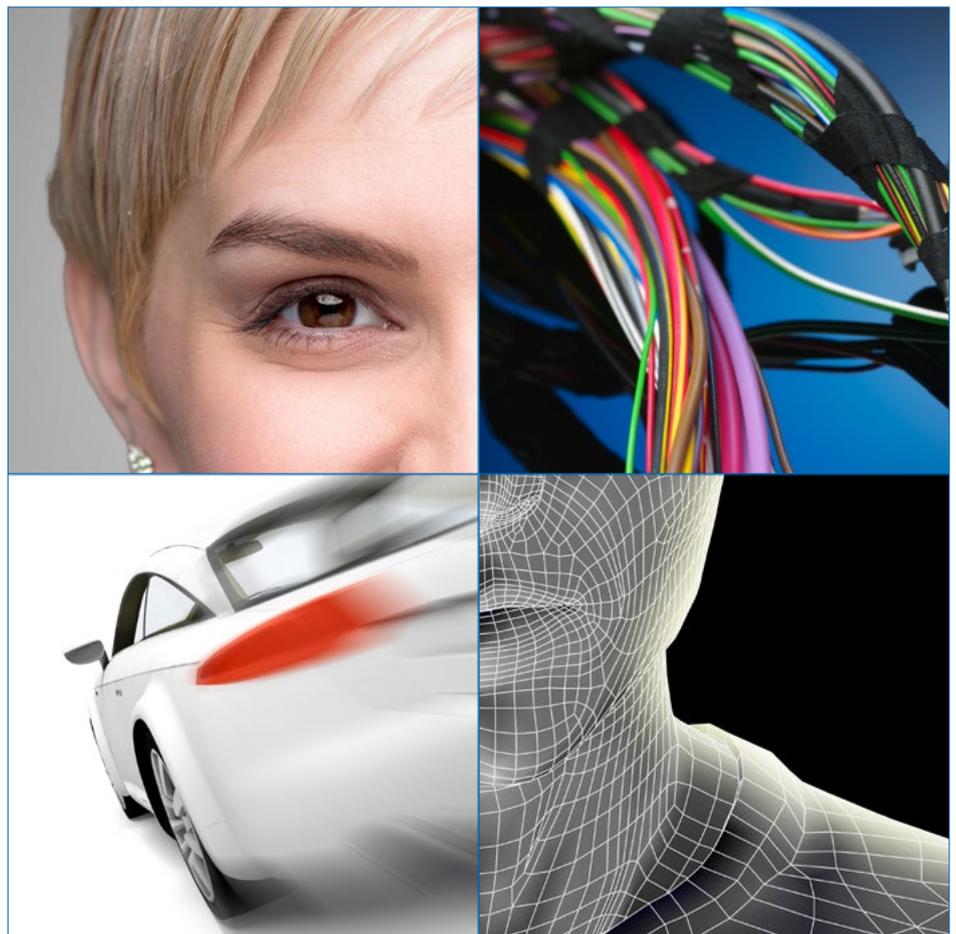


Technischer Leitfaden

Ausfallraten für Bordnetz- Komponenten im Automobil

Erwartungswerte und Bedingungen





Technischer Leitfaden

Ausfallraten für Bordnetz-Komponenten im Automobil – Erwartungswerte und Bedingungen

Herausgeber:

ZVEI e. V.

Fachverband Kabel und isolierte Drähte

Minoritenstraße 9-11

50667 Köln

Verantwortlich:

Sebastian Glatz

Telefon: +49 221 96228-16

E-Mail: kabel@zvei.org

www.zvei.org

1. Ausgabe, Oktober 2021

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt.

Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Herausgebers unzulässig.

Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzung, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Trotz größtmöglicher Sorgfalt übernehmen ZVEI und Bayern Innovativ GmbH keine Haftung für den Inhalt.

bayern  innovativ

Cluster 
Automotive

Bayern Innovativ GmbH

Cluster Automotive

Am Tullnaupark 8

90402 Nürnberg

Verantwortlich:

Dr. Andreas Böhm

Telefon: +49 911-20671-214

E-Mail: boehm@bayern-innovativ.de

www.bayern-innovativ.de

Inhalt

1	Vorwort	13
2	Einführung	14
2.1	Allgemeines	14
2.2	Begriffe und Definitionen	14
2.3	Abkürzungen	15
3	Arbeit und Ziele des Arbeitskreis Automotive Bordnetze	16
3.1	Ziele	16
3.2	Mitwirkende	16
3.3	Arbeitsweise und Organisation	16
3.4	Vorgehensweise	16
4	Technischer Hintergrund, Geltungsbereich	17
5	Unterscheidung von systematischen Fehlern und zufälligen Ausfällen	18
6	Bestimmung der Ausfallrate von zufälligen Ausfällen	19
6.1	Anmerkung zum Unterschied zwischen Qualitäts-Metriken und Ausfallraten	19
6.2	Feld-Beobachtung zur Ermittlung von Ausfallrate und Verteilung der Ausfallarten	19
6.3	Labortests zur Ermittlung von Ausfallrate und Verteilung der Ausfallarten	20
6.4	Verwendung von Rechenmodellen zur Ermittlung einer Ausfallrate	21
6.4.1	Berücksichtigung physikalischer Effekte im FIDES	22
6.4.2	Prozessfaktoren im FIDES	24
6.4.3	Audit-Fragenkatalog	26
6.4.4	Default-Werte	27
7	Ausfallraten und Fehlermodelle der wichtigsten Bordnetzkomponenten	28
7.1	Elektrische Leitungen	28

7.1.1	Beschreibung der Funktionsbaugruppe (Bauteil oder Baugruppe)	28
7.1.2	Genaue Beschreibung der Verwendungsart (Use Case)	28
7.1.3	Beschreibung der Klassen	29
7.1.4	Anforderungen bezüglich Lifecycles der Funktionsbaugruppe	30
7.1.5	Einzuhaltende Eigenschaften der Funktionsbaugruppe	31
7.1.6	Eigenschaften von Leitungen zur Energieversorgung mit Anwendung bis zu 60V (Klasse 1)	31
7.1.7	Eigenschaften Leitungen zur Energieversorgung mit Anwendung ab 60V bis zu 1000V (Klasse 2)	33
7.1.8	Eigenschaften Leitungen zur Datenübertragung (Klasse 3)	33
7.1.9	Eigenschaften Aluminium-Leitungen	33
7.1.10	Eigenschaften Leitungen mit Cu-Legierungen	33
7.2	Elektrische Stecksysteme	34
7.2.1	Beschreibung der Funktionsbaugruppe (Bauteil oder Baugruppe)	34
7.2.2	Genaue Beschreibung der Verwendungsart (Use Case)	36
7.2.3	Beschreibung der Klassen	37
7.2.4	Anforderungen bezüglich Lifecycles der Stecksysteme	40
7.2.5	Fehlermodell	42
7.2.6	Basis-Ausfallrate	47
7.2.7	Einflussfaktoren auf die Ausfallrate	52
7.2.8	Tabellen und Berechnungsformeln	56
7.3	Passive Elektrische Sicherungen	59
7.3.1	Beschreibung der Funktionsbaugruppe (Bauteil oder Baugruppe)	59
7.3.2	Genaue Beschreibung der Verwendungsart (Use Case)	63
7.3.3	Einzuhaltende Eigenschaften der Funktionsbaugruppe	63
7.3.4	Ausfallrate	66
7.3.5	Quantitatives Fehlermodell	77
7.3.6	Berechnungsbeispiel Sicherung	78

7.4 Funktionsbaugruppe Schraubkontaktierung	83
7.4.1 Beschreibung der Funktionsbaugruppe (Bauteil oder Baugruppe)	83
7.4.2 Genaue Beschreibung der Verwendungsart (Use Case)	85
7.4.3 Anforderungen bezüglich Lifecycles der Funktionsbaugruppe	85
7.4.4 Einzuhaltende Eigenschaften der Funktionsbaugruppe	89
7.4.5 Fehlermodell und Ausfallrate	89
7.5 Nicht lösbare elektrische Verbindung	90
7.5.1 Verfahren Ultraschallschweißen (USS)	91
7.5.2 Verfahren Widerstandsschweißen (WSS)	92
7.5.3 Best Practice und Lifecycle für Splice-Verbindungen	94
7.5.4 Fehlermodell für Splice-Verbindungen	98
7.5.5 Ausfallrate von Splice-Verbindungen	99
7.5.6 Konkrete Anwendung der FIDES auf Splice-Verbindungen	101
7.5.7 Beispiel: Ausfallrate für eine spezifische Referenz-Splice-Kombination	104
7.5.8 Überprüfung der Ausfallrate gemäß FIDES durch beschleunigte Laborversuche	107
7.5.9 Isolation/Abdichtelement	107
7.5.10 Kraftschlüssige und mechanische Verbindungen	112
8 Einheitliche Dokumentation	112
9 Arbeitsgruppenmitglieder	113

Tabellen

Tabelle 6-1: Typisches Betriebsprofil in Mitteleuropa als Grundlage für physikalische Belastungs-Berechnungen	23
Tabelle 6-2: Tabellarische Bestimmung chemischer Beschleunigungsfaktoren für Π_{chem}	24
Tabelle 6-3: Übersicht Auditfaktoren: Mögliche Intervalle und Default-Werte	27
Tabelle 7-1: Mindestanforderungen an Stecker von Aggregate Anschlüssen	38
Tabelle 7-2: Mindestanforderungen an Steckhülsen in Gehäusen bzw. mit angeschlagenen Leitungen	39
Tabelle 7-3 Umweltbedingungen der Klasse 1k2, DIN EN 60721-3-1, auszugsweise	41
Tabelle 7-4: Typische Degradationsmechanismen bei Kontaktelementen in Steckverbindern	44
Tabelle 7-5: Verteilung der Ausfallart bei Steckverbinderkontakten in verschiedenen Zeiträumen	48
Tabelle 7-6 Ausfallraten je Fehlergruppe	51
Tabelle 7-7 Errechnete Verbesserungsfaktoren in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur und Stromerwärmung bei einer Aktivierungsenergie von 0,51 eV.	54
Tabelle 7-8 Festgelegte Verbesserungsfaktoren in Abhängigkeit der Aktivierungsenergie pro eV	54
Tabelle 7-9: Rating-Faktoren Steckkontakte	56
Tabelle 7-10: Applikationsspezifische, physikalische FIT Basisraten für Steckkontakte	57
Tabelle 7-11 Resultierende Ausfallraten für Steckkontakte	57
Tabelle 7-12 Ausfallarten für Steckkontakte	58
Tabelle 7-13 Überblick über gängige Automobil-Sicherungen	60
Tabelle 7-14 Überblick über die Sicherungen für die dieses Dokuments gilt	62
Tabelle 7-15 Überblick über die einzuhaltenden Eigenschaften der Sicherungen	63
Tabelle 7-16 Faktoren $\Pi_{\text{thermoelectrical}}$ für Sicherungen	67
Tabelle 7-17 Faktoren Π_{TCy} für Sicherungen	69
Tabelle 7-18: $\Pi_{\text{Mechanical}}$ für Sicherungen	73
Tabelle 7-19: Π_{RH} für Sicherungen	74
Tabelle 7-20: Π_{Chem} für Sicherungen	75
Tabelle 7-21 Berechnung und Empfehlungen mit Auswertung	75
Tabelle 7-22 Auditphasen und ihre Anteile	77
Tabelle 7-23 Ausfallarten der Sicherung	78

Tabelle 7-24 Technische Daten für Stahlbolzen	84
Tabelle 7-25 Technische Daten für Aluminiumbolzen	84
Tabelle 7-26 Minimale Blechdicken bei Schraubkontakten	87
Tabelle 7-27 Empfehlungen für das Design für Splice-Verbindungen	95
Tabelle 7-28 Degradationsmechanismen in Splice-Verbindungen	99
Tabelle 7-29 Fehlerursachen und deren Modellierung gemäß IDES [5]	100
Tabelle 7-30 Physikalische Beschleunigungsfaktoren für Konnektoren, die für Splices gelten.	102
Tabelle 7-31: Auditphasen und Ihre Anteile	103

Abbildungen

Abbildung 6-1: Das FIDES Basis-Modell [5].	22
Abbildung 7-1 Abgrenzung der Funktionsbaugruppe „elektrische Leitung“	28
Abbildung 7-2: Aggregate-Schnittstelle	34
Abbildung 7-3: Inline-Steckverbindung	34
Abbildung 7-4: Beobachtete Fahrzeuge im Feld	48
Abbildung 7-5 Beispiel der Verteilungsuntersuchung der Fehlerraten der Summe systematischer Fehler	49
Abbildung 7-6 Weibullverteilungen der betrachteten systematischen und zufälligen Fehler in den Monaten 7 bis 23	50
Abbildung 7-7 Ermittlung der Regressionsgeraden in den Monaten 7 bis 23 zur Fehlerfortpflanzung auf 90 Monate	50
Abbildung 7-8 Verlauf der hochgerechneten Fehler im Vergleich zu den erfassten Ist-Fehlern am Beispiel der Fehler systematischer Ursachen; der Rahmen spiegelt den Bereich der verwendeten Daten für die Approximation wider	51
Abbildung 7-9 Verwendeter Testhalter für die SF36 mit dem CTI Faktor 86 E-6/K und Quetschkabelschuhen	59
Abbildung 7-10 Verwendeter Sicherungshalter 1 polig mit 6,3mm Crimp-Kastenkontakt	59
Abbildung 7-11 Systemgrenzen für die Sicherung	59
Abbildung 7-12 Testaufbau Wöhlerkurve	71
Abbildung 7-13 Belastungsfunktion	71
Abbildung 7-14 Beispiel einer Wöhlerkurve	72
Abbildung 7-15 Beispiel Temperaturkollektiv Innenraum	80
Abbildung 7-16 Ergebnis der Beispielrechnung für eine Sicherung	82
Abbildung 7-17 geschweißte Schraubkontakte	83

Abbildung 7-18 Systemgrenze Schraubkontakte	83
Abbildung 7-19 Strompfad am Schraubkontakt	83
Abbildung 7-20: Schweißprozess bei Schraubkontakten	86
Abbildung 7-21: Zugfestigkeit und Bruchdehnung von Werkstoffen	86
Abbildung 7-22: Prüfablauf Verschraubung	87
Abbildung 7-23: Darstellung Schraubverbindung	88
Abbildung 7-24: Beispielhafte ultraschallgeschweißte Splices: Endknoten links, Durchgangsknoten rechts	91
Abbildung 7-25: Ultraschallgeschweißte Splice-Verbindung	91
Abbildung 7-26: Skizze einer ultraschallgeschweißten Splice-Verbindung in Form eines Endknotens	92
Abbildung 7-27: Beispielhafte widerstandsgeschweißte Splices: Endknoten links, Durchgangsknoten rechts	93
Abbildung 7-28: Widerstandsgeschweißte Splice-Verbindung	93
Abbildung 7-29: Skizze einer widerstandsgeschweißten Splice-Verbindung in Form eines Endknotens	94
Abbildung 7-30: Darstellung Referenz-Splice (ultraschallgeschweißte), dargestellt ohne Isolationskappe	104
Abbildung 7-31: Darstellung Referenz-Splice (widerstandsgeschweißte), dargestellt ohne Isolationskappe	105
Abbildung 7-32 Schrumpfschläuche	108
Abbildung 7-33 Schmelzklebprofile	109
Abbildung 7-34 Länge der Abisolierung	109
Abbildung 7-35 Abstand A zu gering und abstehende Einzeldrähte	109
Abbildung 7-36 Kleberaustritt am Schrumpfschlauchende	110
Abbildung 7-37 Länge des Schrumpfschlauchabschnitts	110
Abbildung 7-38 Hohlräume am Schrumpfschlauch	101
Abbildung 7-39 Fehlerbilder Schrumpfschlauch	102

Referenzierte Dokumente

[1]	ISO 26262:2018(E) Part 1-12	Dezember 2018	Road vehicles - Functional safety
[2]	MIL-HDBK-217FN2	Dezember 1991	RELIABILITY PREDICTION OF ELECTRONIC EQUIPMENT
[3]	SIEMENS NORM SN 29500-1	2004	Ausfallrate, Bauelement, Erwartungswert, Zuverlässigkeit
[4]	IEC 61709:2017	2017	Electronic Components - Reliability
[5]	FIDES Guide 2009 Edition A	September 2010	Reliability Methodology for Electronic Systems
[6]	FMD-2016	2016	Failure Mode/Mechanism Distributions 2016 Database
[7]	ISO 8820-3; 4. Edition	15.09.2015	Road vehicles -Fuse-links- Part 3: Fuse-links with tabs (blade type) Type C (medium), Type E (high current) and Type F (miniature)
[8]	ISO 8820-4; 2. Edition	15.12.2010	Road vehicles -Fuse-links- Part 4: Fuse-links with female contacts (type A) and bolt contacts (type B) and their test fixtures
[9]	ISO 8820-5; 2. Edition	15.03.2015	Road vehicles -Fuse-links- Part 5: Fuse-links with axial terminals (Strip fuse-links) Types SF30 and SF51 and test fixtures
[10]	ISO 8820-8; 1. Edition	01.08.2012	Road vehicles -Fuse-links- Part 8: Fuse-links with bolt in contacts (Type H and J) with rated voltage of 450 V
[11]	ISO 8820-12	27.02.2020	Road vehicles. Fuse-links. Fuse-links with tabs (blade type) Type N (sub miniature)
[12]	ISO 20934; 1. Edition	04.2019	Road vehicles - Fuse-links with axial terminals for use in 48V networks - Types SF36-70V, SF51-70V and SF56-70V
[13]	Eberlin, Hock; Springer Verlag	2014	Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit technischer Systeme
[14]	ZVEI TLF 0100	April 2019	Verwendungshinweise für Automotive Leitungen
[15]	ZVEI TLF 0112-1	2019	Prüfungen an elektrischen Leitungen für Kraftfahrzeuge, einadrige ungeschirmte Kupferleitungen
[16]	ZVEI TLF 0214	2020	Validierung von Automotive Niedervolt-Steckverbindern
[17]	LV214	März 2010	KFZ Steckverbinder, Prüfvorschrift
[18]	Prüfvorschrift AK-96	April 1996	AK Prüfrichtlinie für KFZ-Steckverbinder

[19]	UTE C 80-810	07/2000	RELIABILITY DATA HANDBOOK - UNIVERSAL MODEL FOR RELIABILITY PREDICTION OF ELECTRONICS COMPONENTS, PCBs AND EQUIPMENT
[20]	Proc. 27th Int. Conf. Electr. Contact (ICEC)	2014	Reliability assessment and field failure predictions – a prognostic model for separable electrical contacts
[21]	IEEE Holm Conference on Electrical Contacts	2018	Accelerated Testing of Electromechanical Connectors Considering Thermal and Mechanical Loads
[22]	Information Center Monograph SVM-8	1971	Selection and Performance of Vibration Tests, Shock and Vibration
[23]	APTIV	2020	Auswertung Felddaten Steckkontakte
[24]	Bordnetzforum Ludwigsburg	08.03.2016	Thermische Belastungen von Isolationsmaterialien
[25]	ZVEI	12/2013	Spannungsklassen in der Elektromobilität
[26]	Stecker AV		Spezifikationsnummer: 114-94201 "Stecker-AV"
[27]	DIN EN ISO 4063:2011-03	03/2011	Schweißen und verwandte Prozesse - Liste der Prozesse und Ordnungsnummern
[28]	DIN 8593-6:2003-09	09/2003	Fertigungsverfahren Fügen - Teil 6: Fügen durch Schweißen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe
[29]	DIN 1910-11:1979-02	02/1979	Schweißen; Werkstoffbedingte Begriffe für Metallschweißen
[30]	DIN 1910-100:2008-02	02/2008	Schweißen und verwandte Prozesse - Begriffe - Teil 100: Metallschweißprozesse mit Ergänzungen zu DIN EN 14610:2005
[31]	DIN EN 14610:2005-02	02/2005	Schweißen und verwandte Prozesse - Begriffe für Metallschweißprozesse
[32]	DIN EN ISO 898-1	2013	Mechanische Eigenschaften von Verbindungselementen aus Kohlenstoffstahl und legiertem Stahl - Teil 1: Schrauben mit festgelegten Festigkeitsklassen - Regelgewinde und Feingewinde
[33]	DIN EN ISO 898-2	2012	Mechanische Eigenschaften von Verbindungselementen aus Kohlenstoffstahl und legiertem Stahl - Teil 2: Muttern mit festgelegten Festigkeitsklassen - Regelgewinde und Feingewinde

[34]	EN AW-5019	2011-07	Aluminium-Werkstoff-Datenblatt EN AW-5019, EN AW-Al Mg5
[35]	EN AW-5052	2011-07	Aluminium-Werkstoff-Datenblatt EN AW-5052, EN AW-Al Mg2,5
[36]	EN AW-5186	2011-07	Aluminium-Werkstoff-Datenblatt EN AW-5186, EN AW-Al Mg4 MNO,4
[37]	EN AW-5554	2011-07	Aluminium-Werkstoff-Datenblatt EN AW-5554, EN AW-Al Mg3 Mn(A)
[38]	EN-AW-6082	2011-07	Aluminium-Werkstoff-Datenblatt EN AW-6082, EN AW-Al Si1MgMn
[39]	VDI-2230	2015	Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen - Zylindrische Einschraubenverbindungen
[40]	VDI/VDE 2862	2015	Mindestanforderungen zum Einsatz von Schraubensystemen und -werkzeugen - Anwendungen im Anlagen-, Maschinen- und Apparatebau sowie für Flanschverbindungen an drucktragenden Bauteilen
[41]	VDA 230-213	2018	Prüfverfahren für die Produktklassen Prelube, Prelube 2, Hotmelt, Spot lubricant

1 Vorwort

Bei funktionskritischen und sicherheitsrelevanten Systemen werden Anforderungen an die Zuverlässigkeit und damit die Ausfallsicherheit gestellt. Der Nachweis der Erfüllung dieser Anforderungen ist in der Regel quantitativ zu erbringen.

Dazu werden auftretende Belastungen im Betrieb beschrieben und geeignete Bordnetz-Komponenten ausgewählt. Dabei wird auf bestehende Normen (SN29500, IEC 61709, MIL-Handbücher usw.) zurückgegriffen, welche jedoch allgemein gehalten und nicht spezifisch auf das Automobil fokussiert sind.

Der aktuelle Stand der Technik im Automobil-Bordnetz ist in die vorliegende Richtlinie eingeflossen.

Es wird aufgezeigt, wie Automobil-Bordnetzkomponenten mit Hilfe konstruktiver Merkmale charakterisiert und in Klassen eingeteilt werden können.

Für diese werden typische Ausfallmechanismen beschrieben, Ausfallverteilungen dargestellt und Erwartungswerte für Ausfallraten genannt. Diese gelten nur für beschriebene Prämissen (zum Beispiel konstruktive Merkmale und Maßnahmen in Produktion oder Betrieb).

Weichen die realen Werte davon ab, müssen die dargestellten Berechnungen gegebenenfalls angepasst werden. Eine Anleitung zu diesen Berechnungen wird deshalb ergänzend dargestellt.

2 Einführung

2.1 Allgemeines

Dieser technische Leitfaden wurde in der vorliegenden Fassung von Vertretern der Wertschöpfungskette von Automobil-Bordnetzen (Hersteller der Komponente, Hersteller der Maschinenteknik, Bordnetz-Konfektionär, Automobilhersteller/OEM) erarbeitet. Die Inhalte dieses technischen Leitfadens referenzieren auf den „Arbeitskreis ASIL im Bordnetz – Ausfallraten für Bordnetz-Komponenten im Automobil“. Die herrschende Meinung zum Stand der Technik ist in die Ausarbeitung eingeflossen; hierbei gilt immer der Stand zum Zeitpunkt der Erstellung des Dokuments.

Die Hinweise in diesem Leitfaden haben unverbindlichen Empfehlungscharakter. Sie dienen als Orientierung zur Bestimmung der Ausfallraten der hier angegebenen Komponenten. Die betrachteten Komponenten bzw. Klassen erheben dabei nicht den Anspruch auf Vollständigkeit.

Nach Bedarf können Aktualisierungen und Erweiterungen erfolgen.

2.2 Begriffe und Definitionen

Begriffe	Definitionen
System	Menge von Komponenten oder Subsystemen, die mindestens einen Sensor, eine Steuerung und einen Aktuator in Beziehung setzen (ISO 26262)
(Hardware-) Komponente	Nicht-Systemebenelement, das logisch oder technisch trennbar ist und mehr als ein Hardwareteil umfasst (ISO 26262)
Funktionsbaugruppe	Andere Bezeichnung für eine (Hardware-) Komponente, die aus einem oder mehreren funktional zusammengehörenden Hardwareteilen besteht
Element	System, (Hardware-) Komponente oder Hardwareteil (ISO 26262)
Kontaktsystem	Kombination aus männlichen und weiblichen Kontaktteilen
Ausfall	Beendigung des beabsichtigten Verhaltens eines Elements durch die Manifestation eines Fehlers (ISO 26262)
Fehler	Anormale Bedingung, die zum Versagen eines Elements führen kann (ISO 26262) Anmerkung 1: Permanente, intermittierende und vorübergehende Ausfälle werden berücksichtigt. Anmerkung 2: Wenn sich ein Subsystem in einem Fehlerzustand befindet, kann dies zu einem Fehler für das System führen. Anmerkung 3: Ein intermittierender Fehler tritt von Zeit zu Zeit auf und verschwindet dann wieder. Diese Art von Fehler kann auftreten, wenn eine Komponente kurz vor dem Zusammenbruch steht oder beispielsweise eine interne Störung in einem Schalter vorliegt. Einige systematische Fehler (z. B. zeitliche Unregelmäßigkeiten) können zu intermittierenden Fehlern führen.
Ausfallart	Art und Weise, in der ein Element das beabsichtigte Verhalten nicht liefert (ISO 26262)
Ausfallrate	Über die Zeit gemittelte Häufigkeit eines beobachteten Ausfalls, in der Regel mit Angabe als Ausfälle pro Stunde

Fehlerverteilung	Prozentuale Verteilung der Ausfallarten bezogen auf die Ausfallrate eines beobachteten Elements
Äquivalenzklasse	Eine Äquivalenzklasse ist eine Untermenge eines Wertebereichs von Aus- und Eingaben, bei denen ein gleichartiges Verhalten der Komponente oder des Systems während des Tests angenommen wird.
Systematischer Ausfall	Ausfall, der in einer deterministischen Art und Weise mit einer bestimmten Ursache verknüpft ist, und der nur durch eine Änderung am Design, dem Herstellprozess, den Betriebsprozessen, der Dokumentation oder anderer relevanter Faktoren ausgeschlossen werden kann (ISO 26262), siehe auch Kapitel 5
Systematischer Fehler	Fehler, der in einen systematischen Ausfall mündet, siehe auch Kapitel 5
Zufälliger Hardware-Ausfall	Ausfall, der unvorhersehbar während der Lebenszeit eines Hardware Elements auftreten kann und einer Wahrscheinlichkeitsverteilung folgt (ISO 26262), siehe auch Kapitel 5
Zufälliger Hardware-Fehler	Fehler, der in einen unvorhersehbaren und damit zufälligen Ausfall mündet, siehe auch Kapitel 5
Rechenmodell	Berechnungsmodell für die Abschätzung von z.B. Ausfallraten. Meist dokumentiert in sogenannten Handbüchern, wie z.B. Siemens SN29500, MIL-HDBK-217, IEC 61709

2.3 Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
AG	Arbeitsgruppe
AK	Arbeitskreis
ASIL	Automotive Safety Integrity Level
AV	Ausführungsvorschrift
FIT	Failure In Time, Angabe als 1 Ausfall in 1.000.000.000 Stunden
FuSi	Funktionale Sicherheit
IATF	International Automotive Task Force
ISO	International Standardisation Organisation
KTL	Kathodische Tauchlackierung
LV	Liefervorschrift
OEM	Original Equipment Manufacturer
TLF	Technischer Leitfaden
VDA	Verband der Automobilindustrie e.V.
ZVEI	Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V.

3 Arbeit und Ziele des Arbeitskreis Automotive Bordnetze

3.1 Ziele

Das Ziel des Arbeitskreises ist es, einen aktuellen Stand der Technik bzgl. Zuverlässigkeitsaussagen und Ausfallhäufigkeiten für charakteristische, in der Automobilbranche übliche Bordnetzkomponenten zu beschreiben. Für systematische Fehler und zufällige Hardware-Ausfälle soll nachvollziehbar dargestellt werden, wie Angaben zu Ausfallraten und die Verteilung der Ausfallarten hergeleitet wurden.

Der Fokus liegt dabei auf dem Anteil der zufälligen Hardware-Ausfälle, da die systematisch bedingten Ausfälle in der Anwendung bei sicherheitsrelevanten Systemen stets zu vermeiden sind. Der vorliegende Leitfaden soll jeweils für die Bordnetzkomponenten die Ausfallverteilungen und ein Verfahren zur Bestimmung der Ausfallraten beschreiben.

3.2 Mitwirkende

Verfasser dieses Dokuments sind Vertreter aus der Wertschöpfungskette (Hersteller der Komponente, Hersteller der Maschinentechnik, Bordnetz-Konfektionär, Automobilhersteller/OEM). Dies sind Unternehmen mit langjähriger Erfahrung in Entwicklung, Versuch und Produktion, die darüber hinaus ausnahmslos über aktuelle Qualitätsmanagementsysteme verfügen (VDA 6.x, IATF 16949).

Zudem haben Experten aus dem Bereich der Beratungs- und Ingenieurdienstleistung sowie aus dem akademischen Umfeld mit den Schwerpunkten Funktionale Sicherheit, Statistik und Methoden, sowie Wahrscheinlichkeitstheorie mitgewirkt.

3.3 Arbeitsweise und Organisation

Ausgangspunkt des Arbeitskreises war ein Workshop, in dem ergebnisoffen Zukunftsthemen eruiert werden sollten. Für alle Mitwirkenden von Interesse war das Thema Zuverlässigkeit von Bordnetz-Komponenten im Energie-Bordnetz. Bestehende Normenwerke deckten diese Problemstellung nicht hinreichend ab.

Vertreter der Bayern Innovativ GmbH organisieren und moderieren den Arbeitskreis und seine Arbeitsgruppen über die Laufzeit.

3.4 Vorgehensweise

Zunächst wurde eine Abgrenzung von systematischen Fehlern und zufälligen Ausfällen (siehe Kapitel 5) vorgenommen. Die bestehenden, gängigen Verfahren zur Ermittlung der Ausfallraten wurden geprüft und die anwendbaren Verfahren übersichtlich zusammengefasst (siehe Kapitel 6). Der Arbeitskreis hat sich dabei für die Darstellung der Berechnungsformeln für Ausfallraten nach dem UTE C 80-810 [5], dem sogenannten FIDES, entschieden. Die Anwendung dieses Standards wird in Kapitel 6.4 und den Fachkapiteln 7.x erläutert.

Bordnetzkomponenten sind in großer Vielfalt im Einsatz; oft sind diese Teile auch proprietär entwickelt. Jedoch weisen sie alle charakteristische Merkmale auf, mit Hilfe derer eine Klassifikation stattfinden kann. Aus dieser wurden die in diesem Leitfaden betrachteten Funktionsbaugruppen charakterisiert (siehe Kapitel 7) und Aussagen zu Ausfallraten und Verteilung der Ausfallarten getroffen. Die Einflussfaktoren und weitere Randbedingungen (u.a. Prozessvorgaben), die allgemeingültig verwendet werden, sind in Kapitel 4 beschrieben.

4 Technischer Hintergrund, Geltungsbereich

Die nachfolgenden Angaben gelten für den Einsatz in Kraftfahrzeugen (Bodenfahrzeugen) mit Verbrennungs- und/oder Elektroantrieb für den Einsatz beim Endkunden (Anwender) im privaten oder professionellen Bereich.

Die mittlere Nutzungsdauer wird für die weitere technische Betrachtung mit 15 Jahren angesetzt. Bei einer angenommenen mittleren Laufleistung von 16.000 km/a ergibt sich damit eine Gesamtlauflistung von 240.000 km über die Gesamtbetriebszeit. Innerhalb dieser Zeit beträgt die elektrische Betriebsdauer 8.000 Stunden (im Fahrbetrieb) und die Dauer des stationären Betriebs 30.000 Stunden (Auszug aus [25]). Diese Parameter können sich fallspezifisch ändern und sind exemplarisch in den Unterkapiteln angeben.

Aus diesem Grunde sind Einsatzfälle wie Militär (wegen besonderer Belastungen), Sonderfahrzeuge (wegen spezifischer Anforderungen), sowie Busse und Nutzfahrzeuge in der vorliegenden Ausgabe nicht erfasst.

Das Fahr- oder Belastungsprofil ist in den einzelnen Unterkapiteln genauer spezifiziert und kann entsprechend veränderter Gegebenheiten angepasst werden, falls erforderlich.

Die thermischen Belastungen durch die Umgebung (Klimazonen) werden durch die bei den Bordnetzkomponenten referenzierten Vorschriften dargestellt und umfassen alle Klimazonen außer den Gebieten der Polar- und Subpolarzonen.

Technisch liegt der Fokus auf den Wirk- und Ausfallmechanismen für das Energiebordnetz.

Im vorliegenden Leitfaden werden die folgenden Bordnetzkomponenten berücksichtigt:

- elektrische Steckverbinder (Kontaktteile und Gehäuse mit Zusatzteilen) entsprechend ZVEI TLF 0214 basierend auf der AK Prüfrichtlinie 96 bzw. LV214 (seit 2010)
- Kfz-Sicherungen (basierend auf der ISO 8820)
- elektrische Schraubverbindungen (Masse und Stromverteiler) inkl. Bolzen und Kabelschuh
- elektrische Fahrzeugleitungen für die Energieversorgung (gem. ZVEI TLF 0112-1 und ISO 19642)
- nicht lösbare elektrische Verbindungen (gem. ISO 4063, DIN8593-6, DIN1910-11, DIN 1910-100) zur Anwendung in Leitungsverbindern

5 Unterscheidung von systematischen Fehlern und zufälligen Ausfällen

Die Unterscheidung von systematischen Fehlern und zufälligen Ausfällen ist für das Verständnis des vorliegenden Dokuments immanent wichtig. Daher wird der Unterscheidung dieses Kapitel gewidmet.

Systematische Fehler zeichnen sich dadurch aus, dass sie in einer deterministischen Art und Weise mit einer bestimmten Ursache verknüpft sind. Hierzu zählen zum Beispiel Entwicklungsfehler, falsche Auslegungen, Produktionsfehler, eine falsche Lagerung, falscher Transport oder auch falscher Gebrauch. Durch eine Änderung am Design oder einem Prozess lassen sich systematische Fehler ausschließen.

Dagegen haben systematische Messabweichungen gegebenenfalls zur Folge, dass eine aus einem Fehler resultierende Abweichung nicht erkannt wird. Eine systematische Messabweichung hat ihre Ursache zum Beispiel in der Anordnung eines Messaufbaus. Diesem kann zum Beispiel dadurch entgegengewirkt werden, dass eine statistische Untersuchung stattfindet und die Streuung der Messergebnisse ausgewertet wird. Ein Zielwert kann mit dem Messwert zzgl. des errechneten Vertrauensbereichs bei einer bestimmten Konfidenz (Wahrscheinlichkeitsaussage) eingehalten werden.

Im Unterschied dazu treten zufällige Ausfälle aufgrund von unvorhersehbaren Umständen während der Lebenszeit eines Produkts auf. Unvorhersehbar bedeutet dabei, dass die Ursachen für die Ausfälle zum Zeitpunkt der Entwicklung nicht bekannt oder die Maßnahmen zur Vermeidung von Abweichungen (bei systematischer Ursache) nicht ausreichend waren.

Findet also zum Beispiel eine Belastung innerhalb der vorgesehenen Parameter, aber mit einer nicht berücksichtigten Häufigkeit von physikalischen Stress-Effekten statt und bricht dadurch ein Bauteil im Betrieb, ist dies ein zufälliger Ausfall (da er durch ein in der Entwicklung nicht berücksichtigtes und damit durch ein unvorhergesehenes Ereignis eintritt). Dabei ist unerheblich, dass sich die Ursache des zufälligen Ausfalls erklären lässt.

Bei Auswertungen von Tests ist eine Unterscheidung der Ausfälle in systematische Ausfälle und zufällige Ausfälle aus oben genannten Gründen nicht möglich. Alle Beobachtungen werden als „Fehlerart“ aufgenommen und sind unabhängig von der Ursache als „zufällige Ausfälle“ zu werten. Allerdings lassen sich aus den Daten unter Umständen systematische Ursachen erkennen und Maßnahmen zur Vermeidung der dadurch resultierenden Ausfälle definieren.

6 Bestimmung der Ausfallrate von zufälligen Ausfällen

In der Praxis angewandte Methoden zur Ermittlung der Ausfallrate einer Komponente sind beispielsweise (Siehe auch in Teil 11 Kapitel 4.6 in [1]):

- Anwendung eines für die Komponente vorhandenes Rechenmodells (z.B. IEC 61709, Siemens SN29500, MIL-HDBK-217, FIDES)
- Labortest mit beschleunigter Alterung mit einem statistischen Auswertungsmodell (z.B. Chi-Square-Modell)
 - High Temperature Operating Life (HTOL)-Test (Modell nach Arrhenius)
 - High Accelerated Stress / Temperature Humidity Bias (HAST / THB)-Test (Modell nach Hallberg-Peck)
 - Temperature Cycling (TC)-Test (Modell nach Coffin-Manson)
- Felddatenauswertung mit einem statistischen Auswertungsmodell (z.B. Chi-Square-Modell)

6.1 Anmerkung zum Unterschied zwischen Qualitäts-Metriken und Ausfallraten

Qualitäts-Metriken werden gerne als Begründung für eine hohe Zuverlässigkeit herangezogen. Tatsächlich ist ein etablierter Qualitätsprozess eine wichtige Grundlage, um zuverlässige Produkte zu entwickeln und herzustellen. Darum ist es sinnvoll, die Qualitätsmaßnahmen in der Abschätzung der Zuverlässigkeit zu berücksichtigen. Eine direkte „Umrechnung“ einer Qualitätsmetrik in eine Zuverlässigkeitsrate ist aber nicht möglich, da eine Qualitätsmetrik in der Regel nur einen kleinen Abschnitt aus dem gesamten Lebenszyklus darstellt. Für eine Ausfallrate muss jedoch immer ein Zeitraum (möglichst die gesamte Lebensphase) betrachtet werden. Eine Ausfallrate ist darum immer auf eine Zeitspanne normiert und mit einer Aussage zur Konfidenz (Konfidenzniveau und Vertrauensbereich) verknüpft.

6.2 Feld-Beobachtung zur Ermittlung von Ausfallrate und Verteilung der Ausfallarten

Um eine Ausfallrate für eine Komponente abzuschätzen gibt es mehrere Möglichkeiten.

Aus [13]:

„Die einfachste Methode, eine Ausfallrate zu bestimmen, ist es also, eine hinreichend große Menge von Objekten über einen hinreichend langen Zeitraum zu beobachten und die Anzahl der Fehler festzustellen, die innerhalb dieses Zeitraums auftreten. Zusätzlich erhalten wir dabei noch die Information über die tatsächliche Lebensdauer der fehlerhaft gewordenen Objekte. Die wichtigste Randbedingung für eine solche Beobachtung ist, dass die Objekte unter genau den Bedingungen betrieben werden, die für ihren regelmäßigen Einsatz definiert sind. Ausfallraten gelten im Allgemeinen nur für die Bedingungen, unter denen sie gemessen werden. Werden Objekte unter anderen Bedingungen betrieben, dann ist damit zu rechnen, dass die bestimmten Ausfallraten mehr oder weniger deutlich abweichen.“

Wenn wir die hier beschriebene Grundsituation für eine Messung von Ausfallraten mathematisch formulieren, dann können wir den Zusammenhang zwischen der Anzahl der Fehler, der Zeit und der Anzahl beobachteter Objekte so schreiben:

$$\frac{c}{\Delta t} = \lambda \cdot n$$

In dieser Gleichung ist c die Anzahl der im Zeitraum Δt fehlerhaft gewordenen Objekte, n die insgesamt beobachtete Zahl von Objekten (die Grundgesamtheit) und λ die Ausfallrate.

Die Ausfallrate ist also ein Proportionalitätsfaktor, der den Zusammenhang zwischen der Grundgesamtheit und der Anzahl der Fehler pro Zeiteinheit beschreibt.“

Darüber hinaus lässt sich bei solch einem Versuch (in der Regel) auch die Verteilung der Ausfallarten bestimmen. Hierzu werden mögliche Fehler definiert, diese in Ausfallarten unterschieden und entsprechend der Beobachtung zugeordnet und prozentual ausgewertet.

6.3 Labortests zur Ermittlung von Ausfallrate und Verteilung der Ausfallarten

Eine physikalische Bestimmung der Ausfallrate ist aufgrund sehr geringer statistischer Wahrscheinlichkeit meist nur mit sogenannten zeitraffenden Methoden in realistischen Zeiträumen möglich und durchzuführen. Im Gegensatz zur Feldbeobachtung bieten Labortests die Möglichkeit einer solchen „zeitlich beschleunigten“ Betrachtung.

Messungen mit realen Belastungsprofilen führen mit großem Aufwand (hohe Anzahl betrachteter Teile, lange Versuchsdauer) zu einer Aussage. Darum werden Labortests in der Regel mit erhöhter Belastung oder beschleunigter Alterung (engl. „accelerated life time test“) durchgeführt. Hierbei muss jedoch eine Beziehung zwischen den Belastungsprofilen und den Betriebsprofilen des Fahrzeuges hergestellt werden, um einen Rückschluss auf die Ausfallerwartungen im Realbetrieb zu ermöglichen.

Grundsätzlich werden dabei für eine zeitlich beschleunigte Bestimmung der Ausfallraten folgende Vorgehen unterschieden:

- i) erhöhte Belastungszeit (Tastverhältnis zwischen Belastungs- und Ruhephase wird erhöht),
- ii) erhöhte Belastung durch Änderung von Parametern (im zulässigen Betriebsbereich, z. B. Temperatur),
- iii) überhöhte Belastung über den Betriebsbereich hinaus (jedoch unterhalb der zulässigen Grenzwerte der betroffenen Materialien, z. B. Kristallisationstemperaturen etc.) und
- iv) verfeinerter Nachweis der Änderung

i) erhöhte Belastungszeit (Tastverhältnis zwischen Belastungs- und Ruhephase wird verändert)

Bei der erhöhten Belastungszeit wird das Verhältnis der Belastungszeit zur Ruhezeit (nicht besonders beanspruchten) Zeit deutlich erhöht, um die normale auszuhaltende Belastung in einer kürzeren Zeit als unter Realbedingungen zu erreichen. Dies entspricht einer zeitlichen Raffung. Dabei ist zu beachten, dass durch die Raffung keine Impulsbelastung außerhalb der zulässigen Parameter entsteht.

Zum Beispiel fällt hierunter eine Erhöhung der Betriebszeit und damit eine längere Bestromung von Leitungen; wobei auch das Nutzerverhalten zur Betriebszeit mit Ein- und Ausschaltzyklen von Verbrauchern gerafft wird.

ii) erhöhte Belastung durch Änderung von Parametern (im zulässigen Betriebsbereich, z. B. Temperatur)

Bei der überhöhten Beanspruchung sind alle physikalischen und chemischen Einflussgrößen denkbar, die in die Reaktionsgeschwindigkeit von Vorgängen der Veränderung einer Komponente eingehen. Die für die Anwendung wichtigsten sind:

- a) mechanische Bewegung oder Schock (Vibration),
- b) thermische Degradation (Diffusion und chemische Reaktion),
- c) chemische Einflüsse,
- d) Feuchtigkeit und
- e) Strahlung.

Bei der mechanischen Beanspruchung (a) ist mit äußerer und innerer Reibung zu rechnen. Bei der thermischen Beanspruchung (b) beschreibt zwar die Arrhenius-Beziehung den grundsätzlichen Zusammenhang bei einer bestimmten Reaktion. Da sich aber meist mehrere unterschiedliche Prozesse überlagern, sind zur allgemein gültigen Charakterisierung weitere Konstanten, wie etwa eine Erstarrungstemperatur, einzuführen. Auch für die weiteren Beanspruchungen gibt es entsprechende Modell-Beziehungen, um einen Rückschluss führen zu können.

Problematisch kann bei beschleunigten bzw. überhöhten Belastungen sein, dass bei beispielsweise höherer Temperatur- oder Vibrationsbeanspruchungen andere Alterungsmechanismen dominieren, die im realen Betrieb irrelevant sind oder Effekte anderer Ausfallmechanismen dann überlagern.

iii) überhöhte Belastung über den Betriebsbereich hinaus (jedoch unterhalb der Grenzen von Materialien, z. B. Kristallisationstemperaturen etc.)

Das Vorgehen entspricht dem Vorgehen bei ii). Allerdings wird die Belastung über die für den Betrieb definierten Grenzen hinaus erhöht. Zudem wird die Belastung derart eingeschränkt, dass die Materialgrenzen nicht erreicht werden, da ansonsten wegen der Überlagerung von anderen Ausfallmechanismen kein aussagekräftiges Ergebnis erzielt werden kann.

iv) Verfeinerter Nachweis der Änderung

Unter dem „verfeinerten Nachweis der Änderung“ wird das präzise Bestimmen von zeitlichen Veränderungen der charakteristischen Eigenschaften (Daten) verstanden, die in einem begrenzten Betriebsintervall beobachtet werden und aus denen auf das Verhalten und damit auf die Ausfallraten in einem längeren Zeitraum (als Prognose) hochgerechnet werden kann.

Der verfeinerte Nachweis der Änderung der charakteristischen Daten findet im Betrieb bei üblicher Belastung und damit im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Verfahren ohne Erhöhung oder Überhöhung der Belastung statt. Dadurch ergeben sich deutlich höhere Anforderungen an die Auflösung und Genauigkeit der Messinstrumente.

6.4 Verwendung von Rechenmodellen zur Ermittlung einer Ausfallrate

Eine Alternative zu physikalischen Tests sind Rechenmodelle, die a priori Abschätzungen der Ausfallrate anhand eines Formel- und Regelwerks und mithilfe von Fragenkatalogen erlauben. Gemäß ISO-26262-5 [1] ist die Bewertung von Hardware-Elementen ein zulässiges alternatives Vorgehen zur Bestimmung der Zuverlässigkeit.

Im Laufe vieler Entwicklungen in einer sicherheitskritischen Umgebung wurden unterschiedliche Rechenmodelle zur Abschätzung der Zuverlässigkeit vieler Komponenten der Elektronik entwickelt. Diese können auch zur Abschätzung herangezogen werden. Beispiele sind:

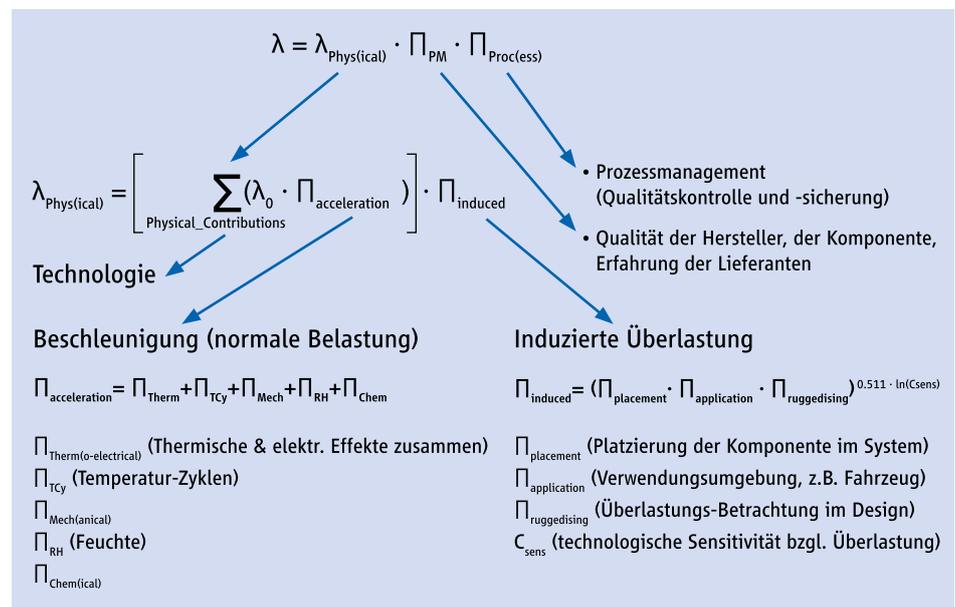
- MIL-HDBK-217F [2]
- SN 29500 [3]
- IEC 61709:2017 [4]
- FIDES Guide 2009 Edition A [5]

Der Arbeitskreis hat sich dazu entschieden, den FIDES Guide [5] als Basis-Modell für die Berechnungen zu verwenden. Grundsätzlich setzt sich eine Ausfallrate $\lambda_{\text{(gesamt)}}$ gemäß FIDES auf oberster Ebene aus drei multiplikativen Faktoren zusammen (FIDES-Basis-Modell siehe ab S. 25 in [5]):

$$\lambda = \lambda_{\text{Physical}} \cdot \prod_{\text{PM}} \cdot \prod_{\text{Proc(ess)}}$$

Die herstellereigene, gesamte Ausfallrate λ ist abhängig von der gesamten Liefer- und Prozesskette. Sie hängt von Auditierungen ab, die ähnlich einem Qualitätsmanagement-Audit nach ISO 9001 durch externe Auditoren durchgeführt wird. Für den Fall, dass die Liefer- und Prozesskette nicht vollständig betrachtet werden kann, sind im FIDES Vorschläge für Default-Werte vorgesehen.

Abb. 6-1: Das FIDES Basis-Modell [5]



6.4.1 Berücksichtigung physikalischer Effekte im FIDES

Physikalischer Anteil λ_{Phys}

Für $\lambda_{\text{Physical}}$ im Basis-Modell gilt:

- $\lambda_{\text{Physical}}$ beschreibt im Wesentlichen die verschiedenen physikalischen Fehlerursachen, es geht allerdings auch ein näherungsweise multiplikativer Audit-Faktor $\Pi_{\text{ruggedising}}$ ein:

$$\lambda_{\text{Physical}} = \lambda_{0_{\text{(Component)}}} \times \sum_i^{\text{Phases}} \left(\frac{t_{\text{annual}}}{8760} \right)_i \times (\Pi_{\text{Thermal}} + \Pi_{\text{TCy}} + \Pi_{\text{Mech}} + \Pi_{\text{RH}} + \Pi_{\text{Chem}})_i \times (\Pi_{\text{Induced}})_i$$

↑
↑

Basisausfallrate
Anzahl der Stunden eines Jahres

- In λ_{Phys} geht die Typ- und Technologie-abhängige Basis-Ausfallrate λ_0 ein, die komponentenspezifisch zu bestimmen ist.
- Die physikalischen Ausfallraten gemäß der physikalischen Fehlermodelle werden mit einem allgemeinen Überlastungszuschlag Π_{induced} und mit der Basis-Ausfallrate $\lambda_{0_{\text{(Component)}}$ der jeweiligen Komponente multipliziert.

- Zu verschiedenen Fehlerursachen existieren jeweilige physikalische Modelle, bei denen die Ursachen getrennt betrachtet werden. Da sich Fehlerursachen auch überlappen bzw. gegenseitig beeinflussen können, können verschiedene Effekte, wie zum Beispiel thermische und elektrische Effekte auch zusammengefasst werden.
- Bei den im Whitepaper behandelten Komponenten werden gemäß FIDES thermische und elektrische Effekte zusammengefasst, in allgemeinsten Form kann ein $\Pi_{Thermal}$ und ein $\Pi_{Electrical}$ unabhängig voneinander auftreten.

Der physikalische Anteil wird wesentlich durch das Betriebsprofil (use profile) bestimmt. Ein Beispiel dazu ist in Tabelle 6-1 dargestellt. Die jeweilige Phase i mit den dazugehörigen $(\Pi_{therm})_i$, $(\Pi_{TCY})_i$, $(\Pi_{RH})_i$, $(\Pi_{Mechanical})_i$ und $(\Pi_{Chem})_i$ ist ein Summand in der Formel für λ_{Phys} . Bei $(t_{annual})_i$ wird die Gesamtdauer der Phase über ein Jahr hinweg betrachtet. Typischerweise ist $\Pi_{induced}$ bei Automobilen über die Phasen hinweg gleich. Die Stunden aller Phasen über ein Jahr ergeben aufsummiert 8760 h.

Tabelle 6-1: Typisches Betriebsprofil in Mitteleuropa als Grundlage für physikalische Belastungs-Berechnungen

		Usage Model			Temperature & humidity				Temperature cycling			
Season	Phase	Days included	Hours per days	Calendar time (hours)	Thermal cycles/day	Reference temperature T_0 in °C	Working temperature °C	RH in %	ΔT in °C	# cycles/year	Cycle duration	Max. temp. during cycling in °C
Summer	Powered	152	1,46	221,92	2	25	90	90	38	304	0,75	90
	Un-powered	152	22,54	3426,08	2	25	30	90	10	304	11,25	30
Spring/Fall	Powered	61	1,46	89,06	2	15	65	90	38	122	0,75	65
	Un-powered	61	22,54	1374,94	2	15	20	90	10	122	11,25	20
Winter	Powered	152	1,46	221,92	2	0	40	90	38	304	0,75	40
	Un-powered	152	22,54	3426,08	2	0	5	90	10	304	11,25	5

Bis auf Π_{Chem} werden die anderen Normal-Beschleunigungsfaktoren nach Formeln aus der „physics of failure“ ermittelt, die komponentenspezifisch gelten. Die jeweiligen Formeln sind noch mit Gewichtungsfaktoren versehen, die sich zusammen zu 100% aufaddieren. Die normale Beschleunigung der Alterung durch chemische Effekte wird gemäß

$$\Pi_{Chem} = \mathit{weight} \cdot \Pi_{sal} \cdot \Pi_{prot} \cdot \Pi_{zone} \cdot \Pi_{envir}$$

anhand von Tabelle 6-2 ermittelt, die in der FIDES sowohl für Sicherungen mit Gewichtungsfaktor $\mathit{weight} = 0,06$ als auch für Konnektoren (Stecker, Schraubverbindungen, elektr. Verbindungen) mit Gewichtungsfaktor $\mathit{weight} = 0,20$ gilt.

Tabelle 6-2: Tabellarische Bestimmung chemischer Beschleunigungsfaktoren für Π_{chem}

Saline pollution level	Π_{sal}	Product protection level	Π_{prot}
Low	1	Hermetic	0
High	2	Non hermetic	1

Application pollution level	Π_{zone}	Environmental pollution level	Π_{envir}
Low	1	Low	1
Moderate	2	Moderate	1,5
High	4	High	2

$\Pi_{induced}$ einschließlich $\Pi_{application}$ und $\Pi_{ruggedising}$

Die Werte $\Pi_{placement}$, $\Pi_{application}$ und C_{sens} , die in $\Pi_{induced}$ eingehen, sind spezifisch zu bestimmen.

Der Faktor $\Pi_{application}$ wird durch die Prüfung von Kriterien bestimmt. Für jedes Kriterium gibt es 3 Einstufungen mit Bewertung 0, 1 oder 2, die einer nicht-aggressiven (0), moderaten (1) oder strapazierenden (2) Anwendungssituation entsprechen. Details zu den Kriterien und ihrer Gewichtung finden sich in [5] ab S. 100. Je nach Komponenten-Typ und Anwendungsfall bei der betrachteten Referenzkomponente sind diese Kriterien im Einzelfall zu beantworten.

$\Pi_{ruggedising}$ soll die Überbeanspruchungen gegenüber dem gewählten Design der Komponente bewerten und wird mittels Fragekatalog ermittelt.

$$\Pi_{ruggedising} = e^{\delta_2 \cdot (1 - Recom_Grade)},$$

wobei $\delta_2 = \ln(2) \approx 0,69$ und

$$Recom_Grade = \frac{1}{225} \sum_i^{Recom.} Recom_Weight_i \cdot Satisfaction_Mark_i.$$

Die Fragen werden mit einer Benotung *Satisfaction_Mark* von 0, 1, 2 oder 3 bewertet (0 am schlechtesten, 3 am besten). *Recom_Weight* ist eine Gewichtung der Fragen, die Summe aller Gewichte beträgt 75. Der Fragenkatalog (siehe [5], p. 102f.) umfasst 16 Fragen und kann Maschinenhersteller, Konfektionäre, OEM und weitere Zulieferer betreffen, die Auswahl und Zuordnung der Fragen ist für jede Frage einzeln nach Referenz-Komponente und weiterer Situation zu beantworten. Wenn nicht alle Fragen zutreffen, ist das Gesamtgewicht von $225 = 75 \cdot 3$ entsprechend zu reduzieren, so dass sich im Bestfall die *Recom_Grade* 3 ergibt.

6.4.2 Prozessfaktoren im FIDES

Für die Bewertung des Einflusses der Prozesse bei u. a. Herstellung eines Bauteils, Transport, Lagerung, Zusammenbau und Produktion wird die Güte des Prozesses bestimmt und zwei multiplikative Faktoren auf die rechnerisch ermittelte physikalische Ausfallrate einer Komponente gegeben: Π_{PM} (Parts Manufacturing) und $\Pi_{Proc(less)}$ (Prozessfaktor).

Parts Manufacturing Π_{PM} :

Π_{PM} beschreibt den Einfluss der Herstellung des Bauteils auf die Ausfallrate. Gemäß der Einstufung von vorliegenden QM-Zertifizierungen wird eine Part-Grade zwischen 0 und 1 ermittelt.

Das allgemeine Modell für Π_{PM} lautet

$$\Pi_{PM} = e^{\delta_1 \cdot (1 - \text{Part_Grade}) - \alpha_1},$$

wobei $\delta_1 = \ln(4) \approx 1,39$ und $\alpha_1 = \ln(2) \approx 0,69$. Die *Part_Grade* wird beschrieben (für nicht aktive Komponenten wie im Whitepaper immer der Fall) durch

$$\text{Part_Grade} = \left[\frac{(QA_{\text{manufacturer}} + QA_{\text{component}}) \times \varepsilon}{24} \right]$$

mit $QA_{\text{manufacturer}}$:

Manufacturer quality assurance level	Position relative to the state of the art	$QA_{\text{manufacturer}}$
IATF 16949 certified	Higher	3
Certified according to one of the following standards: QS9000, TL 9000, ISO/TS 29001, EN9100, AS9100, JISQ 9100, AQAP 2110, AQAP 2120, AQAP 2130, IRIS, IEC TS 62239, ESA/ECSS QPL, MIL-PRF-38535 QML, MIL-PRF-19500	Equivalent	2
ISO 9000 version certified	Lower	1
No information	Very much lower	0

$QA_{\text{component}}$:

Component quality assurance level	Position relative to the state of the art	$QA_{\text{component}}$
Level criteria are defined for each item family	Higher	3
	Equivalent	2
	Lower	1
	Very much lower	0

und dem Erfahrungsfaktor ϵ :

Description of the risk related to use of this manufacturer	Value of ϵ factor
Recognised manufacturer: Mature processes for the item considered	4
Recognised manufacturer – Processes not analysed or not mature for the item considered	3
Manufacturer not recognised (for example never audited more than 6 years earlier) or small series productions	2
Previous disqualification or problem with feedback from operations	1

Die Kriterien für die verschiedenen Stufen bei $QA_{\text{component}}$ unterscheiden sich hier je nach Komponenten-Schublade („item family“) und werden für passive Sicherungen und Konnektoren daher in den jeweiligen Abschnitten in Kapitel 7 aufgeführt.

Prozessfaktor $\Pi_{\text{Proc(ess)}}$

$\Pi_{\text{Proc(ess)}}$ beschreibt die Einflüsse des Prozesses und des Prozessmanagements auf die Ausfallrate und wird durch Auditfragen ermittelt. Hierbei soll die Erfahrung u.a. im Entwicklungs- und Herstellungsprozess bewertet werden. Die Ermittlung des Π_{Proc} -Faktors erfolgt über ein Audit gemäß Kapitel V in [5] durch externe Auditoren:

- Unterteilung in Phasen:
Für verschiedene Komponenten sind von den 7 FIDES Phasen nicht immer alle relevant. Die Gewichte *Contribution_Phase* der nicht relevanten Phasen müssen auf verbleibende Phasen übertragen werden, so dass sich alle verbleibenden Gewichte zu 100% aufaddieren. Diese Aufteilung erfolgt z.B. bei passiven Sicherungen und bei Splice-Verbindungen in diesem technischen Leitfaden spezifisch.
- Aufteilung der Fragen:
Des Weiteren erfolgt eine Aufteilung der Fragen beispielsweise in Fragen, die nur den Maschinenhersteller, die nur den Konfektionär und die beide betreffen. Grundsätzlich gibt es 155 verschiedene Fragen, die z.T. in mehreren Phasen wiederholt gestellt werden können, typischerweise sind jedoch nicht alle Fragen zutreffend. Welche Fragen letztendlich zu stellen sind, ergibt sich für die jeweilige Komponente bei Durchsicht des Fragenkatalogs.

Für den Prozess-Faktor gilt

$$\Pi_{\text{Proc(ess)}} = e^{\delta_2 \cdot (1 - \text{Process_Grade})},$$

wobei ($\delta_2 = \ln(8) = 2.079$). Der *Process_Grade* wird durch

$$\text{Process_Grade} = \sum_{j=1}^7 \left(\text{Contribution_Phase}_j \times \frac{\text{Audit_Mark}_j}{\text{Max_Audit_Mark}_j} \right)$$

bestimmt und nimmt Werte zwischen 0 und 1 an. Dabei bezeichnet Audit_Mark_j die jeweils in Phase j (von 7 Phasen) erzielte Bewertung bei einer maximal möglichen Bewertung von Max_Audit_Mark_j .

6.4.3 Audit-Fragenkatalog

Die Audit-Fragen und Ihre Gewichtung bzw. erreichbaren Punkte sind in [5] ab Seite 270 aufgelistet. Hinweise für die Einstufung erhält man in [5] ab Seite 294. Die relevanten Fragen sind abhängig von der Komponente, der beteiligten Partei (Maschinenhersteller,

Konfektionär, Zulieferer) und entsprechenden spezifischen Annahmen. Der jeweilige Fragenkatalog hängt u.a. von der zu auditierenden Partei und der Referenz-Komponente ab und wird von den Auditoren aufgestellt.

6.4.4 Default-Werte

Zusammengefasst ergeben sich die Minimal- und Maximalwerte (Bestfall und Schlechtfall) in Tabelle 6-3 für die Auditfaktoren. Falls kein Audit durchgeführt wird oder durchgeführt werden kann, sind (eher konservativ abschätzende) Default-Werte einzusetzen. Ein Audit kann auch teilweise durchgeführt werden, z.B. bei einem (Maschinen-)Hersteller, für den nicht durchgeführten Audit-Teil des Konfektionärs und ggf. bei anderen beteiligten Parteien werden dann die entsprechenden Ersatzwerte angesetzt.

Tabelle 6-3: Übersicht Auditfaktoren: Mögliche Intervalle und Default-Werte

Auditfaktor	Min	Default-Werte	Max
$\Pi_{\text{ruggedising}}$	1,0 (= Recom_Grade 3)	1,7	2,0 (= Recom_Grade 0)
Π_{PM}	0,5 (= Part_Grade 1)	1,6	2,0 (= Part_Grade 0)
$\Pi_{\text{Proc(less)}}$	1,0 (= Process_Grade 1)	4,0	8,0 (= Process_Grade 0)

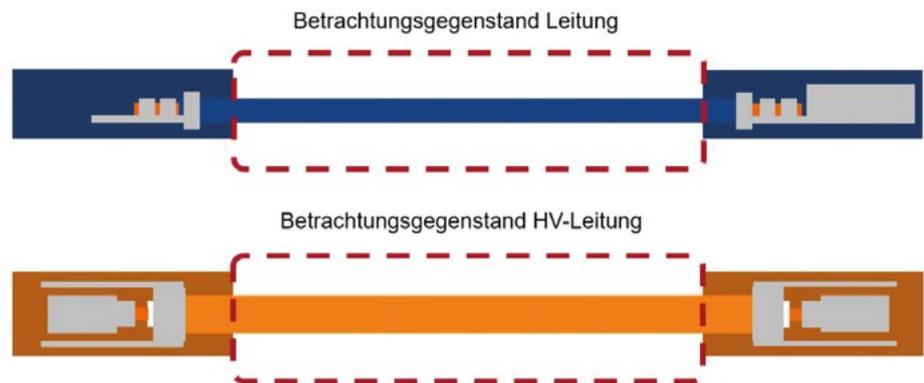
7 Ausfallraten und Fehlermodelle der wichtigsten Bordnetzkomponente

7.1 Elektrische Leitungen

7.1.1 Beschreibung der Funktionsbaugruppe (Bauteil oder Baugruppe)

Als Funktionsbaugruppe „elektrische Leitung“ wird die Leitung zwischen zwei Anschlusspunkten wie in der folgenden Abbildung 7-1 dargestellt betrachtet. Eine etwaig vorhandene Zugentlastung, Dichtung, Überspritzung, etc. wird mit zur Funktionsbaugruppe des Stecksystems gewertet.

Abb. 7-1 Abgrenzung der Funktionsbaugruppe „elektrische Leitung“



7.1.2 Genaue Beschreibung der Verwendungsart (Use Case)

Elektrische Leitungen werden eingesetzt, um zwischen ihren Anschlusspunkten Energie und/oder Signale zu übertragen. Gleichzeitig erfolgt eine galvanische Trennung der Leiter und eines ggf. vorhandenen Schutzschirms innerhalb der Leitung gegeneinander und gegenüber der Umgebung.

Die Energieübertragung über eine Leitung ist durch den gewählten Spannungsbereich (z.B. 12V, 48V, Hochvolt) und den maximal zu übertragenden Strom charakterisiert.

Kommunikationssignale können von niederfrequenten Schaltsignalen, über Audiofrequenzen, bis zu hochfrequenten Kommunikationsprotokollen wie z. B. CAN-FD oder Ethernet reichen. Entsprechend sind die dafür zum Einsatz kommenden Leitungen unter anderem hinsichtlich Leiter, Material, Isolation oder Schirmung zu spezifizieren bzw. auszuwählen.

Ein optionaler Leitungsschirm verhindert bzw. mindert sowohl die Abstrahlung eines in der Leitung erzeugten elektromagnetischen Felds als auch die Einkopplung von äußeren Störungen.

Eine Verdrillung bzw. Verseilung von Leitungen vermindert sowohl gegenseitige Beeinflussungen von elektrischen Leitern als auch induktiv eingekoppelte Gegentaktstörungen.

Abhängig von den oben aufgezeigten Anforderungen kommen verschiedene Leitungsquerschnitte zum Einsatz.

7.1.3 Beschreibung der Klassen

Leitungen können wie folgt in Klassen unterschieden werden:

- Leitungen mit ETP-Cu für Energieversorgung mit Anwendung bis zu 60V (Klasse 1)

<p>Einadrige Leitung (Klasse 1a)</p> 	<p>Einadrige Leitung mit Schirm (Klasse 1b)</p>
<p>Verdrillte Leitungen (Klasse 1c)</p> 	<p>Verdrillte Leitungen mit Schirm (Klasse 1d)</p>

- Leitungen mit ETP-Cu für Energieversorgung mit Anwendung ab 60 V bis zu 1000V (Klasse 2)

<p>Einadrige Leitung (Klasse 2a)</p> 	<p>Einadrige Leitung mit Schirm (Klasse 2b)</p> 
<p>Verdrillte Leitungen (Klasse 2c)</p>	<p>Verdrillte Leitungen mit Schirm (Klasse 2d)</p> 

- Leitungen mit ETP-Cu für Datenübertragungen (Klasse 3)

<p>Einadrige Leitung (Klasse 3a)</p>	<p>Einadrige Leitung mit Schirm (Klasse 3b)</p> 
<p>Verdrillte Leitungen (Klasse 3c)</p> 	<p>Verdrillte Leitungen mit Schirm (Klasse 3d)</p> 

Die nachfolgenden Angaben gelten für die Klasse 1a und Klasse 1c. Die nachfolgenden Angaben gelten nicht für Leitungen aus Aluminium oder Cu-Legierungen.

7.1.4 Anforderungen bezüglich Lifecycles der Funktionsbaugruppe

Anforderungen hinsichtlich des Produktlebenszyklus von Leitungen bzw. sogenannten Meterwaren werden durch den entsprechenden Hersteller definiert. Für den Lifecycle der Leitungen werden die folgenden Phasen unterschieden, in denen unterschiedliche Belastungen und Forderungen an die Leitungen gestellt werden:

- Herstellung der Bauteile
- Lagerung und Transport, Logistik
- Konfektion: Zusammenbau, Verarbeitung, Leitungssatzfertigung, ggf. Nacharbeit bei Konfektion
- Montage und Produktion: Integration ins Fahrzeug, Nacharbeit in der Produktion
- Kundenbetrieb des Fahrzeugs
- Instandsetzung und Reparatur, Nacharbeit im Betrieb
- Demontage und Entsorgung
- Wiederverwendbarkeit

Zusätzlich werden allgemeine Anforderungen an die Leitungen gestellt, die unabhängig von den Phasen zu erfüllen sind. Dies umfasst u.a. Vorgaben zu:

- Transport, Lagerung
(Verarbeitungsprozess und Lagerdauer sind im technischen Leitfaden ZVEI TLF 0100 „Verwendungshinweise für Automotive Leitungen“ beschrieben. Dieser wird vom Fachverband Kabel und Isolierte Drähte des ZVEI herausgegeben.)
- Die Verarbeitung der Leitungen beinhaltet Prozesse wie z. B. Schneiden, Abisolieren, Schweißen, Crimpen von metallischen Kontaktteilen, und Umhüllen mit selbstklebenden Bändern aus Kunststoff oder Gewebe. Daher sind chemische Verträglichkeit, Haftung eines Klebstoffs, Abisolierbarkeit, Materialauswahl und Art der Verarbeitung abzustimmen. Auch sind maximal zulässige mechanische Belastungen durch Ablängen, Absetzen und Verlegen einzuhalten.
- Schutz vor übermäßiger mechanischer Schädigung, z.B. durch Abrieb, Kerbkräften oder Quetschung.
- Leitungen widerstehen einem geringen/kurzfristigen Kontakt mit chemischen Flüssigkeiten sind aber in der Regel nicht resistent. Schutz nur beim Einsatz spezieller Werkstoffe.
- Während des Lebenszyklus sind die Leitungen ferner verschiedenen klimatischen Bedingungen und chemisch-mechanischen Einflüssen unterworfen. Dazu zählen u. a. Temperaturen zwischen -40 °C bis zu 180 °C , Feuchtigkeit, Fremdstoffe wie Öle oder Kälteschutzmittel im Motorraum, Zug-, Biege- und Torsionskräfte. Konstruktiv werden diese Anforderungen über geeignete Isolierwerkstoffe (PVC, PP, Silikon, etc.) und den entsprechenden Aufbau der Leitungen (mehrdrahtig mit symmetrischer oder unsymmetrischer Anordnung) umgesetzt.
- Einhaltung der maximal zulässigen Einsatztemperatur:
 - Bei Einhaltung einer mittleren Temperaturbelastung 20 K niedriger als die Prüftemperatur für 3000 h gemäß ISO 19642 kann man ein Versagen der Isolation aufgrund thermischer Alterung während der vorgegebenen Nutzungsdauer bzw. elektrischen Betriebsdauer ausschließen [24].
- Beachtung minimaler Biegeradien
- Beachtung der Vorgaben für dynamische Bewegungsprofile bzw. Prüfung in Einbaulage
- Aussagen zur Alterungsbeständigkeit einer Leitung unter bestimmten Umwelt- bzw. mechanischen Einflüssen.

Diese Vorgaben müssen entlang der Prozess- und Lieferkette abgestimmt und kommuniziert werden.

7.1.5 Einzuhaltende Eigenschaften der Funktionsbaugruppe

Die Leitungen werden gemäß entsprechenden, von den OEMs vorgeschriebenen Prüfungen bzw. Spezifikationen (z.B. ISO 19642 Teil 1-10) qualifiziert. Hierbei werden die mechanischen, elektrischen, thermischen und chemischen Eigenschaften überprüft und für den Einsatz im Fahrzeug freigegeben. Spezielle Prüfungen für die jeweiligen Applikationen, die nicht Bestandteil der einschlägig bekannten Kabelspezifikationen sind, wie zum Beispiel die Eignung für dynamische Anwendungen, Umschäumungen, usw. werden seitens OEM oder Tier1 abgeprüft.

7.1.6 Eigenschaften von Leitungen zur Energieversorgung mit Anwendung bis zu 60V (Klasse 1)

7.1.6.1 Beschreibung der Verbindung zu anderen Funktionsbaugruppen

Generell gibt es für Energieversorgung die Nieder- und Hochvoltanwendungen gemäß der Spezifikation ISO 19642 Teil 1. Niedervoltleitungen sind ausgelegt für Gleichspannungen ≤ 60 V DC und Hochvoltleitungen > 60 V DC. Die Kabelsätze müssen für diese Anwendungen mit den entsprechend qualifizierten Komponenten (Stecker, Kontakt, Dichtungen, usw.) seitens Tier1 in Abstimmung mit dem OEM konfektioniert bzw. aufgebaut werden.

Die Prüfungen weisen dabei zum Beispiel die Eignung für folgende Eigenschaften nach:

- Funktionsrelevante Maße und mechanische Eigenschaften:
 - Durchmesser
 - Konzentricität
 - Zugfestigkeit
 - Interaktion mit Zugentlastungen
- Elektrische Eigenschaften
 - Widerstand
 - Spannungsklassen
- Verträglichkeit mit der Umgebung
 - Klebstoffe in Bändern
 - Silikone, PU und EPDM in Dichtungen
 - Medien im Bauraum (Wasser, Benzin, Öl, ...)
 - Alterung, Lebensdauer, Verarbeitung...

7.1.6.2 Ausfallrate

Die im Folgenden genannten Ausfallraten beziehen sich auf zufällige Hardwareausfälle. Diese Ausfälle werden vorwiegend durch Verschleiß und Alterung der eingesetzten Materialien hervorgerufen.

Folgende Standards enthalten Aussagen zu Ausfallraten für Leitungen:

- **MIL-HDBK-217F [2]:** Für Leitungen wird eine Basisausfallrate von 0 angenommen. (Kapitel 3.4.1, Seite 3.3: „The wire between connectors is assumed to have a zero failure rate.“)
- **NPRD/FMD-2016 [6]:** keine Angaben für Leitungen bei Bodenfahrzeugen, Angaben für die Luftfahrt weisen keine Ausfälle aus und sind technologisch nicht auf Bodenfahrzeuge übertragbar.

Folgende Standards führen keine Betrachtung von Ausfallraten für Leitungen durch:

- **SN 29500 [3]**
- **IEC 61709:2017 [4]**
- **UTE C80-811 bzw. FIDES guide 2009, Edition A, September 2010 [5]**

Bei Leitungen werden nach ISO 19642 verpflichtend die folgenden produktionsbegleitende Prüfungen durchgeführt: Hochspannungsprüfung und Prüfung des spezifizierten Außendurchmessers. Aufgrund der geforderten 100% Prüfung der gesamten Liefercharge werden

produktionsbedingte, systematische Fehler bei der Leitungsproduktion ausgeschlossen. Die in der ISO 19642 beschriebene konstruktive Ausführung der Leitungen ist seit 1993 nach DIN 72551-1 und ISO 6722-3 unverändert übernommen worden. Den in der Arbeitsgruppe beteiligten Unternehmen sind keine der Leitung zuzuordnenden Ausfälle bekannt und die Leitungen können damit in den letzten 27 Jahren als fehlerfrei betrachtet werden. Aufgrund dieser Feldbeobachtung liegt die zu erwartende Mindestlebensdauer weit über dem in Kapitel 4 aufgeführten Zeitraum, wenn die Vorgaben der Leitungshersteller eingehalten werden. Dabei sind die folgenden Prämissen einzuhalten: Wird eine Leitung konstruktiv nach ISO 19642 entwickelt, nach ISO 19642 bzw. ISO 6722 validiert und gemäß den Spezifikationen des Leitungsherstellers eingesetzt, so ist die Ausfallrate (engl.: Failure rate) λ einer Leitung für die Ermittlung von Ausfallraten im Bordnetz vernachlässigbar. D.h. in quantitativen Berechnungen zur Ermittlung von Ausfallraten kann diese mit $\lambda = 0$ einbezogen werden.

Voraussetzung dafür ist die Einhaltung der unter Kapitel 7.1.4 genannten Bedingungen.

7.1.6.3 Fehlermodell

Die im Folgenden aufgezeigten Fehlerbilder haben ihre Ursache hauptsächlich in systematischen Fehlern. D.h. diese werden primär nicht durch Alterung oder zufällige Ausfälle verursacht, sondern in der Praxis z.B. durch eine falsche Auslegung oder bei der Handhabung / Integration hervorgerufen.

Mögliche Fehlerbilder bei Leitungen sind:

- Unterbrechung, z.B. durch Bruch der Leitung
- erhöhter elektrischer Längswiderstand einer Leitung, z.B. durch Bruch von Litzen in Verbindung mit Oxidierung
- Kurzschluss zwischen
 - zwei benachbart liegenden Leitungen, bei denen jeweils die Isolierung beschädigt ist
 - zwischen einer Leitung mit beschädigter Isolierung und einer leitenden Umgebungskonstruktion (z.B. Kfz-Chassis)
- Veränderung der dielektrischen Eigenschaften einer Energieversorgung.
Anmerkung: Dieses Fehlerbild hat für Energieleitungen keine praktische Auswirkung.

Die oben aufgeführten Effekte können sowohl permanent als auch intermittierend auftreten.

Ursachen für die oben aufgeführten Fehlerbilder können z.B. sein:

- Schädigung der Leitung durch Umwelteinflüsse (Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Chemikalien, etc.), welche über die Auslegungsgrenzen der Leitung hinausgehen, z.B. durch
 - Unterdimensionierung einer Leitung. Aufgrund Überstroms erwärmt sich die Leitung über die Spezifikationsgrenze der Isolierung hinaus.
 - Wärmeeinwirkung von außen auf eine Leitung.
 - Wärmeeinwirkung von innen auf eine Leitung, z.B. durch Entwärmung aus einem Steuergerät heraus.
 - Schädigung der Leitung, z.B. durch Salzwasser bzw. chemische Prozesse (z.B. Elektrolyse).
- Schädigung der Leitung durch mechanische Einwirkung (Biegung, Zug, Druck, Vibration, etc.), welche über die Auslegungsgrenzen der Leitung hinausgehen, z.B. durch:
 - Scharfkantiges Element im Verlegeweg, an dem die Isolierung bzw. die Leitung durch Bewegung „aufscheuert“.
 - Bruch einer querschnittsstarken Leitung durch Vibration.
 - Bruch einer durch Biegewechsel belasteten Leitung.
 - Torsion.

7.1.7 Eigenschaften Leitungen zur Energieversorgung mit Anwendung bis zu 1000V (Klasse 2)

Zurückgestellt auf die zweite Ausgabe.

7.1.8 Eigenschaften Leitungen zur Datenübertragung (Klasse 3)

Zurückgestellt auf die zweite Ausgabe.

7.1.9 Eigenschaften Aluminium-Leitungen

Zurückgestellt auf die zweite Ausgabe.

7.1.10 Eigenschaften Leitungen mit Cu-Legierungen

Zurückgestellt auf die zweite Ausgabe.

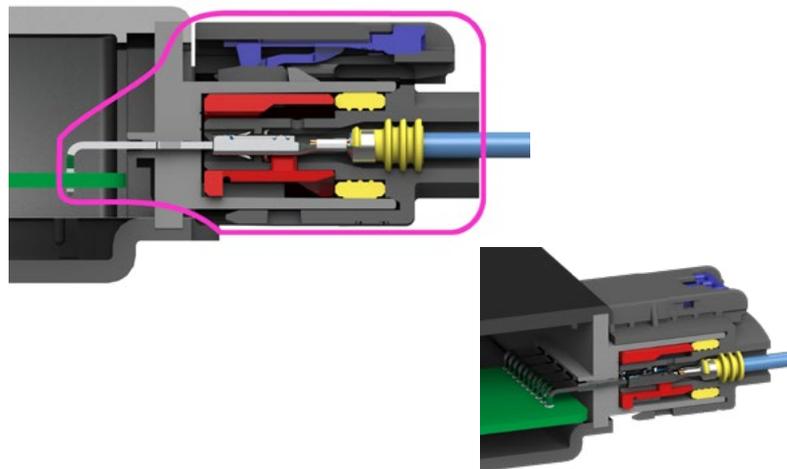
7.2 Elektrische Stecksysteme

7.2.1 Beschreibung der Funktionsbaugruppe (Bauteil oder Baugruppe)

Bei der Festlegung der Systemgrenzen für die Zuverlässigkeitsbetrachtung einer Aggregate-Schnittstelle (z. B. Steckerleiste eines Steuergerätes mit Steckhülsegehäuse des Fahrzeugleitungssatzes) oder einer Inline-Steckverbindung mit beidseitigem Leitungsanschluss standen folgende Überlegungen im Vordergrund:

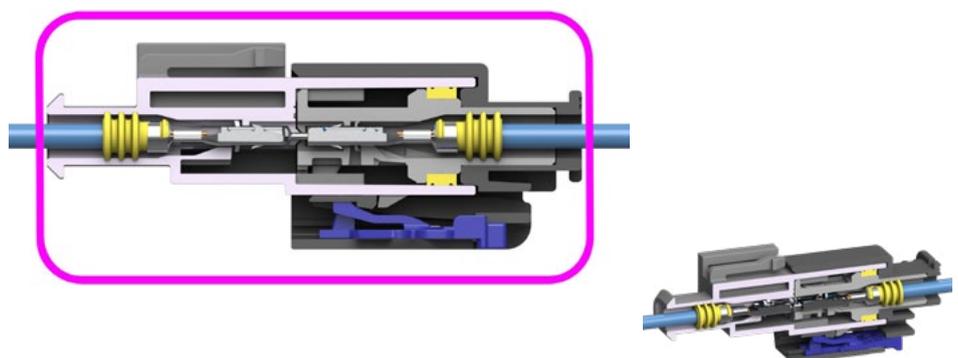
- Aggregate-Schnittstelle:
 - Berücksichtigung aller im Strompfad liegenden Komponenten und Übergangsstellen zwischen Schaltungsträger (Leiterplatte) und Leitung
 - Berücksichtigung aller zur direkten Funktionserfüllung der stromtragenden Komponenten erforderlichen Beitragsleister (Gehäuseaufnahmen, Riegel, Dichtelemente ...)
 - Eingrenzung der Materialien und Ausführungsformen von Schaltungsträger und Leitungstyp

Abb. 7-2: Aggregate-Schnittstelle



- Inline-Steckverbindung:
 - Berücksichtigung aller im Strompfad liegenden Komponenten und Übergangsstellen zwischen den Leitungen des Leitungssatzes
 - Berücksichtigung aller zur direkten Funktionserfüllung der stromtragenden Komponenten erforderlichen Beitragsleister (Gehäuseaufnahmen, Riegel, Dichtelemente ...)
 - Eingrenzung der Materialien und Ausführungsformen des Leitungstyps

Abb. 7-3: Inline-Steckverbindung



Hierbei wurden die Systemgrenzen bewusst so gezogen, dass zwischen den angrenzenden Systemen „Aggregat“ (Steuergerät, Sensor, Aktor) und „Leitungssatz“ keine Definitionslücken entstehen. Darüber hinaus folgt dieser Ansatz der Erkenntnis, dass ohne kontaktierten Stecker und angeschlagene Leitung die Strombelastung eines Kontaktteils nicht bewertet werden kann, gleiches gilt für die Bewertung der Vibrationsbelastung, bei der zusätzlich Gehäuse und Dichtungen einbezogen werden müssen.

Die Validationsprüfungen von Kontakten und Gehäusen folgen genau dieser Logik und auch eine Prüfung bis zum Ausfall eines Kontaktsystems ist auf das Zusammenspiel der oben genannten Bauteile angewiesen.

Darüber hinaus ist die Übertragung von Felddaten bezogen auf die Zuverlässigkeit von Steckverbindungen nur auf Komponenten- und nicht auf Bauteilebene möglich. Aufgrund der Erfassung der Felddaten gelten die ermittelten Zuverlässigkeitsaussagen stets für einen kompletten Strom- oder Signalpfad durch die Aggregate-Schnittstelle oder Inline-Steckverbindung im Sinne der oben genannten Systemgrenzen (Steckverbindung = Komponente) und können nicht explizit den einzelnen Bauteilen (Stecker, Steckhülse, Leitung oder deren Übergangsstellen) zugeordnet werden.

Funktionen der Komponente

Die zentrale Funktion eines Kontaktsystems innerhalb einer Steckverbindung ist die Übertragung von Leistungs- und/oder Signalströmen unter Erfüllung der Anforderung eines möglichst geringen und über die Lebensdauer der Komponente konstanten Durchgangswiderstands.

Die wesentlichen Beitragsleister zur Erfüllung dieser Forderung sind:

- die Leitfähigkeit der zur Erstellung der Kontaktteile verwendeten Materialien (Bahnwiderstand)
- die an den Berührungspunkten der Kontaktpartner auftretenden Kontaktwiderstände (Engwiderstand)
- die Relaxationsbeständigkeit der zur Erzeugung der Kontaktnormalkräfte verwendeten Federelemente
- die in den Kontaktpunkten und Anschlussbereichen eingesetzten Funktionsoberflächen (Beschichtung) und deren Abriebfestigkeit
- die konstruktive Gestaltung der Anschlussbereiche zu den jeweiligen Zuleitungen und die Prozesse zur Umsetzung der individuellen Verbindungstechnologien (z. B. Löten, Schweißen, Crimpen)

Als äußere Einflussgrößen kommen Temperatur- und Schwingbelastungen sowie feste, flüssige oder gasförmige Medien hinzu (z. B. Partikel, Flüssigkeiten, Schadgase)

Der typische Durchgangswiderstand einer gesteckten Kontaktierung liegt im Neuzustand abhängig von der Baugröße im unteren einstelligen MilliOhmbereich.

Dementsprechend wird der Ausfall einer gesteckten Kontaktierung durch das Überschreiten eines (ebenfalls baugrößenabhängigen) Durchgangswiderstand-Grenzwerts beschrieben; alternativ ist ein relativer Anstieg über den Ausgangswert (Neuzustand) wie zum Beispiel Faktor 3 eine mögliche Definition des Ausfalls.

Die Funktionsoberflächen des Kontaktierungsbereichs sind paarig zu verwenden (Sn-Sn und Ag-Ag).

Technische Daten

Zur übersichtlichen Darstellung der wesentlichen Produkteigenschaften von Kontaktsystemen wird ein „Datenblatt“ verwendet. Sollen zusätzlich Ergebnisse aus der Produktvalidierung ausgewiesen werden wird üblicherweise auf das Format „Produktspezifikation“ zurückgegriffen.

Dies gilt jedoch nicht für beide Kontaktpartner gleichrangig, sondern kommt fast ausschließlich für das Kontaktteil zum Tragen, welches die Kontaktnormalkraft erzeugt. Die wesentlichen Inhalte eines Datenblattes sind:

- Baugröße des Kontaktes (in der Regel über die Breite des Gegensteckers definiert)
- Querschnittsbereiche der verarbeitbaren Leitungen
- Werkstoffe und Funktionsoberflächen im Crimp- und Kontaktbereich
- Stromtragfähigkeit in Abhängigkeit von Umgebungstemperatur, Leiterquerschnitt und Leitermaterial (inclusive Material des Gegensteckers)
- Zulässige Grenztemperatur
- Minimales Spur- und Rastermaß in Abhängigkeit vom Leiterquerschnitt
- Steck- und Ziehkräfte (gegebenenfalls differenziert nach Oberflächenbeschichtung der Kontaktpartner)
- Zulässige Anzahl Steckzyklen
- Kontakthaltekraft nach Montage in die Kammer eines Kunststoffgehäuses (gegebenenfalls differenziert nach Primärverrastung und Sekundärverriegelung)

Aufgrund der Bandbreite der in Fahrzeugen zum Einsatz kommenden Kontaktsysteme ist eine konkrete aber gleichzeitig allgemeingültige Angabe von Werten zu den vorgenannten Produkteigenschaften hier nicht möglich.

7.2.2 Genaue Beschreibung der Verwendungsart (Use Case)

Steckkontakte haben den Verwendungszweck mehrere Teile (in der Regel andere Bordnetzkomponenten) miteinander elektrisch leitend, aber lösbar zu verbinden. Die Übertragung elektrischer Signale oder Energie soll an dieser Stelle vom Kontaktsystem möglichst unbeeinträchtigt bleiben. Darum soll der Übergangswiderstand an dem Steckkontakt ein definiertes Maß nicht überschreiten (siehe auch Überlegungen zum Kapitel 7.2.5 „Fehlermodell“).

Steckkontakte sollen den Beanspruchungen (elektrisch, thermisch, mechanisch, chemisch ...) während des Produktlebens, insbesondere jedoch während des Betriebs, widerstehen. Eine ungewollte Lockerung der Verbindung ist zu verhindern. Zur Montage, Demontage und Reparatur müssen die Steckkontakte unter kontrollierten Bedingungen wieder gelöst werden können. Die Anzahl der vorgesehenen Steckzyklen kann dabei variieren.

Für unterschiedliche Spannungsdomänen im Bordnetz (z.B. 12V und 48V) sind gegenseitige Beeinflussungen zu vermeiden. Dies wird im überwiegenden Teil des Bordnetzes durch eine galvanische Trennung oder ausreichend hohem Übergangswiderstand (Isolationswiderstand) erreicht, womit sich die gegenseitige Beeinflussung auf das Phänomen der elektromagnetischen Interferenz beschränkt.

Die Gehäuse und die darin enthaltenen Kammern zum Platzieren der Kontaktelemente sind so ausgeführt, dass mit den damit verbundenen Luft- und Kriechstrecken die Kontakte innerhalb einer Spannungsdomäne unabhängig von der funktionellen Belegung unmittelbar nebeneinander angeordnet werden können (z.B. Klemme 30 direkt neben Klemme 31 in der 12V- Spannungsdomäne).

In Bezug auf die Beeinflussung der Signalqualität durch eventuelle elektromagnetische Interferenzen, werden die Kontakte für Datenleitungen, wie z.B. CAN-Bus, in der Regel OEM- oder funktionspezifisch im Gehäuse platziert.

Bei mehrpoligen Steckverbindern ist die Funktion bzw. die Spannungsdomäne eines einzelnen Kontaktes nicht am Steckverbinder ersichtlich. Die Belegung der Pole wird in übergeordneten Architekturen festgelegt und kann unterschiedlichen Zwecken (Energieversorgung, Treiber für Aktuatoren, Signalisierung oder Datenübertragung) dienen.

Um eine Verwechslung des Steckverbinders mit anderen, eventuell ähnlichen Steckverbindern in der Nähe auszuschließen, werden in der Regel konstruktive Maßnahmen (z.B. Codierung oder Lageorientierung) vorgenommen.

7.2.3 Beschreibung der Klassen

Klasse I: Steckkontakte für Signalübertragung und Energieversorgung (NF und NV Anwendung)

Steckkontakte für die Signalübertragung und/oder Energieversorgung bestehen pro Strompfad aus einer Steckhülse (erzeugt die zur Kontaktierung erforderliche Kontaktnormalkraft und ist in der Regel mit einer Leitung verbunden) und einem Stecker (fährt beim Schließen der Steckverbindung in die Steckhülse und bildet an den Kontaktpunkten der Steckhülse den für einen elektrische Übergang erforderlichen Kontaktpartner). Dabei kann der Stecker Teil einer Steckerleiste sein (Aggregate-Schnittstelle) oder wie die Steckhülse mit einer Leitung verbunden sein (Inline-Steckverbindung). Die für Stecker einer Steckerleiste bestehenden Mindestanforderungen sind in Tabelle 7-1 dargestellt. Die Anforderungen orientieren sich an der jeweiligen Kontakt-Baugröße (abgeleitet von der Steckerbreite) und sind den Ausführungsvorschriften der im VDA organisierten Fahrzeughersteller entnommen (Stecker AV [26]). Die Zuordnung AK / OEM differenziert dabei, ob eine Baugröße von der Gesamtheit (AK-Standard) oder nur einem Teil der Fahrzeughersteller (OEM) eingesetzt wird.

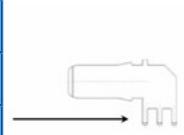
Die Anzahl der Anschlüsse beschreibt die von den Kontaktherstellern empfohlene Ausführung der Anschlusselemente (Lötposten bzw. Einpresszonen) zum Schaltungsträger.

Die materialspezifischen Anforderungen der Aggregate-Stecker können prinzipiell auf die Stecker mit Leitungsanbindung übertragen werden, sind aber aufgrund der expliziten Datenblattangaben solcher Stecker nicht verbindlich vorgegeben.

Die Tabelle 7-1 stellt (mit Ausnahme der empfohlenen Anzahl der Anschlüsse) eine Zusammenfassung der Mindestanforderungen an Stecker(leisten) dar, die für entsprechende Produkte nach Inkrafttreten der Ausführungsvorschriften (OEM –spezifisch zwischen 2011 und 2016) gegeben sein müssen

Tabelle 7-1: Mindestanforderungen an Stecker von Aggregate Anschlüssen

Stecker				
Kontakt Baugröße [mm]	Minimale Leitfähigkeit [MS/m]	Minimale Zugfestigkeit Rm [MPa]	Minimale Haltekraft [N]	Anzahl Anschlüsse
0,5	18	520	15	1
0,63	16	520	25	1
1,2	30	350	30	1
1,5	30	350	40	1
2,8	30	350	60	2
4,8	46	350	60	2
5,2	46	350	60	2
5,8	46	350	60	2
6,3	46	350	60	3
8,0	46	350	80	3
9,5	46	350	80	3
12,0	46	350	80	4
14,5	58	350	80	4
Stecker AV				



Anders als bei den Steckern orientieren sich die Mindestanforderungen an Steckhülsen nicht nur an den Kontakt-Baugrößen, sondern auch an den jeweils angeschlossenen Leiterquerschnitten. Die hier betrachteten Kontakte sind Kontakte mit ausschließlich Crimp-Anschluss (Leitungs- und Isolationscrimp).

Die minimale Haltekraft beschreibt die Zug- oder Druckbeanspruchung, der eine im Gehäuse verbaute Steckhülse standhalten muss, ohne dabei mehr als 1 mm aus ihrer Sollposition bewegt zu werden. Zur Vermeidung von unzulässigen Deformationen der Steckhülse bei der Montage ins Gehäuse wird die minimale Knickfestigkeit gefordert; im Fokus steht hier der Übergang zwischen dem Kontakt- und dem Anschlussbereich.

Welcher Kraftwert beim Herausziehen einer Leitung aus dem Crimpanschluss einer Steckhülse erreicht werden muss ist in der Spalte „Minimale Leiterausreißkraft“ dargestellt.

Die Tabelle 7-2 stellt eine Zusammenfassung der Mindestanforderungen an Steckhülsen dar. Die Referenz auf die Liefervorschriften 214 und 215 (LV 214 / TLF0214, LV 215) und die Stecker-AV der OEMs [26] beschreibt den gemeinsamen Ursprung der Festlegungen. Verbindlich sind die jeweils geltenden OEM-spezifischen Spezifikationen/Prüfvorschriften. Vergleichbar verhält es sich mit den aus der USCAR-Spezifikation entnommenen Mindestwerten für die Knickfestigkeit. Auch hier gelten im Zweifelsfall die individuellen Vorgaben der Fahrzeughersteller.

Tabelle 7-2: Mindestanforderungen an Steckhülsen in Gehäusen bzw. mit angeschlagenen Leitungen

Steckhülse				
Kontakt Baugröße [mm]	Minimale Haltekraft in Kammer [N]	Minimale Knickfestigkeit [N]	Leiterquerschnitt [mm ²]	Minimale Leiterausreißkraft [N]
0,5	25	3	0,13 - 0,35	50
0,63	55	4	0,50	60
1,2		4	0,75	85
1,5	80	7	1,00	108 (1,2 bis 2,8)
2,8		10	1,00	140 (4,8)
4,8	120	10	1,50	150
5,2		10	2,50	200
5,8		10	4,00	310
6,3		15	6,00	450
8,0	180	15	10,00	500
9,5	200	20	16,00	1500
12,0		-	25,00	1900
14,5	500 (p+s)	-	35,00	2300
	LV 214	USCAR2		LV 214 / LV 215

In der Klasse I wird eine maximale Nennspannung von 48 V DC (obere Grenzspannung ≤ 60 V DC) berücksichtigt. Die Auswahl der geeigneten Baugröße (zum Beispiel zur Erfüllung der geforderten Stromtragfähigkeit) auf Basis der applikationsspezifischen Lastenheftvorgaben und der jeweiligen Produktspezifikationen der Kontaktsysteme wird vorausgesetzt.

Klasse II: Steckkontakte für Hochfrequenz (HF) Anwendungen

Steckkontakte für hochfrequente Anwendungen, z.B. Datenleitungen, werden aktuell nicht betrachtet

Klasse III: Steckkontakte für Hochvolt (HV) Anwendungen

Steckkontakte für Hochvolt Anwendungen (Spannung > 60 V DC und ≤ 1500 V DC) werden aktuell nicht betrachtet

7.2.4 Anforderungen bezüglich Lifecycles der Stecksysteme

Für den Lifecycle der Stecksysteme werden die folgenden Phasen unterschieden, in denen unterschiedliche Belastungen der Stecksysteme und Forderungen an die Stecksysteme gestellt werden:

- Herstellung der Bauteile
- Lagerung und Transport, Logistik der Komponenten
- Konfektion: Zusammenbau, Verarbeitung, Leitungssatzfertigung, End-Of-Line-Prüfung, ggf. Nacharbeit bei Konfektion
- Lagerung und Transport, Logistik der Funktionsbaugruppen
- Montage und Produktion: Integration ins Fahrzeug, Prüfung, ggf. Nacharbeit in der Produktion
- Kundenbetrieb des Fahrzeugs
- Instandsetzung und Reparatur, Nacharbeit im Betrieb
- Demontage und Entsorgung
- Wiederverwendbarkeit

Zusätzlich werden allgemeine Anforderungen an die Stecksysteme gestellt, die unabhängig von den Phasen zu erfüllen sind.

7.2.4.1 Allgemeine Anforderungen

Die Kontaktsysteme müssen entsprechend der Richtlinien, Vorschriften und Verfahrensanweisungen von Bauteil-Herstellern, Konfektionär und Fahrzeug-Hersteller (OEM) behandelt werden. Zudem sind geltende Regularien, lokale Gesetze und Auflagen einzuhalten, wie beispielsweise für „Gefahrgut“ (Flussmittel oder Hilfsstoffe für die Montage) oder „Ladungssicherung“.

Die verwendeten Werkzeuge und Verschleißteile müssen für eine spezifikationsgemäße Verarbeitung der Kontaktsysteme geeignet sein. Über die Eignung der Werkzeuge sollten sich die Vertragsparteien verständigen.

Steckverbindergehäuse, die auf sämtliche mechanische Kodierungen der Gegenseite steckbar sind (Z-Kodierung), sind nur im Werkstattbetrieb zulässig. Es muss immer eine Lageorientierung oder eindeutige Kodierung geben, um eine fehlerhafte Steckung zu vermeiden.

Identifizierung:

Für die Rückverfolgbarkeit ist eine eindeutige Identifizierung zu ermöglichen.

Dichtung:

Für gedichtete Steckverbinder ist die Einhaltung der Dichtigkeitsanforderung nachzuweisen. Die zur Gehäusebestückung zu verwendenden Kontaktvarianten und Dichtelemente werden in Abhängigkeit von der Leitungsdimensionierung und der Kammergeometrie vom Bauteil-Hersteller vorgegeben.

7.2.4.2 Anforderungen an die Herstellung der Bauteile

Anforderungen an die Herstellung der Bauteile werden in den Bauteil-Lastenheften der OEMs unterschiedlich definiert.

7.2.4.3 Anforderungen an den Transport

Beim Transport ist sicherzustellen, dass keine Beschädigungen an den Bauteilen auftreten. Dazu ist eine ordnungsgemäße Verpackung der Bauteile nach geltenden Vorschriften der Bauteil-Hersteller, Konfektionäre und Hersteller (OEM) vorzusehen.

7.2.4.4 Anforderungen an die Lagerung

Die Steckverbinder und Kontaktelemente sind konstruktiv so ausgelegt, dass ihre vorgesehene Funktion grundsätzlich während der gesamten Lebensdauer eines Fahrzeugs gewährleistet ist. Die thermischen, mechanischen und chemischen Belastungen, welchen die Produkte im Rahmen der Freigabeprüfungen unterworfen werden, sind weitaus höher als die

Belastungen bei einer ordnungsgemäßen Lagerung der Produkte über mehrere Jahre. Eine uneingeschränkte Lagerfähigkeit ist bis zur Verarbeitung der Kontaktelemente jedoch nicht gegeben, da sich die Anschlussbereiche hinsichtlich ihrer zuverlässigen Kontaktierung verändern können.

Wenn nicht von den Herstellern der Steckverbinder anders spezifiziert, sind bevorzugt Bedingungen einzuhalten, die den Umweltbedingungen der DIN EN 60721-3-1, Standardklassifikation IE11, entsprechen. Dies gilt besonders für die darin beschriebenen klimatischen Randbedingungen (1K2). Diese Bedingungen können der Tabelle 7-3 entnommen werden.

Tabelle 7-3: Umweltbedingungen der Klasse 1k2, DIN EN 60721-3-1, auszugsweise

Umweltbedingung	Wertebereich
Umgebungstemperatur	+5 °C bis + 40°C
Relative Luftfeuchte	5% bis 85%
Absolute Luftfeuchte	1 g/m ³ bis 25 g/m ³
Temperaturgradient am Lagerort	0.5 K/min
Sonneneinstrahlung	700 W/m ²

Die absolute Feuchte grenzt dabei die relative Feuchte ein. Bei einer Lagertemperatur von 30°C ist der Grenzwert der relativen Feuchte von rH=85% erreicht.

Weiterhin sind die Produkte vor Regen und intensiver korrosiver Atmosphäre zu schützen. Die erforderliche Temperierung der Lagerstelle ist über eine geeignete Temperaturregelung ohne zwingende Feuchteregelung sicherzustellen.

Kontaktelemente, wie Stift- und Buchsenkontakte, mit Crimpanschluss oder anderen Anschlusstechniken (Löten ausgenommen) sind bei Einhaltung der gelisteten Lagerbedingungen für eine Dauer von 2 Jahren uneingeschränkt weiterverwendbar. Crimpanschlussbereiche sind in der Regel verzinkt und sind auch nach längerer Lagerung grundsätzlich noch voll funktionsfähig. Im Zweifel ist die Stabilität des elektrischen Widerstandes der Crimpverbindung über entsprechende Testmethoden zu überprüfen.

Kontakte mit Lötanschlüssen sollten innerhalb eines halben Jahres verarbeitet werden.

7.2.4.5 Anforderungen an die Konfektion

Beschädigungen der Kontaktsysteme während der Konfektion sind grundsätzlich zu vermeiden. Tritt dennoch eine Beschädigung an einem Kontaktsystem auf, ist dieses durch ein Neuteil zu ersetzen. Eine Reparatur von sicherheitsrelevanten Kontaktsystemen in der Leitungssatzfertigung birgt hohe Risiken und ist daher nicht zu empfehlen.

Ist während der Konfektion eine Nachbesserung des Leitungssatzes erforderlich, muss bei der Nachbesserung die Verfahrensanweisung des Bauteilherstellers beachtet und die jeweils vorgeschriebenen Werkzeuge verwendet werden.

In der Verarbeitungsanweisung der Bauteil-Hersteller ist die einzuhaltende Höhe und Breite des Adercrimps (einschließlich Toleranzfenster) spezifiziert. Darüber hinaus gelten die in Tabelle 7-2 angegebenen Mindestwerte der Leiterausreißkräfte.

7.2.4.6 Anforderungen an die Montage und Produktion

Von einer Reparatur sicherheitsrelevanter Kontaktsysteme wird aufgrund der nicht abschätzbaren funktionalen Risiken dringend abgeraten. Tritt dennoch eine Beschädigung an einem Kontaktsystem auf, ist dieses durch ein Neuteil zu ersetzen. Eine Reparatur von sicherheitsrelevanten Kontaktsystemen ist nicht zulässig.

Ist während der Montage oder Produktion die Demontage eines Kontaktsystems erforderlich, müssen dazu die Verfahrensanweisungen des Bauteilherstellers und des Konfektionärs und das entsprechend vorgeschriebene Werkzeug verwendet werden.

7.2.4.7 Anforderungen an Nacharbeiten

Nachbesserungen von Kontaktsystemen am endgeprüften Leitungssatz sind nicht erlaubt. Beschädigte Steckkontakte, Stecker und Steckgehäuse sowie Dichtelemente müssen ersetzt werden. Bei Ersatz eines Bauteils oder Nacharbeit ist anschließend eine Funktionsprüfung durchzuführen. Die Funktionsprüfung ist ausschließlich mit Messmitteln durchzuführen, die vom Hersteller für die entsprechende Schnittstelle zugelassen ist.

Zur Demontage von Kontakten aus einem Gehäuse ist die zweite Kontaktsicherung des Gehäuses entsprechend der Montageanleitung mit dem vorgesehenen Spezialwerkzeug zu öffnen.

Für Nacharbeiten dürfen nur die nach Verfahrensanweisung der Bauteilhersteller vorgesehenen Demontage-Werkzeuge verwendet werden.

Können Beschädigungen eines Kontaktteils bei der Entnahme nicht vermieden werden, dürfen die entnommenen Kontaktteile nicht mehr eingesetzt werden und sind durch Neuteile zu ersetzen. Das Anstechen der Leitungsisolierung zur Kontaktierung des Leiters bei der Fehlersuche stellt eine Beschädigung der Komponente im vorgenannten Sinne dar.

Nacharbeiten an Leitungssätzen und Kontaktsystemen (wenn zulässig) müssen vom Konfektionär und Hersteller nach Art und Umfang dokumentiert werden. Eine eindeutige Identifizierung des nachgearbeiteten Leitungssatzes muss möglich sein, ohne dass dieser eine zusätzliche Kennzeichnung erhält.

7.2.4.8 Anforderungen im Kundenbetrieb

Durch den Betrieb des Fahrzeugs beim Kunden ergeben sich über das Fahrprofil des Kunden und der Einflüsse der Umgebung auf das Fahrzeug Anforderungen an die Stecksysteme. Diese Anforderungen unterscheiden sich bei den Herstellern.

Im Kundenbetrieb sind keine Anforderungen zur Interaktion mit dem Kunden definiert. Es werden lediglich Anforderungen für die Instandsetzung und Reparatur gestellt.

7.2.4.9 Anforderungen an Instandsetzung und Reparatur

Steckverbinder dürfen nur unter Berücksichtigung der OEM Vorgaben instandgesetzt oder repariert werden. Der Einfluss einer Reparatur auf die Ausfallrate wird in diesem Dokument nicht betrachtet.

7.2.4.10 Anforderungen an die Wiederverwendbarkeit

Die Wiederverwendbarkeit von Stecksystemen wird per Anforderung explizit ausgeschlossen.

7.2.5 Fehlermodell

Die Funktion eines Steckverbinders ist es, eine durch mechanische Betätigung lösbare elektrische Verbindung zu gewährleisten, wobei die Betätigungen in der Anzahl begrenzt sind (Steckzyklen) und lastfrei erfolgen müssen (Abgrenzung zum Schalter).

Eine vereinfachte Definition der Zuverlässigkeit eines Steckverbinders ist es die elektrische Verbindung mit einem bestimmten Bereich des Kontaktdurchgangswiderstandes unter den

für den Einsatz vorgesehenen Betriebsbedingungen für eine bestimmte Zeit aufrechtzuhalten. Da die Durchgangswiderstände, insbesondere die Kontaktwiderstände und die Widerstände der Anschlüsse im Einsatz über die Zeit degradieren können, ist es nützlich, in diesem Zusammenhang entsprechende Degradationsmechanismen zu betrachten, ob sie intrinsisch oder extrinsisch sind. Intrinsische Mechanismen, die zu zufälligen Ausfällen führen, beziehen sich auf das Design und die verwendeten Materialien vom Aufbau des Steckverbinders. Extrinsische Mechanismen verursachen systematische Fehler und beziehen sich auf die ordnungsgemäße Herstellung bzw. Handhabung und Anwendung.

Beispiele für eine intrinsische Degradation sind Korrosion, Verlust der Normalkraft durch Spannungsrelaxation und Erwärmung.

Beispiele für einen extrinsischen Abbau können Verunreinigungen, ungünstige Einbaulagen oder Aussetzen ungünstiger aggressive Gase sein. Solche Degradationsmechanismen können qualitativ bewertet werden, sind jedoch im Allgemeinen schwierig, wenn nicht unmöglich, bei der Bestimmung der Zuverlässigkeit von Steckverbindern zu quantifizieren.

Weitere Beispiele für Degradationsmechanismen systematischer Fehler, die außerhalb des Bereichs der Zuverlässigkeit von Steckverbindern liegen, umfassen die Verwendung des Steckverbinders außerhalb seines Nenntemperaturbereichs (sowohl umgebungs- als auch gehäusebezogen), der Betrieb mit Strömen, die über die Produktspezifikation hinausgehen (sowohl im Einzel- als auch im verteilten Modus) und unsachgemäße Steckpraktiken (übermäßiges Stecken, Ziehen an Kabeln usw.).

Die extrinsische Degradation kann nur durch die ordnungsgemäße Erarbeitung einer Spezifikation und der abgesicherten Produktion durch die Bauteilhersteller, sowie durch die ordnungsgemäße Montage und Anwendung der vorgesehenen Applikation durch den Anwender kontrolliert werden.

Bei einer Betrachtung von realen Degradationsmechanismen müssen die abgesicherten Parameter zur Funktion der Steckverbinder betrachtet werden. Dabei haben die Kontaktelemente die Aufgabe der Herstellung der elektrischen Verbindung zur Übertragung von elektrischer Energie oder Signalen. Die Gehäuse dienen der Befestigung und Halterung der Kontaktelemente, zur Lagefixierung der Kontakte, zum Schutz der Kontakte vor mechanischen Beschädigungen, zum Schutz der Kontakte gegenüber Umgebungseinflüssen (Korrosion) und zur elektrischen Isolation.

Die für die Funktion des Steckverbinders hauptsächlichen Fehlerarten sind im ordnungsgemäßen, gesteckten Betriebszustand:

- die Erhöhung des Durchgangswiderstandes (open)
- und die Reduzierung des Isolationswiderstandes unter einem Schwellwert (short)
- die gegenseitige mechanische Trennung der Steckverbinderpartner (open)

Eine Unterscheidung zwischen intermittierenden Ausfällen und permanenten Ausfällen wird nicht vorgenommen.

Als wichtigste abzusichernde Eigenschaft soll im Weiteren der elektrische Durchgangswiderstand bezüglich möglicher Fehlerarten detaillierter betrachtet werden, denn

- eine unzulässige Reduzierung des Isolationswiderstands betrifft entweder die Leitung außerhalb der Systemgrenzen einer Steckverbindung oder ist die Folge von in die Steckverbindung eingedrungenen Verunreinigungen (zum Beispiel Flüssigkeiten) und damit ein systematischer Fehler
- ein mechanisches Trennen von Stecker- und Steckhülsegehäuse ohne bewusste Betätigung der Verriegelungselemente des Steckverbinders ist stets nicht bestimmungsgemäßer Gebrauch.

Die kritische physikalische Größe der Steckverbinderkontaktierung ist im Speziellen der eigentliche Kontaktwiderstand, der in der entsprechenden Einbausituation und der elektrischen Belastung über die Zeit aufrechterhalten werden muss.

Bezüglich einer möglichen Erhöhung des Kontaktwiderstandes über eine applikationsspezifische Grenze müssen hierbei mehrere Einflussparameter untersucht werden, insbesondere das Zusammenwirken von Basiswerkstoffen und Kontaktbeschichtungen sowie mit deren physikalischen und chemischen Veränderungen wie Diffusion, Phasenbildungen und -wandlungen, Korrosion und Relaxation. Typische Alterungsmechanismen, die einen Einfluss auf den Kontaktübergangswiderstand im gesteckten Betrieb haben können, sind in der Tabelle 7-4 gelistet. Hierzu existieren verschiedene Modelle der Degradation, die sich je nach Belastungsart unterschiedlich überlagern können und im Einzelfall betrachtet werden müssen.

Tabelle 7-4: Typische Degradationsmechanismen bei Kontaktelementen in Steckverbindern

Material	Mechanismus
Basismaterial (Metalle und Kunststoffe)	<ul style="list-style-type: none"> • Relaxation / Kriechen • Korrosion • Rekristallisation / Erweichen • Versprödung • Ermüdung
Kontaktbeschichtung	<ul style="list-style-type: none"> • Chemische Reaktionen (Oxidation, Korrosion) • Rekristallisation (Erweichung) • Diffusion • Phasenbildung/ -umwandlung • Zustandsänderung (Schmelzen) • Kontaminationen • Abrasion / Schichtverschleiß
Kontaktanschluss (Leiterplatte, Leitung)	<ul style="list-style-type: none"> • Phasenbildung -umwandlung • Relaxation / Kriechen • Diffusion • Versprödung • Brückenbildung

Der betrachtete Zeitraum, in dem sich die Degradationsmechanismen auf die Funktionalität in der Anwendung auswirken, ist bei einem Steckverbinder im gesteckten Zustand der Applikation jedoch unterschiedlich zu bewerten. Da die Steckverbinder in einem Fahrzeug nach dem Verbau des Kabelstranges bis zum Ende der Nutzung im gesteckten Zustand vorliegen, wirken die Degradationsmechanismen Relaxation, Korrosion und Abrasion in Folge von Relativbewegungen bei Temperaturwechsel auch außerhalb des eigentlichen Fahrtbetriebes, womit diese Zeiträume zu Lebensdauerbetrachtungen zu den eigentlichen zusätzlichen Belastungen bei der Nutzung im Fahrtbetrieb hinzu gezogen werden müssen. Die zusätzlichen Belastungen der Steckverbinder bei der Fahrzeugnutzung bedingen Degradationen der Kontakte infolge von Stromerwärmung und Vibrationen wie zusätzliche Relaxation, Diffusionseffekte und additiver Schichtverschleiß.

Die eigentliche elektrische Verbindung erfolgt dabei über den elektrischen Kontakt mittels Einprägung der Kontaktnormalkraft auf die definierten Kontaktpunkte, die einen Übergangswiderstand des Kontaktelements ermöglichen, welcher über den applikationsspezifischen Einsatz und über die geplante Nutzungszeit aufrecht erhalten werden muss.

Die Gesamtwiderstände über die Kontaktverbindung von einem Anschluss zu den anderen sind baugrößenabhängig und liegen in der Regel im Bereich von einstelligen milli-Ohm bei klassischen Baugrößen (0,5 mm bis 9,5 mm Steckerbreiten) bzw. im Bereich von mikro-Ohm bei Hochstromkontakten (12 mm Steckerbreite oder größer, häufig auch in vergleichbarer Dimensionierung als Rundkontakte ausgelegt). Die Erhöhung des Übergangswiderstandes über einen Kontakt und deren Auswirkung als Ausfall im Betrieb ist dabei wiederum applikationsspezifisch unterschiedlich zu betrachten. Im Fall der Übertragung von Signalen sollten Widerstandsänderungen im 10tel Ohmbereich keinen negativen Einfluss auf die Signalübertragung haben. Dahin entgegen ist bei der Nutzung der Steckkontakte zur Energieübertragung (Stromfluss) der Anstieg des Kontaktwiderstandes limitiert, damit eine spezifiziertere und durch Qualifikation abgesicherte maximale Temperatur im Kontaktpunkt nicht überschritten wird.

Betrachtet man die Degradationsmechanismen, so existieren unterschiedliche Schädigungsmodelle in Abhängigkeit von den Temperaturen, von Temperaturdifferenzen und Verschleißstrecken. Diese können sich in Bezug auf eine Ausfallwahrscheinlichkeit der Komponenten überlagern und sich als Fehler multiplizieren.

Als Schädigungsmodelle werden dabei Vorgänge diskutiert, die nach den Mechanismen nach Arrhenius (Relaxation, Korrosion, Phasenwandlungen und Diffusion), Coffin-Manson (Versprödung und Ermüdung) sowie nach der spektralen Schwingungsbelastungsdichte (Abrasion und Schichtverschleiß) beschrieben werden können. Ein Verschleißmodell, das ein Durchreiben der Beschichtungen in Folge von Betätigungen (Stecken und Ziehen) beschreibt, ist im Bereich des Automobils vernachlässigbar, da der Vorgang nur für den eigentlichen Reparaturvorgang relevant ist.

Mit der Kenntnis oder Annahme der Beschreibung der Schädigungsmodelle werden auch beschleunigte Tests möglich, um Fehleraussagen mit verkürzten Testzeiten unter Nutzung kleinerer Testgruppen mit geringer Anzahl an Probanden abzuleiten. Problematisch sind dabei Aussagen, wenn die beschleunigten Belastungen, die auf höhere Temperatur- oder Vibrationsbeanspruchungen basieren, so durchgeführt werden, dass die dominierenden Alterungsmechanismen im Test verlassen werden oder sich durch Sekundäreffekte andere Degradationsmechanismen überlagern.

Dieses kann z.B. eine solche Temperaturbelastung sein, bei der andere physikalische und chemische Prozesse einsetzen, die dann primär zu einem Ausfall führen würden. Bei den Steckverbindern liegen die spezifizierten und qualifizierten Einsatzbedingungen in den Temperaturbereichen nahe der Grenze sekundärer Degradationsmechanismen, so dass mit einer Erhöhung der Belastung über die spezifizierten Grenzen hinaus Fehlermode eintreten können, die nicht im Rahmen der Spezifikation geprüft wurden und zu erhöhten oder verfälschten Fehlerraten führen.

Andere Degradationsmechanismen, welche nicht auf den Temperatureinfluss zielen, sind die Relativbewegungen der Kontaktpartner im Steckverbinder zueinander in Folge von Vibration und den dabei auftretenden Resonanzen im Aufbau der Applikation. Temperaturwechsel, die bei anderen Fahrzeugapplikationen zu Versprödung oder Ermüdung führen sind bei Steckverbindern eher im Bereich der Gehäuse relevant.

Um beispielsweise Aussagen über die Stabilität des Kontaktwiderstandes in Abhängigkeit der Normalkraft zu tätigen, muss folglich das Thema Relaxation der verwendeten Federwerkstoffe, die in der Regel aus Kupferlegierungen bestehen, näher betrachtet werden. Moderne Kontakte werden für den Einsatz einer möglichst hohen Stromtragfähigkeit und für den Einsatz bei erhöhten Temperaturen in Kupferknetlegierungen, meist aus der Gruppe der CuNiSi-Werkstoffe gefertigt. Ein Einfluss der Relaxation, die den Kontaktwiderstand als Folge des Nachlassens der Kontaktnormalkraft ansteigen lassen würde, wird bei diesen Werkstoffen erst bei Temperaturen oberhalb 180 °C nach längerer Zeit deutlich sichtbar. Diese Temperaturbereiche gelten jedoch derzeit als maximale Obergrenzen einzelner Kontaktsysteme mit einer Silberbeschichtung. Beschleunigte Tests in und oberhalb dieses Temperaturbereiches wirken sich als Degradation viel stärker in Beschichtungen aus

und werden zu Fehlaussagen führen. Im Fall von Zinn als Kontaktbeschichtung ändert sich das Diffusionsverhalten von überwiegend Korngrenzendiffusion zu Volumendiffusion im Bereich von etwa 130 °C – 150 °C womit solche Kontakte keinen Temperaturen oberhalb von 130°C in beschleunigten Tests ausgesetzt werden sollten. Im Fall von Silber kann es je nach Schichtausführung oberhalb von 140°C zu einer Erweichung der Beschichtung kommen, was zu einer Verbesserung des Kontaktwiderstandes führt und was konträr zu einer Erhöhung des Widerstandes im Sinne einer Alterung abläuft. Oberhalb von 160°C können dann im Fall von Silber Diffusionseffekte des Sauerstoffs durch die Beschichtung stattfinden, die eine Oxidation der unterliegenden Schicht in der Schichtgrenze einleiten und zum Kontaktausfall führen.

Da die Kontaktflächen in erster Regel je nach Material und Beschichtungsabfolge /- die maximalen Anwendungstemperaturen bestimmen sind die spezifizierten Einsatzbedingungen so definiert, dass eine Widerstandsänderung über die Zeit sehr gering ist und die zulässige Änderung die spezifizierten Erwärmungseigenschaften einhält. Bei nur geringfügig höheren Temperaturen, als die in der Qualifikation abgesicherten, können wie beschrieben andere Alterungsprozesse einsetzen, die vergleichsweise schnell den Kontaktwiderstand über den maximal zulässigen Wert erhöhen können, was einen Ausfall bedeuten würde. Eine beschleunigte Alterung zur Ermittlung von Ausfallraten unter Nutzung dieser erhöhten Temperaturen wird deshalb zu falschen Werten führen.

Neben dem Kontaktübergangswiderstand müssen der Isolationswiderstand mit einem möglichen Sonderfall einer Brückenbildung im Anschluss oder die Elektromigration im undichten Gehäuse betrachtet werden. Bei Verschleißvorgängen, z.B. durch mögliche Betätigungen (Stecken und Ziehen) des Steckverbinders, muss die Häufigkeit dieser Vorgänge über dem geplanten Einsatz hochgerechnet werden. Häufige Steckungen am Anfang des Lebenszyklus werden ein stärkeres Altern bewirken, als wenn die Ereignisse zu Ende der Produktlebensdauer hin geschehen. Beim Automobil fällt diese sehr klein aus (im Gegensatz zur Festlegung der LV 214 [17]) oder ist nur einmalig gegeben, so dass eine Betätigung nur im Reparaturfall gerechtfertigt ist, wobei dann in der Regel eine Komponente getauscht wird. Mit dem Ansteigen der Zuverlässigkeitsforderungen an das Bordnetz im Automobil werden die Betätigungen im niedrigen einstelligen Bereich liegen und können somit bei Zuverlässigkeitsbetrachtungen der Steckverbinder vernachlässigt werden.

Als Degradationsmechanismen, welche nicht auf den Temperatureinfluss zielen, sind im Automobil in erster Linie die Relativbewegungen der Kontaktpartner im Steckverbinder zueinander in Folge von Vibration und den dabei auftretenden Resonanzen im Aufbau der Applikation zu nennen. Die aus der Felderfahrung häufigste Ursache von Ausfällen von Steckverbindern in der Automotiven Anwendung ist die mechanische Belastung, die meist in Form von Vibration auftritt. Definitionsgemäß ist die Kontaktierung im Steckverbinder durch einen ruhenden Kontakt gegeben. Dieses bedeutet, dass die Zuverlässigkeit stets sicher gewährleistet ist, wenn der Kontaktpunkt seine Ruheposition im Betrieb nicht verlässt bzw. kippt, wackelt oder rotiert.

Bei Schwingungen ist dieses jedoch nicht vollständig zu vermeiden. Je nach Konstruktion des Kontaktelements und seinem umfassenden Gehäuse treten durch den Einfluss der beschleunigten Massen der angeschlossenen Leitung im Kontaktpunkt Querkräfte auf, die den Kontaktpunkt bewegen bzw. verschieben können. Das Resultat dieses Vorganges ist ein einhergehender Schichtverschleiß und bei unedlen Kontaktmaterialien tribochemische Reaktionen, die zur Reibkorrosion („Fretting Corrosion“) führen können. Die Verschiebung des Kontaktpunktes, auch als „cross slip“ bezeichnet, erfolgt bei Querkräften, die größer als die Haltekraft des Kontaktes selbst sind. Diese ergeben sich wiederum aus dem Produkt der Normalkraft und des anstehenden Reibkoeffizienten. Der Übergang vom Ruhepunkt zur Verschiebung ist durch eine Änderung der wirksamen Kontaktfläche charakterisiert. Wird der Kontakt mechanisch gering belastet, so verweilt ein Großteil der Kontaktfläche zueinander elastisch „partial slip“. Ein Schichtverschleiß ist im Inneren des Kontaktpunktes dann nicht gegeben, womit der Kontaktwiderstand im Bereich des ruhenden Kontaktes liegt.

Eine beschleunigte Messung zur Ermittlung der Ausfallraten im Fall der Vibration gestaltet sich schwierig bzw. ist dann nicht möglich, wenn die Schwingungsamplituden so groß bemessen werden, dass der Kontaktpunkt sich zwangsweise verschiebt. Der dabei einhergehende Schichtverschleiß bildet dann ein physikalisch abweichendes Versagen ab, das sich sowohl vom Versagensmechanismus als auch von der -geschwindigkeit erheblich und nichtlinear zur Ausgangssituation unterscheidet. Der Kontakt wird in diesem Fall schnell ausfallen und eine Rückrechnung auf geringere Amplituden wird nicht möglich sein. Zusätzlich muss betrachtet werden, dass die aufnehmenden Elemente wie Gehäuse sowie die schwingungsdämpfenden Elemente wie beispielsweise Einzeladerabdichtungen das Bewegungsverhalten deutlich beeinflussen können. Dieses betrifft sowohl das Dämpfungs- als auch das Resonanzverhalten. Erschwerend kommt hinzu, dass je nach Einbausituation, Verlegung des Leitungsabgangs und Einsatzkondition, die Resonanzen sich auf die Kontakte in der Amplitude, der Frequenz und der Eigenform der Schwingung ändern. Der Überhöhungsfaktor in der Resonanz am Kontaktpunkt wird also von den Randbedingungen des Systems bzw. der Systemumgebung definiert, was den Einbauort, die -lage und die Verarbeitung im Fahrzeug miteinschließt.

Erfahrungsgemäß hat sich bewährt, dass eine Bewertung der Funktionalität des Steckverbinders dann möglich ist, wenn der Kontakt in der jeweiligen Einbauanordnung unter den realen Bedingungen ähnlichen Schwingungsbelastungen im Test besteht (genormte, applikationsnahe Schwingungsprofile). Im Fall einer Bewertung der Zuverlässigkeit unter Vibrationsbelastungen sollte der Steckverbinder im geplanten Aufbau mit Leitungsabgang betrachtet werden. Eine Aussage mittels beschleunigten Tests, ab welcher Last mit welcher Wahrscheinlichkeit der Kontakt zum Ausfall kommt, ist aufgrund der vielfältigen Einflussparameter insbesondere der Leitung und deren Verlegung und der Resonanzen im Aufbau nur schwer möglich.

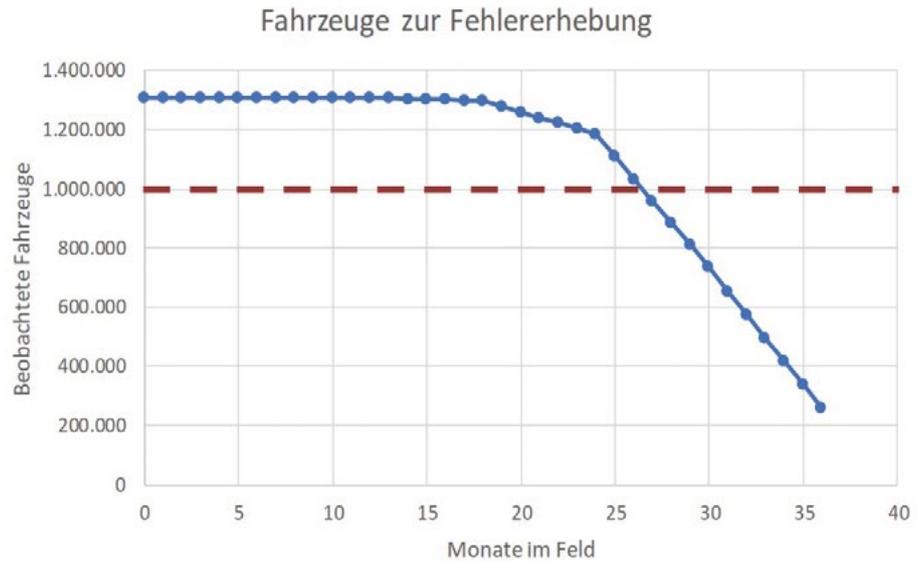
Ein einfacherer Weg erscheint die Erhebung von Felddaten bis End-of-Line zu sein, da die Mehrheit der verwendeten Kontaktteile sich seit Jahren im Feld bewährt haben und auch für künftige Applikationen angewendet werden.

7.2.6 Basis-Ausfallrate

Für die Bestimmung der Basis-Ausfallrate werden bei den Steckkontakten Felddaten herangezogen. Diese stammen aus einer Langläuferstudie von drei Fahrzeugtypen mit initial 1,31 Mio. Fahrzeugen, die den Nutzungszeitraum von 15 Jahren repräsentiert. In dieser Studie wurden Kontaktstellen überwiegend mit Zinn als Kontaktoberfläche erfasst, so dass die errechneten Basisdaten für Zinnkontakte zu Grunde gelegt werden. Die dabei erhobenen Daten liegen aktuell für den Zeitraum der ersten drei Jahre vor und können mittels statistischer Werkzeuge untersucht werden [23].

Über den erfassten Zeitraum haben diese Fahrzeuge durchschnittlich 68.220 km und 1.413h Fahrbetrieb bei einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 30 Meilen/h erlebt. Im dritten Jahr (Monat 25 -36) waren dabei die beobachteten Fahrzeugzahlen stark rückläufig, so dass zum Ende der Untersuchung im Monat 36 nur noch 257 Tausend Fahrzeuge zur Verfügung standen (Abbildung 7-4).

Abb. 7-4: Beobachtete Fahrzeuge im Feld



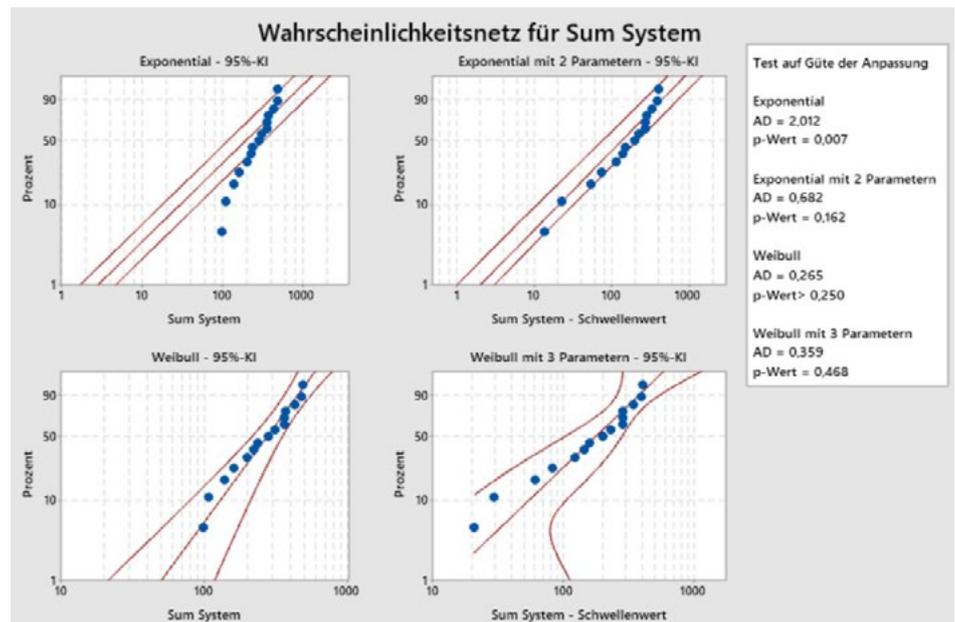
Für die Auswertung sind die Ausfälle unterschiedlicher Ausfallarten herangezogen worden. Damit kann mit dieser Studie auch der Anteil der Ausfälle unterschieden werden, die durch systematische Ursachen und durch zufällige Ursachen entstanden sind (siehe Tabelle 7 -5). Beispiele für systematische Ursachen sind hierbei hauptsächlich nicht gesteckte Steckverbinder und Ursachen wie aufgebogene oder beschädigte Kontakte sowie beschädigte Steckverbinder (Gehäuse). Die in dieser Studie beobachteten zufälligen Ursachen sind in erster Linie auf Reibkorrosion (Fretting- Corrosion), korrodierte Kontakte und Steckverbinder sowie Fehler im Crimpwiderstand zurückzuführen.

Tabelle 7-5: Verteilung der Ausfallart bei Steckverbinderkontakten in verschiedenen Zeiträumen

Fehlerart/ Zeitraum [mon]	0-12	12-24	24-36	zu-fällig	syst. Ursache
Connector Disconnect	50%	48%	58%		X
Terminal Open	16,70%	19%	19%		X
Terminal Unseated	9,10%	7%	4%		X
Terminal Bent / Damaged	5,30%	3%	3%		X
Connector Damaged	4,00%	5%	3%		X
Fretting Corrosion	10,30%	11%	8%	X	
Terminal Corrosion	2,50%	5%	4%	X	
Connector Corrosion	1,20%	1%	0%	X	
Terminal Poor Crimp	0,80%	1%	0%	X	
Summe zufälliger Ursachen	14,80%	18,40%	12,20%	X	
Summe systematische Ursachen	85,20%	81,60%	87,80%		X

Um eine Betrachtung der Ausfälle unter Berücksichtigung der erhobenen Daten auf einen Nutzungszeitraum von 15 Jahren zu tätigen, wurden die Daten im ersten Schritt bezüglich ihrer statistischen Aussagefähigkeit untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass eine genügende statistische Aussagefähigkeit der Datenreihen in den Monaten 7 bis 23 gegeben ist. Da die untersuchten Fahrzeuge in diesem Zeitraum mit 1,31 Mio. anfangs und mit 1,20 Mio. im Monat 23 leicht differieren, wurden die Fehlerzahlen auf eine Mio. Fahrzeuge umgerechnet. Ein Beispiel für die statistische Aussage ist für die Summe der systematischen Fehler in Abbildung 7-5 gezeigt.

Abb. 7-5 Beispiel der Verteilungsuntersuchung der Fehlerraten der Summe systematischer Fehler



Als Ergebnis dieser Untersuchung wurden für die Fehlerreihen Standard-Weibullverteilungen bzw. Weibullverteilungen mit 3 Parametern ermittelt.

Als nächste Betrachtung mussten die Fehlerzeiträume, die in den Monaten >23 statistisch nicht aussagefähig sind, auf einen Nutzungszeitraum von 15 Jahren hochgerechnet werden. Dieses ist auch aus dem Grund zweckmäßig, da bei allen Fehlerarten in den letzten betrachteten Monaten keine Fehler mehr berichtet wurden. Da die Standardfehlerkurve bzw. Lebensdauerkurve zum Ende der Nutzung allgemein wieder ansteigt und diesbezüglich keine Felddaten zur Auswertung vorliegen, einigte sich der Expertenkreis darauf, die Fehlerkurve symmetrisch zu betrachten und damit die Fortrechnung auf den halben Nutzungszeitraum von 7,5 Jahren (90 Monate) zu beschränken.

Da die betrachteten Fehlerdaten bezüglich einer einfachen Weibullverteilung (Abbildung 7-6) eine genügend große Konfidenz ausweisen, wurde die Fehlerfortschreibung auf Basis einer linearen Regression im einfachen Weibullnetz getätigt. Ein Beispiel dafür ist in Abbildung 7-7 gezeigt. Diese Information wird hier dazu verwendet, die Prozessparameter für den FIDES festzulegen.

Abb. 7-6 Weibullverteilungen der betrachteten Fehler systematischer Ursachen und zufälligen Fehler in den Monaten 7 bis 23

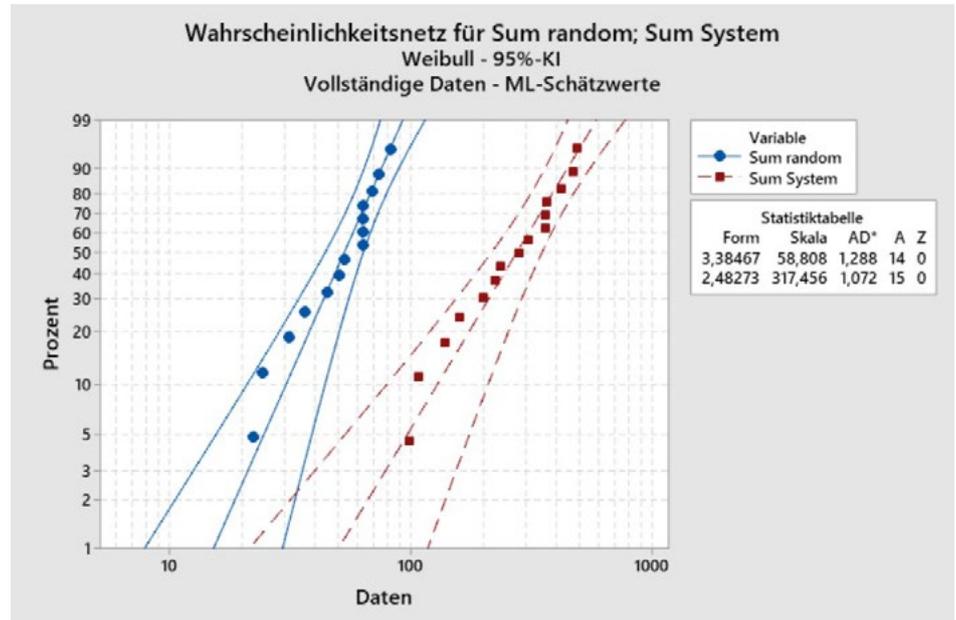
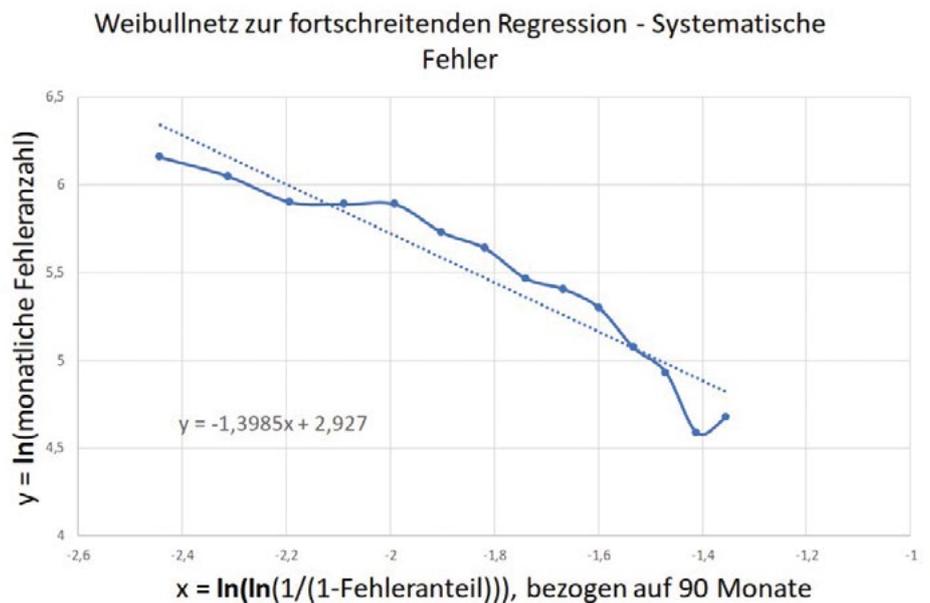
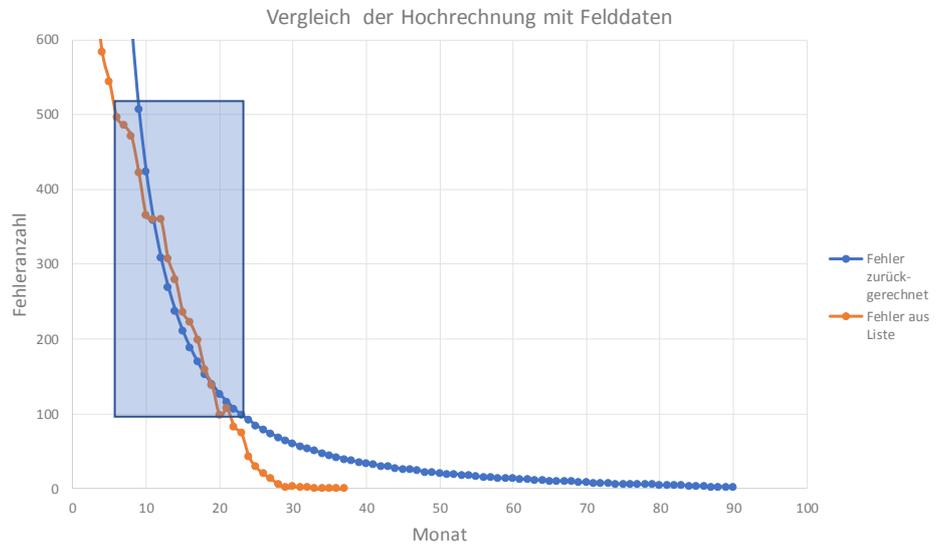


Abb. 7-7 Ermittlung der Regressionsgeraden in den Monaten 7 bis 23 zur Fehlerfortpflanzung auf 90 Monate



Ein Vergleich der Fehlerraten mit der errechneten Fortschreibung der Fehler bis zum Monat 90 ist exemplarisch für die systematischen Fehler in Abbildung 7-8 ersichtlich.

Abb. 7-8 Verlauf der hochgerechneten Fehler im Vergleich zu den erfassten Ist-Fehlern am Beispiel der Fehler systematischer Ursachen; der Rahmen spiegelt den Bereich der verwendeten Daten für die Approximation wider



Die Werte der Fehler für die Fortschreibungen wurden ganzzahlig gerundet und jeweils für die Fehlerartengruppen "Connector Disconnect"; "Terminal Open" + "Terminal Unseated" = "Sum Terminal Open/Unseated"; "Terminal Bent/Damaged" + "Connector Damaged" = "Sum Damaged"; "Fretting Korrosion" und "Terminal Korrosion" + "Connector Korrosion" + "Terminal Poor Crimp" = "Sum Random Time" einzeln wie beschrieben berechnet. Im Weiteren wurden die Ausfälle systematischer Ursachen und zufälligen Ursachen entsprechend Tabelle 7-5 aufsummiert.

Die Stichprobe selbst wird auf den Anteil eingeschränkt, der den Zeitraum eines halben Kalenderjahres (6 Monate) überlebt hat. Diese Einschränkung soll dem Anteil der Ausfälle systematischer Ursachen Rechnung tragen, um so eine Aussage über die tatsächlichen zufälligen Hardware Ausfälle (in Analogie zu den Ausfällen zufälliger Ursache) treffen zu können (analog dem Vorgehen eines „proven in use“ nach ISO 26262 [1]). Dieses ist auch notwendig, da die statistische Aussagefähigkeit für die ersten 6 Monate nicht gegeben war und resultiert aus der Annahme, dass in den ersten Monaten sich die Ausfälle allgemein als Sofortausfälle darstellen. Unter den Randbedingungen der betrachteten 1 Mio. Fahrzeuge, den verbleibenden 84 Monaten, den 39,25 durchschnittlichen monatlichen Betriebsstunden und einer Ausrüstung von durchschnittlich 2000 Kontakten per Fahrzeug ergeben sich die Ausfallraten gemäß Tabelle 7-6.

Tabelle 7-6 Ausfallraten je Fehlergruppe

Basisdaten ohne Monate 1-6		Connector Disconnect	Sum Terminal Open/Unseated	Sum Damaged	Summe systematische Ursachen	Fretting Corrosion	Sum Random Time	Summe zufällige Fehler
Summe Fehler Monat 7-90		3327	1748	628	5703	749	408	1157
nur auf Betriebsstunden gerechnet	Fit-Rate	0,505	0,265	0,095	0,865	0,114	0,062	0,175

Mit der Ausfallrate von 0,865 FIT für die Summe der Fehler systematischer Ursachen und 0,175 FIT für die zufälligen Fehler erhält man eine Gesamtausfallrate von 1,04 FIT bezogen auf einen Kontaktdurchgang. Der Anteil „zufällig“ zu „gesamt“ beträgt dabei 1 zu 5,94. Dieser Wert wird hier dazu verwendet, die Prozessparameter für den FIDES zu bestimmen. Somit wird das Produkt aus Π_{PM} und $\Pi_{Process}$ auf einen Wert von 5,94 festgelegt.

Diese beobachtete Ausfallrate ist für alle in den Fahrzeugen verbauten Arten von Steckkontakten gültig. Sie stellt allerdings nicht die Basis-Ausfallrate dar, da hier prozesstechnische Einflüsse (systematische Fehler) enthalten sind.

Für die Bewertung der Basisausfallrate wird der FIDES zu Grunde gelegt. Dieser sieht eine Multiplikation von $\lambda_{0,physical}$ (in der die Basis-Ausfallrate eine Bemessungsgröße ist) der Prozessparameter Π_{PM} und $\Pi_{Process}$ vor. Die in der Stichprobe erfassten Fahrzeug eines „Premium“ Herstellers werden mit den in den Anforderungen aus Kapitel 7.2.4 umgesetzten Maßnahmen in der Automobilbranche als „Standard-Prozess“ geführt. Der FIDES Standard sieht für diesen Fall die Default-Werte zur Prozessbetrachtung mit $\Pi_{PM} = 1,6$ und $\Pi_{Process} = 4$, sowie deren Produkt von 6,4 vor, womit er ca. 8% über den tatsächlich errechneten Wert von 5,94 liegt.

Die physikalische Ausfallrate für Steckkontakte entspricht dem Wert der zufälligen Fehler rate und ist mit

$$\lambda_{0,physical} = 0,175 \text{ FIT}$$

gegeben. Mit den minimalen und maximalen Ausprägungen der Prozessparameter Π_{PM} und $\Pi_{Process}$ nach FIDES [5] ergibt sich für einen Kontakt mit Sn-Oberfläche im Signalstrombereich eine Streuung in der Bandbreite von $0,5 * 0,175 \text{ FIT} = 0,088 \text{ FIT}$ bis $16 * 0,175 \text{ FIT} = 2,80 \text{ FIT}$ für die mögliche resultierende Ausfallrate (=Ausfallhäufigkeit pro Betriebsstunde).

Der Wert des $\lambda_{0,physical} = 0,175 \text{ FIT}$ wird zunächst mit der Basis-Ausfallrate λ_0 gleichgesetzt. Die Berücksichtigung von Designmaßnahmen und ihres Einflusses auf das $\lambda_{0,physical}$ wird im nächsten Kapitel untersucht, um so eine geeignete Berechnungsvorschrift entwickeln zu können.

7.2.7 Einflussfaktoren auf die Ausfallrate

Die Angabe einer eindeutigen Skalierung für die Berücksichtigung des Einflusses weiterer Maßnahmen oder dem Entfall von Maßnahmen auf die Ausfallrate auf Basis der vorliegenden Daten zur Feldbeobachtung ist derzeit nicht möglich.

Daher werden zu den Maßnahmen relevante Modelle aus der Literatur herangezogen, um den Einfluss auf die Ausfallrate spezifisch zu bewerten. Desweiteren werden langjährige Erfahrungen im Test und den Applikationen in die Bemessung der Faktoren mit einbezogen.

Qualifikationsstrom

Für die Anwendung eines reduzierten Derating-Faktors von standardmäßig 0,8 auf 0,6 kann man im Zusammenhang mit der Umgebungstemperaturobergrenze von 125 °C einen temperaturabhängigen Alterungsmechanismus nach Arrhenius betrachten.

Dabei sind zwei mögliche Degradationen am Kontakt, die Relaxation der Feder und die Alterung der Kontaktschicht, zu betrachten, die indirekt einen Einfluss auf die Konstanz des Durchgangswiderstandes ausüben können. Die Relaxation des Federwerkstoffes und damit das Nachlassen der Kontaktnormalkraft ist dabei stärker temperaturabhängig als die Alterung der Beschichtung. Wenn bei der Qualifikation der Kontakt mit der Lagerung bei der jeweiligen Qualifikationstemperatur die Aufrechterhaltung der Normalkraft nachgewiesen hat, so wird diese Eigenschaft bei einer nur um ca. 20 K geringeren Arbeitstemperatur zeitlich mit dem Faktor >10 sehr lange gegeben sein. Bei den Kontaktschichten ist diese Temperaturabhängigkeit nicht so stark ausgeprägt. Stärkere Degradationen finden in der

Regel erst bei Änderungen der Alterungseffekte außerhalb des Arbeitstemperaturbereiches statt. Bei der Anwendung der Arrhenius-Gleichung für eine beschleunigte Alterung mit einem Beschleunigungsfaktor von:

$$AF = e^{\frac{E_a}{k_B} \left(\frac{1}{T_{Use}} - \frac{1}{T_{Test}} \right)}$$

- k_B - Boltzmannkonstante
- T_{Use} - Ist-Temperatur in Applikation
- T_{Test} - Temperatur im Qualifikationstest
- E_a - Aktivierungsenergie

lassen sich mit der Kenntnis, dass die Temperaturerhöhung mit dem Quadrat des Stromflusses einher geht, temperatur- und stromabhängige Zeitfenster berechnen. Mit den Erwärmungen entsprechend dem Quadrat der Sicherheitsfaktoren zum Stromfluss, mit 0,6 bzw. 0,8, kann unter zu Hilfenahme von Werten der Aktivierungsenergie aus der Literatur [20], [21] ein Beschleunigungsfaktor – oder invers dazu ein Verbesserungsfaktor der Ausfallrate – berechnet werden.

Mit der Abhängigkeit, dass die strombehaftete Erwärmung quadratisch vom Strom abhängig ist:

$$\Delta T_E \sim P_{el} \sim I^2$$

und der Derating-Faktor α_{DS} den Strom wie folgt begrenzt:

$$I_B = \alpha_{DS} \cdot I_{Test} \quad \text{mit} \quad \alpha_{DS} = 0,8$$

ergibt sich die Temperaturerhöhung auf Betriebstemperatur im Einsatz zu:

$$\Delta T_B \sim I_B^2 \sim \alpha_{DS}^2 \cdot I_{Test}^2 = \alpha_{DS}^2 \cdot \Delta T_{Test}$$

und bei einem erhöhten Derating-Faktor mit $\alpha_{DE} = 0,6$ zu:

$$\Delta T_{BE} = \alpha_{DE}^2 \cdot \Delta T_{Test}$$

und damit gilt:

$$\frac{\Delta T_B}{\alpha_D^2} = \frac{\Delta T_{BE}}{\alpha_{DE}^2}$$

$$\Delta T_B, \Delta T_{BE}$$

Erwärmungstemperaturen bei verschiedenen Deratingfaktoren

- α_D, α_{DE} - Deratingfaktoren des Betriebsstromes
- T_U - absolute Umgebungstemperatur
- P_{el} - elektrische Verlustleistung des Kontaktpaares
- I_B - Betriebsstrom

Der Beschleunigungsfaktor und damit der Verbesserungsfaktor werden nun nach:

$$AF = e^{\frac{E_a}{k_B} \left(\frac{1}{T_U + \Delta T_{BE}} - \frac{1}{T_U + \Delta T_B} \right)}$$

bzw.

$$AF = e^{\frac{E_a}{k_B} \left(\frac{1}{T_U + \Delta T_B \cdot \frac{\alpha_{DE}^2}{\alpha_D^2}} - \frac{1}{T_U + \Delta T_B} \right)}$$

bestimmt. Die errechneten Verbesserungsfaktoren für den üblichen Arbeitsbereich der betrachteten Kontakte sind in der Tabelle 7-7 gelistet.

Tabelle 7-7 Errechnete Verbesserungsfaktoren in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur und Stromerwärmung bei einer Aktivierungsenergie von 0,51 eV

	$\Delta T_B / K$					
$T_U / ^\circ C$	10	20	30	40	50	60
85	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,4
105	0,8	0,7	0,6	0,5	0,5	0,4
125	0,9	0,7	0,6	0,6	0,5	0,5
150	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,5
qu-Mittelw.	0,8	0,7	0,6	0,6	0,5	0,4

Bei der Anwendung einer Stromerwärmung im Bereich von 10 K bis 60 K bei Umgebungstemperaturen von 85 °C bis 150 °C errechnen sich entsprechend der Sicherheitsfaktoren die Verbesserungsfaktoren je nach Aktivierungsenergie von 0,45 eV bis 0,60 eV (Literatur) gemittelt zu:

Tabelle 7-8 Festgelegte Verbesserungsfaktoren in Abhängigkeit der Aktivierungsenergie pro eV

E_a/eV	Faktor
0,45	0,6
0,50	0,6
0,55	0,6
0,60	0,5

Der Expertenkreis hat sich mit der $E_a = 0,51$ eV aus [21] und einem Derating-Faktor von 0,6 statt von 0,8 nach ZVEI TLF-0214 [16] auf eine Verbesserung der Ausfallrate um den Faktor 0,6 bei Verringerung der Arbeitstemperatur um 30 K bis 40 K geeinigt.

Kontaktart

Viele Kontakte, insbesondere solche die zur Verbindung von Signal- und Informationswegen Verwendung finden, werden in den Applikationen nicht für den eigentlichen Strom- oder Energietransport genutzt. Die Ströme liegen bei diesen Applikationen in der Regel im mA-Bereich, womit eine Stromerwärmung über die Umgebungstemperatur durch den eigenen Betrieb nicht gegeben ist. Wenn benachbarte Kontakte jedoch Strom führen und sich erwärmen, werden diese Kontakte indirekt eine Temperaturerhöhung erfahren. Diese Temperaturerhöhung wird aber nicht im selben Bereich wie bei den Lastkontakten liegen. Aufgrund dieser Gegebenheit können diese Art der „Signal“-Kontakte generell als Kontakte mit dem Verbesserungsfaktor 0,6 betrachtet werden.

Maßnahme Einzeladerabdichtung für Kontakte im Fahrzeuginnenraum

Das Thema Vibration gestaltet sich aus Thematiken des Verbaus der Steckverbinder in der Applikation, der realen Schwingungsbelastung und der Resonanzen schwierig. Verschiedene Veröffentlichungen berufen sich auf die schon sehr alten Formalismen der beschleunigten „Alterung“ nach [22] zu:

$$AF = \frac{t_{Use}}{t_{Test}} = \left(\frac{g_{Test}}{g_{Use}}\right)^\gamma$$

$t_{Use/Test}$ - Lifetime - Werte

g_{Use} - Ist-Beschleunigung in Applikation

g_{Test} - Beschleunigung im Qualifikationstest

γ - Vibrationsexponent

wobei g_{xy} die gemittelten effektiven Beschleunigungen beinhalten. Rahmenbedingung für die Expertenmeinung war, dass die Verwendung einer Einzeladerabdichtung per Erfahrung eine Verbesserung der Vibrationsbeständigkeit bedeutet. Entsprechende Tests von gleichen Kontakten mit und ohne Einzeladerabdichtung zeigen, dass die einzeladergedichteten Kontakte den Schärfegrad L2 in der Vibration erfüllen, wohin gegen dieses in der ungedichteten Ausführung meist nicht gegeben ist und mindestens nur der L1 bestanden wird. Eine Erklärung dieses Effektes ist die Wirkung des Dichtelementes als Dämpfungsglied, womit die über die Leitung eingetragenen Vibrationen zum Kontaktpunkt hin gedämpft werden. Die Dichtwirkung wird dabei nicht betrachtet.

Mit dieser Kenntnis und der Annahme der erhöhten Dämpfung kann man mit einem Gamma von 2,5 (2 – 3,3, siehe [22]) und den mittleren Beschleunigungen der ZVEI TLF 0214 PG17, Level 1 (19,7m/s²) zu Level 2 (27,8 m/s²) einen Verbesserungsfaktor der Ausfallrate errechnen, der dann bei 0,42 liegen würde. Die Experten schlagen für die Maßnahme Einzeladerabdichtung in Bereichen, in denen keine Dichtheitsanforderungen bestehen den Verbesserungsfaktor 0,5 vor.

Maßnahme Silber als Kontaktoberfläche

Bei der Betrachtung von Silber als Kontaktoberfläche im Vergleich zu Zinn sind sich die Experten einig, dass Silber Vorteile und damit eine Verbesserung der Ausfallrate bietet. Die kontaktphysikalischen Gründe dafür sind, dass Silber im Gegensatz zu Zinn nicht zu Fretting-Korrosion neigt und Silber bei erhöhten Temperaturen sich als beständiger erweist und nicht zu Degradationen in Folge von Diffusionseffekten neigt, womit eine Stabilität des Kontaktwiderstandes einher geht. Der Vorgänger der ZVEI TLF 0214 [16], die AK Prüfrichtlinie von 1996 [18], stützt diese Eigenschaft mit den erlaubten Widerstandserhöhungen nach Testende im Vergleich zu Zinn. Basierend auf der UTE C 80-810, July 2000 [19], Kapitel Connectors, wird die Fehlerrate mit den Faktor 2 bei Silber und den Faktor 3 bei Zinn unterschieden. Damit kann prinzipiell ein Verbesserungsfaktor von 0,66 abgeleitet werden. Die Experten einigen sich auf den Wert von 0,7, also Faktor 0,7 bezogen auf die Basis-Ausfallrate aus Kapitel 7.2.6 für Silberkontakte.

7.2.8 Tabellen und Berechnungsformeln

Die sich aus den Betrachtungen bestimmten Einflussfaktoren auf die Ausfallraten sind in der Tabelle 7-9 als Rating-Faktoren Π_{RF} dargestellt. Als Ausgangsbasis dient dabei der Signalkontakt mit einer Zinnoberfläche mit dem Faktor 1 bezogen auf die Basis-Ausfallrate. Grundlage dieser Basis ist, dass die überwiegende Mehrheit im Fahrzeug verbauten Kontakte als Signalkontakte wenig bestromt und damit ohne Stromerwärmung vorliegen und die Errechnung der physikalischen Ausfallrate sich auf ein Fahrzeug im Feldversuch mit nur anteilig höher bestromten Kontakten bezieht. Demzufolge spiegeln die Signalkontakte in erster Linie den Feldtest wider.

Tabelle 7-9: Rating-Faktoren Steckkontakte

Rating-Faktoren Π_{RF}				
Kontaktteil	Einsatzbedingungen			
Funktionsoberfläche	elektrische Funktion	Strombelastung	ohne Dichtung	mit Dichtung
Zinn	Energieübertragung	Standard Derating (Faktor 0,8)	1,67	0,84
		Reduziertes Derating (Faktor 0,6)	1	0,5
	Signalstrom	nicht relevant		
Silber	Energieübertragung	Standard Derating (Faktor 0,8)	1,17	0,58
		Reduziertes Derating (Faktor 0,6)	0,7	0,35
	Signalstrom	nicht relevant		

Je nachdem ob der Kontakt als Signalkontakt, Silberkontakt, gedichtet oder zusätzliches Derating angewendet wird, errechnet sich aus der Kombination der Faktoren der Verbesserungsfaktor.

$$\lambda_{0,physical} = 0,175 \text{ FIT} * \Pi_{RF}$$

Die sich aus den Maßnahmen errechneten applikationsspezifischen Ausfallraten $\lambda_{0,physical}$ sind in Tabelle 7-10 dargestellt.

Tabelle 7-10: Applikationsspezifische, physikalische FIT Basisraten für Steckkontakte

applikationsspezifische FIT-Basisraten für $\lambda_{0,physical} = 0,175$				
Kontaktteil	Einsatzbedingungen			
Funktions- oberfläche	elektrische Funktion	Strombelastung	ohne Dichtung	mit Dichtung
Zinn	Energie- übertragung	Standard Derating (Faktor 0,8)	0,29	0,15
		Reduziertes Derating (Faktor 0,6)	0,18	0,09
	Signalstrom	nicht relevant		
Silber	Energie- übertragung	Standard Derating (Faktor 0,8)	0,20	0,10
		Reduziertes Derating (Faktor 0,6)	0,12	0,06
	Signalstrom	nicht relevant		

Mit der Betrachtung der Prozessfaktoren ergibt sich dann ein Bereich der resultierenden Ausfallraten gemäß der folgenden Formel:

$$\lambda_0 = \lambda_{0,physical} * \prod_{PM} * \prod_{Process}$$

oder nach Tabelle 7-11.

Tabelle 7-11 Resultierende Ausfallraten für Steckkontakte

resultierende FIT-Raten für $\pi_{PM} * \pi_{Process} = 0,50_{Min} / = 5,94_{DEF} / = 16,0_{MAX}$								
Kontaktteil	Einsatzbedingungen							
	Funktions- oberfläche	elektrische Funktion	Strom- belastung	ohne Dichtung			mit Dichtung	
MIN				DEF	MAX	MIN	DEF	MAX
Zinn	Energie- übertragung	Standard Derating (Faktor 0,8)	0,15	1,73	4,67	0,07	0,87	2,33
		Reduziertes Derating (Faktor 0,6)	0,09	1,04	2,80	0,04	0,52	1,40
	Signalstrom	nicht relevant						
Silber	elektrische Funktion	Standard Derating (Faktor 0,8)	0,10	1,21	3,27	0,05	0,61	1,63
	Energie- übertragung	Reduziertes Derating (Faktor 0,6)	0,6	0,73	1,96	0,03	0,36	0,98
	Signalstrom	nicht relevant						

Werden beispielsweise bei einem Powerstecker drei Maßnahmen zu einer Anwendung eines gedichteten Silberkontakts im Fahrzeuginnenraum, mit der Stromdimensionierung nach Derating-Kurve mit „Reduziertes Derating 60%“ kombiniert, so erhält man auf ein $\lambda_{0,physical} = 0,36$ FIT und bei Berücksichtigung der Prozessfaktoren eine resultierende Ausfallrate im Bereich von 0,03 FIT bis 0,98 FIT.

Die Fehler nach Tabelle 7-5 lassen sich alle in die Ausfallart „Durchgangswiderstand über dem spezifizierten Wert“ zusammenfassen. Kurzschluss effekte (eine Reduzierung des Isolationswiderstands unter einen Schwellwert) konnten nicht nachgewiesen werden. Damit ergibt sich die Verteilung der Ausfallarten nach Tabelle 7-12:

Tabelle 7-12 Ausfallarten für Steckkontakte

Nr.	Ausfallart	Verteilung
1	Durchgangswiderstand über dem spezifizierten Wert („open“)	100%
2	Kurzschluss effekte („short“)	0%

7.3 Passive Elektrische Sicherungen

7.3.1 Beschreibung der Funktionsbaugruppe (Bauteil oder Baugruppe)

Für die Untersuchungen der Sicherungen wurden die in Abbildung 7-9 und Abbildung 7-10 beispielhaft dargestellten Sicherung und Sicherungshalter Kombinationen verwendet.

Abb. 7-9 Verwendeter Testhalter für die SF36 mit dem CTI Faktor 86 E-6/K und Quetschkabelschuhen

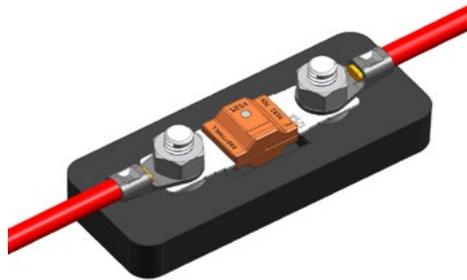
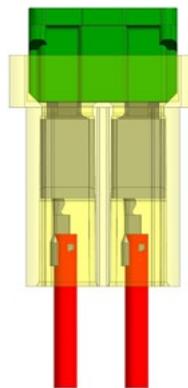


Abb. 7-10 Verwendeter Sicherungshalter 1 polig mit 6,3mm Crimp-Kastenkontakt



Die Systemgrenzen der Funktionsbaugruppe Sicherung sind in Abbildung 7-11 zu sehen. Alle Bereiche innerhalb der gestrichelten Linie werden in den folgenden Erwartungswerten berücksichtigt. Weitere Einflussfaktoren von Komponenten wie Leitung (siehe Kapitel 7.1) oder Verbindungen (siehe Kapitel 7.2) sind entsprechend aus den anderen Kapiteln zu beziehen.

Die Darstellungen gelten für gängige Crimp-Kontaktsysteme als auch für Varianten deren Eingangsseite geclincht oder geschweißt und auf eine Strombrücke aufgebracht ist.

Abbildung 7-11 Systemgrenzen für die Sicherung

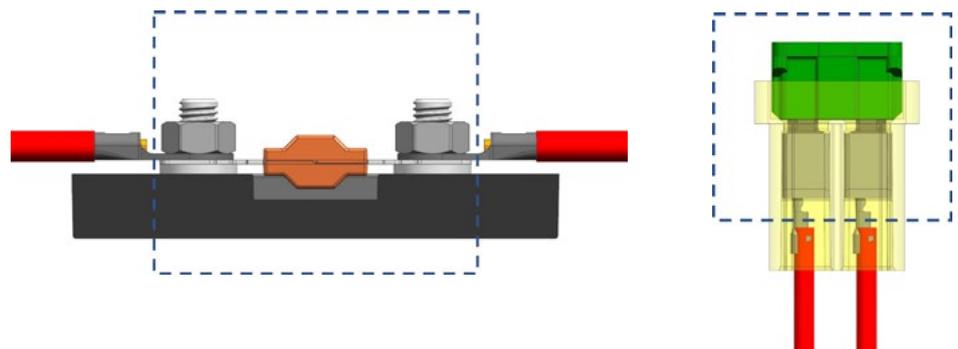
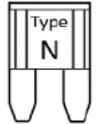
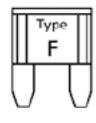
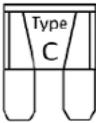
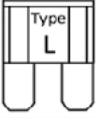
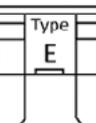


Tabelle 7-13 gibt einen Überblick über die gängigsten Sicherungstypen (Einteilung gemäß [7], [8], [9], [10], [11] und [12]), welche in der Automobil-Bordnetz Umgebung Verwendung finden. Tabelle 7-14 enthält den Ausschnitt aller Sicherungstypen im Geltungsbereich dieses Dokuments. Die wichtigsten technischen Daten sind in dieser Tabelle dargestellt.

Weitere Axial-Terminal-Sicherungstypen mit gleichen elektrischen Eigenschaften aber abweichenden Abmessungen (z.B. Lochabstände) gehören auch zum Geltungsbereich dieses Dokumentes.

Tabelle 7-13 Überblick über gängige Automobil-Sicherungen

Fuse Type	Standard ISO	Terminal Size	ISO Type	Picture	Fast/Slow Acting	Fuse Ratings	Max. Voltage	Max. Int. Current	Ambient Temperature	Fuse Material Plating	Fuse Material
Blade Type	8820-3 8820-10/11 8820-12/13	2.8 mm	N		F	5A - 30A	32 V	1000 A	-40 °C to +125 °C	Ag	Zn
			F		F	2A - 30A	32 V	1000 A	-40 °C to +125 °C	Ag	Zn
									-40 °C to +105 °C	Sn	
			6.3 mm	C		F	1A - 40A	32 V	1000 A	-40 °C to +125 °C	Ag
		L			S	20A - 60A	32 V	1000 A	-40 °C to +125 °C	Ag	Zn
			-40 °C to +105 °C						Sn		
		8 mm	E		S	20A - 80A	32 V	1000 A	-40 °C to +125 °C	Ag	Zn
									-40 °C to +105 °C	Sn	
Female Contacts	8820-4	2.8 mm to 6.3 mm			S	15A - 60A	32 V	1000 A	-40 °C to +125 °C	na	Cu Alloy
		6.3 mm	A1S		S	20A - 60A	32 V	1000 A	-40 °C to +125 °C	na	Cu Alloy
		6.3 mm	A1S		S	20A - 60A	32 V	1000 A	-40 °C to +125 °C	na	Cu Alloy

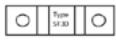
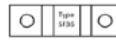
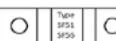
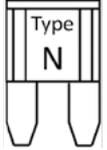
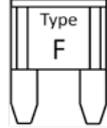
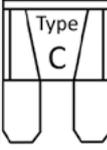
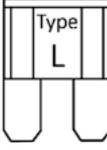
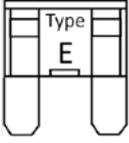
Fuse Type	Standard ISO	Terminal Size	ISO Type	Picture	Fast/Slow Acting	Fuse Ratings	Max. Voltage	Max. Int. Current	Ambient Temperature	Fuse Material Plating	Fuse Material
Axial Terminals SF 30/ SF 51	8820-5	M5/M6	SF30		S	30A - 200A	32 V	1000 A	-40 °C to + 125 °C	Sn	Cu Alloy
		M8	SF51		S	80A - 500A	32 V	2000 A	-40 °C to + 125 °C	Sn	Cu Alloy
Axial Terminals SF 36/ SF 51/56	20934	M6	SF36		S	30A - 200A	70 V	2500	-40 °C to + 125 °C	Sn	Cu Alloy
		M8	SF51/56		S	80A - 500A	70 V	2500	-40 °C to + 125 °C	Sn	Cu Alloy

Tabelle 7-14 Überblick über die Sicherungen für die dieses Dokuments gilt

lfd. Nummer	Fuse Type	Standard ISO	Kontakt	ISO Typ	Bild	Fast/Slow Acting	Fuse Ratings	Max. Voltage	Max. Int. Current
1	Blade Type	8820-12	2.8 mm	N		F	5A - 30A	32 V	1000A
2	Blade Type	8820-3	2.8 mm	F		F	2A - 30A	32 V	1000A
3	Blade Type	8820-3	6.3 mm	C		F	1A - 40A	32 V	1000A
4	Blade Type	8820-10	6.3 mm	L		S	20A - 60A	32 V	1000A
5	Blade Type Blade Type	8820-3	8 mm	E		S	20A - 80A	32 V	1000A
6	Axial Terminals SF30	8820-5	M5/M6	SF30		S	23A - 200A	32 V	2000A
7	Axial Terminals SF51	8820-5	M6/M8	SF51		S	60A - 500A	32 V	2000A
8	Axial Terminals SF36	20934	M6	SF36		S	30A - 200A	70 V	2500A
9	Axial Terminals SFSF51/56	20934	M8	SF51/56		S	60A - 500A	70 V	2500A

7.3.2 Genaue Beschreibung der Verwendungsart (Use Case)

Sicherungen schützen den Leitungssatz vor Beschädigungen durch Überstrom. Bei den betrachteten Sicherungen handelt es sich um stromempfindliche Bauteile, die als definierte Schwachstelle im Stromkreis fungieren sollen. Überschreitet der Strom für eine bestimmte Zeit einen bestimmten Wert, schmilzt das Sicherungselement absichtlich und unterbricht dadurch den Stromfluss im Stromkreis.

Es ist wichtig, eine geeignete Sicherung für den Stromkreis auszuwählen, um die Funktionalität unter normalen Bedingungen sowie einen optimalen Schutz des Leitungssatzes gegen Überlastströme zu gewährleisten. Die Sicherung, wenn diese richtig ausgewählt wurde:

- a) unterbricht erst nach Auftreten der Störung.
- b) unterbricht, bevor die Isolierung des Leitungssatzes oder der Kontakt beschädigt wird (abhängig von Sicherungstyp/wert).
- c) wird nach Beseitigung des Fehlers im Stromkreis durch eine neue Sicherung gleichen Werts ersetzt, um die Funktionsfähigkeit des betroffenen Stromkreises wiederherzustellen.

Ein Überstrom ist ein Strom, der unter normalen Betriebsbedingungen die im System definierte Stromstärke überschreitet. Der Begriff "Überstrom" umfasst sowohl Überlastungen als auch Kurzschlüsse.

7.3.3 Einzuhaltende Eigenschaften der Funktionsbaugruppe

Tabelle 7-15 Überblick über die einzuhaltenden Eigenschaften der Sicherungen

	Haupteigenschaften, die einzuhalten sind	Blade	Axial Terminals
1	Basis Material Kupfer oder Zink	Zink / Kupfer	Kupferlegierung
2	Oberflächenbeschichtung Zinn, Nickel, Silber oder keine Beschichtung	Silber oder Zinn	Silber, Zinn, Nickel oder keine Beschichtung
3	Gehäuse Material Unterschiedliche Materialien Schmelztemperatur	> 200°C	> 200°C
4	Wöhler Kurve als Ersatz für einen Temperatur Zyklus Test	Nicht anwendbar	Erfüllung der Amplituden/ Zykluszahl
5	Impulsfestigkeit	ISO Norm	ISO Norm
6	Umgebungstemperatur Einsatzbereich des Bauteils	-40°C - 125°C	-40°C - 125°C
7	Sicherungseinsatz einteilig, mehrteilig, verlötet	einteilig / mehnteilig	einteilig / mehrteilig
8	Sicherungsgehäuse einteilig, mehrteilig, vernietet, verschweißt	einteilig, mehrteilig	Zweiteilig, vernietet, verschweißt, gecrimpt
9	Sicherungselement-Design gerade, S-U-Form	S/U Form	S/U Form
10	Kontaktierung Flachstecker, Flachkontakt, Kabelschuh	siehe Ausführungen unterhalb dieser Tabelle	siehe Ausführungen unterhalb dieser Tabelle

Haupteigenschaften, die einzuhalten sind		Blade	Axial Terminals
11	Sicherungshalter Expansionsfaktor trockenem Zustand	Wird nicht berücksichtigt	Zu berücksichtigen bei der Wöhlerkurve
12	Alterungsfaktoren Zinndotierung Kupfer / Zink nur Zink	ohne Einschränkung	Kupfer mit Zinndotierung
13	Test Specification: ISO; LV; JASO usw.	ISO 8820- 1/2/3/10/13	ISO 8820-5 ISO 20934

Kontaktpaarungen

Bei der Aussage zur Zuverlässigkeit einer Sicherung im Fahrzeug-Bordnetz sind die Schnittstellen zur Umgebung relevant. Insbesondere die elektrische Kontaktierung von Stecksicherungen hat Einfluss auf die Performance und Lebensdauer des Bauteils und somit auf die Funktion.

Neben der primären Funktion der elektrischen Kontaktierung – Übertragung der Energie zum und vom Bauteil – existieren weitere Koppelmechanismen, z. B. thermische Leitung, mechanische Verbindung und damit möglicher Eintrag von Schwingungen sowie statischen Kräften auf das Bauteil. Im Unterschied zu klassischen Stecker-Buchse-Verbindungen müssen bei der Auslegung der elektrischen Kontaktierung der Schmelzsicherung daher zusätzliche Effekte berücksichtigt werden.

Die meisten im Markt befindlichen Kontaktsysteme wurden für entsprechende Kontaktpartner (Stecker oder Stifte mit eindeutiger Definition von Geometrie und Funktionsoberfläche) entwickelt und bestehen aus Legierungen mit hohem bis fast ausschließlichem Kupferanteil. Viele dieser Kontaktvarianten werden aber auch mit den hier beschriebenen Stecksicherungen eingesetzt.

Jede dieser Konstellationen muss in der Anwendung stets geprüft und freigegeben werden, da es durch die Sicherung zu einem erhöhten Wärmeeintrag in die Steckerverbindung kommen kann.

Die Kontakte zur Kontaktierung von Sicherungen können in unterschiedliche Kategorien eingeordnet werden. Die Hauptunterschiede sind sowohl konstruktiver als auch material-spezifischer Natur.

Hierbei sind folgende konstruktive Unterschiede zu nennen wie:

- Kastenkontakte mit und ohne Stahlüberfederunterstützung zum Leitungsabgang
- Gabelkontakte i.d.R. ohne Stahlüberfederunterstützung zum Stromschienenanschluss

Bei der Materialauswahl der Kontaktteile sind Unterschiede zu finden bei den:

- Leitwerten und Relaxationseigenschaften sowie bei den
- Beschichtungen wie Zinn, Silber, Gold sowie blanke Oberflächen und damit möglichen Paarungen mit entsprechenden Temperatur- und Reibkorrosionseigenschaften.

Eine besondere Eigenschaft der Sicherung ist der ohmsche Widerstand und die damit entstehende Verlustleistung. Diese wird in Wärme umgesetzt was letztendlich für das sichere Abschaltverhalten der Sicherung bei bestimmtem Überströmen auch erwünscht ist. Diese Wärme kann aber auch einen negativen Einfluss auf den Kontaktwiderstand und die Kontaktalterung nehmen (z. B. nachlassende Normalkraft durch Relaxation der Kontaktbuchse). Die Normalkraft zwischen Kontaktstecker und Kontaktbuchse an den Kontaktpunkten ist notwendig für ein gutes elektrisches Verhalten der Steckverbindung.

Stecksicherungen

Stecksicherungen bestehen i.d.R. aus einem Zinkmaterial oder Kupfermaterial mit einer Zinn- oder Silberbeschichtung. Insbesondere Zinksicherungen können bei hohen Temperaturen und langen Lastzeiten zwei typische Verhaltensweise aufzeigen:

1. Flächenpressung in der Kontaktzone (quasistatische mechanische Belastung)

Bei dem in der Schmelzsicherung verwendeten Zn-Basismaterial kann es zu einem Setzverhalten kommen; d.h. hier verringert sich die Dicke des Flachsteck-Anschlusses der Sicherung im Kontaktbereich (nachlassende Normalkraft durch Setzverhalten am Kontaktstecker). Dies ist eine Folge der Flächenpressung an den Kontaktpunkten (abhängig von Anzahl der Kontaktpunkte und der Normalkraft). Als Resultat verringert sich die Normalkraft und der elektrische/thermischer Widerstand in der Kontaktzone nimmt zu. Wie erwähnt bestehen klassische Fahrzeugkontakte aus einem Cu-Basismaterial, bei dem dieses Phänomen im Unterschied zu Zn nur unbedeutend auftritt.

2. Diffusionsprozesse, bei dem das Zinkmaterial der Sicherung und das Kupfermaterial des Kontaktes die Beschichtungen durchwandern und im Kontaktbereich parasitäre metallische Phasen bilden können. Zusätzlich können sich dabei Kirkendall-Poren ausprägen, die den Kontaktwiderstand verschlechtern.

Diese Verbindung ist teilweise kraftschlüssig und stellt im Normalbetrieb i.d.R. kein Problem dar. Erst bei einem notwendigen Sicherungswechsel kann es zur Beschädigung des verbleibenden Kontaktes führen. Damit wäre eine gute Kontaktierung nach dem Sicherungswechsel nicht mehr zwangsweise gegeben. Über die Lebenserwartung des Kontaktes zwischen der neuen Sicherung und dem möglicherweise vorgeschädigten Sicherungshalter können jedoch keine Aussagen getroffen werden.

Um diesen Effekt zu verhindern hat sich eine Diffusionssperrschicht zwischen dem Basismaterial der Sicherung und/oder des Kontaktes und der kontaktierenden Beschichtung bewährt.

Sicherungen mit Silberoberflächen werden i.d.R. heute schon mit einer Nickelsperrschicht eingesetzt, während Sicherungen mit Zinnoberfläche nicht immer eine Nickelsperrschicht aufweisen.

Als Fazit lässt sich sagen, dass die meisten der heute zur Kontaktierung von Sicherungen im Einsatz verwendeten Sammelschienen- und Leitungskontakte keine nennenswerten Probleme gezeigt haben.

Wichtig ist jedoch, dass die für die beabsichtigte Anwendung genutzten Paarungen in der Applikation zu überprüfen und damit die Funktionsfähigkeit sicherzustellen ist. Dies beinhaltet mechanische, elektrische und materialspezifische Gegebenheiten zu berücksichtigen und zu untersuchen.

Diese Abstimmung ist notwendig, um die Lebensdauer-Anforderungen und -Belastungen (Temperatur, Vibration, etc.) sicherzustellen.

Folgende Maßnahmen am Kontakt/an der Sicherung können die performanten Eigenschaften über Lebensdauer sicherzustellen:

a. Unterdrücken der Diffusion (Zink>Kupfer)

Je nach Einbauraum im Fahrzeug und der damit verbundenen Anforderungen an die Systemtemperaturen sind Sicherungen und Kontakte ohne Sperrschicht in einem Temperaturbereich bis 85°C zu nutzen.

Für höhere Umgebungstemperaturen bis 125°C sind Sicherungen oder Kontakte zwingend mit einer Sperrschicht zu versehen.

b. Minimieren der Auswirkungen des Kriecheffekts

Das gesamte Kontaktsystem ist so auszulegen, dass jeweiligen elektrischen

Übergangswiderstände der Sicherungskontakte (unter Berücksichtigung der Fließeingenschaften des Kontaktpartners Zink in der Sicherung) zu End-Of-Life unter 150 % ihrer Anfangswerte (R0) liegen.

In der Regel geschieht dies durch die konstruktive Gestaltung des Verhaltens der Kontaktnormalkraft über Zeit und Weg in der Kontaktbuchse sowie über die Anzahl der Kontaktpunkte.

c. Verhindern von nicht bestimmungsgemäßem Gebrauch im Feld (Servicefähigkeit)

Ein sachgerechter Sicherungswechsel ist zwingend für die Sicherungsfunktion zu gewährleisten. Eine Abweichung beim Sicherungsnennwert und -hersteller kann zu einem nicht erwartenden Auslösen der Sicherung führen.

Dies kann i.d.R. nur durch einen fachgerechten Servicepartner oder der nicht Zugänglichkeit der Sicherungsbox für den Endkunden erfolgen.

7.3.4 Ausfallrate

Als Basis für die Ermittlung der Ausfallrate wird das FIDES Modell [5] für die Sicherung herangezogen, da sich die unterschiedlichen Einflüsse in diesem Modell einzeln betrachten lassen. Das ursprüngliche FIDES-Modell ist allerdings nicht auf Basis von Sicherungen für die Automobilindustrie entwickelt worden, so dass die zu ermittelten Faktoren bzw. Formeln auf Basis der Ergebnisse zusätzlicher Laborversuche angepasst werden müssen. Das Basis-Modell in [5] bleibt unverändert. Nur die für die Eigenschaften der Automobil-Sicherung relevanten Π -Faktoren werden modifiziert. Für die obengenannten Typen gilt dann wie in den folgenden Kapiteln beschrieben.

7.3.4.1 λ Physical

7.3.4.1.1 Thermoelectrical stress factor

Der Thermo-Elektrischer Stressfaktor ist maßgeblich geprägt von der Temperatur des Schmelzleiters.

Diese setzt sich in der Regel aus der Umgebungstemperatur, der Temperaturerhöhung durch den Stromfluss und zusätzlich aus der in der Sicherungsbox herrschenden Zusatztemperatur zusammen.

Bei Kupfersicherungen mit der Zinndotierung bewirkt die Temperatur ein Wachstum der Intermetallischen Phase im Schmelzleiterbereich, die bei den meisten kupferbasierenden Sicherungen zum Einsatz kommt. Das Wachstum der Intermetallischen Phase bedingt eine Widerstandserhöhung, die das Altern der Sicherung maßgeblich prägt. Damit ist die Temperatur- und Zeitkomponente hier die entscheidende Größe.

Die Diffusionsdicke kann rechnerisch ermittelt werden und dient für die Berechnung des Aktivierungsenergie. Wichtig ist die Tatsache, dass diese Wachstumsberechnung nur im Bereich bis 200°C sinnvoll ist. Entscheidend ist auch die Angabe der max. Dauertemperatur des Schmelzleiters für die zu erwartende Lebensdauer. Diese max. Temperatur des Schmelzleiters ist in der Regel in der Derating-Kurve als max. Grenztemperatur angegeben. Für die Ausfallraten-Berechnung in dieser Stressgruppe wurde die Temperaturerhöhungskurve der Sicherung formeltechnisch eingefügt und dafür der erste Formelanteil mit dem Stromfaktoren auf null gesetzt.

Flachsicherungen Typ F/C/E aus Zink-Material sind ähnlich zu bewerten, haben jedoch nicht zwingend eine Zinndotierung und damit ein anderes Alterungsverhalten. Untersuchungen laufen an der Typ C Flachsicherung und können zu einer veränderten Aktivierungsenergie führen.

$$\Pi_{thermoelectrical} = P_1 \times \left(\frac{1}{0,8} \times \frac{I_{applied}}{I_{rated}} \right)^{P_3} \times e^{P_4 \times P_2 \times \left[\frac{1}{P_5 + 273K} - \frac{1}{(T_{FuseElement} + 273K)} \right]}$$

Tabelle 7-16 Faktoren $\Pi_{\text{thermoelectrical}}$ für Sicherungen

w	Modifiziert gegenüber FIDES [5]	Anmerkung	Werte Axial Type	Werte Blade Type
P_1		Anpassungsfaktor basierend auf thermoelektrischen Ausfällen aus realen Felddaten.	13%	13%
P_2	X	Aktivierungsenergie für die thermisch elektrische Beschleunigung. Bei Schraubsicherungen basierend auf der CuSn-Diffusion (Alterung) und bei Zinksicherungen auf Kornwachstumsstrukturen	0,9 eV	0,9 eV ¹
P_3	X	Statt Stromfaktoren werden die realen Sicherungselementtemperaturen basierend auf den eingegebenen Stromlasten verwendet, welche im rechten Exponenten Bereich als $T_{\text{Fuse-Element}}$ zum Einsatz kommen. Daher wird der Exponent in diesem Teil auf 0 gesetzt.	0	0
P_4	X	1 / Boltzmann Konstante $1/8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$	11604 K/eV	11604 K/eV
P_5	X	Reference Temperatur $T_0 = (20^\circ\text{C } T_{\text{umgebung}} + 60\text{K})$	80°C	80°C
$T_{\text{Fuse-Element}}$	X	Durchschnittliche Dauergebrauchstemperatur des Sicherungsschmelzleiter inkl. Umgebungstemperatur und Eigen Erwärmung der Sicherungsbox	Ergibt sich aus dem Design bzw. muss messtechnisch ermittelt werden [°C].	Ergibt sich aus dem Design bzw. muss messtechnisch ermittelt werden [°C]

¹Die tatsächliche Aktivierungsenergie wurde noch nicht endgültig ermittelt. Bis zur genauen Bestimmung kann der Wert des Axial Type verwendet werden.

7.3.4.1.2 $\Pi_{\text{thermal cycling}}$

Der Thermo-Zyklische-Stressfaktor ist maßgeblich von der Flexibilität der Schmelzleiterkontur und Material der Sicherungshalter und -Dosen geprägt. Ein Temperaturwechsel bei Schraubsicherungen auf ISO Standardhaltern repräsentiert nicht zwangsweise das Verhalten von gängigen Sicherungshaltern und Sicherungsdosen im Markt. Die Sicherungsdosen zeichnen sich durch einen erhöhten thermischen Expansionsfaktor aus, wodurch die Ausdehnung der Kunststoffe durch einen Temperaturwechsel den maßgeblichen Stress auf die verschraubte Sicherung und deren Schmelzleiter ausübt. Hier kann von einem Temperaturbereich (Umgebungstemperatur) der Sicherung zwischen -40°C und 125°C ausgegangen werden. Damit kann die Ausdehnung des zu verwendeten Kunststoffes errechnet werden.

Auch Strombelastungen wirken sich thermisch auf die Schmelzleiter aus und verursachen ebenfalls einen mechanischen Stress.

Das Verhalten des Halters bei einem Temperaturwechsel kann auch relativ einfach über eine Wöhlerkurve (siehe auch Kapitel 7.3.4.1.2.1) überprüft werden.

Hierzu wird die Sicherung in vertikaler Position eingespannt und mit unterschiedlichen Weglängen gezogen bzw. gestaucht. Ziel ist die Anzahl der Zyklen bis zum mechanischen Bruch festzustellen.

Typischerweise sind folgende Amplituden zu testen: 0,05/0,1/0,2/0,3/0,4 mm

Die Ergebnisse können dann in einer klassischen Wöhlerkurve dargestellt werden.

Ein entsprechender Abgleich zwischen dem Verhalten eines typischen Sicherungshalter/-box und den Ergebnissen von Zug/Drucktests (Wöhlerkurve) werden untersucht.

Bei Stecksicherungen erfolgt die Kontaktierung i.d.R. über Flachsteckkontakte, damit werden die Sicherungen nicht wie bei Schraubsicherungen mechanisch fixiert. Hierdurch verringert sich deutlich der Einfluss des Sicherungshalters auf den mechanischen Stress des Sicherungsschmelzleiters. Somit wird der Stress eher durch die Strombelastung und der Umgebungstemperatur verursacht (Temperaturwechsel bzw. Temperaturschock).

$$\Pi_{TCy} = P_6 \times \left(\frac{12 \times N_{\text{annual-cy}}}{t_{\text{annual}}} \right) \times \left(\frac{\min(\theta_{cy,2})}{2} \right)^{P_8} \times \left(\frac{D T_{\text{cycling}}}{P_{10}} \right)^{P_7} \times e^{P_9 \times \left[\frac{1}{273K + 20K + P_{10}} - \frac{1}{(T_{rmax-cyclin,g} + 273)} \right]}$$

Tabelle 7-17 Faktoren Π_{TCy} für Sicherungen

	Modifiziert gegenüber FIDES [5]	Anmerkung	Werte Axial Type	Werte Blade Type
P_6		Anpassungsfaktor basierend auf thermozyklischen Ausfällen aus realen Felddaten.	13%	13%
P_7	X	Exponent für die Temperatur-Zyklus Beschleunigung. Erklärung: Stress-Ermittlung erfolgte für die verschraubte Axial Terminal Sicherung anhand der thermischen Ausdehnung eines typischen Kunststoffhalters. Eine entsprechende Korrelation kann über einen Zug/Drucktest mittels einer Wöhlerkurve dienen.	2,7	2,7 ²
P_8		Exponent für die Dauer	0,33	0,33
P_9		Konstante basiert auf die Aktivierungsenergie von 0,122eV und der Boltzmannkonstante = $8,617 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$ $1414 = 0,122 \text{ eV} / 8,617 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$	1414 K	1414 K
P_{10}		Referenztemperatur Unterschied $T_0 = 20^\circ\text{C } T_{\text{Umgebung}}$	20 K	20 K
$(12 \times \frac{N_{\text{annual-cy}}}{t_{\text{annual}}})$		Die Menge der Temperaturzyklen pro Jahr z.B.: $12 \times 365 \times 2 \text{ (Zyklen/Tag)} / 365 = 24$	Missions Profil spezifisch	Missions Profil spezifisch
$\min(\theta_{cy,2})$		Nutzungszeit pro Tag (in Stunden)	Missions Profil spezifisch	Missions Profil spezifisch

²Der tatsächliche Coffin-Manson-Faktor ist noch nicht endgültig ermittelt. Bis zur genauen Bestimmung kann der Wert des Axial Type verwendet werden.

	Modifiziert gegenüber FIDES [5]	Anmerkung	Werte Axial Type	Werte Blade Type
$\Delta T_{\text{cycling}}$		<p>Average. dT ambient temperature rise [K] ist die typische Durchschnittstemperaturerhöhung bezogen auf dem Einbauort der Sicherung im Fahrzeug (OEM Spezifikationen) und setzt sich aus den folgenden Temperaturen zusammen:</p> <p>a) der Temperaturhub [k] in Abhängigkeit vom Einbauort im Fahrzeug z.B. Innenraum</p> <p>b) der Eigenerwärmung [k] innerhalb der Box durch Wärme-Leistung in die Box</p>	Ergibt sich aus dem Design bzw. muss messtechnisch ermittelt werden [K]	Ergibt sich aus dem Design bzw. muss messtechnisch ermittelt werden [K]
$T_{\text{max-cycling}}$		Max. Umgebungstemperatur in der Box	Ergibt sich aus dem Design bzw. muss messtechnisch ermittelt werden [°C]	Ergibt sich aus dem Design bzw. muss messtechnisch ermittelt werden [°C]

7.3.4.1.2.1 Wöhlerversuch

Der Wöhlerversuch soll die zyklisch-mechanische Beanspruchung, welche durch den Temperaturwechsel auf die Sicherung wirkt, simulieren bzw. nachbilden.

Hierbei ist jeder Sicherungsnennwert der Axial-Terminal Familie (Schraubsicherungen) separat zu prüfen, da die Schmelzleiterkonturen je Nennwert unterschiedlich sind.

Ziel ist es die Lastwechselzahl bei unterschiedlichen Amplituden bis zum mechanischen Bruch des Schmelzleiters zu ermitteln. Wie unter Kapitel 7.3.4.1.2.3 kann dann eine Aussage über die grundsätzliche Zyklen-Festigkeit getroffen werden, die Voraussetzung für die Anwendung der hier beschriebene Berechnung der Ausfallrate ist (siehe auch Tabelle 7-15).

7.3.4.1.2.2 Wöhlerkurven-Testbeschreibung:

Die Sicherung wird vertikal in eine Druck-/Zug-Maschine eingespannt und mit einem Drehmoment von 10,5 Nm festgeschraubt.

Anschließend wird die Sicherung weggeregelt mit einer sinusförmigen Belastung von 1 Hz gestreckt und gestaucht. Die Amplituden liegen bei 0,05-0,4 mm.

Der Nullpunkt vom Sinus ist dabei der belastungsfreie Zustand = keine Krafteinwirkung auf die Sicherung.

Das Ergebnis ist die Anzahl der Zyklen bis zum Bruch des Schmelzleiters. Der Bruch wird elektrisch detektiert mit einem Messstrom von 5A über die Sicherung.

Abb. 7-12 Testaufbau Wöhlerkurve

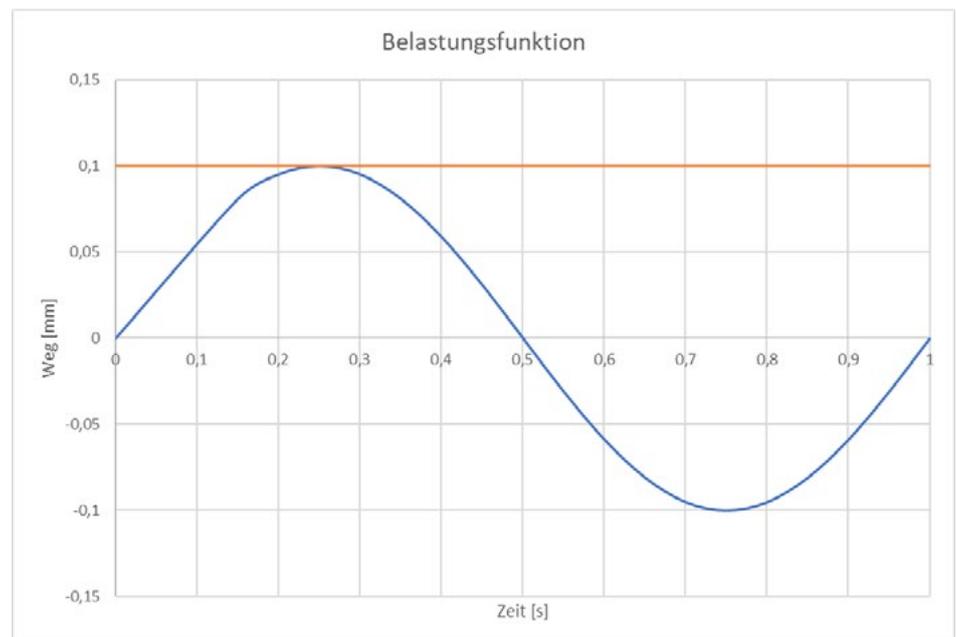


Belastungsfunktion Sinus: $F(x) = A \cdot \sin(x \cdot f \cdot 2\pi)$

Amplituden: $A = \{0,05\text{mm}/0,1\text{mm}/0,2\text{mm}/0,3\text{mm}/0,4\text{mm}\}$

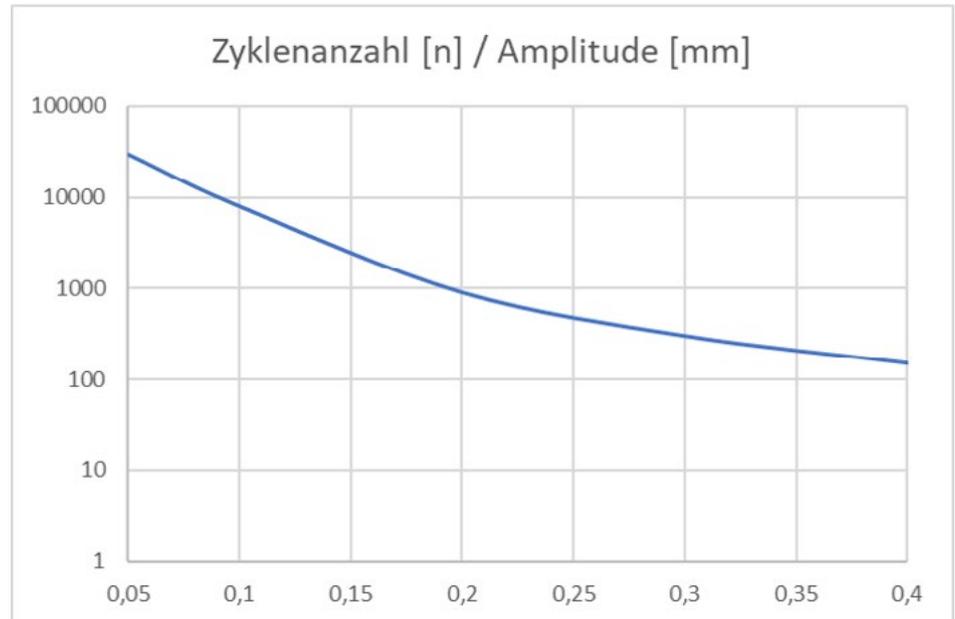
Frequenz: $f = 1\text{Hz} = 1\text{Zyklus/s}$

Abb. 7-13 Belastungsfunktion



7.3.4.1.2.3 Beispiel einer Wöhlerkurve

Abb. 7-14 Beispiel einer Wöhlerkurve



Um die Wöhlerkurve anwenden zu können müssen zwei weitere Parameter bekannt sein:

1. Längenausdehnung des zu verwendeten Sicherungsboxmaterials (vom Hersteller der Sicherungsdose zu ermitteln)
2. Zyklenzahl über Lebensdauer (wird vom OEM festgelegt)

Mit diesen Daten und den zu erwartenden Temperaturbereich kann anhand der Grafik überprüft werden, ob die Sicherung die zu erwartende Zyklenzahl und Längenausdehnung erfüllen kann.

Hierbei ist die Wöhlerkurve für jeden Sicherungsnennwert vom Sicherungshersteller zu ermitteln und einzeln oder als WorstCase Nennwert darzustellen. Damit kann erkannt werden, ob die Sicherung für den Einsatzfall (Temperaturbereich und Zyklenzahl) und für das gewählte Material der Sicherungsdose geeignet ist.

7.3.4.1.3 Mechanischer - Stress Faktor

$$\Pi_{Mechanical} = P_{11} \times \left(\frac{G_{RMS}}{P_{13}}\right)^{P_{12}}$$

Tabelle 7-18: $\Pi_{Mechanical}$ für Sicherungen

	Modifiziert gegenüber FIDES [5]	Anmerkung	Werte Axial Type	Werte Blade Type
P_{11}		Anpassungsfaktor basierend auf mechanischen Ausfällen aus realen Felddaten.	6%	6%
P_{12}		Exponent für den Vibrationsbeschleunigung (Basquin)	1,5	1,5
P_{13}		Referenzwert GRMS	0,5 g ² /Hz	0,5 g ² /Hz
Random Vibration		Eingangsparameter: Rauschprofil an der Sicherung GRMS	x g ² /Hz	x g ² /Hz

7.3.4.1.4 Relative Feuchtigkeit Zyklus - Stress Faktor

$$\Pi_{RH} = P_{14} \times \left(\frac{RH_{ambient}}{P_{15}} \right)^{P_{16}} \times e^{P_4 \cdot P_{17} \times \left[\frac{1}{293} - \frac{1}{(T_{FuseElement} + 273)} \right]}$$

Tabelle 7-19: Π_{RH} für Sicherungen

	Modifiziert gegenüber FIDES [5]	Anmerkung	Werte Axial Type	Werte Blade Type
P_{14}		Anpassungsfaktor basierend auf relative Feuchtigkeit und Korrosion ermittelt aus Ausfällen von realen Felddaten.	24%	24%
P_{15}		RH% Referenz Wert (Peck Model)	70%	70%
P_{16}		Exponent für die relative Feuchte Beschleunigung (Peck Model)	4,4	4,4 zu überprüfen
P_{17}		im Peck Model genutzte Aktivierungsenergie EA(eV) für Rel Humidity	0,9 eV	0,9 eV
P_4		1/Boltzman Konstante	11604 K/eV	11604 K/eV
$T_{FuseElement}$		Durchschnittliche Dauergebrauchstemperatur des Sicherungsschmelzleiter inkl. Umgebungstemperatur und Eigenerwärmung der Sicherungsbox	Ergibt sich aus dem Design bzw. muss messtechnisch ermittelt werden [°C]	Ergibt sich aus dem Design bzw. muss messtechnisch ermittelt werden [°C]
$RH_{ambient}$		Relative Feuchtigkeitsvorgabe	Ergibt sich aus dem Design bzw. muss messtechnisch ermittelt werden [°C]	Ergibt sich aus dem Design bzw. muss messtechnisch ermittelt werden [°C]

7.3.4.1.5 Chemische Beständigkeit – Stress Faktor

$$\Pi_{Chem} = P_{18} \cdot \Pi_{sal} \cdot \Pi_{prot} \cdot \Pi_{zone} \cdot \Pi_{envir}$$

Tabelle 7-20: Π_{Chem} für Sicherungen

	Modifiziert gegenüber FIDES [5]	Anmerkung	Werte Axial Type	Werte Blade Type
P_{18}		Anpassungsfaktor basierend auf chemischen Mitteln, ermittelt aus Ausfällen von realen Felddaten.	6%	6%

7.3.4.1.6 $\Pi_{Induced}$

Induzierte Überlastung

Hier wird in drei Hauptgruppen unterschieden:

$\Pi_{Placement}$:

Einfluss der Platzierung der Komponente im System

$\Pi_{Application}$:

Verwendungsumgebung (z.B. Fahrzeug)

$\Pi_{Ruggedising}$:

Überlastungs-Betrachtung im Design

Innerhalb der Anwendungsgruppe wird zusätzlich zwischen den tauschbaren und nicht tauschbaren Sicherungen unterschieden.

Stecksicherungen sind dem Kunden zugänglich und daher leicht und einfach austauschbar, während die Schraubsicherungen vorrangig den Servicewerkstätten vorbehalten sind oder gar nicht zugänglich sind, da bei Ausfall auch die gesamte Box mit Sicherungsinhalt getauscht werden kann.

7.3.4.1.6.1 Notwendige Berechnungen:

Tabelle 7-21 Berechnung und Empfehlungen mit Auswertung

From the tables below →	$\Pi_{placement} =$	2,5	(FIDES pp98)	
"	$\Pi_{application} =$	X	(FIDES pp100-101)	
"	$\Pi_{ruggedising} =$	Y	(FIDES pp102-103 or pp292-293)	
	$(Csens)_{fuse} =$	5,8	(FIDES pp133)	→ $0.511 * \ln(Csens) = 0,90$

PLACEMENT (FIDES pp98)	
	$\Pi_{\text{placement}}$
Digital non-interface func.	1,0
Digital interface func.	1,6
Analog low level non-interface func.	1,3
Analog low level interface func.	2,0
Analog power non-interface func.	1,6
Analog power interface func.	2,5
FUSE PLACEMENT ASSESSMENT =	2,5

FUSE (FIDES pp133)	Csens	5,8
MOS = Mechanical Overstress	MOS fuse =	6
EOS = Electrical Overstress	EOS fuse =	6
TOS = Thermal Overstress	TOS fuse =	4

APPLICATION (FIDES pp100-101)										
			non-serviceable fuse, driving		non-serviceable fuse, parking or charging		plug-able fuse, driving		plug-able fuse, parking	
Criterion	Description	Weight POS	Pnotes (1, 3, 2, 10)	Σ (Pmarks.POS)	Pnotes (1, 3, 2, 10)	Σ (Pmarks.POS)	Pnotes (1, 3, 2, 10)	Σ (Pmarks.POS)	Pnotes (1, 3, 2, 10)	Σ (Pmarks.POS)
User Type	Capability respecting procedures facing operational constraints	20		0		0		0		0
User qualification level	User or worker control in operational context	10		0		0		0		0
System Mobility	Contingencies to product being moved	4		0		0		0		0
Product manipulation	Possibility of false manipulations, shocks, drops	15		0		0		0		0
System electrical network	Level of elec. disturbance on power supplies, switching & elec. lines	4		0		0		0		0
Product exposure to human activity	Contingencies related to human activity; shock, change in final use	8		0		0		0		0
Exposure to machine disturbances	Contingencies related to operating machines, engines, pollutants	3		0		0		0		0
Exposure to weather	Exposure to hail, sand, frost, rain, dust	2		0		0		0		0
Total =				0		0		0		0
$\Pi_{\text{app}} =$				0,000		0,000		0,000		0,000
$\Pi_{\text{induced}} =$				#WERT!		#WERT!		#WERT!		#WERT!

RUGGEDNESS - FIDES pp292-293 (RE-ORDERED VERSION OF pp102-103)				
Item #: Recommendation (P102-103, re-ordered P292-293)	FIDES Page	Weight	Satisfaction (0→3)	Σ (Weight.Satis)
156. Verification of environmental specs for completeness, using analyses & Ops' feedback	450	4		0
157. Provide training and manage maintenance of skills for use/maintenance of the product	451	7		0
158. Check that product specific procedures & biz. rules have appropriate monitoring system	452	7		0
159. Design dependable electrical protection devices	453	4		0
160. Comprehend risks of product under test being deteriorated by failures of its test means	454	4		0
161. Identifies and uses preventions for reasonably predictable aggressions related to weather	455	4		0
162. Use appropriate prevention to handle reasonably predictable abnormal uses	456	4		0
163. Includes production, storage & maintenance environments in product environmental specs	457	4		0
164. Justification that environmental specs are respected	458	4		0
165. Verify prod. improvement process (eg HAST) to limit environmental sensitivities/constraints	459	7		0
166. Analyzes failure cases that could lead to a failure propagation	460	4		0
167. Perform process analysis of implementation and maintenance operations	461	4		0
168. Review maintenance operations of final user and deal with recommendations	462	4		0
169. Write complete procedures for implementation & maintenance	463	7		0
170. Respects a standard (eg. EN2282) when dealing with power supplies	464	4		0
171. Respects a standard dealing with conducted & radiated e/m disturbances (product/system)	465	3		0

7.3.4.1.6.2 Betriebsmodi

Im Physikalischer Eingabeteil werden verschiedene Betriebszustände definiert, zum Beispiel:

- Fahren
- Vorkonditionierung (z.B. Klimaanlage im Stand starten)
- Laden
- Parken

In der Berechnung werden drei Hauptgruppen genutzt:

- Mode 1 Powered (klassisches Fahrprofil)
- Mode 2 Powered (Fahrzeug steht jedoch sind einige Verbraucher zuschaltbar; inkl. Ladebetrieb).
- Mode 3 UnPowered (Fahrzeug parkt ohne jegliche Strombelastung).

Hier sind entsprechend Anpassungen der Belastungsprofile Angaben zu den jeweiligen Parametern notwendig, wie zum Beispiel Temperatur, Zyklen oder Angaben zur Stromstärke.

Für jeden Betriebsmodus ergibt sich dann eine Ausfallrate, die dann im relevanten Betriebszustand berücksichtigt werden muss oder in einem Missionsprofil mit ihrer Gewichtung entsprechende zur Mission Ausfallrate beiträgt.

7.3.4.2 □process

Die Ermittlung des □process-Faktors erfolgt über ein Audit gemäß [5] Kapitel 5, siehe auch Kapitel 6.4.2. Das Audit ist in Phasen unterteilt und wurde für die passive elektrische Sicherung wie folgend gegenüber der FIDES [5] Tabelle in Kapitel 5.2.2 angepasst:

Tabelle 7-22 Auditphasen und ihre Anteile

PHASE	Phase contribution %
Specification	8
Design	16
Manufacturing of board or subassembly	0
Integration into equipment	40
Integration into system	0
Operation and maintenance	18
Support activities	18
Sum	100

Fragen in Kapitel "Manufacturing of board or subassembly" und "Integration into system" sind nicht anwendbar, da es sich nicht um ein elektronisches System handelt. Die Fragen im Kapitel "Integration into equipment" spiegeln am weitesten die Prüfpunkte der nicht anwendbaren Kapitel wider. Daher wurden die 30% aus den nicht anwendbaren Kapiteln auf "Integration into equipment" addiert. Die Audit-Fragen und Ihre Gewichtung bzw. erreichbaren Punkte sind in [5] ab Seite 271 aufgelistet. Hinweise für die Einstufung erhält man in [5] ab Seite 294.

Wenn kein Audit durchgeführt wird kann der Process_grade mit 0,33 (wie in FIDES [5] empfohlen) angenommen werden.

7.3.5 Quantitatives Fehlermodell

Für Sicherungen können drei verschiedene Ausfallarten ausgemacht werden:

- Sicherung löst zu früh aus ggü. der definierten Kennlinienbereich
- Sicherung löst zu spät aus ggü. der definierten Kennlinienbereich
- Sicherung löst gar nicht aus

Das Hauptmerkmal liegt auf dem zu frühen Auslösen, da bedingt durch die Stressfaktoren und der damit einwirkenden Alterung die Sicherung früher als später auslösen wird. Dies passiert in mindestens 90% der Fälle. Ein zu spätes oder gar kein Auslösen ist eher unwahrscheinlich. Folgende Fehlerverteilung gilt daher nach Experteneinschätzung für Sicherung wie in Tabelle 7-23.

Tabelle 7-23 Ausfallarten der Sicherung

Nr.	Ausfallart	Verteilung
1	Sicherung löst zu früh aus a) Widerstandserhöhung (Zinn/Kupfer-Diffusion) b) Bruch (Längenausdehnung oder Vibration) c) Korrosion (Temperatur Feuchte oder Chemische Belastung) d) Peak Strombelastung (erreichen des i^2t Wertes)	90%
2	Sicherung löst zu spät aus (Schmelzleiter erreicht nicht die notwendige Schmelztemperatur in der Applikation)	5%
3	Sicherung löst gar nicht aus (Schmelzleiter erreicht nicht die notwendige Schmelztemperatur)	5%

7.3.6 Berechnungsbeispiel Sicherung

In diesem Kapitel wird ein Berechnungsbeispiel anhand einer „Axial Terminals SF30“ 100A-Sicherung gezeigt. Als Basis dient die in diesem Leitfaden definierte FIDES Methode 2009 [5] und das Kapitel 7.3 „Passive Elektrische Sicherungen“.

Für die sinnvolle Berechnung der Ausfallrate sind Eingangsdaten notwendig, die für eine exemplarischen Applikation sinnig sind. Neben den zu berechneten Strompfad notwendigen Daten wie Sicherungsnennwert und -strom sind allgemeingültige Festlegungen in den jeweiligen OEM-Testspezifikationen zu finden.

Die allgemeingültigen Formeln für die Berechnung sind im Leitfaden Kapitel 6.4 beschrieben. Die benötigten Parameter sind einzeln von den Herstellern zu ermitteln bzw. zu definieren.

Für dieses nachfolgende Beispiel wurden zum Teil Default-Werte aus den FIDES 2009 Guidelines [5] entnommen und wenn nicht vorhanden aus den möglichen Auswahlfeldern für die Sicherung selektiert, wie zum Beispiel $\square_{\text{placement}}$ mit dem Wert von 2,5.

Eingangsdaten müssen von den nachfolgenden Parteien erbracht werden:

- a) Sicherungshersteller
- b) Boxhersteller typischerweise 1st Tier
- c) OEM

Daten vom Sicherungshersteller sind:

- Sicherungstemperaturerhöhung beim definierten Strom
- Grenztemperatur des Bauteils, i.d.R. der Sicherungs-Schmelzleiter
- \square -Induced
- \square -Process
- \square -PM

Daten vom Boxenhersteller sind:

- a) Temperaturerhöhung innerhalb der Box
- b) Vibrationsverstärkung, welche durch die Box hervorgerufen wird
- c) Chemische Belastungsfestlegung mit Low/Moderate/High und Hermetic/ NonHermetic

Daten vom OEM sind:

- a) Lebensdauer in Stunden für alle Modes
- b) Durchschnittliche Umgebungstemperatur in der Sicherungsbox aus den LV124-Temperaturkollektiven [17]
- c) Anzahl der Temperaturzyklen pro Tag
- d) Durchschnittliche dT Umgebungstemperatur der Sicherungsbox basierend auf dem Einbauort; siehe LV124 [17]
- e) Maximale Umgebungstemperatur der Sicherungsbox aus dem Temperaturkollektiv LV124 [17]

Weitere Parameter sind wie folgt für dieses Beispiel gewählt:

Die Basisfehlerrate wird für Sicherungen unverändert aus FIDES übernommen:

$$\lambda_{0Fuse} = 0,5$$

$$\Pi_{induced} = (\Pi_{placement} \cdot \Pi_{application} \cdot \Pi_{ruggedising})^{0,511 \cdot \ln(C_{sens})} \text{ mit (siehe auch Kapitel 6.4.4):}$$

$$> \Pi_{placement} = 2,5$$

$$> \Pi_{application} = 1,6$$

$$> \Pi_{ruggedising} = 1,7$$

$$> C_{sens Fuse} = 5,8$$

$$\Pi_{acceleration} = \Pi_{Therm} + \Pi_{TCy} + \Pi_{Mech} + \Pi_{RH} + \Pi_{Chem};$$

aus den einzelnen Formeln, siehe nachfolgende Seiten.

$$\Pi_{PM} = 1,6$$

$$\Pi_{Process} = 4,0$$

Ermittlung des physikalischen Anteils „ $\Pi_{acceleration}$ “ aus dem Kapitel 7.3 „Passive Sicherungen“

$$\lambda_{Physical} = \lambda_{0(Component)} \times \sum_i^{Phases} \left(\frac{t_{annual}}{8760} \right)_i \times (\Pi_{Thermal} + \Pi_{TCy} + \Pi_{Mech} + \Pi_{RH} + \Pi_{Chem})_i \times (\Pi_{Induced})_i$$

mit

$$\Pi_{acceleration} = \Pi_{Therm} \times \Pi_{TCy} \times \Pi_{Mech} \times \Pi_{RH} \times \Pi_{Chem}$$

Berechnungsbeispiel für den Fahrbetrieb:

Π_{Therm} :

$$\Pi_{thermoelectrical} = P_1 \times \left(\frac{1}{0,8} \times \frac{I_{applied}}{I_{rated}} \right)^{P_3} \times e^{P_4 \times P_2 \times \left[\frac{1}{P_5 + 273K} - \frac{1}{(T_{FuseElement} + 273K)} \right]}$$

Parameter P1 – P4 sind in Tabelle 7-16 beschrieben.

$T_{FuseElement}$ ist dabei die Absolut-Temperatur des Sicherungsschmelzleiters, die sich ausfolgenden Größen zusammensetzt:

- a) Temperaturerhöhung des Schmelzleiters durch den Applikationsstrom (vom OEM zu benennen). In diesem Beispiel wird die 100A Sicherung mit 50A Strom betrieben und erwärmt sich um 30K. Zusätzlich wird ein Sicherheitsfaktor von 20% auf die Temperatur beaufschlagt, welche klassisch in dem Derating-Normstandard zur Anwendung kommt.

b) zusätzliche Temperatur, die aus der Eigenerwärmung der Box kommt, in diesem beispielhaften Fall 20K.

c) Durchschnittstemperatur aus den Temperaturkollektiven TK2 mit 43,75K (siehe Abb. 7-15)

Abb. 7-15 Beispiel Temperaturkollektiv Innenraum

Temperaturkollektive				
Verteilung [%]	TK1	TK2	TK3	TK4
	Temp [°C]			
6	-40	-40	-40	-40
20	23	23	23	23
65	40	50	65	85
8	75	100	115	135
1	80	105	120	140
Durchschnitt	35	43,75	54,85	69,65

Temperaturkollektive für verschiedene Einbauträume		
Einbautraum der Komponente	Kollektiv Nr.	Temperaturhub [K]
Innenraum, ohne besondere Anforderungen	1	36
Karosserieanbau, ohne besondere Anforderungen	1	36
Innenraum mit Sonneneinstrahlung	2	46
Karosserieanbau Dach	2	46
Motorraum, aber nicht am Motor	3	60
am Kühler	3	60
Motoranbau	4	75
Getriebeanbau	4	75

Damit erreicht der Schmelzleiterwert eine Gesamttemperatur von:

$$\ggggg 30K \cdot 1,2 + 43,75^\circ C + 20K \sim 99,75^\circ C \llllll$$

Π_{TCy} :

$$\Pi_{TCy} = P_6 \times \left(\frac{12 \times N_{annual-cy}}{t_{annual}} \right) \times \left(\frac{\min(\theta_{cy,2})}{2} \right)^{P_8} \times \left(\frac{\Delta T_{cycling}}{P_{10}} \right)^{P_7} \times e^{P_9 \cdot \left[\frac{1}{273K + 20K + P_{10}} - \frac{1}{(T_{Tmax-cycling} + 273)} \right]}$$

Parameter P6 – P10 sind in Tabelle 7-17 beschrieben.

$\Delta T_{cycling}$ (Avg. dT ambient temperature rise [k] ist die typische Delta-Durchschnittstemperaturerhöhung bezogen auf dem Einbauort der Sicherung im Fahrzeug (OEM Spezifikationen) und setzt sich aus folgenden Temperaturen zusammen:

a) der Eigenerwärmung in der Box wie in diesem Beispiel im Innenraum ohne besondere Anforderungen

b) der Eigenerwärmung innerhalb der Box mit 20K.

>> Damit liegt die Gesamttemperaturerhöhung bei 36K+20K = 56K <<.

$T_{max-cycling}$ (max ambient temperature within box [°C]) ist die maximale Umgebungstemperatur in der Box, die sich aus folgenden Größen zusammensetzt:

a) Maximale Umgebungstemperatur der Box (typischerweise aus dem Temperaturkollektiv zu wählen, in diesem Beispiel 105°C.

$\Pi_{Mechanical}$:

$$\Pi_{Mechanical} = P_{11} \times \left(\frac{G_{RMS}}{P_{13}} \right)^{P_{12}}$$

Parameter P11 – P13 sind in Tabelle 7-18 beschrieben. Für das Berechnungsbeispiel wurde ein Rauschprofilwert an der Sicherung GRMS mit 3,5 g²/Hz gewählt.

$$\Pi_{RH}: \quad \Pi_{RH} = P_{14} \times \left(\frac{RH_{ambient}}{P_{15}} \right)^{P_{11}} \times e^{P_{12} \times P_{13} \times \left[\frac{1}{293} - \frac{1}{(T_{FuseElement} + 273)} \right]}$$

Parameter P14 – P17 sind in Tabelle 7-18 beschrieben.

T_{FuseElement} ist dabei die Absolut-Temperatur des Sicherungsschmelzleiters, die sich aus folgenden Größen zusammensetzt:

- a) Temperaturerhöhung des Schmelzleiters durch den Applikationsstrom (vom OEM zu benennen). In diesem Beispiel wird die 100A Sicherung mit 50A Strom betrieben und erwärmt sich um 30K. Zusätzlich wird ein Sicherheitsfaktor von 20% auf die Temperatur beaufschlagt, welche klassisch in dem Derating-Normstandard zur Anwendung kommt.
- b) zusätzliche Temperatur, die aus der Eigenerwärmung der Box kommt, in diesem beispielhaften Fall 20K.
- c) Durchschnittstemperatur aus den Temperaturkollektiven TK2 mit 43,75K (siehe Abb. 7-15)

Damit erreicht der Schmelzleiterwert eine Gesamttemperatur von:

$$\ggggg \ 30K \cdot 1,2 + 43,75^\circ C + 20K \sim 99,75^\circ C \llllll$$

RH_{ambient} = relative Feuchtigkeit ist mit 70% gewählt.

$$\Pi_{Chem}: \quad \Pi_{Chem} = P_{18} \cdot \Pi_{sal} \cdot \Pi_{prot} \cdot \Pi_{zone} \cdot \Pi_{envir}$$

Parameter P18 ist in Tabelle 7-18 beschrieben.

Die Umgebungstemperaturen für den Mode 2 und Mode 3 weichen vom Mode 1 ab und sind weitgehendst reduziert worden. Der Hauptgrund hierfür ist die fehlende bzw. reduzierte Bestromung sowie eine geringere Umgebungstemperatur.

Die nachfolgende Eingangstabelle zeigt die für die Berechnung genutzten Daten sowie die Ergebnisse:

Abb. 7-16 Ergebnis der Beispielrechnung für eine Sicherung

Lasten	Sicherungs-nennwerte und Querschnitte	Mode 1 - Fahren										Mode 2 - Parken Verbraucher sind aktiviert										Mode 3 - Parken Verbraucher sind nicht aktiviert																					
		Thermo-Elektrisch	Thermo-Zyklisch	Vibration	rel. Feuchte	Umwelt-Bedingungen	lifetime [h]	Thermo-Elektrisch	Thermo-Zyklisch	Vibration	rel. Feuchte	Umwelt-Bedingungen	lifetime [h]	Thermo-Elektrisch	Thermo-Zyklisch	Vibration	rel. Feuchte	Umwelt-Bedingungen	lifetime [h]																								
Verbraucher	Sicherungsnennwert [A] Sicherungstyp Querschnitt [mm²] Stecksicherung	Last-Strom [A]	Durchschnittliche dT Umgebungstemp. Box [K]	Temperaturerhöhung in Box [°C]	Temperaturzyklen / Tag [E]	Durchschnittliche dT Umgebungstemp. Box [K]	Max. Umgebungstemp. [°C]	Beschleunigung [g/Hz]	Vibrationsverstärkung [%] ggü. Box	Relative Luftfeuchtigkeit [%]	Salzbelastungsforderungen Low/High	Umweltbedingungen High/Moderate/Low	Verschmutzung High/Moderate/Low	Dichtungsbereich Hermetic/NonHermitic	lifetime [h]	Last-Strom [A] effektiv Werte	Durchschnittliche dT Umgebungstemp. Box [K]	Temperaturerhöhung in Box [°C]	Temperaturzyklen / Tag [E]	Durchschnittliche dT Umgebungstemp. Box [K]	Max. Umgebungstemp. [°C]	Beschleunigung [g/Hz]	Vibrationsverstärkung [%] ggü. Box	Relative Luftfeuchtigkeit [%]	Salzbelastungsforderungen Low/High	Umweltbedingungen High/Moderate/Low	Verschmutzung High/Moderate/Low	Dichtungsbereich Hermetic/NonHermitic	lifetime [h]	Last-Strom [A] effektiv Werte	Durchschnittliche dT Umgebungstemp. Box [K]	Temperaturerhöhung in Box [°C]	Temperaturzyklen / Tag [E]	Durchschnittliche dT Umgebungstemp. Box [K]	Max. Umgebungstemp. [°C]	Beschleunigung [g/Hz]	Vibrationsverstärkung [%] ggü. Box	Relative Luftfeuchtigkeit [%]	Salzbelastungsforderungen Low/High	Umweltbedingungen High/Moderate/Low	Verschmutzung High/Moderate/Low	Dichtungsbereich Hermetic/NonHermitic	lifetime [h]
Lenkung	100 SF50 16 nein	50	54,85	20	2	60	105	3,85	100	70	Low	Mod	Low	Non	8	20	30	10	2	30	50	0	70	Low	Mod	Low	Non	3	0	23	0	1	23	30	0	70	Low	Mod	Low	Non	120		

Zusatzinformationen	
PM	4
Process	1,6
Placement	2,5
Application	1,6
Ruggedising	1,7
Csens Fuse	5,8

Model Parameters														
Thermoelektrisch			Temperaturzyklisch			Mechanical			Relative Feuchtigkeit			Chemisch		
Percentage contribution to overall FIT rate	13%	F1	Percentage contribution to overall FIT rate	61%	F6	Percentage contribution to overall FIT rate	6%	F11	Percentage contribution to overall FIT rate	26%	P14	Percentage contribution to overall FIT rate	6%	P18
EA (kV) for thermo-electrical acceleration (Arrhenius)	0,9	F2	Power law used for T/C acceleration	2,7	F7	Power law used for vibrational accel. (Basquin Model)	1,5	F12	Peck Model reference RH% (non-operational condition)	30	P15	Power law used for RH acceleration (using Peck Model)	4,400	P16
Power law used for current density acceleration	0	F3	Power law used for duration	0,333	F8	Reference Gauss value	0,50	F13	EA (kV) used in the Peck Model for RH	80	P17	EA (kV) used in the Peck Model for RH	11000	P19
k (Boltzmann's constant)	11604	F4	EA x k factor used	11604	F9				LF (Boltzmann's constant)	11604	P20			
Reference Temp. T ₀ (20°C Umgebungstemperatur + 600) [°C]	80	F5	Reference Temperature difference T ₀ [K]	20	F10									

angepasst i. vgl. zu FIDES

Ergebnisse			
$\lambda_{0(Fuse)}$	=	0,5	FITS
$\lambda_{Physical}$	=	$\lambda_{0(Fuse)} \cdot \Sigma[(t_{annual}/8760) \cdot \Pi_{stress}] \cdot \Pi_{induced}$	= 5,35 FITS
$\Pi_{Process}$	=	4,00	
Π_{PM}	=	1,600	
λ_{Total}	=	$\lambda_{Physical} \times \Pi_{PM} \times \Pi_{Process}$	= 34,24 FITS

7.4 Funktionsbaugruppe Schraubkontaktierung

7.4.1 Beschreibung der Funktionsbaugruppe (Bauteil oder Baugruppe)

Hier betrachtet werden geschweißte Schraubkontakte. Ein Beispiel sind die beiden Darstellungen.

Abb. 7-17 geschweißte Schraubkontakte



Die Systemgrenzen der Funktionsbaugruppe Schraubkontakte ist in der nächsten Abbildung zu sehen. Alle Bereiche außerhalb der gestrichelten Linie werden nicht berücksichtigt. Diese beschränkt sich auf die Schweißverbindung zum Blech, die Schraubverbindung Bolzen-Mutter-Kabelschuh und die Verbindung zur Leitung ggf. ihrer Abdichtung. Alle Bereiche außerhalb der gestrichelten Linie werden nicht berücksichtigt.

Abb. 7-18 Systemgrenze Schraubkontakte



Funktionen der Komponente

Die Funktion von solchen verschweißten Schraubkontakten ist es eine Kontaktierung zum Grundblech herzustellen. Der Strom wird dabei über den Kabelschuh auf den Bolzen und Mutter über die Schweißung in das Blech abgeleitet.

Abb. 7-19 Strompfad am Schraubkontakt



Technische Daten

Klasse I: Stahlbolzen

Tabelle 7-24 Technische Daten für Stahlbolzen

Gewindegröße	Min Blechdicke	Werkstoff Schweißbolzen	Oberfläche Schweißbolzen	Werkstoff Mutter	Anzahl der Kabelschuhe
M5	0,7	Vergütet auf 8.8 nach DIN EN ISO 898-1	Galvanisch Zinn 70% / Zink 30% min 5µm, farblos passiviert + Gleitmittel	Festigkeitsklasse 8 nach DIN EN ISO 898-2	Maximal 4 Min Einschraubtiefe der Mutter 1xGewindedurchmesser
M6	0,8				
M8	1,0				
M10	1,2				

Klasse II: Alu Bolzen

Tabelle 7-25 Technische Daten für Aluminiumbolzen

Gewindegröße	Min Blechdicke	Werkstoff Schweißbolzen	Oberfläche Schweißbolzen	Werkstoff Mutter	Anzahl der Kabelschuhe
M8	2	EN AW-5019 EN AW-5554 EN AW-6082	Gebeizt, Poliert Titan Konversionsbehandelt	EN AW-5052 Stahl Festigkeitsklasse 8	Maximal 4 Min Einschraubtiefe der Mutter 1xGewindedurchmesser
M10	2,5	EN AW-5186		EN AW-5052	Maximal 4 Min Einschraubtiefe der Mutter 1xGewindedurchmesser

Für die nachfolgende Betrachtung werden nur die Bolzen der Klasse I betrachtet.

Die Montage/Anzug der Kabelschuhe richtet sich nach der VDI2230. Anzug auf Drehmoment. Bevorzugt wird ein Anzug auf Drehmoment + Drehwinkel.

7.4.2 Genaue Beschreibung der Verwendungsart (Use Case)

Schraubkontakte haben die Aufgabe eine elektrische Verbindung herzustellen (im Falle eines Massebolzens zur Fahrzeugkarosserie). Der Stromfluss wird durch einen Kabelschuh über Bolzen/ Mutter und Schweißung sichergestellt. Die Masseanbindung wird durch eine lackfreie Kontaktfläche realisiert. Die Kabelschuhe müssen eben, gratfrei und eine komplett verzinnete Oberfläche aufweisen. Beim Einsatz von vorverzinnem Material bzw. blanken Stanzkanten ist gemäß bestehender Qualitätsforderungen auf einen bestimmungsgemäßen Einsatz bezüglich Korrosionsschutz zu achten. Es sollten maximal 4 Kabelschuhe auf einen Bolzen aufgelegt werden. Die Anzahl richtet sich nach der Dicke der Kabelschuhe und der Gewindelänge. Die minimale Gewindelänge in der Mutter sollte 1x Gewindedurchmesser betragen.

Der Übergangswiderstand ist dabei auf Lebensdauer möglichst niedrig zu halten. Um eine übermäßiges Setzverhalten und dadurch ein Anstieg des Widerstandes zu verhindern, wird der Einsatz von Schraubwerkzeugen gemäß VDI / VDE 2862 empfohlen. Bei der Verschraubung in den Werkstätten ist auch eine Verschraubung mit Drehmomentschlüssel zulässig. Es gibt zwei mögliche Anzugsverfahren. Das erste Anzugsverfahren ist der Anzug bis in den elastischen Bereich. Das Drehmoment im elastischen Bereich richtet sich nach der VDI2230. Das zweite Verfahren ist der Anzug bis in den plastischen Bereich. Hierbei erfolgt der Anzug eines Drehmoments plus einem Drehwinkel.

Massebolzen sollen den Beanspruchungen (thermisch, mechanisch, chemisch ...) während der Fahrt widerstehen. Die Bolzen sind für 12V und 48V ausgelegt. Der Temperaturbereich für die Anwendung liegt zwischen -40°C und 120°C.

7.4.3 Anforderungen bezüglich Lifecycles der Funktionsbaugruppe

Für den Lifecycle der Massebolzen werden die folgenden Phasen unterschieden, in denen unterschiedliche Belastungen und Forderungen gestellt werden:

- Herstellung der Bauteile
- Transport und Logistik
- Lagerung. (Die Bolzen können unbegrenzt gelagert werden.)
- Schweißen beim OEM, Kontrolle der Schweißung
- KTL Prozess, Trocknung, Lackierung
- Demontage der Mutter, überprüfen der Kontaktfläche
- Verbindungsprozess Kabelschuh an Leitung
- Montage der Kabelschuhe, Verschrauben mit EC Schrauber, lagerichtige Montage mit Verdrehschutz
- Kundenbetrieb des Fahrzeugs
- Nacharbeit bei Reparatur
- Demontage und Recycling

7.4.3.1 Allgemeine Anforderungen

Die Schraubsysteme müssen entsprechend der Richtlinie, Vorschriften und Verfahrensanweisungen der Bauteil Hersteller und OEM behandelt und verarbeitet werden.

7.4.3.2 Anforderungen an die Herstellung der Bauteile

Anforderungen an die Herstellung der Bauteile werden in den Bauteil-Lastenheften der OEMs unterschiedlich definiert.

7.4.3.3 Anforderung an den Transport

Beim Transport ist sicherzustellen, dass keine Beschädigungen an den Bauteilen auftreten. Dazu ist eine ordnungsgemäße Verpackung der Bauteile nach geltenden Vorschriften der Bauteil-Hersteller vorzusehen.

7.4.3.4 Anforderung an die Lagerung

Die Lagerung soll in trockenen, leicht beheizten Räumen mit niedriger Luftfeuchtigkeit erfolgen. Korrosionsfördernde Mittel oder Betriebsstoffe (Salze etc.) in der Umgebungsatmosphäre des Lagerungsortes unbedingt vermeiden. Zur Verwendbarkeit von original

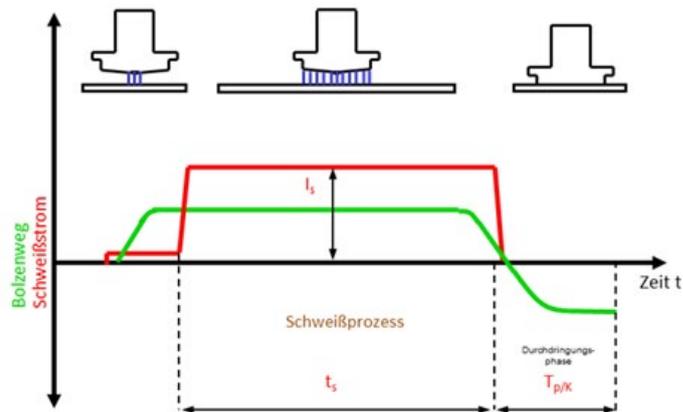
verpackten Schraubkontakten liegen keine zeitlichen Einschränkungen vor, wenn sie diese in ihrer Verpackung lagern. Im Zuführer verbliebene Stahlbolzen müssen jedoch spätestens nach 6 Monaten entsorgt werden. Grund: Die ständige Reibung der Schweißbolzen zueinander beschädigt die Oberflächenbeschichtung.

7.4.3.5 Anforderung Schweißen beim OEM

Schraubkontakte werden gemäß dem Prinzip „Hubzündung“ geschweißt. Der Schweißprozess wird dabei auf folgende Parameter überwacht:

- Bolzen auf Werkstück
- Lichtbogenspannung
- Schweißstrom
- Schweißzeit
- Hubhöhe
- Durchdringung

Abb. 7-20: Schweißprozess bei Schraubkontakten

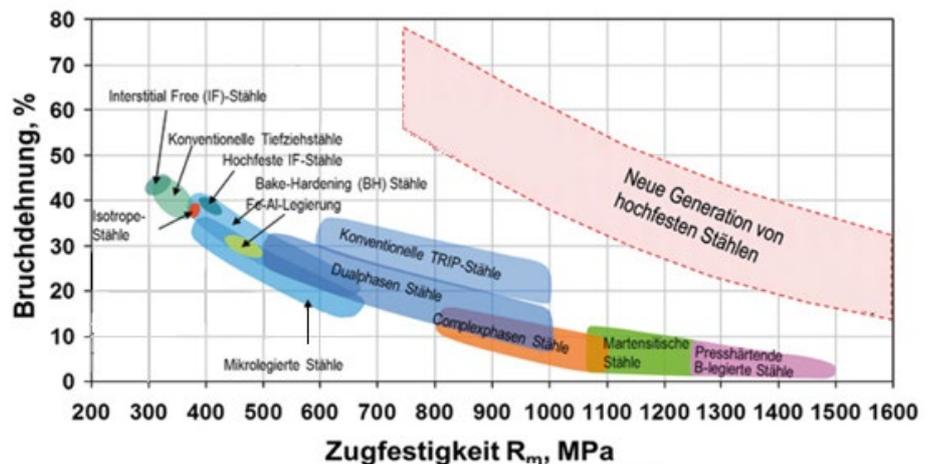


Für die Beurteilung der Schweißbeignung von Stählen sind folgende Faktoren relevant

- Kohlenstoffgehalt des Stahlwerkstoffs
- Legierungselemente und deren Menge
- Abkühlgeschwindigkeit der Schweißzone

Schraubkontakte werden auf niedriglegierte Stähle und auf festen bis hochfesten Stählen verschweißt. Die Abbildung 7-21 zeigt eine Übersicht verwendeter Stähle im Karosseriebau.

Abb. 7-21: Zugfestigkeit und Bruchdehnung von Werkstoffen



Die Oberflächeneigenschaften der Bauteile haben einen entscheidenden Einfluss auf die Güte des Schweißergebnisses. Schmierstoffe (Öle, Fette, Trockenschmierstoffe etc.) weisen in ihrer Menge und Verteilung auf der Bauteiloberfläche einen maßgeblichen Einfluss auf das Schweißergebnis auf. Die o. g. zumeist kohlenwasserstoffhaltigen Stoffe beeinflussen unter anderem die Höhe der entstehenden Schweißenergie und die Güte der Schweißzone. Somit sind diese filmischen Verunreinigungen für die Schweißparameterfindung zu berücksichtigen. Sind diese nicht homogen und in zu hoher Menge auf der Oberfläche verteilt, wird eine Behandlung des Bauteils vor dem Schweißprozess empfohlen. Andere Verunreinigungen wie metallische Fremdpartikel können den Lichtbogen ableiten oder sogar zum Erlöschen bringen. Daher wird hier zu einer Reinigung des Bauteils vor dem Schweißprozess geraten.

Oberflächenbehandlungen müssen den Vorgaben der VDA 230-213 entsprechen.

Die Stahlblechdicke richtet sich nach dem Flanschdurchmesser des Schraubkontaktes.

Es gelten folgende minimalen Blechdicken.

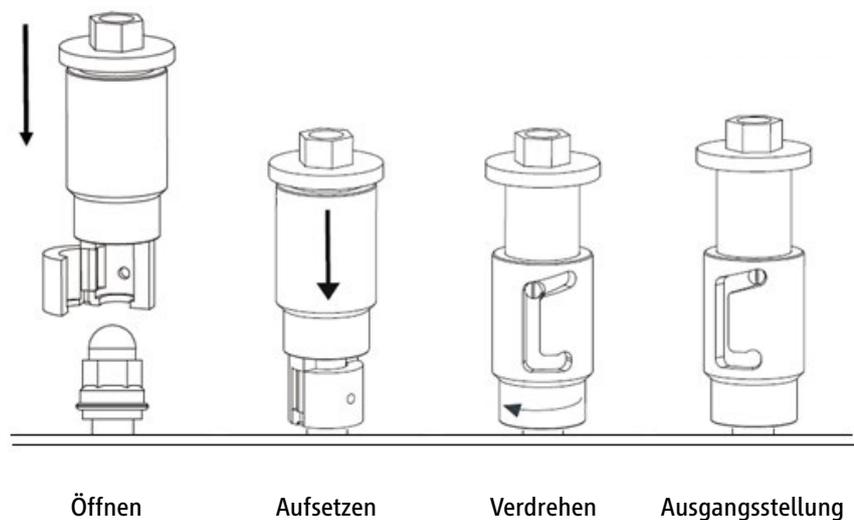
Tabelle 7-26 Minimale Blechdicken bei Schraubkontakten

Schweißflansch Ø	Minimale Blechdicke
7	≥0,7
8	≥0,8
9	≥1,0
10-11	≥1,2

7.4.3.6 Kontrolle der Schweißung

Die Schweißung der Schraubkontakte erfolgt über ein 8-kant am Schweißbolzen. Der Bolzen wird mit Hilfe eines Werkzeuges über den 8-kant auf Torsion belastet. Die nachfolgende Darstellung zeigt den Prüfablauf. Das Prüfmoment für die Schweißung muss oberhalb des Nennanzuges liegen.

Abb. 7-22: Prüfablauf Verschraubung



7.4.3.7 Anforderung an KTL Prozess, Trocknung, Lackierung.

Die Schraubkontakte müssen so ausgelegt sein, dass sie einem Trocknungsprozess standhalten. Als Obergrenze gilt eine Temperatur von 200°C.

7.4.3.8 Demontage der Mutter

Nach der Lackierung und Trocknung muss sich die Mutter demontieren lassen. Als Richtwert für das Demontagemoment gilt hier das Anzugsmoment. Ein höheres Demontagemoment ist ebenfalls zulässig.

7.4.3.9 Anforderung an die Kontaktfläche

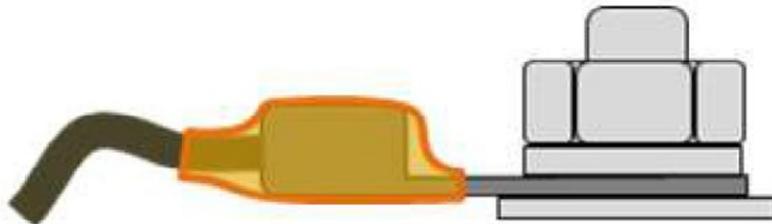
Die Kontaktfläche muss nach der Lackierung frei von Lack sein. Eine geringe Kontamination im Randbereich ist zulässig. Eine durchgehende / flächige Kontamination ist unzulässig.

7.4.3.10 Aufnahme von Kabelschuhen

Der Schraubkontakt sind so ausgelegt, dass einzelne oder mehrere Kabelschuhe aufgenommen werden können. Dabei ist die verbleibende Mindestgewindetiefe in der Mutter zu beachten. Eine geeignete Verdrehsicherung für eine lagerichtige Montage ist vorzusehen. Die Anzahl der Kabelschuhe richtet sich nach der Dicke der Kabelschuhe. Kabelschuhe dürfen keine Prägung im Bereich der Kontaktierung haben. Bei Verwendung von unterschiedlichen Materialkombinationen zwischen Kabelschuh und Bolzen bzw. Mutter ist auf die Kontaktkorrosion aufgrund der elektrochemischen Spannungsreihe zu achten.

Blanke Kabelschuhe aus Messing, Kupfer oder versilberte Kabelschuhe sollten nicht verwendet werden, da hier die Spannungsdifferenz zu groß ist. Der Crimp am Kabelschuh ist gegen Feuchtigkeit zu schützen.

Abb. 7-23: Darstellung Schraubverbindung



7.4.3.11 Anforderung Verschrauben mit EC Schrauber

Schraubkontakte müssen mit Schraubwerkzeugen gemäß VDI / VDE2862 verschraubt werden. Bei der Verschraubung ist auf den Einfluss der Schraubtoleranz der Schraubwerkzeuge auf die zulässige Gesamttoleranz zu achten. Für die Montage gibt es 2 verschiedene Schraubmöglichkeiten. Für nachträgliche Verschraubungen in Werkstätten ist auch eine Verschraubung mit Drehmomentschlüssel zulässig.

- Elastische Verschraubung auf Drehmoment.
Für die Elastische Verschraubung gilt als Obergrenze die Streckgrenze $R_{p0,2}$. Diese Streckgrenze ist in Vorversuchen mit original Bauteilen zu ermitteln und im Schraubverfahren das Drehmoment auf maximal 90 % der Streckgrenze auszulegen. Alternativ kann auch das Verfahren nach VDI2230 verwendet werden. Für die Verschraubung ist ein EC Schrauber mit niedriger Schrauber-Toleranz (Klasse II oder besser) zu verwenden.
- Plastische Verschraubung. Drehmoment + Drehwinkel
Bei der plastischen Verschraubung wird gezielt bis in den plastischen Bereich angezogen und darüber hinaus um einen vorgegebenen Winkel verdreht. Bei diesem Verfahren werden höhere Klemmkräfte erzeugt als bei der elastischen Verschraubung.

Der Vorteil von diesem Verfahren liegt darin, dass der Klemmkraftabfall niedriger ist als bei der elastischen Verschraubung. Die Verschraubung ist so zu wählen, dass eine mehrmalige Verschraubung möglich ist. Die Anzahl der Verschraubungen ist mit dem OEM abzustimmen.

7.4.3.12 Anforderungen im Kundenbetrieb

Durch den Betrieb des Fahrzeugs beim Kunden ergeben sich über das Fahrprofil des Kunden und der Einflüsse der Umgebung auf das Fahrzeug Anforderungen an die Schraubkontakte. Die Anforderungen der OEMs bezüglich Instandsetzung und Reparatur sind zu beachten. Schraubkontakte können bei Bedarf geöffnet, gereinigt und erneut verschraubt werden.

7.4.4 Einzuhaltende Eigenschaften der Funktionsbaugruppe

Die in Kapitel 7.4.3 genannten Anforderungen sind alle einzuhalten, um eine Funktion auf Lebenszeit sicherzustellen.

7.4.5 Fehlermodell und Ausfallrate

Zu Fehlermodell und Ausfallrate können zum aktuellen Stand des Technischen Leitfadens keine Aussagen getroffen werden, weil die Datenbasis der Feldbeobachtung noch erweitert werden muss.

7.5 Nicht lösbare elektrische Verbindung

Elektrische Verbindungen haben die Funktion, Bauteile physisch und insbesondere elektrisch leitend miteinander zu verbinden. Durch die Verbindung wird die Übertragung von Leistungs- und/oder Signalströmen realisiert. Der Durchgangswiderstand soll möglichst gering sein und sich zeitlich (Alterung) wenig verändern. In diesem Dokument handelt es sich um miteinander verbundene elektrische Leitungen zur Verwendung in Bordnetzen von Fahrzeugen. Gegenüber der Umwelt (Karosserie usw.) ist die Verbindung elektrisch zu isolieren. Dies wird über Umhüllungen mit Klebeband oder Schrumpfschlauch realisiert. Um Korrosions-Effekte auszuschließen, sind in definierten Bereichen mit Medienexposition (z. B. Motorraum, Stoßfänger) Abdichtungen vorzusehen. Gebräuchlich sind Schrumpfschläuche mit zusätzlichem Innenkleber.

Die hier betrachteten Verbindungen bestehen aus Leitung-Leitung-Verbindungen. Verbindungen Terminal-Leitung und Terminal-Terminal sind in dieser Ausgabe des Technischen Leitfadens zurückgestellt.

Übliche Verfahren und Verbindungselemente zur Herstellung stoffschlüssiger und kraftschlüssiger Verbindung von elektrischen Leitungen sind:

- Ultraschallschweißen
- Widerstandsschweißen
- Röhrchen / Quetschverbinder
- Crimpverbinder

Anmerkung: Röhrchen-/Quetsch- und Crimpverbindungen oder offene Crimphülsen werden hier nicht weiter betrachtet.

Die Darstellung der elektrischen Verbindungen lässt sich in Klassen strukturieren.

Beschreibung der Klassen

Hier in diesem Betrachtungsrahmen werden die nicht lösbaren elektrischen Verbindungen, im Folgenden Splice genannt, als System in Verbindung mit Isolier- und Abdichtelementen beschrieben.

Klasse Ia: Gedichteter ultraschallgeschweißter Splice

Stoffschlüssige bzw. teil-stoffschlüssige elektrische Verbinder, die mit Ultraschallschweißapparaten geschweißt werden. Für den Feuchtraum erfolgt die Abdichtung durch einen geeigneten Schrumpfschlauch mit Innenkleber. Dieses Produkt ist ausgelegt, dass während der Verarbeitung vorhandene Hohlräume am Splice mit Innenkleber aufgefüllt werden.

Klasse Ib: Ungedichteter ultraschallgeschweißter Splice

Mit Ultraschallschweißapparaten geschweißte Splice-Verbindungen. Für den Trockenraum erfolgt die Isolierung durch ein Isolierklebeband (Tapen), eine Isolationskappe oder einen geeigneten Schrumpfschlauch ohne Innenkleber.

Klasse IIa: Gedichteter widerstandspunktgeschweißter Splice

Stoffschlüssige bzw. teil-stoffschlüssige elektrische Verbinder, die durch Widerstandspunktschweißen konfektioniert werden. Für den Feuchtraum erfolgt die Abdichtung durch einen geeigneten Schrumpfschlauch. Dieses Produkt ist ausgelegt, dass während der Verarbeitung vorhandene Hohlräume am Splice mit Innenkleber aufgefüllt werden.

Klasse IIb: Ungedichteter widerstandspunktgeschweißter Splice

Stoffschlüssige bzw. teil-stoffschlüssige elektrische Verbindungen, die durch Widerstandspunktschweißen konfektioniert werden. Für den Trockenraum erfolgt die Isolierung durch ein Isolierklebeband (Tapen), eine Isolationskappe oder einen geeigneten Schrumpfschlauch ohne Innenkleber.

Klasse III: Kraftschlüssige und mechanische Verbindungen

Kraft-/formschlüssige Verbindungen, z.B. mittels Crimp, werden aktuell nicht betrachtet.

7.5.1 Verfahren Ultraschallschweißen (USS)

Das Ultraschallschweißen von Nichteisenmetallen ist ein Sonderverfahren des Kaltpressschweißens gemäß DIN 8593 ([28]) und DIN 1910 ([29], [30]) und gehört zur Gruppe „Schweißen in fester Phase“. Genauer gesagt handelt es sich um ein Reibschweißverfahren. In der Norm DIN EN ISO 4063 ([27]) ist es als Prozess 41 klassifiziert.

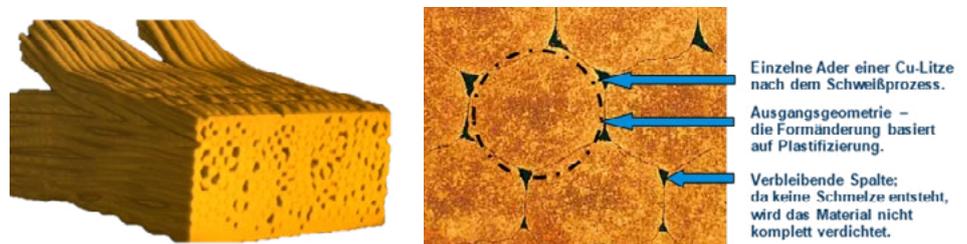
Beispielhafte Splice-Verbindungen sind in Abbildung 7-24 dargestellt.

Abb. 7-24: Beispielhafte ultraschallgeschweißte Splices: Endknoten links, Durchgangsknoten rechts



In Bezug auf die Physik der Kontaktstelle handelt es sich um eine stoffschlüssige oder teilweise stoffschlüssige Verbindung. Zwischen Metallen entsteht eine metallurgische Verbindung durch intermolekulare Kräfte. Die resultierende Verbindung ist größtenteils stoffschlüssig, wie durch mikroskopische Aufnahmen ersichtlich ist (siehe Abbildung 7-25).

Abb. 7-25: Ultraschallgeschweißte Splice-Verbindung



Vorteile des Ultraschallschweißens liegen beispielsweise in einer metallischen Verbindung hoher Qualität mit exzellenten elektrischen Eigenschaften in der Verbindungszone. Verschiedene Materialdicken und artfremde Materialien können verschweißt werden (z.B. Al und Cu). Die thermische Belastung der Fügeteile ist gering bei zugleich kurzen Zykluszeiten und der Prozess energiesparend im Vergleich zu anderen Schweißverfahren. Es wird kein Zusatzmaterial (z.B. Lötzinn, Schutzgas) benötigt.

Entscheidend für die Qualität stoffschlüssiger Verbindungen ist die Auswahl von Materialien mit geeigneter Leitfähigkeit ohne Verunreinigungen (durch Fette, Öle, Fremdpartikel etc.).

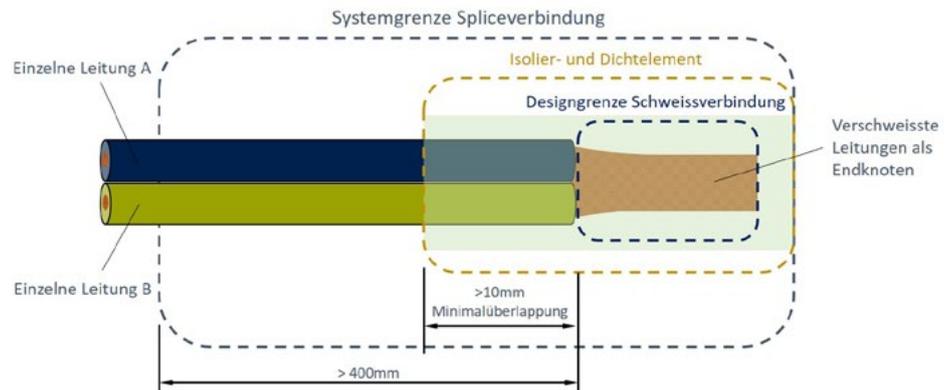
7.5.1.1 Funktionsbaugruppe und Systemgrenze

Bei der Definition der Systemgrenzen ist sicherzustellen, dass einerseits auch Bereiche, die durch den Schweißprozess und Isolations- und Abdichtprozess signifikant beeinflusst werden (insbesondere durch thermische Beeinflussung), miterfasst werden, andererseits dürfen keine Lücken oder Überschneidungen zu angrenzenden Systemen entstehen. Grundsätzlich kann die Belastung eines Splice (durch Strom, Vibration) nicht isoliert betrachtet werden, es muss die Interaktion mit Leitungen, Aggregaten, Dichtungen etc. mitbetrachtet werden. Felddaten bezüglich der Zuverlässigkeit von Splice-Verbindungen sind höchstens auf einer umfassenderen Ebene (z.B. Komponenten) verfügbar.

Es wird empfohlen, einen Mindestabstand von 400 mm zwischen der Ultraschallschweißung und dem angrenzenden Element (z.B. Kontaktteil) einzuhalten, um Schalleinflüsse zu vermeiden.

Abbildung 7-26 zeigt die Systemgrenze einer Splice-Verbindung (Endknoten):

Abb. 7-26: Skizze einer ultraschallgeschweißten Splice-Verbindung in Form eines Endknotens



7.5.1.2 Beschreibung der Verbindung zu anderen Funktionsbaugruppen

Ein Splice dient primär als Verbindung zwischen Leitungen (siehe Kapitel 7.1), die ihrerseits an andere Baugruppen anschließen. Die Herstellung des Bauteils „Splice“ erfolgt beim Konfektionär. Die Splice werden im Rahmen der Leitungssatzfertigung mit geeigneten Maschinen hergestellt.

Entscheidend für die Produktion des Splice ist, dass beim Schweißen des Splice die Güte des Leitermaterials gesichert ist (Schweißbarkeit), dass die Isolierung an den Leitenden vorschriftsgemäß entfernt wurde und dass die Leitungen schließlich regelkonform in die Maschine eingelegt werden. Gegebenenfalls kommt noch ein Schrumpfschlauch oder andere Abdichtung hier hinzu. Bis auf die Güte des Leiters handelt es sich hier um nicht-elektrische Eigenschaften des Splice.

Der typische Durchgangswiderstand einer Splice-Verbindung liegt im Neuzustand abhängig von der Baugröße im Bereich von $10^{-4} \Omega$.

Eine Ausfallart einer geschweißten Kontaktierung kann demgemäß durch die relative Erhöhung (z.B. um einen Faktor 2 gegenüber dem Neuzustand) des Durchgangswiderstands oder das Überschreiten eines (ebenfalls baugrößenabhängigen) absoluten Grenzwerts beschrieben werden.

7.5.2 Verfahren Widerstandsschweißen (WSS)

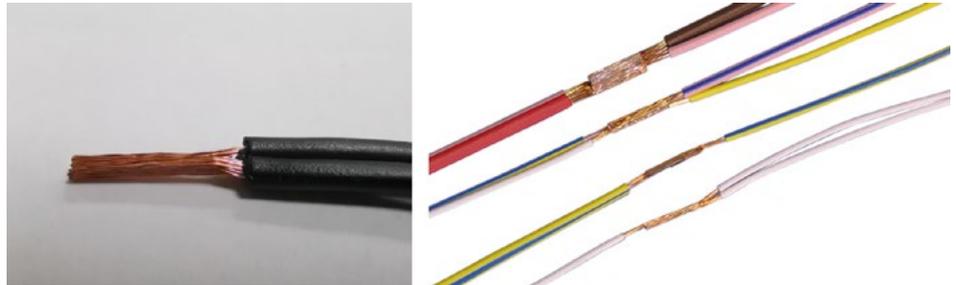
Das Widerstandsschweißen wird gemäß DIN 1910 ([29], [30]) und DIN EN 14610 ([31]) den Pressschweißverfahren mit dem Energieträger elektrischer Strom zugeordnet. Das Verfahren ist als Pressschweißen definiert, wobei die zum Schweißen erforderliche Wärme durch den Widerstand und den dadurch resultierenden Strom in der Schweißzone erzeugt wird.

Der Schweißstrom wird applikationsbedingt festgelegt und kann von wenigen kA bis zu 50kA und mehr betragen. Die Übertragung der Energie findet zwischen zwei Elektroden statt (Ober- und Unterelektrode), welche der Geometrie des herzustellenden Splice angepasst sind. Die benötigte Energie zum Kompaktieren/Verschweißen eines Splice ist bei gleichen Geometrien des Splice (Höhe, Breite, Länge) also Querschnitten und gleichen Materialien immer gleich. Durch das Einbringen der Wärme wird das Leitungsmaterial aufgeweicht und es wird, in Verbindung mit dem Schweißdruck, die stoffschlüssige Verbindung hergestellt.

Diverse nationale und herstellerspezifische Normen und Spezifikationen beschreiben die Anforderungen und Testmethoden zur Herstellung von Splices.

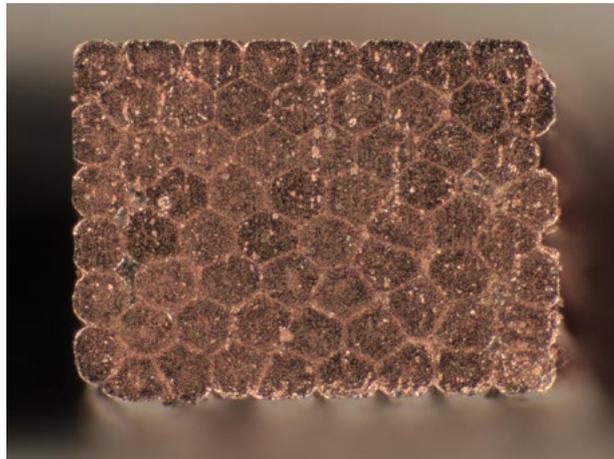
Beispielhafte Splice-Verbindungen sind in Abbildung 7-27 dargestellt.

Abb. 7-27: Beispielhafte widerstandsgeschweißte Splices: Endknoten links, Durchgangsknoten rechts



In Bezug auf die Physik der Kontaktstelle handelt es sich um eine stoffschlüssige Verbindung (siehe Abbildung 7-28: Widerstandsgeschweißte Splice-Verbindung) Es handelt sich um eine metallurgische Verbindung durch intermolekulare Kräfte, die resultierende Verbindung ist größtenteils stoffschlüssig, wie durch mikroskopische Aufnahme erkennbar ist.

Abb. 7-28: Widerstandsgeschweißte Splice-Verbindung



Vorteile des Widerstandsschweißens liegen beispielsweise in einer metallischen Verbindung hoher Qualität mit exzellenten elektrischen Eigenschaften in der Verbindungszone, auch für verschiedene Materialdicken. Hierbei ist eine Verunreinigung durch Fette, Öle oder Fremdpartikel, etc. unerheblich für die Qualität des Splices. Ebenso ist das Querschnittsverhältnis der Kabel untereinander nicht so bedeutend wie bei anderen Schweißverfahren. Beim Erstellen eines Splice wird kein Zusatzmaterial (z.B. Lötzinn, Schutzgas) benötigt.

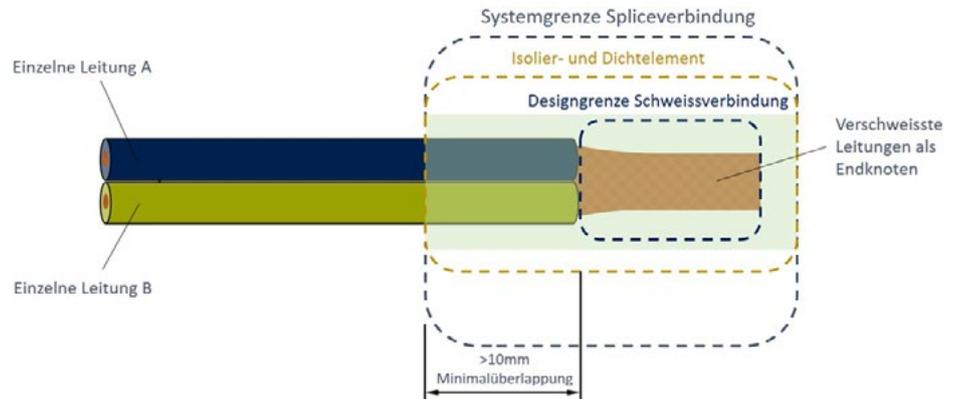
Entscheidend für die Qualität stoffschlüssiger Verbindungen ist die Auswahl von Materialien mit geeigneter Leitfähigkeit.

7.5.2.1 Funktionsbaugruppe und Systemgrenze

Bei der Definition der Systemgrenzen ist sicherzustellen, dass einerseits auch Bereiche, die durch Schweißprozess und Isolationsprozess signifikant beeinflusst werden (insbesondere durch thermische Beeinflussung), miterfasst werden, andererseits dürfen keine Lücken oder Überschneidungen zu angrenzenden Systemen entstehen. Grundsätzlich kann die Belastung eines Splice (durch Strom) nicht isoliert betrachtet werden, es muss die Interaktion mit Leitungen, Aggregaten, Dichtungen etc. mitbetrachtet werden. Felddaten bezüglich der

Zuverlässigkeit von Splice-Verbindungen sind höchstens auf einer umfassenderen Ebene (z.B. Komponenten) verfügbar.
Die Betrachtungsgrenzen für widerstandsgeschweißte Splice-Knoten sind in Abbildung 7-29 dargestellt.

Abb. 7-29: Skizze einer widerstandsgeschweißten Splice-Verbindung in Form eines Endknotens



7.5.2.2 Beschreibung der Verbindung zu anderen Funktionsbaugruppen

Ein Splice dient primär als Verbindung zwischen Leitungen (siehe Kapitel 7.1), die ihrerseits an andere Baugruppen anschließen. Die Herstellung des Bauteils „Splice“ erfolgt beim Konfektionär. Die Splice werden im Rahmen der Leitungssatzfertigung mit geeigneten Maschinen hergestellt.

Entscheidend für die Produktion des Splice ist, dass beim Schweißen des Splice die Güte des Leitermaterials gesichert ist (Schweißbarkeit), dass die Isolierung an den Leitenden vorschriftsgemäß entfernt wurde und dass die Leitungen schließlich regelkonform in die Maschine eingelegt werden. Gegebenenfalls kommt noch ein Schrumpfschlauch oder andere Abdichtung hier hinzu. Bis auf die Güte des Leiters handelt es sich hier um nicht-elektrische Eigenschaften des Splice.

Der typische Durchgangswiderstand einer Splice-Verbindung liegt im Neuzustand abhängig von der Baugröße im Bereich von $10^{-4} \Omega$.

Eine Ausfallart einer geschweißten Kontaktierung kann demgemäß durch die relative Erhöhung (z.B. um einen Faktor 2 gegenüber dem Neuzustand) des Durchgangswiderstands oder das Überschreiten eines (ebenfalls baugrößenabhängigen) absoluten Grenzwerts beschrieben werden.

7.5.3 Best Practice und Lifecycle für Splice-Verbindungen

Für den Lifecycle von Splices werden folgende Phasen unterschieden, in denen verschiedene Belastungen und Forderungen an die Verbindungen gestellt werden:

- Design
- Materialauswahl
- Materiallagerung und -transport, Materiallogistik
- Konfektion: Herstellung der Verbindung
- Konfektion: Isolation der Verbindung
- Montage und Produktion: Integration ins Fahrzeug, Nacharbeit in der Produktion
- Kundenbetrieb des Fahrzeugs
- Instandsetzung und Reparatur, Nacharbeit im Fahrzeugbetrieb
- Demontage und Entsorgung
- Wiederverwendung

Zusätzlich werden allgemeine Anforderungen an Splices gestellt, die unabhängig von Phasen generell zu erfüllen sind.

7.5.3.1 Design

Die Auslegung der Splice-Verbindungen soll dergestalt erfolgen, dass diese robust gegenüber den typischen Belastungen während des Fahrzeugbetriebs sind. Eine (physische) Beeinträchtigung der mechanischen Verbindung z.B. durch Vibrationen, ist immer zu verhindern, z.B. durch entsprechende Befestigung.

Die zulässigen Endknoten können Tabelle 7-27 entnommen werden. In Bezug auf die akzeptierten Kombinationen von verschiedenen Nennquerschnitten der miteinander zu verschweißenden Leitungen sei auf die Spezifikationen der Automobilhersteller (OEM) verwiesen.

Bei der Knotendefinition muss auf ein robustes Design geachtet werden. Symmetrische Knotenaufbauten sind generell zu vermeiden (z.B. "side splices"). Die Empfehlungen für das Design der hier betrachteten Splice-Verbindungen können der folgenden Tabelle entnommen werden.

Tabelle 7-27: Empfehlungen für das Design für Splice-Verbindungen

Endknoten	Klasse I ultraschallgeschweißter Splice	Klasse II widerstandsgeschweißter Splice
Anzahl Leitungen	Prozessbedingt keine Vorgabe, Empfehlung Handling-bedingt max. 8	Prozessbedingt keine Vorgabe, Empfehlung Handling-bedingt max. 8
Querschnittsverhältnis	Empfehlung max. 3:1 Kleinsten Leiterquerschnitt 9% (Gesamtquerschnitt <5mm) bzw. 7% (Gesamtquerschnitt ≥5mm) vom Gesamtquerschnitt	Empfehlung max. 3:1 Kleinsten Leiterquerschnitt 9% (Gesamtquerschnitt <5mm) bzw. 7% (Gesamtquerschnitt ≥5mm) vom Gesamtquerschnitt

7.5.3.2 Material

Die Leitungen werden gemäß entsprechenden, von den OEMs vorgeschriebenen Prüfungen bzw. Spezifikationen qualifiziert (siehe hierzu auch Kapitel 7.1 Elektrische Leitungen). Für jede Anwendung muss die Kompatibilität der Leitungsauswahl zusammen mit der Verbindungstechnologie zu Projektbeginn auf Verträglichkeit und Verarbeitbarkeit geprüft werden. Für jede Anwendung passend sind Maschinentyp, Schweißwerkzeuge, Schweißmodus auszuwählen. Die einzelnen Freigaben sind rückverfolgbar zu dokumentieren.

Die Eigenschaften der Leitungen sollten sich bestenfalls während der Produktion nicht ändern, ggf. sind die Freigabeproofungen zu wiederholen.

Angaben zu Materialien für Isolier- und Dichtelemente sind in Kapitel 7.5.9 beschrieben. Die Abisolierlänge ist abhängig von der Applikation, dem Querschnitt, der Werkzeuggeometrie der verarbeitenden Schweißanlage und dem Isolier- und Abdichtprozess. Innerhalb einer Splice-Verbindung muss eine einheitliche Abisolierlänge verwendet werden. Das Entfernen der Isolierung darf nur auf Teilabzug erfolgen. Hierbei dürfen Einzeladern nicht übermäßig beschädigt und nicht abgetrennt werden.

Im Automobilbereich beschränkt man sich im Allgemeinen darauf Kupfer (unlegiert und legiert) und Aluminium (unlegiert und legiert) miteinander zu verschweißen, z.B. Al + Al, Cu + Cu, Al + Cu, Cu-Leg. + Cu-Leg. und Cu-Leg. + Cu.

Die Betrachtung von Aluminium-Leitungen wird hier zurückgestellt und ggf. in einer späteren Auflage dieses Technischen Leitfadens miteinbezogen.

Splice mit unterschiedlichen Leitermaterialien (z.B. Aluminium und Kupfer) werden im Folgenden hier nicht betrachtet.

Am besten geeignet für geschweißte, elektrische Leitungen sind reine, blanke, unbeschichtete Kupferleitungen (Cu-ETP, Cu-OFE). Das Kupfer soll eine Reinheit von Minimum 99.9% aufweisen und sauerstofffrei sein. Verunreinigungen mit Blei (Pb) oder eine Zinnbeschichtung sind nicht erlaubt. Die Menge an Extraktionsölen und Additiven auf und zwischen den Einzeldrähten soll minimal sein.

Für erweiterte Anforderungen z.B. an die Festigkeit der Leitung, werden Kupferlegierungen eingesetzt (z.B. CuAg, CuMg, CuSn). Diese Art von Verbindung wird in der vorliegenden Version des Technischen Leitfadens nicht berücksichtigt.

7.5.3.3 Materiallagerung und -transport, Materiallogistik

Anforderungen an die Lagerung beziehen sich hier auf den Zeitraum bevor der Splice geschweißt wird. Hier ist das Alter der verwendeten Leitungen relevant. Die Art der Lagerung und entsprechende Lagerfristbeschränkungen sind zu beachten. Hohe Lagertemperaturen und eine lange Lagerdauer haben einen negativen Einfluss auf die Schweißbarkeit der Leitung.

Verweis auf ZVEI TLF 0100 – Verwendungshinweise für Automotive Leitungen.

Beim Transport ist sicherzustellen, dass keine Beschädigungen an den verwendeten Leitungen und an den gefertigten Splice auftreten. Dazu sind ein ordnungsgemäßer Schutz bzw. Verpackung nach geltenden Vorschriften der Leitungs-Hersteller, Konfektionäre und OEM zu gewährleisten.

7.5.3.4 Konfektion: Herstellung der Verbindung

Splice müssen entsprechend den Richtlinien, Vorschriften und Verfahrensanweisungen von Maschinen-Herstellern, Konfektionären und Herstellern (OEM) gefertigt und gehandhabt werden. Des Weiteren müssen vor Ort gültige Gesetze und Regularien sowie Auflagen eingehalten werden.

Bei der Vorbereitung der Leitungen und danach der Knotenerstellung ist korrektes und sauberes Arbeiten zwingend. Die nachfolgenden Punkte sollen jederzeit eingehalten werden.

- Verhindern von Verschmutzungen der zu schweißenden Leitungen
- Produktion nur mit einwandfrei gewarteten und freigegebenen Betriebsmitteln
- Jeder Produktionsschritt soll protokolliert werden. Eine automatische Protokollierung über eine durchgängige Datenerfassung ist vorzuziehen.
- Kontrolle des Leitungsmaterials auf Alter und Zustand vor Produktionsbeginn
- Überprüfen des vorhergehenden Arbeitsschrittes vor der Weiterverarbeitung
- Veränderungen der Produktionsparameter darf nur durch ausgebildetes Personal erfolgen. Alle Änderungen sind zu protokollieren.
- Hilfsmittel (Einlegehilfen, etc.) sollen immer eingesetzt werden falls sinnvoll. Werden Hilfsmittel eingesetzt, dann sollen sie "nicht ausschaltbar" und soweit möglich "manipulationsicher" sein.

Die produzierten Verbindungen sind bei Produktionsstart und danach regelmässig zu überprüfen. Sämtliche Prüfungen sind zu dokumentieren (gemäß eingangs erwähnten Richtlinien).

Die verwendeten Werkzeuge und Verschleißteile müssen für eine spezifikationsgemäße Erstellung der Splice geeignet sein. Über die Eignung der Werkzeuge sollten sich die Vertragsparteien verständigen.

In der Produktion müssen beim Einlegen der Leitungen in die Schweißmaschine die Einlegevorschriften des Maschinenherstellers oder des OEM berücksichtigt werden. Speziell symmetrische Splice sind durch Vorrichtungen (oder auch softwareseitig) an der Schweißmaschine, oder ggf. durch entsprechendes Splice-Design zu vermeiden.

Beschädigungen der Splice während der Konfektion sind grundsätzlich zu vermeiden

Identifizierung:

Für jeden Splice ist für die Rückverfolgbarkeit eine eindeutige Identifizierung zu ermöglichen.

Die Details und der Umfang der Rückverfolgbarkeit sind mit dem jeweiligen OEM abzustimmen.

Geometrie:

OEM-Spezifikationen bzgl. der geometrischen Dimensionen (z.B. Breite, Höhe und Toleranzen) müssen berücksichtigt werden. Darüber hinaus werden seitens der OEM Mindestanforderungen an Belastungen durch Kräfte (Zug, Schälten etc.) für Splice-Verbindungen vorgegeben.

7.5.3.5 Konfektion: Isolation der Verbindung

Mechanischer Schutz wird durch eine Umhüllung (Schrumpfschlauch, Tapen, etc.) erreicht. Beim Einsatz im Feuchtraum ist eine gedichtete Splice-Verbindung (z.B. Schrumpfschlauch mit geeignetem Innenkleber) zu verwenden. Im Trockenraum ist ein Umwickeln mit Isolierklebeband oder ein Schrumpfschlauch ohne Innenkleber ausreichend.

An äußeren Einflüssen sind noch äußere Medien (jeweils in den Aggregatzuständen Gas, Flüssigkeit, Partikel), Temperatur- und Schwingungsbelastung zu berücksichtigen.

Isolation: Funktionen der Funktionsbaugruppe

1. Dichtigkeit zur Umwelt
2. Dichtigkeit zu Leitungen / Isolierung der Kontaktstellen
3. Mechanische Festigkeit der Schweißverbindung
4. Beständigkeit gegenüber chemischen Reagenzien

Das Dichtungs- und Isolationselement (Schrumpfschlauch, Tape) wird gemäß OEM-Spezifikationen eingesetzt. In diesen wird auf die Anforderungen (z.B. Dichtheits- und Temperaturklassen) verwiesen.

7.5.3.6 Montage und Produktion: Integration ins Fahrzeug, Nacharbeit in der Produktion

Beschädigungen der Splice während der Montage oder Produktion sind grundsätzlich zu vermeiden. Tritt dennoch eine Beschädigung an einem Splice auf, ist der betroffene Leitungssatz vollständig durch ein Neuteil zu ersetzen.

Nachbesserungen von Splice-Verbindungen nachgelagert zum Konfektionär sind nicht erlaubt. Beschädigte Leitungssätze müssen vollständig durch neue Leitungssätze ersetzt werden. Bei Ersatz ist anschließend eine Funktionsprüfung durchzuführen.

7.5.3.7 Kundenbetrieb des Fahrzeugs

Durch den Betrieb des Fahrzeugs beim Kunden ergeben sich über das Fahrprofil des Kunden und die Einflüsse der Umgebung auf das Fahrzeug Anforderungen an die Splice-Verbindungen. Diese Anforderungen unterscheiden sich je nach Hersteller.

7.5.3.8 Instandsetzung und Reparatur, Nacharbeit im Fahrzeugbetrieb

Instandsetzung, Reparatur und Nacharbeit von elektrischen Splice-Verbindungen am endgeprüften Leitungssatz sind nicht erlaubt. Bei Ersatz eines Bauteils oder Nacharbeit ist anschließend eine Funktionsprüfung durchzuführen.

Die hier in diesem Dokument vorgestellte Ausfallrate kann für Nacharbeiten im Fahrzeugbetrieb nicht herangezogen werden.

7.5.3.9 Anforderungen an Demontage und Entsorgung

Die in den Verarbeitungsvorschriften der Hersteller festgelegte Vorgehensweise zur Demontage eines Leitungssatzes ist einzuhalten.

7.5.3.10 Anforderungen an die Wiederverwendung

Die Wiederverwendung von Splice-Verbindungen wird ausdrücklich ausgeschlossen.

7.5.4 Fehlermodell für Splice-Verbindungen

Die Funktion einer Splice-Verbindung ist es, eine dauerhafte elektrische Verbindung zu gewährleisten. Als Kriterium für die Zuverlässigkeit wird insbesondere der Übergangswiderstand herangezogen. Steigt dieser an (z.B. durch Bildung von Oxidschichten, mechanische Lockerung), ist die Funktion der Verbindung beeinflusst, ein offener Kontakt entspricht einem unendlich großen Übergangswiderstand. Zuverlässigkeit heißt hier, dass der Übergangswiderstand der Splice-Verbindung mindestens für eine bestimmte Zeit unter einem vorher festgelegten Grenzwert bleibt.

Bei Fehlern ist zwischen den eigentlichen Fehlerursachen und den Fehlerbildern, wie sich die Fehler bemerkbar machen, zu unterscheiden:

Ein Fehlerbild ist der erhöhte Widerstand, was durch Messung bzw. ersichtliche Korrosion festgestellt werden kann, bis zur Leitungsunterbrechung (Wackelkontakt oder dauerhaft), was sich durch teilweises bis komplettes Auseinanderfallen des Splice oder Abtrennung einzelner Leitungen bemerkbar machen kann. Ein davon unabhängiges Fehlerbild ist ein Kurzschluss, der durch zerstörte Isolation, Kriechströme oder physisches Eindringen eines Drahtes ersichtlich wird.

Ursachen für Fehler können elektrischer, chemischer, thermischer und mechanischer Natur sein bzw. eine Kombination dieser Effekte. Elektrische Überlastung durch zu große Stromstärken oder direkte thermische Überlastung können zur Schädigung der Isolation bis zum Schmelzen/Verglühen des Splices führen. Chemische Ursachen sind Korrosion, durch Feuchtigkeit in der Umgebung (klimatisch) oder durch Eindringen von Feuchtigkeit, Säuren, Laugen. Ebenso sind Verbindungsstellen potenzielle Lokalelemente, d.h. es sind galvanische (elektrochemische) Effekte möglich. Mechanische Fehlerquellen sind durch Vibrationen (Schwingungsermüdung) oder inzidentelle Schlageinwirkung (Splice zerschlagen durch z.B. Schlagloch) gegeben, durch Reibung, Zugkräfte, Schälkräfte (Abschälen), Quetschen, Aufscheuern durch scharfkantige Elemente im Verlegeweg oder mechanisches Eindringen eines Drahtes. Ebenso gibt es thermo-mechanische Ermüdungs-Effekte, z.B. durch regelmäßigen Kälte-Wärme-Übergang können sich Verbindungsstellen lockern.

Diese Alterungsmechanismen, die einen Einfluss auf die Zuverlässigkeit des geschweißten Splice haben können, sind in nachfolgender Tabelle 7-28 aufgeführt. Verschiedene Ursachen für Degradation können sich dabei auch überlagern.

Tabelle 7-28: Degradationsmechanismen in Splice-Verbindungen

Material	Mechanismus
Leiter (Metalle), insbesondere am Stoffschluss	<ul style="list-style-type: none"> • Kriechen • Chemische Reaktionen (Korrosion) • Ermüdung • Kontaminationen • Schälen, Abrasion • Brückenbildung
Leitungsisolierung (Kunststoff)	<ul style="list-style-type: none"> • Chemische Reaktionen (Oxidation) • Verhärtung, Versprödung • Diffusion • Zustandsänderung (Schmelzen) • Abrasion
Dichtung, Schrumpfschlauch, Tape (Kunststoff, Kleber), Lackierung (Lack)	<ul style="list-style-type: none"> • Chemische Reaktionen (Oxidation) • Verhärtung, Versprödung • Diffusion • Zustandsänderung (Schmelzen) • Abrasion

Da Splice-Verbindungen als unlösbar konzipiert sind und da gewisse physikalische Effekte (auch) in Ruhezeiten ablaufen, sind die Alterungsmechanismen auch außerhalb von Betriebszeiten zu betrachten. In diesen Standzeiten laufen Temperaturwechsel-Effekte, chemische Effekte und Effekte durch relative Feuchtigkeit ab. Dagegen spielen rein mechanische (wie Vibration), und thermale(-elektrische) Mechanismen im Ruhezustand keine Rolle.

7.5.5 Ausfallrate von Splice-Verbindungen

Gemäß der Diskussion in Kapitel 6.4 erfolgt eine Bestimmung der Ausfallrate für Splices hier mithilfe des FIDES [5]. Die hierdurch bestimmte Ausfallrate wird anschließend durch beschleunigte Tests validiert.

Die allein messtechnische Bestimmung (auch mithilfe von Beschleunigungsmethoden) oder die Bestimmung durch Auswertung von Feldausfällen (spezifische Beobachtungen liegen nicht vor) ist bei der geringen Anzahl an Ausfällen schwierig. Die erforderliche statistische Signifikanz würde eine zu große Stichprobengröße bzw. eine zu lange Mess-/ Beobachtungsdauer erfordern.

Die allgemeine Methodik der FIDES ist in Kapitel 6.4 beschrieben. Im Folgenden werden nur für Splice spezifische Aspekte dargestellt. Dabei wird eine Systemlösung betrachtet, d.h. hier eine Splice-Verbindung (USS oder WSS) geschweißt mit einer (repräsentativen) Schweißanlage mit den entsprechenden Einrichtungen zur Prozessüberwachung bzw. Bedienhilfen. Von den elektronischen Komponenten der FIDES kommt den Splice-Verbindungen der Bereich der „connectors“ am nächsten, auf den im Folgenden aufgebaut wird. Als Repräsentant wird ein sogenannter Referenzsplice betrachtet, von dem ausgehend Ausfallraten verwandter Splices (z.B. bei geänderter Leitungsanzahl) mithilfe der im Kapitel 7.5.6 beschriebenen Formeln bestimmt werden können.

Zu den in Kapitel 7.5.4 gelisteten Fehlerursachen existieren verschiedene Modelle, bei denen die Ursachen getrennt betrachtet werden. Die für Splice-Verbindungen im Automobil relevanten Ausfallmechanismen und Modelle, die in der FIDES angesetzt werden, sind Tabelle 7-29 zu entnehmen. Die konkreten Formeln folgen in Tabelle 7-30.

Tabelle 7-29: Fehlerursachen und deren Modellierung gemäß FIDES [5]

Fehlerursache	Physics of Failure-Modell
Thermo-elektrisch (Π_{Therm})	Potenzgesetz x Arrhenius-Beschleunigungsmodell
Mechanisch (Versprödung/Ermüdung durch Vibration)	Basquin-Gesetz / Coffin-Manson-Gleichung
Thermo-mechanisch (Relaxation, Temperatur-Lastwechsel)	Norris-Landzberg-Korrektur der Coffin-Manson-Gleichung
Feuchte-chemisch (Relative Humidity)	Peck-Modell (spezielles Potenzgesetz x Arrhenius-Beschleunigung)
Chemisch	kein physikalisches Modell in FIDES, Punktebewertung nach Fragenkatalog

Anpassung von Π_{chem} , Π_{TCy} , Π_{RH} und Π_{mech} für einen Schrumpfschlauch

Es ist meist sinnvoll und auch üblich Splice mit einem Schrumpfschlauch (heat shrink) mit Innenkleber zu versiegeln. Die Funktionen des Schrumpfschlauchs,

- a) gegenüber der Umwelt abzudichten (insbesondere Schutz gegen chemische Reagenzien und Isolation von Kontaktstellen) und
- b) mechanische Festigkeit der Schweißverbindung

wird in dem FIDES nicht abgebildet. Die Funktion a) betrifft in Π_{chem} den Faktor Π_{prot} für das „Product protection level“, des Weiteren Π_{TCy} (Temperaturwechsel) und Π_{RH} (Feuchte-chemisch) und b) die mechanische Alterung Π_{mech} . Als Anpassung wird daher bei Dichtung durch einen Schrumpfschlauch mit Innenkleber vorgenommen:

- a) in Π_{chem} den Beitrag Π_{prot} auf 0,5 zu setzen (als Mittelung zwischen hermetischem Abschluss mit $\Pi_{\text{prot}} = 1$ und nicht hermetisch mit $\Pi_{\text{prot}} = 0$), d.h. Π_{chem} wird halbiert,
- b) Π_{TCy} zu halbieren,
- c) Π_{RH} zu halbieren und
- d) in Π_{mech} den Beitrag $Gmrs$ mit einem Faktor 0,5 zu multiplizieren, d.h. da $Gmrs$ quadratisch eingeht wird Π_{mech} mit einem Faktor 0,25 multipliziert.

Was thermo-elektrische Effekte betrifft ist die Eigenschaft der Dichtung die Wärmeabgabe des Splice zu verringern nachteilig, umgekehrt wird der Einfluss von Wärme von außen ebenfalls verringert. Daher wird hier keine Veränderung von $\Pi_{\text{therm(o-electrical)}}$ gegenüber einem ungedichteten Splice vorgenommen.

Alternativ könnte für die Schutzkomponente Schrumpfschlauch eine eigene Ausfallrate bestimmt werden, die mit der Ausfallrate für den Splice genau verrechnet werden kann. Es stellt sich heraus, dass die hier verfolgte vereinfachte Anpassung von Π_{chem} , Π_{TCy} , Π_{RH} und Π_{mech} quantitativ eine ähnliche Reduzierung der Ausfallrate bewirkt.

An weiteren Einflussgrößen auf die Verbindungsqualität lassen sich in einer ersten Einteilung die Bereiche Entwurf und Produktion abgrenzen. Für die weiteren Details sei auf Kapitel 7.5.3 „Best Practice und Lifecycle für Splice-Verbindungen“ verwiesen.

Diese Einflussgrößen fließen im Rahmen des Audits in die Faktoren $\Pi_{\text{Ruggedising}}$ (insbesondere Entwurf), Π_{PM} (Qualität) und Π_{Proc} (insbesondere Produktion) ein.

7.5.6 Konkrete Anwendung der FIDES auf Splice-Verbindungen

Als Basis für die Ermittlung der Ausfallrate wird das FIDES Modell [5] für Verbinder (connectors) herangezogen, da spezifische Felddaten für Splice-Verbindungen nicht mit ausreichender Verlässlichkeit zur Verfügung stehen. Zudem lassen sich die unterschiedlichen Einflüsse in diesem Modell einzeln betrachten. Dieses Modell ist allerdings nicht auf Basis von Splice-Verbindungen für die Automobilindustrie entwickelt worden. Das Basis-Modell des FIDES [5] (siehe auch Kapitel 6.4) bleibt unverändert. Nur die für die Eigenschaften der Splice-Verbindungen in Automobilen relevanten Faktoren werden modifiziert:

- **Item family:**
Als Device-Typ wird in der FIDES für Splice-Verbindungen die Klasse „connectors“ für die Entwicklung eines „Evaluation Guide Calculation Sheets“ zugrunde gelegt. Modifikationen sind hier im Bereich des „Connection Type“, da hier kein Stoffschluss vorgesehen ist und im Bereich des elektrischen Temperaturanstiegs notwendig.
- **Basisausfallrate:**
Es ergeben sich insbesondere folgende nachgelagerte Anpassungen des FIDES-Modells bei Splice-Verbindungen. Als erstes wird $\lambda_{\text{physical}}$ betrachtet, das im Wesentlichen die physikalischen Fehlerursachen der Splice-Verbindung abbildet. Der Charakter einer stoffschlüssigen, metallischen Verbindung geht allerdings in die FIDES bisher nur indirekt ein und muss entsprechend modelliert werden. Für die Basis-Ausfallrate gilt hier:

$$\lambda_{0_Splice} = \lambda_{\text{Type}} \times \prod_{\text{Connection}} \times \prod_{\text{Contact}} \times \prod_{\text{Cycle}}$$

- λ_{Type} :
Im Modell für eine Splice-Verbindung gilt:

$$\lambda_{\text{Type}} = 0.05$$

- $\prod_{\text{connection}}$:
Der Faktor $\prod_{\text{Connection}}$ (in der FIDES auch als \prod_{report} bezeichnet) ist nach Typ zu setzen (siehe FIDES [5], S. 158, für Kraftschluss, Löten, Verdrillen). Für stoffschlüssige Verbindungen (substance-locking) wie Splice-Verbindungen ist hier eine Annahme zu treffen. Aufgrund des Oberflächenanteils von ca. 80% durch den Schweißprozess liegt eine voll-stoffschlüssige metallurgische Verbindung vor, die besser als eine kraftschlüssige Verbindung (mit $\prod_{\text{Connection}} = 1,0$ gemäß FIDES [5]) zu bewerten ist. Daher wird hier aufgrund von vergleichenden Versuchen (siehe Kapitel 7.5.8) für geschweißte Splice-Verbindungen ein $\prod_{\text{Connection}} = 0,5$ angenommen.

- \prod_{Contact} :
Für die Abhängigkeit der Basis-Ausfallrate von der Anzahl der Leitungen gilt:

$$\prod_{\text{Contact}} = (N_{\text{Contact}})^{0.5}$$

Hierbei ist N_{Contact} die Anzahl der Leitungen im Splice.

- **Steckzyklen:**
Da Splice unlösbar sind, wird die Anzahl der Steckzyklen gemäß FIDES durch den Wert

$$\prod_{\text{Cycles}} = 0.2$$

ersetzt.

- Die physikalischen Beschleunigungsformeln und die führenden prozentualen Gewichtungsfaktoren für Konnektoren finden sich in Tabelle 7-30. Die Formeln sind für einen nicht gedichteten Splice dargestellt. Eine Anpassung der Formeln bei Verwendung eines Schrumpfschlauchs zur Abdichtung wird am Ende von Kapitel 7.5.5 beschrieben.

Tabelle 7-30: Physikalische Beschleunigungsfaktoren für Konnektoren, die für Splices gelten.

Factors contributing to physical stresses

$\Pi_{Thermal}$	In an operating phase: $= 0.58 \times e^{11604 \cdot 0.1 \cdot \left[\frac{1}{273+T_0} - \frac{1}{273+T_{board} - ambient} + \Delta T \right]}$
	In a non-operating phase: $= 0$
Π_{TCy}	$= 0.04 \times \left(\frac{24 \cdot N_{annual-cy}}{2 \cdot t_{annual}} \right) \times \left(\frac{\min\{\Theta_{cy}; 2\}}{2} \right)^{1/3} \times \left(\frac{\Delta T_{cycling}}{20} \right)^{1.9} \times e^{1414 \cdot \left[\frac{1}{273+20+T_0} - \frac{1}{273+T_{max-cycling}} \right]}$
$\Pi_{Mechanical}$	$= 0.05 \times \left(\frac{G_{RMS}}{0.5} \right)^{1.5}$
Π_{RH}	$= 0.13 \times \left(\frac{RH_{ambient}}{70} \right)^{4.4} \times e^{11604 \cdot 0.8 \cdot \left[\frac{1}{273+T_0} - \frac{1}{273+T_{board} - ambient} \right]}$
$\Pi_{Chemical}$	$= 0.20 \times \Pi_{sal} \times \Pi_{envir} \times \Pi_{zone} \times \Pi_{prot}$

where

- $RH_{ambient}$ humidity associated with a phase (%)
Note: The relative humidity at splices at an equipment interface may be different from the relative humidity at other items in the equipment.
- $T_{board-ambient}$ average board/ambient temperature during a phase (°C)
- $\Delta T_{cycling}$ amplitude of variation associated with a cycling phase (°C)
- $T_{max-cycling}$ maximum temperature during a cycling phase (°C)
- $N_{annual-cy}$ number of cycles associated with each cycling phase over a year (cycles)
- Θ_{cy} cycle duration (hours)
- G_{RMS} vibration amplitude associated with each random vibration phase (Grms)
- $T_{working} = T_{board-ambient} + \Delta T$

Der hier verwendete Exponent 1,9 in der Norris-Landzberg-Korrektur der Coffin-Manson-Gleichung für das Temperature Cycling für Lötverbindungen wurde wegen des geringen Einflusses auf Nachkommastellen der Ausfallrate beibehalten. Bis auf Π_{Chemi} sind diese Formeln spezifisch für Konnektoren.

- Bei den Faktoren für $\Pi_{induced}$ gilt für Konnektoren generell

$$\Pi_{placement} = 1$$

$$C_{sens} = 4,4$$

und man erhält für Splice durch Auswertung des Kriterienkatalogs der FIDES für die Anwendungssituation (Automobil, nicht direkt am Motor)

$$\Pi_{application} = 5,261.$$

Falls der Splice beispielweise direkt am Motor verbaut wäre, würde sich der Wert ändern auf

$$\Pi_{\text{application}} = 5,570.$$

Durch Messungen kann λ_{type} bzw. $\Pi_{\text{connection}}$ (bisher von „Connectors“ aus der FIDES entlehnt) für Splice-Verbindungen abgesichert werden; siehe Kapitel 7.5.8.

Für die Audit-Faktoren ergeben sich folgende Anpassungen des FIDES-Modells:

- Π_{PM} bestimmt sich über Zertifizierungen von Schweißanlagenhersteller und Konfektionär. Für $\text{QA}_{\text{component}}$ gelten gemäß FIDES hier als spezifische Kriterien:

$\text{QA}_{\text{component}}$ factor:

Component quality assurance level	Position relative to the start of the art	$\text{QA}_{\text{component}}$
Qualification according to one of the following standards: ESCC 340x level B, NASDA-QTS-xxxx class, 1, ...	Much higher	3
Qualification according to one of the following standards: Telcordia GR1217-CORE, MIL-C-xxxxx, MIL-DTL-xxxx ARINC 600 & 80x, AECMA, ...	Higher	2
Conforming with one of the EIA, IEC, SAE, BS standards	Equivalent	1
No information	Lower	0

- Was das Audit für $\Pi_{\text{Proc(ess)}}$ betrifft, so sind für Splice-Verbindungen von den 7 FIDES Phasen nur 5 Phasen relevant. Die Gewichte der nicht relevanten Phasen „Manufacturing Board/Assembly“ und „Integration into System“ werden auf die Phase „Integration into Equipment“ übertragen. Damit ergibt sich folgende Gewichtung:

Tabelle 7-31: Auditphasen und Ihre Anteile

PHASE	Contribution_Phase in %
Specification	8
Design	16
Manufacturing of board or subassembly	0
Integration into equipment	40
Integration into system	0
Operation and maintenance	18
Support activities	18
Summe	100

- Bei Π_{Proc} und $\Pi_{\text{Ruggedising}}$ können von den Auditfragen abhängig von den beteiligten Parteien einige Fragen entfallen. Weitere Anpassungen am Fragenkatalog wurden nicht vorgenommen.

7.5.7 Beispiel: Ausfallrate für eine spezifische Referenz-Splice-Kombination

Um eine Übertragung auf möglichst viele Splice-Varianten zu ermöglichen, wird eine Referenz definiert. Dieser Referenz-Splice ist charakteristischer Vertreter einer Klasse (siehe Kapitel 7.5). Für bestimmte Merkmale (Attribute) bzw. Parameter kann innerhalb einer Klasse (vgl. folgende Aufzählung) angenommen werden, dass die Erwartungswerte für die Zuverlässigkeit ähnlicher Splice-Knoten der Zuverlässigkeit des Referenzsplices entspricht. Als Merkmale für den Referenzsplice und seine Verwendung werden definiert:

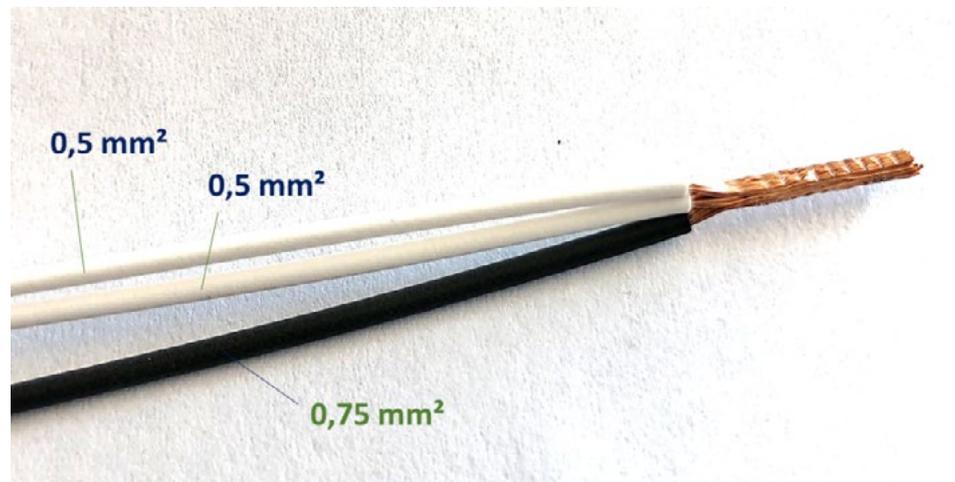
- Endknoten
- Verbindung von Cu-Leitern zu Cu-Leitern
- Leitungen: 1x 0,75mm² und 2x 0,5mm²
- Isolationskappe (eine genauere Spezifikation des Materials und der Isolationskappe ist gemäß FIDES für die FIT-Rate nicht relevant.)
- Funktion: Energieversorgung
- Einbauort: alle Bauräume außer Motorblock und Getriebe
- elektrische Belastung bis 5 A
- Betriebsprofil, bei 25°C gemäß Tabelle 6-1

7.5.7.1 Beispiel: Ausfallrate für einen ultraschallgeschweißten Splice

Für ein typisches Betriebsprofil (bei 25°C gemäß Tabelle 6-1) wird mit der FIDES für den Referenzsplice als physikalischer Anteil λ_{phys} der Ausfallrate ein Intervall von 0,040 FIT bis 0,068 FIT berechnet, wobei hier noch ein Audit zu $\Pi_{\text{ruggedising}}$ gemäß der Formel in Abbildung 6-1 näherungsweise multiplikativ eingeht, wodurch sich das Intervall ergibt.

Für $\lambda_{\text{(gesamt)}}$ ergibt sich mit den Wertebereichen für Π_{PM} und Π_{Proc} aus λ_{phys} ein Intervall von 0,020 FIT bis 1,091 FIT.

Abb. 7-30: Darstellung Referenz-Splice (ultraschallgeschweißt), dargestellt ohne Isolationskappe



Bei Berechnung mit dem Default-Wert nach FIDES für $\Pi_{\text{ruggedising}} = 1,7$ ergibt sich

$$\lambda_{\text{phys}} = 0,060 \text{ FIT}$$

und schließlich mit den Default-Werten für Π_{PM} und Π_{Proc} gemäß FIDES ein

$$\lambda_{\text{(gesamt)}} = 0,39 \text{ FIT.}$$

In Bezug auf Π_{PM} und Π_{Proc} haben sich für eine auditierte Schweißanlage die Annahmen des Kapitels 7.5.3 Best Practice und Lifecycle für Splice-Verbindungen bestätigt. Es ergibt sich

$$\lambda_{phys} = 0,051 \text{ FIT (mit auditiertem } \Pi_{Ruggedising})$$

und

$$\lambda_{(gesamt)} = 0,18 \text{ FIT (mit auditiertem } \Pi_{Ruggedising}, \Pi_{PM} \text{ und } \Pi_{Proc}).$$

Die auditierten Ausfallraten sind als obere Schranke auf zwei gültige Stellen gerundet angegeben.

Die zuvor genannten Ausfallraten beziehen sich auf einen ungedichteten ultraschallgeschweißten Splice (Klasse Ib). Für einen USS gedichtet mit Schrumpfschlauch (Klasse Ia) ergeben sich gemäß der Anpassung des FIDES (siehe Kapitel 7.5.5) als Ausfallraten vor Audit Werte für λ_{phys} von 0,021 FIT bis 0,036 FIT und für $\lambda_{(gesamt)}$ von 0,011 FIT bis 0,579 FIT.

Mit Default-Werten für $\Pi_{Ruggedising}$, Π_{PM} und Π_{Proc} erhält man

$$\lambda_{phys} = 0,032 \text{ FIT}$$

und

$$\lambda_{(gesamt)} = 0,20 \text{ FIT.}$$

Unter Einbeziehung von Audits sind beispielsweise

$$\lambda_{phys} = 0,026 \text{ FIT}$$

und

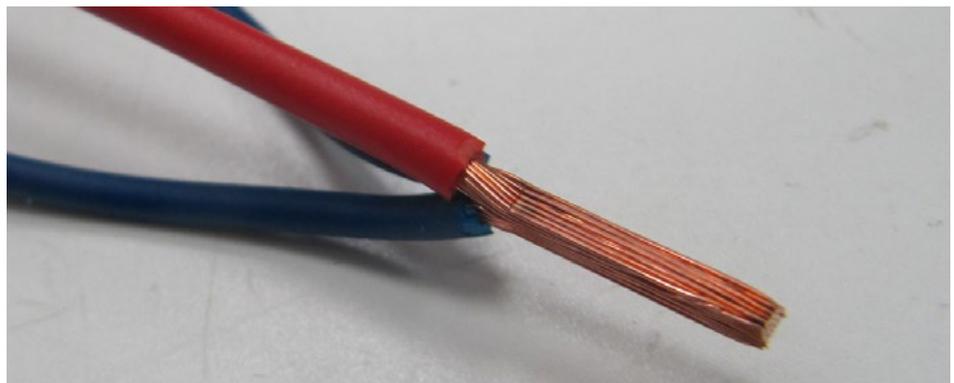
$$\lambda_{(gesamt)} = 0,094 \text{ FIT}$$

(unter zusätzlichen Annahmen für das Schrumpfschlauch-Verarbeitungsgerät) und besser möglich.

7.5.7.2 Beispiel: Ausfallrate für einen widerstandsgeschweißten Splice

Für ein typisches Betriebsprofil (bei 25°C gemäß Tabelle 6-1) wird mit der FIDES für den Referenzsplice als physikalischer Anteil λ_{phys} der Ausfallrate ein Intervall von 0,040 FIT bis 0,068 FIT bestimmt, wobei hier der Default-Wert für $\Pi_{ruggedising}$ (Einfluss von Zuverlässigkeits- und Robustheitsüberlegungen ins Design) gemäß der Formel in Abbildung 6-1 näherungsweise multiplikativ eingeht.

Abb. 7-31: Darstellung Referenz-Splice (widerstandsgeschweißt), dargestellt ohne Isolationskappe



Für $\lambda_{(\text{gesamt})}$ ergibt sich mit den Wertebereichen für Π_{PM} und Π_{Proc} aus λ_{Phys} ein Intervall von 0,020 FIT bis 1,091 FIT. Bei Berechnung mit dem Default-Wert nach FIDES für $\Pi_{\text{Ruggedising}} = 1,7$ ergibt sich

$$\lambda_{\text{Phys}} = 0,060 \text{ FIT}$$

und schließlich mit den Default-Werten für Π_{PM} und Π_{Proc} gemäß FIDES ein

$$\lambda_{(\text{gesamt})} = 0,39 \text{ FIT.}$$

In Bezug auf Π_{PM} und Π_{Proc} haben sich für eine auditierte Schweißanlage die Annahmen des Kapitels 7.5.3 Best Practice und Lifecycle für Splice-Verbindungen bestätigt. Es ergibt sich

$$\lambda_{\text{Phys}} = 0,051 \text{ FIT (mit auditiertem } \Pi_{\text{Ruggedising}})$$

und

$$\lambda_{(\text{gesamt})} = 0,22 \text{ FIT (mit auditiertem } \Pi_{\text{Ruggedising}}, \Pi_{\text{PM}}, \Pi_{\text{Proc}}).$$

Die zuvor genannten Ausfallraten beziehen sich auf einen ungedichteten widerstandsgeschweißten Splice (Klasse IIb). Für einen WSS gedichtet mit Schrumpfschlauch (Klasse IIa) ergeben sich gemäß der Anpassung des FIDES (siehe Kapitel 7.5.5) als Ausfallraten vor Audit Werte für λ_{Phys} von 0,021 FIT bis 0,036 FIT und für $\lambda_{(\text{gesamt})}$ von 0,011 FIT bis 0,579 FIT.

Mit Default-Werten für $\Pi_{\text{Ruggedising}}, \Pi_{\text{PM}}$ und Π_{Proc} erhält man

$$\lambda_{\text{Phys}} = 0,032 \text{ FIT}$$

und

$$\lambda_{(\text{gesamt})} = 0,20 \text{ FIT.}$$

Unter Einbeziehung von Audits sind beispielsweise

$$\lambda_{\text{Phys}} = 0,026 \text{ FIT}$$

und

$$\lambda_{(\text{gesamt})} = 0,11 \text{ FIT}$$

(unter zusätzlichen Annahmen für das Schrumpfschlauch-Verarbeitungsgerät) und besser möglich.

7.5.8 Überprüfung der Ausfallrate gemäß FIDES durch beschleunigte Laborversuche

Für die Validierung der mit der FIDES bestimmten Ausfallraten, werden Laborversuche mit erhöhter Belastung (siehe Kapitel 6.3) für gedichtete und nicht gedichtete Splice durchgeführt.

Bei der Beschleunigung durch verfeinerten Nachweis wären bei Splice-Verbindungen folgende Einflussgrößen denkbar:

- a) mechanische Abzugskräfte,
- b) Wärme und
- c) Dichtigkeit.

Aufgrund des größeren Zeitraffungsfaktors wird hier der Weg der Beschleunigung durch überhöhte Belastung verfolgt.

Die Beschleunigung von Ausfällen der Splice im Labor wird durch zyklische Wärmebelastung erreicht. Durch Bestromung des Splice wird eine Erwärmung des Knotens von innen hervorgerufen. Dabei handelt es sich um Stromimpulse, die innerhalb kürzester Zeit die Komponente auf die maximale Betriebstemperatur erwärmen. Danach folgt eine Pause, in der sich die Komponente wieder abkühlt, beispielsweise auf ein Viertel der maximal möglichen Temperaturdifferenz. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis sich die charakteristischen Eigenschaften zumindest nachweisbar ändern, wenn nicht ein Totalausfall abgewartet werden soll.

Bei den durch Ultraschall- und Widerstandsschweißung verbundenen Komponenten handelt es sich um eine (teils) stoffschlüssige Schweißverbindung (siehe z.B. Abbildung 7-25 und Abbildung 7-28). Wegen der Ausdehnungsdifferenzen (z.B. aufgrund von Inhomogenitäten) würde ein Temperaturschock die Schweißstelle mechanisch erheblich belasten und damit beschleunigend wirken.

In Vorversuchen hat sich bestätigt, dass die elektrischen Eigenschaften die Qualität der Verbindung insgesamt gut beschreiben. Als Ausfallkriterium wurde hier die Verdoppelung des Übergangswiderstands seit Beginn der Messung festgelegt. Für die Messpunkte wurden verschiedene physikalische Modelle zur Widerstandserhöhung aus der Literatur betrachtet. Für geschweißte Splice (USS mit/ohne Schrumpfschlauch, WSS ohne Schrumpfschlauch) konnte in ersten Messreihen überprüft werden, dass die nach FIDES errechneten physikalischen Ausfallraten als obere Schranken in dieser Größenordnung realistisch sind. Insbesondere konnte demonstriert werden, dass die Ergänzung der FIDES um $\Pi_{\text{Connection}}$ für geschweißte Splice (siehe Kapitel 7.5.6, $\Pi_{\text{Connection}}$) im Vergleich zum für gecrimpte Splice in der FIDES angegebenen $\Pi_{\text{Connection}}$ -Wert gerechtfertigt ist. An gecrimpten Splice wurden 2 verschiedene Typen hierzu getestet.

Inwieweit die Beschleunigung des Ausfallmechanismus reproduzierbar ist und anhand Messungen sich die Ausfallraten gemäß FIDES weiter verbessern lassen, kann allerdings erst durch entsprechende Langzeitversuche mit hinreichender Komponentenanzahl statistisch signifikant nachgewiesen werden.

7.5.9 Isolation/Abdichtelement

7.5.9.1 Beschreibung der Funktion

Splice-Verbindungen müssen aufgrund möglicher Umgebungseinflüsse geschützt werden, um die elektrischen Eigenschaften sicherzustellen, mechanisch zu festigen, am Kontaktpunkt die Vibrationen zu dämpfen und Korrosion zu verhindern. Einflüsse können sein: direkter oder durch Kapillarwirkung bedingter Feuchtigkeitseintritt. Dieses kann sowohl im Feuchtbereich wie auch im Trockenbereich gefordert sein. Im Feuchtbereich werden Schrumpfschläuche mit Innenkleber verwendet, wobei im Trockenbereich Schrumpfschläuche ohne Innenkleber o.ä. Produkte eingesetzt werden können. Zudem dient das Abdichtelement als Berührschutz, Kurzschlusschutz und mechanischer Schutz für die Verbindungsstelle.

Abb. 7-32 Schrumpfschläuche



7.5.9.2 Materialauswahl, Werkstoffe

Die zu verwendenden Werkstoffe der Schrumpfschläuche werden passend zur Dauereinsatztemperatur- und Dichtigkeitsklasse ausgewählt. Hierbei muss der Innenkleber sicher mit der Kabelisolierung z.B. PVC, PE, XLPE verkleben.

Als Werkstoffe für Schrumpfschläuche mit Innenkleber dienen für den Mantelwerkstoff strahlenvernetzte, modifizierte Polyolefine und für den Innenkleber thermoplastische Schmelzklebstoffe. Die Schrumpfschläuche werden in einem Co-Extrusionsprozess hergestellt. Somit ist sichergestellt, dass nach Standardverarbeitung der Mantelwerkstoff und der Schmelzklebwerkstoff fest miteinander verbunden bleiben.

Wird die Anzahl der zulässigen Einzeladern in der Splice-Verbindung überschritten, muss in die abzudichtende Schweißstelle zusätzlich Schmelzkleber eingebracht werden. Dies erfolgt mit geeigneten Schmelzkleberprofilteilen, vorzugsweise aus dem gleichen Werkstoff wie der Innenkleber der Schrumpfschläuche. Menge und Formgebung ist abhängig vom Querschnittsaufbau.

7.5.9.3 Lagerung

Die Anforderung an die Lagerung bezieht sich hier auf den Zeitraum bevor der Schrumpfschlauch verarbeitet wird. Hier ist das Alter der verwendeten Produkte relevant und entsprechende Lagerfristbeschränkungen sind zu beachten.

Eine ordnungsgemäße Verpackung und Lagerung nach geltenden Vorschriften der Schrumpfschlauchhersteller, Konfektionäre und OEM ist zu gewährleisten.

7.5.9.4 Design

Bei der Isolation von Splice-Verbindungen sind gewisse Voraussetzungen für eine Abdichtung / Isolation zu berücksichtigen:

Geeignete Auswahl des Schrumpfschlauches mit Innenkleber, wie Schlauchgröße, Abschnittlänge, Farbe, Temperaturklasse, Dichtigkeitsklasse unter Beachtung der OEM-Freigaben, eventuelle zusätzliche Schmelzkleberprofile.

Abb. 7-33 Schmelzklebprofile



Vorbereitungen der Einzeladern

Die Länge der Abisolierung B ist mit 14 mm +1 definiert.

Bei der weiteren Verarbeitung ist darauf zu achten, dass keine einzelnen Kupferdrähte abstehen. Beim späteren Schrumpfen können diese Drähte durch den Schlauch stechen und zu unbrauchbaren Splices führen.

Abb. 7-34 Länge der Abisolierung

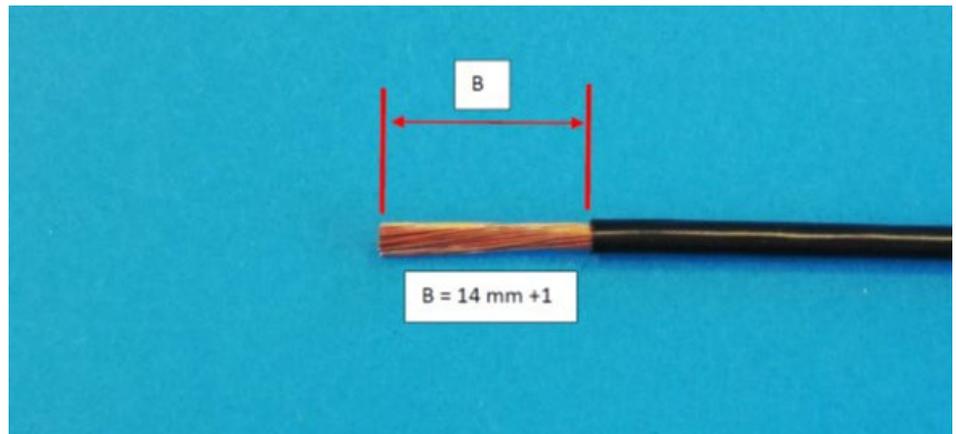
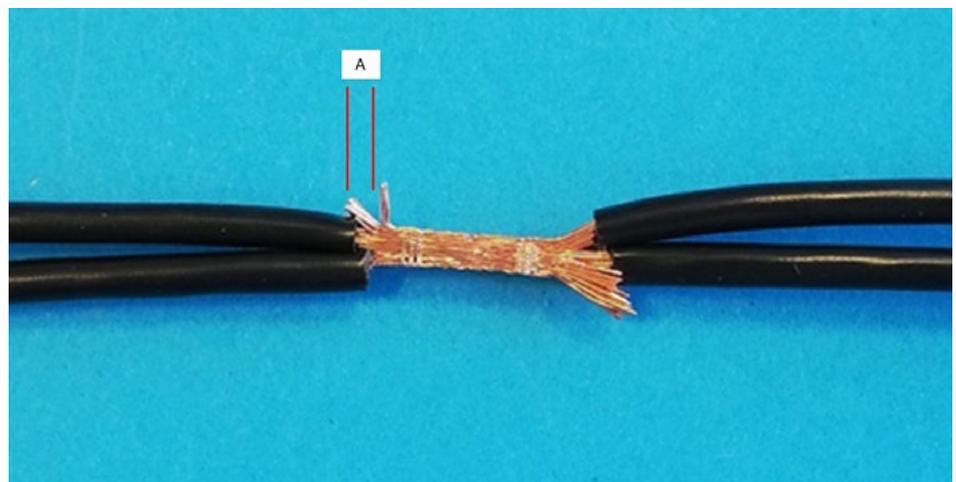


Abb. 7-35 Abstand A zu gering und abstehende Einzeldrähte



7.5.9.5 Herstellung der Splice-Verbindung

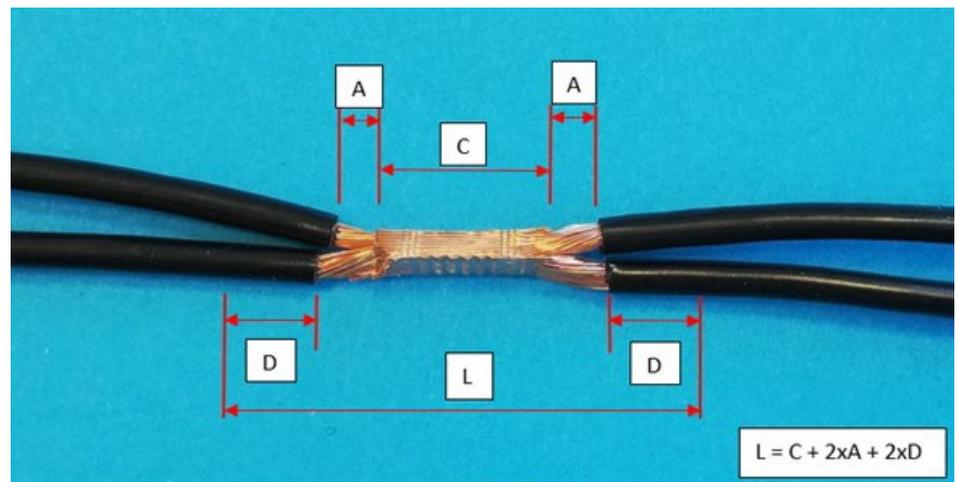
Beim Schweißvorgang muss sichergestellt sein, dass ein freier Abstand von 3 – 5 mm zwischen Abisolierung und Schweißpunkt gegeben ist. Dadurch ist es dem Kleber möglich, beim Schrumpfvorgang zwischen die Adern zu fließen und abdichten und die geforderte Abdichtung zu gewährleisten.

Abb. 7-36 Kleberaustritt am Schrumpfschlauchende



Ein Kleberaustritt an den Schlauchenden ist kein Qualitätskriterium der Dichtigkeit (Beachtung der Verarbeitungsanleitung der Schrumpfschlauchhersteller). Bei der Positionierung der Schlauchabschnitte muss die Verarbeitungsanleitung der Schrumpfschlauchhersteller berücksichtigt werden. Die Länge L des Schrumpfschlauches mit Kleber ergibt sich aus der Länge C der Schweißstelle + 2 x A (3-5mm) + 2 x D (Minimumüberlappung auf der Kabelisolierung von > 10 mm je Seite).

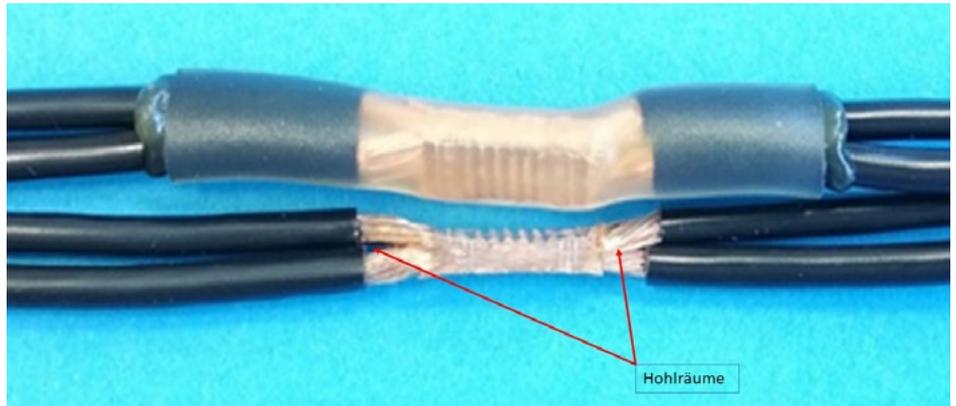
Abb. 7-37 Länge des Schrumpfschlauchabschnitts



7.5.9.6 Verarbeitungsparameter

Um eine reproduzierbare Dichtigkeit zu erhalten, muss die Kleberschmelze eine bestimmte Temperatur haben. Dann kann die Schmelze in die Hohlräume fließen bzw. der Schrumpfschlauch die Schmelze in die Hohlräume drücken.

Abb. 7-38 Hohlräume am Schrumpfschlauch



Zu beachten sind die Herstellerempfehlungen zur Schrumpfschlauchgröße, zu Verarbeitungsparametern und zur Dichtstellenprüfung.

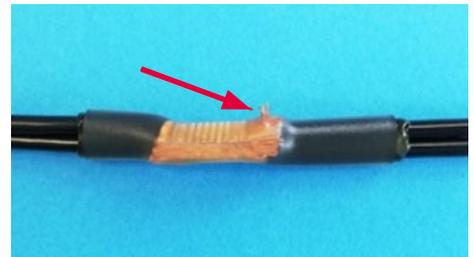
Schrumpfverarbeitungsgeräte: Hierzu sind geeignete Verarbeitungsgeräte der Schrumpfschlauchlieferanten zu benutzen. Dadurch kann sichergestellt werden, dass immer reproduzierbare Ergebnisse erhalten werden. Die zweckmäßige Geräte- und Heiztechnik stimmen der Kabelkonfektionär und Schrumpfschlauchhersteller miteinander ab.

7.5.9.7 Auszuschließende Fehler

Abb. 7-39 Fehlerbilder Schrumpfschlauch



Schrumpfzeit zu kurz



Durchstecher



Überlappung zu kurz



Schrumpfung zu heiß oder zu lange



Zum Vergleich: Schrumpfergebnis in Ordnung

7.5.9.8 Ausfallrate und Ausfallarten

Der Einfluss des Schrumpfschlauchs auf die Ausfallrate wird bei der Berechnung für die Funktionsbaugruppe der Splice-Verbindungen berücksichtigt (siehe Abschnitt in 7.5.5). Zudem werden bei den Versuchen, beschrieben in Kapitel 7.5.8, Splice-Verbindungen ohne und mit Schrumpfschlauch untersucht.

7.5.10 Kraftschlüssige und mechanische Verbindungen

Kraftschlüssige und mechanische Verbindungen, z.B. mittels Crimp, werden aktuell nicht betrachtet.

8 Einheitliche Dokumentation

Für die wesentlichen Bordnetzkomponenten, die vom Arbeitskreis untersucht wurden, ergeben sich eine Reihe von notwendigen Angaben zu den Komponenten, ihrer Einsatzumgebung, der Handhabung und weiterer einzuhaltender Bedingungen.

Damit der vorliegende Vorschlag zur Ermittlung von Ausfallraten erfolgen kann, müssen die notwendigen Voraussetzungen und Bedingungen für die Berechnungen von den beteiligten Unternehmen der gesamten Lieferkette einschließlich des OEM bereitgestellt werden.

Dies umfasst unter anderem:

- Datenblatt
- Verarbeitungsvorschriften
- Lager- und Transportvorschriften
- Verwendungsvorschriften (nächster Tier, OEM und Endkunde)
- Betriebsvorschriften
- Wartungsvorschriften
- Berechnungsvorschriften

9 Arbeitsgruppenmitglieder

Ansprechpartner des Arbeitskreises

Dr. Andreas Boehm
Leiter Arbeitskreis Bordnetze
Bayern Innovativ GmbH
Am Tullnaupark 8
90402 Nürnberg
Deutschland
Telefon: +49 911 20671-214
E-Mail: boehm@bayern-innovativ.de

Sebastian Glatz
Geschäftsführer Fachverband Kabel und isolierte Drähte
ZVEI e. V.
Minoritenstraße 9-11
50667 Köln
Deutschland
Telefon: +49 221 96228-16
E-Mail: Sebastian.Glatz@zvei.org

Dokumentintegration

Thomas Gabler
Kugler Maag CIE GmbH
Leibnizstr. 11, 70806 Kornwestheim
Deutschland

Bernd Pfeufer
TÜV SÜD Auto Service GmbH
Daimlerstraße 11, 85748 Garching
Deutschland

Teilnehmende Unternehmen, nicht arbeitsgruppenspezifisch angeführt:

AUDI AG

Auto-Kabel Management Gesellschaft mbH

BMW Group

Coficab Deutschland GmbH

CONTEXT AG

Aptiv Services Deutschland GmbH

DRÄXLMAIER Group

DSG-Canusa GmbH

Fujikura Automotive Europe GmbH

Gustav Klauke GmbH

Intercable GmbH
KBE Elektrotechnik GmbH
KOSTAL Kontakt Systeme GmbH
Kromberg & Schubert Automotive GmbH & Co. KG
Kugler Maag CIE GmbH
LEONI Bordnetz-Systeme GmbH
LEONI Kabel GmbH
Littelfuse Europe GmbH
MD ELEKTRONIK GmbH
Nexans autoelectric GmbH
Physical Software Solutions GmbH
Prysmian Kabel und Systeme GmbH
Rosenberger Hochfrequenztechnik GmbH & Co. KG
samoconsult GmbH
Schunk Sonosystems GmbH
Strunk Connect - Automated Solutions GmbH & Co. KG
Sumitomo Electric Bordnetze SE
TE Connectivity Germany GmbH
Telsonic AG
Tucker GmbH - Stanley Engineered Fastening
TÜV SÜD Auto Service GmbH
Yazaki Systems Technologies GmbH
ZF Friedrichshafen AG



ZVEI e.V.
Lyoner Straße 9
60528 Frankfurt am Main
Telefon: +49 69 6302-0
Fax: +49 69 6302-317
E-Mail: zvei@zvei.org
www.zvei.org