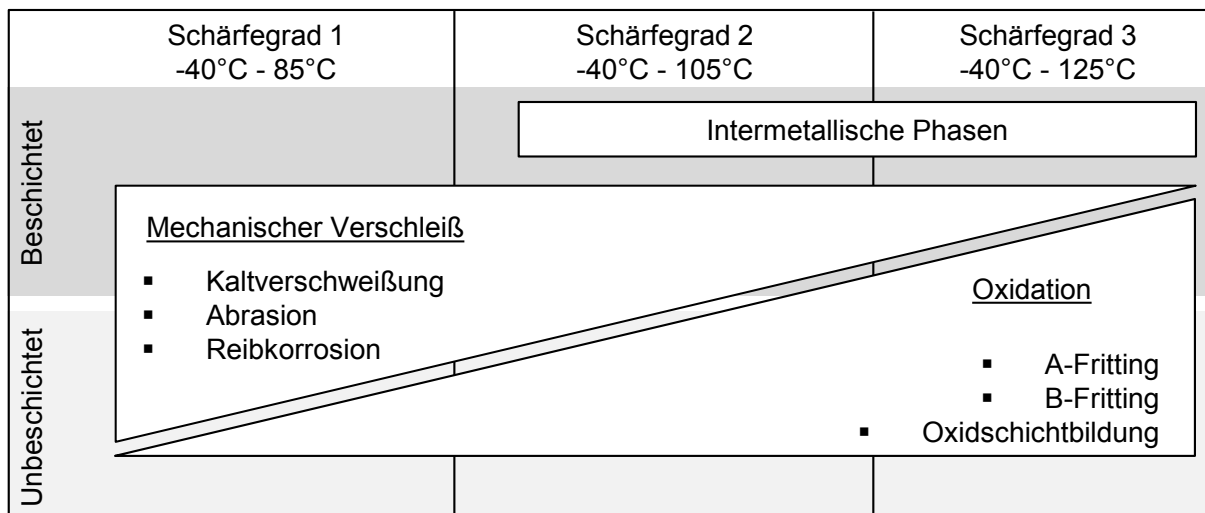


Abbildung 66: Schärfegradabhängige Schädigungsmechanismen bei Temperaturschocktests

Auch in [121] wird bei Klemmkontakten das dominierende Schädigungspotential von Oxidationsprozessen mit zunehmender Maximaltemperatur beschrieben. So sind bei niedrigen Temperaturen im Bereich von 60 °C – 100 °C vor allem mechanische Schädigungseffekte bestimmend, die durch oxidative Prozesse überlagert werden und ab 100 °C bestimmend für den Ausfall des elektrischen Klemmkontakts sind. In ähnlicher Form ist der Effekt auch bei beschichteten Kontaktelementen zu erkennen. Narayanan und Park zeigen in ihren Analysen, dass im Temperaturbereich von 85 °C zinnbeschichtete Oberflächen vor allem durch mechanischen Verschleiß bzw. Reibkorrosion geschädigt werden. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Temperaturschocktests verdeutlichen auch, dass Kontaktsysteme mit verzinnnten Kontaktflächen stärker zu Widerstandsverläufen der Kategorie 2 und 3 neigen.

Neben den genannten Effekten (Fritting und Oxidation) kommt es bei der Kontaktpaarung Kupfer/Zinn ebenfalls zur Ausbildung von intermetallischen Phasen aufgrund von Diffusionsprozessen zwischen den Kupferatomen des Flachleiters und den Zinnatomen des beschichteten Kontaktelements. Die Ausbildungsgeschwindigkeit dieser Phasen aus Cu₃Sn und Cu₆Sn₅ steigt ebenfalls mit der Temperatur.

[114] beschreibt, dass sich ab einer Temperatur von 100 °C bereits nach wenigen Tagen für den Kontaktwiderstand kritische Schichtdicken von circa 2 µm ausbilden können. Weiterhin zeigen sich auch in [122] bei Dauerbelastungstests von Klemmverbindungen ab einer Temperatur von 125 °C aufgrund der Bildung intermetallischer Phasen, fluktuierende Widerstandsverläufe. Durch das Zusammenspiel der Relativbewegungen zwischen den Kontaktpartnern und der fortschreitenden Oxidation freiliegender Oberflächenabschnitte bzw. der Bildung intermetallischer Phasen steigt der gemessene Durchgangswiderstand R_d mit der Zahl der Bewegungszyklen an. Die Zusammenhänge diese Degradationsmechanismen bei Klemmkontakten sind zwar komplex, jedoch in zahlreichen Veröffentlichungen umfassend beschrieben. Faktoren, die die Lebensdauer der elektrischen Kontakte beeinflussen sind demnach die Amplitude und Frequenz der Bewegung [123], die Oberflächenbeschaffenheit [124], die Schichtdicke [114] und die Normalkraft [125].

5.2.2 Vibration

Dynamische Beanspruchungen von Steckkontakten werden durch Vibrationsmessungen simuliert. [89] definiert hierfür unterschiedliche Belastungsprofiltypen und Schärfegrade.

Messbedingungen

Die darin festgelegten dynamischen Prüfbedingungen überlagern Vibrationen unter thermischer Last und lassen deshalb keine getrennte Betrachtung vibrationsbedingter Schädigungsmechanismen für die neuen Kontaktierungstechnologien zu.

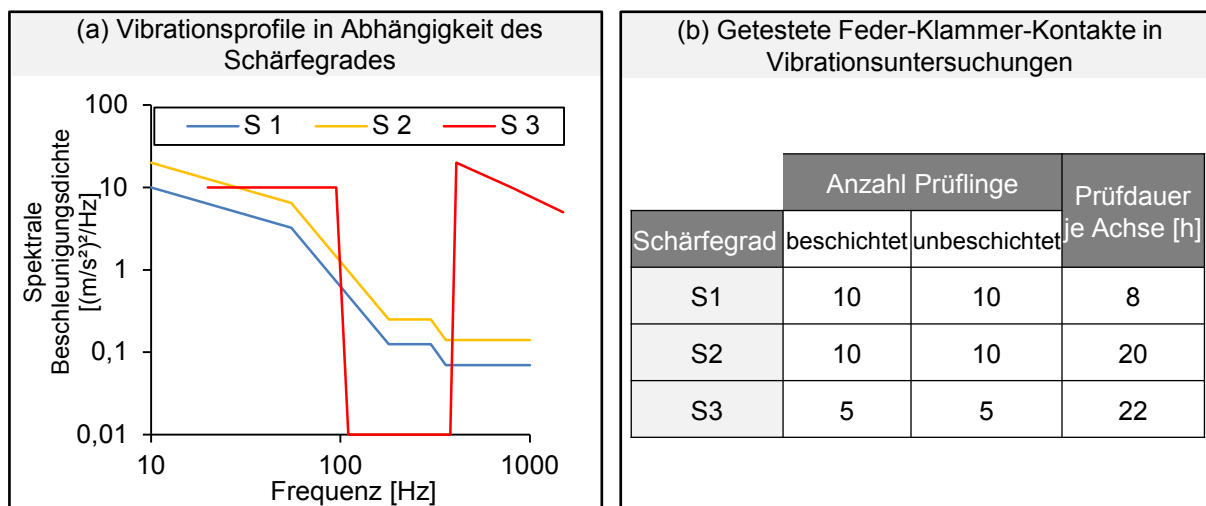


Abbildung 67: Prüfprofile und Probenanzahl der Vibrationsuntersuchungen

Um dennoch die Einflüsse dynamischer Beanspruchungen in der Kontaktstelle der Feder-Klammerdirektkontaktierung unabhängig von thermischen Lastzuständen grundlegend zu untersuchen, werden in diesem Kapitel Vibrationsmessungen bei Raumtemperatur durchgeführt und das Schädigungsverhalten diskutiert. Die im

Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Vibrationsanalysen basieren auf den Prüfvorgaben für zufallserregte Rauschprofile nach [89] für drei unterschiedliche Schärfegrade (Abbildung 67 a).

Messergebnisse

In Abhängigkeit der Belastungsrichtung können Vibrationsbelastungen zu verschiedenen Relativbewegungsrichtungen im Kontaktsystem führen. Um die richtungsabhängige Steifigkeit des Kontaktsystems zu simulieren, werden die Testkontakte deshalb nacheinander in den drei Raumrichtungen in x-, y-, und z-Richtung belastet (Abbildung 68) und der Durchgangswiderstandswert R_d zwischen den jeweiligen Raumachsentests gemessen.

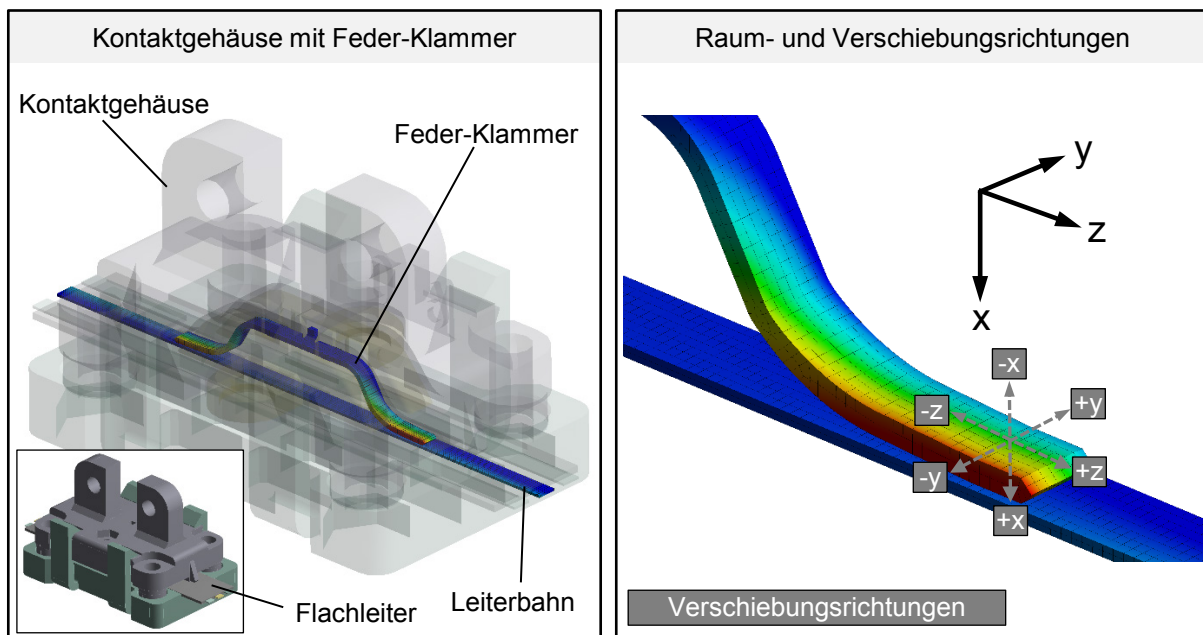


Abbildung 68: Belastungsrichtungen der Vibrationsanalyse

Abbildung 69 (a und c) zeigt die Veränderung der Durchgangswiderstandswerte durch die induzierten Rauschprofile für beschichtete und unbeschichtete Kontaktelemente. Die hintereinander durchgeführte Belastung führt zu einer Schadensakkumulation im Kontaktsystem. Abbildung 69 (b und d) zeigt deshalb zusätzlich die Summen der Mittelwerte der Widerstandsänderungen für S1 bis S3. Eine genaue Beschreibung der Testbedingungen kann Anhang 5.4 entnommen werden. Die Messungen ergeben, dass höhere Schärfegrade der Vibrationsbelastungen den Klemmkontakt stärker schädigen und R_d von S1 zu S3 überproportional zunimmt. Gleichzeitig ergeben die Analysen, dass die raumrichtungsabhängigen Vibrationsmessungen zu unterschiedlich verteilten Widerstandserhöhungen führen. Zwar akkumulieren sich die Schädigungen in x-, y- und z-Richtung, dennoch kommt es in Abhängigkeit der getesteten Raumrichtung zu unterschiedlich stark ausgeprägten R_d -Anstiegen. Beanspruchungen in y-Richtung zeigen hierbei die größten Widerstandserhöhungen.

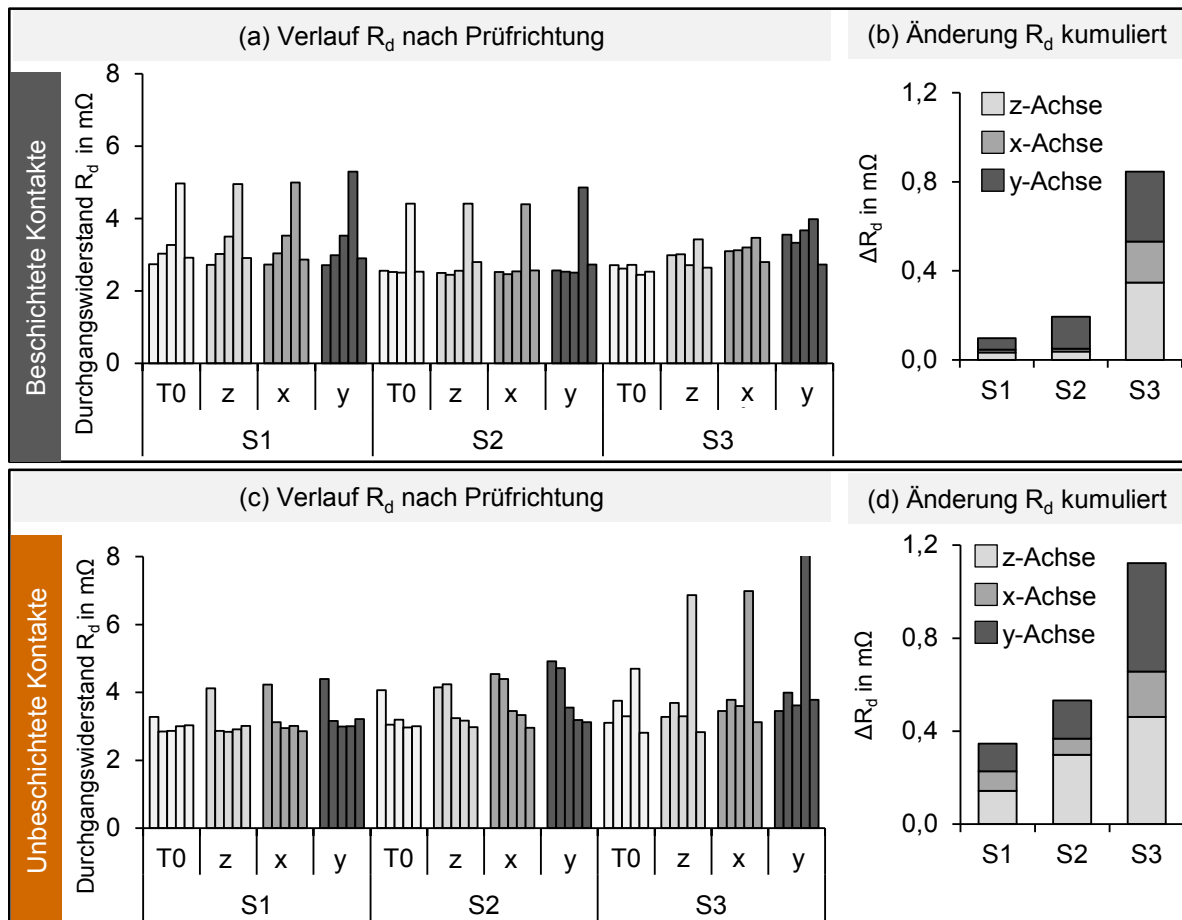


Abbildung 69: Widerstandserhöhung in Abhängigkeit des Schärfegrades der Vibrationsbelastung

Schädigungsmechanismen

Ursächlich für die Widerstandserhöhung sind vibrationserregte Relativbewegungen in der Kontaktfläche, deren Amplituden von der Raumrichtung und dem Schärfegrad abhängen. Das Kontaktsystem der Feder-Klammer besitzt folglich in Abhängigkeit der Belastungsrichtung ungleiche Steifigkeits- und Dämpfungseigenschaften. Bei den untersuchten Belastungstypen durch Breitbandrauschen wird das Kontaktsystem in einem definierten Frequenzbereich mit zufallserregten Schwingungen unterschiedlicher Effektivbeschleunigungswerte belastet. Das Lastprofil der jeweiligen Schärfegrade wird durch die spektrale Beschleunigungsdichte über der Frequenz definiert (Abbildung 67 a).

Zur Untersuchung der raumrichtungsabhängigen Relativbewegung in der Kontaktstelle werden in dieser Arbeit die Ergebnisse numerischer PSD-Analysen¹⁷ aus ANSYS-Workbench herangezogen. Die Randbedingungen des Simulationsmodells können dabei Anhang 5.5 entnommen werden. Die Schwingprofile aus

¹⁷ Power spectral density (engl.), spektrale Leistungsdichte

Abbildung 67 a dienen als Randbedingungen der FE-Simulationen des Kontaktsystems. Der geometrische Aufbau und der Lagerzustand des Simulationsmodells entsprechen den realen Versuchsbedingungen. Die in der Kontaktfläche hervorgerufenen Relativbewegungen der erzwungenen Schwingungen in x-, y- oder z-Richtung ergeben sich aus der Differenz der Verschiebungen von Federklammer und Leiter.

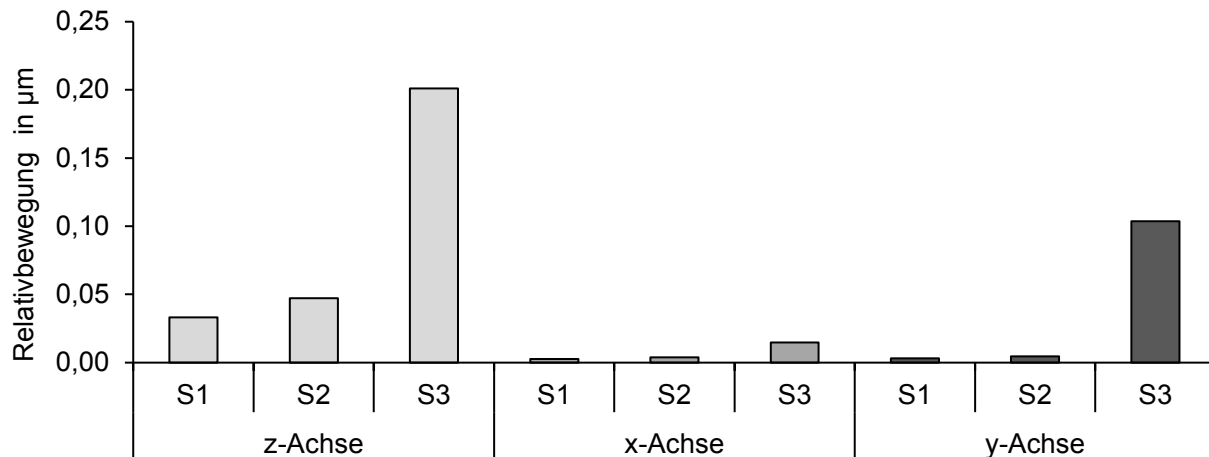


Abbildung 70: Relativverschiebung von Vibrationsbelastungen in Abhängigkeit der Raumrichtung und des Schärfegrads

Abbildung 70 zeigt die Ergebnisse der Simulationsstudie und stellt die Relativbewegungen für S1 - S3 in Abhängigkeit der Raumrichtungen dar. Die Gleitrichtungen in y- und z- Richtung verlaufen quer bzw. längs zum Flachleiter in der Kontaktebene. Relativbewegungen in x-Richtung entsprechen demnach einem Abheben der Federklammer vom Leiter. Die Abhängigkeit von der Raumrichtung lässt sich anschaulich anhand der allgemeinen Differentialgleichung der Balkenschwingung erläutern. Die Federklammer kann im Einspannbereich des Gehäuses wiederum idealisiert als Balkenelement mit Rechteckquerschnitt betrachtet werden:

$$-(EIw'')'' + (\rho I \ddot{w}')' + (Nw')' + q = \rho A \ddot{w} \quad (5.1)$$

Das bestimmende Maß für die Systemsteifigkeit ist das axiale Flächenmoment I entsprechend der wirksamen Belastungsrichtung. In z-Richtung ist I aufgrund des Querschnittsverhaltens der Federklammer deutlich geringer als in y-Richtung. Dies führt zu einer höheren Systemsteifigkeit in y-Richtung und gleichzeitig zu geringeren Relativverschiebungswerten.

Die Messungen haben gezeigt, dass vor allem die in der Kontaktebene liegenden Verschiebungsrichtungen in y- und z-Richtung Schädigungen des Kontaktes hervorrufen. Die durchgeführten FE-Simulationen ergeben für diese Raumrichtungen aufgrund der diskutierten richtungsabhängigen Systemsteifigkeiten entsprechend überhöhte Verschiebungswerte im Kontaktsystem. Gleichzeitig zeigen die durchgeführten Simulationsstudien, dass die Amplituden der Relativbewegungen im

Vergleich zu thermisch induzierten Belastungen wie Temperaturschocktests und deutlich unterhalb von 1 μm liegen und damit deutlich geringer sind. Schädigungsmechanismen, die auf große, durch Thermospannungen induzierte Relativbewegungen ($\ll 100 \mu\text{m}$) zurückzuführen sind, wurden bereits in Kapitel 5.2.1 umfassend diskutiert. Die aufgezeigten Mechanismen, hervorgerufen durch Vorgänge der Reibkorrosion, Oxidation oder der Ausbildung intermetallischer Phasen, sind bereits hinreichend erforscht und sind umfassend in diversen Arbeiten beschrieben.

Arbeiten zu Schädigungsprozessen, die auf geringe Relativbewegung unterhalb von 5 μm zurückzuführen sind, sind nach heutigem Stand der Forschung nicht bekannt. Die Ergebnisse der durchgeführten Vibrationsuntersuchungen deuten jedoch darauf hin, dass vibrationsinduzierte Mikrorelativbewegungen in Klemmkontakten zu einer Ermüdungsschädigung bzw. zum Ermüdungsversagen der Kontaktzone führt und sich dadurch der verhältnismäßig geringe Anstieg der R_d -Werte begründen lassen kann. Der bestimmende physikalische Vorgang ist dabei keine Gleitbewegungen zwischen den Kontaktpartnern, sondern vielmehr elastische und plastische Verformungen der mikroskopischen A-Spots. Der Effekt führt dazu, dass sich z.B. Kaltverschweißungen durch Rissbildung und Risswachstum lösen und dabei die Kontaktoberfläche dauerhaft zerstören. Auch Vorgänge der Schwingungsrisskorrosion sind möglich.

Insgesamt zeigen beschichtete Kontaktelemente eine geringere Anfälligkeit gegenüber Vibrationsbelastungen. Gründe hierfür können im höheren Reibkoeffizienten von Zinnkontaktflächen und der stärkeren Neigung zur Ausbildung von Mikrokaltverschweißungen liegen. Gleichzeitig ist die Risswachstumsgeschwindigkeit in Zinn aufgrund seiner höheren Duktilität im Vergleich zu Kupfer oder Kupferbasislegierungen geringer. Das Lösen von Kaltverschweißungszonen durch wachsende Mikrorisse im Bereich von A-Spots kann dadurch verlangsamt werden, wodurch sich die geringeren Anstiege der Durchgangswiderstände von verzinneten Feder-Klammer-Direktkontakten erklären lassen können.

5.2.3 Überlagerte Belastungen

Die Zuverlässigkeitsuntersuchungen von Kfz-Steckverbindern liegen der Normenzusammenfassung der Lieferantenvorschrift 214 zugrunde. In insgesamt 29 Prüfgruppen werden dabei unterschiedliche Eigenschaften der Verbindungssysteme, wie Einsteck- und Haltekräfte, Stromerwärmung, dynamisches Verhalten, chemische Beständigkeit oder Wasserdichtheit geprüft. In Abhängigkeit der Prüfaufgabe, d.h. ob z.B. ein Neuteil qualifiziert wird oder nur Anpassungen an einem bereits getesteten Kontaktsystem verifiziert werden sollen, müssen unterschiedliche Prüfgruppen (PG) durchlaufen werden. Zwar bauen viele Prüfgruppen, wie PG 16 (Reibkorrosion), PG 17 (Dynamische Beanspruchung) oder PG 19 (Umweltsimulation) auf den Grundbelastungstest Temperaturschock-, -wechsel oder -auslagerung bzw. Vibrationsuntersuchungen auf, jedoch werden zur

Qualifizierung von Kontakten im Kfz immer mehrere Grundbelastungstests parallel getestet oder hintereinander durchgeführt. Diese Kombination führt dazu, dass sich Schädigungsmechanismen überlagern und den Ausfall des Kontakts exponentiell beschleunigen oder aber verhindern oder gar rückgängig machen. Die im Folgenden vorgestellten Ergebnisse aus Versuchen überlagerter thermischer Testreihen und der Kombination aus Vibrationsbelastungen unter erhöhter Temperatur sind Testbedingungen, die in PG 17 und PG 19 definiert sind. Ziel der nachfolgenden Ergebnisdiskussion ist die Einflussanalyse überlagerter Schädigungsmechanismen und der Ableitung von Schädigungsgraden in Abhängigkeit der Grundbelastungsarten.

Thermische Überlagerung

Die Versuchsreihen setzen sich aus hintereinander durchgeführten Temperaturschock-, Temperaturwechsel- und Temperaturlagerungsuntersuchungen zusammen (Abbildung 71). Die Untersuchungen lehnen sich an die in [89] beschriebene Prüfgruppe 19 (Umweltsimulationen) an.

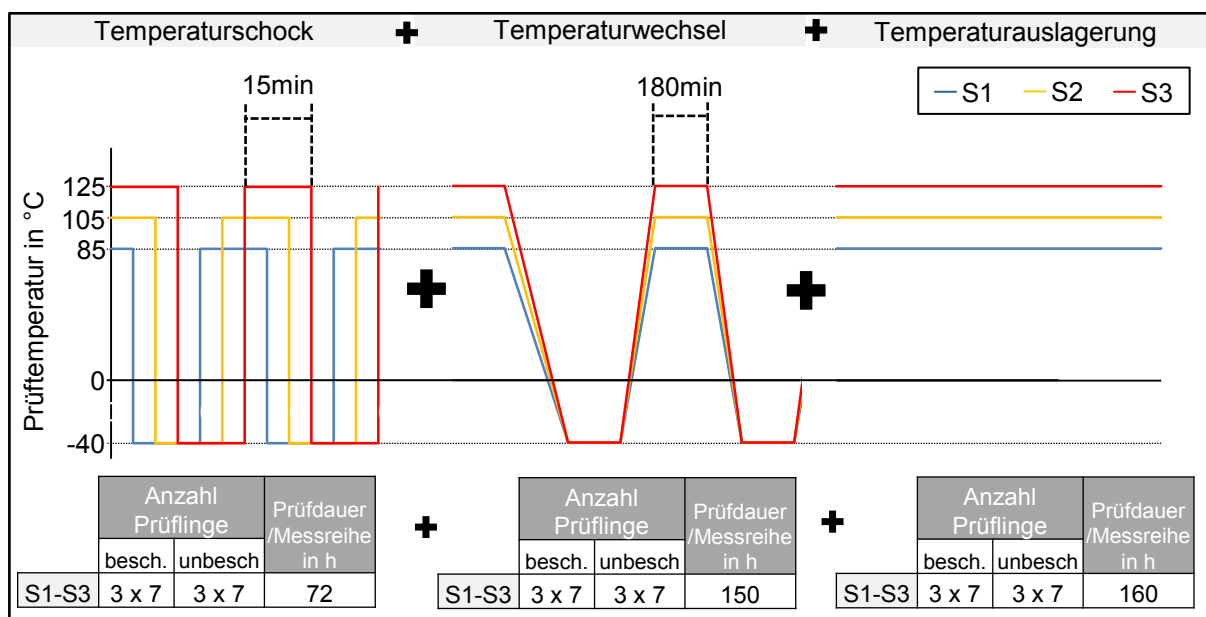


Abbildung 71: Prüfprofile und Probenanzahl der durchgeführten thermisch überlagerten Dauerbelastungstests

Abbildung 72 zeigt gemessene Durchgangswiderstandsverläufe über die drei Grundbelastungsarten hinweg für gering (a) und stark geschädigte Kontaktelemente (b). Die Widerstandsverläufe bilden dabei deutlich die drei unterschiedlichen thermischen Beanspruchungsarten ab. Dem kurzzyklischen Wechsel vom warmen in den kalten Temperaturzustand des Temperaturschocks folgen lange periodische Widerstandsänderungen im Temperaturwechseltest und ein konstant verlaufender Widerstand durch die thermische Auslagerung der Prüflinge. Aus der hohen Frequenz der thermischen Lastwechsel der Temperaturschocktests ergeben sich

letztlich die höchsten Prüfanforderungen für den Klemmkontakt. Exemplarisch für ausgefallene Kontakte ist die starke Überhöhung des gemessenen Durchgangswiderstands bereits während des Temperaturschocktests (Abbildung 72 b).

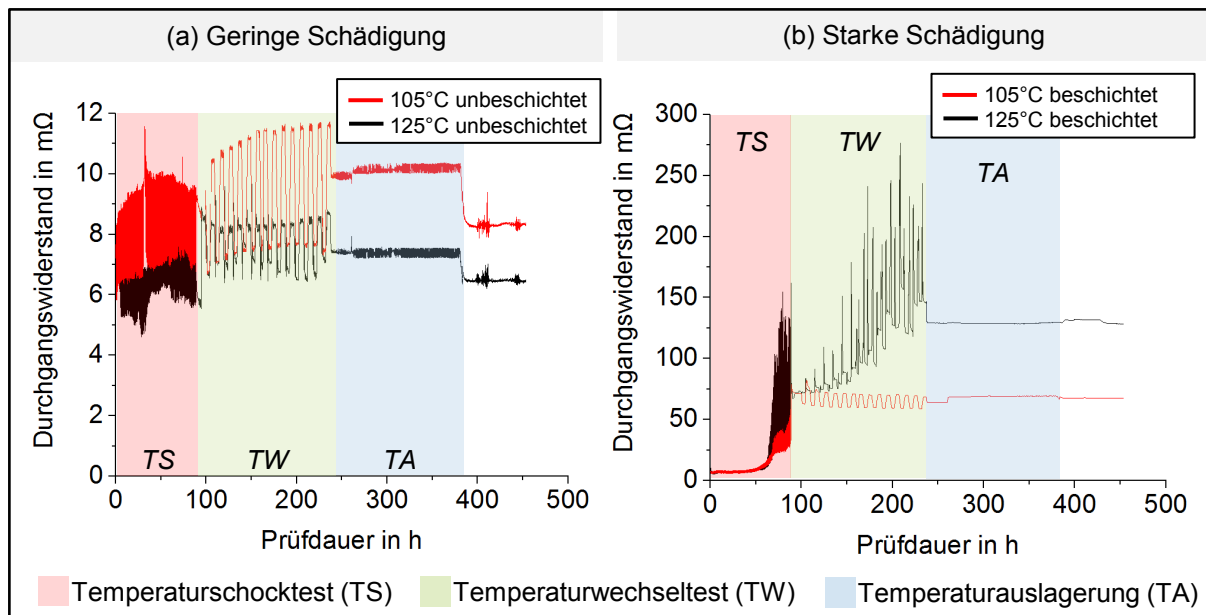


Abbildung 72: Durchgangswiderstandsverlauf für thermisch überlagerte Belastungen

Die nachfolgenden Beanspruchungen in Form von thermischen Wechsel- und Auslagerungsbeanspruchungen führen zu einer Akkumulation der bereits vorhandenen Schädigung aus den Temperaturschocktests und steigern das Schädigungswachstum. Temperaturwechsel zeigen dabei wiederum ein gesteigertes Schädigungspotential gegenüber der thermischen Auslagerung.

Abbildung 73 zeigt die Ausfallzeiten für beschichtete und unbeschichtete Kontakte bei einem Ausfallkriterium von $\Delta R_d > 15 \text{ m}\Omega$ gegenüber dem Ausgangswiderstands-wert. Der in Kapitel 5.2.1 beschriebene Effekt thermisch stabilerer unbeschichteter Kontaktelemente zeigt sich auch in diesen Testreihen. Die Untersuchungen deuten darauf hin, dass die mittlere Ausfallzeit unbeschichteter Kontaktelemente rund 50 % über beschichteten Systemen liegt. Obwohl die Schädigungen der einzelnen Belastungen aus TS, TW und AL überlagert werden, überwiegt dennoch das Schädigungspotential der Temperaturwechseltests. Über 70 % der Ausfälle treten bereits während den Temperaturschocktests auf.

Zwar durchlaufen die Prüflinge in Temperaturwechseltests die gleichen Temperatur-hübe wie in Temperaturschocktests, die Frequenz der Lastwechsel ist jedoch deutlich geringer. Zusammenfassend kann deshalb festgestellt werden, dass eine steigende maximale Temperatur und eine steigende Anzahl von Temperaturhüben die Lebensdauer der Kontaktierungstechnologie negativ beeinflussen. Dieser Zusammenhang ist dabei auf steigende Belastung durch Relativbewegungen in der

Kontaktstelle mit steigender Frequenz der Temperaturwechsel und die ansteigende Wachstumsgeschwindigkeit mit steigender Temperatur zurückzuführen.

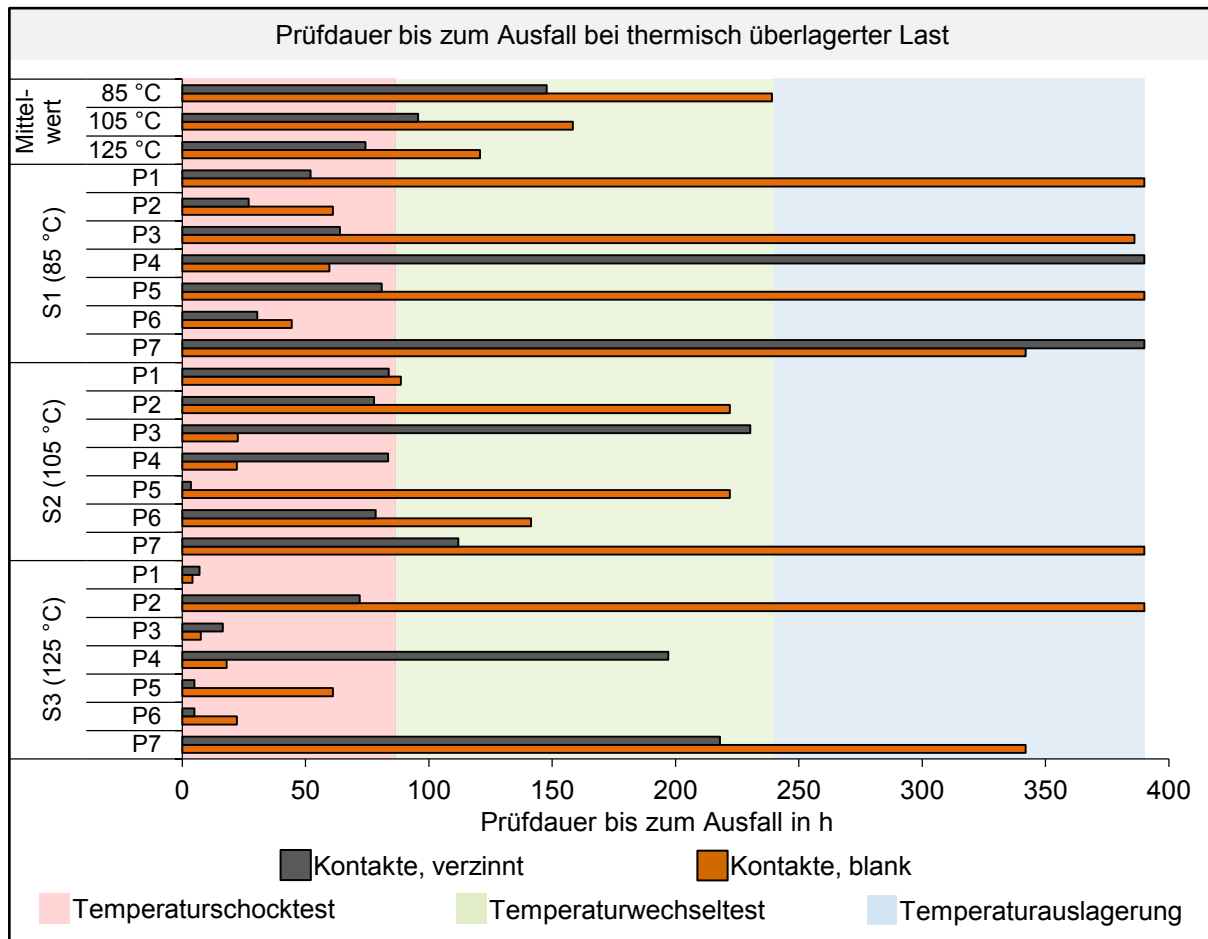


Abbildung 73: Ausfallzeiten für thermisch überlagerte Dauerbelastungstests

Vibration und Temperaturwechsel

Die Simulation der dynamischen Beanspruchung von Klemmkontakten im Kfz ist in der Prüfgruppe 17 (Dynamische Beanspruchung) der LV 214 beschrieben. Zwar steht hierin die Untersuchung der mechanischen Belastbarkeit im Vordergrund, die festgelegten Abläufe überlagern jedoch die schärfegradabhängige Vibrationslast mit Temperaturwechseltests. Die mechanische Beanspruchung von Klemmkontakten wird somit unter überhöhten und wechselnden Temperaturzuständen simuliert.

Die nachfolgend vorgestellten Ergebnisse der Zuverlässigkeitsuntersuchungen basieren auf den beschriebenen Prüfbedingungen aus Vibrations- und Temperaturwechseltest. Abbildung 74 zeigt die Ergebnisse aus Vibrationsmessungen, überlagert mit Temperaturwechseltests, für die Schärfegrade S1 und S2. Vergleicht man die akkumulierte Schädigung aus thermisch überlagerten dynamischen Testreihen mit den Ergebnissen der Vibrationsbelastungen bei Raumtemperatur, kann eine deutlich stärkere Widerstandserhöhung unter thermisch beeinflussten Vibrationsmessungen festgestellt werden.

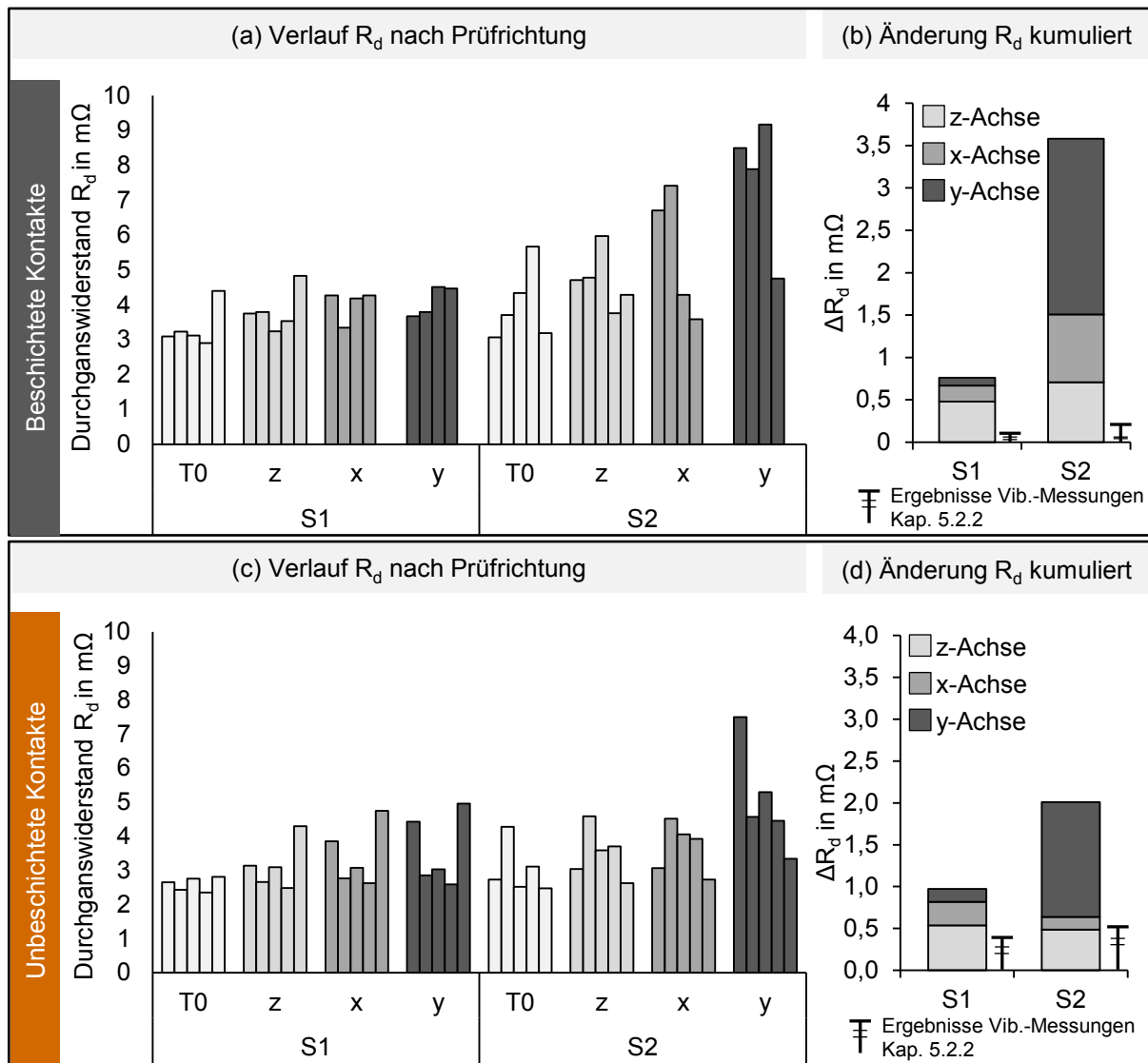


Abbildung 74: Änderung des Durchgangswiderstands unter Vibrations- und Temperaturwechselbelast

Der Effekt kann auf die zugrundeliegenden Schädigungsmechanismen der jeweiligen Grundbelastungsart zurückgeführt werden. Vibrationsbelastungen rufen im Kontaktsystem sehr kleine Amplituden deutlich unter $5\text{ }\mu\text{m}$ hervor und regen zur Rissbildung in den A-Spots an. Thermische Wechselbelastungen führen zu Reibkorrosion, Fretting oder der Ausbildung von intermetallischen Phasen in der Klemmstelle. Die Relativverschiebungen bei dieser Belastungsart können in Abhängigkeit des Temperaturhubs dabei deutlich über $100\text{ }\mu\text{m}$ liegen. Der stetige Anstieg der Durchgangswiderstandswerte R_d zwischen den Achsen und die höheren gemessenen R_d -Werte bei beschichteten Kontaktsystemen zeigen dabei den dominierenden schädigenden Einfluss durch die thermische Wechselbeanspruchung. Betrachtet man die Temperaturzyklen des Schärfegrades S1 bei $T_{\text{max}1} = 105^\circ\text{C}$ und S2 bei $T_{\text{max}2} = 120^\circ\text{C}$ wird auch hierbei deutlich, dass die starke Überhöhung der mittleren R_d -Werte bei S2 auf die maximale Prüftemperatur zurückzuführen ist.

5.3 Schadensbilder der Kontaktflächen

In der Regel tritt nicht nur ein einzelnes Schadensbild auf, sondern ein komplexes Feld aus überlagerten Schädigungsmechanismen, das zu einer Erhöhung des Durchgangswiderstand R_d führt. Das nachfolgende Kapitel gibt eine Übersicht über die im Laufe der Zuverlässigkeitsuntersuchungen aufgetretenen Schadensbilder und gliedert sie nach ihrem zugrundeliegenden Mechanismus in Fremdschichten, mechanischen Verschleiß und Kontaktierungsfehler.

		TS			TW			TA			Vib		
		S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3
		85	105	125	85	105	125	85	105	125	85	105	125
Fremdschichten	A und B Fritting										-		
	Oxidschichtbildung										-		
	Intermetallische Phasen										-		
	Isolationsfremdschichten										-		
Mechanischer Verschleiß	Klatverschweißung												
	Fretting							-			-		
	Abrassion							-			-		
	Schwingverschleiß	-			-			-					
Kontaktierungsfehler	Kerbe												
	Spanbildung												
	Risse												
		<div>Auftretungswahrscheinlichkeit</div> <div><div><div></div><div>gering</div><div></div></div><div><div></div><div>hoch</div><div></div></div></div> <div><div></div><div>Temp. unabhängig</div><div></div></div> <div><div></div><div>Kontakte, verzinnt</div><div></div></div> <div><div></div><div>Kontakte, blank</div><div></div></div>											

Tabelle 13: Auftretende Schadensbilder in Abhängigkeit der Belastungsarten

Die vorgestellten Schädigungen im Klemmkontakt wurden dabei durch die Grundbelastungsarten Temperaturschock, -wechsel und –auslagerung bzw. Vibration hervorgerufen. Von einer Diskussion der Schadensbilder überlagelter Dauerbelastungstests wird aufgrund der bereits diskutierten gegenseitigen Wechselwirkung, aber auch der Dominanz spezifischer Schadensarten, abgesehen. Tabelle 13 zeigt die aufgetretenen Schadensbilder in Abhängigkeit des Schärfegrads und ordnet diese gewichtet nach der Auftretungswahrscheinlichkeit den getesteten Grundbelastungen zu. Die Ausbildung von Fremdschichten und der fortschreitende mechanische Verschleiß im Kontaktsystem sind abhängig von der simulierten Belastungsart. Grundsätzlich gilt, dass mit einer Zunahme der thermischen Zyklen und der maximalen Prüftemperatur die Auftretungswahrscheinlichkeit der jeweiligen

Schadensfälle steigt. Fremdschichten treten dabei oftmals zusammen mit mechanischen Verschleißarten auf. Kontaktierungsfehler, wie Kerben oder Risse im Flachleiter und Spanbildung beim Abgleiten der Federklammer sind belastungsartunabhängig und konnten in allen Proben nachgewiesen werden. Beeinflusst wird deren Häufigkeit maßgeblich durch das Kontaktsystem selbst.

5.3.1 Fremdschichten

Grundsätzlich erhöhen Fremdschichten auf den Kontaktoberflächen den Übergangswiderstand R_d eines elektrischen Kontakts. Dabei sind neben der Oxidbildung, die noch näher erläutert wird, auch Fremdschichten bzw. Partikel aus Kunststoff oder sonstigen Partikeln (wie z.B. Staub) zu berücksichtigen. Allgemein führt der Kontakt mit Luftsauerstoff oder anderen aggressiven Medien zum Aufbau von Oxidationsschichten. Nach Malucci et al erhöht sich das Wachstum von Oxidschichten mit einer Zunahme der Temperatur oder der relative Luftfeuchte bzw. unter der Anwesenheit korrosiver Substanzen [126]. Das Wachstum von Oxidschichtdicken kann durch eine logarithmische Funktion angenähert werden, die für verschiedene Temperaturhübe und für unterschiedliche Zyklenanzahlen in Abbildung 75 dargestellt ist. Das Maß für die Dicke der Oxidschicht ist zugleich ein Maß für die Widerstandsentwicklung von R_d .

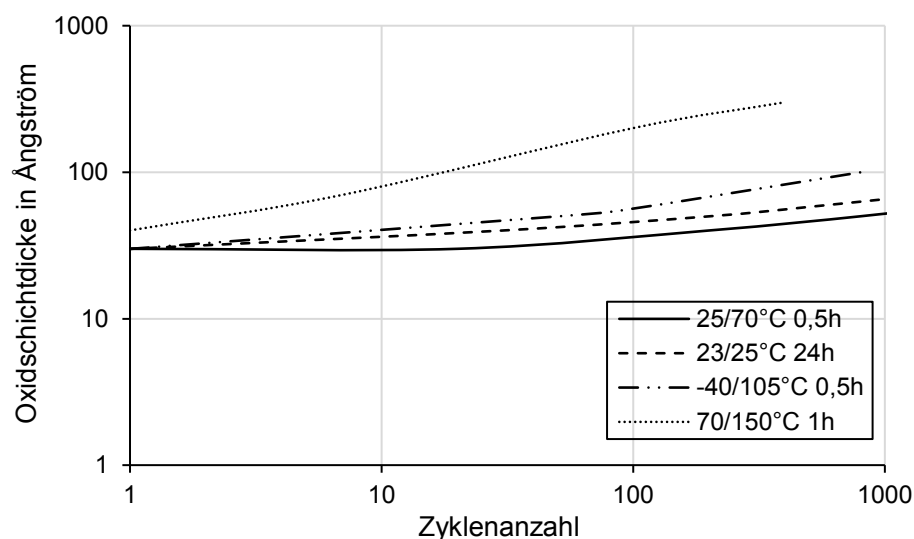


Abbildung 75: Oxidschichtdickenwachstum in Abhängigkeit des thermischen Belastungszustands nach [126]

Die Ausbildung von Oxidschichten konnte bei beschichteten und unbeschichteten Kontaktelementen gleichermaßen nachgewiesen werden. Die Oxidschichtbildung ist dabei primär von zwei Parametern abhängig. Einerseits wirkt eine steigende Prüftemperatur bei höheren Schärfegraden beschleunigend auf die Ausbildung, andererseits beeinflusst der zeitliche Temperaturverlauf und damit die thermische Belastungsart das Oxidschichtwachstum.

Oxidschichten und intermetallische Phasen

Kapitel 5.2.1 beschreibt den Effekt, dass es bei wechselnden thermischen Beanspruchungen zu Relativbewegungen und einem Abheben des Kontaktelements kommt. Die gasdichte Klemmfläche verringert sich hierbei und führt zur Oxidschichtausbildung im Kontaktbereich.

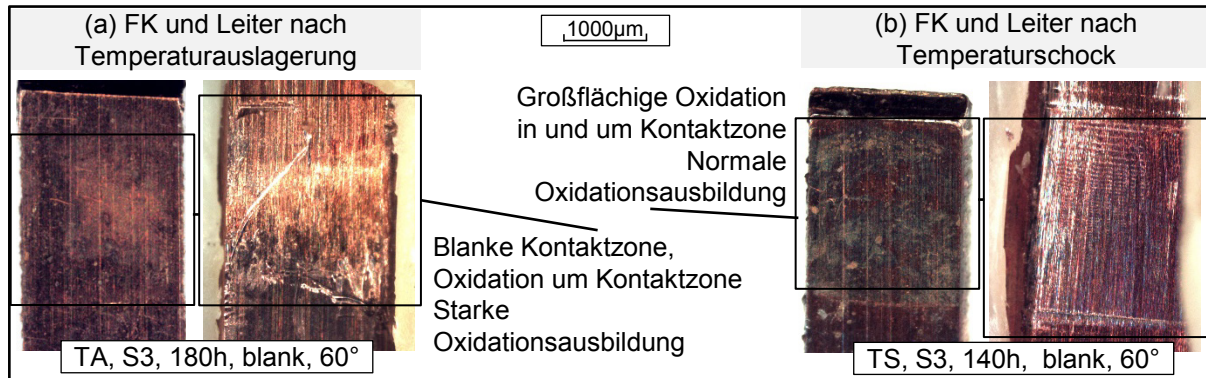


Abbildung 76: Mikroskopiebilder oxidierter Kontaktflächen

Abbildung 76 zeigt die Kontaktflächen eines thermisch ausgelagerten Kontakts (a) und eines geschockten Kontakts (b), jeweils bei S3. (a) zeigt eine ausgeprägte Oxidschicht um den blanken Kontaktbereich herum. Die konstante Maximaltemperatur bei 125°C führt zu einem starken Wachstum der Oxidschicht außerhalb des Kontaktbereichs. Die Kontaktstelle selbst bleibt geschlossen, da sich aufgrund der konstanten Prüftemperatur der thermischen Auslagerung keine Relativbewegungen zwischen Kupferleiter und Kontaktelement einstellen. (b) hingegen stellt eine großflächige oxidierte Kontaktstelle dar. Die Relativbewegungen zwischen Federklammer und Leiter aufgrund der Temperaturschockbelastung haben die Oxidschicht im Klemmbereich immer wieder abgetragen und in die Kontaktstelle eingearbeitet. Es zeigt sich im Vergleich zu (a) eine gleichmäßig ausgebildete Oxidschicht. Gleichzeitig führt die zyklische Belastung zu einer geringer ausgeprägten Oxidationsschicht, da die Prüfzeit bei maximaler Temperatur (125°C) nur bei 50% der gesamten Prüfdauer liegt.

Klemmverbindungen mit beschichteten Kontakten zeigen bezogen auf die temperaturabhängige Oxidschichtausbildung ein ähnliches Verhalten. Speziell für Zinn ist der dominierende Korrosionsvorgang die Eigenkorrosion. Zinn bildet an der Oberfläche eine passivierende Deckschicht aus. Die Zinnbeschichtung führt jedoch auch dazu, dass es zu lokalen Anhaftungen von Zinn am Kupferleiter kommt und sich gleichzeitig intermetallische Phasen ausbilden. Beide Fremdschichten wirken sich dabei negativ auf die Zuverlässigkeit der elektrischen Verbindungsstelle aus (Abbildung 77).

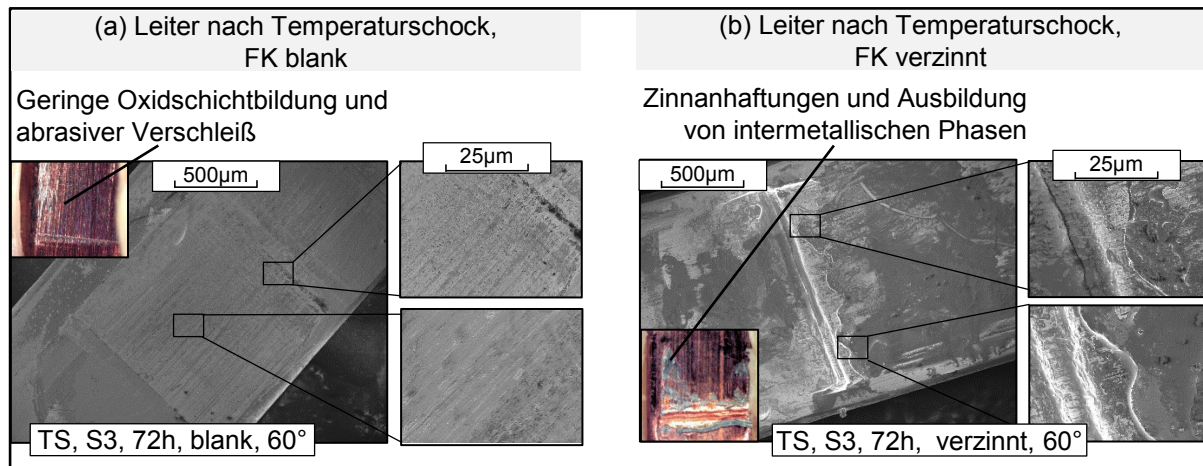


Abbildung 77: REM-Aufnahmen von oxidierten und mit intermetallischen Phasen behafteten Kontaktflächen

Organische Fremdschichten

Weiterhin haben die Untersuchungen gezeigt, dass mit der Ablagerung von Isolationsrückständen im Kontaktbereich ein weiterer Fremdschichttyp zum Ausfall des Kontakts führen kann. Ursächlich für das Auftreten der organisch-chemischen Ablagerungen können kondensierte organische Dämpfe der Isolation oder des Kontaktgehäuses sein, die sich auf den Kupferleiter niederschlagen. Auch Isolationsrückstände im Kontaktbereich, die beim Durchtrennen der Isolation und dem Abgleiten der Federklammer auf dem Kupferleiter zurückbleiben, verursachen in den Untersuchungen derartige Schadensbilder (Abbildung 78).

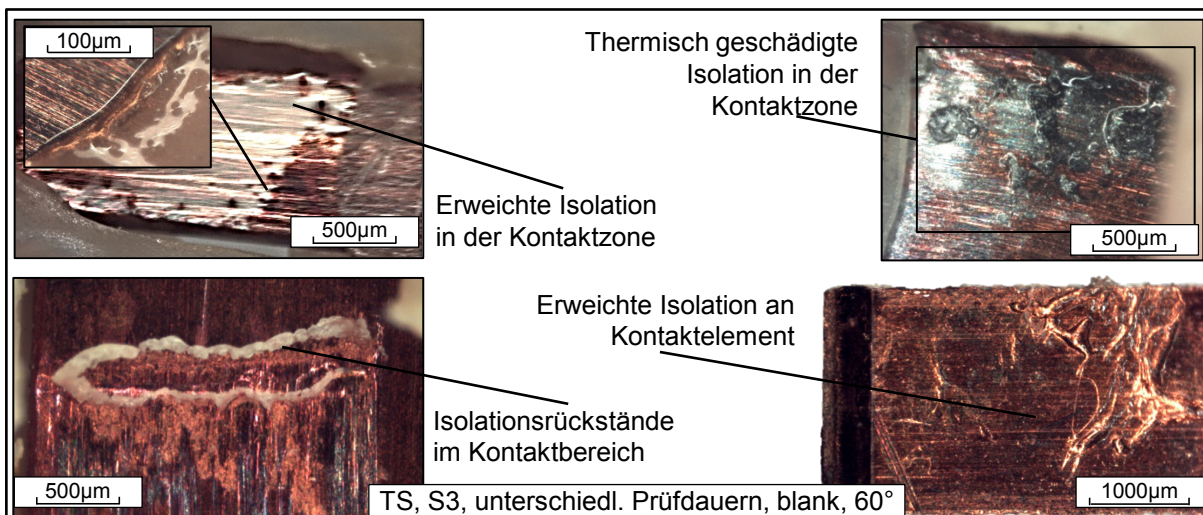


Abbildung 78: Mikroskopiebilder von organischen Ablagerungen im Kontaktbereich

Vor allem Relativbewegungen, induziert durch Temperaturhübe, führen dazu, dass die Isolationsrückstände in den Kontaktbereich wandern. Steigende Maximaltemperaturen erweichen die Fremdpartikel und beschleunigen den Effekt der Ausbildung von organischen Fremdschichten zusätzlich. Isolationsfremdschichten konnten in

den Untersuchungen vor allem nach Temperaturschocktests bei hohen Schärfegraden nachgewiesen werden [107]. Die isolierende Fremdschicht in Form von organischen Ablagerungen kann zur Einengung des Strompfades zwischen den Kontaktflächen führen. Durch den hervorgerufenen lokalen Effekt der Stromerwärmung wird die elektrische Verbindungsstelle zusätzlich thermisch geschädigt. Einige Proben zeigen demnach thermisch stark geschädigte Isolationsrückstände und lassen sich auf diesen Effekt zurückführen.

5.3.2 Mechanischer Verschleiß

Die lösbare Verbindung der Feder-Klammer ist anfällig gegenüber mechanischen Verschleiß. Sich durch Umgebungseinflüsse einstellende Relativbewegungen zwischen den Kontaktflächen führen dabei zu unterschiedlichen Schädigungsmechanismen.

Reibkorrosion und Abrasion

Unedle und v.a. weiche Metalle, wie Kupfer und Zinn neigen zur Reibkorrosion. Der Mechanismus wird in Kapitel 5.1.1 erläutert und zählt nach Malucci zu den häufigsten Schadensarten bei Klemmkontakten. Dabei kommt es zum Aufreißen von Kaltverschweißungszonen durch Relativbewegungen im Kontaktsystem und einem fortwährenden Korrosionsprozess der ausgerissenen Partikel, wodurch nicht nur die Oberflächenrauigkeit der Klemmstelle, sondern auch der Durchgangswiderstand R_d des Kontaktsystems erhöht wird.

Nach Braunovic sind Rückstände durch Reibkorrosion nicht als durchgehende Schicht, sondern als poröse Erscheinungen auf Kontaktflächen auszumachen und gleichzeitig stellt er fest, dass speziell Temperaturschock- und Temperaturwechseltests zur beschleunigten Schädigung durch Reibkorrosion führen [127].

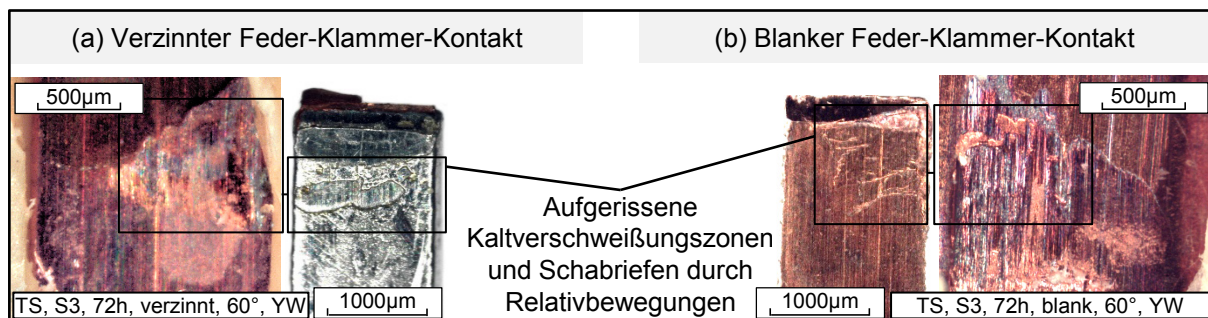


Abbildung 79: Mikroskopiebilder von aufgerissenen Kaltverschweißungszonen

Abbildung 79 zeigt Mikroskopiebilder von durch Reibkorrosion geschädigten Kontaktstellen. Die Untersuchungen weisen darauf hin, dass dieser Schädigungsmechanismus, wie in der Literatur beschrieben, durch hohe, wechselnde Temperaturen verstärkt wird. Fretting-Korrosion konnte dabei sowohl bei beschichteten als auch bei unbeschichteten Kontaktelementen nachgewiesen werden, wobei die weichen

Abriebpartikel zinnbeschichteter Kontakte (a) im Vergleich zu blanken Kontakten (b) geringere Oberflächenriefen in der Kupferleiteroberfläche erzeugt haben.

Auch dieser Schädigungsmechanismus tritt vor allem bei Temperaturschocktests mit hohen Maximaltemperaturen auf. Die Schädigungseffekte der Fretting-Korrosion überlagern sich mit dem abrasiven Verschleiß der Kontaktfläche. Da beide Mechanismen die Oberfläche schädigen, sind sie oftmals nicht klar voneinander zu unterscheiden. Grundsätzlich gilt jedoch, dass Fretting-Korrosion durch aufgerissene Kaltverschweißungszonen lokal begrenzt in der Kontaktzone stattfindet und die sich daraus entwickelnden Schabriefen ebenfalls örtlich begrenzt entstehen.

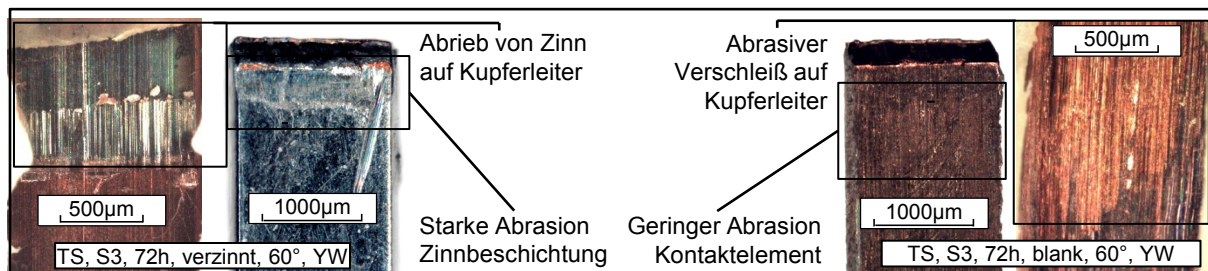


Abbildung 80: Abrasiver Verschleiß der Kontaktfläche

Der Vorgang der Fretting-Korrosion führt dazu, dass der weichere Kontaktpartner durch die induzierten Relativbewegungen verschleißt und dabei deutliche Schabriefen auf der Kontaktfläche hinterlässt. Die weiche Zinnbeschichtung kann sich zudem zusätzlich auch auf den Flachleiter ablagern (Abbildung 80).

Schwingungsrissskorrosion

Der Effekt der Schwingungsrissskorrosion wird vor allem in der Werkstofftechnik, der Festigkeitslehre oder der Bruchmechanik verwendet, basiert jedoch auf ähnlichen Lastarten, wie sie bei der Vibration von Klemmkontakten vorherrschen: Die dynamische Belastung der Oberfläche von Bauteilen unter atmosphärischen Bedingungen [128]. Schwingungsrissskorrosion (SRK) wird nach heutigem Stand der Forschung jedoch nicht in Zusammenhang mit Schadensmechanismen elektrischer Klemmkontakte gebracht. Die generell schwer zu detektierenden Schadensbilder der SRK konnten im Rahmen dieser Arbeit zwar nicht nachgewiesen werden, die Schadensart soll dennoch an dieser Stelle Erwähnung finden.

Überlagerte zyklische, mechanische Beanspruchungen durch Vibrationen und Medieneinflüsse, bei denen neben der Korrosionsreaktion eine Dehnung des metallischen Werkstoffes als Folge von statischen Zugspannungen ist, ruft die Schwingungsrissskorrosion (Corrosion Fatigue) hervor (Abbildung 81). Sie hängt von einer Vielzahl von Parametern ab (z.B. Werkstoff, Medium, Spannungsausschlag, Lastfolge, Belastungsfrequenz) [129].

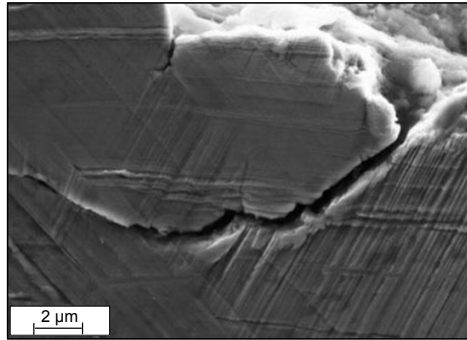


Abbildung 81: REM-Aufnahme eines durch Schwingrisskorrosion hervorgerufenen Fehlerbildes [130]

Grundsätzlich sind Risskorrosionserscheinungen als Interaktion dreier Einflussbereiche anzusehen, dies sind der Werkstoff, der meistens eine dafür besonders kritische Mikrostruktur aufweist (Oberflächenrauigkeit der Kontaktflächen), die gekoppelte mechanische und korrosive Beanspruchung (Vibration und Atmosphäre) und die Form des Bauteils, z.B. durch designbedingte Kerben und ungünstig zur mechanischen Beanspruchungsrichtung angeordneten Querschnitten (A-Spots). Vibrationsbelastete Klemmstellen der Feder-Klammer-Direktkontaktierung werden letztlich von allen drei Einflussbereichen bestimmt. Zwar sind die Mechanismen der Schwingungsrisskorrosion noch nicht genau erforscht, die Wirkung der SRK lässt sich aber abhängig von der Frequenz der Lastwechsel beschreiben [130; 129]. Auch die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen zeigen mit zunehmender dynamischer Beanspruchung stärkere Veränderungen des gemessenen Durchgangswiderstandswertes R_d .

5.3.3 Kontaktierungsfehler

Das Wirkprinzip der Feder-Klammer-Direktkontaktierung bedingt ein Abgleiten des Kontaktelements auf dem Flachleiter. In Abhängigkeit der Systemparameter des Kontaktsystems (Feder-Klammer, Flachleiter, Trägermaterial, Gehäuse) kommt es zu unterschiedlich stark ausgeprägten Fehlern im Kontaktsystem.

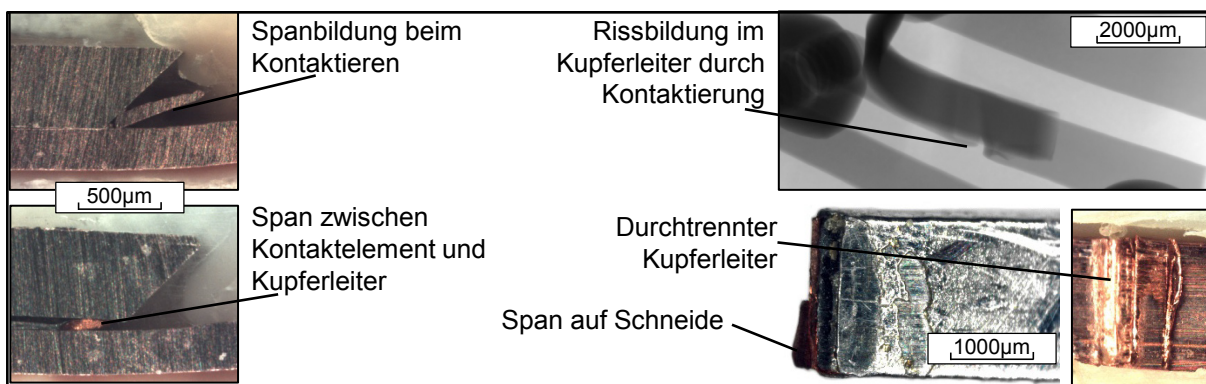


Abbildung 82: Mikroskopie- und Röntgenaufnahmen von Kontaktierungsfehlern

In der Folge können sich von der Ausbildung von Kerben und Schabriefen auf der Leiteroberfläche bis hin zur Spanbildung im Kontaktsystem oder im schlimmsten Fall, der Durchtrennung des Leiters, unterschiedliche Schadensbilder einstellen. Abbildung 82 zeigt Kontaktierungsfehler im Kontaktsystem als das Resultat zu hoher Kontaktierungskräfte. Einen deutlich negativen Einfluss auf die Zuverlässigkeit der elektrischen Verbindungsstelle zeigen vor allem vollständig oder teilweise durchtrennte Leiterbahnen und Spanablagerungen zwischen dem Kontaktelement und dem Kupferleiter. Bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Kontaktierungsversuchen zur Analyse der Verfahrenseinflüsse (Kap. 4) und der Langzeitzuverlässigkeit (Kap. 5) der FKD von ca. 3300 Kontaktierungen konnten in 366 Kontaktsystemen Späne in der Klemmfläche nachgewiesen werden (11 %). Bei insgesamt 31 Proben wurde der Leiter teilweise oder gesamtheitlich durchtrennt (1 %). Mit einer gezielten Auslegung des Kontaktsystems durch Festlegung der Kontaktelementgeometrie und der Wahl eines geeigneten Flachleitertyps lassen sich die dargestellten Effekte jedoch deutlich reduzieren. Eine gesamtheitliche Vermeidung konnte in den durchgeführten Tests jedoch nicht erzielt werden, da es aufgrund von vorwiegend geometrischen Schwankungen der Kontaktelemente und der Kontaktgehäuse immer wieder zu den beschriebenen Fehlerbildern gekommen ist.

5.4 Anwendung von Raffungsmodellen zur Vorhersage der lastabhängigen Ausfallwahrscheinlichkeit

Der eigentliche elektrische Ausfall eines Kontakts durch Unterbrechung des Stromflusses bei einem theoretisch unendlich hohen Durchgangswiderstandswerts R_d ist in der Anwendung ungeeignet, um die Funktion der Verbindung zu beschreiben. Vielmehr werden in der Praxis in Abhängigkeit des Kontaktsystems Grenzwerte für R_d festgelegt, die schon deutlich vor der elektrischen Trennung einen Kontakt als ausgefallen definieren. Der Leiterquerschnitt, die eingesetzte Kontaktierungstechnologie und das Anwendungsfeld der elektrischen Verbindung legen dabei den Grenzwert des zulässigen Durchgangswiderstands R_d fest.

Die vorgestellten Schädigungsmechanismen, vor allem die Ausbildung von Fremdschichten und der mechanische Verschleiß, führen zur einer Erhöhung von R_d und damit zum Ausfall des Kontakts. Die Ausfallwahrscheinlichkeit der Feder-Klammer-Direktkontaktierung soll in dieser Arbeit in Abhängigkeit der Belastungsart anhand der Anwendung von Raffungsmodellen ermittelt werden. Basis hierfür sind die diskutierten Messergebnisse der durchgeführten Dauerbelastungstests.

Neben den üblichen Verfahren die Prüfdauer von elektrischen Verbindungen zu verkürzen, wie Omission (Vernachlässigen nicht-schädigungsrelevanter Lastspiele) oder Frequenzerhöhung der Lastspiele, werden im Versuch oftmals höhere Prüfbeanspruchungen als im realen Betriebseinsatz im Feld getestet. Die überhöhten

Belastungen führen dabei zum beschleunigten Schädigungswachstum und theoretisch zu einem früheren Ausfall. [131]

Durch sogenannte Raffungsmodelle kann der Zusammenhang zwischen der Lebensdauer eines Bauteils und seiner Belastungshöhe durch mathematische Ansatzfunktionen formuliert werden. Raffungsmodelle werden in der Technik bereits seit langer Zeit angewandt. Typische Anwendungsgebiete sind in Bereichen der Betriebsfestigkeitsanalyse von Turbinenläufern oder anderen thermisch-mechanisch hochbeanspruchten Bauteilen zu finden. Aber auch die Lebensdauer elektronischer Komponenten kann mithilfe von Raffungsmodellen beschrieben werden.

Abhängig vom physikalischen Belastungszustand und basierend auf den zugrundeliegenden Schädigungsmechanismen existieren in der Literatur eine Vielzahl unterschiedlicher Modelle, um den oftmals nichtlinearen Zusammenhang zwischen der Lebensdauer und der Belastungshöhe abzubilden. Die Modelle besitzen jedoch keine allgemeine Gültigkeit, sondern sind vielmehr für einen speziellen Anwendungsfall ausgelegt. Voraussetzung für die Anwendung eines Raffungsmodells ist, dass sich der Schädigungsmechanismus zwischen Feld und Versuch nicht ändert [132].

Tabelle 14 gibt eine Übersicht über Raffungsmodelle, die in der Literatur für die Lebensdaueranalysen von Elektronikkomponenten im Allgemeinen Anwendung finden und ordnet sie den anwendbaren Belastungsarten zu.

Raffungsmodell	Belastungsart			
	mechanisch	thermisch	medial	chemisch
Arrhenius		T		E_a
Bayerer		T, ΔT		
Coffin-Manson	$\Delta \varepsilon_{er}$	ΔT		
Eyring-Beziehung		T		
Eyring allg.	f	T		
Lawson		T	rF	
Norris-Landzberg	f	T, ΔT		
Peck		T	rF	

Tabelle 14: Bekannte Raffungsmodelle und deren Anwendungsgebiete

Oftmals wurden die eingesetzten Raffungsmodelle nicht für die Zuverlässigkeitsanalyse elektrischer Kontakte entwickelt, sondern haben ihren Ursprung in anderen Bereichen der Technik. Da die damit beschriebenen Wachstumsmechanismen jedoch auch bei elektrischen Bauteilen auftreten können, wurde ihr Einsatzgebiet um die Analyse der Lebensdauer dieser Komponenten erweitert. Einige Modelle wurden durch ergänzende Terme weiterentwickelt oder mit anderen Modellen kombiniert.

Nachfolgend werden die aufgeführten Ansätze bezüglich ihres ursprünglichen Einsatzgebiets kurz erläutert:

- **Savante Arrhenius** beschreibt durch seinen Ansatz das Verhalten monomerer Reaktionen in der chemischen Kinetik. Ursprünglich charakterisiert er die Abhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten von der Temperatur [133]. Das Modell nach Arrhenius ist weit verbreitet und findet angepasst auch in der Elektronikindustrie für die Beschreibung von Korrosionsreaktionen Anwendung [90].
- Das **Bayerer-Modell** stellt eine Ergänzung des Coffin-Manson-Ansatzes dar. Es wurde speziell für Bipolartransistoren mit isolierter Gate-Elektrode (IGBT) für Power-Module entwickelt [134].
- **Coffin-Manson** beschreibt ursprünglich die Vorhersage der Auswirkungen von Thermoschockversuchen auf Flugzeugturbinenteile im Abgasstrom. Zunächst beinhaltete das Modell die Kriechdehnung $\Delta\epsilon_{er}$, wurde jedoch um Temperaturänderungen ΔT erweitert [135].
- Die **Eyring-Beziehung** basiert auf dem Arrhenius-Ansatz [25] und kommt aus der Quantenmechanik, um Reaktionsgeschwindigkeiten zu berechnen [136]. Der Ansatz erlaubt die Extrapolation von thermisch beeinflussten Oxidationsprozessen.
- Das **verallgemeinerte Eyring-Modell** bezieht neben der Temperaturabhängigkeit eine zweite, nichtthermische Spannung mit ein. Dies kann zum Beispiel eine elektrische Spannung oder auch eine Vibrationsbelastung sein. [131]
- Neben der Beschreibung thermisch-chemischer Prozesse findet sich in der Literatur auch eine Reihe von Modellen, die mediale Belastungen abbilden können. **R. W. Lawson** stellt ein Modell zur Lebensdauervorhersage von kunststoffummantelten Halbleiterbauelementen dar, das den Einfluss der Luftfeuchtigkeit berücksichtigt. [137]
- Der nicht genormte **Norris-Landzberg-Ansatz** berücksichtigt sowohl die Ausfallmechanismen durch Materialermüdung nach Coffin-Manson als auch durch chemische Reaktionen nach Arrhenius. Genauso wie beim Ansatz nach Coffin-Manson lassen sich hier Wöhlerlinien auf thermische Wechsel übertragen. [116]
- Das **Modell nach Peck** wurde von D. Stewart Peck nach einer Untersuchung von 61 Datenpunkten elektronischer Epoxidverglassteile aufgestellt. Es ist zur Lebensdauervorhersage unter feuchten Bedingungen geeignet, weswegen neben der maximalen Temperatur T auch die relative Feuchte rF in die Gleichung eingeht. [138]

5.4.1 Theoretische Ansätze der angewandten Raffungsmodelle

Für die Untersuchung der Anwendbarkeit von Raffungsmodellen unter thermischer Last in Form von Schock-, Wechsel- und Auslagerungsbelastungen der FKD, kommen die vorgestellten Modelle nach Arrhenius, Coffin-Manson und Norris-Landzberg zum Einsatz. Alle drei Methoden ermöglichen die Beschreibung des Schadenswachstums durch thermische Einflüsse.

Die Zuverlässigkeitsuntersuchungen der FKD haben gezeigt, dass die simulierten Schädigungsmechanismen vor allem chemischen und mechanischen Ursprungs sind. Arrhenius basiert auf der Beschreibung chemischer Mechanismen, Coffin-Manson auf mechanischen Vorgängen. Norris-Landzberg kombiniert beide. Die nachfolgenden Ausführungen zeigen die Anwendung und den Vergleich der Modelle auf die durchgeführten Lebensdaueruntersuchungen. Gleichzeitig werden die mathematischen Zusammenhänge der jeweiligen Modelle erläutert.

Arrhenius

DIN EN ISO 2578 beschreibt die Anwendung des Modells bei statischen Temperaturversuchen und dient zur Bestimmung der Temperatur-Zeit-Grenzen bei konstanter Wärme. Die Norm gilt für die geraffte Analyse von Alterungsmechanismen von Kunststoffen im Allgemeinen [68]. Nach [139] kann der allgemeine Arrhenius-Ansatz ebenfalls auf Lebensdaueruntersuchungen unter erhöhten thermischen Bedingungen angewandt und direkt auf die Zyklenanzahl bis zum Ausfall N_F , z.B. von Temperaturschocktests, bezogen werden:

$$N_F = A_0 \cdot e^{\frac{E_A}{k_b \cdot T_{max}}} \quad (5.2)$$

In (5.2) entspricht A_0 der Reaktionsgeschwindigkeit bei der Temperatur T_{max} . Im Falle eines Temperaturschock- oder Temperaturwechseltests wird die Maximaltemperatur verwendet. k_b beschreibt die Boltzmann-Konstante¹⁸ und E_A die Aktivierungsenergie, welche bei Schadensmechanismen in der Elektrotechnik typischerweise zwischen 0,05 eV und 1 eV liegt [90].

Coffin-Manson

Das ursprüngliche Coffin-Manson-Modell beinhaltet die Kriechdehnung, da die Auswirkungen von Thermoschockversuchen auf Flugzeugturbinenteile im Abgasstrom beschrieben wurden [140; 135]. Mithilfe von Wöhlerlinien wird der stationäre Lastfall auf variable Lasten übertragen. Allgemein stellen Wöhlerlinien die Werkstoffermüdung dar. Sie können jedoch auch auf den thermischen Lastfall übertragen werden, wenn die akkumulierte, äquivalente Kriechdehnung oder die

¹⁸ In den Untersuchungen wird mit $k_b = 8,617 \cdot 10^{-5}$ eV/K gerechnet.

dissipierte, inelastische Energiedichte als Schädigungsmaß Verwendung finden [139].

$$N_F = C_0 (\Delta \varepsilon_{er})^{-q} \quad (5.3)$$

Um die Anzahl der Zyklen (N_F) bis zum Versagen zu bestimmen, muss eine materialabhängige Konstante C_0 mit einem Faktor, in den neben der irreversiblen Kriechdehnung $\Delta \varepsilon_{er}$ auch der Exponent q eingeht, multipliziert werden. Auf Temperaturschockversuche angewandt wird die Kriechdehnung durch den Temperaturhub ΔT ersetzt. In diesem Fall wird der im elastischen Verformungsbereich des Materials liegende Temperaturhub vernachlässigt, da er im Vergleich mit dem gesamten Temperaturhub gering ausfällt. [135]

$$N_F = C_0 (\Delta T)^{-q} \quad (5.4)$$

In (5.3) und (5.4) stellt q den Schädigungsexponenten dar. Er hängt sowohl vom Material und Schädigungsmechanismus ab, als auch von der abzubildenden Lastart (Thermoschock- oder Vibrationstests) [139]. C_0 und q können empirisch oder durch FEM-Simulationen ermittelt werden [135]. Aus (5.4) geht hervor, dass N_F im Vergleich zum Ansatz nach Arrhenius nicht von der oberen Grenztemperatur T_{max} abhängt, sondern vom Temperaturhub ΔT . Verwendung findet der Ansatz deshalb vor allem bei Temperaturwechseltests und beschreibt Ausfallmechanismen durch Materialermüdung wie Delamination oder Risswachstum. In JEDEC JEP 122C¹⁹ wird die Anwendung des Modells darüber hinaus auf Thermoschocktests von Halbleiterbauteilen beschrieben [116].

Norris-Landzberg

Der nicht genormte Norris-Landzberg-Ansatz berücksichtigt sowohl die Ausfallmechanismen, hervorgerufen durch Materialermüdung nach Coffin-Manson als auch aufgrund von chemischen Reaktionen nach Arrhenius. Analog zum Ansatz nach Coffin-Manson lassen sich Wöhlerlinien auf thermische Wechsel übertragen.

$$N_F = C_2 \cdot f^{C_3} \cdot (\Delta T)^{-q} \cdot e^{\frac{E_A}{k_B \cdot T_{max}}} \quad (5.5)$$

In (5.5) stellt C_2 einen Koeffizienten, f die Frequenz der Temperaturwechsel, C_3 den dazugehörigen Exponenten und q den Schädigungsexponenten dar [15]. Der Ansatz nach Norris-Landzberg setzt sich aus den Modellfunktionen nach Arrhenius und Coffin-Manson zusammen. Dieser Zusammenhang erklärt damit auch warum der Ansatz nach Norris-Landzberg oft als modifizierter, um den Arrhenius-Teil erweiterten Coffin-Manson-Ansatz bezeichnet wird [116].

¹⁹ JEP 122C: Failure mechanisms and models for semiconductor devices; Die JEDEC Solid State Technology Association ist eine amerikanische Organisation zur Standardisierung von Halbleitern.

5.4.2 Vergleichende Bewertung der Raffungsmodelle

Grundlage für die Anwendung der Raffungsmodelle zur Vorhersage der Ausfallwahrscheinlichkeit des Feder-Klammerdirektkontakts sind die Versuchsergebnisse der Temperaturschockmessungen aus Kapitel 5.2.1. Eingangswerte für die Anwendung der Raffungsmodellansätze sind der Temperaturhub ΔT und die maximale Temperatur T_{\max} der getesteten Proben. Die unbekannten Koeffizienten der Raffungsmodelle werden mit Hilfe der Methode der kleinsten Fehlerquadrate berechnet. Hierbei werden die jeweiligen Koeffizienten geschätzt und die Zyklenzahl bis zum Ausfall eines Kontakts N_f nach (5.2), (5.4) und (5.5) berechnet und mit der tatsächlich geprüften Zyklenzahl verglichen. Die iterative Anpassung der Koeffizienten ermöglicht schließlich die Bestimmung der fehlenden Koeffizienten. In Abhängigkeit vom mathematischen Aufbau des Modells und den damit beschriebenen physikalischen Effekten lässt die Vorgehensweise eine unterschiedlich gute Näherung an die gemessenen temperaturhubabhängigen Ausfallzeiten und schließlich einen Vergleich der einzelnen Ansatzfunktionen zu. Dieser Ansatz wird typischerweise bei der Anwendung von Raffungsmodellen auf empirisch ermittelte Messdaten verfolgt und ist in unterschiedlichen wissenschaftlichen Arbeiten beschrieben [131; 135; 137; 116].

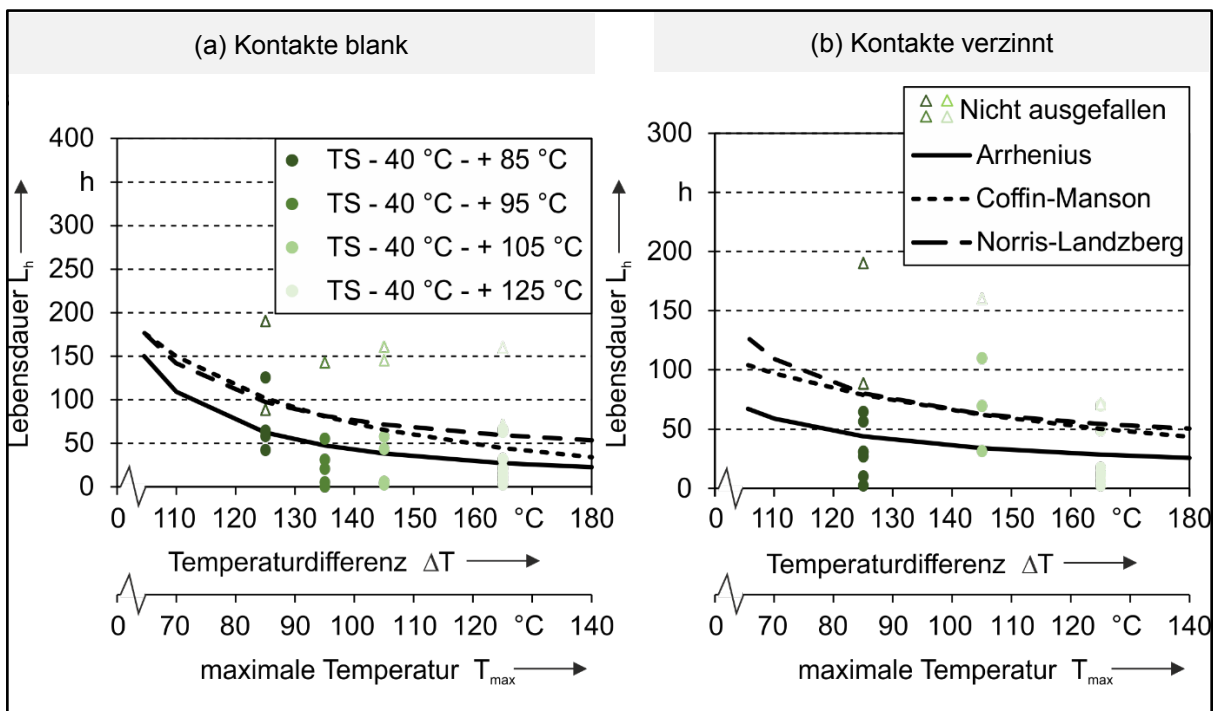


Abbildung 83: Ausfallzeiten bei Temperaturschocktests und Interpolation der Messdaten durch verschiedene Raffungsmodellansätze

Um die Zyklenzahl N_f bis zum Ausfall eines Feder-Klammer-Direktkontakts bestimmen zu können, muss zuerst ein Ausfallkriterium für den online-gemessenen Durchgangswiderstand R_d definiert werden. Aufgrund fehlender Normregelungen für zulässige Abweichungen vom Ausgangswert von R_d unter Last wird der Grenzwert

aus der Lieferantenvorschrift 214 für KFZ-Steckverbinder abgeleitet. Als ausgefallen gilt jene Probe, deren Durchgangswiderstandwert sich um $15\text{ m}\Omega$ erhöht. Der vorgeschlagene Wert orientiert sich an Crimpverbindungen mit Rundleiterquerschnitten von $0,35\text{ mm}^2$ und entspricht in guter Näherung dem Rechteckquerschnitt der in den Belastungstest kontaktierten Flachleiter ($0,31\text{ mm}^2$). Zur Ermittlung der Ausfallzeit der Prüflinge kommt ein Online-Messsystem zum Einsatz, das eine kontinuierliche Aufzeichnung des Durchgangswiderstands während der Dauerbelastungstests ermöglicht. Der Messaufbau und die Messbedingungen entsprechen den der LV 214 geforderten Prüfbedingungen (Anhang 5.1).

Abbildung 83 zeigt die nach der beschriebenen Vorgehensweise ermittelten Funktionen der betrachteten Raffungsmodelle. Aus Gründen der Anschaulichkeit wurde die Anzahl der Zyklen N_f bis zum Ausfall eines Kontakts in die Lebensdauer umgerechnet²⁰. Die errechneten Koeffizienten der angewandten Raffungsmodellansätze können Anhang 5.1 entnommen werden. Die Gegenüberstellung der Ergebnisse unbeschichteter (a) und beschichteter (b) Kontaktelemente verdeutlicht die bereits in den vorangegangenen Kapiteln diskutierte beschleunigte Alterung verzinnter Kontaktsysteme der FKD. Die Betrachtung der mittleren quadratischen Abweichung (MQF) zwischen den Funktionen der Raffungsmodelle und den Messergebnissen zeigt, dass der Ansatz nach Arrhenius die beste Annäherung zu den empirisch ermittelten Lebensdauern L_h erlaubt (Tabelle 15). Obwohl die Theorien nach Coffin-Manson und Norris-Landzberg einen ähnlichen exponentiellen Verlauf abbilden, weichen beide um etwa 40 % vom Arrhenius-Schätzwert ab.

Modell	Mittlere quadratische Abweichung (MQF) von gemessenen Lebensdauer	
	unbeschichtet	beschichtet
Arrhenius	57,04	53,17
Coffin-Manson	97,98	90,46
Norris-Landzberg	98,87	91,17

Tabelle 15: Mittlere quadratische Abweichung der Raffungsmodellansätze von den messtechnisch erfassten Ausfallzeiten

Um die Abweichungen der jeweiligen Modelle von den Messergebnissen zu erklären, müssen die zugrundeliegenden physikalischen Effekte, die durch die einzelnen Modelle beschrieben werden, betrachtet werden. Die Arrhenius-Gleichung beschreibt allgemein quantitative Temperaturabhängigkeiten bei chemischen Prozessen und gilt als phänomenologische Beziehung für viele chemische Prozesse. Die Gleichungen von Coffin-Manson und Norris-Landzberg beschreiben Potenzfunktionen, die ihren

²⁰ Die Haltezeit der Warm- und Kaltphase bei Temperaturschocktests ist nach [87] mit 15 min definiert. Bei einer Umlagerungszeit von maximal 10 s wird im Rahmen dieser Arbeit eine Zyklusdauer mit 30 min angesetzt.

Ursprung in der Vorhersage des werkstofftechnischen Effekts des Risswachstums haben. Viele Ansätze im Bereich der Betriebsfestigkeit, bei denen das Risswachstum der bestimmende Schadensmechanismus ist, basieren, analog zu den betrachteten Ansätzen auf Potenzfunktionen.

Die nachgewiesenen Schädigungseffekte, die unter thermischer oder mechanischer Last bei der FKD auftreten können, haben gezeigt, dass vor allem chemische Prozesse bei den Alterungsmechanismen dominieren, jedoch nicht mechanische. Zwar treten bei Temperaturschocktests neben chemischen Reaktionen, wie Oxidation, der Ausbildung intermetallischer Phasen oder dem Niederschlag von Polymerisationsprodukten, auch mechanische Schadensbilder, z.B. durch die Aufrauung der Kontaktfläche durch den Abriss von Kaltverschweißungszonen, auf. Bestimmend für die Erhöhung des Übergangswiderstands ist demnach die Ausbildung von Fremdschichten, hervorgerufen durch vorwiegend chemische Prozesse. Schädigungen aufgrund von Rissbildung in der Kontaktstelle, wie sie Coffin-Manson und Norris-Landzberg ursprünglich beschreiben, konnten die Lebensdaueranalysen unter thermischen Wechselbelastungen nicht nachweisen.

5.5 Anwendungspotentiale für eine zuverlässige Verbindungstechnologie im Kfz

Neben den diskutierten Temperaturschocktests werden für die Ableitung der Anwendungspotentiale zusätzlich auch die Ergebnisse aus Temperaturwechseltests und Temperaturlagerung für die Schärfegrade S1 - S3 herangezogen. Analog zu den in Kapitel 5.4.2 vorgestellten Verfahren werden für beide thermische Belastungsarten der Ansatz nach Arrhenius auf die empirisch ermittelten Daten angewandt.

Vorgeschriebene Prüfdauern für Temperaturbelastungstests

Zwar stimmen die in den Untersuchungen angewendeten Belastungsprofile der Dauerbelastungstests mit den Vorgaben geltender Prüfnormen überein, für eine grundlegende Qualifizierung der Zuverlässigkeit wurde die Prüfdauer T jedoch an die Ausfallzeiten der getesteten Prüflinge angepasst. Um die gemessenen Lebensdauern mit den von OEM geforderten Lebensdauern für Bordnetzkomponenten zu vergleichen, sind in Tabelle 16 die in [90] festgelegten Prüfdauern der Lebensdaueruntersuchungen für E/E-Komponenten aufgeführt.

Tabelle 16 fasst die relevanten Prüfdauern bei einer angenommenen Lebensdauer im Feld von 10 Jahren und einer Kilometer-Laufleistung des Kfz von 400.000 km zusammen.

	Prüfdauer je Schärfegrad in h			Bemerkungen
	S1	S2	S3	
Auslagerung	1100	1400	1450	-
Temperaturwechsel	1050	1200	1250	Haltezeit 30min., Zyklendauer 132min.
Temperaturschock	500h für Komponenten im Motor 100h für alle anderen Komponenten			Haltezeit 30min., Zyklusdauer 60min.

Tabelle 16: Schärfegradabhängige Prüfdauern nach [89; 90]

Vergleich der gemessenen Lebensdauern mit vorgeschriebenen Prüfdauern

Neben den in Kapitel 5.4.2 vorgestellten Versuchsergebnissen unter dem Einfluss von Temperaturschocktests stellt Abbildung 84 ebenfalls die Ergebnisse aus Temperaturwechseltests und Temperaturlagerungstests dar. Neben den symbolisch gekennzeichneten gemessenen Lebensdauern sind analog zu der Herangehensweise aus Kapitel 5.4.2 die Lebensdauerkennlinien nach Arrhenius dargestellt.

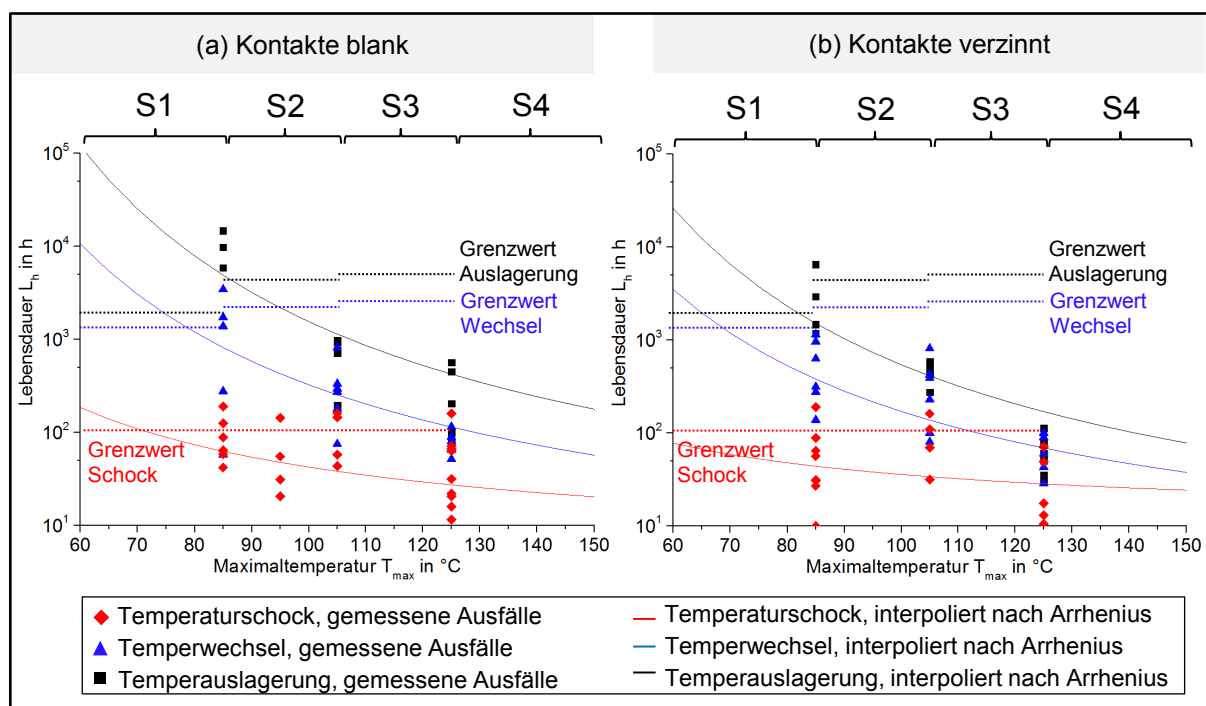


Abbildung 84: Lebensdauerkennlinien für thermische Auslagerungs-, Wechsel- und Schockbeanspruchungen

Weiterhin sind die vorgeschriebenen Prüfdauern aus Tabelle 15 als horizontal verlaufende Grenzlinien abgebildet. Die flach verlaufenden Lebensdauerkurven zeigen deutlich, dass Temperaturschocktests die FKD am stärksten schädigen und das Schädigungspotential vom Temperaturwechseltest hin zur thermischen Auslagerung sinkt. Gleichzeitig zeigt Abbildung 84, dass unbeschichtete Kontakte (a)

in allen thermischen Belastungstests höhere Lebensdauern aufweisen als beschichtete Federelemente (b). Im Hinblick auf das Forschungsziel dieser Arbeit, ein universell einsetzbares Kontaktierungsverfahren von Elektronikkomponenten direkt im Einbauort des Automobils zu entwickeln, sind vorwiegend Einbauräume mit Prüfanforderungen von S1 – S2 als relevant für eine vollautomatisierte Montage anzusehen. Vergleicht man die gemessenen Lebensdauern mit den nach Tabelle 16 definierten Prüfdauern für E/E-Komponenten, zeigt sich, dass die Zuverlässigkeitsanforderungen der geltenden Prüfvorschriften nur teilweise vom Kontaktsystem der FKD erfüllt werden können.

Ein Einsatz der Kontaktierungstechnologie für Bauräume mit Prüfanforderungen des Schärfegrades 1 scheint für (a) möglich. Die erzielten Lebensdauern der Feder-Klammer-Kontakte erfüllen in den Auslagerungsversuchen bei S1 die Vorgaben deutscher OEM. Auch in Wechsel- und Schocktests zeigen gemessene Kontakte teilweise höhere Lebensdauern, als der geforderte Grenzwert. Die interpolierten Lebensdauer kennlinien nach dem Modellansatz nach Arrhenius verlaufen jedoch für Wechsel- und Schocktests bereits unterhalb der eingezeichneten Grenzwerte. Mit steigenden Temperaturhub für S2 - S4 sinkt die in den Versuchen nachgewiesene Lebensdauer deutlich und liegen unterhalb der vorgeschriebenen Prüfzeiten. Beschichtete Kontaktsysteme (b) überstehen hingegen keine der vorgegebenen Prüfdauern.

Die Gründe für die niedrigen Lebensdauerwerte der neuartigen Kontaktierungstechnologie unter gerafften Prüfbedingungen sind vielfältig. Die Herstellungstechnologien der Komponenten des Kontaktsystems (additive Fertigung des Kontaktgehäuses, Laserstrahlschneiden und Schneid-Biegeprozess der Kontaktklammern) sind als prototypisch anzusehen, um im Rahmen der Forschungsarbeiten eine flexible Geometriegestaltung zu ermöglichen. Die flexiblen Produktionstechnologien führen zu schwankenden geometrischen Parametern des Kontaktelements ($\phi: 60^\circ \pm 3^\circ$, $l: 6 \text{ mm} \pm 0,4 \text{ mm}$) und des Kontaktgehäuses (Maßhaltigkeit $\pm 0,3 \text{ mm}$). In Serie hergestellte Crimp-Kontakte für Automotiv-Anwendungen am Beispiel eines Crimps für Leiterquerschnitte von bis zu $0,35 \text{ mm}^2$ der Fa. TE-Connectivity erzielen deutlich höhere Maßhaltigkeiten ($l: 11 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$)²¹. Auch geeignete Steckergehäuse können maßgenauer gefertigt werden (Maßhaltigkeit $\pm 0,2 \text{ mm}$)²². Da das Kontaktbild der FKD von den geometrischen Parametern des Kontaktsystems abhängt, führen die geometrischen Abweichungen gleichzeitig zu einer schwankenden Verbindungsqualität und einem frühzeitigen Ausfall unter Last.

²¹ Basierend auf den Abmessungen des Male-Crimps AMP Get .64 Connector System Nr. 1-1419158-6

²² Basieren auf den Abmessungen eines zum genannten Crimp passenden Steckergehäuses AMP E-J II+ Connector Nr. 93-4072-006-1

Eine weitere wesentliche Ursache, die zu geringen Lebensdauern der FKD führt, liegt im Prozess selbst. Die einseitige Kontaktierung des Flachleiters bedingt im Gegensatz zu Doppelfederkontakten, wie sie typischerweise bei Kfz-Steckverbindern eingesetzt werden, den Nachteil, unterhalb der Klemmstelle befindliche Komponenten, wie die untere Isolationsschicht und das Trägersubstrat punktuell zu komprimieren. Zusammen mit thermisch aktivierten Vorgängen der Spannungsrelaxation, nicht nur im Klammerwerkstoff, sondern auch in den genannten Komponenten, verringern diese Mechanismen die Kontaktnormalkraft F_N und erhöhen das Ausfallrisiko. Die ortsflexible Kontaktierung bereits montierter Flachleiter mittels des Prinzips der FKD bedingt somit gleichzeitig eine, aus mechanischer Sicht geminderte Belastbarkeit der elektrischen Verbindungsstelle, v.a. unter thermischer Last.

Optimierungspotentiale der FKD

Optimierungsmaßnahmen können dennoch die Zuverlässigkeit der FKD steigern, um auch höheren Prüfanforderungen zu genügen. Einerseits kann der Einsatz großserientauglicher Produktionsprozesse, wie sie heutzutage für die Produktion von Crimpkontakten und Komponentengehäusen eingesetzt werden, dazu beitragen, die Streuung der geometrischen Parameter zu reduzieren. Andererseits kann auch die weitere Optimierung der Teilkomponenten des Kontaktsystems die Zuverlässigkeit weiter steigern. Neben dem Einsatz thermisch stabilerer Werkstoffe, z.B. kurzfaserverstärkte Gehäusewerkstoffe, wie sie nach heutigen Stand der Technik in vielen Bereichen im Kfz bereits Anwendung finden, jedoch mithilfe additiver Fertigungstechnologien noch nicht sicher verarbeitet werden können, sind auch geometrische Anpassungen der jeweiligen Teilkomponente des Kontaktsystems denkbar. Dem Abbau der Kontaktkraft kann z.B. durch eine optimierte Nachdruckzone unter der Einbringungen eine zusätzlichen Federelements in das Gehäuse entgegengewirkt werden.

Ein weiterer Ansatz, um die Ausbildung von Fremdschichten und den abrasiven Verschleiß durch Relativbewegungen in der Kontaktfläche zu reduzieren, kann durch den Einsatz von sogenannten Kontaktschmiermitteln erfolgen. Temperaturschocktests des Schärfegrades 3 haben gezeigt, dass die mittlere Lebensdauer von Feder-Klammerdirektkontakten mit dem Einsatz von Kontaktschmiermittel in der Kontaktstelle um mehr als 100 Prozent gesteigert werden kann. Vor allem beschichtete Federklammern zeigen in den Versuchen deutlich spätere Ausfallzeiten. Bei der Untersuchung von mit Gold, Silber und Zinn beschichteten Kontakten in [141] wurde für alle Reibversuche übereinstimmend herausgefunden, dass ein passender Schmierstoff je nach Material den Kontaktwiderstand verringern kann. Durch den Schmierstoff wird Oxidation verhindert, die Reibung verringert und Abriebprodukte aus der Kontaktzone entfernt. Die Wirksamkeit des Kontaktschmierstoffes ist hierbei abhängig von der Adhäsion zwischen Schmierstoff und Kontaktoberfläche,

Bedeckung der Kontaktzone und der Dicke der Schmierstoffschicht. Auch in [142] wurden die Auswirkungen eines Schmierstoffes auf mit Zinn beschichtete Kupferkontakte in Reibkorrosionsversuchen untersucht. Über eine Dauer von 50 Zyklen erhöhte sich der Kontaktwiderstand bei mit Schmiermittel belegten Kontakten nur geringfügig, wohingegen die Kontakte ohne Schmiermittel eine starke Erhöhung auf bis zu $10\ \Omega$ erfahren.

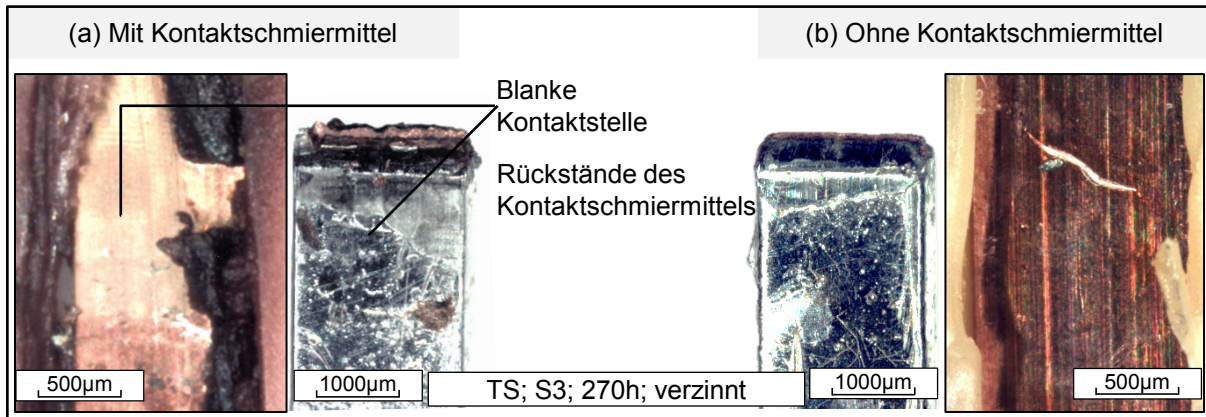


Abbildung 85: Vergleich der Kontaktfläche mit und ohne Kontaktschmiermittel nach Temperaturschocktests

Zwar steigt mit dem Einsatz von Kontaktschmiermittel der Montageaufwand der FKD, da die leitfähige Paste in die Kontaktfläche transportiert werden muss und die Handhabung von Medien automatisierte Montageprozesse zusätzlich komplexer gestaltet. Dennoch zeigen die erste Versuchsreihen bei Temperaturschocktestes im höchsten Schärfegrad S3 bei $T_{\max}=125^{\circ}\text{C}$ eine erhebliche Verbesserung der Langzeitzuverlässigkeit der elektrischen Verbindungsstelle. Vor allem der oxidative und abrasive Verschleiß kann durch den Einsatz von Kontaktschmiermittel deutlich reduziert werden (Abbildung 85a).

6 Hochfrequenz-Eigenschaften der Feder-Klammer-Direktkontaktierung

Die Integration zukünftiger Fahrzeugfunktionen in ein modernes Kfz macht eine echtzeitfähige Signalübertragung von hohen Datenraten erforderlich und stellt gleichzeitig hohe Anforderungen an die zulässige Fehlerrate bei der Signalübermittlung. Als exemplarische Anwendungen im Automobil können innovative Radarsysteme genannt werden, die durch eine sensorgestützte Erfassung der Fahrzeugumgebung einen Beitrag zur erhöhten Verkehrssicherheit leisten. Auch der Einsatz von Funktionen, die eine Car-2-Car- oder Car-2-x-Kommunikation ermöglichen, oder Kamerasysteme zur Überwachung des Fahrzeugumfelds werden zukünftig zu einem Anstieg der Datenraten im Bordnetz führen. [1]

Die steigenden Anforderungen an die Hochfrequenzeigenschaften der verschiedenen Komponenten und Baugruppen des Bordnetzes, um Signale möglichst verlustarm und unempfindlich gegenüber Störungen zu übertragen, stellt die Entwickler neuer Systeme vor große Herausforderungen. Neben Funktionskomponenten, wie Sensoren oder Antennen, kommt hierbei auch den Übertragungsstrecken aus Leitungen und Kontaktstellen eine wichtige Rolle zu. [13]

Ein Lösungsansatz, der den technischen Wandel der Bordnetzarchitektur ermöglichen soll, ist die Feder-Klammer-Direktkontaktierung. Als Bindeglied zwischen E/E-Komponente und Leitungsnetzwerk muss auch eine universell einsetzbare Kontaktierungstechnologie für die automatisierte Anbindung von flachleiterbasierten Bordnetzsystemen den steigenden Anforderungen an die Hochfrequenzeigenschaften genügen. Dieses Kapitel stellt die Ergebnisse der Analyse und Charakterisierung der Hochfrequenzeigenschaften der neuen Kontaktierungsmethode vor und diskutiert dessen Potential für die Übertragung hoher Datenraten in zukünftigen Bordnetzsystemen.

6.1 Anforderungen an die Übertragung hoher Datenraten

In modernen Fahrzeugen kommen unterschiedliche Kommunikationssysteme zum Einsatz, deren Einsatzgebiete von der Motorsteuerung über diverse Fahrdynamikprogramme und Sicherheitsmechanismen bis hin zu verschiedensten Komfort- und Infotainment-Anwendungen reichen. Die Kommunikation zwischen den Elektronikkomponenten wird über Bussysteme bewerkstelligt. Der ständige Zuwachs an neuen Fahrzeugfunktionen hat dabei zur Einführung immer neuer lokaler Sub-Bustechnologien im Kfz geführt.

6.1.1 Moderne Bussysteme im Kraftfahrzeug

Abhängig von den zu übertragenden Datenraten lassen sich Automobil-Bussysteme in verschiedene Klassen einteilen. Der CAN-Bus (Controller Area Network) ist eines

der verbreitetsten ereignisgesteuerten Bussysteme und erfüllt weiche Echtzeitanforderungen in der Kommunikation für Anwendungen wie ABS oder der Motorsteuerung. [13]

Ein weiterer lokaler Sub-Bus ist das LIN (Local Interconnect Network), das zur Übertragung geringer Datenraten eingesetzt wird, wie z.B. für die Steuerung der automatischen Türverriegelung oder der elektrischen Fensterheber. Ein hart echtzeitfähiges und zeitgesteuertes System stellt FlexRay dar, das deterministische Übertragungszeiten zwischen den einzelnen Steuergeräten garantiert und die Basis für künftige hochsicherheitskritische Drive-by-Wire-Fahrzeugsysteme bietet [9].

Für Multimediaanwendungen, die besonders breitbandige Hochleistungskommunikationssysteme zur Übertragung qualitativ hochwertiger Video-, Audio- und Sprachdaten innerhalb des Fahrzeuges benötigen, ist eine gängige Lösung der Media Oriented Systems Transport (kurz: MOST). [143]

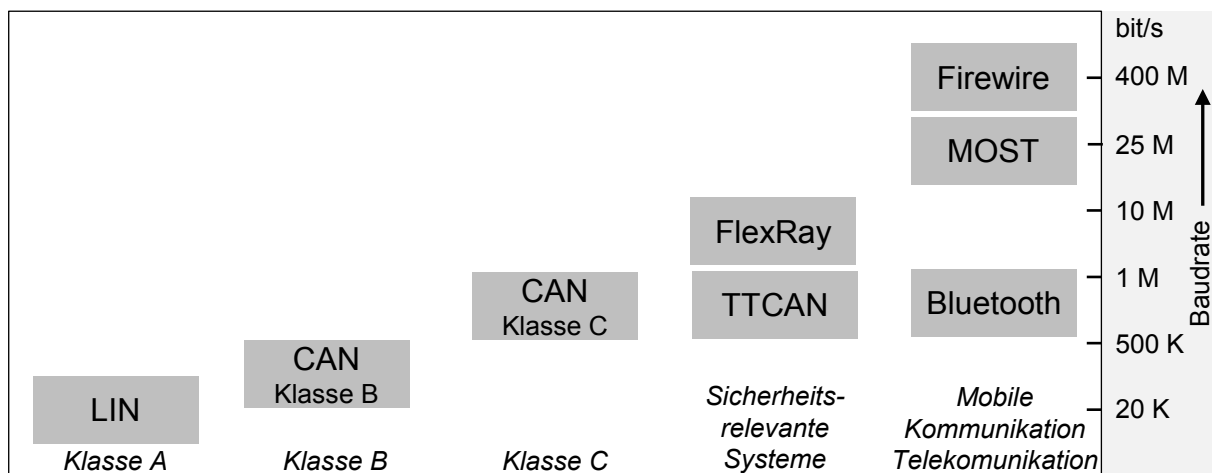


Abbildung 86: Übertragbare Datenraten heutiger Bussysteme in Anlehnung an [13]

In Abhängigkeit der übertragenen Datenraten finden im Kfz verschiedene Leiterstrukturen Verwendung. Neben klassischen metallischen Rundleitern wie Single Wire oder Twisted-Pair Leitungen, kommen bei sehr hohen Datenraten ab 10 Mbit/s ebenfalls kunststoffbasierte Lichtleitfaserleitungen zum Einsatz. [9]

Der Skineffekt führt dazu, dass metallische Rundleiter bauraum- und gewichtsbezogen für HF-Anwendungen nicht optimal genutzt werden. Gleichzeitig erhöht die undefinierte Position der Rundleiter durch die manuelle Montage des physischen Bordnetzes die Gefahr der elektromagnetischen Beeinflussung der verbauten Fahrzeugkomponenten. Störungen, unsichere Betriebszustände oder Unfälle durch eine elektromagnetische Einstrahlung auf die Bordelektronik (ABS, Airbag etc.) werden dabei durch aufwändige Abschirmmaßnahmen vermieden [2].

Die automatisierte Bordnetzmontage von Rechteckleitern ermöglicht aufgrund der genau kalkulierbaren Lage der Einzeladern im Vergleich zu konventionellen Rundleiterstrukturen die Durchführung von vereinfachten EMV-Berechnungen und

EMV-Optimierungen. Flachleittersysteme bieten nach Einschätzung von Experten ein hohes Entwicklungspotential für HF-optimierte Leitungsnetze und können den anhaltenden Trend der Elektrifizierung und der steigenden Vernetzung im Kfz zukünftig eine technologische Basis geben [3].

6.1.2 Hochfrequenztechnische Störgrößen koplanarer Leiter

Eine Reflexion in der Signalübertragung entsteht immer dann, wenn sich die Ausbreitungsbedingung, beschrieben durch den Leitungswellenwiderstand Z , für die Welle ändert. Z ist von den geometrischen Querschnittsabmessungen und den Materialeigenschaften der Leiterstruktur abhängig und wird aus dem Verhältnis von Spannungswelle zu Stromwelle gebildet. Leitungswellenwiderstände einfacher Leitergeometrien lassen sich dabei analytisch formulieren. [144]

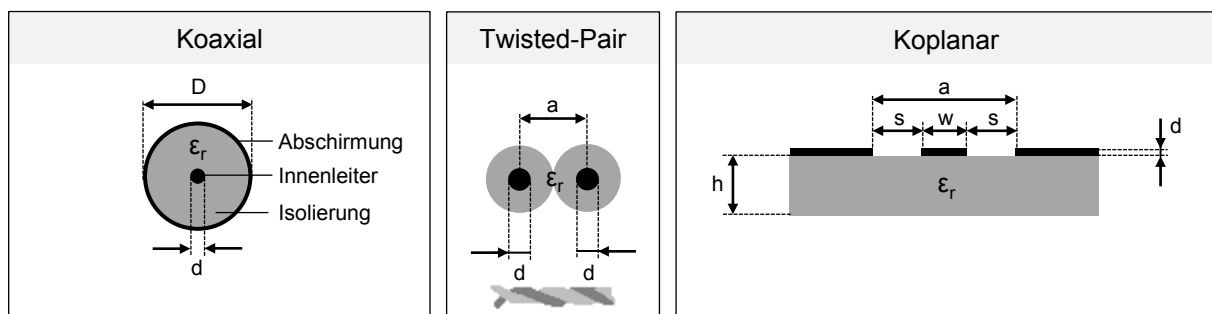


Abbildung 87: Leiterstrukturen zur Signalübertragung in Anlehnung an [144]

Koaxialkabel stellen allgemein eine typische Übertragungsleitung in der Hochfrequenztechnik dar. Der Leitertyp setzt sich aus einem Innenleiter und einem dazu konzentrisch angeordneten Außenleiter, der gleichzeitig als Massebezug und Abschirmung fungiert, zusammen (Abbildung 87). In kraftfahrzeugtechnischen Anwendungen finden neben Koaxialleitern vor allem Twisted-Pair-Leitungen Verwendung. Der helixförmige Leitungspfad führt dabei zu einem unempfindlicheren Verhalten gegenüber äußeren elektromagnetischen Feldern und reduziert das Übersprechen zwischen den Leitungspaaren [145].

Koplanarleitungen stellen eine weitere Struktur zur Führung von Signalen dar und befähigen aufgrund der planaren Anordnung zur Kontaktierung mittels der Feder-Klammer-Direktkontaktierung. Der Leitungstyp setzt sich aus drei symmetrisch und in einer Ebene angeordneten Streifen- oder Rechteckleitern zusammen. Die beiden äußeren Leiter dienen der Masseführung, der innere Leiter stellt die Signalleitung dar. Die definierte Leiteranordnung führt zu einer symmetrischen Feldverteilung und einer guten Integrierbarkeit bei der Auslegung von Schaltungen [18].

Der Leitungswellenwiderstand Z wird von der Geometrie der Leitung und der relativen Permittivität ϵ_r des Isolationsmaterials beschrieben. Für Koaxial- und Twisted-Pair-Kabel, als typische Anwendungen im Automobilbau, und der

Koplanarleitung zur Kontaktierung mittels der FKD gelten für die in Abbildung 89 dargestellten Leitergeometrien folgende Zusammenhänge für Z:

Koaxial	Twisted-Pair	Koplanar	
$Z = \frac{\mu_0 c}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \ln \frac{D}{d}$	$Z = \frac{\mu_0 c}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \ln \frac{2a}{d}$	$Z = \frac{\mu_0 c}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \left(\ln 2 \frac{1 + \sqrt{\frac{w}{a}}}{1 - \sqrt{\frac{w}{a}}} \right)^{-1}$	(6.1-3)

Besteht ein Signalpfad aus Abschnitten mit unterschiedlichen Leitungswellenwiderständen kommt es an den Grenzflächen zu Diskontinuitäten, wodurch Reflexionen und folglich Störungen des Signals hervorgerufen werden. Die Ursprünge von Diskontinuitäten sind vielfältig. Querschnittsänderungen durch Fehlstellen oder eine abrupte Richtungsänderung (z.B. Knick) des Leiters stellen genauso eine Störgröße dar, wie Kontaktstellenübergänge zu einem anderen Leiter.

In der Hochfrequenztechnik werden zur Beschreibung der Reflexions- und Transmissionseigenschaften von Schaltungen dimensionslose Streuparameter S verwendet. Aus den Streuparametern können Rückschlüsse auf die Übertragungseigenschaften einer Hochfrequenzkomponente gezogen werden. Sie bilden den Quotienten aus den jeweiligen Wellenparametern und beschreiben den Zusammenhang zwischen einlaufender und auslaufender normierter Leistungswelle. Streuparameter lassen sich mit modernen Netzwerkanalysatoren reproduzierbar messen und dienen daher in der Hochfrequenztechnik der Beschreibung von Schaltungen.

Der erste Index eines Streuparameters beschreibt das Tor, an dem eine Welle austritt, der zweite Index das Tor, an dem Leistung eingespeist wird. Sind die Indizes gleich s_{ii} , handelt es sich um Reflexionsfaktoren, sind sie ungleich s_{ij} , werden sie als Transmissionsfaktoren bezeichnet. Die Streuparameter S sind folgendermaßen definiert [144]:

$$S_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0} = r_1 \quad \begin{array}{l} \text{Eingangsreflexionsfaktor} \\ \text{bei angepasstem Ausgang} \end{array} \quad (6.4)$$

$$S_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0} \quad \begin{array}{l} \text{Vorwärtstransmissionsfaktor} \\ \text{bei angepasstem Ausgang} \end{array} \quad (6.5)$$

$$S_{12} = \left. \frac{b_1}{a_2} \right|_{a_1=0} \quad \begin{array}{l} \text{Rückwärtstransmissionsfaktor} \\ \text{bei angepasstem Eingang} \end{array} \quad (6.6)$$

$$S_{22} = \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1=0} = r_2 \quad \begin{array}{l} \text{Ausgangsreflexionsfaktor} \\ \text{bei angepasstem Eingang} \end{array} \quad (6.7)$$

Die in Abbildung 88 dargestellte einpolige Darstellung dient der Verdeutlichung der in (6.4) bis (6.7) beschriebenen Beziehungen und zeigt die allgemeine Beschreibung fortlaufender Wellengrößen a und rückgestreuter Wellengrößen b :

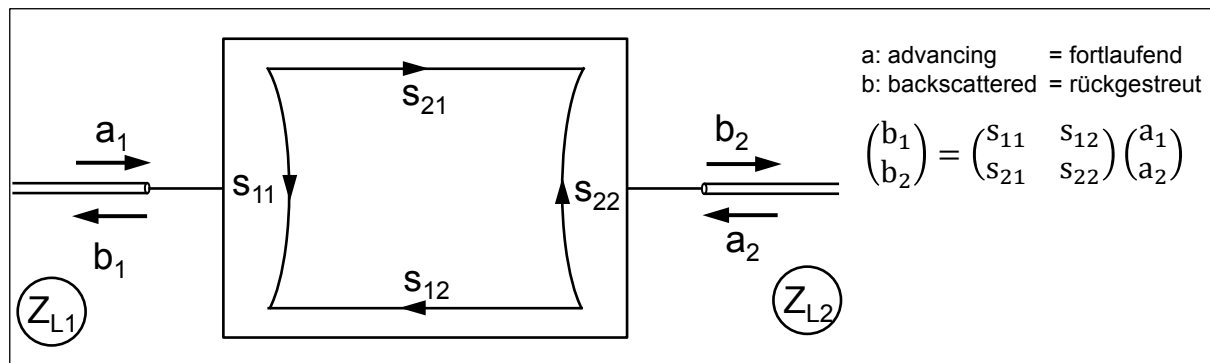


Abbildung 88: Streuparameter eines Zweitors in einpoliger Darstellung nach [146]

Der Betrag eines Streuparameters wird typischerweise logarithmisch in dB angegeben.

$$s_{ij}^l = 20 \log_{10} |s_{ij}| \quad \text{Logarithmische Darstellung des Streuparameterbetrages in dB} \quad (6.8)$$

Die Kehrwerte der Streuparameterbeträge beschreiben die Dämpfungseigenschaften der Schaltung. Sie untergliedern sich in die Einfügedämpfung S_{ij} , welche nur transmittierte Signalanteile beschreibt und die Rückfluss- bzw. Reflexionsdämpfung S_{ii} , die nur reflektierte Anteile darstellt.

$$RL = 20 \log_{10} \left| \frac{1}{s_{ii}} \right| = -20 \log_{10} |s_{ii}| = -s_{ii}^l \quad \text{Rückflusssdämpfung in dB} \quad (6.9)$$

$$IL = 20 \log_{10} \left| \frac{1}{s_{ij}} \right| = -20 \log_{10} |s_{ij}| = -s_{ij}^l \quad \text{Einfügedämpfung in dB} \quad (6.10)$$

Durch Fourier-Transformation der Rückflusssdämpfung S_{11} lässt sich das Frequenzspektrum in den Zeitbereich transformieren und das Impedanzprofil darstellen. Über die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Signals kann der Leitungswellenwiderstand Z einem definierten Ort der Leiterstruktur zugeordnet werden. Diese Methode ermöglicht die Darstellung der Änderung des Leitungswellenwiderstandes in Leiterrichtung und wird oftmals zur Detektion von Störstellen eingesetzt, z.B. bei Erdkabeln [147]. Die Beschreibungsform ist ebenfalls dazu geeignet die geometrischen Einflüsse der Federklammer auf die übertragbare Datenrate darzustellen und wird daher im Rahmen dieser Arbeit angewendet.

6.1.3 Messtechnische und simulative Untersuchung der Verbindungstechnologie

Für die grundlegende Analyse der FKD werden die wichtigsten Hochfrequenzeigenschaften des Kontaktelements gemessen. Grundlage für die Qualifizierung von

Kommunikationskabeln für Automotive-Anwendungen ist die Norm DIN EN 50289²³. Darin werden unter anderem die Messung des Leitungswellenwiderstands Z , der Einfügedämpfung S_{12} und der übertragbaren Datenrate gefordert. Die Kennwerte dienen im Rahmen dieser Arbeit ebenfalls als Bewertungsgrößen für die Hochfrequenztauglichkeit der FKD.

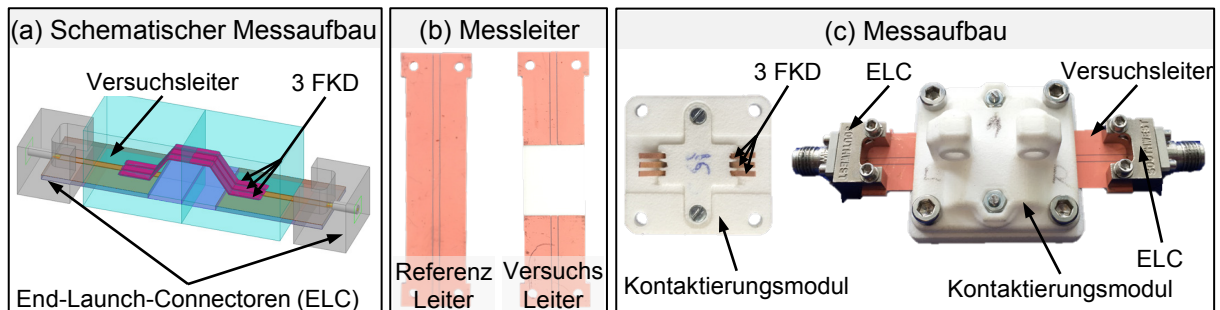


Abbildung 89: Aufbau der Messschaltung

Als Leiterstruktur dient eine koplanare Dreibandleitung, ausgelegt auf einen für gängige Messmittel geeigneten Wellenwiderstand von 50Ω . Um das Übertragungsverhalten der Kontaktierungsmethode zu analysieren, werden der innenliegende Signalleiter und die beiden äußeren Masseleiter mit drei baugleichen Federklammer-Direktkontakten kontaktiert. Die Koplanarleitung der Versuchsschaltung ist unterbrochen und wird über die drei Federklammern geschlossen.

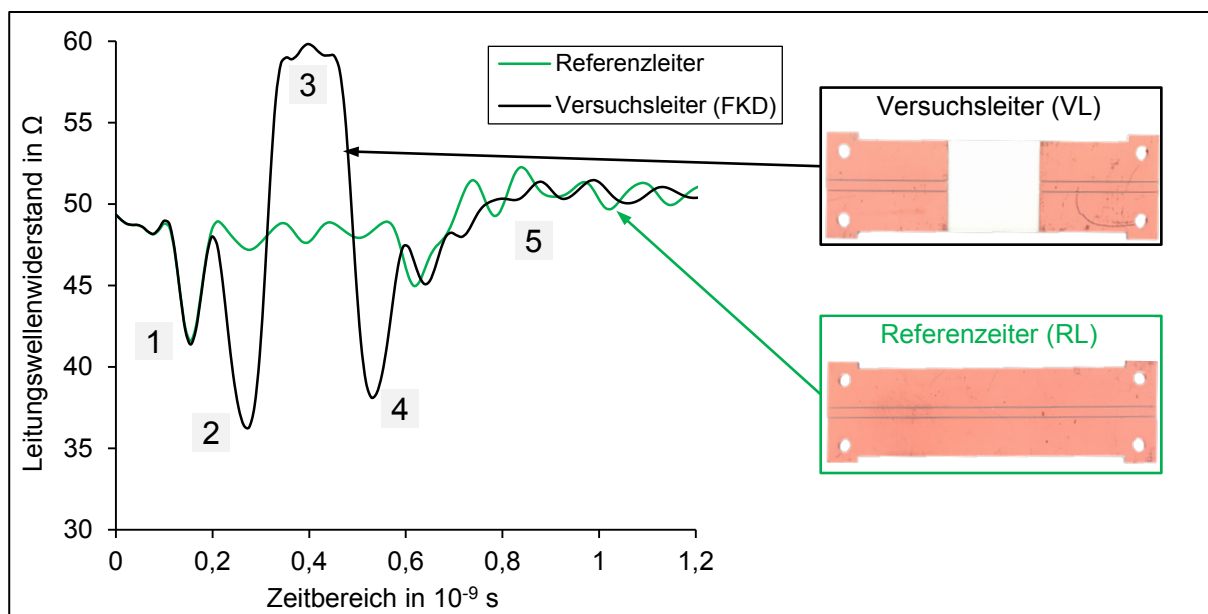


Abbildung 90: Wellenwiderstandsprofil für Versuchs- und Referenzleiter

Der schematische Aufbau der Messschaltung ist in Abbildung 89 a dargestellt. Als Referenz zur Versuchsleitung dient eine Durchgangsleitung, um den Einfluss der

²³ Kommunikationskabel - Spezifikationen für Prüfverfahren

Federklammer auf das Dämpfungsverhalten analysieren zu können (b). Das Übertragungsverhalten der FKD wird mit einem Netzwerkanalysator untersucht, der über zwei End-Launch-Connectoren (ELC) mit dem Versuchsleiter verbunden ist (c).

Abbildung 90 zeigt die Zeitbereichsdarstellung des Wellenwiderstandsprofils für den beschriebenen Messaufbau. Die charakteristischen Einbrüche und Peaks sind mit Ziffern markiert. (1) kennzeichnet die Position der Signaleinspeisung durch den ELC. Die Messkurven des Versuchs- und Referenzleiters verlaufen in diesem Bereich deckungsgleich. Der Signalübertritt vom Koplanarleiter zur Federklammer äußert sich deutlich im Wellenwiderstandsprofil. (2) und (4) zeigen deutliche Einbrüche an den Kontaktstellen der Federklammer zum Koplanarleiter.

Im verlustlosem Fall berechnet sich der Wellenwiderstand Z aus:

$$Z = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad (6.11)$$

In (6.11) entspricht L' dem Induktivitätsbelag und C' dem Kapazitätsbelag. Die Kenngrößen beschreiben die auf die Leitungslänge bezogene Induktivität und Kapazität eines Leiters. Ein Einbruch von Z entspricht demnach einem kapazitiven Verhalten durch die parallel zur Leiterebene verlaufenden Klammerbeine. Da das Signal die beiden Klammerbeine zu unterschiedlichen Zeiten durchläuft, kann es zusätzlich zu einer zeitlichen Überlagerung der Signale und dadurch zu Mehrfachreflexionen kommen, was diesen Effekt weiter verstärkt.

(3) kennzeichnet eine starke Erhöhung des Wellenwiderstandes. Der Peak folgt nach (6.11) entsprechend einem induktiven Verhalten der Struktur und ist auf den großen Abstand des Klammerstegs zur Leiterebene zurückzuführen. Aufgrund der Signallaufzeitüberhöhung durch den FKD-Aufbau verlaufen die Kurven beim Signalaustritt des ELC (5) nicht mehr deckungsgleich.

Um eine Aussage über die Qualität der vorgestellten Messschaltung der FKD treffen zu können, werden die 3-dB-Grenzen der S_{21} -Verläufe der Versuchs- und Referenzschaltung miteinander verglichen (Tabelle 17). Die 3-dB-Grenze ist in der Nachrichtentechnik eine gängige Kennzahl für Schaltungen und definiert die Grenzfrequenz, bei der der Signalpegel um 3dB abfällt, was einem fünfzigprozentigen Leistungsabfall entspricht.

Messaufbau	Grenzfrequenz f_{grenz} bei -3 dB
FKD und Messleitung	ca. 6,3 GHz
Referenzleitung	ca. 7,9 GHz

Tabelle 17: Grenzfrequenzen für Mess- und Referenzleiter

Die Bandbreite einer Schaltung ist umso höher, je höher die Grenzfrequenz f_{grenz} ist. Geht man davon aus, dass ein Signal bei einer Dämpfung von 50 % vom Empfänger

in ausreichender Form rekonstruierbar ist, ist der vorgestellte FKD-Aufbau unter den zum Messzeitpunkt bestehenden Bedingungen bis zu einer Frequenz von ca. 6,3 GHz einsetzbar. Beim Vergleich der neuartigen Kontaktierungstechnologie mit der zulässigen Grenzfrequenz von standardisierten Kfz-Koaxialverbindungen, die in Abhängigkeit der Bauform zwischen 6 bis 11GHz liegt [9], erscheint die FKD für die Anwendung zur Übertragung hochfrequenter Signale als geeignet.

Für die Analyse der geometrischen Einflussgrößen der Federklammer auf das Übertragungsverhalten dient ein parametrisiertes FE-Simulationsmodell. Die Validierung des Modells erfolgt hierbei mithilfe der Messergebnisse der vorgestellten Messschaltung.

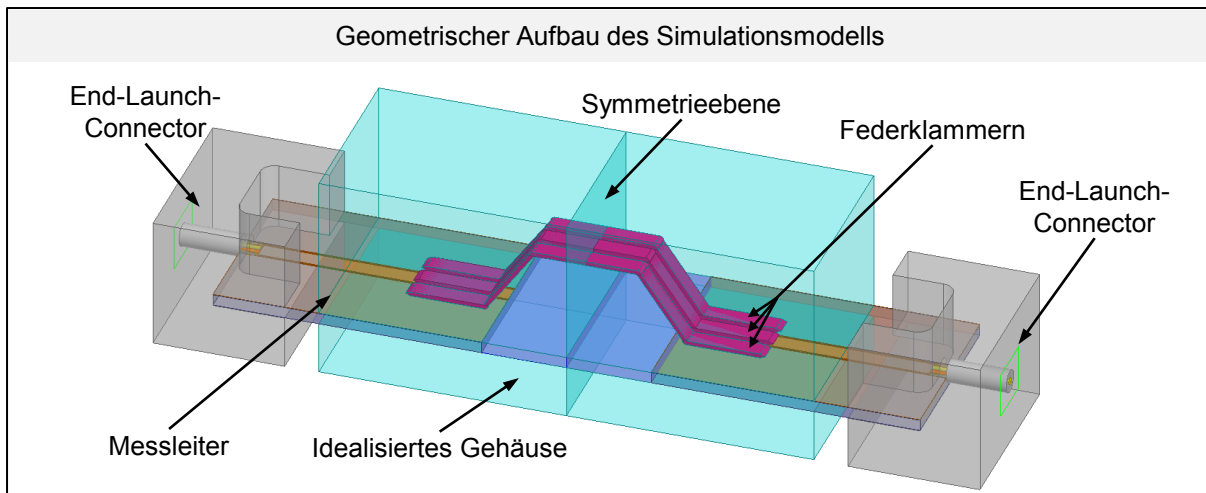


Abbildung 91: Aufbau des HFSS-Simulationsmodells

Abbildung 91 zeigt den parametrisierten Aufbau des Simulationsmodells. Die Parameterstudie wird mit der kommerziellen Simulations-Software ANSYS-HFSS (engl.: High Frequency Electromagnetic Field Simulation) durchgeführt. Die Randbedingungen der Simulation leiten sich aus dem 3D-Modell der Messschaltung mit den zugeordneten Materialkennwerten für Federklammer, Koplanarleiter, Gehäuse und ELC ab.

Das Simulationstool ermöglicht die numerische Berechnung der dreidimensionalen Wellenausbreitung elektromagnetischer Felder und die Ableitung aller gängigen Bewertungsgrößen zur Beschreibung der Hochfrequenzeigenschaften der Verbindung. Die Messschaltung wird aufgrund ihrer achsensymmetrischen Struktur als Halbmodell simuliert. Zur Validierung der Ergebnisse der numerischen Analyse werden die S11- und S21-Kurvenverläufe mit Messungen verglichen. Abbildung 92 zeigt hierbei die Streuparameter des Referenzleiters (RL) als Durchgangsleitung und die Streuparameter des Versuchsleiters (VL) des Feder-Klammer-Aufbaus.

Die Streuparameter der Simulation zeigen geringe Abweichungen zu den Messergebnissen. Die Ursachen der Ungenauigkeiten können auf geometrische Fertigungstoleranzen des Messaufbaus, variierenden Materialeigenschaften durch

fertigungsbedingte inhomogene Materialdichten und dadurch variierende Materialkennwerte zwischen gemessenen und simulierten Werten zurückgeführt werden. Auch Einflüsse durch die Kalibrierung des Netzwerkanalysators werden im Simulationsmodell nicht berücksichtigt und führen zu zusätzlichen Abweichungen.

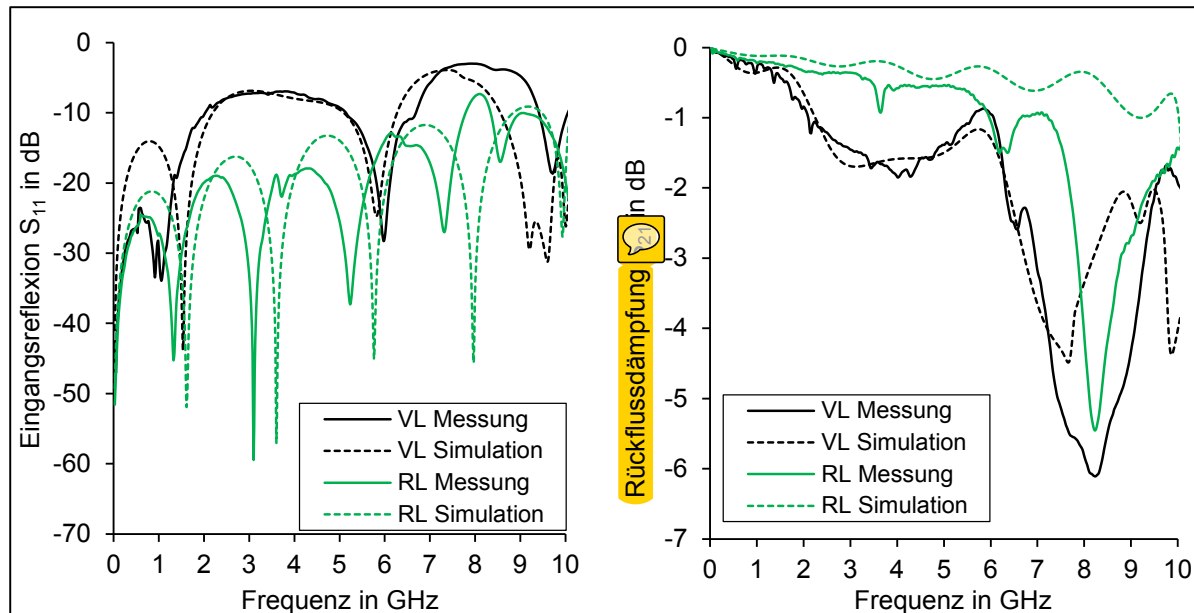


Abbildung 92: Streuparameter für Versuchsleiter und Simulationsmodell

Dennoch liefert die Simulation vor allem im relevanten mittleren einstelligen GHz-Bereich eine gute Näherung zu den gemessenen Werten. Das dreidimensionale Simulationsmodell dient für die nachfolgende Analyse der geometrischen Einflüsse der Feder-Klammer auf die Übertragungseigenschaften als Diskussionsgrundlage.

6.2 Einflüsse der Feder-Klammer-Geometrie auf die Übertragungseigenschaften

Kapitel 6.1.3 hat gezeigt, dass es durch einen Signalübergang vom Koplanarleiter zur Federklammer zur Änderung des Wellenwiderstandsprofils der Schaltung kommt. Das Federbein verursacht dabei einen kapazitiv parasitären Wellenwiderstandseinbruch. Klammersteg und -schulter verhalten sich im Wellenwiderstandsprofil induktiv.

Aus (6.3) geht hervor, dass der Wellenwiderstand neben den werkstofftechnischen Randbedingungen, die hier nicht beleuchtet werden sollen, maßgeblich durch die Leitergeometrie beeinflusst wird. In diesem Kapitel sollen daher die grundlegenden geometrischen Einflüsse der Federklammer auf das Übertragungsverhalten bei hohen Frequenzen vorgestellt werden.

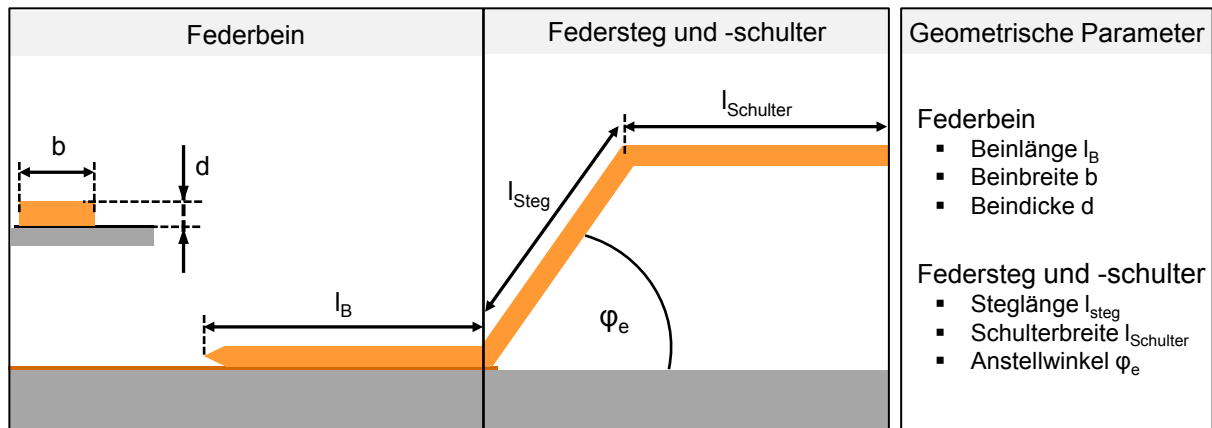


Abbildung 93: Geometrische Parameter des Simulationsmodells

Abbildung 93 zeigt die schematische Darstellung der Federklammer und ihrer geometrischen Kenngrößen, welche in den Simulationen parametrisch betrachtet werden. Neben der Längenänderung der Federklammersegmente l_B , l_{Steg} und l_{Schulter} sollen auch die geometrischen Haupteinflussgrößen in Form der Federbeinbreite b und -dicke d bzw. eine Variation des Anstellwinkels φ Grundlage der Diskussion sein.

6.2.1 Längenänderung der Federklammersegmente

Kapitel 6.1.3 zeigt auf, dass die kapazitiven und induktiven Störeinflüsse durch die Federklammersegmente hervorgerufen werden und der Grad der Störung dabei durch die Leitergeometrie verursacht wird. Abbildung 94 stellt die Ergebnisse der parametrisierten Simulationsstudien bei einer Variation der Längen der Federklammersegmente gegenüber und bildet die Einfügedämpfung S_{21} der verschiedenen Geometrien ab.

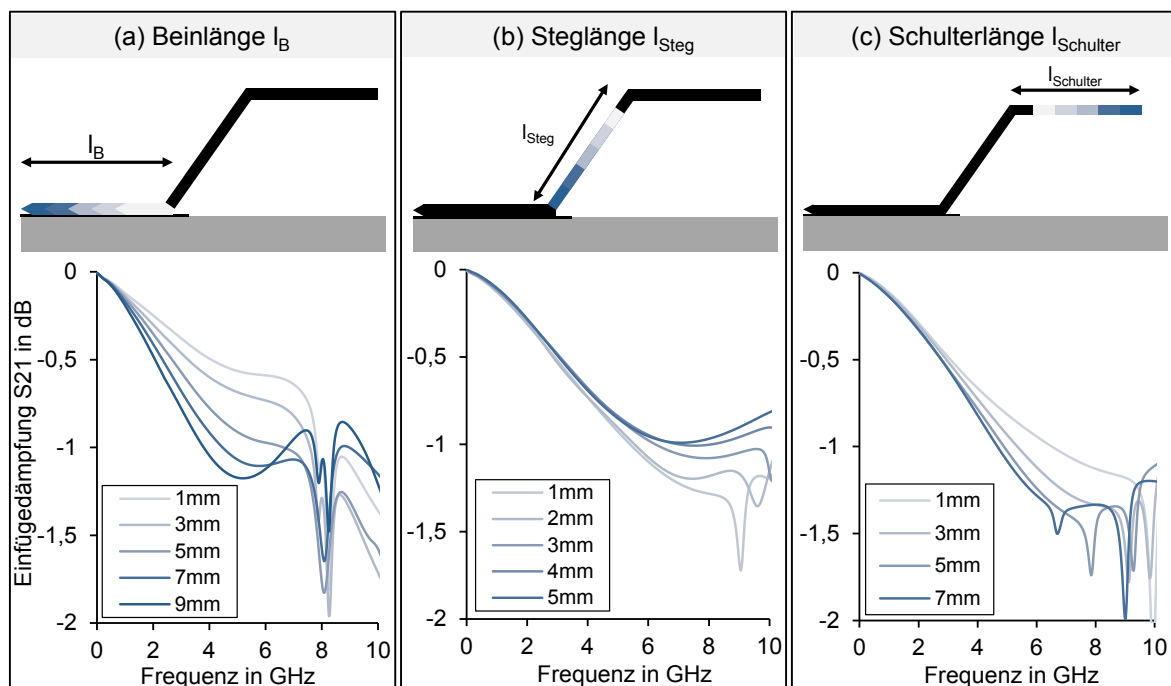


Abbildung 94: Einfluss der Federklammersegmente auf die Einfügedämpfung

(a) zeigt die Einfügedämpfung des FKD-Aufbaus für verschiedene effektive Beinlängen l_B . Betrachtet wird der mittlere einstellige Frequenzbereich bis zu 8 GHz, was einer Datenübertragungsrate von 8 GBit/s entspricht (vgl. Datenraten heutiger Bussysteme mit max. 24 Mbit/s). Das kapazitive Verhalten sinkt mit abnehmender Beinlänge. Vor allem im betrachteten Frequenzbereich wird die Einfügedämpfung dabei deutlich durch l_B beeinflusst. Exemplarisch liegt bei einer Frequenz von 5 GHz die Einfügedämpfung bei einer Beinlänge von $l_B = 9$ mm um 0,6 dB niedriger als für $l_B = 1$ mm, was einer Leistungsverringerung von rund 38 % entspricht. Abbildung 94 (b und c) zeigen, dass eine Längenvariation des Klammerstegs l_{Steg} und der Klammerschulter l_{Schulter} verglichen mit l_B nur einen geringen Einfluss auf die Einfügedämpfung der Schaltung haben. Zudem haben die Messungen verdeutlicht, dass eine Anpassung von l_{Steg} und l_{Schulter} im Wesentlichen zu einer Veränderung der Laufzeit des Signals führen, jedoch nur im geringen Maße einen kapazitiven Einbruch hervorrufen.

6.2.2 Anstellwinkel, Federdicke und –breite

Die Veränderung der geometrischen Abmessungen führt zu Diskontinuitäten im Wellenwiderstandsprofil. Diese Widerstandssprünge und die damit verbundenen Reflexionen fallen bei ausgeprägten Knickstellen und hohen φ_e größer aus als bei Strukturen mit abgerundeten Leiterkanten oder flachen Winkeländerungen. Weiterhin steigt beim Signalübergang auf die Federklammer die Einfügedämpfung mit der effektiv wirksamen Kontaktfläche. Die Größe der Kontaktfläche wird hierbei neben der Federbeinlänge l_B auch durch die Federklammerbreite b beeinflusst.

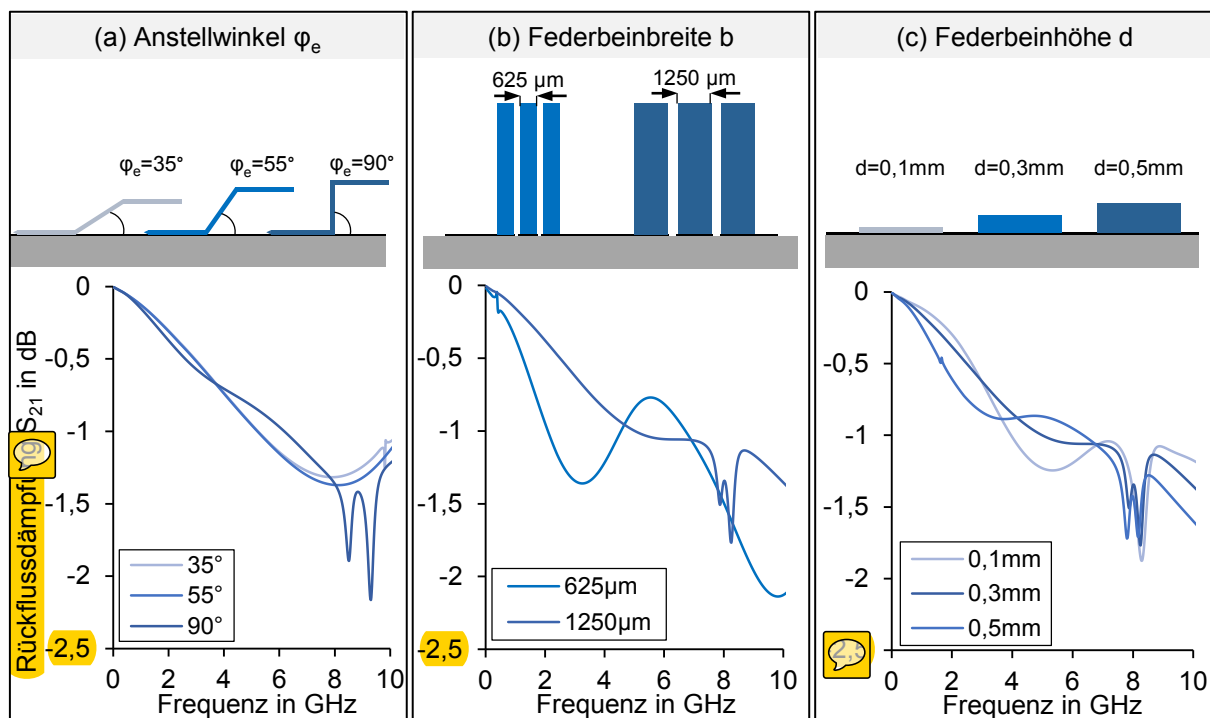


Abbildung 95: Einfluss von φ , b und d auf die Einfügedämpfung

In Abhängigkeit von d führt das Aufliegen der Federklammer zu einer erheblichen Erhöhung der Leiterbahn. Die damit verbundene Änderung des Leitungswellenwiderstands an der Übergangsstelle zwischen Federklammer und Leiterplatte, kann ebenfalls zur Störung bei der Signalübertragung führen. Um den Einfluss der geometrischen Effekte auf die Signalübertragung zu analysieren, wird auch der Anstellwinkel φ , die Federbeindicke d und die Federbeinbreite b variiert und deren Auswirkungen auf die Einfügedämpfung S_{21} untersucht.

Abbildung 95 stellt die S_{21} -Verläufe für variable φ , b und d dar. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die geometrischen Parameter verglichen mit den Längenänderungen der Federklammersegmente aus Kapitel 6.2.2 einen geringeren Einfluss auf das Dämpfungsverhalten der Schaltung haben. Die Variation des Anstellwinkels zeigt im Frequenzbereich bis 8 GHz nur geringe Änderungen im Verlauf von S_{21} . Scharfe Knickstellen für $\varphi_e = 90^\circ$ führen erst bei Frequenzen oberhalb von 8 GHz zu einem ausgeprägten Dämpfungsverhalten.

Die S_{21} -Kurvenverläufe für $b = 625 \mu\text{m}$ zeigen im Vergleich zur Grundfederklammerbreite von $b = 1250 \mu\text{m}$ höhere Einfügedämpfungswerte. Eine Variation der Federdicke d beeinflusst das Übertragungsverhalten nur im geringen Maße.

6.2.3 Vergleichende Bewertung der geometrischen Einflussgrößen

Für eine vergleichende Bewertung der betrachteten geometrischen Einflussgrößen auf das Übertragungsverhalten der FKD stellt Abbildung 96 die Einfügedämpfungswerte über der Frequenz dar.

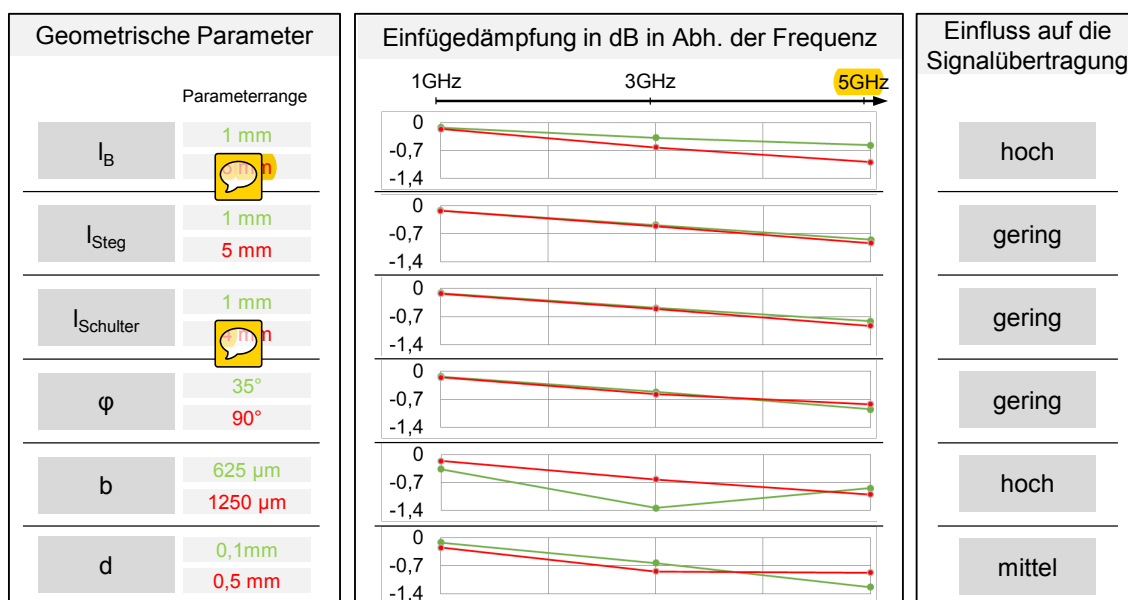


Abbildung 96: Geometrische Einflussgrößen der FKD auf die Einfügedämpfung

In Abhängigkeit der Ausprägung des jeweiligen Parameters führen die erläuterten Effekte zu unterschiedlichen Charakteristiken in der frequenzabhängigen Einfügedämpfung. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sich aus der

Parameterstudie von φ , b und d im Frequenzbereich bis zu **10 GHz** kein geometrisches Optimum ableiten lässt. So führt beispielsweise eine niedrige Federbeinhöhe d im Frequenzbereich bis 3 GHz zu geringeren Einfügedämpfungs-werten, oberhalb dieser Frequenz kommt es jedoch zu deutlich überhöhten S_{21} -Werten. Ein ähnliches Verhalten lässt sich auch bei der Variation von φ und b erkennen. Bei Hochfrequenzanwendungen, die im Frequenzbereich unter 10 GHz arbeiten, kann hingegen eine Verkürzung der Beinlänge l_B das Dämpfungsverhalten durch die Verbindungsstelle minimieren. Eine Reduzierung der Steglänge l_{Steg} und der Schulterbreite l_{Schluter} führen zwar ebenfalls zu einer Verbesserung des Hochfrequenzverhaltens, deren Einfluss ist jedoch geringer ausgeprägt. Je nach Frequenz und Anwendungsfall müssen daher in der Praxis die passenden geometrischen Parameter ausgewählt werden, um ein optimales Übertragungsverhalten zu erzielen.

6.3 Potentiale bei der Übertragung hohe Datenraten

Um die Methode der FKD hinsichtlich ihrer Hochfrequenzeigenschaften zu charakterisieren, war zunächst der Entwurf eines dafür geeigneten Aufbaus nötig, der auf einen Wellenwiderstand von 50Ω ausgelegt ist. Die Charakterisierung der Zweitor-Brücken-Struktur nach Kapitel 6.2 ergibt, dass die Übertragung hochfrequenter Signale mit der FKD-Methode im Frequenzbereich mit einer Bandbreite von bis zu 10 GHz durchaus möglich ist. Die 3-dB-Grenze des Einfügedämpfungs-Verlaufs wird in diesem Fall bei 6,3 GHz überschritten. Innerhalb der Bandbreite $B_{\text{FKD}} = 6,3 \text{ GHz}$ kann demnach mindestens 50 % der Signalleistung transmittiert werden. Für eine Baudrate von 1 Bit pro Symbol und eine Pulsdauer von 0,2 ns ermöglicht der Brücken-Aufbau somit theoretisch eine Übertragung von maximal 5 Gbit/s. An dieser Stelle muss jedoch erwähnt werden, dass sich die übertragbare Bandbreite B_{FKD} auf einen einzelnen Feder-Klammer-Kontakt bezieht. Komplexe Datennetzwerke im Kfz sind in der Praxis aus mehreren, meist hintereinander geschalteten oder verzweigten Leitungspfaden aufgebaut, um alle Sender und Empfänger zu vernetzen. Für einen Übertragungskanal der Bandbreite B_{ges} aus i in Reihe geschalteten Gliedern der Bandbreite B_i gilt nach [148] folgender Zusammenhang:

$$\frac{1}{B_{\text{ges}}^2} = \sum_i \frac{1}{B_i^2} \quad (6.12)$$

Die Leistungsfähigkeit des Übertragungskanals nimmt nach (6.12) demnach mit der Anzahl i der Glieder ab. Unter der Annahme einer Bandbreite $B_{\text{FKD}} = 6,3 \text{ GHz}$ für das messtechnisch untersuchte Kontaktsystem der Federklammer ergibt sich bei einer Reihenschaltung von i Gliedern für die Bandbreite des Übertragungskanals B_{ges} ein fallendes Verhalten mit steigender Gliederzahl (Abbildung 97). Leitet man daraus eine erzielbare Datenrate ab und vergleicht diese mit gängigen Bussystemen

erscheint die Anwendung der FKD nach heutigen Anforderungen im Kfz von Übertragungsraten bis zu 25 Mbit/s dennoch als geeignete Verbindungstechnologie.

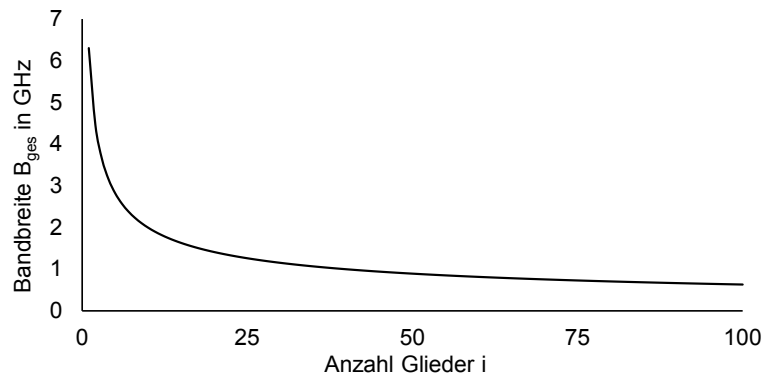


Abbildung 97: Erzielbare Bandbreite in Abhängigkeit der FKD-Glieder

Hinsichtlich der geometrischen Veränderungen zeigen die Untersuchungen, dass gegenüber einem herkömmlichen FKD-Aufbau vor allem eine Verkürzung der effektiven Beinlänge zur Verbesserung der Signalübertragung führt, da hierbei die parasitär kapazitiven Übergangsbereiche zwischen Federklammer und Leiterplatte minimiert werden können. Abhängig vom Frequenzspektrum kann eine Verkürzung der effektiven Beinlänge l_B daher als zielführend erachtet werden. Auch die Anpassung der geometrischen Parameter l_{Steg} , l_{Schulter} , d , b und φ_e ermöglichen eine Dämpfungsreduzierung des Schaltungsaufbaus. Letztlich führt vor allem eine Miniaturisierung der FKD zu verbesserten Übertragungseigenschaften.

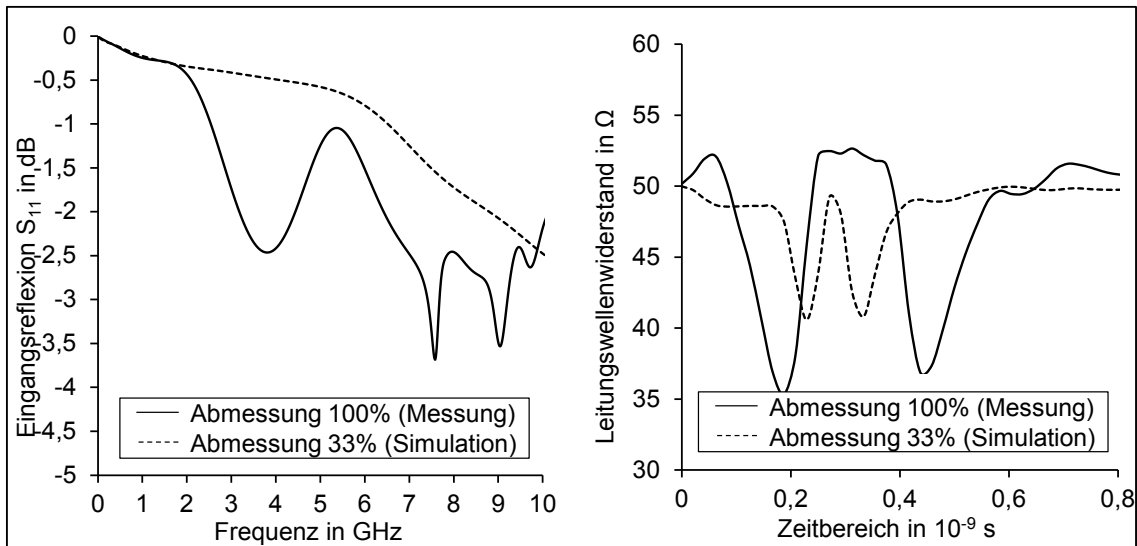


Abbildung 98: Einfluss der Größenänderung auf die Übertragungseigenschaften

Abbildung 98 zeigt die Einfügedämpfung und das Wellenwiderstandsprofil der Messschaltung und eines miniaturisierten Modells (Abmessungen um zwei Drittel reduziert) im Vergleich. Die Simulationsstudie belegt hierbei, dass ein verkleinerter FKD-Aufbau im Frequenzbereich oberhalb von 2 GHz zu einem deutlich verbesserten Übertragungsverhalten führt.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Grundlage der Überlegungen, automatisierte Kontaktierungsverfahren für Elektronikkomponenten zur flexiblen Integration in flachleiterbasierte Bordnetzsysteme zu entwickeln, ist der technische Wandel der Bordnetzarchitektur. Die Entwicklung hat Automobilhersteller und -zulieferer dazu veranlasst innovative Leitungs- und Kontaktierungslösungen in die Produktion- und Montageprozessketten des Bordnetzes zu integrieren.

Neue Verbrauchs-, Emissions- und Sicherheitsanforderungen, sich ändernde Kundenwünsche in Form individueller Mobilitätsansprüche und die fortschreitende Vernetzung im Kfz bedingen technische Neuerungen in der Bordnetzentwicklung. Immer mehr Fahrzeugfunktionen und die umfangreichen Konfigurationsmöglichkeiten der Fahrzeugausstattung durch den Kunden haben zu einem stetigen Komplexitätsanstieg des Bordnetzes geführt. Die Komponentenanzahl, die Leitungslänge und das Gewicht der Leitungssätze sind durch diese Entwicklung in demselben Maße gestiegen, wie die Kosten zur Produktion der komplexen Komponenten. Trotz der beschriebenen Änderungen ist die Bordnetzproduktion und -montage bis heute fast ausschließlich von manuellen Fertigungsschritten geprägt. Die schwer handhabbaren, biegeschlaffen Leiterstrukturen und die hohe Variantenvielfalt ließen bislang alle Ansätze der Automatisierung scheitern, sodass die Produktion der Leitungssätze weiterhin in Niedriglohnländern wie Rumänien oder Tunesien erfolgt.

Neue Lösungsansätze zur Steigerung des Automatisierungsgrads in der Bordnetzproduktion sind vor allem im Einsatz innovativer Leiterstrukturen zu finden, die eine verbesserte Handhabbarkeit und eine optimale Bauraumausnutzung versprechen. Insbesondere der Einsatz von flexiblen Flachleitern ermöglicht eine automatisierte Verlegung direkt im Einbauort des Fahrzeugs und stellt letztlich einen Paradigmenwechsel gegenüber der klassischen Bordnetzherstellung dar, bei der die größtenteils manuelle Kabelbaumfertigung sowie die manuelle Kabelbaummontage räumlich und zeitlich zusammengefasst werden kann. Das fehlende Bindeglied zwischen den zu vernetzenden E/E-Komponenten und der automatisiert verlegbaren Leiterstruktur ist jedoch eine universell einsetzbare und automatisierbare elektrische Verbindungstechnologie. Die technischen Entwicklungen der Bordnetzproduktion weisen darauf hin, dass gerade diese fehlende Universalität und die meistens stark eingeschränkte Automatisierbarkeit der verfügbaren FFC-Kontaktierungsverfahren als Hauptgründe für die bislang vergleichsweise niedrige Marktdurchdringung der Flachleitertechnologie in der Massenproduktion zu betrachten sind.

Da bislang eine fundierte wissenschaftliche Grundlage über automatisierbare Kontaktierungsverfahren für Elektronikkomponenten an flachleiterbasierte Bordnetzsysteme fehlt, wurde in dieser Arbeit eine flexibel einsetzbare Kontaktierungslösung erforscht, die in möglichst vielen Einbauorten des Kfz zum Einsatz

kommen kann. Auf Basis der in dieser Arbeit zusammengefassten einbauortabhängigen Bauraum- und Zuverlässigkeitsanforderungen wurden bekannte Kontaktierungsverfahren für flexible Flachleiter evaluiert. Letztendlich zeigte sich, dass alle am Markt vorhandenen Technologien für dezentrale Kontaktierungen und getrennt von Montageoperationen entwickelt worden sind. Der Einsatz für die Kontaktierung an automatisiert montierten Flachleitern wäre lediglich eine Adaption bestehender Kontaktierungstechniken, die den speziellen Anforderungen für die automatisierte Anbindung von E/E-Komponenten im Einbauort des Automobils nicht gerecht werden kann.

Aus der Ableitung von Handlungsfeldern erwies sich das in [96] beschriebene Konzept der Feder-Klammer-Direktkontaktierung (FKD) am geeignetsten für einen automatisierten Anschluss von Elektronikkomponenten an flachleiterbasierte Bordnetzsysteme. Hinter dem Konzept der Feder-Klammer-Direktkontaktierung steht die Grundidee, ein federndes Kontaktierungselement einzusetzen, das die Isolationsschicht während des Kontaktierungsprozesses durchsticht und dabei eine direkte elektrische Klemmverbindung zum Flachleiter herstellt. Da das Kontaktelement direkt in das Gehäuse der E/E-Komponente integriert ist, können die Montage und die Kontaktierung in einem Prozessschritt zusammengefasst werden. Die FKD schafft damit gegenüber herkömmlichen technologischen Ansätzen die Voraussetzung für ein deutliches Rationalisierungspotenzial in der Bordnetzproduktion. Kostenintensive Komponenten heutiger Kabelsätze, die eine manuelle Montage im Bauraum des Kfz ermöglichen, z.B. Steckergehäuse, Kontaktelemente, Bandagen, Clips etc. können mit dem Einsatz der FKD deutlich reduziert werden oder entfallen vollständig.

Für den Nachweis der Universalität des Kontaktierungsverfahrens wurden im Rahmen dieser Arbeit neben Zuverlässigkeitsuntersuchungen und der Bewertung der Hochfrequenzeigenschaften ebenfalls die Prozesseinflussgrößen grundlegend untersucht. Für die Analyse des Kontaktierungsprozesses dienten neben den Ergebnissen aus umfangreichen Messreihen ebenfalls parametrische FE-Simulationen des Kontaktierungsvorgangs für unterschiedliche Kontaktelementgeometrien. Neben Parameterstudien der Kontaktelementgeometrie ermöglichte die numerische Analyse des Kontaktsystems vor allem die Untersuchung der Spannungs- und Dehnungszustände und die Ableitung von wegabhängigen Kraftvektoren am Kontaktelement während des Kontaktierprozesses. Aufbauend auf den numerischen und messtechnischen Untersuchungen wurde zudem ein analytisches Berechnungsmodell entwickelt, das eine exakte Beschreibung der Kontaktierkraft ermöglicht.

Herausforderung beim Einsatz der FKD ist durch die Wahl der Federklammergeometrie und des zu verbindenden Kontaktsystems eine Kontaktierungskraft zu erzeugen, mit der die obere Isolationsschicht durchtrennt wird, ohne dabei den

darunter befindlichen Kupferleiter zu beschädigen. Im Wesentlichen kann die Breite dieses Kraftfensters durch das gewählte Flachleittersystem und die Schneidengeometrie eingestellt werden. Eine Anpassung der Hauptabmessungen der Federklammer ermöglicht es schließlich innerhalb dieser Kraftgrenzen einen zuverlässigen Kontakt herzustellen.

Gerade lösbare Kontaktierungen werden hinsichtlich ihrer Langzeitzuverlässigkeit als kritisch eingestuft. Es war demzufolge essenziell das Kontaktierungsverfahren auch hinsichtlich der Auswirkungen mechanischer und thermischer Belastungszustände zu charakterisieren. Mit den Versuchsergebnissen aus umfangreichen thermischen und mechanischen Dauerbelastungstests (Temperaturschock-, -wechsel und -auslagerung bzw. Vibration) konnte nachgewiesen werden, dass unterschiedliche Alterungsmechanismen den Ausfall eines Kontakts hervorrufen. Die Alterungsmechanismen sind im hohen Maße von der Belastungsart und dem Schärfegrad des Dauerbelastungstests abhängig. Temperaturschocktests schädigen den Klemmkontakt dabei am stärksten, wobei durch die Untersuchungen nachgewiesen werden konnte, dass das Schädigungspotential von der Maximaltemperatur und der Anzahl der Temperaturhübe abhängt. Die Analyse der Lebensdauer verzinnter und blanker CuNiSi-Klemmkontakte zeigte darüber hinaus eine erhöhte Lebensdauer von blanken CuNiSi-Kontakten mit dem Kupferleiter des FFC.

Basierend auf den Ergebnissen der Lebensdauertests konnte weiterhin die Anwendung verschiedenartiger analytischer Raffungsmodelle zur Vorhersage der lastabhängigen Ausfallwahrscheinlichkeit diskutiert werden. Der Modellansatz nach Arrhenius bildet hierbei die gemessenen Ausfallzeiten am exaktesten ab. Der Vergleich gemessener Lebensdauern mit vorgeschriebenen Prüfbedingungen für E/E-Komponenten im Kfz zeigt, dass die geforderten Zuverlässigkeitsanforderungen nur teilweise vom Kontaktsystem der FKD erfüllt werden können. Ein Einsatz der Kontaktierungstechnologie in Bauräumen mit geringen thermischen Anforderungen, z.B. im Innenraum des Kfz erscheint dennoch realisierbar.

Um auch den zukünftig weiter ansteigenden Datenraten im Bordnetz gerecht zu werden, wurde in dieser Arbeit auch die Hochfrequenztauglichkeit der Federklammer-Direktkontaktierung untersucht. Für die Charakterisierung ihrer Hochfrequenzeigenschaften war zunächst der Entwurf eines geeigneten Aufbaus nötig. Als Leiterstruktur diente eine koplanare Dreibandleitung, ausgelegt auf einen für gängige Messmittel geeigneten Wellenwiderstand von $50\ \Omega$. Die Charakterisierung der Zweitor-Brücken-Struktur zeigt, dass die Übertragung hochfrequenter Signale mit der FKD-Methode im Frequenzbereich mit einer Bandbreite von bis zu 10 GHz durchaus möglich ist. Dieser Wert bezieht sich auf einen einzelnen Federklammer-Kontakt. Leitet man daraus eine erzielbare Datenrate für mehrere, hintereinander geschaltete Kontaktstellen ab und vergleicht diese mit gängigen Bussystemen, erscheint die Anwendung der FKD nach heutigen Anforderungen im

Kfz für Übertragungsraten bis zu 25 Mbit/s dennoch als eine geeignete Verbindungstechnologie.

Neben der messtechnischen Analyse der FKD wurden durch parametrisierte FE-Simulationsstudien die geometrischen Einflüsse des Kontaktelements auf das Übertragungsverhalten charakterisiert. Hinsichtlich der geometrischen Veränderungen zeigten die Untersuchungen, dass vor allem eine Verkürzung der effektiven Beinlänge zur Verbesserung der Signalübertragung führt, da hierbei die parasitär kapazitiven Übergangsbereiche zwischen Federklammer und Leiterplatte minimiert werden können.

Zusammenfassend bietet der Einsatz der FKD in Kombination mit einer nach [3] beschriebenen automatisierten Verlegung von Flachleitern direkt im Einbauort des Automobils ein hohes Potential, die bisherigen, primär manuellen Produktions- und Montageschritte des Bordnetzsystems in modernen Kfz gesamtheitlich zu automatisieren. Durch Variation der Geometrie des Feder-Klammer-Direktkontakts kann das Kontaktelement gezielt auf das eingesetzte Flachleitersystem eingestellt werden. Die Variabilität des Kontaktierungsverfahrens ermöglicht dadurch die Kontaktierung eines breiten Leiterspektrums von Signal- oder Leistungsleitungen, verschiedenen Isolationsmaterialien und unterschiedlichen Flachleitertypen, wodurch die Anwendung in einer Vielzahl an Einbauszenarien möglich wird. Analysen der Hochfrequenzeigenschaften der FKD konnten zudem aufzeigen, dass im Hinblick auf zukünftige Anwendungen im Kfz (z.B. Internet, Multimedia oder Funksysteme) ebenfalls hohe Datenraten übertragen werden können. Zuverlässigkeitsuntersuchungen der Kontaktierungstechnologie zeigen, dass eine Anwendung in Einbauorten im Innenraum des Kfz, wie dem Türmodul, dem Innenraumboden, dem Dachhimmel oder dem Kofferraum möglich ist. Eine ganzheitliche Substitution heutiger, primär auf Rundleitern basierenden Bordnetzsysteme erscheint auf mittelfristige Sicht dennoch nicht umsetzbar, da mit dem Einsatz flachleiterbasierter Bordnetzsysteme ein technischer, aber auch wirtschaftlicher Paradigmenwechsel in der heutigen Bordnetzproduktion vollzogen wird. Neben der Produktions- und Montagekette ändert sich hierbei auch die Wertschöpfungskette der Bordnetzproduktion, in der Bordnetzproduzenten zu Kabellieferanten oder Modulhersteller zu Bordnetzproduzenten werden. Eine schrittweise Einführung dieser neuen Technologie in flächigen, gut zugänglichen Bauräumen mit geringen Umweltauforderungen, erscheint dennoch umsetzbar. Weiterführende Forschungsarbeiten sollen in seriennahen Anwendungsfällen die Serientauglichkeit qualifizieren und dadurch eine weitere Entwicklungsstufe bei der Einführung der neuartigen Technologie beschreiten.

8 Summary

The technological change of the wiring harness architecture has encouraged automotive manufacturers and suppliers to integrate innovative wiring and contacting solutions into the production and assembly chains of wiring harnesses. One integral approach to fulfill these challenges supports the use of flexible flat cable-based wiring systems and the integration of electronic components through automated contacting methods herein.

New consumption, emission and safety requirements, changing customer demands in the form of individual mobility and the progressive interconnection of automobiles cause a change in the production of wiring harness systems. Continually growing electronics-supported functions and extensive configuration possibilities of vehicle equipment by the customer have led to a steady increase in complexity of wiring harnesses. The number of electronic components, as well as size and costs of wiring systems have also risen steadily. In spite of the described progress, production and assembly of wiring harnesses is still almost exclusively characterized by manual production steps. The difficult-to-handle, flexible structure and its diversity of variants have hitherto failed all automation approaches.

New approaches can especially be found in the use of innovative wiring structures, which facilitate improved handling conditions and an optimized utilization of installation space. The use of the introduced technology results in a paradigm shift compared to the traditional wiring system production in which the manual production of wiring harness as well as the manual assembly can be combined in an automated way. However, the missing link between the electronic component and the innovative, automated assembled wiring structure is a universally applicable, automated electric contacting technology. The technological development of wiring harness production indicates the fact that this lack of universality and the distinctly restricted automatization applicability, especially with respect to direct contacting in the installation space of the automobile, are the main reasons for the comparatively low market penetration of the flexible flat cable technology in mass production.

Since a well-founded scientific basis for automated contact methods for electronic components and FFC-based wiring harnesses has been lacking so far, a universally applicable contacting technique has been investigated in this work, which can be used in various vehicle installation scenarios. Based on the installation space-dependent reliability and geometry requirements, common contacting methods for FFC have been evaluated. Finally, it has been emphasized that all existing technologies are developed for decentralized contacting process steps, separate from assembly operations. The use of common contacting technologies on automated assembled FFC would merely be an adaptation of existing contacting

methods which cannot meet the specific requirements for the automated connection of electronic components in the installation space of the automobile.

From the derivation of fields of action, the concept of the so called spring clip contacting method (FKD), which is described in [96], appears most applicable for automated contacting of electronic components and FFC-based wiring harness systems. Behind the concept of FKD, the underlying idea is to use a contact element as spring clip, which penetrates the insulation layer during the contacting process and thereby develops an electrical connection with the conductor of the FFC. The FKD creates the condition for a significant rationalization potential in the wiring harness production compared to conventional technological approaches. Cost-intensive components of today's wiring systems, which enables manual assembly in the automobiles' installation space, e.g. housings, contact elements, bandages, clips, etc. can be dramatically reduced by the use of the FKD.

To verify of the universality of the contacting method, the process influencing variables, the reliability, and high-frequency properties have been fundamentally investigated. For the analysis of the contacting process, the results of extensive measurement series and parametric FEA studies of the contacting process of different contact element geometries have been used. In addition to parameter studies of the contact element geometry, the numerical analysis of the contact system allowed the determination of stress and strain states and the derivation of process-dependent force vectors on the contact element during the contacting process. On the basis of numerical and metrological investigations, an analytic model of computation has also been developed, which allows an accurate characterization of the process' contact force. The main challenge of the FKD is to generate a contact force which penetrates the upper insulation layer without damaging the copper conductor underneath by selecting appropriate spring clip geometry constraints and a suitable contact system. Basically, the width of this force sope can be adjusted by the selected system of FFC and the spring clip geometry itself. An adaptation of the main dimensions of the spring clip finally allows to establish reliable connections within these force limits.

Especially detachable contacts are classified as critical with regard to their long-term reliability. Therefore, it was essential to characterize the contacting process concerning the effects of mechanical and thermal stress conditions. The test results from extensive thermal and mechanical fatigue tests (shock, cycling, constant temperature and vibration of accelerated life testing) have shown that different aging mechanisms cause the failure of a contact. Aging mechanisms depend to a large extent on the type of stress and the severity of the life cycle testing. Temperature shock tests cause the most severe damage to the contact system. Furthermore, the investigations have shown that the damage potential depends on the maximum temperature as well as the number of temperature cycles. The lifetime analysis of

tinned and bare CuNiSi spring clip contact systems also showed an increased lifetime of bare contacts with the copper conductor.

Based on the results of lifetime tests, the application of different accelerated test-models to predict the load-dependent failure probability was discussed. Here, the model approach by Arrhenius is the most accurate approximation of the measured failure time. The comparison of measured lifetime with prescribed test conditions for electronic components in automobiles showed that the applicable reliability requirements can be met only partially by the contact system of the FKD for low severities of life cycle tests. The fielding of the introduced contacting technology in low thermal requirements, e.g. in the interior of the vehicle nevertheless appears realizable. In order to meet the continuously increasing data rates in the on-board network of modern automobiles, this study also investigated the high-frequency properties of the FKD. For the characterization of high-frequency properties, the design of a suitable measurement setup was necessary. The conductor structure was described by a coplanar three-wire structure, designed with a surge impedance of 50 Ω . The characterization of the two-port circuit have shown that transmission of high-frequency signals in the frequency range with a bandwidth of up to 10 GHz with the spring clip contacting method is to be entirely possible. In summary, the use of the FKD in combination with an automated assembly of FFC in the installation space of automobiles as described in [3] offers a high potential to automatize the primarily manual production and assembly steps of today's wiring harness production. By varying the geometry of the spring clip contact, the contact element can be specifically adjusted to the applied FFC-system. The variability of the contacting process facilitates the contacting of a broad application field of signal or power cables, different insulation materials and different types of FFC, which enables the implementation in a variety of installation scenarios. Analyzes of high-frequency properties of the FKD show that high data rates can also be transmitted with regard to future applications in motor vehicles (e.g. Internet, multimedia or radio systems). Reliability investigations of the contacting technology show application potentials especially in the interior of the car, such as door module, flooring, roof or trunk. However, a holistic substitution of modern wiring harness systems, which are primarily based on round conductors, is scarcely implementable in the short and medium term, since the use of FFC-based wiring systems results in a technical and economic paradigm shift in today's wiring system. The introduction of the new technology will change not only the production and assembly chain, but also the value chain of wiring harness production. Wiring harness producers will become cable suppliers and car module manufacturers will become wiring harness producers. Nevertheless, an incremental introduction of the technology inside planar, easily accessible installation spaces with low environmental requirements, e.g. door or roof, seems to be realistic in the medium term. Further research work is intended to qualify for close-to-production applications.

9 Abkürzungsverzeichnis

3D	Dreidimensional
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymere
BMW	Bayerische Motoren Werke
CAD	Computer aided design (engl.), Rechnergestütztes Konstruieren
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
Cu	Kupfer
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DH	Dachhimmel
E/E-Komponente	Elektrische und elektronische Komponente
ELC	End-Launch-Connector
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
FEM	Finite Elemente Methode
FFC	Flexible flat cable (engl.), flexible Flachleiter
FFC-e	Flexible flat cable - extruded (engl.), extrudierter flexibler Flachleiter
FFC-l	Flexible flat cable - laminated (engl.), laminierter flexibler Flachleiter
FK	Feder-Klammer
FKD	Feder-Klammer-Direktkontaktierung
FPC	Flexible printed circuits (engl.), flexible Schaltungsträger
FW	Fahrwerk und Unterboden
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
HF	Hochfrequenz
HK	Heckklappe
IRB	Innenraumboden
IT	Informationstechnik
Kfz	Kraftfahrzeug
KR	Kofferraum
KSK	Kundenspezifischer Kabelbaum
LCD	Liquid crystal display (engl.), Flüssigkristallbildschirm
LDS	Laserdirektstrukturierung
LIF	Low-insertion-force

MID	Molded interconnect devices / Mechatronic integrated devices
MR	Motorraum
OEM	Original equipment manufacturer
PA	Polyamid
PBT	Polybutylenterephthalat
PCB	Printed circuit board (engl.), starre Leiterplatte
PEN	Polyethylenaphtalat
PET	Polyethylenerephthalat
PG	Prüfgruppe
PI	Polyimid
Pkw	Personenkraftwagen
PP	Polypropylen
PSD	Power spectral density (engl.), spektrale Leistungsdichte
PTFE	Polytetrafluorethylen
PVC	Polyvinylchlorid
RL	Referenzleiter
SCARA	Selective compliance assembly robot arm (engl.), horizontaler Gelenkarmroboter
SKB	Stufenkabelbaum
SMD	Surface mounted devices (engl.), oberflächenmontierte Bauelemente
SRK	Schwingungsrissskorrosion
TA	Temperaturauslagerung
TM	Türmodul
TPE-E	thermoplastisches Copolyester
TPE-U	thermoplastisches Elastomer auf Urethanbasis
TS	Temperaturschock
TW	Temperaturwechsel
VL	Versuchsleiter
VW	Volkswagen AG
ZIF	Zero-insertion-force

10 Nomenklatur

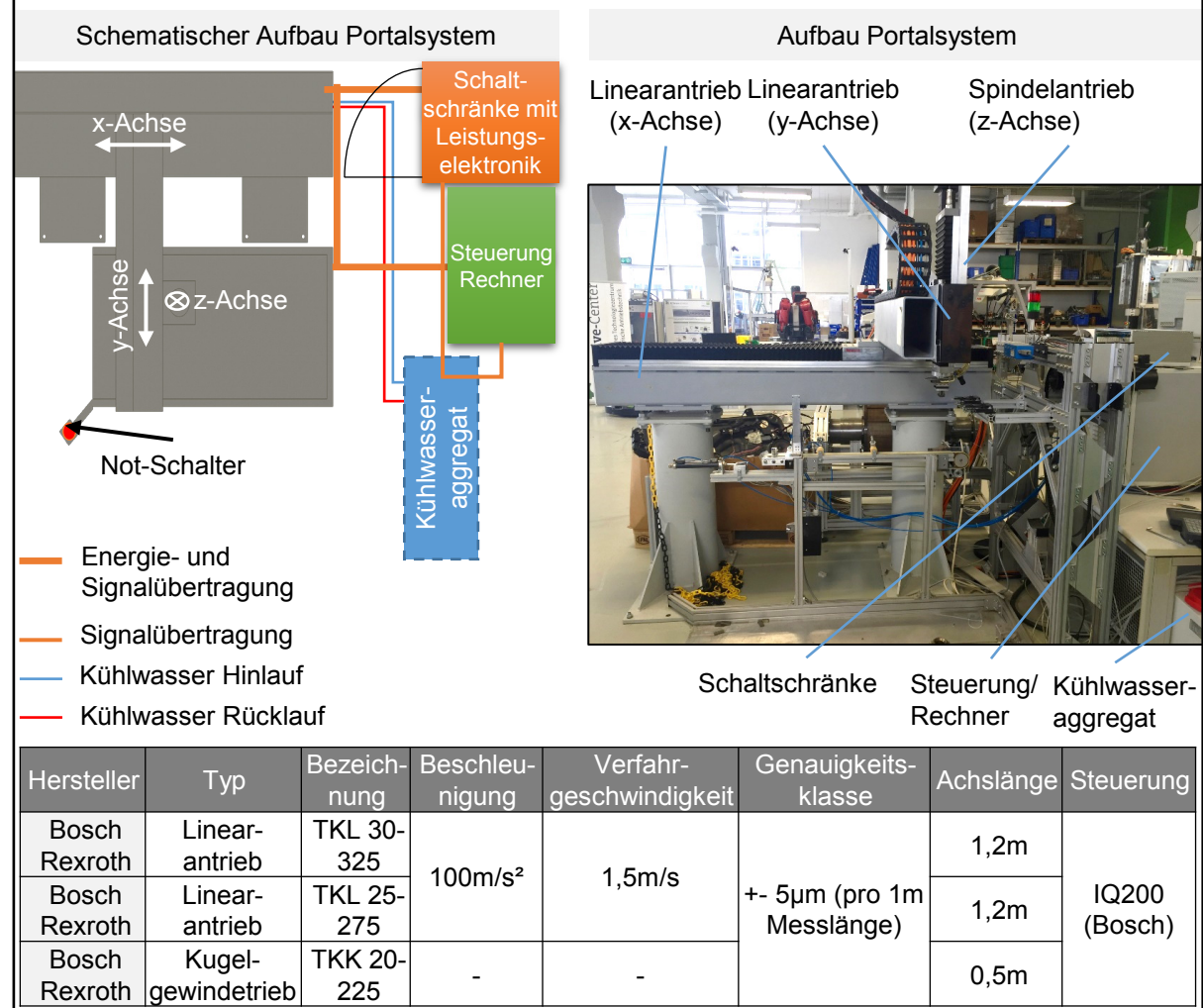
a	Leiterdicke	mm
A_0	Reaktionsgeschwindigkeit	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
A_s	scheinbare Kontaktfläche	mm^2
A_t	tragende Kontaktfläche	mm^2
A_w	wirksame Kontaktfläche	mm^2
b	Feder-Klammerbreite	mm
B	Bandbreite	Hz
c	Lichtgeschwindigkeit	m/s
C'	Kapazitätsbelag	F/m
C_0	materialabhängige Konstante (Coffin-Manson)	-
C_2	Koeffizienten (Norris-Landzberg)	-
C_3	Exponent (Norris-Landzberg)	-
C_F	elastische Federsteifigkeit der Feder-Klammer	N/mm
C_T	Steifigkeit des Trägersubstrats	N/mm
d	Feder-Klammerdicke	mm
E	Elastizitätsmodul	MPa
E_A	Aktivierungsenergie	eV
f	Frequenz	Hz
F_A	Auflagerkraft des Federbeins durch Biegebelastung	N
F_c	erforderliche Durchtrennkraft der Isolation	N
F_{c0}	Schneidfaktor	N/mm
f_{grenz}	Grenzfrequenz	Hz
F_H	normierter Leiterhaftsitz der Isolation	N/mm
F_I	Kontaktierungskraft in Prozessphase I	N
F_{II}	Kontaktierungskraft in Prozessphase II und III	N
F_{iso}	Kraftreaktion der Isolationsschicht	N
F_k	Kontaktierungskraft oder Kontaktnormalkraft	N
F_{leiter}	Kraftreaktion des Leiters	N
F_{max}	maximale Kontaktierungskraft	N
F_{res}	Wirksame Kontaktierungskraft auf Feder-Klammer	N
F_s	normierte Schälkraft der Isolation	N/mm
f_s	Substratdurchbiegung	mm

F_v	Schälfestigkeit des Isolationsmaterials	N
f_{zul}	zulässige Substratdurchbiegung	mm
H_c	Meyershärte	MPa
I	Flächenträgheitsmoment	mm ⁴
k_b	Boltzmann-Konstante	eV
l	freie Beinlänge der Feder-Klammer	mm
L'	Induktivitätsbelag	H/m
l_c	Schnittlänge der Federklammer beim Durchdringen der Isolationsschicht	mm
$l_{Schulter}$	Schulterlänge der Feder-Klammer	mm
l_{Steg}	Steglänge der Feder-Klammer	mm
M_{eff}	Momentenreaktion im Einspannbereich der Feder-Klammer	Nmm
M_{el}	Elastisches Biegemoment	Nmm
M_{pl}	vollplastische Moment	Nmm
N_F	Zyklenanzahl bis zum Ausfall eines Kontakts	-
q	Schädigungsexponent	-
R_d	Durchgangswiderstand	Ω
R_e	Engewiderstand	Ω
R_f	Fremdschichtwiderstand	Ω
r_F	relative Feuchte	-
R_k	Kontaktflächenwiderstand	Ω
R_{KL}	Widerstand der Feder-Klammerbeine	Ω
R_{KN}	Widerstand zwischen Feder-Kammer und Kontaktnase	Ω
R_L	Leiterwiderstand	Ω
R_m	Streckgrenze	MPa
s	Isolationsschichtstärke	mm
S	Streuparameter	dB
s_{TR}	Substratstärke des Trägersubstrats	mm
T	Temperatur	°C
T_{max}	maximale Temperatur	°C
T_{min}	minimale Temperatur	°C
x	Kontaktierungsweg	mm
x_a	Einfederhöhe der Feder-Klammer	mm
Z	Leitungswellenwiderstand	Ω
α	Freiwinkel	°

β	Keilwinkel	°
γ	Spanwinkel	°
δ	Durchbiegung der Federklammer	mm
$\Delta\epsilon_{er}$	Kriechdehnung	-
ϵ_r	relative Permittivität	-
μ	Gleitreibungskoeffizient	-
ρ_w	spezifischer Widerstände	Ωm
φ_0	Eintrittswinkel zu Beginn des Kontaktvorgangs	°
φ_b	Anstellwinkel schiefe Ebene	°
φ_e	Anstellwinkel bei ebener Kontaktierung	°

11 Anhang

Anhang 3.1 - Protalsystem



Anhang 4.1 – Messaufbau Kontaktierungskraft und Durchgangswiderstand

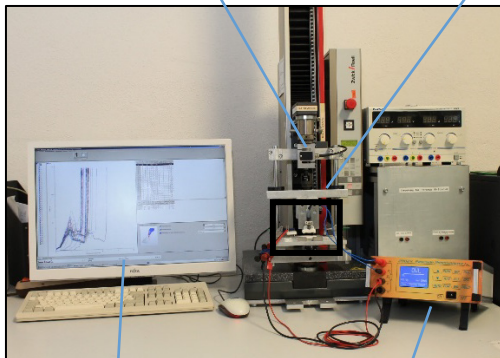
Messaufbau

Prüfmaschine mit 200N
Kraftaufnehmer

Prüfvorrichtung

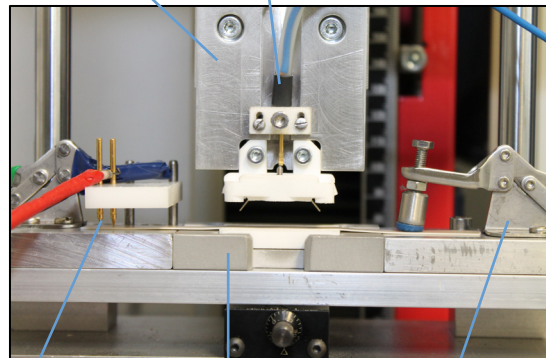
Aufnahme für
Gehäuse

Kelvin-
Klemme



PC mit
Auswertesoftware

Widerstands-
messgerät

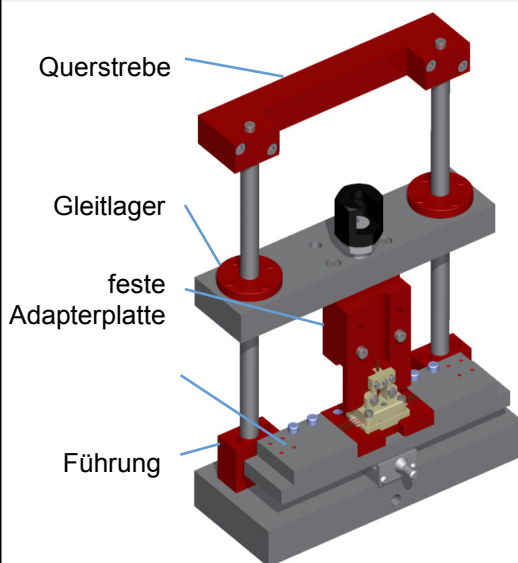


gefederte
Kontaktstifte

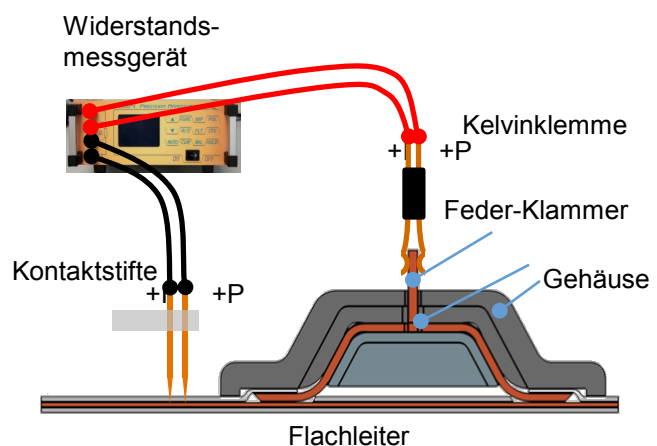
Aufnahme für
Grundplatte

Schnellspanner zur
Fixierung des FFC

Schematischer Aufbau Prüfvorrichtung



Schematischer Aufbau Prüfvorrichtung



Prüfvorrichtung - Technische Daten

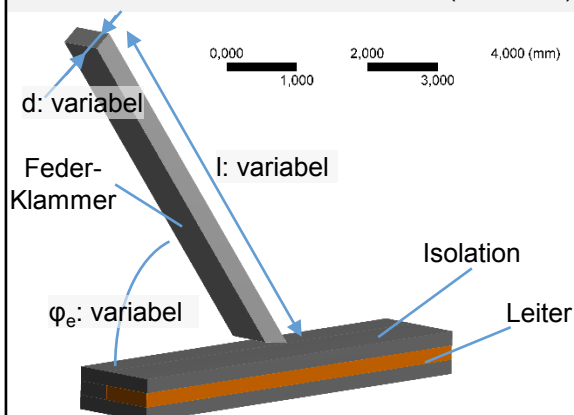
Zug-Druck-Tischprüfmaschine	Z2.5/TN1S (Fa. Zwick)
Verfahrgeschwindigkeit	10 mm/min
Positioniergenauigkeit	+/- 2µm
Kraftaufnehmer	KAP-Z (Fa. AST)
Messbereich	0 - 200 N
Genauigkeitsklasse	0,05

Widerstandsmessgerät – Technische Daten

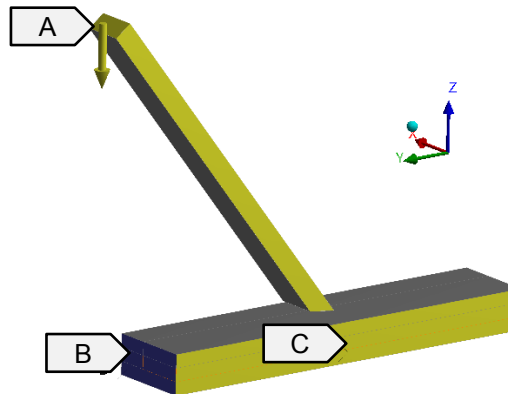
Messmethode	Vierpunkt-Messung
Typ	Elio (Fa. Pedranti Elio)
Messbereich	1 nΩ - 320 Ω
Messstrom (Messgerät)	0 - 10 A
Messgenauigkeit	+/- 0,6 ‰
Messstrom angewandt	100 mA

Anhang 4.2 – Eingangsdaten FE-Simulation Kontaktierungsprozess

Parametrisiertes Simulationsmodell (1/4-Modell)



Randbedingungen



Werkstoff-eigenschaft	Feder-Klammer	Isolation	Leiter	Beschreibung	Typ	Bemerkung
Dichte in kg/m³	8800	1300	8930	Solvertyp	Explizit	-
Querkontraktionszahl	0,34	0,42	0,35	Endtime	-	0,0005s
Elastizitätsmodul in MPa	11500	168,7	129210	Mass Scaling	nein	-
Streckgrenze in MPa	500	10	180	A	Geschwindigkeit z-Richtung	-5000mm/s
Tangentenmodul in MPa	2000	5,8	2458	B	Feste Lagerung	-
				C	Verschiebung z-Richtung	-
				Kontakt	Brechbar	15MPa
				Reibung	Reibungsbehaftet	μ=0,6
				Netz	Elementgröße	0,1mm

Anhang 4.3 – Randbedingungen FE-Simulation Vibrationsanalyse

$$R_{FB} = \left(\frac{l_{ges}}{2} - l_{s,A;B;C} - l_N \right) \cdot \frac{\rho_K}{A_1}$$

$$R_{L1} = l_1 \cdot \frac{\rho_L}{A_L}$$

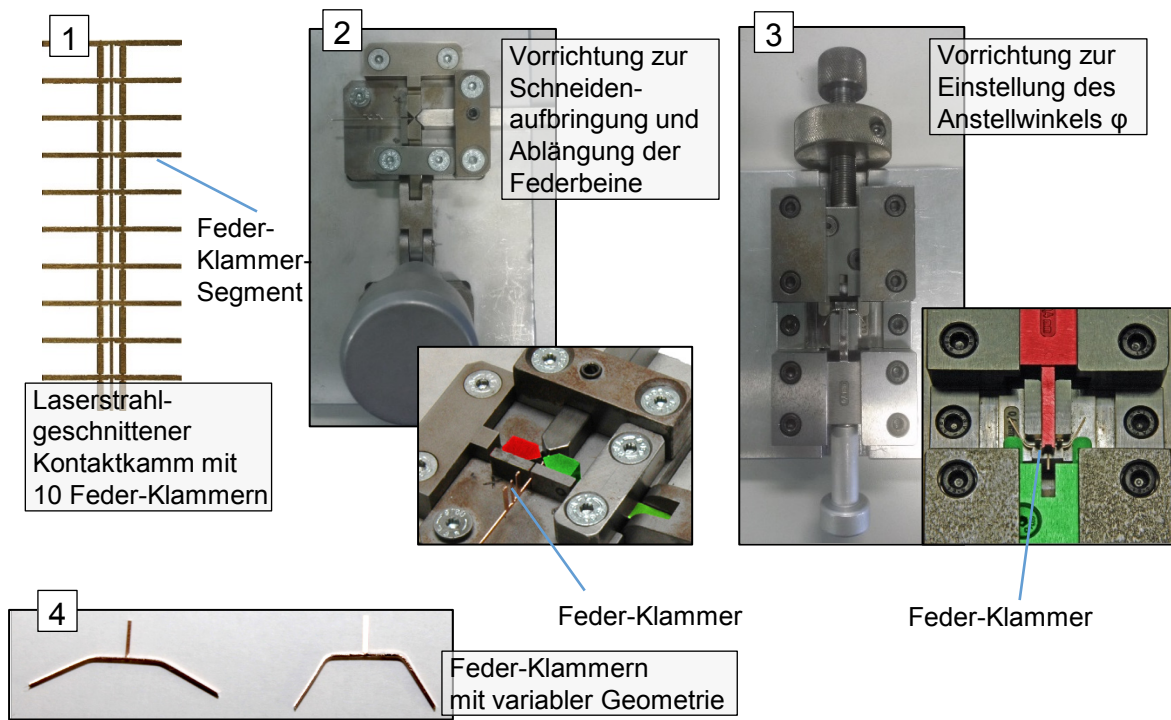
$$R_{L2} = l_2 \cdot \frac{\rho_L}{A_L}$$

$$R_N = (l_N - l_{MP2}) \cdot \frac{\rho_K}{A_3}$$

$$R_N = l_{KN} \cdot \frac{\rho_K}{A_2}$$

$l_{s,A} = l_s$	l_{ges} : Gesamtlänge (ungebogen)	l_2 : Länge des Leiters, Abschnitt 2
$l_{s,B} = \frac{l_s}{2}$	l_N : Länge Nase	l_i : Länge der Isolation
$l_{s,C} = l_s$	l_{MP2} : Länge Messpunkt 2	b : Breite der Federklammer
	l_{KN} : Länge der Verengung zwischen Klammer und Nase	b_{KN} : Breite der Verengung zwischen Klammer und Nase
	l_s : Länge der Schneide	b_N : Breite der Nase
	l_1 : Länge des Leiters, Abschnitt 1	d : Blechdicke der Federklammer

Anhang 4.4 – Prototypische Herstellung eines Feder-Klammer-Kontakts



Anhang 4.5 – Prüfgehäuse eines Feder-Klammer-Direktkontakts

Schematischer Aufbau Prüfgehäuse

Additiv gefertigtes Prüfgehäuse

The diagram shows an exploded view of a test fixture assembly. The components are labeled as follows:

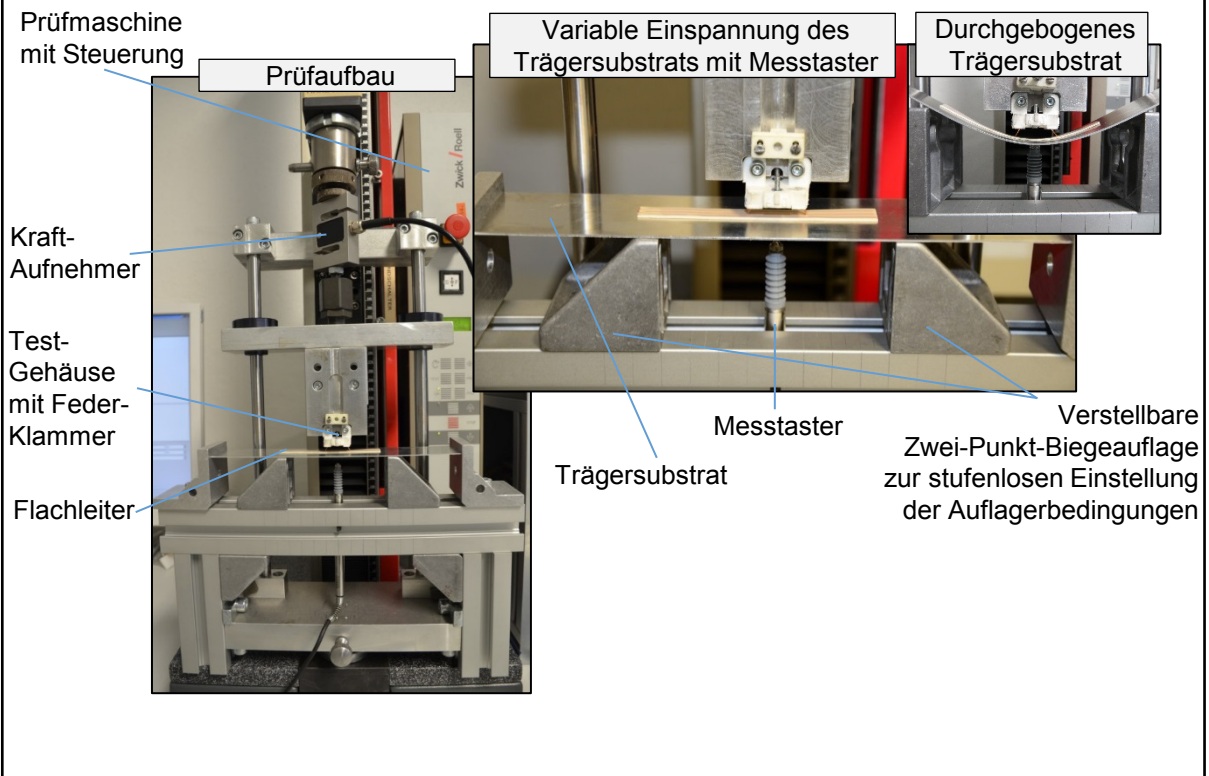
- Gehäuse**: The main housing, shown in a light blue/purple color.
- Feder-Klammer**: A spring clip, shown in a yellowish-brown color.
- Flach-leiter**: A flat circuit board, shown in a red color.
- Bodenplatte**: The base plate, shown in a light blue/purple color.

The photograph shows the assembled test fixture. It is a white, 3D-printed component with two copper-colored wires inserted into it. An inset image shows a close-up of the assembly, highlighting the copper wires and the white plastic housing.

Materialeigenschaften Prüfgehäuse

Herstellungsverfahren	Selektives Lasersintern	Elastizitätsmodul	1550 MPa - 1600 MPa
Material	Polyamid 12	Vicat-Erweichungstemperatur	163 °C
Zugfestigkeit	42 MPa - 48 Mpa	Genauigkeit (Abmaße)	+/- 0,2 %

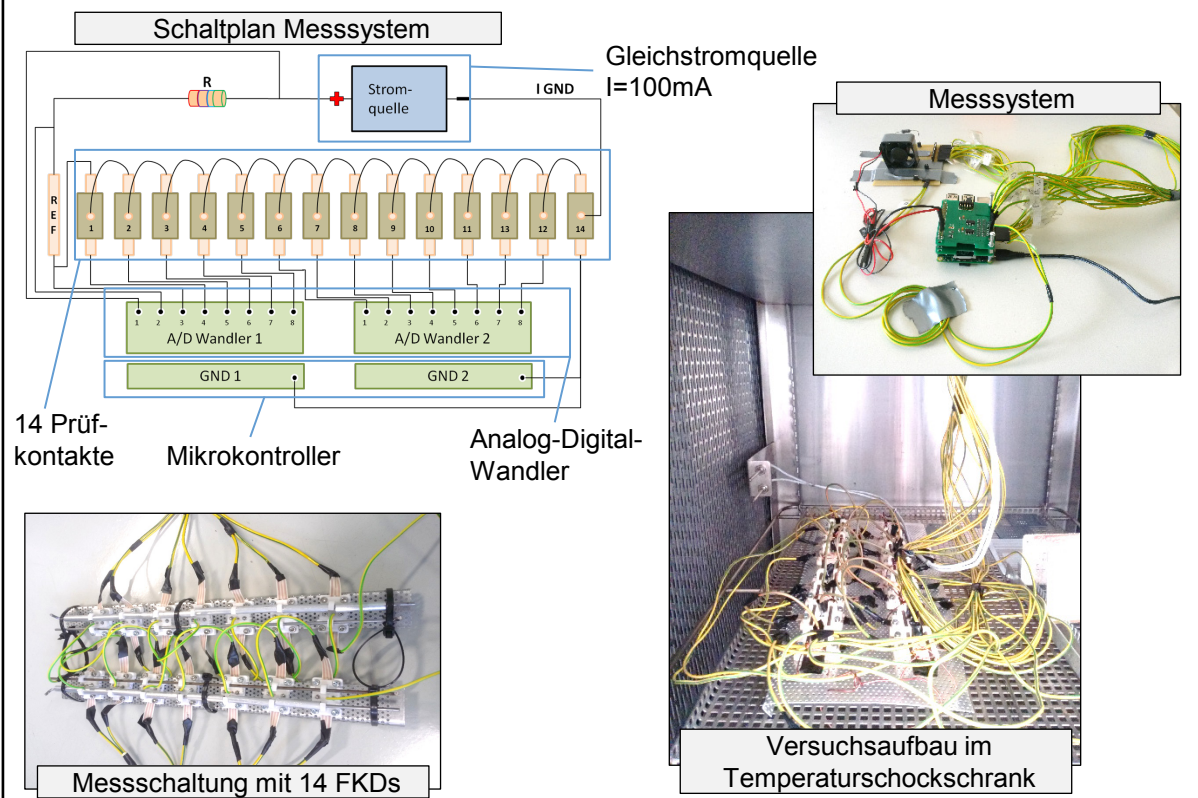
Anhang 4.6 – Versuchsaufbau zur Messung der Substratdurchbiegung



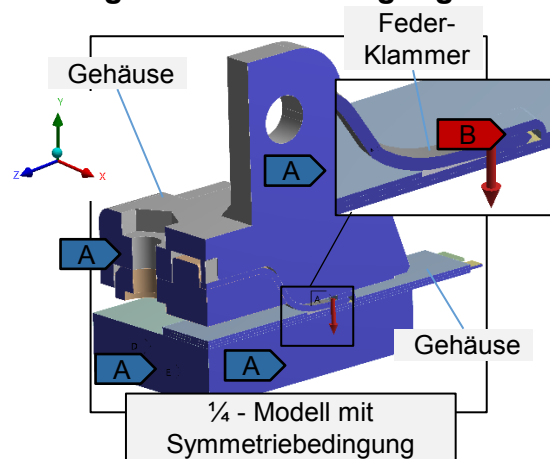
Anhang 5.1 – Koeffizienten der Raffungsmodelle

Test-art	Kontakt-oberfl.	Arrhenius		Coffin-Manson		Norris-Landzberg		
		Reaktions-geschwindig-keit in $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	Aktivierungs-energie in eV	Koeffizient	Schädigungs-exponent	Koeffizient	Schädigungs-exponent	Aktivierungs-energie in eV
TS	blank	19,204	0,010	$3,431\cdot 10^5$	1,624	0,462	0,784	0,014
	verzinnt	8,010	0,019	$3,583\cdot 10^9$	3,010	0,603	0,712	0,016
TW	blank	3,160	0,039	-	-	-	-	-
	verzinnt	3,000	0,045	-	-	-	-	-
TA	blank	2,800	0,050	-	-	-	-	-
	verzinnt	4,000	0,056	-	-	-	-	-

Anhang 5.2 – Messschaltung der Online-Messung f. Temperaturschocktests



Anhang 5.3 – Randbedingungen FE-Simulation thermische Ausdehnung



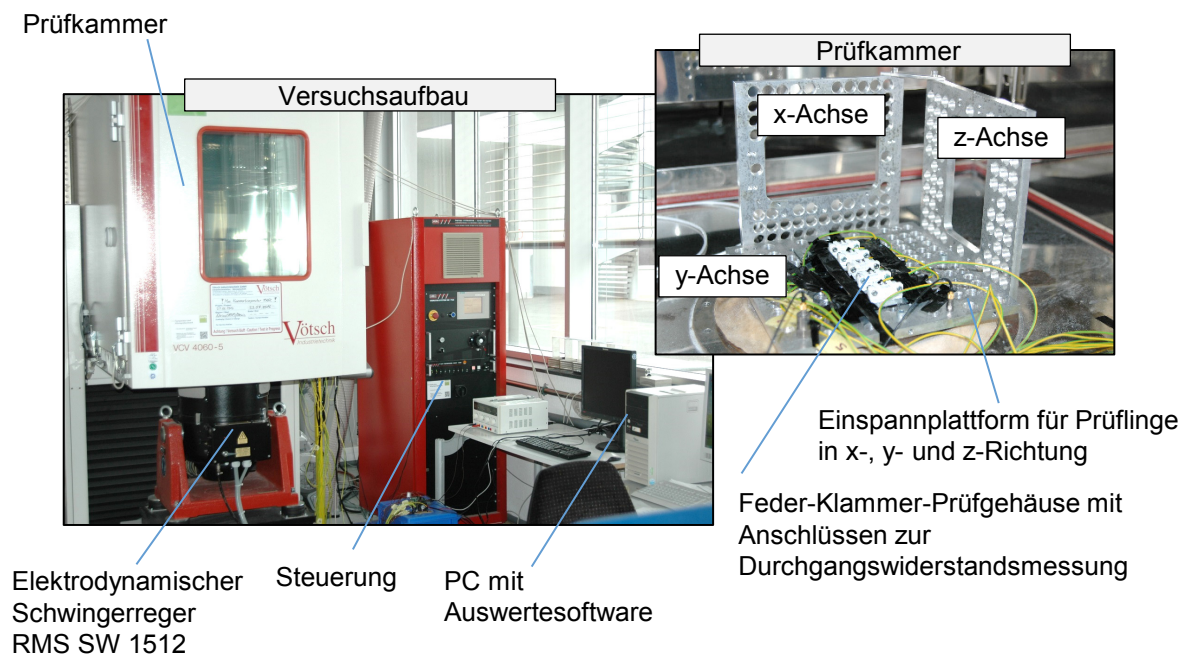
Beschreibung	Typ	Bemerkung
Solvertyp	Implizit	-
A	Reibungsfreie Lagerung	-
B	Kraft in y-Richtung	15 N (konst.)

Alle Kontakte sind als reibungsbehaftet ($\mu=0,6$) definiert.

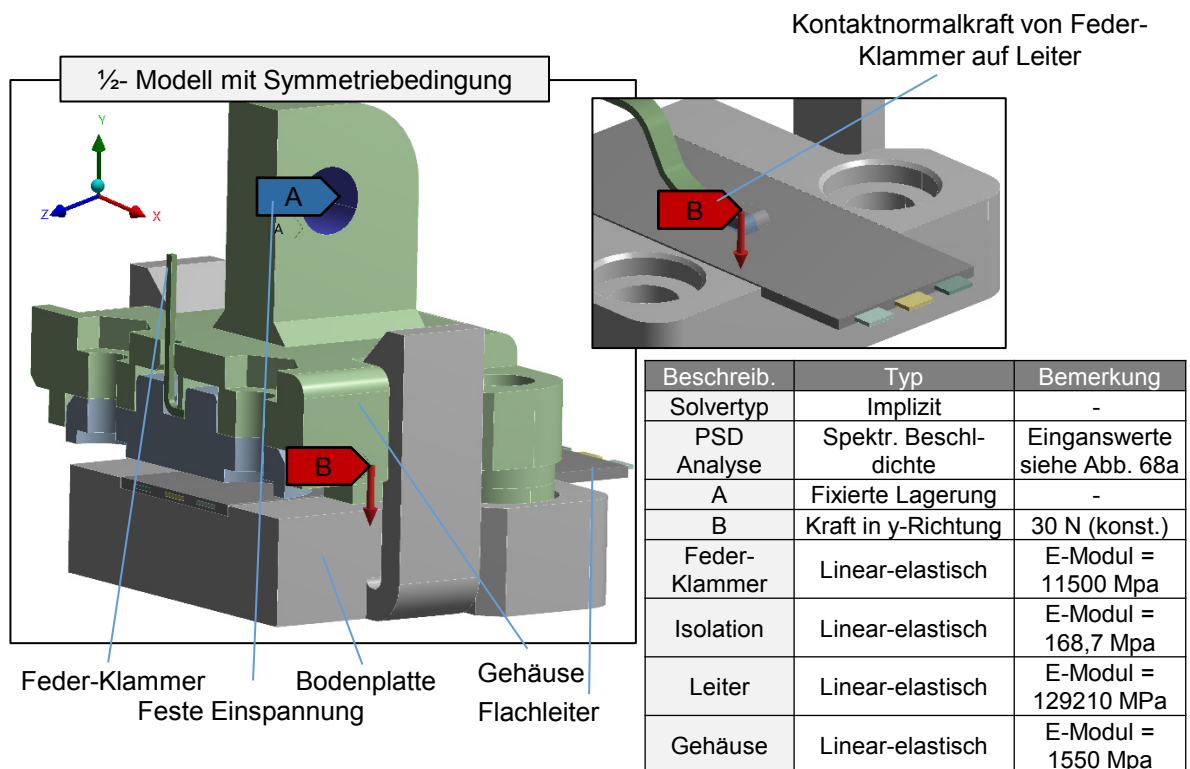
Bauteil	ρ kg/m ³	Poisonzahl	α in 1/K	E in MPa
Gehäuse, Grundplatte	930	0,38	0,00016	siehe Tab. A1
Isolierung	1250	0,36	0,00015	siehe Tab. A2
Leiter	8920	0,35	0,0000168	130000
Feder-Klammer	8900	0,35	0,0000106	127000
Schraube	7850	0,3	0,000012	200000

Tabelle A1		Tabelle A2	
Gehäuse, Grundplatte nach [5]		Isolaiton nach [21]	
Temperatur in °C	E-Modul in MPa	Temperatur in °C	E-Modul in MPa
-40	2500	-40	800
-20	2400	-20	500
0	2100	0	300
20	1600	20	168,7
40	900	40	50
60	500	60	18
80	400	80	8
100	350	100	5
120	280	120	3
140	250	140	1

Anhang 5.4 – Versuchsaufbau für Vibrationsuntersuchungen



Anhang 5.5 – Randbedingungen FE-Simulation Vibrationsanalyse



12 Literaturverzeichnis

- [1] MEISENZAHN, J. ; BAUER, C.: Trends im Bordnetz. In: *18. Kooperationsforum Bordnetze 2015*.
- [2] ERNST, M. ; HEUERMANN M.: *Die wichtigsten Bordnetz-Trends*. In: *Elektronik automotive Sonderheft Bordnetz* (September 2014), S. 20–23
- [3] KUNZE, A.: *Automatisierte Montage von makromechatronischen Modulen zur flexiblen Integration in hybride Pkw-Bordnetzsysteme*. Dissertation. Bamberg : Meisenbach Verlag, 2008 (Bericht aus dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik)
- [4] KRIEGER, J.: *Automatisierte prozessüberwachte Konfektionierung von folienisolierten Flachleitern*. Dissertation. Heimsheim : Jost-Jetter Verlag, 2002 (IPA-IAO-Forschung und -Praxis Nr. 344)
- [5] ADRIAN, J.: *Automatisiertes, stoffschlüssiges Fügen folienisolierter Flachleiter mit Oberflächenkontamination*. Heimsheim : Jost-Jetter Verlag, 2005 (IPA-IAO-Forschung und Praxis 418)
- [6] MATZNER, C.: *Konzeption produktspezifischer Lösungen zur Robustheitssteigerung elektronischer Systeme gegen die Einwirkung von Betauung in Automobil*. Zugl.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2010. Bamberg : Meisenbach, 2010 (Bericht aus dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik 215)
- [7] FELDMANN, K. (Hrsg.); SCHÖPPNER, V. (Hrsg.); SPUR, G. (Hrsg.): *Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren*. 2. Aufl. München : Hanser Verlag, 2014
- [8] WALLENTOWITZ, H. (Hrsg.); REIF, K. (Hrsg.): *Handbuch Kraftfahrzeugelektronik : Grundlagen - Komponenten - Systeme - Anwendungen*. 2. Aufl. Wiesbaden : Vieweg & Teubner Verlag, 2011
- [9] REIF, K.: *Bosch Autoelektrik und Autoelektronik : Bordnetze, Sensoren und elektronische Systeme*. 6. Aufl. Wiesbaden : Vieweg & Teubner Verlag, 2011
- [10] REIF, K.: *Automobilelektronik : Eine Einführung für Ingenieure*. 4. Aufl. Wiesbaden : Vieweg & Teubner Verlag, 2012
- [11] HOFFMANN, V. ; RUDOLPH, H.: *Modulare automobile Bordnetze*. In: *VDI-Berichte* 1996, Nr. 1287, S. 281–293
- [12] Goerlandt F.: *Modularisierung und Komplexität des Kraftfahrzeugs – Konsequenzen für das Bordnetz*, Bd. 1009.
- [13] ZIMMERMANN, W. ; SCHMIDGALL, R.: *Bussysteme in der Fahrzeugtechnik : Protokolle, Standards und Softwarearchitektur*. 5. Aufl. Wiesbaden : Springer & Vieweg Verlag, 2014

- [14] REIF, K.: *Batterien, Bordnetze und Vernetzung*. Wiesbaden : Vieweg & Teubner Verlag, 2010
- [15] BABIEL, G.: *Bordnetze und Powermanagement : Thermische Modellbildung für elektrische und elektronische Bauelemente*. Wiesbaden : Springer Verlag, 2013
- [16] PRECHLER R.: *Trends und Herausforderungen im Bordnetz* (17. Kooperationsforum Bordnetze 2014). Ingolstadt, 2014-11-19
- [17] ESCH, F.-R.: *Strategie und Technik des Automobilmarketing*. Wiesbaden : Springer Verlag, 2013
- [18] ZINKE, O. ; BRUNSWIG, H. ; VLCEK, A. ; HARTNAGEL, H. L. ; MAYER, K.: *Hochfrequenztechnik 1 : Hochfrequenzfilter, Leitungen, Antennen*. 6. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 2000
- [19] LISON, J.: *Trends und Entwicklung im Bordnetz* (12. Kooperationsforum Bordnetze 2009). Ingolstadt, 2009-11-11
- [20] ERICH, D.-I. E.: *Standardisierung und Innovationen im Bordnetz*. In: *ATZelektronik 2* (2007), Nr. 4, S. 60–64
- [21] BÖNIG, J.: *Integration des Systemverhaltens von Automobil-Hochvoltleitungen in die virtuelle Absicherung durch strukturmechanische Simulation*. Dissertation. Bamberg : Meisenbach Verlag (Bericht aus dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik 281)
- [22] BRAESS, H.-H. ; SEIFFERT, U.: *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik* : Springer Verlag, 2011
- [23] HEURUNG, T.: *Ein integriertes Konzept zur Entwicklung von Kabelbäumen*. In: *auto & elektronik* 1999, Heft 1, S. 127–131
- [24] SCHMITT, P.: *Automatisiertes Bandagieren von Leitungen mit Klebebändern*. In: *Maschinenmarkt*, Heft 14, S. 60–61
- [25] AGARD, B. ; TOLLENAERE, M.: Design of wire harnesses for mass customization. In: *Recent advances in integrated design and manufacturing in mechanical engineering* : Springer, 2003, S. 53–62
- [26] SCHEJA, J.: *Logistische Entscheidungsprobleme in der Praxis*. Gabler Edition Wissenschaft. Wiesbaden : Deutscher Universitätsverlag, 2005
- [27] CANKUT, Y.: *Kabelbäume automatisiert fertigen*. In: *ATZ Prod (ATZproduktion)*, 01/2011, S. 28–31
- [28] REINHART, G.: *Flexible Automatisierung der Konstruktion und Fertigung elektrischer Leitungssätze*. Dissertation. Berlin, Heidelberg : Springer, 1988 (iwb Forschungsberichte, Berichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München 12)

- [29] FRÖHLICH, K.: Umbruch in der Automobilindustrie, 09/2015. In: *ATZ*, S. S. 98
- [30] ROSS, H.-L.: *Funktionale Sicherheit im Automobil*. In: *München/Wien: Carl-Hanser-Verlag* (2014)
- [31] KATZIER, H.: *Elektrische Steckverbinder : Technologien, Anwendungen und Anforderungen*. 1. Aufl. Bad Saulgau : Leuze Verlag, 2012
- [32] HENKEL, A.: *Fehlertolerante Bordnetze* (18. Kooperationsforum Bordnetze). München, 2015-11-23
- [33] DRUHM, O. ; WIESMAYER, D.: Das vernetzte Netz, 09/2015. In: *Elektronik automotive*, S. 28–31
- [34] SCHNEIDHAMMER, G. ; DRUHM, O.: Das Bordnetz der Zukunft, 09/2015. In: *ATZelektronik*, S. 36–41
- [35] RICHTER, H.: *Elektronik und Datenkommunikation im Automobil*. In: *Ifl Technical Report Series* (2009)
- [36] *Hacker konnten BMW-Türen jahrelang per Handy öffnen: dpa*. In: *Die Zeit* (2015-01-30), Nr. 5, S. 12
- [37] JOHANNING, V. ; MILDNER, R.: *Car IT kompakt : Das Auto der Zukunft -- Vernetzt und autonom fahren*. Wiesbaden : Springer & Vieweg Verlag, 2015
- [38] HARDER, S.: *Hacker-Angriff aufs Auto: Bremsversagen via Bluetooth*. In: *Spiegel* (08/2014)
- [39] PLÖTZ, P. ; GNANN, T. ; KÜHN, A. ; WIETSCH, M. ; FRAUNHOFER, I. S.: *Markthochlaufszszenarien für Elektrofahrzeuge*. In: *Study commissioned by the National Academy of Science and Engineering and Working Group 7* (2013)
- [40] BURKERT, A. ; GUTZMER, P.: Mit 48 V wird es hochspannend, 01/2016. In: *MTZ*, S. 8–13
- [41] RODERER, G.: *Komplexität und Automatisierung* (14. Kooperationsforum Bordnetze 2011). München, 2011-11-30
- [42] BÖNIG, J. ; SPAHR, M. ; FISCHER, C. ; FRANKE, J.: Structural mechanic finite element analysis of the bend and torsion behavior of high-voltage cables. In: FRANKE, J. (Hrsg.): *3rd International Electric Drives Production Conference : Proceedings*. Piscataway, NJ : IEEE Service Center, 2013, S. 446–454
- [43] JANOUGH, S.: *Nichts geht ohne Kabel : Interview mit dem Leoni-Vorstandsvorsitzenden Dr. Klaus Probst*. URL <http://www.elektroniknet.de/automotive/sons-tiges/artikel/82538/1/> – Überprüfungsdatum 2017-02-14
- [44] WAGNER, G.: *Metall-Ultraschallschweißen von flexiblen Flachleitern*. AIF Abschlussbericht. Kaiserslautern

- [45] OTT, M.: *Automatische Leitungssatzverlegung im Pkw*. In: *Productronic* (2004), 5/6, S. 19–20
- [46] ADAMS, M.: *Extrudierte Flachleiter für vielseitige automotive Anwendungen*. In: *auto & elektronik* (2003), 2-3, S. 18–19
- [47] SCHRAMM, R.: *Strukturierte additive Metallisierung durch kaltaktives Atmosphärendruckplasma*. Dissertation. Bamberg : Meisenbach Verlag (Bericht aus dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik 273)
- [48] FRANKE, J. ; SPAHR, M. ; KUHN, T. ; HÖRBER, J.: Additive Manufacturing Technologies for Functionalized Mechatronic Integrated Devices. In: *Proceedings of the 11th International Congress Molded Interconnected Devices*.
- [49] FRANKE, J.: *Räumliche elektronische Baugruppen : Werkstoffe, Herstellung, Montage und Anwendungen für spritzgegossene Schaltungsträger*. München : Hanser Verlag, 2013
- [50] FRANKE, J.: *MID-Studie 2011 : Markt- und Technologieanalyse*. Erlangen, 2011
- [51] SÜß-WOLF, R.: Thermokinetic Process Flamecon® for Large Scale MID. In: Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen 3-D MID (Hrsg.): *Proceedings 9th International Congress Molded Interconnect Devices MID*, 2010
- [52] BISGES, M.: PLASMACOAT 3D is the revolutionary dry metallization process for the next generation of polymer electronic. In: Microsystèmes sur plastique (Hrsg.): *PEP - Centre Technique de la Plasturgie et des Composites*.
- [53] THEOPHILE, E.: The plasmadust process: An innovative process for metal coatings on a wide variety of substrates. In: Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen 3-D MID (Hrsg.): *Proceedings 9th International Congress Molded Interconnect Devices MID*, 2010
- [54] DZUR, B.: *Praktische Plasmaoberflächentechnik : Leitfaden für Studium und Anwendung*. 1. Aufl. Bad Saulgau : Leuze Verlag, 2011
- [55] SCHLOMS, M. ; MARTENS, S.: *Energy Backbone für die Stromverteilung : Schienen statt Kabel*. In: *Elektronik automotive Sonderheft Bordnetz* (2015), S. 21–26
- [56] SCHNEIDHAMMER, G. ; DRUHM, O.: *Lösungen zur dezentralen Bordnetzversorgung*. In: *ATZelektronik* (2016), Nr. 4, S. 48–53
- [57] SCHOFT, S.: *Zur Alterung von Aluminium-Hochstromverbindungen unter besonderer Berücksichtigung des Kriechens der Leitermaterialien*. In: *VDE-Fachbericht-Kontaktverhalten und Schalten* (2005)

- [58] SCHMIDT, H. ; HAUSWALD, T. ; BLÜMMEL, U.: *Kontaktierung von Aluminium-Litzenleitern mittels Crimptechnologie*. In: *VDE-Fachbericht-Kontaktverhalten und Schalten* (2011)
- [59] LEE, W.-B. ; BANG, K.-S. ; JUNG, S.-B.: *Effects of intermetallic compound on the electrical and mechanical properties of friction welded Cu/Al bimetallic joints during annealing*. In: *Journal of Alloys and Compounds* 390 (2005), 1-2, S. 212–219
- [60] JOYCE, C. F.: *A Weibull model to characterize lifetimes of aluminum alloy electrical wire connections*. In: *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology* 14 (1991), Nr. 1, S. 124–133
- [61] TANABE, S. ; SHIRAKI, Y. ; MURATA, Y.: *Near and far fields analysis from flat cables*. In: *IEEE 1997 IEEE 1997 International Symposium on Electromagnetic Compatibility Symposium Record*, S. 419–424
- [62] GERLING, D.: *Approximate analytical calculation of the skin effect in rectangular wires*. In: *2009 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, S. 1–6
- [63] BRAMESFELD, W. ; NEUMANN, L.: *Flachleiter, Technologie moderner E/E-Architekturen*. In: *Elektronik im Kraftfahrzeug– VDI-Berichte*, S. S. 891-904
- [64] SCHEFFELS, G.: *Flach und flexibel*. In: *Automobil Industrie* (2009), Nr. 9
- [65] DRAGOV, N.: *Verfahren und Vorrichtung zum Falten von Flachbandkabel*. 2003. Veröffentlichungsnr. EP 1 271 719 A3
- [66] DOMKE, W.: *Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung*. 10. verb. Aufl. Düsseldorf : Girardet, 2001
- [67] FELDMANN, K. ; GOTH, C. ; KUNZE, A.: *Interdisziplinäre Zusammenarbeit zur spezifischen Förderung der MID-Technologie*. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF)* 2009, Heft 9 (2007), S. 558–562
- [68] DIN EN ISO 2578. 1998. *Kunststoffe - Bestimmung der Temperatur-Zeit-Grenzen bei langanhaltender Wärmeeinwirkung*
- [69] EHRENSTEIN, G. W.: *Mit Kunststoffen konstruieren*. 3. Aufl. München : Hanser Verlag, 2007
- [70] SCHÜRMANN, H.: *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 2007
- [71] CZABANSKI, J. ; KRIEGER, J.: *Flex-Wiring und MID substituieren konventionelle Leitungssätze*. In: *Draht* (2000), Heft 3, S. 54–56

- [72] FELDMANN, K. ; KUNZE, A.: *Saving Weight and Costs with Flat Conductors - Efficient Assembly Concepts*. In: *Kunststoffe international* (2006), Nr. 3, S. 125–127
- [73] PHILIPP, S.: *Flat not fat : PU insulation for flat automotive cable*
- [74] LEONI Kabel GmbH: *LEONI Fahrzeugleitungen : Automotive Cables – Überprüfungsdatum 2017-02-15*
- [75] GASTEL, v. P.: *Einrichtung zum berührungslosen Betätigen einer Heckklappe eines Kraftfahrzeugs*. Huf Hülsbeck & Fürst GmbH & Co. Kg. Anmeldenr. DE200810063366. Veröffentlichungsnr. DE102008063366 A1
- [76] Thorsten Fuchs, Detlef Russ, Holger Würstlein: *Verfahren zur Erzeugung einer Bedienmeldung beim Auftreten eines Bedienereignisses*. Brose Fahrzeugteile GmbH & Co. Kommanditgesellschaft, Hallstadt. Anmeldenr. DE201010055297. Veröffentlichungsnr. DE102010055297 A
- [77] PÖHLAU, F.: *Techniken zum Abisolieren und Verbinden von Flachbandleitern*. Studie 30.04.1996. Erlangen, 1996
- [78] BÜHLER, L.: *Flachleiter innovativ verarbeiten*. In: *Productronic* (2004), Heft 7/8, S. S. 34-35
- [79] BAUMANN, G.: *Schnittiges Verfahren – Abisolieren und Ablängen von Kabeln mit CO-Lasern*. In: *Draht* (2000), Heft 3, S. S. 58-59
- [80] BLIEDTNER, J. ; MÜLLER, H. ; DIETRICH, J. ; REISZNER, H.: *FFC-Konfektionierung für Bordnetze im Automobilbau*. In: *DVS-Berichte* 2004, Nr. 230, S. 178–182
- [81] NITZL, C.: *Steckverbinder für Flachleiter*. Lisa Dräxlmaier GmbH. 2004-01-15. Veröffentlichungsnr. DE 102 27 602 A1, Int. Cl.: H01R 12/08 ed
- [82] SCHAUER, F.: *Verfahren zur Herstellung einer elektrisch leitenden Verbindung mit einem Flachleiter*. kabelmetal electro GmbH, Deutschland. 6. Febr. 1997. Veröffentlichungsnr. DE3840014 C2
- [83] SCHEERER, W.: *Untersuchung des elektrischen Kontaktverhaltens mikromechanischer Schaltelemente*. Stuttgart : Hahn-Schickard-Gesellschaft, 2001
- [84] VINARICKY, E.: *Elektrische Kontakte, Werkstoffe und Anwendungen : Grundlagen, Technologien, Prüfverfahren*. 2. Aufl. Berlin : Springer Verlag, 2002
- [85] Fachtagung Kabelextrusion (Hrsg.): *Kabelextrusion 2003 : Niederspannung, Automotive, Mittelspannung/Hochspannung, Messtechnik ; [Fachtagung Kabelextrusion, Bad Neuenahr, 8. - 9.10.2003 ; Tagungsbeiträge]*. Düsseldorf : VDI-Verl., 2003 (Kunststofftechnik)

-
- [86] KREBS, M.: *Rheologische Untersuchungen zur Temperatur- und Druckabhängigkeit von ein- und zweiphasigen Thermoplasten*. Dissertation. Kassel : Universitätsbibliothek Kassel, 2011 (Berichte des Instituts für Mechanik 2011,1)
- [87] KNOBLAUCH, G.: *Steckverbinder : Systemkonzepte und Technologien*. 2. Aufl. Renningen : Expert Verlag, 2002
- [88] BEHRENS, V.: *Elektrische Kontakte : Werkstoffe, Gestaltungen und Anwendungen in der Nachrichten-, Automobil- und Energietechnik*. 3. Aufl. Renningen : Expert Verlag, 2010
- [89] Lieferantenvorschrift 214. 2010. *Kfz-Steckverbinder, Prüfvorschrift*
- [90] UNGER, W. ; GETTO, R.: *Prüfungsauswahlverfahren für E/E-Komponenten : Deutschsprachige Übersetzung DC-10612*. Sindelfingen,, 2003
- [91] HEIDENREICH, K.: Karosserie-Anbauteile aus Kunststoff. In: WEBER, H. (Hrsg.): *Fachtagung Kunststoffe im Automobil-Exterieur*, 2006
- [92] RUDLAFF, T. ; KELZ, M.: *Developments in lightweight engineering for the Mercedes-Benz body-in-white* (Automotive Circle). 06.11.2012, 2012
- [93] BIRKERT, A. ; HAAGE, S. ; STRAUB, M.: *Umformtechnische Herstellung komplexer Karosserieteile : Auslegung von Ziehanlagen*. Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 2013
- [94] SCHRÖDER, K.-H.: *Werkstoffe für elektrische Kontakte und ihre Anwendungen : Fertigungsverfahren, Eigenschaften, Verbindungstechniken, Prüfverfahren, Anwendungen*. 2. Aufl. Renningen-Malmsheim : Expert Verlag, 1997
- [95] VDI-Richtlinie 2225. 1990. *Technisch-wirtschaftliches Konstruieren*.
- [96] ZIEGLER, C. ; KUNZE, A.: *Feder-Klammer-Direktkontaktierung*. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Deutschland. 2009-08-20. Deutschland. Veröffentlichungsnr. DE 10 2008 008 544. IPC H01R 4/24
- [97] MROCZKOWSKI, R. S. ; JUGY, R. ; GERFER, A.: *Trilogie der Steckverbinder : Applikationshandbuch zur optimierten Steckverbinderauswahl ; Steckverbindergrundlagen und Designkriterien*. 1. Ausg. Künzelsau : Swiridoff, 2011
- [98] RIEDER, W.: *Elektrische Kontakte : Eine Einführung in ihre Physik und Technik*. Berlin, Offenbach : VDE Verlag, 2000
- [99] HOLM, R.: *Electric Contacts : Theory and Application*. Fourth completely rewritten edition. Berlin, Heidelberg : Springer, 1967
- [100] GREENWOOD, J. A. ; WILLIAMSON, J. B. P.: *Contact of Nominally Flat Surfaces*. In: *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 295 (1966), Nr. 1442, S. 300–319

- [101] HOLM, R.: *Electric Contacts Handbook*. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 1958
- [102] SPAHR, M. ; BONIG, J. ; GLASSEL, T. ; SPRENG, S. ; EBERT, T. ; FRANKE, J.: Explicit FEM analysis of a new contacting method for electronic devices with novel wiring harnesses. In: *2015 IEEE 61st Holm Conference on Electrical Contacts (Holm)*, S. 400–407
- [103] BÖNIG, J. ; BICKEL, B. ; SPAHR, M. ; FISCHER, C. ; FRANKE, J.: Explicit Dynamics Process Simulation of Linear Coil Winding for Electric Drives Production. In: FRANKE, J. (Hrsg.): *4th International Electric Drives Production Conference : Proceedings*. Piscataway, NJ : IEEE Service Center, 2014, S. 210–216
- [104] KINDMANN, R. ; FRICKEL, J.: *Elastische und plastische Querschnittstragfähigkeit : Grundlagen, Methoden, Berechnungsverfahren, Beispiele*. Berlin : Ernst Verlag, 2002
- [105] BROCKMANN, W.: *Klebtechnik : Klebstoffe, Anwendungen und Verfahren*. 1. Aufl. Weinheim : Wiley-VCH Verlag, 2008
- [106] HARTING, D.: *Kontakt für Leiterfolien*. Harting Automotive GmbH & Co. KG. Anmeldenr. 00122234.8. 2001-05-09. Veröffentlichungsnr. EP 1 098 395 A2
- [107] SPAHR, M. ; KREITLEIN, S. ; HAAS, R. ; JAUMANN, A. ; GLASEL, T. ; SPRENG, S. ; FRANKE, J.: Application and comparison of analytic accelerated test-models for lifetime prediction of a novel contacting method. In: *2016 IEEE 62nd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts (Holm)*, S. 94–99
- [108] GLÄSEL, T. ; SPAHR, M. ; SPRENG, S. ; FRANKE, J.: *Innovative Kontaktierungstechnologien im Elektromaschinenbau: Entwicklung, Qualifizierung und Optimierung*. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 111 (2016), Nr. 5*, S. 280–284
- [109] BURESCH, I.: Möglichkeiten der Eigenschaftsoptimierung von Zinnoberflächen für Steckkontakte. In: VDE-Verlag (Hrsg.): *22. Albert-Keil-Seminar*.
- [110] BACH, F.-W. (Hrsg.): *Moderne Beschichtungsverfahren*. Weinheim : Wiley-VCH Verlag, 2005
- [111] BRAUNOVIC, M. ; MYSHKIN, N. K.: *Electrical contacts : Fundamentals, applications and technology*. London, 2007 (Electrical and computer engineering 132)
- [112] TU, K.: *Interdiffusion and reaction in bimetallic Cu-Sn thin films*. In: *Acta Metallurgica 21 (1973), Nr. 4*, S. 347–354
- [113] HAMMAM, T.: *The impact of sliding motion and current load on the deterioration of tin-coated contact terminals*. In: *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies 23 (2000), Nr. 2*, S. 278–285

- [114] BRAUNOVIC, M. ; ALEKSANDROV, N.: Intermetallic compounds at aluminum-to-copper and copper-to-tin electrical interfaces. In: *Electrical Contacts - 1992 Proceedings of the Thirty-Eighth IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, S. 25–34
- [115] HERMANCE, H. W. ; EGAN, T. F.: *Organic Deposits on Precious Metal Contacts*. In: *Bell System Technical Journal* 37 (1958), Nr. 3, S. 739–776
- [116] SCHREIER-ALT, T. ; RASTJAGAEV, E. ; RAßMANN, A. ; Albert-Ludwigs-Universität Freiburg Institut für Mikrosystemtechnik: *Raffungsmodelle: Raffungsmodelle für die Qualifikation mechatronischer Systeme und Komponenten ; Abschlussbericht ; Forschungsvorhaben Nr. 618 I : FVA, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Arbeitskreis Mechatronik*, 2014
- [117] GAGNON, D. ; BRAUNOVIC, M.: *Fretting in copper-to-copper contacts under AC and DC current conditions*. In: *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies* 24 (2001), Nr. 3, S. 378–383
- [118] LEE, A. ; MAMRICK, M.: *Fretting corrosion of Tin-plated copper alloy*. In: *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology* 10 (1987), Nr. 1, S. 63–67
- [119] MALUCCI, R. D.: *Effects of wipe on contact resistance of aged surfaces*. In: *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part A* 18 (1995), Nr. 3, S. 701–707
- [120] ABBOTT, W. H.: The effects of design variables and surface films on the contact resistance of copper-copper contact interfaces. In: *Electrical Contacts - 1992 Proceedings of the Thirty-Eighth IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, S. 219–235
- [121] NARAYANAN, T. S. ; PARK, Y. W. ; LEE, K. Y.: *Fretting-corrosion mapping of tin-plated copper alloy contacts*. In: *Wear* 262 (2007), 1-2, S. 228–233
- [122] PARK, Y. W. ; NARAYANAN, T. S. ; LEE, K. Y.: *Effect of temperature on the fretting corrosion of tin plated copper alloy contacts*. In: *Wear* 262 (2007), 3-4, S. 320–330
- [123] ITO, T. ; MATSUSHIMA, M. ; TAKATA, K. ; HATTORI, Y.: Factors Influencing the Fretting Corrosion of Tin Plated Contacts. In: *Electrical Contacts - 2006. 52nd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, S. 267–272
- [124] VARENBERG, M. ; HALPERIN, G. ; ETSION, I.: *Different aspects of the role of wear debris in fretting wear*. In: *Wear* 252 (2002), 11-12, S. 902–910
- [125] ELLEUCH, K. ; FOUVRY, S. ; KAPSA, P.: *Fretting maps for anodised aluminium alloys*. In: *Thin Solid Films* 426 (2003), 1-2, S. 271–280

- [126] MALUCCI, R. D.: *Accelerated testing of tin-plated copper alloy contacts*. In: *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies* 22 (1999), Nr. 1, S. 53–60
- [127] BRAUNOVIC, M.: *Fretting damage in tin-plated aluminum and copper connectors*. In: *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology* 12 (1989), Nr. 2, S. 215–223
- [128] SOMMER, K. ; HEINZ, R. ; SCHÖFER, J.: *Verschleiß metallischer Werkstoffe : Erscheinungsformen sicher beurteilen*. 1. Aufl. Wiesbaden : Vieweg & Teubner Verlag, 2010
- [129] DUBBEL, H. ; FELDHOUSEN, J. ; GROTE, K.-H.: *Dubbel : Taschenbuch für den Maschinenbau*. 24. Aufl. Berlin : Springer Verlag, 2014
- [130] VISSER, A. ; VICHYTI, C. ; MORI, G. ; VIDIC, J. ; PIPPAN, R. ; PANZENBÖCK, M. ; KAPP, M. ; FLUCH, R.: *Untersuchungen zur Schwingungsrissskorrosion und Repassivierung bei rostfreien austenitischen CrNiMo-Stählen in chloridhaltigen Lösungen*. In: *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte* 158 (2013), Nr. 9, S. 384–390
- [131] MAISCH, M.: *Zuverlässigkeitsorientiertes Erprobungskonzept für Nutzfahrzeuggetriebe unter Berücksichtigung von Betriebsdaten*. Dissertation. Stuttgart : IMA, 2007 (Berichte aus dem Institut für Maschinenelemente, Antriebstechnik, CAD, Dichtungen, Zuverlässigkeit Bericht Nr. 124)
- [132] NELSON, W. B.: *Accelerated Testing : Statistical Models, Test Plans, and Data Analysis*. Hoboken : John Wiley & Sons Inc, 2009 (Wiley Series in Probability and Statistics v.344)
- [133] ARRHENIUS, S.: *Über die Reaktionsgeschwindigkeit bei der Inversion von Rohrzucker durch Säuren*. In: *Zeitschrift für Physikalische Chemie* 4 (1889), Nr. 1
- [134] BAYERER, R. ; HERRMANN, T. ; LICHT, T. ; LUTZ, J. ; FELLER, M.: *Model for Power Cycling lifetime of IGBT Modules - various factors influencing lifetime*. In: *5th International Conference on Integrated Power Electronics Systems*, 2008
- [135] HANNACH, T.: *Ermittlung von Lebensdauergleichungen vom Coffin-Manson- und Morrowtyp für bleihaltige und bleifreie Weichlote durch Kombination von FE und Experiment*. Dissertation. 1. Aufl. Göttingen : Cuvillier Verlag, 2010
- [136] GLASSTONE, S. ; et al: *The theory of rate processes - The kinetics of chemical reactions, viscosity, diffusion and electrochemical phenomena*. New York : International chemical series, 1941

- [137] LAWSON, R. W.: The Accelerated Testing of Plastic Encapsulated Semiconductor Components. In: *12th International Reliability Physics Symposium*, S. 243–249
- [138] PECK, D. S.: Comprehensive Model for Humidity Testing Correlation. In: *24th International Reliability Physics Symposium*, S. 44–50
- [139] CARUSO, H. ; DASGUPTA, A.: A fundamental overview of accelerated-testing analytic models. In: *Annual Reliability and Maintainability Symposium. 1998 Proceedings. International Symposium on Product Quality and Integrity*, S. 389–393
- [140] ESCOBAR, L. A. ; MEEKER, W. Q.: A Review of Accelerated Test Models. In: *Statistical Science* 21 (2006), Nr. 4, S. 552–577
- [141] ZHANG, J. G.: The application and mechanism of lubricants on electrical contacts. In: *IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, S. 145–154
- [142] SHAO, C. B. ; ZHANG, J. G.: Electric contact behavior of Cu-Sn intermetallic compound formed in tin platings. In: *Electrical Contacts - 1998. Forty-Fourth IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, S. 26–33
- [143] WOLF, M. ; WEIMERSKIRCH, A. ; PAAR, C.: Secure In-Vehicle Communication. In: LEMKE, K.; PAAR, C.; WOLF, M. (Hrsg.): *Embedded Security in Cars*. Berlin/Heidelberg : Springer Verlag, 2006, S. 95–109
- [144] LANGE, K. ; LÖCHERER, K.-H.: *Taschenbuch der Hochfrequenztechnik : Band 1: Grundlagen*. 5. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 1992
- [145] STINY, L.: *Passive elektronische Bauelemente : Aufbau, Funktion, Eigenschaften, Dimensionierung und Anwendung*. 2. Aufl. Wiesbaden : Springer & Vieweg Verlag, 2015
- [146] GUSTRAU, F.: *Hochfrequenztechnik : Grundlagen der mobilen Kommunikationstechnik*. 2., überarb. und erw. Aufl. München : Fachbuchverl. Leipzig, 2013
- [147] HELMREICH, K.: *Entwurf und Analyse von Schaltungen für hohe Datenraten, Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik*. Erlangen, Universität Erlangen-Nürnberg : Vorlesungsskript. 2016
- [148] JOHNSON, H. W. ; GRAHAM, M.: *High-speed signal propagation : Advanced black magic*. 10. Aufl. Upper Saddle River, NJ : Prentice Hall PTR, 2008

