

Ausfallraten für Bordnetz-Komponenten im Automobil

Erfahrungswerte und Bedingungen

Technischer Leitfaden
2. Ausgabe 2026

Inhalt

1	Vorwort	14
2	Einführung	15
2.1	Allgemeines	15
2.2	Begriffe und Definitionen	15
2.3	Abkürzungen	17
3	Arbeit und Ziele des Arbeitskreis Automotive Bordnetze	18
3.1	Ziele	18
3.2	Mitwirkende	18
3.3	Arbeitsweise und Organisation	18
3.4	Vorgehensweise	18
4	Technischer Hintergrund, Geltungsbereich	19
5	Unterscheidung von systematischen Fehlern und zufälligen Ausfällen	20
6	Bestimmung der Ausfallrate von zufälligen Ausfällen	21
6.1	Anmerkung zum Unterschied zwischen Qualitätsmetriken und Ausfallraten	21
6.2	Feld-Beobachtung zur Ermittlung von Ausfallrate und Verteilung der Ausfallarten	21
6.3	Labortests zur Ermittlung von Ausfallrate und Verteilung der Ausfallarten	23
6.4	Verwendung von Rechenmodellen zur Ermittlung einer Ausfallrate	24
6.4.1	Berücksichtigung physikalischer Effekte im FIDES	25
6.4.2	Prozessfaktoren im FIDES Guide	28
6.4.3	Anpassungen am FIDES Modell	30
7	Ausfallraten und Fehlermodelle der wichtigsten Bordnetzkomponenten	30
7.1	Elektrische Leitungen	30
7.1.1	Beschreibung der Funktionsbaugruppe (Bauteil oder Baugruppe)	30
7.1.2	Genauere Beschreibung der Verwendungsart (Use Case)	31
7.1.3	Übersicht zu den Klassen	31
7.1.3.1	Eigenschaften von Leitungen zur Energieversorgung mit Anwendung bis zu 60V (Klasse 1)	32
7.1.3.1.1	Beschreibung der Klasse	32
7.1.3.1.2	Anforderungen bezüglich Lebenszyklus der Funktionsbaugruppe	33
7.1.3.1.3	Einzuhaltende Eigenschaften der Funktionsbaugruppe	34
7.1.3.1.4	Fehlermodelle	34
7.1.3.1.5	Ausfallraten	34
7.1.3.1.6	Fehlerverteilungen	37
7.1.3.2	Eigenschaften Leitungen zur Energieversorgung mit Anwendung bis zu 1000V (Klasse 2)	37
7.1.3.3	Eigenschaften Leitungen zur Datenübertragung (Klasse 3)	37
7.1.3.3.1	Beschreibung der Klasse	37
7.1.3.3.2	Anforderungen bezüglich Lebenszyklus der Funktionsbaugruppe	38
7.1.3.3.3	Einzuhaltende Eigenschaften	38
7.1.3.3.4	Fehlermodell	38
7.1.3.3.5	Ausfallrate von Datenleitungen	38
7.1.3.3.6	Fehlerverteilung	41
7.1.3.4	Eigenschaften Aluminium-Leitungen	42

7.1.3.5 Eigenschaften Leitungen mit Cu-Legierungen	42
7.1.4 Tabellen und Berechnungsformeln	42
7.1.4.1.1 Ausfallrate für Kupfer-Leitungen zusammengefasst	42
7.1.4.1.2 Zusammenfassung Ausfallraten für (Cu-)Leitungen	42
7.2 Elektrische Stecksysteme	44
7.2.1 Beschreibung der Funktionsbaugruppe (Bauteil oder Baugruppe)	44
7.2.2 Genaue Beschreibung der Verwendungsart (Use Case)	46
7.2.3 Übersicht zu den Klassen	46
7.2.3.1 Klasse Ia: Standardkontakte für Signalübertragung und Energieversorgung	47
7.2.3.1.1 Beschreibung der Klasse	47
7.2.3.1.2 Anforderungen bezüglich Lebenszyklus der Stecksysteme	48
7.2.3.1.3 Allgemeine Anforderungen	48
7.2.3.1.4 Anforderungen an die Herstellung der Bauteile	49
7.2.3.1.5 Anforderungen an den Transport	49
7.2.3.1.6 Anforderungen an die Lagerung	49
7.2.3.1.7 Anforderungen an die Konfektion	50
7.2.3.1.8 Anforderungen an die Montage und Produktion	50
7.2.3.1.9 Anforderungen an Nacharbeiten	50
7.2.3.1.10 Anforderungen im Kundenbetrieb	51
7.2.3.1.11 Anforderungen an Instandsetzung und Reparatur	51
7.2.3.1.12 Anforderungen an die Wiederverwendbarkeit	51
7.2.3.1.13 Einzuhaltende Eigenschaften der Standardkontakte	51
7.2.3.1.14 Fehlermodelle	51
7.2.3.1.15 Ausfallraten	55
7.2.3.1.16 Fehlerverteilungen	63
7.2.3.2 Klasse Ib: Power-Kontakte Steckkontakte für die Energieversorgung ab 6,3 mm Baugröße	64
7.2.3.2.1 Beschreibung der Klasse	64
7.2.3.2.2 Anforderungen bezüglich Lebenszyklus	65
7.2.3.2.3 Einzuhaltende Eigenschaften der Power-Kontakte	66
7.2.3.2.4 Fehlermodelle	66
7.2.3.2.5 Ausfallraten	67
7.2.3.2.6 Fehlerverteilungen	74
7.2.3.3 Klasse II: Steckkontakte für Hochfrequenz (HF) Anwendungen	74
7.2.3.4 Klasse III: Steckkontakte für Hochvolt (HV) Anwendungen	74
7.2.4 Tabellen und Berechnungsformeln	74
7.3 Passive Elektrische Sicherungen	75
7.3.1 Beschreibung der Funktionsbaugruppe (Bauteil oder Baugruppe)	75
7.3.2 Genaue Beschreibung der Verwendungsart (Use Case)	77
7.3.3 Einzuhaltende Eigenschaften der Funktionsbaugruppe	77
7.3.4 Ausfallrate	79
7.3.4.1 $\lambda_{Physical}$	80
7.3.4.1.1 Basis FIT-Rate λ_0	80
7.3.4.1.2 $\Pi_{acceleration}$	80

7.3.4.1.3 Mechanische Stressfaktor ($\Pi_{\text{Mechanical}}$)	86
7.3.4.1.4 Relative Feuchtigkeit Stressfaktor (Π_{RH})	86
7.3.4.1.5 Chemischer Stressfaktor (Π_{Chem})	87
7.3.4.1.6 $\Pi_{\text{Strom-Impuls}}$	87
7.3.4.1.7 $\Pi_{\text{Strom-Zyklus}}$	87
7.3.4.1.8 Π_{Induced}	88
7.3.4.2 Π_{PM} (Part Manufacturing factor)	90
7.3.4.2.1 Π_{Process}	90
7.3.5 Quantitatives Fehlermodell	91
7.4 Funktionsbaugruppe Schraubkontaktierung	91
7.4.1 Beschreibung der Funktionsbaugruppe	91
7.4.2 Genaue Beschreibung der Verwendungsart (Use Case)	91
7.4.3 Übersicht zu den Klassen	91
7.4.3.1 Klasse I: Masseverbindung	91
7.4.3.1.1 Beschreibung der Klasse I: Masseverbindung	91
7.4.3.1.2 Anforderungen bezüglich Lebenszyklus der Funktionsbaugruppe	94
7.4.3.1.2.1.1 Materialauswahl	95
7.4.3.1.2.1.2 Herstellungsprozess	95
7.4.3.1.2.2.1 Material	96
7.4.3.1.2.2.2 Oberflächenschutz	96
7.4.3.1.2.2.3 Leitungskontaktierung	96
7.4.3.1.2.2.4 Isolierung/Abdichtung	97
7.4.3.1.2.2.5 Dynamische Belastung	97
7.4.3.1.3 Einzuhaltende Eigenschaften der Funktionsbaugruppe	101
7.4.3.1.4 Fehlermodell	102
7.4.3.1.5 Ausfallrate	102
7.4.3.1.6 Fehlerverteilung	104
7.4.3.2 Klasse II: Potentialverbindung	104
7.4.4 Tabellen und Berechnungsformeln	104
7.5 Nicht lösbare elektrische Verbindung	104
7.5.1 Beschreibung der Funktionsbaugruppe (Bauteil oder Baugruppe)	104
7.5.2 Genaue Beschreibung der Verwendungsart (Use Case)	105
7.5.3 Übersicht zu den Klassen	105
7.5.3.1 Klasse I: Ultraschallgeschweißte Splice-Verbindung (USS)	106
7.5.3.1.1 Beschreibung der Klasse	106
7.5.3.1.2 Anforderungen bezüglich Lebenszyklus für Splice-Verbindungen	108
7.5.3.1.3 Einzuhaltende Eigenschaften	111
7.5.3.1.4 Fehlermodell für Splice-Verbindungen	111
7.5.3.1.5 Ausfallrate von Splice-Verbindungen	113
7.5.3.1.5.2.1 Labortechnische Validierung der Ausfallrate für Splice (kleiner Querschnitt)	117
7.5.3.1.5.2.2 Labortechnische Validierung der Ausfallrate für geschweißte Splice (großer Querschnitt)	117
7.5.3.1.6 Fehlerverteilungen	121
7.5.3.2 Klasse II: Widerstandsgeschweißte Splice-Verbindung (WSS)	121

7.5.3.2.1	Beschreibung der Klasse	121
7.5.3.2.2	Anforderungen bezüglich Lebenszyklus	123
7.5.3.2.3	Einzuhaltende Eigenschaften	123
7.5.3.2.4	Fehlermodell	123
7.5.3.2.5	Ausfallrate	123
7.5.3.2.6	Fehlerverteilung	123
7.5.3.3	Klasse III: Kraftschlüssige und mechanische Verbindungen	123
7.5.3.4	Isolation/Abdichtelement	123
7.5.3.4.1	Beschreibung der Funktion	123
7.5.3.4.2	Materialauswahl, Werkstoffe	124
7.5.3.4.3	Lagerung	124
7.5.3.4.4	Design	124
7.5.3.4.5	Herstellung der Splice-Verbindung	125
7.5.3.4.6	Verarbeitungsparameter	126
7.5.3.4.7	Auszuschließende Fehler	126
7.5.3.4.8	Einfluss auf Ausfallrate und Ausfallarten	127
7.5.4	Tabellen und Berechnungsformeln	127
8	Einheitliche Dokumentation	128
9	Anwendungsbeispiel	128
10	Arbeitsgruppenmitglieder	130
Anlage 1	Anhang für elektrische Leitungen	131
Anlage 2	Anhang für Stecksysteme	131
Anlage 3	Anhang für Sicherungen	132
A.3.1	Übersicht Axial-Terminal-Sicherungstypen	132
A.3.2	Berechnungsbeispiel Sicherungen	133
Anlage 4	Anhang für Schraubverbindungen	138
A.4.1	Analyse der Fehlermodelle	138
A.4.2	Ausfallrate einer Masseverbindung	140
A.4.2.1	Beispiel: Ausfallrate einer Masseverbindung	140
A.4.2.2	Vorgehen gemäß FIDES mit Anpassungen durch Tests	141
A.4.2.3	Vorgehen mithilfe von Felddaten	141
Anlage 5	Anhang für nicht lösbare elektrische Verbindungen	143
A.5.1	Ausfallrate für eine Referenz-Splice-Kombination mit kleinem Querschnitt	143
A.5.1.1	Beispiel: Ausfallrate für USS mit kleinem Querschnitt	143
A.5.1.2	Beispiel: Ausfallrate für WSS mit kleinem Querschnitt	144
A.5.2	Ausfallrate für eine Referenz-Splice-Kombination mit großem Querschnitt	146
A.5.2.1	Beispiel: Ausfallrate für einen USS mit großem Querschnitt	147
A.5.2.2	Beispiel: Ausfallrate für einen WSS mit großem Querschnitt	147

Tabellen

Tabelle 6-1: Typisches Betriebsprofil in Mitteleuropa als Grundlage für physikalische Belastungs-Berechnungen	26
Tabelle 6-2: Tabellarische Bestimmung chemischer Beschleunigungsfaktoren für Π_{Chem}	27
Tabelle 6-3: Übersicht Auditfaktoren: Mögliche Intervalle und Default-Werte	30
Tabelle 7-1: Ausfallraten aus oberen Schranken von Konfidenzintervallen zu Felddaten für verschiedene Unterklassen von Datenleitungen und zum Vergleich für Klasse 1; ergänzend ist das Stichprobenmaterial angegeben.	41
Tabelle 7-2: Fehlerverteilung Datenleitung	41
Tabelle 7-3: Übersicht der Ausfallraten für Energie- und Datenleitungen	43
Tabelle 7-4: Fehlerverteilung für elektrische Leitungen	43
Tabelle 7-5: Mindestanforderungen an Stecker von Aggregate Anschlüssen	47
Tabelle 7-6: Mindestanforderungen an Steckhülsen in Gehäusen bzw. mit angeschlagenen Leitungen	48
Tabelle 7-7: Umweltbedingungen der Klasse 1k2, DIN EN 60721-3-1, auszugsweise	49
Tabelle 7-8: Typische Degradationsmechanismen bei Kontaktelementen in Steckverbindern	52
Tabelle 7-9: Verteilung der Ausfallart bei Steckverbinderkontakten in verschiedenen Zeiträumen	56
Tabelle 7-10: Ausfallraten je Fehlergruppe	59
Tabelle 7-11: Errechnete Verbesserungsfaktoren in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur und Reduzierung der Stromerwärmung bei einer Aktivierungsenergie von 0,51 eV	61
Tabelle 7-12: Festgelegte Verbesserungsfaktoren in Abhängigkeit der Aktivierungsenergie pro eV	61
Tabelle 7-13: Rating-Faktoren Steckkontakte	62
Tabelle 7-14: Applikationsspezifische, physikalische FIT Basisraten für Steckkontakte	63
Tabelle 7-15: Resultierende Ausfallraten für Steckkontakte	63
Tabelle 7-16: Ausfallarten für Steckkontakte	63
Tabelle 7-17: Der Terminal Poor Crimp Fehler für große Leiterquerschnitte ist primär systematisch verursacht. Bei geeigneter Qualifikation kann dieser Systematische Fehler aber soweit ausgeschlossen werden, dass auch die Felddaten-basierte Ausfallrate der Standard-Kontakte angesetzt werden kann.	64
Tabelle 7-18: Darstellung der im Test applizierten Anregungsfrequenzen und Beschleunigungen entsprechend der Berechnung aus 7.2.3.2.5.2	72
Tabelle 7-19: Ergebnisse der Untersuchungen: Anonymisierte Darstellung der Ergebnisse für die Kontaktsysteme A, B,C und D, abhängig von Kabelquerschnitt und Einspannlänge.	72
Tabelle 7-20: Basis Ausfallraten für Power-Kontakte	73
Tabelle 7-21: Resultierende Ausfallraten für Power-Kontakte	73
Tabelle 7-22: Ausfallarten für Steckkontakte	74
Tabelle 7-23: Fehlerverteilung für Steckkontakte	74
Tabelle 7-24: Überblick über die Sicherungen für die dieses Dokuments gilt	76
Tabelle 7-25: Überblick über die einzuhaltenden Eigenschaften der Sicherungen	77
Tabelle 7-26: Neuaufteilung der Gewichtungsfaktoren erfolgt in nächster Ausgabe	81
Tabelle 7-27: Faktoren $\Pi_{\text{thermoelectrical}}$ für Sicherungen	82
Tabelle 7-28: Faktoren Π_{TCy} für Sicherungen	83
Tabelle 7-29: $\Pi_{\text{Mechanical}}$ für Sicherungen	86
Tabelle 7-30: Π_{RH} für Sicherungen	86
Tabelle 7-31: Π_{Chem} für Sicherungen	87
Tabelle 7-32: $\Pi_{\text{Placement}}$	88

Tabelle 7-33: $\Pi_{\text{Application}}$	88
Tabelle 7-34: $\Pi_{\text{Ruggedness (Extraction)}}$	89
Tabelle 7-35: $C_{\text{Sensitivity}}$	89
Tabelle 7-36: Manufacturing Score	90
Tabelle 7-37: Auditphasen und ihre Anteile	90
Tabelle 7-38: Ausfallarten der Sicherung	91
Tabelle 7-39: Technische Daten für Stahlbolzen	94
Tabelle 7-40: Technische Daten für Aluminiumbolzen	94
Tabelle 7-41: Minimale Blechdicken bei Schraubkontakten	99
Tabelle 7-42: Fehlerursachen und deren Modellierung gemäß FIDES	102
Tabelle 7-43: Fehlerverteilung Masseverbindung	104
Tabelle 7-44: Unterklassen nach Dichtung bzw. Querschnitt bei Splice-Verbindungen	106
Tabelle 7-45: Empfehlungen für das Design für Splice-Verbindungen	108
Tabelle 7-46: Degradationsmechanismen in Splice-Verbindungen	112
Tabelle 7-47: Fehlerursachen und deren Modellierung gemäß FIDES	113
Tabelle 7-48: Physikalische Beschleunigungsfaktoren für Konnektoren, die für Splice gelten (nach FIDES [5]).	115
Tabelle 7-49: Auditphasen und Ihre Anteile	116
Tabelle 7-50: Übersicht der Ausfallraten für Splice-Verbindungen	127
Tabelle A.3-1: Überblick über gängige Automobil-Sicherungen	132
Tabelle A.3-2: Beispiel Temperaturkollektiv Innenraum	135
Tabelle A.3-3: Temperaturkollektive für unterschiedliche Lagen	136
Tabelle A.4-1: Funktions- und Fehlermodelle für Schraubverbindungen	140

Abbildungen

Abbildung 6-1: Das FIDES Basis-Modell	25
Abbildung 7-1: Abgrenzung der Funktionsbaugruppe "elektrische Leitung"	30
Abbildung 7-2: Änderungen der logarithmierten Einfügedämpfung s_{21} nach thermischer Last in Abhängigkeit der Frequenz, der Grenzwert nach Open Alliance TC9 ist durch die oberste Linie dargestellt	39
Abbildung 7-3: Aggregate-Schnittstelle	44
Abbildung 7-4: Inline-Steckverbindung	44
Abbildung 7-5: Beobachtete Fahrzeuge im Feld	55
Abbildung 7-6: Beispiel der Verteilungsuntersuchung der Fehlerraten der Summe systematischer Fehler (Sum System)	56
Abbildung 7-7: Weibullverteilungen der betrachteten Fehler systematischer Ursachen und zufälligen Fehler in den Monaten 7 bis 23	57
Abbildung 7-8: Ermittlung der Regressionsgeraden in den Monaten 7 bis 23 zur Fehlerfortpflanzung auf 90 Monate	58
Abbildung 7-9: Verlauf der hochgerechneten Fehler im Vergleich zu den erfassten Ist-Fehlern am Beispiel der Ausfälle systematischer Ursachen; der Rahmen spiegelt den Bereich der verwendeten Daten für die Approximation wider	58
Abbildung 7-10: Leitungsabfangung	65
Abbildung 7-11: Systemgrenzen einer Power-Kontaktierung	65
Abbildung 7-12: Kabelschwingung	66
Abbildung 7-13: Ortskurve, zugehörige Geschwindigkeit und Beschleunigung	66
Abbildung 7-14: Gesamtansicht des mechanischen Aufbaus	68
Abbildung 7-15: Steckerfixierung: Die Stecker können vertikal und horizontal geklemmt werden. Die Steckerfixierung kann zur Einstellung der erforderlichen Kontaktüberdeckung in Steckrichtung verschoben werden.	68
Abbildung 7-16: Kontakt-seitige Leitungsfixierung mit Durchmesser $D=23$ mm und $L= 9.5$ mm	69
Abbildung 7-17: Leitungsklemmung: Die Leitungsklemmung ist spezifisch für den Durchmesser der Leitung ausgelegt und limitiert sich auf eine „Klemmlänge“ des doppelten Kabeldurchmessers. Die Leitungsklemmung kann axial verschoben werden, somit kann die Abfanglänge variiert werden.	69
Abbildung 7-18: Anregung der Kabelvibration mit Hilfe eines Mini-Shakers mittig zwischen der Kontakt-seitigen Leitungsfixierung und der Leitungsklemmung	69
Abbildung 7-19: Exemplarische Darstellung des Messaufbaus	70
Abbildung 7-20: Realisierung der Messung des Spannungsfalls über die relevante Messstrecke	70
Abbildung 7-21: Zeitsignal und zugehörige Fourier-Transformierte einer Relativbewegung	70
Abbildung 7-22: Auftretende Schwankungen im Spannungsfall für eine Anregung über Schärfegrad 2 hinaus (15 g bei 128 Hz, 16mm ² mit 150mm Abfanglänge).	73
Abbildung 7-23: Verwendeter Testhalter für die Sicherung der Bauform SF36 mit dem CTE (Ausdehnungskoeffizient) Faktor 86 E-6/K und Quetschkabelschuhe	73
Abbildung 7-24: Verwendeter Sicherungshalter 1-polig mit 6,3mm Crimp-Kastenkontakt	75
Abbildung 7-25: Systemgrenzen für die Sicherung	75
Abbildung 7-26: Stressgruppen Sicherung	80
Abbildung 7-27: Testaufbau Wöhlerkurve	84
Abbildung 7-28: Belastungsfunktion	85
Abbildung 7-29: Beispiel einer Wöhlerkurve	85
Abbildung 7-30: Beispiel einer Puls widerstandskurve	87
Abbildung 7-31: Systemgrenze Schraubkontakte	92

Abbildung 7-32: Darstellung eines Schweißbolzens eines Schraubkontakts mit Mutter und Kontaktfläche	92
Abbildung 7-33: Strompfad am Schraubkontakt	93
Abbildung 7-34: Beispiele für Kabelschuhe	96
Abbildung 7-35: Beispiele für Kabelschuhe mit Kontaktierung	97
Abbildung 7-36: Schweißprozess bei Schraubkontakten	98
Abbildung 7-37: Zugfestigkeit und Bruchdehnung von Werkstoffen	98
Abbildung 7-38: Prüfablauf Verschraubung	99
Abbildung 7-39: noch zulässige Lackreste auf Kontaktfläche	100
Abbildung 7-40: Darstellung Schraubverbindung	101
Abbildung 7-41: Beispielhafte ultraschallgeschweißte Splice: Endknoten links, Durchgangsknoten rechts	106
Abbildung 7-42: Ultraschallgeschweißte Splice-Verbindung	106
Abbildung 7-43: Skizze einer ultraschallgeschweißten Splice-Verbindung in Form eines Endknotens	107
Abbildung 7-44: Foto eines Durchgangssplice mit großem Querschnitt (links) mit dem dazugehörigen Modell (rechts oben) und einem vereinfachten Ersatzschaltbild (rechts unten), einschließlich der Bezeichnungen für die Messgrößen (I: gemessener Strom, U: gemessene Spannung der Stromquelle)	118
Abbildung 7-45: Messung des Längswiderstands R_L , Querwiderstands R_Q und Diagonalwiderstands R_D . Die Pfeile im Knoten veranschaulichen die Stromdichte und -richtung.	118
Abbildung 7-46: Beispielhafte widerstandsgeschweißte Splice: Endknoten links, Durchgangsknoten rechts.	121
Abbildung 7-47: Widerstandsgeschweißte Splice-Verbindung	121
Abbildung 7-48: Skizze einer widerstandsgeschweißten Splice-Verbindung in Form eines Endknotens	122
Abbildung 7-49: Schrumpfschläuche	123
Abbildung 7-50: Länge der Abisolierung	124
Abbildung 7-51: Abstand (A) zu gering und abstehende Einzeldrähte	125
Abbildung 7-52: Kleberaustritt am Schrumpfschlauchende	125
Abbildung 7-53: Länge des Schrumpfschlauchabschnitts	125
Abbildung 7-54: Hohlräume am Schrumpfschlauch	126
Abbildung 7-55: Fehlerbilder Schrumpfschlauch	127
Abbildung 9-1: Strompfad im Bordnetz, schematisch	128
Abbildung 9-2: Anwendungsbeispiel	129
Abbildung A.5-1: Darstellung Referenz-Splice (ultraschallgeschweißte), dargestellt ohne Isolationskappe	143
Abbildung A.5-2: Darstellung Referenz-Splice (widerstandsgeschweißte), dargestellt ohne Isolationskappe	144
Abbildung A.5-3: Darstellung Referenz-Splice 1x 35 -2x 10 (2 ultraschallgeschweißte, 1 widerstandsgeschweißte Splice; dargestellt ohne Tape)	146

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 2022, Edition A	July 2023	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, Vortrag GG Group	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-AI Mg5
[35]	EN AW-5052	2011-07	Aluminium-Werkstoff-Datenblatt EN AW-5052, EN AW-AI Mg2,5
[36]	EN AW-5186	2011-07	Aluminium-Werkstoff-Datenblatt EN AW-5186, EN AW-AI Mg4 Mn0,4
[37]	EN AW-5554	2011-07	Aluminium-Werkstoff-Datenblatt EN AW-5554, EN AW-AI Mg3 Mn(A)
[38]	EN-AW-6082	2011-07	Aluminium-Werkstoff-Datenblatt EN AW-6082, EN AW-AI 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
[42]	1000BASE-T1 Channel and Components Requirements – Link Segment Type A (UTP) (V2.3)	2021	Channel and Components Requirements for 1000BASE-T1 Link Segment Type A (UTP)
[43]	1000BASE-T1 Channel and Components Requirements – Link Segment Type A (STP) (V2)	2020	Channel and Components Requirements for 1000BASE-T1 Link Segment Type A (STP)
[44]	1000BASE-T1 and 2.5G/5G/10GBASE-T1 Link Segments (V1.1)	2024	Channel and Component Requirements for Fully Shielded 1000BASE-T1 and 2.5G/5G/10GBASE-T1 Link Segments
[45]	DIN/TS 70214	2025	Straßenfahrzeuge - Validierung von Automotive-Niedervolt-Steckverbindern
[46]	ISO 19642	2023	Road vehicles - Automotive cables
[47]	DIN/TS 7012	2024	Straßenfahrzeuge – Elektrische Leitungen

Änderungshistorie

Version	Datum	Beschreibung
Release 1.0	20. Oktober 2021	Erste Version, Teilveröffentlichung
Release 2.0	Mai 2026	Zweite Version

Impressum

ZVEI e. V. • Verband der Elektro- und Digitalindustrie • Minoritenstr. 9-11 • 50667 Köln
Lobbyregisternr.: R002101 • EU Transparenzregister ID: 94770746469-09 • www.zvei.org

Datum: Mai 2026

1 Vorwort

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

Hierzu werden die im Betrieb auftretenden Belastungen beschrieben und geeignete Bordnetzkomponenten ausgewählt. Dabei wird auf bestehende Normen (z. B. SN 29500, IEC 61709, MIL-Handbücher usw.) zurückgegriffen, die jedoch allgemein gehalten und nicht spezifisch auf den Automobilbereich ausgerichtet sind.

Der aktuelle Stand der Technik im Automobilbordnetz ist in die vorliegende Richtlinie eingeflossen. Es wird aufgezeigt, wie Bordnetzkomponenten anhand konstruktiver Merkmale charakterisiert und in Klassen eingeteilt werden können. Für diese Klassen werden typische Ausfallmechanismen beschrieben, Ausfallarten und Fehlerverteilungen dargestellt sowie Erwartungswerte für Ausfallraten angegeben. Diese gelten nur unter den beschriebenen Prämissen (z. B. konstruktive Merkmale sowie Maßnahmen in Produktion und Betrieb).

Weichen die realen Werte davon ab, sind die dargestellten Berechnungen gegebenenfalls anzupassen. Eine Anleitung zu diesen Berechnungen wird ergänzend dargestellt.

2 Einführung

2.1 Allgemeines

Dieser technische Leitfaden wurde in der vorliegenden Fassung von Vertretern der Wertschöpfungskette des Automobilbordnetzes (Komponentenhersteller, Maschinenhersteller, Bordnetzkonfektionäre, Systemhersteller, Entwicklungsdienstleister und Automobilhersteller/OEMs) erarbeitet.

Die Inhalte dieses Leitfadens basieren auf den Ergebnissen des *Arbeitskreises ASIL im Bordnetz – Ausfallraten für Bordnetzkomponenten im Automobil*. Die gemeinsame fachliche Einschätzung zum Stand der Technik wurde in der Ausarbeitung berücksichtigt und ist mit eingeflossen. Maßgeblich ist dabei der Stand zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Dokuments.

Die in diesem Leitfaden enthaltenen Hinweise haben unverbindlichen Empfehlungscharakter. Sie dienen als Orientierungshilfe zur Bestimmung der Ausfallraten der hier beschriebenen Komponenten. Die aufgeführten Komponenten und Klassen erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Aktualisierungen und Erweiterungen können bei Bedarf erfolgen.

2.2 Begriffe und 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
Item Family	Nach FIDES [5] eine elementare Einheit, welche für die Betrachtung der Zuverlässigkeit nicht weiter unterteilt wird.
Element	System, (Hardware-) Komponente oder Hardwareteil (ISO 26262)
Kontaktsystem	Kombination aus Stift- und Buchsenkontakten
Ausfall	Beendigung des beabsichtigten Verhaltens eines Elements durch die Manifestation eines Fehlers (ISO 26262)

Fehler	<p>Abnormale Bedingung, die zum Versagen eines Elements führen kann (ISO 26262)</p> <p><i>Anmerkung 1:</i> Permanente, intermittierende und vorübergehende Ausfälle werden berücksichtigt.</p> <p><i>Anmerkung 2:</i> Wenn sich ein Subsystem in einem Fehlerzustand befindet, kann dies zu einem Fehler für das System führen.</p> <p><i>Anmerkung 3:</i> 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.</p>
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)
Systematischer Fehler	Fehler, der in einen systematischen Ausfall mündet
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

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	Verband der Elektro- und Digitalindustrie e.V.

3 Arbeit und Ziele des Arbeitskreis Automotive Bordnetze

3.1 Ziele

Ziel des Arbeitskreises ist es, den aktuellen Stand der Technik hinsichtlich Zuverlässigkeitsaussagen und Ausfallhäufigkeiten charakteristischer, in der Automobilbranche üblicher Bordnetzkomponenten darzustellen.

Für systematische Fehler und zufällige Hardware-Ausfälle soll nachvollziehbar beschrieben werden, wie man Angaben zu Ausfallraten und zur Verteilung der Ausfallarten herleitet.

Der Fokus liegt dabei auf dem Anteil der zufälligen Hardware-Ausfälle, da systematisch bedingte Ausfälle in sicherheitsrelevanten Anwendungen grundsätzlich zu vermeiden sind.

Die vorliegende Richtlinie beschreibt für die jeweiligen Bordnetzkomponenten die Ausfallverteilungen sowie ein Verfahren zur Bestimmung der Ausfallraten.

3.2 Mitwirkende

Verfasser dieses Dokuments sind Vertreter entlang der Wertschöpfungskette – Komponentenhersteller, Maschinenhersteller, Bordnetzkonfektionäre, Systemhersteller, Entwicklungsdienstleister und Automobilhersteller/OEMs.

Es handelt sich um Unternehmen mit langjähriger Erfahrung in Entwicklung, Erprobung und Produktion, die zudem ausnahmslos über aktuelle Qualitätsmanagementsysteme verfügen (z. B. VDA 6.x, IATF 16949).

Darüber hinaus haben Experten aus der Beratungs- und Ingenieurdienstleistung sowie aus dem akademischen Umfeld mitgewirkt, mit Schwerpunkten in den Bereichen Funktionale Sicherheit, Statistik, Methodik und Wahrscheinlichkeitstheorie.

3.3 Arbeitsweise und Organisation

Ausgangspunkt des Arbeitskreises war ein Workshop, in dem ergebnisoffen Zukunftsthemen identifiziert werden sollten. Für alle Mitwirkenden von besonderem Interesse war dabei das Thema Zuverlässigkeit von Bordnetzkomponenten im Energiebordnetz, da bestehende Normenwerke diese Fragestellung bislang nicht hinreichend abdecken.

Die Organisation und Moderation des Arbeitskreises sowie seiner Arbeitsgruppen erfolgte über die gesamte Laufzeit durch Vertreter der Bayern Innovativ GmbH.

3.4 Vorgehensweise

Zunächst wurde eine Abgrenzung zwischen systematischen Fehlern und zufälligen Ausfällen vorgenommen (siehe Kapitel 5).

Die bestehenden und gängigen Verfahren zur Ermittlung von Ausfallraten wurden geprüft, und die anwendbaren Verfahren sind in Kapitel 6 übersichtlich zusammengefasst. Der Arbeitskreis hat sich dabei für die Darstellung der Berechnungsformeln zur Bestimmung von Ausfallraten nach UTE C 80-810 [19], dem sogenannten FIDES-Ansatz, entschieden. Die Anwendung dieses Standards wird in Kapitel 6.4 sowie in den Fachkapiteln 7.x erläutert.

Bordnetzkomponenten sind in großer Vielfalt im Einsatz; häufig werden sie auch proprietär entwickelt. Dennoch weisen sie charakteristische Merkmale auf, anhand derer eine Klassifikation erfolgen kann. Auf dieser Basis wurden die in diesem Leitfadens betrachteten Funktionsbaugruppen beschrieben (siehe Kapitel 7) und Aussagen zu Ausfallraten sowie zur Verteilung der Ausfallarten getroffen.

Die allgemeinen Einflussfaktoren und Randbedingungen (u. a. Prozessvorgaben), die übergreifend Anwendung finden, 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 Betrieb durch Endkunden (Anwender) im privaten oder professionellen Bereich.

Für die weitere technische Betrachtung wird eine mittlere Nutzungsdauer von 15 Jahren zugrunde gelegt. Bei einer angenommenen durchschnittlichen Laufleistung von 16.000 km pro Jahr ergibt sich eine Gesamtlaufleistung von 240.000 km über die gesamte Betriebszeit. Innerhalb dieses Zeitraums beträgt die elektrische Betriebsdauer 8.000 Stunden (im Fahrbetrieb) und die Dauer des stationären Betriebs 30.000 Stunden (vgl.[25]). Diese Parameter können sich anwendungsspezifisch unterscheiden und sind exemplarisch in den jeweiligen Unterkapiteln angegeben.

Aus diesem Grund sind Einsatzfälle wie militärische Anwendungen (aufgrund besonderer Belastungen), Sonderfahrzeuge (aufgrund spezifischer Anforderungen) sowie Busse und Nutzfahrzeuge in der vorliegenden Ausgabe nicht berücksichtigt.

Das Betriebsprofil ist in den jeweiligen Unterkapiteln näher beschrieben und kann – falls erforderlich – an veränderte Rahmenbedingungen angepasst werden.

Die thermischen Belastungen durch die Umgebung (Klimazonen) werden durch die für die Bordnetzkomponenten jeweils referenzierten Vorschriften abgedeckt und umfassen alle Klimazonen, ausgenommen die Polar- und Subpolarzonen.

Technisch liegt der Fokus auf den Wirk- und Ausfallmechanismen des Energiebordnetzes.

In der vorliegenden Richtlinie werden die folgenden Bordnetzkomponenten berücksichtigt:

- Elektrische Steckverbinder (Kontaktteile und Gehäuse mit Zusatzteilen) entsprechend DIN/TS 70214
- Kfz-Sicherungen (basierend auf der ISO 8820)
- Elektrische Schraubverbindungen (Masse und Stromverteiler) inkl. Bolzen und Kabelschuhe
- Elektrische Fahrzeugleitungen für die Energieversorgung (gemäß DIN/TS 70112-1, DIN 70112-1001 und ISO 19642)
- Nicht lösbare elektrische Verbindungen (gem. ISO 4063, DIN8593-6, DIN 1910-11, DIN 1910-100) zur Anwendung in Leitungsverbindern

5 Unterscheidung von systematischen Fehlern und zufälligen Ausfällen

Die Unterscheidung zwischen systematischen Fehlern und zufälligen Ausfällen ist für das Verständnis dieses Dokuments von zentraler Bedeutung. Daher wird ihr in diesem Kapitel besondere Aufmerksamkeit gewidmet.

Systematische Fehler zeichnen sich dadurch aus, dass sie in deterministischer Weise mit einer bestimmten Ursache verknüpft sind. Hierzu zählen beispielsweise Entwicklungsfehler, fehlerhafte Auslegungen, Produktionsfehler, falsche Lagerung, unsachgemäßer Transport oder fehlerhafte Verwendung. Durch Änderungen am Design oder an Prozessen lassen sich systematische Fehler grundsätzlich vermeiden bzw. ausschließen.

Systematische Messabweichungen können dazu führen, dass eine aus einem Fehler resultierende Abweichung nicht erkannt wird. Eine solche Abweichung kann beispielsweise durch den Aufbau oder die Anordnung eines Messsystems verursacht werden. Dem kann durch eine statistische Untersuchung und die Auswertung der Streuung von Messergebnissen entgegengewirkt werden. Ein Zielwert gilt als eingehalten, wenn der Messwert zuzüglich des errechneten Vertrauensbereichs bei einer definierten Konfidenz (Wahrscheinlichkeitsaussage) innerhalb der Toleranz liegt.

Zufällige Ausfälle treten dagegen aufgrund unvorhersehbarer Ereignisse während der Lebensdauer eines Produkts auf. Unvorhersehbar bedeutet, dass die Ursachen der Ausfälle zum Zeitpunkt der Entwicklung nicht bekannt waren oder die zur Vermeidung systematischer Ursachen getroffenen Maßnahmen nicht ausreichend waren.

Tritt beispielsweise eine Belastung innerhalb der vorgesehenen Parameter, jedoch mit einer nicht berücksichtigten Häufigkeit physikalischer Stress-Effekte auf, sodass ein Bauteil im Betrieb versagt, handelt es sich um einen zufälligen Ausfall. Er entsteht durch ein in der Entwicklung nicht vorhergesehenes Ereignis, auch wenn seine Ursache im Nachhinein erklärbar ist.

Bei der Auswertung von Tests ist eine klare Trennung zwischen systematischen und zufälligen Ausfällen in der Regel nicht möglich. Alle beobachteten Ereignisse werden zunächst als Fehlerarten erfasst und als zufällige Ausfälle gewertet. Aus den erhobenen Daten können potenziell systematische Ursachen identifiziert und daraus Maßnahmen zur Vermeidung künftiger Ausfälle abgeleitet werden.

6 Bestimmung der Ausfallrate von zufälligen Ausfällen

In der Praxis werden zur Ermittlung der Ausfallrate einer Komponente verschiedene Methoden angewendet (vgl. auch ISO 26262-11, Kapitel 4.6 [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-Test (HTOL) – Modell nach Arrhenius
 - High-Accelerated-Stress-/ Temperature-Humidity-Bias-Test (HAST / THB) – Modell nach Hallberg-Peck
 - Temperature-Cycling-Test (TC) – Modell nach Coffin-Manson
- Felddatenauswertung mit einem statistischen Auswertungsmodell (z.B. Chi-Square-Modell)

Die genannten Methoden berücksichtigen in der Regel eine bis drei kombinierte Belastungen. Da in der realen Anwendung eine größere Vielzahl an Belastungen auftritt, sind die aus solchen Untersuchungen abgeleiteten Werte stets mit einer gewissen statistischen Unsicherheit behaftet.

6.1 Anmerkung zum Unterschied zwischen Qualitätsmetriken und Ausfallraten

Qualitätsmetriken werden häufig als Begründung für eine hohe Zuverlässigkeit herangezogen. Tatsächlich bildet ein etablierter Qualitätsprozess eine wesentliche Grundlage, um zuverlässige Produkte zu entwickeln und herzustellen.

Daher ist es sinnvoll, Qualitätsmaßnahmen bei der Abschätzung der Zuverlässigkeit zu berücksichtigen. Eine direkte Umrechnung einer Qualitätsmetrik in eine Ausfallrate ist jedoch nicht möglich, da Qualitätsmetriken in der Regel nur einen begrenzten Abschnitt des gesamten Produktlebenszyklus abbilden.

Für die Bestimmung einer Ausfallrate muss dagegen stets ein Zeitraum, idealerweise die gesamte Lebensdauer, betrachtet werden. Eine Ausfallrate ist immer auf eine Zeitspanne bezogen und mit einer Aussage zur statistischen Sicherheit, bestehend aus Konfidenzniveau und Vertrauensbereich, verknüpft.

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

Zur Abschätzung einer Ausfallrate für eine Komponente stehen mehrere Vorgehensweisen zur Verfügung.

Nach [13] gilt:

„Die einfachste Methode, eine Ausfallrate zu bestimmen, besteht darin, eine hinreichend große Menge von Objekten über einen ausreichend langen Zeitraum zu beobachten und die Anzahl der Fehler festzustellen, die innerhalb dieses Zeitraums auftreten. Zusätzlich erhält man Informationen 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 regulären Einsatz definiert sind. Ausfallraten gelten im Allgemeinen nur für die Bedingungen, unter denen sie gemessen werden. Werden Objekte unter anderen Bedingungen betrieben, ist damit zu rechnen, dass die bestimmten Ausfallraten mehr oder weniger deutlich abweichen.“

Wenn wir diese Grundsituation mathematisch formulieren, ergibt sich der Zusammenhang zwischen der Anzahl der Fehler, der Zeit und der Anzahl beobachteter Objekte zu:

$$\frac{x}{n \Delta t} = \lambda$$

Dabei ist x die Anzahl der im Zeitraum Δt fehlerhaft gewordenen Objekte, n die beobachtete Grundgesamtheit (insgesamt betrachtete Anzahl von Objekten) und λ die Ausfallrate.

Die Ausfallrate ist somit ein Proportionalitätsfaktor, der den Zusammenhang zwischen der Grundgesamtheit und der Anzahl der Fehler pro Zeiteinheit beschreibt [13].

Besteht die Grundgesamtheit aus regulär gefertigten Mustern, die den Herstellungsprozess sowie das firmenspezifische Qualitätsmanagement abbilden, und werden systematische Fehler mit einbezogen, lässt sich über Felddaten die gesamte FIT-Rate $\lambda_{(gesamt)}$ bestimmen.

Werden dagegen nur zufällige Fehler betrachtet, ergibt sich aus den Felddaten λ_{phys} ; die systematischen Fehler werden dann über die Π -Faktoren aus Auditierungen abgebildet.

Ein Vorteil der Felddatenauswertung liegt darin, dass bei typischerweise hohen Produktionszahlen eine ausreichende statistische Konfidenz der FIT-Rate in der Regel nachgewiesen werden kann.

Je nach Komponente (z. B. bei Spezialteilen oder kleinen Stückzahlen) oder Hersteller (z. B. Neueinsteiger am Markt) kann die Nutzung von Felddaten jedoch nachteilig sein. Ein Teil der Produktion lässt sich meist nicht vollständig nachverfolgen (Dunkelziffer $1/d_n$), und auch der Rücklauf von Ausfällen ist oft unvollständig (Dunkelziffer $1/d_x$). Falls Einblick in Regresslisten gewährt wird, kann eine halbierte Dunkelziffer angenommen werden.

Daraus ergibt sich für die Ausfallrate:

$$\frac{x}{n} \frac{d_n}{\Delta t} = \lambda$$

Hieraus kann ein Stichprobenmittel für λ bestimmt werden, das jedoch keine statistische Konfidenz aufweist. So hat beispielsweise kein Ausfall bei zehn Mustern nicht dieselbe Aussagekraft wie kein Ausfall bei 10^9 Mustern, obwohl in beiden Fällen das Stichprobenmittel Null ergibt.

Als Konfidenzniveau wird in diesem Leitfaden $v = 90\%$ festgelegt. Für dieses Konfidenzniveau wird ein Konfidenzintervall

$$[\underline{\lambda}, \bar{\lambda}]$$

berechnet. Die obere Grenze des Intervalls dient als Schätzwert für die Ausfallrate λ .

Zur Berechnung können sowohl nichtparametrische Modelle als auch parametrische Modelle verwendet werden, bei denen eine bestimmte Verteilungsannahme getroffen wird. In diesem Leitfaden wird ein nichtparametrisches Modell zugrunde gelegt, das auf der Bestimmung eines Konfidenzintervalls für eine Binomialverteilung basiert.

Numerisch kann dieses Intervall mithilfe der Fisherschen F-Verteilung (Quotient von Chi-Quadrat-verteiltern Zufallsvariablen) bestimmt werden. Für $x \geq 1$ ergibt sich:

$$\lambda = \frac{(x+1)q}{(n-x) + (x+1)q},$$

wobei $q(1-(1-v)/2)$, $2(x+1)$, $2(n-x)$ das entsprechende Quantil der F-Verteilung ist, welches tabelliert bzw. in statistischer Software implementiert ist.

Im Allgemeinen werden Konfidenzintervalle betrachtet, die symmetrisch um das Stichprobenmittel liegen. Falls dabei negative Ausfallraten auftreten (z. B. bei Nullausfällen), ist die untere Intervallschranke auf 0 zu verschieben.

Für den Fall von Nullausfällen ergibt sich die Ausfallrate zu:

$$\lambda_0 = 1 - \sqrt[n]{1-v}$$

Diese ist stets größer als Null, auch wenn keine Ausfälle beobachtet wurden.

Als realistisch beobachtbarer Zeitraum wird der Garantiezeitraum mit 3 Jahren angesetzt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in den ersten Beobachtungsjahren Ausfälle aus früheren Produktionsjahren einfließen, während die zuletzt gefertigten Teile ggf. nur über einen Teilzeitraum beobachtet werden können.

Wird die Auswertung zweier ähnlicher Komponenten zu einer gemeinsamen Klasse zusammengefasst, verringern sich in der Regel die FIT-Raten, wobei durch dieses Vorgehen jedoch komponentenspezifische Informationen verloren gehen.

Darüber hinaus lässt sich im Rahmen solcher Untersuchungen in der Regel auch die Verteilung der Ausfallarten bestimmen. Hierzu werden potenzielle Fehler definiert, in Ausfallarten klassifiziert, den beobachteten Ereignissen zugeordnet und anschließend prozentual ausgewertet.

6.3 Labortests zur Ermittlung von Ausfallrate und Verteilung der Ausfallarten

Eine physikalische Bestimmung der Ausfallrate ist aufgrund der sehr geringen statistischen Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls in der Regel nur mit sogenannten zeitraffenden Methoden innerhalb realistischer Zeiträume möglich.

Im Gegensatz zur Feldbeobachtung bieten Labortests die Möglichkeit einer „zeitlich beschleunigten“ Betrachtung.

Messungen mit realen Belastungsprofilen führen – aufgrund der erforderlichen hohen Stückzahlen und langen Versuchsdauern – nur mit erheblichem Aufwand zu belastbaren Ergebnissen. Daher werden Labortests in der Regel mit erhöhter Belastung oder beschleunigter Alterung (engl. Accelerated Lifetime Test) durchgeführt.

Dabei muss eine Beziehung zwischen den Laborbelastungsprofilen und den Betriebsprofilen des Fahrzeugs hergestellt werden, um eine Rückführung auf die Ausfallerwartungen im Realbetrieb zu ermöglichen.

Grundsätzlich werden für die zeitlich beschleunigte Bestimmung der Ausfallraten folgende Vorgehensweisen unterschieden:

- i) Erhöhte Belastungszeit (Erhöhung des Tastverhältnisses zwischen Belastungs- und Ruhephase)
- ii) Erhöhte Belastung durch Änderung von Parametern (innerhalb des zulässigen Betriebsbereichs, z. B. Temperatur)
- iii) Überhöhte Belastung über den Betriebsbereich hinaus (jedoch unterhalb der Grenzwerte der verwendeten Materialien, z. B. Kristallisationstemperaturen)
- iv) Verfeinerter Nachweis der Änderung

i) Erhöhte Belastungszeit zeitliche Raffung

Bei der erhöhten Belastungszeit wird das Verhältnis zwischen Belastungszeit und Ruhezeit deutlich erhöht, um die übliche Lebensdauerbeanspruchung in kürzerer Zeit zu erreichen.

Dies entspricht einer zeitlichen Raffung. Dabei ist sicherzustellen, dass durch die Raffung keine Impulsbelastung außerhalb der zulässigen Parameter entsteht.

Beispiel: Erhöhung der Betriebszeit und damit längere Bestromung von Leitungen, wobei das Nutzerverhalten (Ein- und Ausschaltzyklen) ebenfalls zeitlich gerafft wird.

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

Bei der erhöhten Beanspruchung können alle physikalischen und chemischen Einflussgrößen herangezogen werden, die die Reaktionsgeschwindigkeit von Alterungs- oder Degradationsvorgängen beeinflussen. Die für die Anwendung wichtigsten sind:

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

Bei der mechanischen Beanspruchung (a) ist mit äußerer und innerer Reibung zu rechnen.

Bei der thermischen Beanspruchung (b) beschreibt die Arrhenius-Beziehung den grundlegenden Zusammenhang zwischen Temperatur und Reaktionsgeschwindigkeit. Da sich jedoch meist mehrere Prozesse überlagern, sind zur allgemein gültigen Beschreibung zusätzliche Konstanten (z. B. Erstarrungstemperaturen) erforderlich.

Auch für die weiteren Beanspruchungsarten existieren entsprechende Modellbeziehungen, mit deren Hilfe Rückschlüsse auf die Ausfallwahrscheinlichkeit gezogen werden können.

Problematisch bei beschleunigten oder überhöhten Belastungen kann sein, dass bei z. B. stark erhöhter Temperatur- oder Vibrationsbeanspruchung andere Alterungsmechanismen dominieren, die im Realbetrieb nicht relevant sind, oder dass Effekte überlagert werden.

iii) Überhöhte Belastung über den Betriebsbereich hinaus jedoch unterhalb der Grenzwerte der verwendeten Materialien, z. B. Kristallisationstemperaturen etc.

Dieses Vorgehen entspricht grundsätzlich dem unter Punkt ii) beschriebenen, jedoch werden die Belastungen über die für den Betrieb definierten Grenzen hinaus erhöht. Dabei ist sicherzustellen, dass die Materialgrenzen nicht überschritten werden, da ansonsten aufgrund der Überlagerung anderer Ausfallmechanismen keine aussagekräftigen Ergebnisse erzielt werden können.

iv) Verfeinerter Nachweis der Änderung

Unter einem „verfeinerten Nachweis der Änderung“ versteht man das präzise Bestimmen zeitlicher Veränderungen charakteristischer Eigenschaften (Messdaten), die in einem begrenzten Betriebsintervall beobachtet werden. Aus diesen Veränderungen kann das Verhalten und damit die Ausfallrate über längere Zeiträume hochgerechnet werden.

Der verfeinerte Nachweis erfolgt im Betrieb unter üblichen Belastungen, also ohne Erhöhung oder Überhöhung der Prüfbedingungen. Dadurch ergeben sich deutlich höhere Anforderungen an die Auflösung und Genauigkeit der eingesetzten Messsysteme.

6.4 Verwendung von Rechenmodellen zur Ermittlung einer Ausfallrate

Eine Alternative zu physikalischen Tests sind Rechenmodelle, die *a priori*-Abschätzungen der Ausfallrate auf Basis eines Formel- und Regelwerks sowie mithilfe standardisierter Fragenkataloge ermöglichen.

Gemäß ISO-26262-5 [1] ist die Bewertung von Hardware-Elementen ein zulässiges alternatives Vorgehen zur Bestimmung der Zuverlässigkeit.

Im Zuge zahlreicher Entwicklungen in sicherheitskritischen Umgebungen wurden verschiedene Rechenmodelle zur Abschätzung der Zuverlässigkeit elektronischer Komponenten entwickelt. Diese Modelle können auch für die in diesem Leitfadens betrachteten Anwendungen herangezogen werden. Beispiele hierfür 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 $\lambda_{(gesamt)}$ gemäß FIDES auf oberster Ebene aus drei multiplikativen Faktoren zusammen (siehe FIDES-Basis-Modell):

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

Die herstellereigene gesamte Ausfallrate λ ist somit abhängig von der gesamten Liefer- und Prozesskette. Sie wird wesentlich durch Auditierungen beeinflusst, die analog zu Qualitätsmanagement-Audits (z. B. nach ISO 9001) von externen Auditoren durchgeführt werden.

Für den Fall, dass die Liefer- und Prozesskette nicht vollständig betrachtet werden kann, sieht die FIDES Vorschläge für Default-Werte vor, die zur konservativen Abschätzung herangezogen werden können.

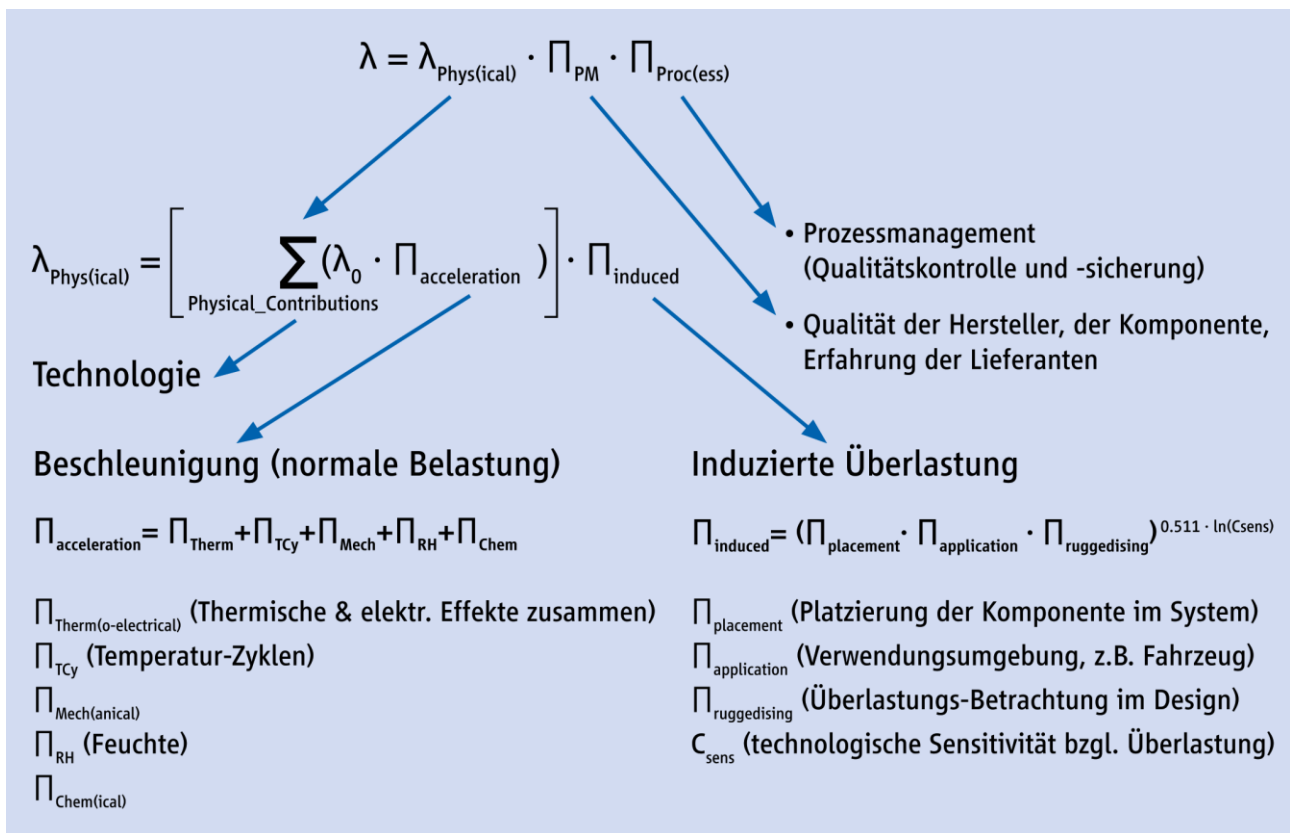


Abbildung 6-1: Das FIDES Basis-Modell

6.4.1 Berücksichtigung physikalischer Effekte im FIDES

Physikalischer Anteil λ_{Phys}

Für den physikalischen Anteil $\lambda_{\text{Physical}}$ im FIDES-Basis-Modell gilt:

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

↑ Basisausfallrate
 ↑ Anzahl der Stunden eines Jahres

$\lambda_{\text{Phys(ical)}}$ beschreibt im Wesentlichen die verschiedenen physikalischen Fehlerursachen. Zusätzlich geht ein näherungsweise multiplikativer Audit-Faktor $\Pi_{\text{ruggedising}}$ ein.

In λ_{Phys} fließt die typ- und technologieabhängige Basis-Ausfallrate λ_0 ein, die komponentenspezifisch zu bestimmen ist.

Die physikalischen Ausfallraten gemäß der jeweiligen Fehlermodelle werden mit einem allgemeinen Überlastungszuschlag Π_{induced} sowie der Basis-Ausfallrate $\lambda_{0,(\text{Component})}$ multipliziert.

Zu den verschiedenen Fehlerursachen existieren jeweils physikalische Modelle, in denen die Ursachen getrennt betrachtet werden. Da sich Fehlerursachen überlagern oder gegenseitig beeinflussen können, lassen sich thermische und elektrische Effekte auch zusammenfassen.

Bei den im Leitfaden behandelten Komponenten werden gemäß FIDES Guide thermische und elektrische Effekte gemeinsam berücksichtigt. In der allgemeinsten Form können Π_{Thermal} und $\Pi_{\text{Electrical}}$ jedoch unabhängig voneinander auftreten.

Der physikalische Anteil wird maßgeblich durch das Betriebsprofil (use profile) bestimmt. Ein Beispiel hierfür ist in Tabelle 6-1 dargestellt. Jede Phase i mit den dazugehörigen Faktoren $(\Pi_{\text{therm}})_i$, $(\Pi_{\text{TCy}})_i$, $(\Pi_{\text{RH}})_i$, $(\Pi_{\text{Mechanical}})_i$ und $(\Pi_{\text{Chem}})_i$ bilden einen Summanden in der Gleichung für λ_{Phys} .

Für $t_{\text{annual},i}$ wird die Gesamtdauer der jeweiligen Phase innerhalb eines Jahres berücksichtigt. Typischerweise bleibt Π_{induced} bei Automobilanwendungen über die Phasen hinweg konstant. Die Summe der Phasen ergibt über ein Jahr hinweg 8760 Stunden.

		Usage model				Temperature & humidity			Temperature cycling			
Season	Phase	Days included	Hours per day	Calendar time (hours)	Thermal cycles/day	Reference temperature in 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
	Unpowered	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
	Unpowered	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
	Unpowered	152	22,54	3426,08	2	0	5	90	10	304	11,25	5

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

Bis auf Π_{Chem} werden alle anderen Beschleunigungsfaktoren nach den Formeln der Physics of Failure ermittelt, die jeweils komponentenspezifisch gelten.

Diese Formeln sind mit Gewichtungsfaktoren versehen, deren Summe 100 % ergibt.

Die normale Beschleunigung der Alterung durch chemische Effekte wird gemäß folgender Gleichung bestimmt:

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

Dabei gelten die in Tabelle 6-2 aufgeführten Werte, wie im FIDES Guide beschrieben.

In der FIDES-Methodik beträgt der Gewichtungsfaktor weight für Sicherungen 0,06 und für Konnektoren (Stecker, Schraubverbindungen, elektrische Verbindungen) 0,20.

Saline pollution level	Π_{sal}
Low	1
High	2

Product protection level	Π_{prot}
Hermetic	0
Non hermetic	1

Application pollution level	Π_{zone}
Low	1
Moderate	2
High	4

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

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

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

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

$$\Pi_{induced} = \left(\Pi_{placement} \cdot \Pi_{application} \cdot \Pi_{ruggedising} \right)^{0.511 \cdot \ln(C_{sens})}$$

Der Faktor $\Pi_{application}$ wird durch die Bewertung definierter Kriterien bestimmt.

Für jedes Kriterium existieren drei Bewertungsstufen mit den Einstufungen 0, 1 oder 2, die einer nicht-aggressiven (0), moderaten (1) oder stark beanspruchenden (2) Anwendungssituation entsprechen.

Die Details zu den Kriterien und deren Gewichtung sind im FIDES Guide [5] ab Seite 100 ff. beschrieben.

Je nach Komponententyp und Anwendungsfall sind diese Kriterien individuell zu beantworten.

Der Faktor $\Pi_{ruggedising}$ bewertet die Überbeanspruchung gegenüber dem gewählten Design der Komponente und wird mithilfe eines standardisierten Fragenkatalogs 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 der Satisfaction_Mark = 0, 1, 2 oder 3 bewertet (0 = schlechteste, 3 = beste Bewertung).

Der Gewichtungsfaktor Recom_Weight beschreibt die Relevanz der Frage; die Summe aller Gewichte beträgt 75.

Der Fragenkatalog (siehe FIDES Guide [5] ab Seite 102ff.) umfasst 16 Fragen und kann Maschinenhersteller, Konfektionäre, OEMs und weitere Zulieferer betreffen. Die Auswahl und Zuordnung der Fragen ist je nach Referenzkomponente individuell vorzunehmen.

Wenn nicht alle Fragen zutreffen, ist das Gesamtgewicht von 225 (= 75 · 3) entsprechend zu reduzieren, so dass sich im Bestfall eine Recom_Grade = 3 ergibt.

Für $\Pi_{ruggedising}$ ergibt sich damit ein Wertebereich von 1 bis 2.

Als Default-Wert ist der Wert 1,7 festgelegt. Dieser kann verwendet werden, wenn kein Audit durchgeführt wird oder werden kann.

6.4.2 Prozessfaktoren im FIDES Guide

Für die Bewertung der Prozesseinflüsse während Herstellung, Transport, Lagerung, Zusammenbau und Produktion wird die Prozessgüte bestimmt.

Dabei werden zwei multiplikative Faktoren auf die rechnerisch ermittelte physikalische Ausfallrate einer Komponente angewendet: Π_{PM} (Parts Manufacturing) und $\Pi_{Proc(ess)}$ (Prozessfaktor).

Parts Manufacturing Π_{PM} :

Der Faktor Π_{PM} beschreibt den Einfluss der Bauteilherstellung auf die Ausfallrate. Abhängig von den vorliegenden Qualitätszertifizierungen wird ein *Part_Grade* zwischen 0 und 1 ermittelt.

Das allgemeine Modell lautet:

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

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 Leitfaden immer der Fall) durch

$$Part_Grade = \left\lfloor \frac{(QA_{manufacturer} + QA_{component}) \cdot \varepsilon}{24} \right\rfloor$$

mit $QA_{manufacturer}$:

Manufacturer quality assurance level	Position relative to the state of the art	$QA_{manufacturer}$
Certified IATF 16949	Higher	3
Certified according to one of the following standards: QS9000, TL9000, 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 certified	Lower	1
No information	Very much lower	0

$QA_{component}$:

Component quality assurance level	Position relative to the state of the art	$QA_{manufacturer}$
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 the 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 or audited more than 6 years earlier) or small series production	2
Previous disqualification or problem with feedback from operations	1

Die Kriterien für die verschiedenen Stufen von $QA_{\text{component}}$ unterscheiden sich je nach Komponentenfamilie („item family“) und werden für passive Sicherungen und Stecker in den jeweiligen Abschnitten in Kapitel 7 beschrieben.

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

Der Faktor $\Pi_{\text{Proc(ess)}}$ beschreibt die Einflüsse des Prozesses und des Prozessmanagements auf die Ausfallrate und wird durch Auditfragen ermittelt. Dabei soll insbesondere die Erfahrung in Entwicklungs- und Herstellungsprozessen bewertet werden.

Die Ermittlung des Π_{Proc} -Faktors erfolgt über ein Audit gemäß Kapitel V im FIDES Guide, das von externen Auditoren durchgeführt wird.

Unterteilung in Phasen:

Für verschiedene Komponenten sind nicht immer alle sieben FIDES-Phasen relevant. Die Gewichte ($\text{Contribution_Phase}$) der nicht relevanten Phasen werden auf die verbleibenden Phasen übertragen, sodass sich deren Summe zu 100 % ergibt. Diese Anpassung erfolgt z. B. bei passiven Sicherungen oder Splice-Verbindungen komponentenspezifisch.

Aufteilung der Fragen:

Darüber hinaus erfolgt eine Aufteilung der Auditfragen, z. B. in solche, die nur den Maschinenhersteller, nur den Konfektionär oder beide betreffen. Insgesamt existieren 155 verschiedene Fragen, die teilweise in mehreren Phasen wiederholt gestellt werden können. Welche Fragen relevant sind, ergibt sich aus dem jeweiligen Komponenten- und Prozesskontext.

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 bestimmt durch:

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

und nimmt Werte zwischen 0 und 1 an.

Dabei bezeichnet Audit_Mark_j die in Phase j erzielte Bewertung bei einer maximal möglichen Bewertung Max_Audit_Mark_j .

Audit-Fragenkatalog

Die Auditfragen sowie deren Gewichtungen und erreichbare Punktzahlen sind im FIDES Guide [5] ab Seite 270 aufgelistet. Dort sind auch die Hinweise für die Einstufung enthalten. Die relevanten Fragen hängen von der Komponente, der auditierten Partei (Maschinenhersteller, Konfektionär, Zulieferer) und spezifischen Annahmen ab.

Der konkrete Fragenkatalog wird von den Auditoren in Abhängigkeit der Referenzkomponente erstellt.

Falls kein vollständiges Audit durchgeführt wird, sind konservative Default-Werte zu verwenden. Ein Audit kann auch teilweise erfolgen, z. B. beim Maschinenhersteller; für nicht auditierte Teile (z. B. beim Konfektionär) werden entsprechende Ersatzwerte angesetzt.

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)
$\Pi_{\text{Proc(ess)}}$	1,0 (= Process_Grade 1)	4,0	8,0 (= Process_Grade 0)

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

6.4.3 Anpassungen am FIDES Modell

Für bestimmte *item families* aus dem FIDES Guide werden in diesem Leitfaden Anpassungen vorgenommen. Diese Anpassungen betreffen insbesondere Komponenten, deren Aufbau oder Einsatzbedingungen vom Standardmodell abweichen. Die jeweiligen Modifikationen werden in den Kapiteln zu den entsprechenden Funktionsbaugruppen beschrieben und fachlich begründet.

7 Ausfallraten und Fehlermodelle der wichtigsten Bordnetzkomponenten

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.

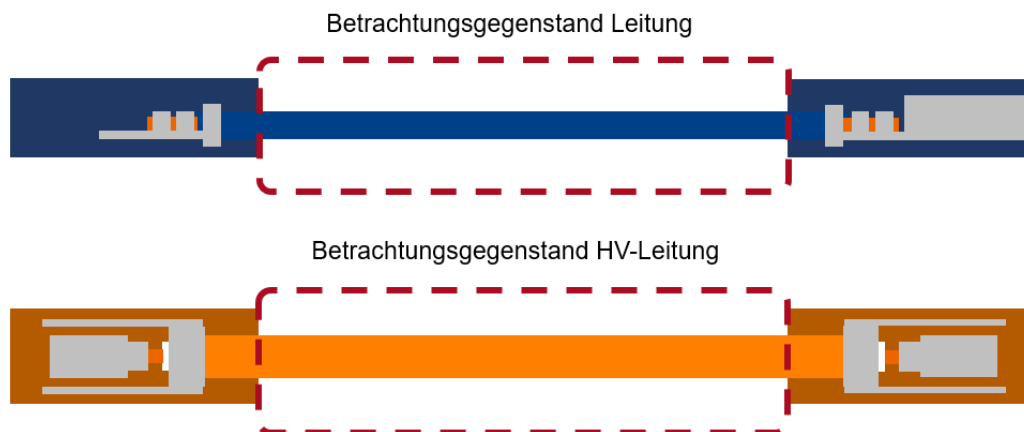


Abbildung 7-1: Abgrenzung der Funktionsbaugruppe "elektrische Leitung"

7.1.2 Genaue Beschreibung der Verwendungsart (Use Case)

Elektrische Leitungen dienen der Übertragung von Energie und/oder Signalen zwischen ihren Anschluss-
punkten. Dabei stellt die Leitungsisolation die elektrische Trennung der Leiter untereinander sowie eines ge-
gebenenfalls vorhandenen Leitungsschirms gegenüber den Leitern und der Umgebung sicher.
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 hochfre-
quenten Kommunikationsprotokollen wie z. B. CAN-FD oder Ethernet reichen. Entsprechend sind die dafür
zum Einsatz kommenden Leitungen hinsichtlich unter anderem Leiter, Material, Isolation oder Schirmung zu
spezifizieren bzw. auszuwählen.

Ein optionaler Leitungsschirm verhindert bzw. mindert sowohl die Ausbreitung 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 elektri-
schen Leitern als auch induktiv eingekoppelte Störungen.

Abhängig von den oben aufgezeigten Anforderungen kommen verschiedene Leitungsquerschnitte zum Ein-
satz.


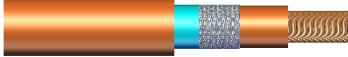

7.1.3 Übersicht zu den Klassen

Leitungen können wie folgt in Klassen unterschieden werden:




- Leitungen 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 für Energieversorgung mit Anwendung 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>Nicht belegt</p>	<p>Verdrillte Leitungen mit Schirm (Klasse 2d)</p> 

- Leitungen für Datenübertragungen (Klasse 3)

<p>Einadrige Leitung ohne Schirm (Klasse 3a)</p> <p>Nicht belegt</p>	<p>Einadrige Leitung mit Schirm für asymmetrische Daten- oder Signalübertragung (Klasse 3b)</p> <p>Beispiel: Koax</p> 
<p>Verdrillte Leitungen mit differenzieller Datenübertragung ohne Schirm (Klasse 3c)</p> 	<p>Verdrillte Leitungen mit differenzieller Datenübertragung mit Schirm (Klasse 3d)</p> <p>Beispiel: STP</p> 

LIN-Leitungen werden gemäß dem aktuellen Stand der Technik der Klasse 1 (Energieleitungen) zugeordnet. Es besteht jedoch die Möglichkeit, dass künftig zusätzliche Kriterien für LIN-Leitungen definiert werden, die zu einer späteren Einstufung in die Kategorie der Datenleitungen führen könnten.

Andere Typen von dreiadrigen Leitungen, wie z. B. die SENT-Leitung gemäß SAE J2716 Rev. 4, werden erst in einer zukünftigen Ausgabe berücksichtigt. SENT-Leitungen dienen der Übertragung digital codierter Sensorsignale und weisen hinsichtlich Signalintegrität und Leitungsausführung teils andere Anforderungen auf als andere Datenleitungen. Eine Einordnung erfolgt daher erst nach weiterer Abstimmung und Analyse.

Die in diesem Leitfadens betrachteten Umfänge gelten nicht für Datenleitungen mit Leitern aus Aluminium.

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

7.1.3.1.1 Beschreibung der Klasse

Für die Energieversorgung werden grundsätzlich Nieder- und Hochvoltanwendungen gemäß der ISO 19642 Familie unterschieden. Niedervoltleitungen sind für Gleichspannungen ≤ 60 V DC ausgelegt, Hochvoltleitungen für > 60 V DC. Die Kabelsätze müssen für diese Anwendungen mit den jeweils qualifizierten Komponenten (z. B. Stecker, Kontakte, Dichtungen) durch den Tier-1 Lieferanten unter Abstimmung mit dem OEM konfektioniert bzw. aufgebaut werden.

Die Qualifizierung umfasst Prüfungen, die die Eignung der Leitungen unter anderem für folgende Eigenschaften nachweisen:

- Funktionsrelevante Maße und mechanische Eigenschaften:
 - Durchmesser
 - Konzentrität
 - Zugfestigkeit
 - Interaktion mit Zugentlastungen
- Elektrische Eigenschaften
 - Widerstand
 - Spannungsklassen

- Verträglichkeit mit der Umgebung
 - Klebstoffe in Bändern
 - Silikone, PU und EPDM in Dichtungen
 - Medien im Bauraum (z.B. Wasser, Benzin, Öl)
 - Alterung, Lebensdauer, Verarbeitung
 - Isolation gegenüber anderen Leitern und leitenden Umgebungsstrukturen (z.B. KFZ-Chassis)

7.1.3.1.2 Anforderungen bezüglich Lebenszyklus der Funktionsbaugruppe

Die Anforderungen an den Produktlebenszyklus von Leitungen bzw. sogenannten Meterwaren werden durch die geltenden Normen, insbesondere ISO 19642, sowie durch zusätzliche herstellerspezifische Vorgaben definiert. Für den Lebenszyklus der Leitungen werden die folgenden Phasen unterschieden, in denen jeweils unterschiedliche Belastungen und Anforderungen auftreten:

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

Zusätzlich gelten übergreifende Anforderungen, die unabhängig von den Phasen einzuhalten sind. Dazu zählen u.a.:

- Transport, Lagerung, Verarbeitungsprozess und Lagerdauer:
Diese sind im technischen Leitfaden ZVEI TLF 0100 „Verwendungshinweise für Automotive Leitungen“ beschrieben, herausgegeben vom Fachverband Kabel und Drähte des ZVEI.
- Die Verarbeitung der Leitungen:
Dazu gehören insbesondere Schneiden, Abisolieren, Schweißen, Crimpen von metallischen Kontakten sowie das Umhüllen mit selbstklebenden Kunststoff- oder Gewebebändern. Chemische Verträglichkeit, Klebstoffhaftung, Abisolierbarkeit, Materialauswahl und Art der Verarbeitung müssen abgestimmt sein. Maximal zulässige mechanische Belastungen durch Ablängen, Absetzen oder Verlegen sind einzuhalten.
- Schutz vor übermäßiger mechanischer Schädigung:
z.B. durch Abrieb, Kerbkräfte oder Quetschung.
- Chemische Einflüsse:
Leitungen widerstehen einem geringen bzw. kurzfristigen Kontakt mit chemischen Flüssigkeiten, sind jedoch in der Regel nicht dauerhaft beständig. Ein Schutz ist nur durch spezielle Werkstoffe gewährleistet.
- Klimatische und mechanische Belastungen:
Im Lebenszyklus wirken u.a. Temperaturen von -40 °C bis zur spezifischen Einsatztemperatur, Feuchtigkeit, Öle, Kälteschutzmittel, sowie Zug-, Biege- und Torsionskräfte. Konstruktiv werden diese Anforderungen über geeignete Isolierwerkstoffe und den Aufbau der Leitung (mehrdrahtig, symmetrisch oder unsymmetrisch) adressiert.
- Einhaltung der maximal zulässigen Einsatztemperatur:
Wird eine mittlere Temperaturbelastung gewählt, die 20 K unter der Prüftemperatur für 3000 h gemäß ISO 19642 liegt, kann ein Isolationsversagen aufgrund thermischer Alterung während der definierten Nutzungsdauer bzw. Betriebsdauer ausgeschlossen werden [24].
- Beachtung minimaler Biegeradien,
- Beachtung dynamischer Bewegungsprofile bzw. Prüfung in Einbaulage,
- Nachweis der Alterungsbeständigkeit unter vorgegebenen Umwelt- und mechanischen Einflüssen.

Diese Anforderungen sind entlang der gesamten Prozess- und Lieferkette abzustimmen und klar zu kommunizieren.

7.1.3.1.3 Einzuhaltende Eigenschaften der Funktionsbaugruppe

Die Leitungen werden gemäß den von den OEMs vorgeschriebenen Prüfungen und Spezifikationen (z. B. ISO 19642) qualifiziert. Dabei werden die mechanischen, elektrischen, thermischen und chemischen Eigenschaften überprüft und für den Einsatz im Fahrzeug freigegeben.

Spezielle Prüfungen, die nicht Bestandteil der üblichen Leitungsspezifikationen sind, wie zum Beispiel die Eignung für dynamische Anwendungen, Umschäumungen oder besondere Verarbeitungsschritte, werden durch den OEM oder den jeweiligen Tier-1 Lieferanten durchgeführt.

7.1.3.1.4 Fehlermodelle

Die im Folgenden dargestellten Fehlerbilder haben ihre Ursache überwiegend in systematischen Fehlern. Das bedeutet, sie entstehen in der Regel nicht durch Alterung oder zufällige Ausfälle, sondern zum Beispiel durch eine falsche Auslegung oder durch Fehler bei Handhabung und Integration.

Mögliche Fehlerbilder bei Leitungen sind:

- Unterbrechung, zum Beispiel durch Bruch der Leitung,
- Erhöhter elektrischer Längswiderstand, zum Beispiel durch gebrochene Litzen in Verbindung mit Oxidierung,
- Kurzschluss
 - zwischen zwei benachbart liegenden Leitungen mit jeweils beschädigter Isolierung,
 - zwischen einer Leitung mit beschädigter Isolierung und einer leitenden Umgebungsstruktur (z. B. Kfz-Chassis),
- Veränderung der elektrischen Eigenschaften einer Energieleitung.
Anmerkung: Dieses Fehlerbild hat für Energieleitungen keine praktische Auswirkung.

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

Typische Ursachen für diese Fehlerbilder sind unter anderem:

- Schädigungen durch Umwelteinflüsse (Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Chemikalien), die über die Auslegungsgrenzen hinausgehen, zum Beispiel durch
 - Unterdimensionierung einer Leitung, wodurch sie sich aufgrund von Überstrom über die Spezifikationsgrenze der Isolierung hinaus erwärmt
 - Wärmeeinwirkung von außen
 - Wärmeeinwirkung von innen, zum Beispiel durch Ableitung aus einem Steuergerät
 - Schädigung durch Salzwasser oder chemische Prozesse wie Elektrolyse
- Schädigungen durch mechanische Einwirkung (Biegung, Zug, Druck, Vibration), die über die Auslegungsgrenzen hinausgehen, zum Beispiel durch:
 - ein scharfkantiges Element im Verlegeweg, an dem die Isolierung oder die Leitung durch Bewegung aufscheuert
 - Bruch einer querschnittsstarken Leitung infolge von Vibration
 - Bruch einer Leitung durch wiederholte Biegewechsel
 - Torsion

7.1.3.1.5 Ausfallraten

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 aus der 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 [19]** bzw. **FIDES Guide 2022 [5]**

Zu ergänzen ist, dass im FIDES Guide lediglich bei einer Vielzahl von Drähten $N_{b_{wires}}$, zum Beispiel im Abschnitt *Hybrids and Multi Chip Modules / Wiring, case, substrate, external connections*, folgende Basisfehler-rate angegeben wird:

$$\lambda_{0_wiring} = 1,04e-4 (N_{b_{wires}})^{0,93}$$

Leitungen werden gemäß ISO 19642 sowie nach OEM- und Lieferantenvorgaben produktionsbegleitend geprüft, zum Beispiel durch Hochspannungsprüfungen und Prüfungen des spezifizierten Außendurchmessers. Je nach Kundenvorgabe können auch 100-%-Prüfungen vorgesehen sein. Durch entsprechend ausgelegte Routine- und Endprüfungen lassen sich produktionsbedingte systematische Fehler weitgehend vermeiden.

Die in ISO 19642 beschriebene konstruktive Ausführung von Fahrzeugleitungen baut inhaltlich auf früheren Normen wie DIN 72551-1 und ISO 6722 auf. Den in der Arbeitsgruppe beteiligten Unternehmen sind – bei Einhaltung dieser Normen und Spezifikationen – keine der Leitung selbst zuzuordnenden Ausfälle bekannt. Dabei sind folgende Prämissen einzuhalten: Eine Leitung ist konstruktiv nach ISO 19642 zu entwickeln, nach ISO 19642 zu validieren und gemäß den Spezifikationen des Leitungsherstellers einzusetzen. Weitere Voraussetzung ist die Einhaltung der unter Kapitel 7.1.3.1.2 genannten Bedingungen.

Bei der Abschätzung einer Ausfallrate für Leitungen (common-use case) gehen ausschließlich stochastische (zufällige) Ausfälle ein. In Analogie zu gängigen Standards (z. B. IEC 60216 (DIN EN 60216), ISO 19642, DIN/TS 70112-1) konzentrieren wir uns für die Klasse der Energieleitungen auf das Versagen der Isolation bei Wickelprüfungen nach konstanter Temperaturbelastung. Für Datenleitungen lässt sich dieser Ansatz auf deren Isolation übertragen. Durch Überbelastung kann mithilfe des allgemein akzeptierten Arrhenius-Modells ein Zeitraffungsfaktor zwischen den Messungen und dem FIDES-Betriebsprofil (siehe Tabelle 6-1) bestimmt werden. Eine Ausfallrate für die Leitung ohne Isolation wäre separat zu betrachten; hier ist nach Expertenmeinung eine niedrigere Ausfallrate als für isolierte Leitungen zu erwarten.

Die nachfolgend genannten Ausfallraten bzw. Ausfallraten pro Länge beziehen sich auf zufällige Hardwareausfälle. Diese Ausfälle werden vor allem durch Verschleiß des Isolations- und Mantelmaterials hervorgerufen.

Ausfallraten für Energie-Leitungen sind in Ausfällen pro Zeit und pro belasteter Leitungslänge anzugeben. Die Einheit lautet daher 1 Ausfall / 10^9 h / m = 1 FIT/m.

Aufgrund verfügbarer Felddaten kann auch bei keinem bekannten Ausfall lediglich eine obere Schranke der Ausfallrate berechnet werden. Die Ausfallrate beträgt in diesem Fall nicht 0 FIT, sondern entspricht der oberen Grenze des Konfidenzintervalls (z. B. bei 90 % Vertrauensniveau). Der Stichprobenumfang des Felddatensatzes geht dabei wesentlich in die Intervallbreite ein.

Für die Klasse 1 Leitungen wurden Messungen aus LV-Prüfungen und Materialtests von vier Leitungsherstellern (seit 2004) gemäß einer abgestimmten Tabellenschablone bereitgestellt, aufbereitet, anonymisiert und statistisch ausgewertet. Die Gruppierung nach Isolationsmaterial und die Betrachtung provozierter Ausfälle unter Überlast erwiesen sich als zielführend. Zur Prüfung der statistischen Signifikanz (lineare und nichtlineare Ausgleichsrechnung, Maximum-Likelihood-Methode, empirische Verteilungsfunktion) wurden zusätzlich allgemein zugängliche Daten, etwa aus Forschungsprojekten, betrachtet.

Durch die Datensammlung wurde ein hinreichend großer Stichprobenumfang für ausgewählte Isolationsmaterialien erreicht. Die Messpunkte (Anzahl intakter Muster nach Wickelprüfung bei verschiedenen Entnahmepunkten aus dem Wärmeschrank) liegen für unterschiedliche konstante Testtemperaturen vor. Sie ermöglichen die Bestimmung der Weibull-Parameter τ und β sowie des Exponentialparameters λ durch FIT an die Überlebenswahrscheinlichkeit:

$$W(t) = \exp \left[- \left(\frac{t}{\tau} \right)^\beta \right]$$

Die Weibull-Verteilung weist eine zeitabhängige Ausfallrate auf:

$$\lambda_{\text{phys}}(t) = \lambda(t) = \frac{\beta t^{\beta-1}}{\tau^\beta}$$

Dabei ist τ der Skalenparameter (nahe dem Erwartungswert μ) und β der Formparameter, der die Beschleunigung des Alterungsprozesses charakterisiert. $\beta=1$ entspricht der Exponentialverteilung mit konstanter Ausfallrate, $\beta > 1$ einer steigenden Ausfallrate. Für die Exponentialverteilung gilt

$$\lambda_{\text{phys}} = \lambda_{\text{exp}} = \frac{1}{\tau}$$

Anhand des Arrhenius-Modells:

$$m(T) = t_r \exp\left(\frac{T_a}{T-T_\infty}\right)$$

werden für ein gegebenes Isolationsmaterial die Invarianten Aktivierungstemperatur T_a und reaktionskinetische Periodendauer t_r bestimmt. Ein modifiziertes Arrhenius-Modell liefert entsprechende Invarianten für die Standardabweichung σ . Auf die Anpassung einer Erstarrungstemperatur T_∞ wurde verzichtet; physikalisch liegt diese ohne Anpassungen bei $T_\infty = 0 \text{ K} = -273.15^\circ\text{C}$.

Es ist zu beachten, dass bei den gesamten Testdaten natürlicherweise nur die Überlagerung von Fehlern

- (I) aus Burn-in, sog. „Kinderkrankheiten“ ($\beta < 1$),
- (II) durch zufällige Ausfälle ($\beta = 1$) unbekannter Ursache und
- (III) prinzipiell vorherberechenbare Alterungseffekte ($\beta > 1$)

beobachtet werden kann.

Da die Messpunkte typischerweise bei fortgeschrittenen Betriebszeiten liegen, können Burn-in-Effekte vernachlässigt werden. Die beobachteten Ausfälle entsprechen somit der Summe aus zufälligen und alterungsbedingten Ausfällen. Alterungsbedingte Ausfälle sind prinzipiell statistisch berechenbar und durch geeignete Spezifikationen (z. B. maximale Betriebsdauer) begrenzbar.

Die gefitteten Weibull- bzw. Exponentialverteilungen umfassen daher sowohl Alterungs- als auch Zufallsausfälle. Die Standardabweichung σ beschreibt die zufällige Streuung der Ausfallzahlen. Für eine konservative Betrachtung wird angenommen, dass alle Ausfälle als zufällige Ausfälle zu bewerten sind und das Arrhenius-Alterungsmodell exakt gilt. Die aus den Datenfits hochgerechnete Ausfallrate für $T = 90^\circ\text{C}$ nach 8.000 h gemäß FIDES-Betriebsprofil wird als obere Abschätzung für λ_{phys} herangezogen.

Als FIDES-Referenzobjekt für die Klasse wird folgende Leitung betrachtet:

- Leitermaterial: Cu
- Leiterquerschnitt: 0.5 mm^2
- Isolationsmaterial: PVC T105 FLRY
- Funktion: Energie- oder Datenübertragung
- Einbauort: alle Bauräume außer Motorblock und Getriebe ($\leq 90^\circ\text{C}$ Dauerbetrieb)
- Betriebsprofil gemäß Tabelle 6-1, 25°C Außentemperatur, 8.000 h Betrieb (≈ 15 Jahre)
- Wicklungslänge gemäß ISO 19642-2: mindestens $1,8 \text{ cm}$ pro Windung

Aus dem Pkw-Betriebsprofil ergibt sich zusätzlich zur Temperatur-Extrapolation ein Zeitraffungsfaktor von $12 = 24\text{h} / 2\text{h}$ (durchschnittliche tägliche Betriebszeit).

Da bei Wickelprüfungen nur der gewickelte Abschnitt geprüft wird, wird die Ausfallrate konservativ durch die minimale Wicklungslänge dividiert.

Es ergibt sich:

$$\lambda_{\text{phys-pro-1}} \leq 0,00034 \text{ FIT/m} = 3,4\text{e-4 FIT/m}$$

Die statistische Auswertung lässt sich gemäß FIDES Guide [5] auf andere Leitungen derselben Klasse übertragen oder rechnerisch anpassen. Die Daten deuten auf eine nur geringe Abhängigkeit der Ausfallrate vom Leiterquerschnitt hin; die Datenlage genügt jedoch nicht für eine statistisch signifikante Aussage. Der Querschnitt beeinflusst vielmehr die getestete Wicklungslänge und damit die Güte der Abschätzung.

Weitere Einflüsse auf die spezifische Ausfallrate $\lambda_{\text{phys-pro-1}}$ sind: Höhere β -Werte oder längere tägliche Betriebszeiten verschlechtern die Ausfallrate, höhere τ -Werte oder höhere Temperaturklassen verbessern sie.

Typischerweise werden in einem Pkw-Bordnetz bis zu ca. 2 km Leitungen verschiedener Klassen verbaut. Daraus ergibt sich die konservative Abschätzung:

$$\lambda_{\text{phys, Bordnetz}} \leq 0,69 \text{ FIT}$$

Dieser Wert ist ggf. mit Default- oder Auditfaktoren zu einer Gesamtausfallrate λ_{gesamt} zu ergänzen.

Für die Berechnung wurde ein Streubereich von $\pm 2 \sigma$ um die gefitteten Verteilungen angesetzt. Bei angenommener Normalverteilung der Streuung entspricht dies einem Konfidenzniveau von 95,4 % und liegt damit über dem im Leitfaden verwendeten Niveau von 90 %.

7.1.3.1.6 Fehlerverteilungen

Für Leitungen können vier verschiedene Ausfallarten ausgemacht werden:

- Unterbrechung, zum Beispiel durch Bruch der Leitung (60% Anteil)
- Erhöhter elektrischer Längswiderstand, zum Beispiel durch gebrochene Litzen in Verbindung mit Oxidation (10% Anteil)
- Kurzschluss (30% Anteil)
 - zwischen zwei benachbart liegenden Leitungen mit jeweils beschädigter Isolierung
 - zwischen einer Leitung mit beschädigter Isolierung und einer leitenden Umgebungsstruktur (z.B. Kfz-Chassis)

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

Dieser Abschnitt ist für die nächste Ausgabe zurückgestellt.

7.1.3.3 Eigenschaften Leitungen zur Datenübertragung (Klasse 3)

7.1.3.3.1 Beschreibung der Klasse

Für die Datenübertragung werden spezifisch ausgelegte Kabelsätze eingesetzt. Diese müssen mit den jeweils qualifizierten Komponenten (Stecker, Kontakte, Dichtungen usw.) durch den Tier-1 Lieferanten in Abstimmung mit dem OEM konfektioniert bzw. aufgebaut werden.

Für eine beispielhafte Übersicht der nachzuweisenden Eigenschaften wird zunächst auf Kapitel 7.1.3.1 verwiesen. Ergänzend ist für Datenleitungen die informationstechnische Eigenschaft zu berücksichtigen, insbesondere die Prüfung der Signalqualität bzw. der Qualität der Datenübertragung.

7.1.3.3.2 Anforderungen bezüglich Lebenszyklus der Funktionsbaugruppe

Grundsätzlich gelten dieselben Anforderungen wie bei den Leitungen zur Energieversorgung. Es wird daher auf Kapitel 7.1.3.1 verwiesen.

7.1.3.3.3 Einzuhaltende Eigenschaften

Die Funktion einer Datenleitung besteht darin, eine zuverlässige Datenübertragung sicherzustellen. Zu den relevanten charakteristischen Eigenschaften zählen die Impedanz, die Rückflussdämpfung, die Einfügedämpfung sowie das Übersprech-Verhalten.

Als Ausfallkriterium gilt eine Störung oder ein Verlust der Datenübertragung infolge von Abweichungen von den hierfür spezifizierten Grenzwerten.

7.1.3.3.4 Fehlermodell

Für die Fehlerbilder sei auf Kapitel Fehlermodelle mit den Fehlerbildern für Leitungen zur Energieversorgung bis 60 V verwiesen. Die dort aufgeführten Fehlerursachen sind überwiegend systematischer Natur.

Ein zusätzliches Fehlerbild für Datenleitungen ergibt sich aus einer beeinträchtigten Signalintegrität bzw. einer reduzierten Datenübertragung, verursacht durch Veränderungen der Übertragungstechnischen Eigenschaften. In gewissen Grenzen können verrauschte oder verfälschte Daten technisch detektiert, geregelt oder rekonstruiert werden. Ein fehlerhaft übertragenes Signal oder ein ausbleibendes Signal kann unter Umständen durch ein Steuergerät erkannt werden. Daher liegt der Fokus der folgenden Worst-Case-Abschätzung auf dem Fehlerbild „fehlerhafte Signalintegrität“.

Bei der Abschätzung einer Ausfallrate für Datenleitungen (common-use case) werden ausschließlich stochastische (zufällige) Ausfälle berücksichtigt. In Analogie zu den gängigen Standards (z. B. DIN EN ISO 2578 (1998-10), IEC 60216 (DIN EN 60216), ISO 19642) gelten dieselben Grundsätze wie bei Leitungen der Klasse 1 hinsichtlich des Versagens der Isolation bei Wickelprüfungen unter konstanter Temperaturbelastung. Für Datenleitungen ist jedoch zusätzlich die Änderung der dielektrischen Eigenschaften und damit der Signalqualität maßgeblich.

7.1.3.3.5 Ausfallrate von Datenleitungen

Ausfallraten für Datenleitungen sind, im Gegensatz zu Energieleitungen, in Ausfällen pro Zeit und pro Stück Datenleitung zu betrachten (und nicht pro belasteter Leitungslänge). Die allgemeine Einheit lautet daher $1 \text{ Ausfall} / 10^9 \text{ Stunden Lebensdauer} = 1 \text{ FIT}$.

Im Folgenden werden die Datenleitungstypen STP, UTP, koaxial und Starquad betrachtet. Zum Vergleich werden Energieleitungen beim Ansatz der Felddaten ebenfalls berücksichtigt.

7.1.3.3.5.1 Ausfallrate gemäß FIDES (angepasst anhand vorliegender Messungen)

Es liegen Messungen zur thermischen Alterung, insbesondere von STP-Leitungen, mit der Übertragungsklasse 10G vor. Die Analyse der Messdaten von STP- und vergleichbaren Koaxialleitungen stützt die Annahme, dass die thermische Alterung den dominierenden Einflussfaktor darstellt und sich für die genannten Datenleitungstypen ähnlich auswirkt. Eine Unterscheidung nach unterschiedlichen Übertragungsraten ist für die Betrachtung der Ausfallraten nicht erforderlich.

Auch wenn die Messungen im Wesentlichen Alterungseffekte erfassen, bildet der Datensatz die gesamte Badewannenkurve ab. Das bedeutet, es werden Ausfälle aus Burn-in, zufällige Ausfälle und spezifizierbare Alterungsausfälle gemeinsam beobachtet. Die beobachteten Ereignisse schließen somit zufällige Hardwareausfälle ein. Für eine konservative Worst-Case-Abschätzung werden diese Ausfälle vollständig den zufälligen Hardwareausfällen zugeordnet.

Die Veränderung der Datenübertragung wird über die Änderung frequenzabhängiger S-Parameter vor und nach der thermischen Belastung der Leitung bewertet. In diesem Abschnitt werden logarithmierte S-Parameter betrachtet. Überschreitet die Änderung definierte Grenzwerte, gilt die Datenleitung als ausgefallen. Für den betrachteten Leitungstyp (Ethernet STP) werden die Anforderungen der Open Alliance TC9 [43] [44] herangezogen.

Für die Auswertung lagen Messungen aus Freigabeprüfungen zu zwei Alterungsbelastungen vor:

- Langzeitalterung (LZA): 3000 h bei 105 °C
- Kurzzeitalterung (KZA): 240 h bei 130 °C

Die Rückflusdämpfung S11 (bzw. Sdd11 bei differentieller Übertragung) ist für die Alterungsbewertung ungeeignet. Gründe hierfür sind:

- Die Messung von S11 ist sehr sensitiv gegenüber Frequenzänderungen, die bei der thermischen Alterung nicht einbezogen werden (können).
- Die Bewertung von S11 vor und nach thermischer Alterung liefert keine Tendenz zur Verbesserung oder Verschlechterung der Leitung.

Da für die Bestimmung einer Ausfallzeit keine konkurrierenden Parameter notwendig sind, wird im Folgenden ausschließlich die Einfügedämpfung S21 (bzw. Sdd21 bei differentieller Übertragung) als Alterungsindikator verwendet (siehe Abbildung 7-2). Die Rückflusdämpfung S11 wird im Rahmen der Alterungsbewertung lediglich daraufhin geprüft, ob die Grenzwerte gemäß Open Alliance TC9 eingehalten werden.

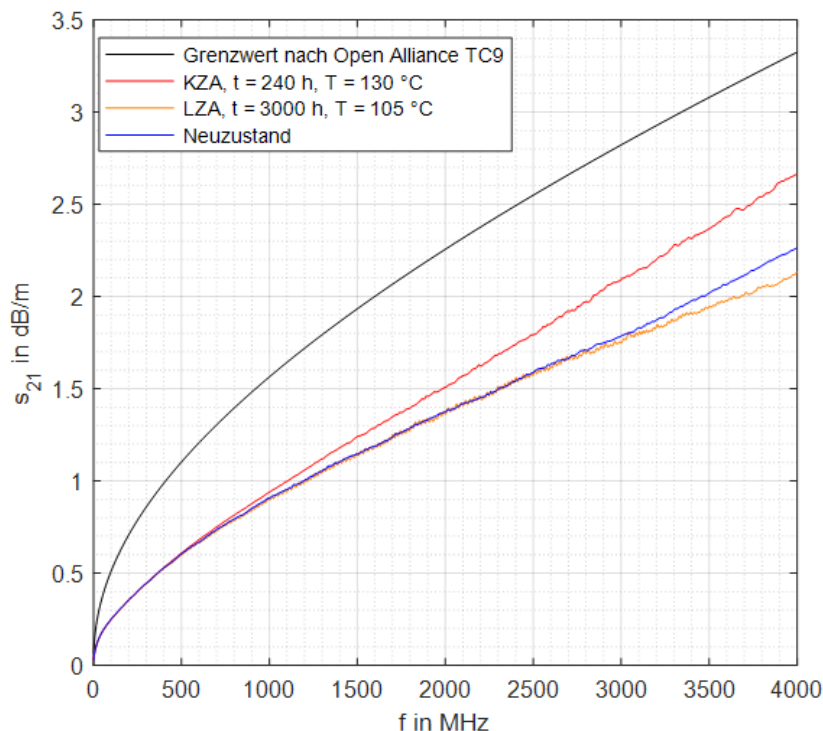


Abbildung 7-2: Änderungen der logarithmierten Einfügedämpfung s_{21} nach thermischer Last in Abhängigkeit der Frequenz, der Grenzwert nach Open Alliance TC9 ist durch die oberste Linie dargestellt

Mit Hilfe von Lebensdauerindikatoren werden Ausfallzeiten bei LZA (105 °C) und KZA (130 °C) bestimmt. Typische Betriebslasten liegen nach Tabelle 6-1 bei 90 °C. Mit Hilfe der gefundenen Ausfälle zu höheren Temperaturen (105 °C und 130 °C) wird über das Arrheniusmodell eine Lebensdauer bei 90 °C extrapoliert (siehe Ausfallraten).

Daraus ergibt sich

$$\lambda_{\text{phys,Dielektrikum}} \approx 3,36\text{E-5 FIT},$$

Dies zeigt, dass Datenleitungen bei reiner thermischer Belastung und üblichen Betriebstemperaturen eine hohe Robustheit gegenüber Ausfällen aufweisen.

Für die Isolation der Datenleitung kann das allgemeine Ergebnis zur Isolation von Leitungen angewendet werden. Dabei wurden zusätzlich mechanische und klimatische Belastungen berücksichtigt. Daraus ergibt sich:

$$\lambda_{\text{phys}} = \lambda_{\text{phys,Isolation}} + \lambda_{\text{phys,Dielektrikum}} \approx 0,00343 \text{ FIT}$$

7.1.3.3.5.2 Ausfallrate aus Felddaten

Für die Validierung der mit FIDES bestimmten Ausfallraten werden Felddaten zu Ausfällen und Nichtausfällen zusammengestellt und statistisch ausgewertet. Dazu wurden von mehreren OEMs, Konfektionären und Leitungsherstellern Informationen zu Produktionszahlen sowie zu typischerweise verbauten Längen bzw. Stücklängen der Leitungen für den im Leitfaden betrachteten Pkw-Typ bereitgestellt:

Längen

STP (ETH): 10 m

J-UTP: 50 m

UTP ohne Mantel: 350 m

Koax: 30 Meter

Starquad: 5 m

Zum Vergleich Energieleitungen ca. 1 600 m (ca. 2 000 m Leitungen insgesamt pro Bordnetz)

Stücklängen:

STP (ETH): 1 m pro Stück

J-UTP: 2 m pro Stück

UTP ohne Mantel: 2 m pro Stück

Koax: 1,5 m pro Stück

Starquad: 1 m pro Stück

Alle Datenleitungsstücke sind damit kürzer als 10 m und fallen in dieselbe Klasse hinsichtlich der Ausfallkriterien gemäß Open Alliance TC9. LIN-Leitungen werden wie Energieleitungen betrachtet, da hier in erster Näherung ebenfalls die Isolation der maßgebliche Einflussfaktor ist.

Die Betriebsprofile der Datensätze repräsentieren im Wesentlichen die typische Nutzung, die durch das standardisierte Betriebsprofil (bei 25°C gemäß Tabelle 6-1) angenähert abgebildet wird.

Für Details zur Berechnung des Stichprobenmittels und des Konfidenzintervalls wird auf Kapitel 6.2 verwiesen. Für ein Konfidenzniveau von 90 % wird jeweils die obere Schranke des Konfidenzintervalls als Schätzwert für die Ausfallrate λ_{gesamt} herangezogen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7-1 für die verschiedenen Datenleitungsklassen dargestellt.

λ_{phys} aus Felddaten für 1 fiktiven Ausfall					
FIT-Raten	Bezeichnung Leitung	Typische Längen bzw. Stücke pro Pkw		Obere Schranke Konfidenzintervall	Stichprobenmittel (unabhängig von Konfidenz)
Klasse	Einheit ->	m	Stücke	1 FIT	1 FIT
3b	Koax	30	20	0,0280	0,0193
3c I	J-UTP	50	25	0,0224	0,0154
3c II	UTP o.M.	350	175	0,0032	0,0022
3d I	STP (Ethernet)	10	10	0,0561	0,0386
3d II	Starquad	5	5	0,1122	0,0772
3	Datenleitungen zusammengefasst			0,002387	0,001600
	Einheit ->	m	Stücke	1 FIT	1 FIT
1	Energieleitungen (& LIN)	1600		0,000351	0,000241

Tabelle 7-1: Ausfallraten aus oberen Schranken von Konfidenzintervallen zu Feldausfällen für verschiedene Unterklassen von Datenleitungen und zum Vergleich für Klasse 1; ergänzend ist das Stichprobenmaterial angegeben.

Unter der Annahme eines fiktiven zufälligen Ausfalls und unter Berücksichtigung der in Kapitel 6.2 erläuterten Dunkelziffern ergibt sich für ein Datenleitungsstück allgemein (über alle Klassen hinweg):

$$\lambda_{\text{phys}} < 0,00239 \text{ FIT (90\% Konfidenz)}$$

$$\lambda_{\text{gesamt}} < 0,0180 \text{ (90\% Konfidenz)}$$

Damit liegen die Felddaten unter den Ausfallraten gemäß Kapitel 7.1.3.3.5, also unter den aus FIDES mit testbasierten Anpassungen abgeleiteten Ausfallraten (einheitlich für alle betrachteten Klassen). Der für RF- und HF-Aspekte relevante Prozessfaktor wurde über einen herstellerübergreifenden Fragebogen zur Selbstevaluierung bestimmt und beträgt $\Pi_{\text{Process, RF/HF}} = 0,915$. Für die übrigen Faktoren wurden Default-Werte verwendet. Eine Auditierung der jeweiligen Datenleitungshersteller ermöglicht eine genauere Bestimmung und potenzielle Absenkung der Ausfallrate.

Bei künftig steigenden Stückzahlen und weiterhin einem fiktiven Ausfall würde die Ausfallrate aus Felddaten sinken. Der Zugang über Felddaten etabliert die bei der FIDES grundsätzlich offene Konfidenz der Ausfallrate zu einem Niveau von 90%.

7.1.3.3.6 Fehlerverteilung

Die Expertengruppe hat die Fehlerverteilung wie folgt festgelegt:

Ausfallart	Prozentualer Anteil
Datenübertragung nicht möglich	10%
Datenübertragung gestört	90%

Tabelle 7-2: Fehlerverteilung Datenleitung

Bei künftig weiter steigenden Stückzahlen und weiterhin keinem beobachteten Ausfall würde die aus Felddaten abgeleitete Ausfallrate weiter sinken. Damit wird über Felddaten eine Konfidenz von 90 % für die Ausfallrate hergestellt.

7.1.3.4 Eigenschaften Aluminium-Leitungen

Die in Kapitel 7.1.3.1.3 vorgenommenen Abschätzungen zu Ausfallraten der PVC-Isolierung bei Cu-Leitungen können als obere Abschätzungen für die PVC-Isolierung von Al-Leitungen herangezogen werden. Dies liegt darin begründet, dass die Wechselwirkungen zwischen Aluminium und PVC als weniger kritisch bewertet werden als die zwischen Kupfer und PVC (Stichwort PVC-Instabilität).

Weiteres ist derzeit auf die nächste Ausgabe zurückgestellt.

7.1.3.5 Eigenschaften Leitungen mit Cu-Legierungen

Zurückgestellt auf die nächste Ausgabe.

7.1.4 Tabellen und Berechnungsformeln

7.1.4.1.1 Ausfallrate für Kupfer-Leitungen zusammengefasst

Für eine konservative Abschätzung werden die Ausfallraten aus den Felddaten der Energieleitungen herangezogen. Die Ausfallraten für Datenleitungen werden dagegen konservativ gemäß FIDES Guide [5] bestimmt, wobei die angepassten Faktoren aus den vorliegenden Messungen berücksichtigt werden. Eine Übersicht der Zahlenwerte findet sich in der Tabelle am Ende dieses Kapitels.

Die Ausfallraten können durch weitere Arrhenius-Versuche bis zum tatsächlichen Ausfall experimentell genauer bestimmt werden, entweder durch neue Tests oder durch die Auswertung zusätzlicher Messdaten. Bisherige Ergebnisse zeigen jedoch, dass Leitungen gegenüber thermischer Belastung sehr robust sind.

Alternativ ist eine statistische Verfeinerung durch detailliertere Auswertung von Felddaten möglich. Dafür wären insbesondere Einblicke in Regresslisten, präzisere Angaben zu produzierten Leitungsmengen und eine fortgeführte Beobachtung der Felddaten hilfreich. Eine größere Stückzahl bei gleichbleibend fiktiver Ausfallzahl führt zu engeren Konfidenzintervallen.

Grundsätzlich können konservative Default-Werte bei Auditfaktoren durch vor Ort Audits gemäß FIDES Guide [5] ersetzt werden. Dadurch lassen sich die Ausfallraten in der Regel weiter verringern, also verbessern.

7.1.4.1.2 Zusammenfassung Ausfallraten für (Cu-)Leitungen

In der folgenden Tabelle ist eine Übersicht der Ausfallraten elektrischer Leitungen nach Klassen dargestellt. Typischerweise relevante Werte sind fett hervorgehoben.

FIT Raten für Leitungen gemäß FIDES mit Anpassung (durch vorhandene Versuche) bzw. Felddaten mit 90%Konfidenz								
FIT Raten (worst case Zugang, hier Felddaten bei Energieleitungen, FIDES bei Datenleitungen)				λ_{phys}	λ_{gesamt}			
Material	Typ	Spannungsklasse	Klasse im Whitepaper	Ohne Π_{PM}, Π_{Proc} mit Default für $\Pi_{ruggedising}$	Default-Werte statt Audit (aber ggf. mit $\Pi_{Proc,RF/HF}$)	Audit bestmöglich	Audit real	Audit schlechtestmöglich
Cu	Energieleitung [FIT/m]	bis 60 V	1	3,51E-04	2,89E-03	1,51E-04	n.b.	8,22E-03
		bis 1000 V	2	nicht betrachtet (n.b.)				
	Datenleitung [FIT/Stück (bis 10m)]	-	3	3,43E-03	2,59E-02	1,35E-03	n.b.	7,35E-02
Al	nicht betrachtet (n.b.)							
Cu Legierung	nicht betrachtet (n.b.)							

Tabelle 7-3: Übersicht der Ausfallraten für Energie- und Datenleitungen

Die angegebenen Werte gelten für einadrige Energieleitungen sowie für Datenleitungen mit gemeinsamer Umhüllung.

Es ist zu beachten, dass kurze Energieleitungen und Datenleitungen mit geringer Stückzahl im Vergleich zu anderen Komponenten, wie zum Beispiel Sicherungen, Masseverbindungen oder Steuergeräten, in der Größenordnung von etwa zwei Zehnerpotenzen niedrigere Ausfallraten aufweisen können. Bei der Summierung von Ausfallraten in Leitungssätzen ist daher eine geeignete Rundung auf die gültigen Stellen erforderlich. In diesem Leitfadens werden typischerweise zwei gültige Stellen verwendet.

Die Fehlerverteilungen sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

Ausfallart	Energieversorgung bis 60V (Klasse I)	Energieversorgung bis 1000V (Klasse II)	Datenleitungen (Klasse III)
Unterbrechung bzw. Datenübertragung nicht möglich	60%	Klasse II wird nicht in dieser Ausgabe betrachtet	10%
Erhöhter Widerstand	10%		n.a.
Kurzschluss	30%		n.a.
Veränderung der dielektrischen Eigenschaften	n.a.		n.a.
Datenübertragung gestört	n.a.		90%

Tabelle 7-4: Fehlerverteilung für elektrische Leitungen

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. der Steckerleiste eines Steuergeräts 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 der Leitung
- Berücksichtigung aller für die direkte Funktionserfüllung der stromtragenden Komponenten erforderlichen Beitragsleister (z.B. Gehäuseaufnahmen, Verriegelungselemente, Dichtelemente)
- Eingrenzung der Materialien und Ausführungsformen von Schaltungsträger und Leitungstyp

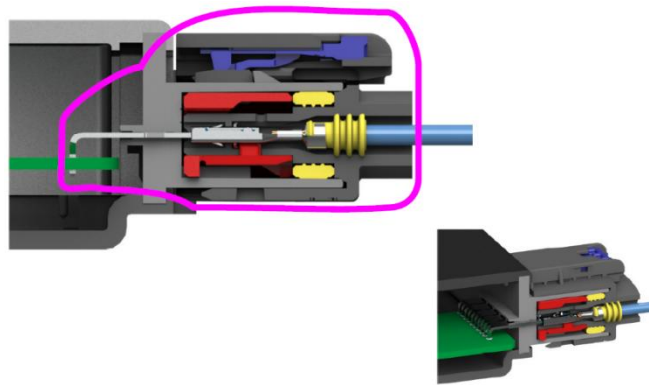


Abbildung 7-3: Aggregate-Schnittstelle

Inline-Steckverbindung:

- Berücksichtigung aller im Strompfad liegenden Komponenten und Übergangsstellen zwischen den Leitungen des Leitungssatzes
- Berücksichtigung aller für die direkte Funktionserfüllung der stromtragenden Komponenten erforderlichen Beitragsleister (z.B. Gehäuseaufnahmen, Verriegelungselemente, Dichtelemente)
- Eingrenzung der Materialien und Ausführungsformen des Leitungstyps

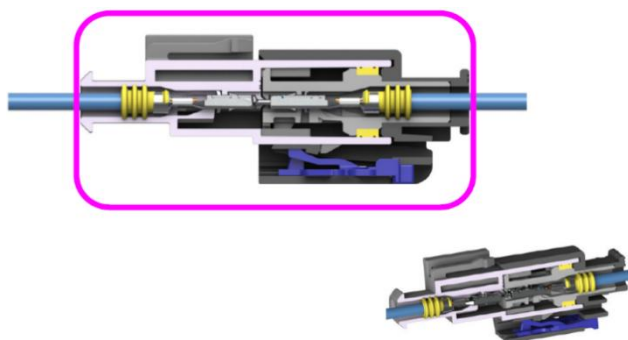


Abbildung 7-4: Inline-Steckverbindung

Hierbei wurden die Systemgrenzen bewusst so definiert, 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 berücksichtigt 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.

Die Übertragung von Felddaten in Bezug auf die Zuverlässigkeit von Steckverbindungen ist darüber hinaus 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 Aggregat-Schnittstelle oder Inline-Steckverbindung im Sinne der oben definierten Systemgrenzen (Steckverbindung = Komponente). Eine explizite Zuordnung der Aussagen zu einzelnen Bauteilen (z. B. Stecker, Stechhülse, Leitung oder deren Übergangsstellen) ist daher nicht möglich.

Funktionen der Komponente

Die zentrale Funktion eines Kontaktsystems innerhalb einer Steckverbindung besteht in der Übertragung von Leistungs- und/oder Signalströmen unter der Anforderung, einen möglichst geringen und über die Lebensdauer der Komponente konstanten Durchgangswiderstand sicherzustellen.

Die wesentlichen Beitragsleister zur Erfüllung dieser Forderung sind:

- die Leitfähigkeit der zur Erstellung der Kontakteile verwendeten Materialien (Bahnwiderstand)
- die an den Berührungspunkten der Kontaktpartner auftretenden Kontaktwiderstände (Enge- und Fremdschichtwiderstand)
- 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 wirken Temperatur- und Schwingbelastungen sowie feste, flüssige oder gasförmige Medien (z. B. Partikel, Flüssigkeiten, Schadgase).

Der typische Durchgangswiderstand einer gesteckten Kontaktierung liegt im Neuzustand, abhängig von der Baugröße, im unteren einstelligen Milli-Ohm-Bereich. Dementsprechend wird der Ausfall einer gesteckten Kontaktierung durch das Überschreiten eines (ebenfalls baugrößenabhängigen) Durchgangswiderstandsgrenzwerts beschrieben. Alternativ kann ein relativer Anstieg über den Ausgangswert (Neuzustand), z. B. um den Faktor 3, als Definition des Ausfalls herangezogen werden.

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

Technische Daten

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

Dies gilt jedoch nicht für beide Kontaktpartner gleichermaßen, sondern betrifft fast ausschließlich das Kontaktteil, das die Kontaktnormalkraft erzeugt.

Die wesentlichen Inhalte eines Datenblattes sind:

- Baugröße des Kontakts (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 (einschließlich des Materials 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 dienen dem Zweck, mehrere Teile (in der Regel andere Bordnetzkomponenten) elektrisch leitend, aber lösbar miteinander zu verbinden. Die Übertragung elektrischer Signale oder Energie soll dabei möglichst unbeeinflusst durch das Kontaktsystem erfolgen. Aus diesem Grund darf der Übergangswiderstand am Steckkontakt einen definierten Grenzwert nicht überschreiten.

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

Für unterschiedliche Spannungsdomänen im Bordnetz (z. B. 12 V, 48 V, Hochvolt) müssen gegenseitige Beeinflussungen vermieden werden. Dies wird in den meisten Bereichen des Bordnetzes durch eine galvanische Trennung oder einen ausreichend hohen Übergangswiderstand (Isolationswiderstand) erreicht. Dadurch beschränkt sich die gegenseitige Beeinflussung auf das Phänomen der elektromagnetischen Interferenz.

Die Gehäuse und die darin enthaltenen Kammern zur Platzierung der Kontaktelemente sind so gestaltet, dass die Kontakte innerhalb einer Spannungsdomäne, unabhängig von der funktionellen Belegung, unmittelbar nebeneinander angeordnet werden können. Dies wird durch die Ausführung der Luft- und Kriechstrecken ermöglicht (z. B. Klemme 30 direkt neben Klemme 31 in der 12-V-Spannungsdomäne).

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

Bei mehrpoligen Steckverbindern ist die Funktion bzw. die Spannungsdomäne eines einzelnen Kontaktes am Steckverbinder selbst nicht ersichtlich. Die Belegung der Pole wird in übergeordneten Architekturen festgelegt und kann unterschiedlichen Zwecken dienen, wie etwa der Energieversorgung, dem Antrieb von Aktuatoren, der Signalisierung oder der Datenübertragung.

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

7.2.3 Übersicht zu den Klassen

Steckkontakte für Signalübertragung und Energieversorgung und können wie folgt in Klassen unterschieden werden:

Klasse Ia: Standardkontakte

Steckkontakte für die Signalübertragung und/oder Energieversorgung bis 6,3 mm Baugröße

Klasse Ib: Power-Kontakte

Steckkontakte für die Energieversorgung ab 6,3 mm Baugröße

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

7.2.3.1 Klasse Ia: Standardkontakte für Signalübertragung und Energieversorgung

7.2.3.1.1 Beschreibung der Klasse

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 elektrischen 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 7-5 dargestellt. Die Anforderungen orientieren sich an der jeweiligen Kontaktbaugröße, abgeleitet von der Steckerbreite, und sind den Ausführungsvorschriften der im VDA organisierten Fahrzeughersteller entnommen (Stecker AV [26]).

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 jedoch aufgrund der expliziten Datenblattangaben solcher Stecker nicht verbindlich vorgegeben.

Die Tabelle 7-5 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.

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				

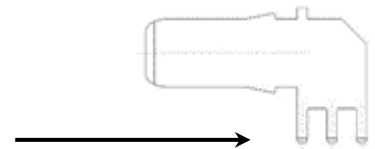


Tabelle 7-5: Mindestanforderungen an Stecker von Aggregate Anschlüssen

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 unzulässiger Deformationen der Steckhülse bei der Montage ins Gehäuse wird die minimale Knickfestigkeit gefordert; im Fokus steht dabei 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 7-6 stellt eine Zusammenfassung der Mindestanforderungen an Steckhülsen dar. Die Referenz auf die Liefervorschriften 214 und 215 (DIN/TS 70214 und LV215) sowie die Stecker-AV der OEMs [26] beschreibt den gemeinsamen Ursprung der Festlegungen. Verbindlich sind die jeweils geltenden OEM-spezifischen Spezifikationen und Prüfvorschriften. Vergleichbar verhält es sich mit den aus USCAR-2 entnommenen Mindestwerten für die Knickfestigkeit. Auch hier gelten im Zweifelsfall die individuellen Vorgaben der Fahrzeughersteller.

Steckhülse				
Kontakt Baugröße [mm]	Minimale Haltekraft in Klammer [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	USCAR-2		LV 214 / LV 215

Tabelle 7-6: Mindestanforderungen an Steckhülsen in Gehäusen bzw. mit angeschlagenen Leitungen

In der Klasse I wird eine maximale Nennspannung von 48 V (obere Grenze 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.

7.2.3.1.2 Anforderungen bezüglich Lebenszyklus der Stecksysteme

Für den Lebenszyklus der Stecksysteme werden die folgenden Phasen unterschieden, in denen unterschiedliche Belastungen und Anforderungen an die Stecksysteme auftreten:

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

Zusätzlich gelten übergeordnete Anforderungen an die Stecksysteme, die unabhängig von den jeweiligen Phasen einzuhalten sind.

7.2.3.1.3 Allgemeine Anforderungen

Die Kontaktsysteme müssen entsprechend den Richtlinien, Vorschriften und Verfahrensanweisungen von Bauteilherstellern, Konfektionär und Fahrzeughersteller (OEM) behandelt werden. Zudem sind geltende Regularien, lokale Gesetze und Auflagen einzuhalten, zum Beispiel im Hinblick auf Gefahrgut wie Flussmittel oder andere Hilfsstoffe für die Montage sowie auf Anforderungen zur Ladungssicherung.

Die verwendeten Werkzeuge und Verschleißteile müssen für eine spezifikationsgerechte 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 ausschließlich im Werkstattbetrieb zulässig. Es muss stets eine Lageorientierung oder eine eindeutige Kodierung vorhanden sein, 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 für die Gehäusebestückung zu verwendenden Kontaktvarianten und Dichtelemente werden abhängig von der Leitungsdimensionierung und der Kammergeometrie vom Bauteilhersteller vorgegeben.

7.2.3.1.4 Anforderungen an die Herstellung der Bauteile

Die Anforderungen an die Herstellung der Bauteile werden in den Bauteillastenheften der OEMs jeweils unterschiedlich festgelegt.

7.2.3.1.5 Anforderungen an den Transport

Beim Transport ist sicherzustellen, dass keine Beschädigungen an den Bauteilen auftreten. Dazu ist eine ordnungsgemäße Verpackung der Bauteile gemäß den geltenden Vorschriften der Bauteilhersteller, Konfektionäre und Fahrzeughersteller (OEM) vorzusehen.

7.2.3.1.6 Anforderungen an die Lagerung

Die Steckverbinder und Kontaktelemente sind konstruktiv so ausgelegt, dass ihre vorgesehene Funktion während der gesamten Lebensdauer eines Fahrzeugs grundsätzlich gewährleistet ist. Die thermischen, mechanischen und chemischen Belastungen, denen die Produkte im Rahmen der Freigabeproofungen ausgesetzt werden, sind deutlich höher als die Belastungen bei einer ordnungsgemäßen Lagerung über mehrere Jahre. Eine uneingeschränkte Lagerfähigkeit bis zur Verarbeitung ist jedoch nicht gegeben, da sich die Anschlussbereiche hinsichtlich einer 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 insbesondere für die darin definierten klimatischen Randbedingungen (1K2). Diese Bedingungen sind in Tabelle 7-7 aufgeführt.

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

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

Die absolute Feuchte begrenzt dabei die relative Feuchte. Bei einer Lagertemperatur von 30 °C ist der Grenzwert der relativen Feuchte von 85 Prozent erreicht.

Weiterhin sind die Produkte vor Regen und vor intensiver korrosiver Atmosphäre zu schützen. Die erforderliche Temperierung der Lagerstelle ist über eine geeignete Temperaturregelung sicherzustellen, eine Feuchterege- lung ist nicht zwingend erforderlich.

Kontaktelemente wie Stift und Buchsenkontakte mit Crimpanschluss oder anderen Anschlusstechniken, ausgenommen Löten, sind bei Einhaltung der genannten Lagerbedingungen für eine Dauer von zwei Jahren un- eingeschränkt weiterverwendbar. Crimpanschlussbereiche sind in der Regel verzinkt und bleiben auch nach längerer Lagerung grundsätzlich voll funktionsfähig. Im Zweifel ist die Stabilität des elektrischen Widerstands der Crimpverbindung über geeignete Testmethoden zu prüfen.

Kontakte mit Lötanschlüssen sollten innerhalb eines halben Jahres verarbeitet werden.

7.2.3.1.7 Anforderungen an die Konfektion

Beschädigungen der Kontaktsysteme während der Konfektion sind grundsätzlich zu vermeiden. Tritt den- noch eine Beschädigung an einem Kontaktsystem auf, ist dieses durch ein Neuteil zu ersetzen. Eine Re- paratur von sicherheitsrelevanten Kontaktsystemen in der Leitungssatzfertigung birgt hohe Risiken und ist da- her nicht zu empfehlen.

Ist während der Konfektion eine Nachbesserung des Leitungssatzes erforderlich, müssen bei der Nachbes- serung die Verfahrensanweisungen des Bauteilherstellers beachtet und die jeweils vorgeschriebenen Werk- zeuge verwendet werden.

In den Verarbeitungsanweisungen der Bauteilhersteller sind die einzuhaltende Höhe und Breite des Adercr- imps einschließlich des Toleranzfensters spezifiziert. Darüber hinaus gelten die in Tabelle 7-6 angegebenen Mindestwerte der Leiterausreißkräfte.

7.2.3.1.8 Anforderungen an die Montage und Produktion

Von einer Reparatur sicherheitsrelevanter Kontaktsysteme wird aufgrund der nicht abschätzbaren funktiona- len 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 die Verfahrensanweisungen des Bauteilherstellers und des Konfektionärs sowie das jeweils vorgeschriebene Werkzeug verwendet werden.

7.2.3.1.9 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 einer Nacharbeit ist anschließend eine Funktionsprüfung durchzuführen. Die Funktionsprüfung ist ausschließlich mit Messmitteln durchzuführen, die vom Hersteller für die entsprechende Schnittstelle zu- gelassen sind.

Zur Demontage von Kontakten aus einem Gehäuse ist die Sekundärverriegelung (Secondary Lock) des Ge- häuses 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 entnom- menen Kontaktteile nicht mehr eingesetzt werden und sind durch Neuteile zu ersetzen. Das Anstecken der Leitungsisolierung zur Kontaktierung des Leiters bei der Fehlersuche stellt eine Beschädigung der Kompo- nente im vorgenannten Sinne dar.

Nacharbeiten an Leitungssätzen und Kontaktsystemen (sofern 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.

7.2.3.1.10 Anforderungen im Kundenbetrieb

Durch den Betrieb des Fahrzeugs beim Kunden ergeben sich über das jeweilige Fahrprofil und die Umwelteinflüsse auf das Fahrzeug Anforderungen an die Stecksysteme. Diese Anforderungen unterscheiden sich je nach Hersteller.

Im Kundenbetrieb bestehen keine Anforderungen hinsichtlich einer direkten Interaktion mit dem Kunden. Es werden lediglich Anforderungen für die Instandsetzung und Reparatur gestellt.

7.2.3.1.11 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.

7.2.3.1.12 Anforderungen an die Wiederverwendbarkeit

Die Wiederverwendbarkeit von Stecksystemen wird per Anforderung ausdrücklich ausgeschlossen.

7.2.3.1.13 Einzuhaltende Eigenschaften der Standardkontakte

Steckverbinder erfüllen in Kombination mit den angrenzenden Systemen wie Leitungen und Aggregaten die Funktion einer trennbaren elektrischen Verbindung. Die Robustheit wird wesentlich durch Gehäuse und Dichtung beeinflusst, weshalb die Funktion immer für die gesamte Komponente betrachtet werden muss. In der Applikation besteht die zentrale Aufgabe in der Übertragung von Leistungs- und/oder Signalströmen bei einem möglichst niedrigen und über die Lebensdauer konstanten Durchgangswiderstand.

7.2.3.1.14 Fehlermodelle

Die Funktion eines Steckverbinders besteht darin, eine durch mechanische Betätigung lösbare elektrische Verbindung sicherzustellen, wobei die Anzahl der Betätigungen begrenzt ist (Steckzyklen) und diese lastfrei erfolgen müssen (Abgrenzung zum Schalter).

Eine vereinfachte Definition der Zuverlässigkeit eines Steckverbinders ist, die elektrische Verbindung mit einem bestimmten Bereich des Durchgangswiderstands unter den vorgesehenen Betriebsbedingungen für eine bestimmte Zeit aufrechtzuerhalten. Da die Durchgangswiderstände, insbesondere die Kontaktwiderstände und die Widerstände der Anschlüsse, im Einsatz über die Zeit degradieren können, ist es sinnvoll, die entsprechenden Degradationsmechanismen zu betrachten, unabhängig davon, ob sie intrinsisch oder extrinsisch sind. Intrinsische Mechanismen, die zu zufälligen Ausfällen führen, beziehen sich auf das Design und die verwendeten Materialien des Steckverbinders. Extrinsische Mechanismen verursachen systematische Fehler und beziehen sich auf Herstellung, Handhabung und Anwendung.

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

Beispiele für extrinsische Degradation sind Verunreinigungen, ungünstige Einbaulagen oder das Aussetzen gegenüber aggressiven Gasen. Solche Mechanismen können qualitativ bewertet werden, sind jedoch generell schwierig, wenn nicht unmöglich, quantitativ in Zuverlässigkeitsaussagen zu überführen.

Weitere Beispiele systematischer Fehler außerhalb des eigentlichen Steckverbinder-Zuverlässigkeitsbereichs umfassen den Einsatz des Steckverbinders außerhalb des Nenntemperaturbereichs (sowohl umgebungs- als auch gehäusebezogen), den Betrieb mit Strömen über der Produktspezifikation (sowohl einzeln als auch verteilt) und unsachgemäße Steckpraktiken wie übermäßiges Stecken oder Ziehen an Leitungen.

Die extrinsische Degradation kann nur durch eine ordnungsgemäß definierte Spezifikation, abgesicherte Produktionsprozesse der Bauteilhersteller sowie eine korrekte Montage und Anwendung durch den Anwender kontrolliert werden.

Bei der Betrachtung realer Degradationsmechanismen müssen die für die Funktion des Steckverbinders maßgeblichen Parameter betrachtet werden. Die Kontaktelemente stellen die elektrische Verbindung zur Übertragung von Energie oder Signalen her. Die Gehäuse dienen der Befestigung und Halterung der Kontaktelemente, deren Lagefixierung, dem mechanischen Schutz, dem Schutz vor Korrosion und der elektrischen Isolation.

Die wesentlichen Fehlerarten im ordnungsgemäß gesteckten Betriebszustand sind:

- Erhöhung des Durchgangswiderstandes über den applikationsspezifischen Grenzwert (R-Fehler) hinaus, so dass zugehörige Funktionen beeinträchtigt werden (open)
- Reduzierung des Isolationswiderstandes unter einen Schwellwert (short)
- Mechanische Trennung der Steckverbinderpartner (open)

Eine Unterscheidung zwischen intermittierenden und permanenten Ausfällen wird nicht vorgenommen.

Als wichtigste abzusichernde Eigenschaft wird im Folgenden der elektrische Durchgangswiderstand betrachtet. Denn:

- eine unzulässige Reduzierung des Isolationswiderstands betrifft entweder die Leitung außerhalb der Systemgrenzen der Steckverbindung oder ist Folge eingedrungener Verunreinigungen (z. B. Flüssigkeiten) und damit ein systematischer Fehler
- ein unbeabsichtigtes Lösen ohne Betätigung der Verriegelungselemente ist stets nicht bestimmungsgemäßer Gebrauch

Die kritische physikalische Größe der Steckverbinderkontaktierung ist der Kontaktwiderstand, der in der jeweiligen Einbausituation und unter elektrischer Belastung über die Zeit stabil bleiben muss.

Für eine mögliche Erhöhung des Kontaktwiderstands über eine applikationsspezifische Grenze müssen mehrere Einflussparameter betrachtet werden, insbesondere das Zusammenspiel der Basiswerkstoffe und Beschichtungen sowie deren physikalische und chemische Veränderungen wie Diffusion, Phasenbildung und -umwandlung, Korrosion und Relaxation. Typische Alterungsmechanismen sind in Tabelle 7-8 angegeben.

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

Tabelle 7-8: Typische Degradationsmechanismen bei Kontaktelementen in Steckverbindern

Der betrachtete Zeitraum, in dem sich die Degradationsmechanismen auf die Funktionalität in der Anwendung auswirken, ist bei einem Steckverbinder im gesteckten Zustand der Applikation unterschiedlich zu bewerten. Da die Steckverbinder in einem Fahrzeug nach dem Verbau des Kabelstrangs bis zum Ende der Nutzung im gesteckten Zustand vorliegen, wirken die Degradationsmechanismen Relaxation, Korrosion und Abrasion infolge von Relativbewegungen bei Temperaturwechsel auch außerhalb des eigentlichen Fahrbetriebs. Diese Zeiträume müssen den Lebensdauerbetrachtungen zusätzlich zu den Belastungen während der Nutzung im Fahrbetrieb zugerechnet werden. Die zusätzlichen Belastungen der Steckverbinder bei der Fahrzeugnutzung führen zu Degradationen der Kontakte infolge von Stromerwärmung und Vibrationen wie zusätzliche Relaxation, Diffusionseffekte und Schichtverschleiß.

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

Die Gesamtwiderstände über die Kontaktverbindung von einem Anschluss zum 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 Übergangswiderstands über einen Kontakt und deren Auswirkung als Ausfall im Betrieb ist applikationsspezifisch unterschiedlich zu betrachten. Im Fall der Übertragung von Signalen sollten Widerstandsänderungen im Zehntel-Ohm-Bereich keinen negativen Einfluss auf die Signalübertragung haben. Hingegen ist bei der Nutzung der Steckkontakte zur Energieübertragung der zu tolerierende Anstieg des Kontaktwiderstands limitiert, damit eine spezifizierte und durch Qualifikation abgesicherte maximale Temperatur im Kontaktpunkt nicht überschritten wird.

Betrachtet man die Degradationsmechanismen, 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 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 einen Abrieb der Beschichtungen infolge 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 beschleunigte Tests möglich, um Fehleraussagen mit verkürzten Testzeiten unter Nutzung kleiner Testgruppen mit geringer Anzahl an Probanden abzuleiten. Problematisch sind 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.

Dies kann etwa eine 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, sodass mit einer Erhöhung der Belastung über die spezifizierten Grenzen hinaus Fehlermodi eintreten können, die nicht im Rahmen der Spezifikation geprüft wurden und zu erhöhten oder verfälschten Fehlerraten führen.

Andere Degradationsmechanismen, die nicht auf Temperatureinfluss zielen, sind die Relativbewegungen der Kontaktpartner im Steckverbinder infolge 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 Steckergehäuse relevant.

Um beispielsweise Aussagen über die Stabilität des Kontaktwiderstands in Abhängigkeit von der Normalkraft zu tätigen, muss 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, der den Kontaktwiderstand als Folge des Nachlassens der Kontaktnormalkraft ansteigen lassen würde, wird bei diesen Werkstoffen erst bei

Temperaturen oberhalb von 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 Temperaturbereichs 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 bis 150 °C, womit solche Kontakte nicht 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 Kontaktwiderstands führt und konträr zu einer Erhöhung des Widerstands 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 Kontaktoberflächen 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 höherer Temperatur als der in der Qualifikation abgesicherten Temperatur 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, etwa 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 bewirken ein stärkeres Altern als Steckungen am Ende der Produktlebensdauer. Beim Automobil fällt dies sehr klein aus (im Gegensatz zur Festlegung der LV 214 [17]) oder ist nur einmalig gegeben, sodass 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, die nicht auf Temperatureinfluss zielen, sind im Automobil in erster Linie die Relativbewegungen der Kontaktpartner im Steckverbinder infolge 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 automobilen Anwendung ist die mechanische Belastung, die meist in Form von Vibration auftritt. Definitionsgemäß ist die Kontaktierung im Steckverbinder durch einen ruhenden Kontakt gegeben. Dies bedeutet, dass die Zuverlässigkeit stets gewährleistet ist, wenn der Kontaktpunkt seine Ruheposition im Betrieb nicht verlässt bzw. kippt, walkt oder rotiert.

Bei Schwingungen ist dies jedoch nicht vollständig zu vermeiden. Je nach Konstruktion des Kontaktelements und seinem umfassenden Gehäuse bzw. der Dichtung treten durch den Einfluss der beschleunigten Massen der angeschlossenen Leitung im Kontaktpunkt Querkräfte auf, die den Kontaktpunkt bewegen bzw. verschieben können. Darüber hinaus spielen die Leitungsmasse und die freie Leitungslänge in der Applikation eine signifikante Rolle. Das Resultat dieses Vorgangs ist ein einhergehender Schichtverschleiß und bei unedlen Kontaktmaterialien tribochemische Reaktionen, die zur Reibkorrosion (Fretting Corrosion) führen können. Für den Fall edler Kontaktbeschichtungen kann es durch eine Überlagerung von Reibverschleiß und Korrosion der Basiswerkstoffe (bei abrasivem Verschleiß durch die Funktionsoberflächen hindurch) zu Ausfällen kommen. Die Verschiebung des Kontaktpunktes, auch als Cross-Slip bezeichnet, erfolgt bei Querkräften, die größer als die Haltekraft des Kontakts 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 im 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 nicht möglich, wenn die Schwingungsamplituden so groß bemessen werden, dass der Kontaktpunkt sich zwangsweise verschiebt. Der dabei auftretende Schichtverschleiß bildet dann ein physikalisch abweichendes Versagen ab, das sich sowohl vom Versagensmechanismus als auch von der Geschwindigkeit erheblich und nichtlinear von der 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. Dies 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 Einbaulage und die Verarbeitung im Fahrzeug einschließt.

Erfahrungsgemäß hat sich bewährt, dass eine Bewertung der Funktionalität des Steckverbinders dann möglich ist, wenn der Kontakt in der jeweiligen Einbauanordnung unter 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 beschleunigter 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-Life zu sein, da die Mehrheit der verwendeten Kontaktteile sich seit Jahren im Feld bewährt hat und auch für künftige Applikationen angewendet wird.

7.2.3.1.15 Ausfallraten

7.2.3.1.15.1 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, sodass die errechneten Basisdaten für Zinnkontakte zugrunde gelegt werden. Die 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 1.413 h Fahrbetrieb bei einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 30 Meilen pro Stunde erlebt. Im dritten Jahr (Monat 25 bis 36) waren die beobachteten Fahrzeugzahlen stark rückläufig, sodass zum Ende der Untersuchung im Monat 36 nur noch 257.000 Fahrzeuge zur Verfügung standen (Abbildung 7-5).

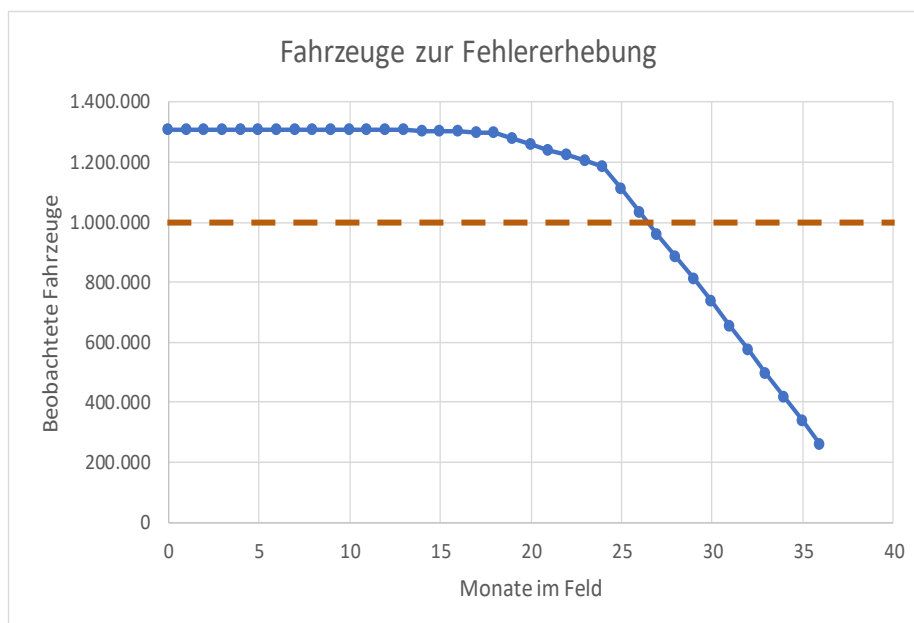


Abbildung 7-5: Beobachtete Fahrzeuge im Feld

Für die Auswertung sind die Ausfälle unterschiedlicher Ausfallarten herangezogen worden. Damit kann mit dieser Studie auch der Anteil der Ausfälle unterschieden werden, der durch systematische Ursachen und durch zufällige Ursachen entstanden ist (siehe Tabelle 7-9). Beispiele für systematische Ursachen sind hierbei hauptsächlich nicht gesteckte Steckverbinder sowie aufgebogene oder beschädigte Kontakte und 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.

Fehlerart / Zeitraum [mon]	0-12	13-24	25-36	zufällig	sys. 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 systemischer Ursachen	85,20%	81,60%	87,80%		X

Tabelle 7-9: Verteilung der Ausfallart bei Steckverbinderkontakten in verschiedenen Zeiträumen

Um eine Betrachtung der Ausfälle auf einen Nutzungszeitraum von 15 Jahren vorzunehmen, wurden die Daten im ersten Schritt bezüglich ihrer statistischen Aussagefähigkeit untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass in den Monaten 7 bis 23 eine ausreichende statistische Aussagefähigkeit 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 Million Fahrzeuge umgerechnet. Ein Beispiel für die statistische Aussage ist für die Summe der systematischen Fehler in Abbildung 7-6 gezeigt.

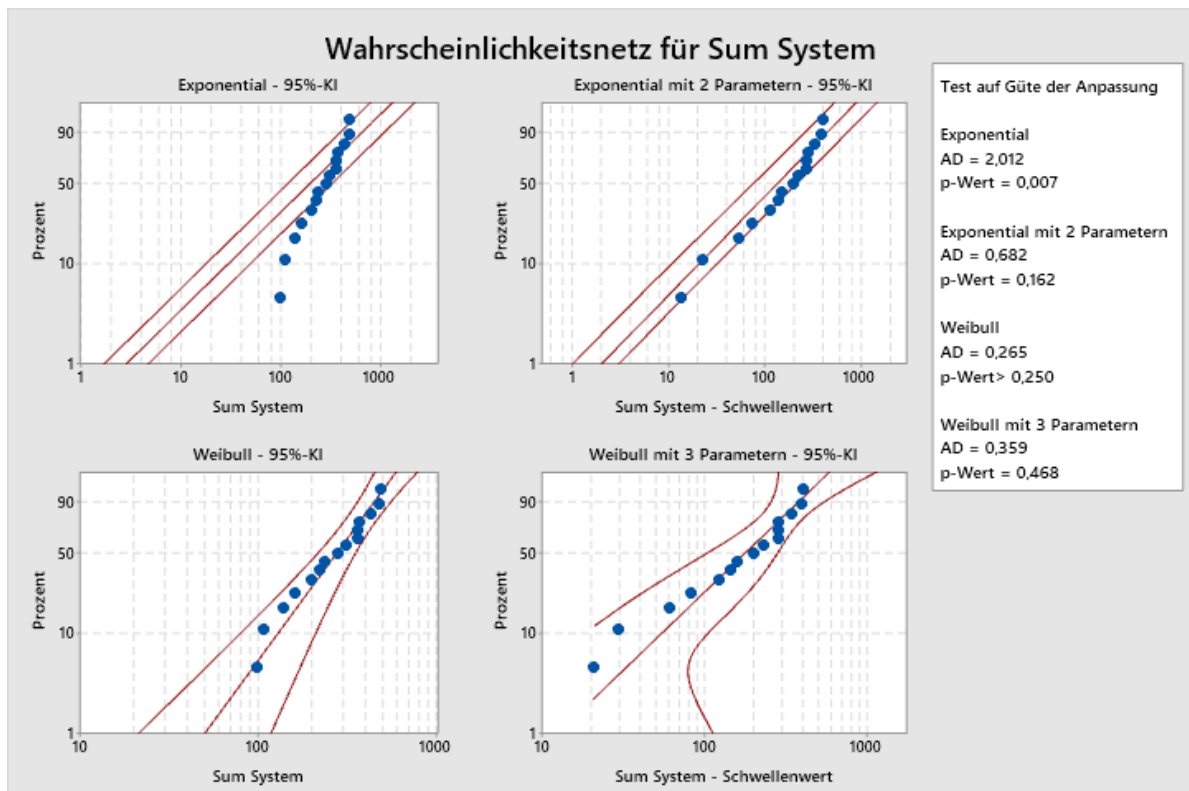


Abbildung 7-6: Beispiel der Verteilungsuntersuchung der Fehlerraten der Summe systematischer Fehler (Sum System)

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

Als nächster Schritt mussten die Fehlerzeiträume, die in den Monaten größer als 23 statistisch nicht aussagefähig sind, auf einen Nutzungszeitraum von 15 Jahren hochgerechnet werden. Dies ist auch deshalb zweckmäßig, weil in den letzten betrachteten Monaten keine Fehler mehr berichtet wurden. Da die typische Lebensdauerkurve zum Ende der Nutzung allgemein wieder ansteigt und hierzu keine Felddaten vorliegen, einigte sich der Expertenkreis darauf, die Fehlerkurve symmetrisch zu betrachten und die Fortschreibung auf den halben Nutzungszeitraum von 7,5 Jahren (90 Monate) zu beschränken.

Da die betrachteten Fehlerdaten bezüglich einer einfachen Weibullverteilung (Abbildung 7-7) eine ausreichend große Konfidenz aufweisen, wurde die Fehlerfortschreibung auf Basis einer linearen Regression im einfachen Weibullnetz durchgeführt. Ein Beispiel ist in Abbildung 7-8 dargestellt. Diese Information wird zur Festlegung der Prozessparameter für den FIDES Guide [5] verwendet.

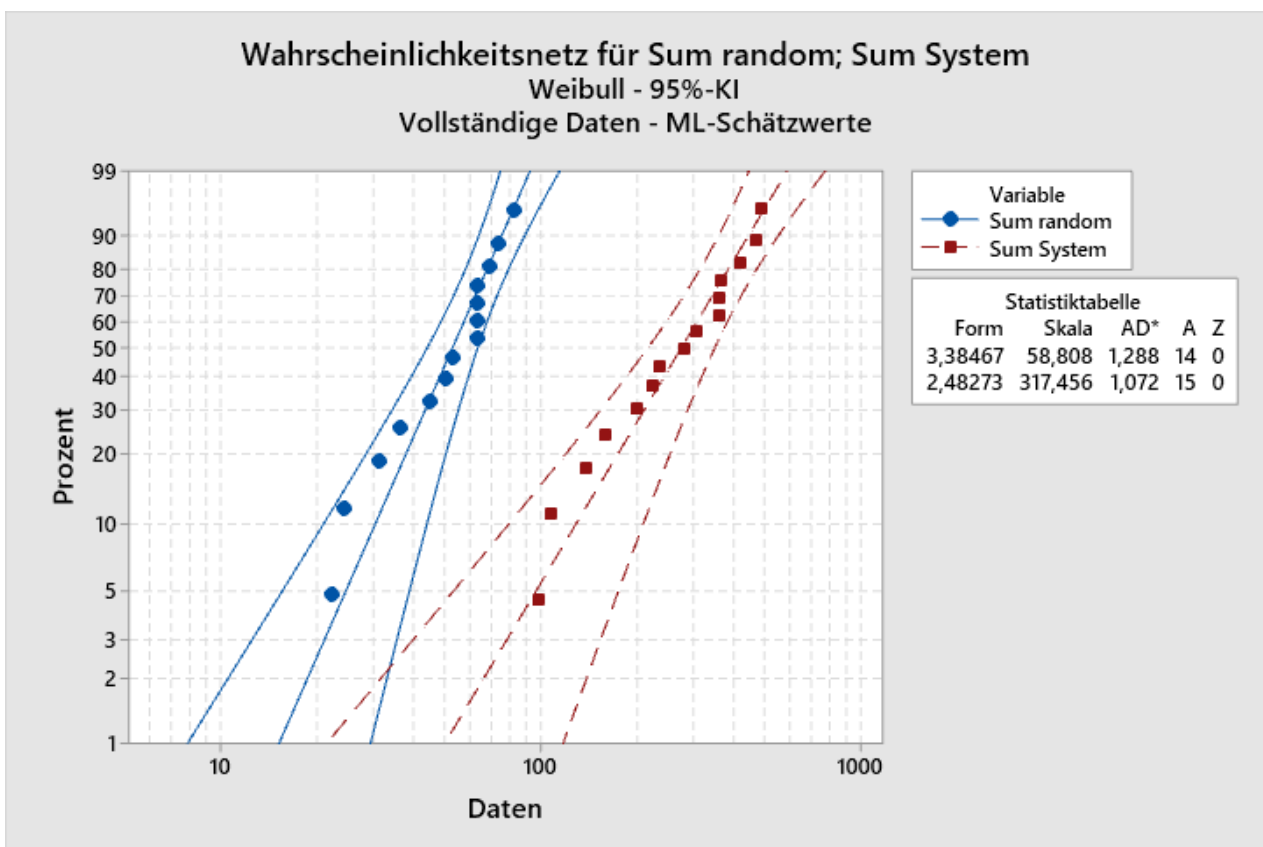


Abbildung 7-7: Weibullverteilungen der betrachteten Fehler systematischer Ursachen und zufälligen Fehler in den Monaten 7 bis 23

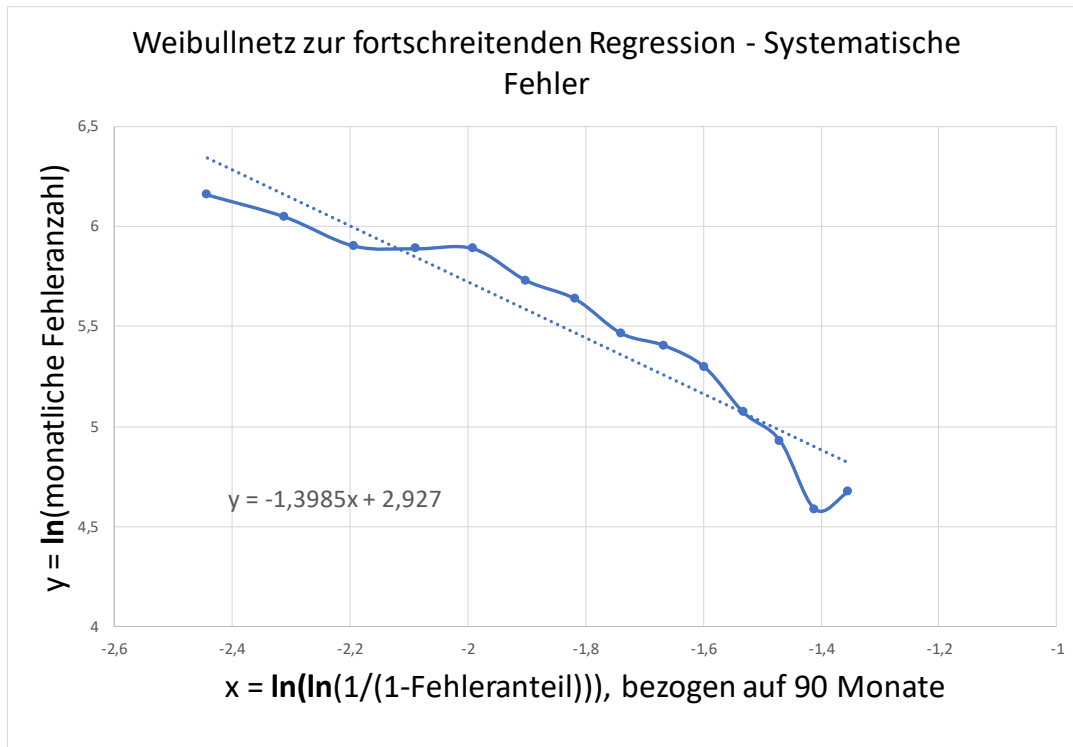


Abbildung 7-8: Ermittlung der Regressionsgeraden in den Monaten 7 bis 23 zur Fehlerfortpflanzung auf 90 Monate

Ein Vergleich der Fehlerraten mit der errechneten Fortschreibung der Fehler bis Monat 90 ist exemplarisch für die systematischen Fehler in Abbildung 7-9 dargestellt.

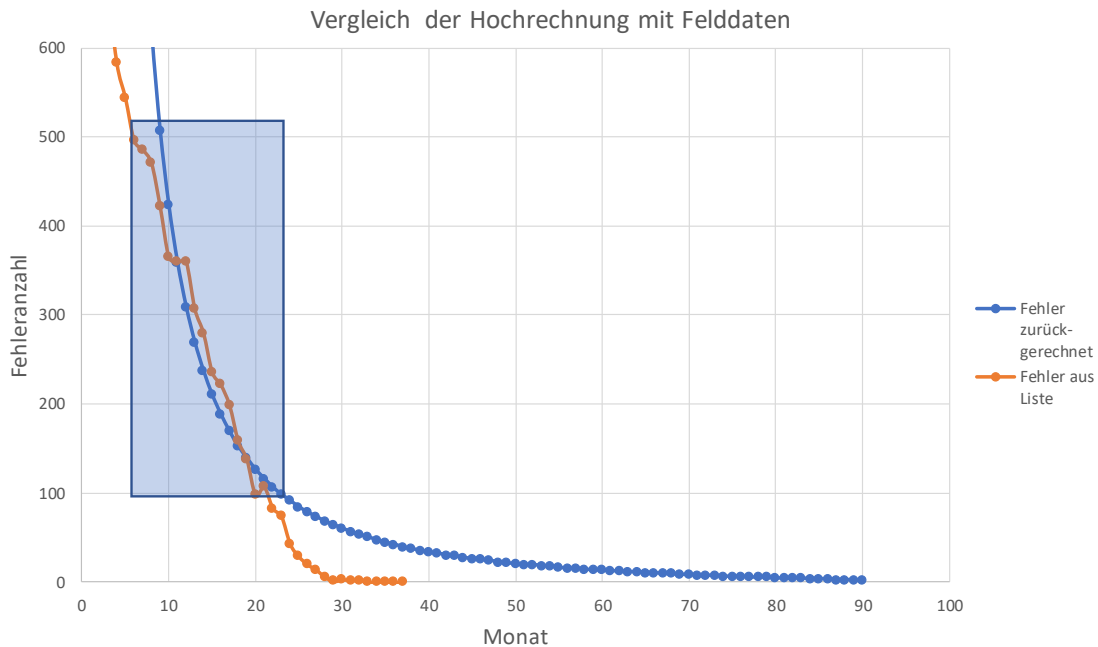


Abbildung 7-9: Verlauf der hochgerechneten Fehler im Vergleich zu den erfassten Ist-Fehlern am Beispiel der Ausfälle systematischer Ursachen; der Rahmen spiegelt den Bereich der verwendeten Daten für die Approximation wider

Die Werte der Fehler für die Fortschreibung 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 Corrosion" und "Terminal Corrosion" + "Connector Corrosion" + "Terminal Poor Crimp" = "Sum Random Time" einzeln berechnet. Anschließend wurden die Ausfälle systematischer und zufälliger Ursachen gemäß Tabelle 7-9 aufsummiert.

Die Stichprobe wird auf den Anteil eingeschränkt, der den Zeitraum eines halben Kalenderjahres (sechs Monate) überlebt hat. Diese Einschränkung dient dazu, den Anteil der Ausfälle systematischer Ursachen zu berücksichtigen, um eine Aussage über tatsächliche zufällige Hardwareausfälle treffen zu können (in Analogie zum Vorgehen „proven in use“ nach ISO 26262). Dies ist notwendig, da für die ersten sechs Monate keine statistische Aussagefähigkeit gegeben war und sich Ausfälle in dieser Phase typischerweise 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 pro Fahrzeug ergeben sich die Ausfallraten gemäß Tabelle 7-10.

Basisdaten ohne Monate 1-6		Connector Disconnect	Sum Terminal Open / Unseated	Sum Damaged	Summe systematische Ursachen	Fretting Corrosion	Sum Sandom Time	Summe zufälliger 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	0,115	0,062	0,175

Tabelle 7-10: Ausfallraten je Fehlergruppe

Mit der Ausfallrate von 0,865 FIT für die Summe der Ausfälle systematischer Ursachen und 0,175 FIT für die Ausfälle zufälliger Ursache ergibt sich eine Gesamtausfallrate von 1,04 FIT bezogen auf einen Kontaktdurchgang. Der Anteil zufälliger Ausfälle zu „gesamt“ beträgt dabei 1 zu 5,94. Dieser Wert wird zur Bestimmung der Prozessparameter für den FIDES Guide [5] verwendet. Somit wird das Produkt aus Π_{PM} und $\Pi_{Process}$ auf 5,94 festgelegt.

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

Für die Bewertung der Basisausfallrate wird der FIDES Guide [5] zugrunde gelegt. Dieser sieht eine Multiplikation von $\lambda_{0,Physical}$ (in der die Basisausfallrate eine Bemessungsgröße ist) mit den Prozessparametern Π_{PM} und $\Pi_{Process}$ vor. Die in der Stichprobe erfassten Fahrzeuge eines „Premium“-Herstellers werden mit den in Kapitel 7.2.3.1.2 beschriebenen Maßnahmen als „Standardprozess“ geführt. Der FIDES-Standard sieht hierfür die Default-Werte $\Pi_{PM} = 1,6$ und $\Pi_{Process} = 4$ vor, deren Produkt 6,4 beträgt. Dieser Wert liegt etwa 8% über dem errechneten Wert von 5,94.

Die physikalische Ausfallrate für Steckkontakte entspricht dem Wert der zufälligen Fehlerrate und beträgt:

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

Mit den minimalen und maximalen Ausprägungen der Prozessparameter Π_{PM} und $\Pi_{Process}$ nach FIDES ergibt sich für einen Kontakt mit Zinnoberfläche im Signalstrombereich eine Streuung 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 $\lambda_{0,Physical} = 0,175 \text{ FIT}$ wird zunächst mit der Basisausfallrate λ_0 gleichgesetzt. Die Berücksichtigung von Designmaßnahmen und ihres Einflusses auf $\lambda_{0,Physical}$ wird im nächsten Kapitel beschrieben, um eine geeignete Berechnungsvorschrift entwickeln zu können.

7.2.3.1.15.2 Einflussfaktoren auf die Ausfallrate

Die Angabe einer eindeutigen Skalierung für die Berücksichtigung des Einflusses weiterer Maßnahmen oder des Entfalls von Maßnahmen auf die Ausfallrate ist auf Basis der vorliegenden Felddaten derzeit nicht möglich. Daher werden für die Maßnahmen relevante Modelle aus der Literatur herangezogen, um den Einfluss auf die Ausfallrate spezifisch zu bewerten. Des Weiteren werden langjährige Erfahrungen aus Tests und Applikationen in die Bemessung der Faktoren einbezogen.

Qualifikationsstrom

Für die Anwendung eines reduzierten Deratingfaktors von standardmäßig 0,8 auf 0,6 kann im Zusammenhang mit der Umgebungstemperaturobergrenze von 125 °C ein temperaturabhängiger Alterungsmechanismus nach Arrhenius betrachtet werden.

Dabei sind zwei mögliche Degradationen am Kontakt zu betrachten, die indirekt Einfluss auf die Konstanz des Durchgangswiderstandes ausüben können: die Relaxation der Feder und die Alterung der Kontaktschicht. Die Relaxation des Federwerkstoffs und damit das Nachlassen der Kontaktnormalkraft ist stärker temperaturabhängig als die Alterung der Beschichtung. Wird bei der Qualifikation durch Lagerung bei der jeweiligen Qualifikationstemperatur die Aufrechterhaltung der Normalkraft nachgewiesen, 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 treten in der Regel erst bei Änderungen der Alterungseffekte außerhalb des Arbeitstemperaturbereichs auf.

Bei Anwendung der Arrheniusgleichung für eine beschleunigte Alterung mit dem Beschleunigungsfaktor:

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

k_B – Boltzmannkonstante

T_{Use} – Ist – Temperatur in Applikation

T_{Test} – Temperatur im Qualifikationstest

E_a – Aktivierungsenergie

lassen sich unter Berücksichtigung, dass die Temperaturerhöhung mit dem Quadrat des Stromflusses einhergeht, temperatur- und stromabhängige Zeitfenster berechnen. Mit der Erwärmung entsprechend dem Quadrat der Sicherheitsfaktoren zum Stromfluss mit 0,6 bzw. 0,8 kann unter Zuhilfenahme von Aktivierungsenergien aus der Literatur [20] ein Beschleunigungsfaktor oder invers ein Verbesserungsfaktor berechnet werden

Die strombehaftete Erwärmung ist quadratisch vom Strom abhängig:

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

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

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

Damit ergibt sich:

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

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

$$\Delta T_{BE} = \alpha_{DE}^2 \cdot \Delta T_{Test} \quad \text{und damit gilt:}$$

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

$\Delta T_B, \Delta T_{BE}$ – 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 ergibt sich aus:

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

bzw.

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

Die errechneten Verbesserungsfaktoren sind in Tabelle 7-11 dargestellt.

T _u / °C	Δ T _B - Δ T _{BE} / K					
	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

Tabelle 7-11: Errechnete Verbesserungsfaktoren in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur und Reduzierung der Stromerwärmung bei einer Aktivierungsenergie von 0,51 eV

Bei Stromerwärmungen im Bereich von 10 K bis 60 K und Umgebungstemperaturen von 85 °C bis 150 °C ergeben sich entsprechend der Sicherheitsfaktoren Verbesserungsfaktoren je nach Aktivierungsenergie (0,45 eV bis 0,60 eV) gemittelt gemäß Tabelle 7-12.

E _a / eV	Faktor
0,45	0,6
0,50	0,6
0,55	0,6
0,60	0,5

Tabelle 7-12: Festgelegte Verbesserungsfaktoren in Abhängigkeit der Aktivierungsenergie pro eV

Der Expertenkreis hat sich mit E_a = 0,51 eV aus [21] und einem Deratingfaktor von 0,6 statt 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 Steckkontakte, insbesondere solche zur Verbindung von Signal- und Informationswegen, werden in den Applikationen nicht für den eigentlichen Strom- oder Energietransport genutzt. Die Ströme liegen in der Regel im mA-Bereich, womit keine nennenswerte Eigenerwärmung über die Umgebungstemperatur entsteht. Erwärmungen benachbarter Lastkontakte können sie indirekt beeinflussen, jedoch deutlich geringer. Aufgrund dessen können diese Signal-Kontakte generell mit einem Verbesserungsfaktor von 0,6 betrachtet werden.

Maßnahme Einzeladerabdichtung für Kontakte im Fahrzeuginnenraum

Das Thema Vibration ist aufgrund des Verbaus der Steckverbinder in der Applikation, der realen Schwingungsbelastungen und der Resonanzen schwierig. Verschiedene Veröffentlichungen berufen sich auf ältere Formalismen der beschleunigten Alterung:

$$AF = \frac{t_F}{t_T} = \left(\frac{g_T}{g_F}\right)^\gamma$$

$t_{Use/Test}$ – Lifetime – Werte

g_{Use} – Ist – Beschleunigung in Applikation

g_{Test} – Beschleunigung im Qualifikationstest

γ – Vibrationsexponent

Tests mit identischen Kontakten mit und ohne Einzeladerabdichtung zeigen, dass einzeladergedichtete Kontakte typischerweise den Schärfeegrad L2 erfüllen, während ungedichtete Ausführungen meist nur L1 erreichen. Ursache ist die Dämpfungswirkung des Dichtelements, das die in die Leitung eingetragenen Vibrationen zum Kontaktpunkt hin reduziert. Die Dichtwirkung selbst spielt dabei keine Rolle.

Unter Annahme eines Gamma von 2,5 (2 – 3,3, siehe [22]) sowie der Beschleunigungen nach DIN/TS 70214 PG17 (Level 1: 19,7m/s²; Level 2: 27,8 m/s²) ergibt sich ein Verbesserungsfaktor von ca. 0,42. Der Expertenkreis schlägt dafür in Anwendungen ohne Dichtheitsanforderungen einen konservativen Faktor von 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 Corrosion neigt und sich Silber bei erhöhten Temperaturen im Arbeitsbereich als beständiger erweist und nicht zu Degradationen infolge von Diffusionseffekten neigt, womit eine Stabilität des Kontaktwiderstandes einhergeht. 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 [19], Kapitel *Connectors*, wird die Fehlerrate mit dem Faktor 2 bei Silber und dem 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 7.2.3.1.15.1 für Silberkontakte.

7.2.3.1.15.3 Bestimmen der Ausfallrate

Die sich aus den Betrachtungen bestimmten Einflussfaktoren auf die Ausfallraten sind in Tabelle 7-13 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 der 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.

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		

Tabelle 7-13: Rating-Faktoren Steckkontakte

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

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

Die sich aus den Maßnahmen errechneten applikationsspezifischen Ausfallraten $\lambda_{0,Physical}$ sind in Tabelle 7-14 dargestellt.

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

Tabelle 7-14: Applikationsspezifische, physikalische FIT Basisraten für Steckkontakte

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

$$\lambda_0 = \lambda_{0,physical} \cdot \Pi_{PM} \cdot \Pi_{Process}$$

oder nach Tabelle 7-15.

resultierende FIT-Raten für $\Pi_{PM} \cdot \Pi_{Process} = 0,5$ Min / = 5,94 DEF / = 16 MAX								
Kontaktteil	Elektrische Funktion	Strombelastung	ohne Dichtung			mit Dichtung		
			MIN	DEF	MAX	MIN	DEF	MAX
Zinn	Energieübertragung	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	Energieübertragung	Standard Derating (Faktor 0,8)	0,10	1,21	3,27	0,05	0,61	1,63
		Reduziertes Derating (Faktor 0,6)	0,06	0,73	1,96	0,03	0,36	0,98
	Signalstrom	nicht relevant						

Tabelle 7-15: Resultierende Ausfallraten für Steckkontakte

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

7.2.3.1.16 Fehlerverteilungen

Die Ausfälle nach Tabelle 7-9 lassen sich alle der Ausfallart „Durchgangswiderstand über dem spezifizierten Wert“ zuordnen. Kurzschluss effekte (eine Reduzierung des Isolationswiderstands unter einen Schwellwert) konnten nicht nachgewiesen werden. Damit ergibt sich die Verteilung der Ausfallarten nach Tabelle 7-16:

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

Tabelle 7-16: Ausfallarten für Steckkontakte

7.2.3.2 Klasse Ib: Power-Kontakte Steckkontakte für die Energieversorgung ab 6,3 mm Baugröße

7.2.3.2.1 Beschreibung der Klasse

Die zur Ableitung der Basis-Ausfallrate in Kapitel 7.2.3.1.15.1 herangezogenen Felddaten beruhen im Wesentlichen auf Kontaktsystemen mit kleinen und mittleren Baugrößen bis 6,3 mm.

Darüber hinaus umfassen die in der Klasse I in Kapitel 7.2.3.1 aufgeführten „Steckkontakte für die Signalübertragung und Energieversorgung“ jedoch auch die Baugrößen von 8 bis 14,5 mm, nachfolgend „Power-Kontakte“ genannt.

Wie die Steckkontakte der kleinen und mittleren Baugrößen basieren auch die prinzipiell gleich aufgebauten Power-Kontakte auf Kontaktstellen, welche mit einer definierten Kontaktnormalkraft auf dem Kontaktpartner aufliegen.

Mit den für Power-Kontakte typischen Leiterquerschnitten wachsen jedoch die von der Leitung auf das Kontakteil übertragenen Kräfte.

Wird die Leitung durch Stöße oder durch Vibrationen in Schwingung gebracht, können die resultierenden Kräfte auf das Kontakteil dessen Haftreibungskräfte zum Kontaktpartner übersteigen und eine Relativbewegung in den Kontaktzonen verursachen. Dies kann zu abrasivem Verschleiß in der Kontaktzone führen und bei andauernder Belastung zum Durchrieb der Funktionsoberflächen.

Thermische und chemische Prozesse können nachfolgend einen unzulässigen Anstieg des Kontaktwiderstands verursachen.

Im Kapitel „Power-Kontakte“ wird dargelegt, unter welchen Rahmenbedingungen die in Tabelle 7-13 aufgelisteten resultierenden Ausfallraten für Steckkontakte sowie deren Rating-Faktoren (Oberfläche, Strombelastung, Dichtung) auf Power-Kontakte übertragen werden können.

Darüber hinaus ist anzumerken, dass der Kontaktanschluss für Leitungen von Power-Kontakten, abweichend zu Tabelle 7-9, als kritisches Auslegungselement gesondert zu betrachten ist. Dies bedeutet, dass ein Fehler „Terminal Poor Crimp“ bei großen Leiterquerschnitten primär als systematisch zu verstehen ist und somit im Rahmen der obligatorischen Produkt- und Prozessvalidierung gemäß DIN/TS 70214 abgesichert ist. Eine mutmaßlich zu erwartende erhöhte Ausfallrate „Terminal Poor Crimp“ kann somit ausgeschlossen werden und etwaige nachfolgend im Feld auftretende Ausfälle sind weiterhin entsprechend der Felddaten von Standard-Kontakten als zufällig anzusehen.

Fehlerart / Zeitraum [mon]	zufällig	sys. Ursache
Connector Disconnect		X
Terminal Open		X
Terminal Unseated		X
Terminal Bent / Damaged		X
Connector Damaged		X
Fretting Corrosion	X	
Terminal Corrosion	X	
Connector Corrosion	X	
Terminal Poor Crimp	X	X

Tabelle 7-17: Der Terminal Poor Crimp Fehler für große Leiterquerschnitte ist primär systematisch verursacht. Bei geeigneter Qualifikation kann dieser Systematische Fehler aber soweit ausgeschlossen werden, dass auch die Felddaten-basierte Ausfallrate der Standard-Kontakte angesetzt werden kann.

Eine mit der Funktionalität von Kontaktsystemen kleiner und mittlerer Baugröße vergleichbare Betriebsbedingung ist immer dann gegeben, wenn die Kontaktpunkte von Power-Kontakten auch bei Schwingungsanregung über die Leitung in Ruhelage bleiben. Um die geforderte Ruhelage zu erreichen, bedarf es einer hinreichenden Leitungsabfangung bezüglich Position („A“, Abstand Gehäuse zu Klemmpunkt) und Klemmlänge („B“, Länge der Leitungsfixierung). Beide Parameter stehen jeweils in Abhängigkeit von der betrachteten Leitungsdimension („D“, Leitungsdurchmesser).

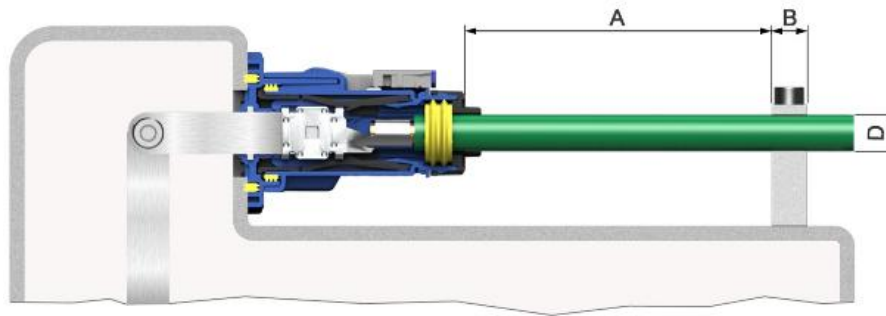


Abbildung 7-10: Leitungsabfangung

Aus dem empirisch ermittelten Schwingverhalten einer Leitung unter Variation der Abfangposition bei einer festgelegten Klemmlänge („B“ = $2 \times$ Leitungsdurchmesser) wird eine realitätsnahe Belastung des Kontaktsystems in einem entsprechenden Versuchsaufbau mittels eingekoppelter Shaker-Anregung über einen definierten Zeitraum nachgestellt.

Wird anschließend die Beibehaltung der Ruhelage während der Belastung nachgewiesen, ist die Übertragbarkeit der Ausfallraten unter den gefundenen Abfangbedingungen zulässig.

Die Untersuchungen bezüglich der jeweils hinreichenden Abfangbedingungen werden mit repräsentativen Kontaktsystemen der Baugrößen 9,5 mm und 12 mm sowie FL(R)Y-Leitungen mit 16, 25 und 35 mm² Leiterquerschnitten durchgeführt. Dabei erfolgt die kontaktseitige Leitungsfixierung mittels Standarddichtelementen in Standardkammern.

Die Intensität der zur Ermittlung des Schwingverhaltens der Leitungen aufgetragenen Anregung entspricht dem Schärfegrad 2 der DIN TS 70214. Die sich jeweils ergebenden Resonanzfälle werden für die Schwingbelastung während der Prüfung zugrunde gelegt.

Zum Nachweis der Ruhelage der Kontaktpunkte wird der Kontaktwiderstand durch Messung des Spannungsfalls während der Schwingbelastung kontinuierlich überwacht.

Bei der Festlegung der Systemgrenzen für die Zuverlässigkeitsbetrachtung einer Schnittstelle mit Power-Kontakten werden, abweichend von Kapitel Beschreibung der Funktionsbaugruppe (Bauteil oder Baugruppe), nur Aggregate-Schnittstellen betrachtet. Dies umfasst Steckerleisten eines Aggregates oder Steuergerätes in Kombination mit leitungssatzseitigen Steckhülsegehäusen.

Neben der Berücksichtigung der in Kapitel Beschreibung der Funktionsbaugruppe (Bauteil oder Baugruppe) genannten Komponenten, Übergangsstellen und sonstigen erforderlichen Beitragsleisten ist bei Steckverbindungen mit Power-Kontakten auch die Leitungsabfangung in die betrachteten Systemgrenzen einzubeziehen.

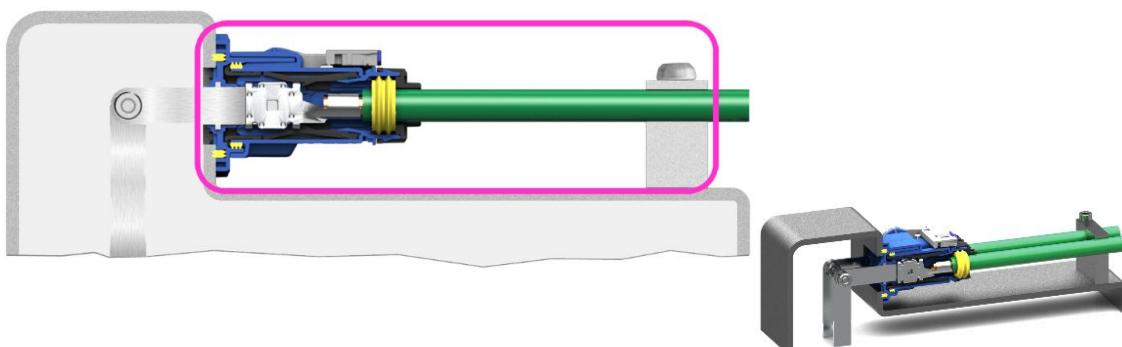


Abbildung 7-11: Systemgrenzen einer Power-Kontaktierung

7.2.3.2.2 Anforderungen bezüglich Lebenszyklus

Es gelten identische Voraussetzungen wie in Kapitel 7.2.3.1.2 beschrieben, mit dem Unterschied, dass neben dem Crimp primär Ultraschallschweißverbindungen eingesetzt werden.

7.2.3.2.3 Einzuhaltende Eigenschaften der Power-Kontakte

Steckkontakte erfüllen in Kombination mit den angrenzenden Systemen (Leitungen, Aggregat) die Funktion einer trennbaren elektrischen Verbindung. Die Robustheit wird maßgeblich von Gehäuse und Dichtung beeinflusst, weshalb die Funktion immer die Gesamtkomponente betreffend betrachtet werden muss. In der Applikation besteht die zentrale Funktion in der Übertragung von Leistungsströmen bei einem möglichst niedrigen und über die Lebensdauer konstanten Durchgangswiderstand.

7.2.3.2.4 Fehlermodelle

Ein relevanter Degradationsmechanismus ist der vibrationsgetriebene Verschleiß (vgl. Kapitel 7.2.3.1.14). Bei Power-Kontakten besteht für die Vibration ein gesondert zu betrachtendes Risiko, da bei diesen Kontaktgrößen auch große und damit schwere Leitungen zum Einsatz kommen. Diese Leitungen werden in der Fahrzeugapplikation über Schellen, Kabelbinder und ähnliche Befestigungselemente im Fahrzeug fixiert und dadurch beruhigt. Aufgrund der Bauraumsituation ist es jedoch nicht immer möglich, die Vibrationsentlastung optimal zu positionieren, sodass gewisse Freilängen zwischen dem Steckverbinder und der ersten Abfängung unvermeidlich sind. Diese Freilänge kann in Schwingung versetzt werden und eine zusätzliche Kraft auf das Kontaktsystem übertragen.

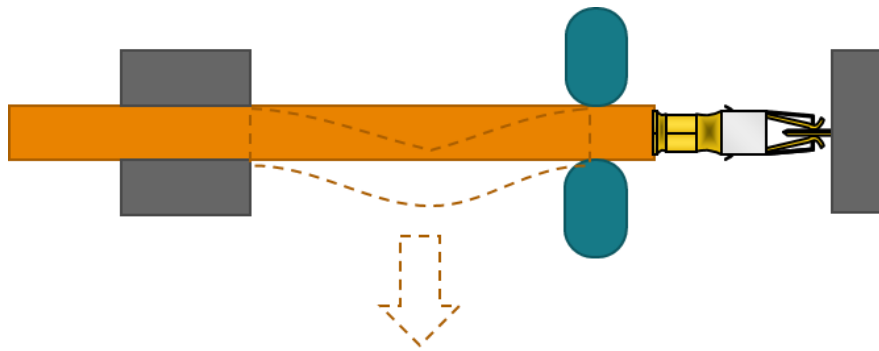


Abbildung 7-12: Kabelschwingung

Speziell im Resonanzfall besteht das Risiko, dass die dadurch erzeugten Kräfte die Haltekräfte des Kontaktsystems überschreiten und es zu einer Relativbewegung im Kontaktsystem kommt. Eine solche Relativbewegung führt zu gesteigertem Verschleiß, was die Anwendbarkeit der empirisch ermittelten Basis-Ausfallrate einschränkt (vgl. Kapitel 7.2.3.1.15.1).

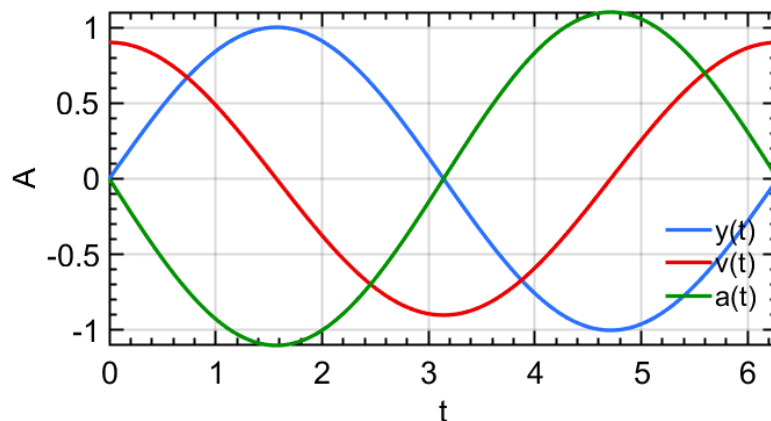


Abbildung 7-13: Ortskurve, zugehörige Geschwindigkeit und Beschleunigung

Physikalisch betrachtet können zwei Variablen dazu führen, dass eine Kraftübertragung von der Kabelschwingung auf das Kontaktsystem erfolgt:

- 1.) Im quasistatischen Fall führt die Auslenkung des Kabels in Kombination mit der Kabelsteifigkeit dazu, dass eine Auslenkung der Steckhülse entsteht.
- 2.) Im dynamischen Fall spielt die Beschleunigung des Kabels eine Rolle. Die Kraft, die bei der Richtungsänderung in der Ortsamplitude des Kabels wirkt, überträgt sich über die Steckhülse in das Kontaktsystem.

Um beide Fälle beurteilen zu können, ist es notwendig, die aus der Applikation ermittelten Vibrationsprofile zu kennen und zu übertragen. Basierend auf Voruntersuchungen ist bekannt, dass die maximale Auslenkung der Leitung bei der niedrigsten Resonanzfrequenz auftritt. Für die betrachteten Power-Kontakte entspricht dies dem Fall des kleinsten Leitungsquerschnitts mit der größten Abfänglänge.

In Voruntersuchungen wurde für diesen Fall (16 mm² Leitung mit 300 mm Abfänglänge) bei 2 g Beschleunigung eine Amplitude von 0,4 mm nachgewiesen. Setzt man dies in Relation zu den von den Vibrationsklassen erzeugten Beschleunigungen, sind maximale Auslenkungsamplituden (bei SG5) bei 300 mm Abfänglänge von 7,2 mm in der Mitte der Leitung zu erwarten. Unter Berücksichtigung der flexiblen Kabeleigenschaften, der dämpfenden Wirkung der Dichtung und des Aufbaus folgt, dass die quasistatischen Belastungen vernachlässigbar sind.

7.2.3.2.5 Ausfallraten

7.2.3.2.5.1 Basis-Ausfallrate und Einflussfaktoren auf die Ausfallrate

Das grundlegende Ziel der gesonderten Betrachtung der Power-Kontakte besteht darin, die Anwendbarkeit der Basis-Ausfallrate gemäß Kapitel 7.2.3.1.15.1 zu betrachten und gegebenenfalls Grenzen der Übertragbarkeit zu ermitteln.

7.2.3.2.5.2 Nachweis der Zulässigkeit einer Übertragbarkeit

Definition der Probanden

Die relevanten Applikationen, die im Fokus dieser Betrachtung stehen, umfassen speziell x-by-wire Anwendungen. Auf dieser Basis wurden die Probanden und Randbedingungen wie folgt definiert:

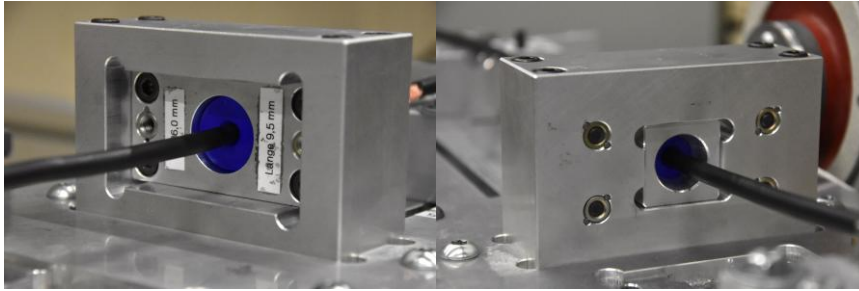
Als relevantes Lastprofil wurden Vibrationen vom Schärfegrad 2 [17] zugrunde gelegt.

Es wurden repräsentativ vier Kontaktsysteme unterschiedlicher Hersteller mit den Kontaktgrößen 9,5 mm und 12 mm ausgewählt. Alle Kontaktsysteme basierten auf einer AgII [26] -beschichteten Kontaktzone.

Als Gegenkontakte wurden zwei unterschiedliche Flachstecker festgelegt. Für die 9,5-mm-Kontakte wurde ein repräsentativer AgII [26] -beschichteter Steckkontakt mit einer Dicke von 1,2 mm ausgewählt. Für die 12-mm-Kontakte wurden AgII [26] -beschichtete Steckkontakte mit einer Dicke von 0,8 mm definiert.

Zur Vermeidung zusätzlicher Einflussgrößen wurden für sämtliche Versuchsaufbauten drei verschiedene Leitungen der Firma KBE zur Verfügung gestellt. Für die 16 mm² und die 25 mm² Leitung kamen FLRY-Leitungen des Typs B zum Einsatz, für die 35 mm² Leitung eine FLY-Leitung.

Für alle Probanden wurden querschnittsspezifische Einzeladerabdichtungen der Firma Kostal aus Silikon eingesetzt. Die Dichtungen waren auf den Außendurchmesser der Leitung und eine Standardkammergröße mit einem Durchmesser von 23 mm und einer Dicke von 9,5 mm ausgelegt.



Messaufbau

Ziel des Messaufbaus ist es, eine definierte Erregung des Kabels zu erzeugen, ohne andere Fehlermechanismen anzuregen, welche in der Basisfehlerrate für Standard-Kontakte berücksichtigt sind. Dazu wurde ein mechanischer Aufbau entwickelt, der eine mechanische Fixierung der Prüflinge ermöglicht.

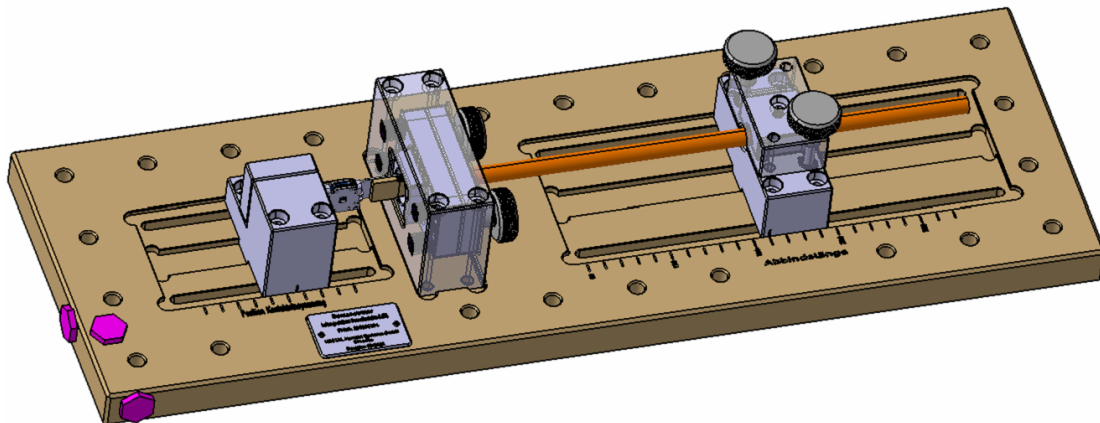


Abbildung 7-14: Gesamtansicht des mechanischen Aufbaus

Die Kernelemente des Aufbaus umfassen von links nach rechts

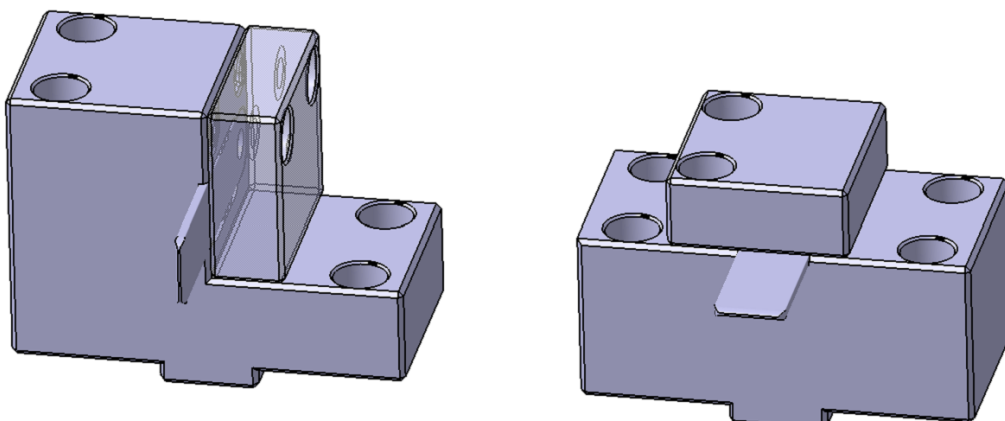


Abbildung 7-15: Steckerfixierung: Die Stecker können vertikal und horizontal geklemmt werden. Die Steckerfixierung kann zur Einstellung der erforderlichen Kontaktüberdeckung in Steckrichtung verschoben werden.

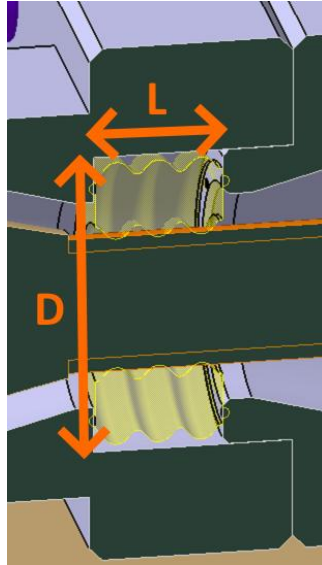


Abbildung 7-16: Kontakt-seitige Leitungsfixierung mit Durchmesser $D=23$ mm und $L=9.5$ mm

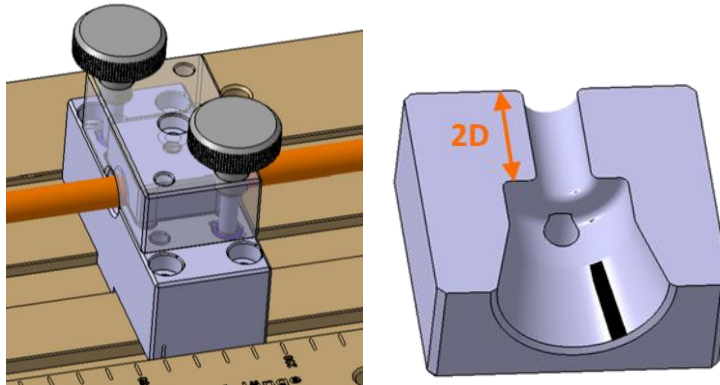


Abbildung 7-17: Leitungsklemmung: Die Leitungsklemmung ist spezifisch für den Durchmesser der Leitung ausgelegt und limitiert sich auf eine „Klemmlänge“ des doppelten Kabeldurchmessers. Die Leitungsklemmung kann axial verschoben werden, somit kann die Abfanglänge variiert werden.

Die Simulation der Resonanzschwingung der Leitung erfolgt mittels Shaker und Finger. Die Leitung ist starr in eine Aluminium-Manschette von 4 mm Breite eingeklemmt, die wiederum starr auf dem Kopf des Minishakers befestigt ist. Dadurch lässt sich bei bekannter Frequenz und Amplitude die Resonanzschwingung der Leitung anregen.

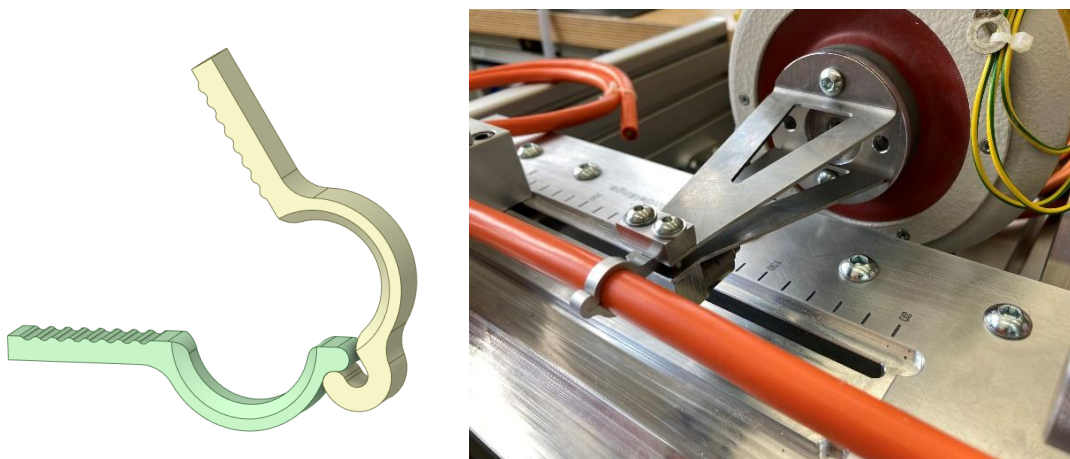


Abbildung 7-18: Anregung der Kabelvibration mit Hilfe eines Mini-Shakers mittig zwischen der Kontakt-seitigen Leitungsfixierung und der Leitungsklemmung

Für die Detektion einer Relativbewegung in der Kontaktzone wurde eine Elektronik entwickelt, welche über das Frequenzband von 3 Hz bis 3 kHz eine breitbandige Signalverstärkung mit einem Gain von 1000 ermöglicht. Als Eingangsgröße der Verstärkerschaltung dient der gemessene Spannungsfall bei einem Teststrom von 10 A. Das offsetbefreite Ausgangssignal wird zeitlich hochaufgelöst (44,1 kHz) mit 16 Bit aufgezeichnet und im Fourier-Raum analysiert.

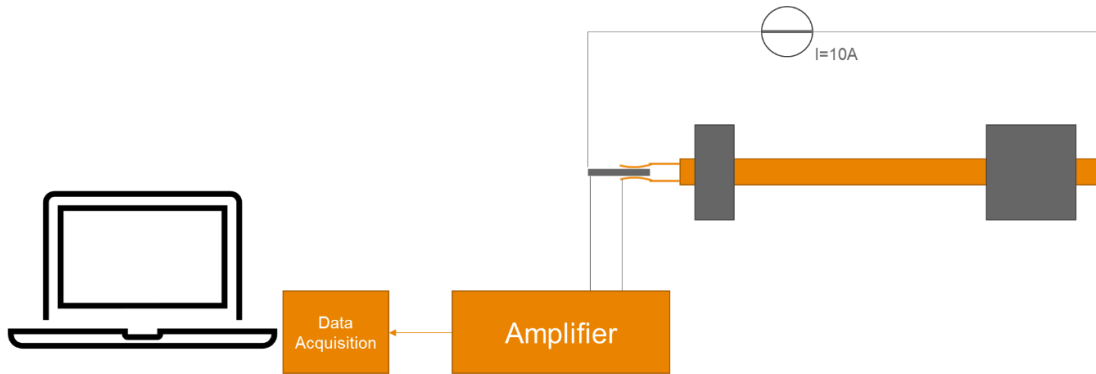


Abbildung 7-19: Exemplarische Darstellung des Messaufbaus

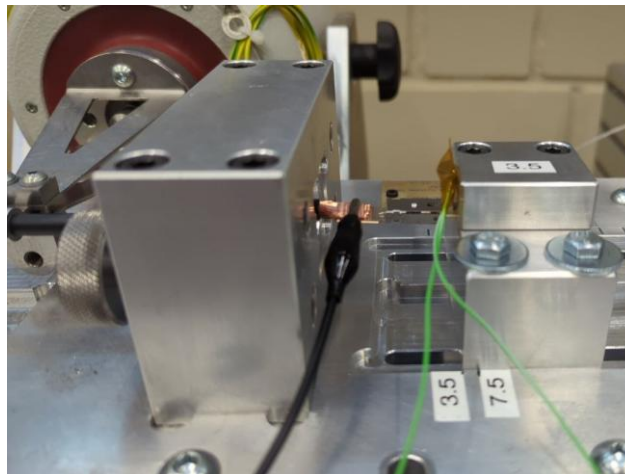


Abbildung 7-20: Realisierung der Messung des Spannungsfalls über die relevante Messstrecke

Analyse

Durch den Testaufbau und die Elektronik werden relative Änderungen im Kontaktwiderstand messbar gemacht. Diese sind ein Indiz für die Existenz einer Relativbewegung in der Kontaktzone. Periodische Bewegungen der Kontakte infolge einer periodischen Schwingungsanregung sind im Fourier-Raum sichtbar:

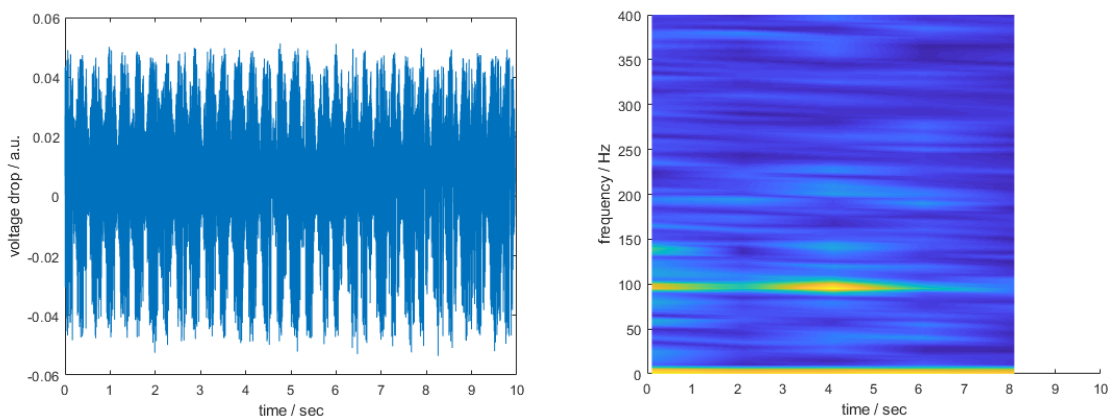


Abbildung 7-21: Zeitsignal und zugehörige Fourier-Transformierte einer Relativbewegung

Als geeignetes Detektionskriterium dient somit die Existenz sichtbarer Frequenzamplituden im zeitlichen Fourierspektrum.

Da eine induzierte Relativbewegung unabhängig von der Belastungsdauer erzeugt wird, lässt sich die Testdauer auf wenige Minuten reduzieren.

Übertragungsfunktion

Eine Grundvoraussetzung für die Anwendbarkeit des Ansatzes ist das Wissen über Frequenz und Amplitude der zu berücksichtigenden Leitungsvibration. Aus der Literatur sind Ansätze zur Berechnung der Resonanzfrequenzen von Kabeln bekannt. Mithilfe von Messungen an den definierten Kabeln wurde der mathematische Formalismus adaptiert und ist somit in folgender Form gültig für die FLY- und FLRY-Leitungen der Firma KBE mit Leitungsquerschnitten von 16 mm² bis 35 mm² bei Raumtemperatur.

Die Resonanzfrequenz f erster Ordnung berechnet sich über:

$$f = \sqrt{\frac{1000000 \cdot T_0}{\rho \cdot A} \cdot \left(\frac{3141.5}{l}\right)^2 + \frac{1000 \cdot EI}{m} \cdot \left(\frac{3141.5}{l}\right)^4}$$

Mit der Kabelspannung T_0 , der Masse m und der Dichte ρ :

Querschnitt	Masse [kg / km]	Dichte [kg / m ³]	Kabelspannung [N]
16 mm ²	182	3713.1	0.1785
25 mm ²	279	4308.8	0.2737
35 mm ²	360	3733.8	0.3532

EI berechnet sich über die Abfanglänge l in mm:

$$EI = -0.0001 \frac{\text{N}}{\text{mm}^3} \cdot l + 0.0019366 \frac{\text{N}}{\text{mm}^4} \cdot A - 0.0014032 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Für Vibrationsbelastungen des Schärfgrades 2 ist ein Rauschprofil definiert, das die maximale Belastung des Stecksystems darstellt. Auf Basis empirischer Messungen wurde die aus dem Rauschprofil entstehende Schwingungsamplitude A_{sin} der Leitung wie folgt berechnet:

$$A_{\text{sin}} = 0.0123 \frac{1}{\text{mm}} \cdot l \cdot \sqrt{\frac{A_{\text{spd}}}{100 \frac{1}{\text{Hz}}}}$$

Mit A_{spd} der Amplitude der spektralen Leistungsdichte in $\left[\frac{(m/s^2)^2}{\text{Hz}}\right]$ bei der Resonanzfrequenz und der Abfanglänge l in mm.

Testmatrix

Auf Basis der vom Expertenkreis als kritisch betrachteten Eingangsgrößen, der Vorabtests und der technischen Realisierbarkeit wurden folgende Parameter variiert:

Varierte Parameter	Kommentar
Abfanglänge	Zwischen 15 cm und 30 cm variiert
Leitungsquerschnitt	16 mm ² , 25 mm ² , 35 mm ²
Beschleunigungsrichtung	Vertikal und horizontal
Prüfmuster	4 Kontaktsysteme

Folgende Parameter wurden vor Beginn der Tests festgesetzt:

Definierte Parameter	Kommentar
Klemmlänge	Wurde durch Voruntersuchungen als wenig relevant identifiziert und auf 2 x D festgesetzt
Einzeladerabdichtung	Leitungsfixierung, aus Komplexitätsgründen standardisiert
Leitungsmaterialien und physikalische Eigenschaften	Aus Komplexitätsgründen standardisiert
Temperatur	Nur bei Raumtemperatur auf Grund des Messaufbaus

Ergebnisse

	Anregungsfrequenz in Hz					Beschleunigung in g			
	150 mm	200 mm	250 mm	300 mm		150 mm	200 mm	250 mm	300 mm
16 mm ²	128	63	35	22	16 mm ²	0,3	0,6	1	1,5
25 mm ²	151	81	50	34	25 mm ²	0,3	0,6	0,9	1,3
35 mm ²	168	92	58	41	35 mm ²	0,2	0,5	0,8	1,2

Tabelle 7-18: Darstellung der im Test applizierten Anregungsfrequenzen und Beschleunigungen entsprechend der Berechnung aus 7.2.3.2.5.2

Die insgesamt 144 durchgeführten Messungen zeigten unter den definierten Randbedingungen keine Auffälligkeiten. Daraus kann geschlossen werden, dass kein Kontaktsystem allein auf Basis der Kabelschwingung eine Relativbewegung in den Kontaktpunkten erfährt.

Einspannlänge / Kabelquerschnitt		16 mm ²				25 mm ²			35 mm ²	
150 mm	quer	1 (0)	5 (0)	9 (0)	13 (0)	65 (0)	69 (0)	73 (0)	113 (0)	117 (0)
		2 (0)	6 (0)	10 (0)	14 (0)	66 (0)	70 (0)	74 (0)	114 (0)	118 (0)
	senkrecht	3 (0)	7 (0)	11 (0)	15 (0)	67 (0)	71 (0)	75 (0)	115 (0)	119 (0)
		4 (0)	8 (0)	12 (0)	16 (0)	68 (0)	72 (0)	76 (0)	116 (0)	120 (0)
200 mm	quer	17 (0)	21 (0)	25 (0)	29 (0)	77 (0)	81 (0)	85 (0)	121 (0)	125 (0)
		18 (0)	22 (0)	26 (0)	30 (0)	78 (0)	82 (0)	86 (0)	122 (0)	126 (0)
	senkrecht	19 (0)	23 (0)	27 (0)	31 (0)	79 (0)	83 (0)	87 (0)	123 (0)	127 (0)
		20 (0)	24 (0)	28 (0)	32 (0)	80 (0)	84 (0)	88 (0)	124 (0)	128 (0)
250 mm	quer	33 (0)	37 (0)	41 (0)	45 (0)	89 (0)	93 (0)	97 (0)	129 (0)	133 (0)
		34 (0)	38 (0)	42 (0)	46 (0)	90 (0)	94 (0)	98 (0)	130 (0)	134 (0)
	senkrecht	35 (0)	39 (0)	43 (0)	47 (0)	91 (0)	95 (0)	99 (0)	131 (0)	135 (0)
		36 (0)	40 (0)	44 (0)	48 (0)	92 (0)	96 (0)	100 (0)	132 (0)	136 (0)
300 mm	quer	49 (0)	53 (0)	57 (0)	61 (0)	101 (0)	105 (0)	109 (0)	137 (0)	141 (0)
		50 (0)	54 (0)	58 (0)	62 (0)	102 (0)	106 (0)	110 (0)	138 (0)	142 (0)
	senkrecht	51 (0)	55 (0)	59 (0)	63 (0)	103 (0)	107 (0)	111 (0)	139 (0)	143 (0)
		52 (0)	56 (0)	60 (0)	64 (0)	104 (0)	108 (0)	112 (0)	140 (0)	144 (0)

Tabelle 7-19: Ergebnisse der Untersuchungen: Anonymisierte Darstellung der Ergebnisse für die Kontaktsysteme A, B,C und D, abhängig von Kabelquerschnitt und Einspannlänge.

Alle vier untersuchten Kontaktsysteme konnten mit 16 mm² Leitungen appliziert werden. Für die Kontaktsysteme A, B und D war eine Applikation mit 25 mm² möglich. Die 35 mm² Leitungen waren nur auf die Kontaktsysteme B und D applizierbar.

Die erste Zahl repräsentiert die anonymisierte Zählweise der Prüflinge. Die Zahl in Klammern repräsentiert die Anzahl der detektierten Auffälligkeiten. (0) bedeutet entsprechend: keine Auffälligkeit.

7.2.3.2.5.3 Nachweis der Gültigkeit und Gültigkeitsgrenzen

Die durchgeführten Untersuchungen im Rahmen dieser Studie beschränken sich gemäß Kapitel 7.2.3.2.5.2 auf Schärfegrad 2. Um den verfolgten Ansatz auch im Sinne einer Grenzwertbetrachtung zu validieren, wurde über den Umfang der definierten Randbedingungen hinaus ein Test mit erhöhter Beschleunigung durchgeführt. In Abbildung 7-22 sind signifikante Resonanzfrequenzen im FFT-Spektrum sichtbar. Hierzu ist anzumerken, dass die auftretenden Signalschwankungen eine Amplitude über den Messbereich hinaus aufwiesen, sodass der angelegte Messstrom auf 4 A reduziert werden musste.

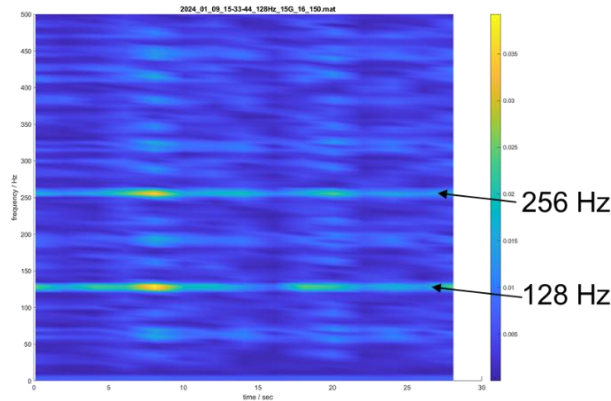


Abbildung 7-22: Auftretende Schwankungen im Spannungsfall für eine Anregung über Schärfegrad 2 hinaus (15 g bei 128 Hz, 16mm² mit 150mm Abfänglänge).

7.2.3.2.5.4 Bestimmen der Ausfallrate

Unter den Randbedingungen, dass die Power-Kontakte im Rahmen der notwendigen Produktqualifikation nach LV214 [17] qualifiziert werden, können bei Raumtemperatur, Schärfegrad 2, mit Silberbeschichtung, Abfänglängen von weniger als 30cm und mit Einzeladerabdichtung keine erhöhten Ausfallrisiken identifiziert werden.

Auf dieser Basis ist die eingeschränkte Tabelle der Basis-Ausfallraten entsprechend anzuwenden:

applikationsspezifische FIT-Basisraten für $\lambda_{0,physical} = 0,175$			
Kontaktteil	Einsatzbedingungen		
Funktionsoberfläche	Elektrische Funktion	Strombelastung	mit Dichtung
Silber	Energieübertragung	Standard Derating (Faktor 0,8)	0,10
		Reduziertes Derating (Faktor 0,6)	0,06

Tabelle 7-20: Basis Ausfallraten für Power-Kontakte

Gleiches gilt für die resultierenden Ausfallraten unter Berücksichtigung der Prozessfaktoren entsprechend Tabelle 7-21:

resultierende FIT-Raten für $\Pi_{PM} \cdot \Pi_{Process} = 0,5 \text{ Min} / = 5,94 \text{ DEF} / = 16 \text{ MAX}$					
Kontaktteil	Einsatzbedingungen				
Funktionsoberfläche	Elektrische Funktion	Strombelastung	mit Dichtung		
			MIN	DEF	MAX
Silber	Energieübertragung	Standard Derating (Faktor 0,8)	0,05	0,61	1,63
		Reduziertes Derating (Faktor 0,6)	0,03	0,36	0,98

Tabelle 7-21: Resultierende Ausfallraten für Power-Kontakte

Werden die Grenzen des getesteten Parameterraumes verlassen, sind gesonderte Risikobewertungen durchzuführen.

7.2.3.2.6 Fehlerverteilungen

Die Fehler nach Tabelle 7-17 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 7-22.

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

Tabelle 7-22: Ausfallarten für Steckkontakte

7.2.3.3 Klasse II: Steckkontakte für Hochfrequenz (HF) Anwendungen

Steckkontakte für hochfrequente Anwendungen, zum Beispiel Datenleitungen, werden aktuell nicht betrachtet.

7.2.3.4 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 Tabellen und Berechnungsformeln

Für die Berechnung der physikalischen Basis-Ausfallrate $\lambda_{0,physical}$ zur Klasse Ia gelten die Tabellenwerte nach Kapitel 7.2.3.1.15.3 und zur Klasse Ib die Tabellenwerte nach Kapitel 7.2.3.2.5.4 zur Bestimmung von Π_{RF} . Unter Verwendung dieses Wertes berechnet sich die Ausfallrate dann mit folgenden Formeln:

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

$$\lambda_0 = \lambda_{0,physical} \cdot \Pi_{PM} \cdot \Pi_{Process}$$

Für die Fehlerverteilungen gelten die Werte der nachfolgenden Tabelle 7-23.

Nr.	Ausfallart	Verteilung für Klasse Ia und Ib	Verteilung für Klasse II	Verteilung für Klasse III
1	Durchgangswiderstand über dem spezifizierten Wert („open“)	100%	In dieser Ausgabe nicht betrachtet	In dieser Ausgabe nicht betrachtet
2	Kurzschluss effekte („short“)	0%		

Tabelle 7-23: Fehlerverteilung für Steckkontakte

7.3 Passive Elektrische Sicherungen

7.3.1 Beschreibung der Funktionsbaugruppe (Bauteil oder Baugruppe)

Für die Untersuchungen der Sicherungen wurden die in Abbildung 7-23 und Abbildung 7-24 beispielhaft dargestellten Sicherung und Sicherungshalter- Kombinationen verwendet.



Abbildung 7-23: Verwendeter Testhalter für die Sicherung der Bauform SF36 mit dem CTE (Ausdehnungskoeffizient) Faktor 86 E-6/K und Quetschkabelschuhen

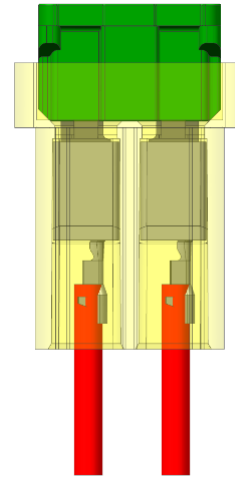


Abbildung 7-24: Verwendeter Sicherungshalter 1-polig mit 6,3mm Crimp-Kastenkontakt

Die Systemgrenzen der Funktionsbaugruppe Sicherung sind in Abbildung 7-25 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 aus den entsprechenden Kapiteln zu entnehmen.

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

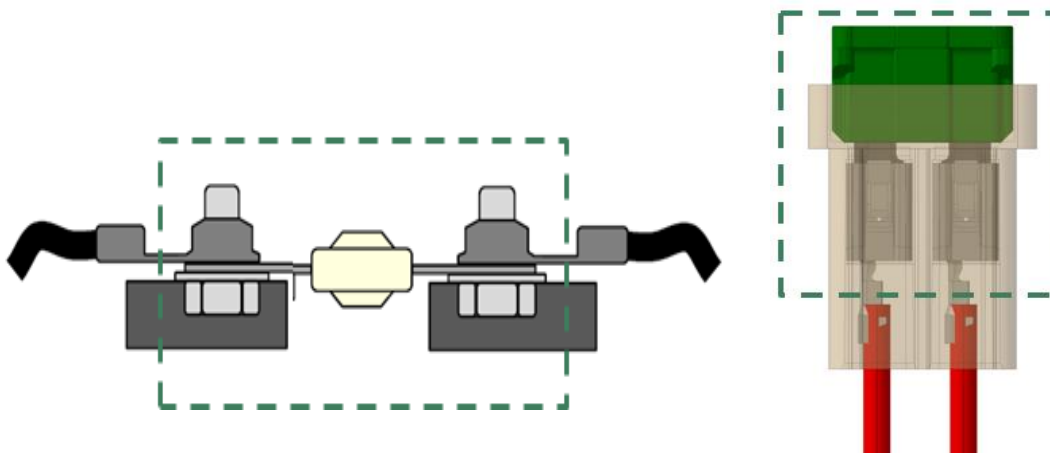


Abbildung 7-25: Systemgrenzen für die Sicherung

Anlage 3 gibt einen Überblick über die gängigsten Sicherungstypen (Einteilung gemäß [8], [9], [10], [11] und [12]), welche in der Automobil-Bordnetz Umgebung Verwendung finden. Tabelle 7-24 enthält den Ausschnitt aller Sicherungstypen im Geltungsbereich dieses Dokuments. Die wichtigsten technischen Daten sind in dieser Tabelle dargestellt.

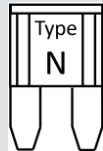
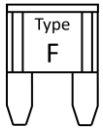
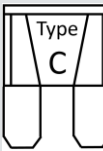
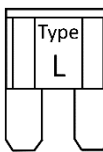
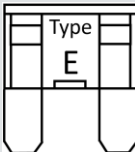

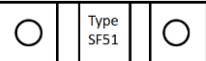
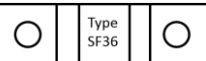
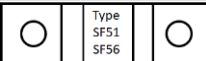
Ifd. Nummer	Fuse Type	Standard ISO	Kontakt	ISO Typ	Bild	Fast/ Slow Acting	Fuse Ratings	Max. Voltage	Max. Int. Current
1	Blade Type	8820-12	2.8 mm	N		F	5A - 30A	32 V	1000A
2	Blade Type	8820-3	2.8 mm	F		F	2A - 30A	32 V	1000A
3	Blade Type	8820-3	6.3 mm	C		F	1A - 40A	32 V	1000A
4	Blade Type	8820-10	6.3 mm	L		S	20A - 60A	32 V	1000A
5	Blade Type	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 SF51/56	20934	M8	SF51/56		S	60A - 500A	70 V	2500A

Tabelle 7-24: Überblick über die Sicherungen für die dieses Dokuments gilt

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 sie 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 und -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

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 / mehrteilig	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
11	Sicherungshalter Expansionsfaktor trocknem 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 and so on	ISO 8820-1/2/3/10/13	ISO 8820-5 ISO 20934

Tabelle 7-25: Überblick über die einzuhaltenden Eigenschaften der Sicherungen

Kontaktpaarungen

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

Neben der primären Funktion der elektrischen Kontaktierung, also der Übertragung der Energie zum und vom Bauteil, existieren weitere Koppelmechanismen wie thermische Leitung, mechanische Verbindung und damit ein 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 wie Stecker oder Stifte mit eindeutiger Definition von Geometrie und Funktionsoberfläche entwickelt und bestehen aus Legierungen mit hohem bis fast ausschließlich 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 Steckkontakte zur Kontaktierung von Sicherungen können in unterschiedliche Kategorien eingeordnet werden. Die Hauptunterschiede sind sowohl konstruktiver als auch materialspezifischer Natur. Hierbei sind folgende konstruktive Unterschiede zu nennen:

- Kastenkontakte mit und ohne Stahlüberfederunterstützung mit Leitungsanbindung
- Gabelkontakte, in der Regel ohne Stahlüberfederunterstützung zum Stromschiemenanschluss

Bei der Materialauswahl der Kontaktteile sind Unterschiede zu finden bei den Leitwerten und Relaxationseigenschaften sowie bei den Beschichtungen wie Zinn, Silber, Gold oder blanken 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 bestimmten Überströmen erwünscht ist. Diese Wärme kann jedoch auch einen negativen Einfluss auf den Kontaktwiderstand und die Kontaktalterung nehmen, zum Beispiel durch nachlassende Normalkraft infolge von Relaxation der Kontaktbuchse.

Die Normalkraft zwischen Kontaktstecker und Kontaktbuchse an den Kontaktpunkten ist notwendig für ein gutes elektrisches Verhalten der Steckverbindung.

Stecksicherungen

Stecksicherungen bestehen in der Regel aus einem Zinkmaterial oder Kupfermaterial mit einer Zinn- oder Silberbeschichtung. Insbesondere Zinksicherungen können bei hohen Temperaturen und langen Lastzeiten zwei typische Verhaltensweisen aufzeigen:

1. **Flächenpressung in der Kontaktzone (quasi-statische mechanische Belastung)**
Beim in der Schmelzsicherung verwendeten Zinkbasismaterial kann es zu einem Setzverhalten kommen. Das bedeutet, dass sich die Dicke des Flachsteckanschlusses der Sicherung im Kontaktbereich verringert. Dies resultiert in einer nachlassenden Normalkraft aufgrund des Setzverhaltens am Kontaktstecker. Ursache ist die Flächenpressung an den Kontaktpunkten, abhängig von der Anzahl der Kontaktpunkte und der Normalkraft. Als Folge verringert sich die Normalkraft und der elektrische beziehungsweise thermische Widerstand in der Kontaktzone nimmt zu. Klassische Fahrzeugkontakte bestehen aus einem Kupferbasismaterial, bei dem dieses Phänomen im Unterschied zu Zink nur in unbedeutendem Maße auftritt.
2. **Diffusionsprozesse**, bei denen das Zinkmaterial der Sicherung und das Kupfermaterial des Kontaktes die Beschichtungen durchwandern und im Kontaktbereich parasitäre metallische Phasen bilden können. Zusätzlich können sich Kirkendall-Poren ausprägen, die den Kontaktwiderstand verschlechtern.

Diese Verbindung ist teilweise kraftschlüssig und stellt im Normalbetrieb in der Regel kein Problem dar. Erst bei einem notwendigen Sicherungswechsel kann es zu einer Beschädigung des verbleibenden Kontaktes kommen. Damit wäre eine gute Kontaktierung nach dem Sicherungswechsel nicht mehr zwangsläufig 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 in der Regel heute bereits 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 sind und damit die Funktionsfähigkeit sicherzustellen ist. Dies beinhaltet mechanische, elektrische und materialspezifische Gegebenheiten zu berücksichtigen und zu untersuchen. Diese Abstimmung ist notwendig, um die Lebensduranforderungen und die Lebensdauerbelastungen wie Temperatur und Vibration 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 die jeweiligen elektrischen Übergangswiderstände der Sicherungskontakte unter Berücksichtigung der Fließseigenschaften des Kontaktpartners Zink in der Sicherung am Ende der Lebensdauer unter 150 Prozent ihrer Anfangswerte R_0 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, um die Sicherungsfunktion zu gewährleisten. Eine Abweichung beim Sicherungsnennwert oder beim Hersteller kann zu einem nicht erwarteten Auslösen der Sicherung führen. Dies kann in der Regel nur durch einen fachgerechten Servicepartner oder durch die Nichtzugänglichkeit der Sicherungsbox für den Endkunden sichergestellt werden.

7.3.4 Ausfallrate

Als Basis für die Ermittlung der Ausfallrate wird das FIDES Modell für die Sicherung herangezogen, da sich die unterschiedlichen Einflüsse in diesem Modell einzeln betrachten lassen. Das ursprüngliche FIDES-Modell wurde allerdings nicht auf Basis von Sicherungen für die Automobilindustrie entwickelt, sodass die zu ermittelten Faktoren beziehungsweise Formeln auf Grundlage der Ergebnisse zusätzlicher Laborversuche angepasst werden müssen. Das Basismodell im FIDES Guide [5] wird in dieser neuen Ausgabe um zwei neue Stressgruppen erweitert und wie in der vorherigen Version ebenfalls mit modifizierten Π -Faktoren versehen.

Für die oben genannten Fuse-Typen (Tabelle 7-24) gilt dann die Vorgehensweise wie in den folgenden Kapiteln beschrieben.

$$\lambda = \lambda_{physical} \cdot \Pi_{PM} \cdot \Pi_{Process}$$

7.3.4.1 $\lambda_{physical}$

$$\lambda_{physical} = \lambda_0 \cdot \left(\sum \Pi_{acceleration} \right) \cdot \Pi_{induced}$$

Der physikalische Teil $\lambda_{physical}$ berücksichtigt ein Gesamtprodukt aus der Basis FIT-Rate λ_0 , der Summe verschiedener Stressfaktoren $\Pi_{acceleration}$ sowie einem Faktor $\Pi_{induced}$. Der FIDES Guide [5] definiert fünf verschiedene $\Pi_{acceleration}$ Stressgruppen, die einer Schmelzsicherung nicht vollständig gerecht werden. In dieser neuen Ausgabe werden zwei weitere Stressgruppen aufgeführt, die einen wesentlichen Einfluss auf die Lebensdauer der Sicherung haben. Diese müssen mit entsprechenden Langzeittests belegt werden und haben es in die zweite Auflage nicht geschafft. Der Fokus liegt dabei auf der Stromimpulsgruppe, die mit Hilfe von Puls-Widerstands-Kurven die notwendige Stressformel ermitteln soll.

Die Begründung für die Verwendung der beiden neuen Stressgruppen ist nachfolgend beschrieben.

Die originalen FIDES-Stressgruppen „thermoelektrisch“ und „thermozyklisch“ berücksichtigen zwar den Konstant-Stromanteil sowie eine zyklische Umgebungstemperaturänderung, ignorieren jedoch wiederkehrende Stromzyklen und Stromimpulse im Fahrbetrieb. Hierbei wird die Sicherung nicht im Ganzen gestresst, sondern partiell im Schmelzleiterbereich, was wiederum einen konzentrierten Stress auf den schwächsten Teil der Sicherung darstellt. Die folgende Darstellung zeigt die unterschiedlichen Stressgruppen von Sicherungen und die damit verbundenen Risiken einer nicht gewollten Auslösung der Sicherung.

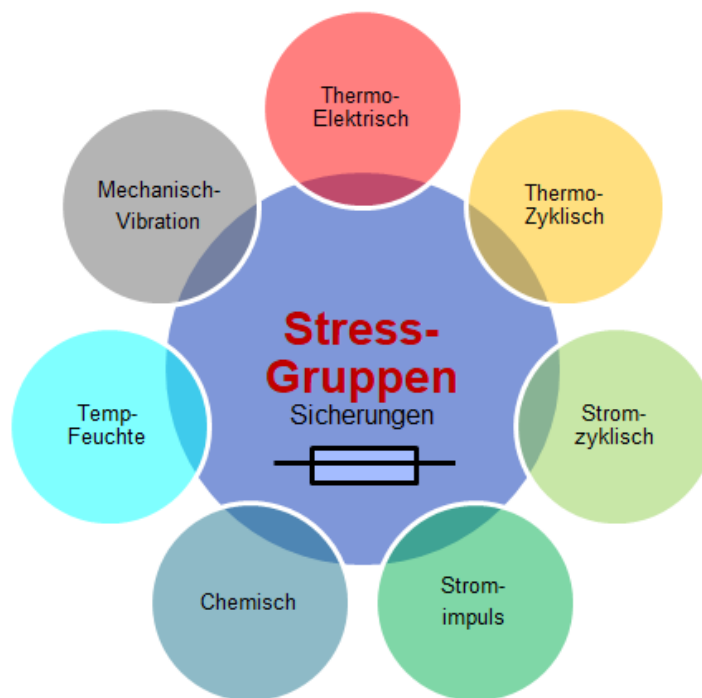


Abbildung 7-26: Stressgruppen Sicherung

7.3.4.1.1 Basis FIT-Rate λ_0

Die Basis-Ausfallrate für Sicherungen ist laut FIDES Guide [5] mit 0,5 FIT definiert und bleibt daher unverändert. Diese wird in dem "alternativen FIT-Raten-Modell", welches in der nächsten Ausgabe vorgestellt wird differenzierter beschrieben.

7.3.4.1.2 $\Pi_{acceleration}$

Hier werden die jeweiligen Stressfaktoren beschrieben, die während des Betriebseinsatzes auf die Sicherungskonstruktion wirken. Die Stressfaktoren werden in die nachfolgenden Gruppen eingeteilt.

7.3.4.1.2.1 Gewichtungsfaktoren

Jeder Stressgruppe steht ein Multiplikator vor, der in seiner Gesamtsumme den Faktor 1 aufweist. Dabei wird jeder Gruppe ein unterschiedlicher Wert zugewiesen, welcher aus einer Felddatenuntersuchung quantifiziert worden ist. Hier kann aber auch ein Faktor gewählt werden, der die Sensibilität der Sicherungen auf die jeweilige Stressgruppe stärker abbildet. Die Gewichtung kann zudem unterschiedlich ausfallen, je nachdem, welche Sicherungstypen betrachtet werden.

Ein Beispiel für Unterschiede kann das gewählte Sicherungsmaterial sein, da eine Stecksicherung in der Regel aus Zinklegierungen besteht, während eine Schraubversicherung Kupferlegierungen einsetzt. In diesem Fall wäre die Stressgruppe „Relative Feuchtigkeit“ für beide Sicherungstypen unterschiedlich zu bewerten, da Zink stärker zu Korrosion neigt als Kupfer.

Material- und Konstruktionsunterschiede machen sich auch in den Formelparametern bemerkbar. Unabhängig von deren Definition ist diese Aufteilung bei Ergänzung durch weitere Stressgruppen neu vorzunehmen. Die beiden neuen Stressgruppen weisen zyklische Belastungsmerkmale auf. Daher ist der Vorschlag, der thermozyklischen Gruppe einen Anteil von 0,12 abzuziehen und diesen auf die beiden neuen Stressgruppen mit jeweils 0,06 zu verteilen.

Stressgruppen	Thermo-Elektrisch	Thermo-Zyklisch	Mechanisch	Relative Feuchtigkeit	Chemisch	Strom-Impuls	Strom-Zyklus	Summe
	$\Pi_{\text{thermo-electrical}}$	$\Pi_{\text{thermal cycling}}$	$\Pi_{\text{Mechanical}}$	$\Pi_{\text{Relative Humidity}}$	Π_{Chemical}	$\Pi_{\text{Strom-Impuls}}$	$\Pi_{\text{Strom-Zyklus}}$	
Orig. Fides	0,13	0,51	0,06	0,24	0,06	na	na	1

Tabelle 7-26: Neuaufteilung der Gewichtungsfaktoren erfolgt in nächster Ausgabe

7.3.4.1.2.2 Thermo-Elektrischer Stressfaktor ($\Pi_{\text{thermoelectrical}}$)

Der thermo-elektrische Stressfaktor ist maßgeblich geprägt durch die 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 Zinndotierung bewirkt die Temperatur ein Wachstum der intermetallischen Phase im Schmelzleiterbereich, die bei den meisten kupferbasierten Sicherungen zum Einsatz kommt. Das Wachstum der intermetallischen Phase bedingt eine Widerstandserhöhung, die das Altern der Sicherung maßgeblich prägt. Damit sind die Temperatur- und Zeitkomponente hier die entscheidenden Größen.

Die Diffusionsdicke kann rechnerisch ermittelt werden und dient der Berechnung der Aktivierungsenergie. Wichtig ist die Tatsache, dass diese Wachstumsberechnung nur im Bereich bis 200 °C sinnvoll ist. Entscheidend ist auch die Angabe der maximalen Dauertemperatur des Schmelzleiters für die zu erwartende Lebensdauer. Diese maximale Temperatur des Schmelzleiters ist in der Regel in der Derating-Kurve als Maximalgrenztemperatur angegeben.

Für die Ausfallratenberechnung in dieser Stressgruppe wurde die Temperaturerhöhungskurve der Sicherung formeltechnisch eingefügt und dafür der erste Formelanteil mit den Stromfaktoren auf null gesetzt ($P_3=0$).

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

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

	Modifiziert gegenüber FIDES	Anmerkung	Werte Axial Type	Werte Blade Type
P ₁		Anpassungsfaktor basierend auf thermoelektrischen Ausfällen aus realen Felddaten.		13 %
P ₂	X	Aktivierungsenergie für die thermisch elektrische Beschleunigung. Bei Schraubsicherungen basierend auf der CuSn-Diffusion (Alterung) und bei Zinksicherungen auf Kornwachstumsstrukturen, die i.d.R. zu einer Widerstandserhöhung der Sicherung führen. Der Wert ist für jeden Sicherungstyp von jedem Sicherungshersteller separat zu ermitteln. Der hier aufgeführte Wert kann als Startwert für kupferbasierende Sicherungen genutzt werden.		0,9 eV
P ₃	X	Statt Stromfaktoren werden die realen Sicherungselementtemperaturen basierend auf den eingegebenen Stromlasten verwendet, welche im rechten Exponenten Bereich als T _{Fuse-Element} zum Einsatz kommen. Daher wird der Exponent P ₃ in diesem Teil auf 0 gesetzt.		0
P ₄		1 / Boltzmann Konstante 1/8.617 x 10 ⁻⁵ eV/K		11604 K/eV
P ₅	X	Reference Temperatur T ₀ = (20°C T _{Umgebung} + 60K)		80 °C
T _{Fuse Element}	X	Durchschnittliche Dauergebrauchstemperatur des Sicherungsschmelzleiter als Summe aus: 1- Schmelzleitertemperatur mit einem 20%igen Sicherheitsaufschlag 2- Durchschnitts-Kollektivtemperatur LV124 3- Eigenerwärmung innerhalb der Sicherungsbox		Ergibt sich aus dem Design bzw. muss messtechnisch ermittelt werden [°C].

Tabelle 7-27: Faktoren $\Pi_{\text{thermoelectrical}}$ für Sicherungen

7.3.4.1.2.3 Thermo-Zyklischer Stressfaktor (Π_{TCy})

Der thermo-zyklische Stressfaktor ist maßgeblich von der Flexibilität der Schmelzleiterkontur sowie vom Material der Sicherungshalter und Sicherungsboxen geprägt. Ein Temperaturwechsel bei Schraubsicherungen auf ISO-Standardhaltern repräsentiert nicht zwangsläufig das Verhalten gängiger Sicherungshalter und Sicherungsboxen im Markt. Die Sicherungsdosen zeichnen sich durch einen erhöhten thermischen Expansionsfaktor aus, wodurch die Ausdehnung der Kunststoffe infolge eines Temperaturwechsels den maßgeblichen Stress auf die verschraubte Sicherung und deren Schmelzleiter ausübt. Hier kann von einem Temperaturbereich der Sicherung zwischen -40 °C und +125 °C ausgegangen werden. Damit kann die Ausdehnung des zu verwendenden Kunststoffes durch den Tier-1 Lieferant 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 überprüft werden (siehe Kapitel 7.3.4.1.2.4). Hierzu wird die Sicherung in vertikaler Position eingespannt und mit unterschiedlichen Weglängen gezogen bzw. gestaucht. Ziel ist es, die Anzahl der Zyklen bis zum mechanischen Bruch festzustellen. Typischerweise sind folgende Amplituden zu testen: 0,05 mm, 0,1 mm, 0,2 mm, 0,3 mm, 0,4 mm.

Die Ergebnisse können anschließend in einer klassischen Wöhlerkurve dargestellt werden. Ein entsprechender Abgleich zwischen dem Verhalten eines typischen Sicherungshalters oder einer Sicherungsbox und den Ergebnissen aus Zug- und Drucktests (Wöhlerkurve) wird untersucht.

Bei Stecksicherungen erfolgt die Kontaktierung in der Regel über Flachsteckkontakte. Damit werden die Sicherungen nicht wie bei Schraubsicherungen mechanisch fixiert. Hierdurch verringert sich der Einfluss des Sicherungshalters auf den mechanischen Stress des Sicherungsschmelzleiters deutlich. Somit wird der Stress eher durch die Strombelastung und die Umgebungstemperatur verursacht, insbesondere durch Temperaturwechsel oder Temperaturschocks.

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

	Modifiziert gegenüber FIDES	Anmerkung	Werte Axial Type	Werte Blade Type
P ₁		Anpassungsfaktor basierend auf thermoelektrischen Ausfällen aus realen Felddaten.	51 %	
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. Der Wert ist für jeden Sicherungstyp von jedem Sicherungshersteller separat zu ermitteln. Der hier aufgeführte Wert kann als Startwert für kupferbasierende Sicherungen genutzt werden.	2,7	
P ₈		Exponent für die Dauer	0,33	
P ₉		Konstante basiert auf die Aktivierungsenergie von 0,122eV und der Boltzmannkonstante=8,617 ⁻⁵ eV/K 1414=0,122eV/8,617 ⁻⁵ eV/K	1414 K	
P ₁₀		Referenztemperatur Unterschied T ₀ = 20°C T _{Umgebung}	20 K	
(12 x N _{annual-cy} / t _{annual})		Die Menge der Temperaturzyklen pro Jahr z.B.: 12 x 365 x 2 (Zyklen/Tag) / 365 = 24	Missions Profil spezifisch	
min (θ _{cy,2})		Nutzungszeit pro Tag (in Stunden)	Missions Profil spezifisch	
Δ T _{cycling}		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: a) der Temperaturhub [K] in Abhängigkeit vom Einbauort im Fahrzeug z.B. Innenraum b) der Eigenerwärmung [K] innerhalb der Box durch Wärme-Leistung in die Box	Ergibt sich aus dem Design bzw. muss messtechnisch ermittelt werden [K]	
T _{max-cycling}		Max. Umgebungstemperatur in der Box	Ergibt sich aus dem Design bzw. muss messtechnisch ermittelt werden [°C]	

Tabelle 7-28: Faktoren Π_{TCy} für Sicherungen

7.3.4.1.2.4 Wöhlerversuch

Der Wöhlerversuch soll die zyklisch mechanische Beanspruchung simulieren bzw. nachbilden, welche durch den Temperaturwechsel auf die Sicherung wirkt. 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 beschrieben, kann anschließend eine Aussage über die grundsätzliche Zyklusfestigkeit getroffen werden, die Voraussetzung für die Anwendung der hier beschriebenen Berechnung der Ausfallrate ist (siehe auch Tabelle 7-25).

7.3.4.1.2.5 Wöhlerkurven-Testbeschreibung:

Die Sicherung wird vertikal in eine Druck-/Zugmaschine 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 bis 0,4 mm.

Der Nullpunkt des Sinus ist dabei der belastungsfreie Zustand, das bedeutet keine Kraffteinwirkung auf die Sicherung.

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

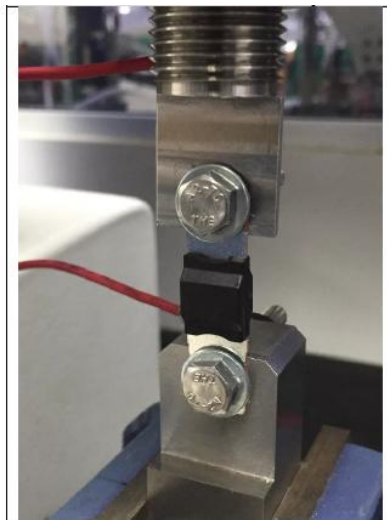


Abbildung 7-27: Testaufbau Wöhlerkurve

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

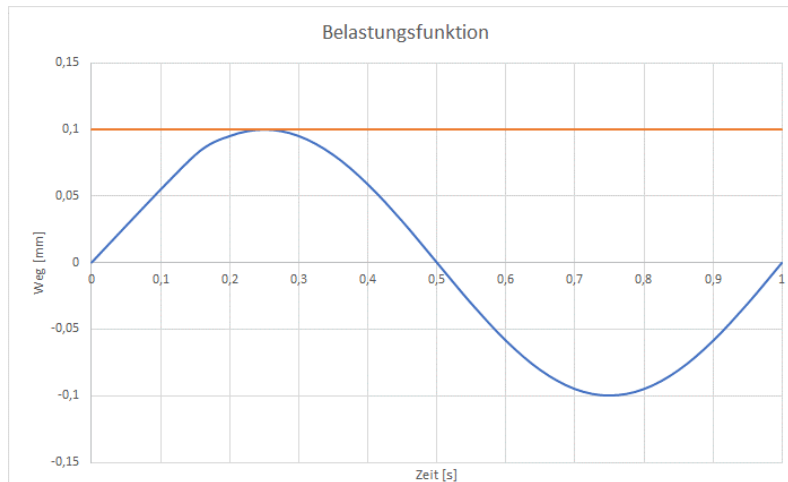


Abbildung 7-28: Belastungsfunktion

7.3.4.1.2.6 Beispiel einer Wöhlerkurve

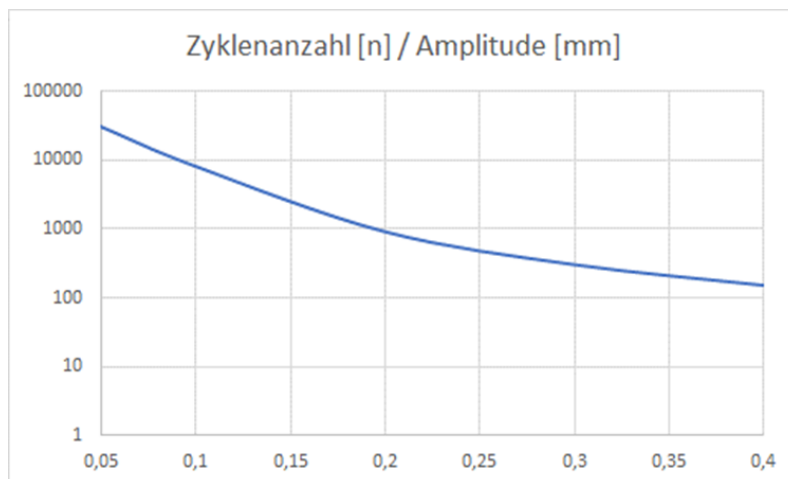


Abbildung 7-29: Beispiel einer Wöhlerkurve

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

1. die Längenausdehnung des zu verwendenden Sicherungsboxmaterials (vom Hersteller der Sicherungsdose zu ermitteln)
2. die Zyklusanzahl über die Lebensdauer (wird vom OEM festgelegt)

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

Hierbei ist die Wöhlerkurve für jeden Sicherungsnennwert vom Sicherungshersteller zu ermitteln und einzeln oder als Worst-Case-Nennwert darzustellen. Damit kann der Boxhersteller bzw. OEM erkennen, ob die Sicherung für den Einsatzfall (Temperaturbereich und Zyklusanzahl) und für das gewählte Material der Sicherungsdose geeignet ist.

Anmerkungen:

Die Wöhlerkurve ist abhängig von:

1. der Amplitude des verwendeten Sicherungsnennwertes, die sich aus der relativen Kraft der Boxausdehnung, bedingt durch den Temperaturhub, und der Gegenkraft des Schmelzleiters ergibt
2. der Frequenz; je kleiner sie ist, desto stärker ist die Belastung für den Schmelzleiter
3. der Umgebungstemperatur, die das Material unterschiedlich stark beanspruchen kann

7.3.4.1.3 Mechanische Stressfaktor ($\Pi_{Mechanical}$)

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

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

Tabelle 7-29: $\Pi_{Mechanical}$ für Sicherungen

7.3.4.1.4 Relative Feuchtigkeit Stressfaktor (Π_{RH})

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

	Modifiziert gegenüber FIDES	Anmerkung	Werte Axial Type	Werte Blade Type
P ₁₄		Anpassungsfaktor basierend auf relative Feuchtigkeit und Korrosion ermittelt aus Ausfällen von realen Felddaten.	24 %	
P ₁₅		RH% Referenz Wert (Peck Model)	70 %	
P ₁₆		Exponent für die relative Feuchte Beschleunigung (Peck Model) Der Wert ist für jeden Sicherungstyp von jedem Sicherungshersteller separat zu ermitteln. Der hier aufgeführte Wert kann als Startwert für kupferbasierende Sicherungen genutzt werden.	4,4	
P ₁₇		im Peck Model genutzte Aktivierungsenergie EA (eV) für Rel Humidity Der Wert ist für jeden Sicherungstyp von jedem Sicherungshersteller separat zu ermitteln. Der hier aufgeführte Wert kann als Startwert für kupferbasierende Sicherungen genutzt werden.	0,9 eV	
P ₄		1/Boltzmann Konstante	11604 K/eV	
T _{FuseElement}		Durchschnittliche Dauergebrauchstemperatur des Sicherungsschmelzleiter als Summe aus: 1- Schmelzleitertemperatur mit einem 20%igen Sicherheitsaufschlag 2- Durchschnitts-Kollektivtemperatur LV124 3- Eigenerwärmung innerhalb der Sicherungsbox	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 [%]	

Tabelle 7-30: Π_{RH} für Sicherungen

7.3.4.1.5 Chemischer Stressfaktor (Π_{Chem})

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

	Modifiziert gegenüber FIDES	Anmerkung	Werte Axial Type	Werte Blade Type
P ₁₈		Anpassungsfaktor basierend auf chemischen Mitteln, ermittelt aus Ausfällen von realen Felddaten.	6 %	

Tabelle 7-31: Π_{Chem} für Sicherungen

7.3.4.1.6 $\Pi_{Strom-Impuls}$

Unter einem Stromimpulszyklus versteht man allgemein einen schnellen Stromübergang von kurzer Dauer (ms), aber potenziell hoher Energie. Pulswechsel wirken sich auf einem kleinen Abschnitt des Sicherungselements aus.

Der Anpassungsfaktor für diese Stressgruppe kann anteilig aus der thermozyklischen Gruppe entnommen werden, wobei die gewählte Höhe von 6% einen willkürlichen Wert darstellt.

Für die Ermittlung der relevanten Daten muss vorab eine „Puls-Widerstandskurve“ für die jeweiligen Sicherungstypen ermittelt werden. Diese gibt den jeweiligen rel. i^2t -Wert (x-Achse) in Abhängigkeit von der Zykluszahl bis zum Ausfall (y-Achse) an (siehe Abbildung 7-30).

Die Puls-Widerstandskurve unterliegt einem Temperatureinfluss, der sich aus der Summe des Durchschnittswertes eines Temperaturkollektivs und der Eigenerwärmung innerhalb der Box ergibt. Der Temperatureinfluss wird mittels einer Reratingkurve abgebildet und fließt in die Berechnung einer resultierenden Kurve ein. Die finale Berechnungsformel für die gesamte Stressgruppe ist noch in der Entwicklung, da aktuelle Testversuche laufen, um die notwendigen Daten zu erzeugen.

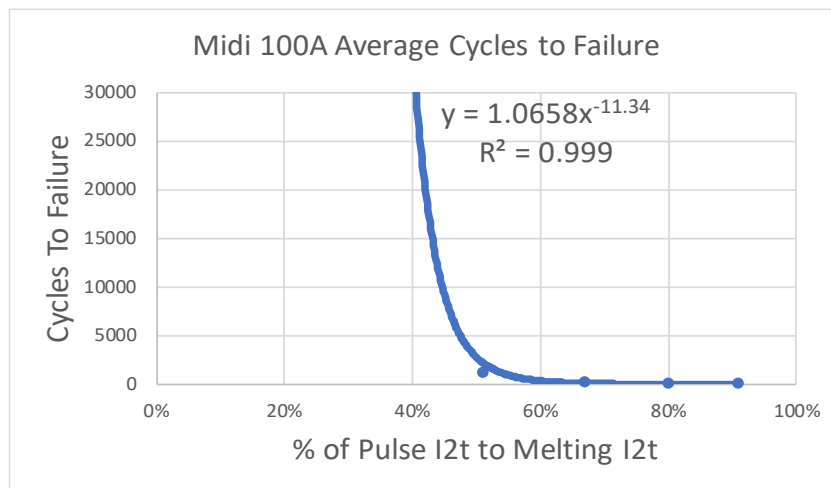


Abbildung 7-30: Beispiel einer Pulswiderstandskurve

7.3.4.1.7 $\Pi_{Strom-Zyklus}$

Unter Stromzyklen versteht man deutlich längere Transienten, beispielsweise solche im Sekunden- bis Minutenbereich oder länger. Hier wird wesentlich mehr Wärme erzeugt, sodass die Temperatur der Sicherung deutlich ansteigt und sich über die gesamte Sicherung verteilt. Die gesamte Sicherung erfährt Ausdehnungen und Kontraktionen, nicht nur ein kleiner Abschnitt wie bei Stromimpulsen.

Dieser Anteil ist bisher im thermozyklischen Teil enthalten und bleibt in dieser Ausgabe noch unberücksichtigt.

7.3.4.1.8 Π_{Induced}

Der letzte physikalischer Anteil nennt sich Π_{Induced} und umfasst unterschiedliche Effekte, die nachfolgend beschrieben werden.

$$\Pi_{\text{Induced}} = (\Pi_{\text{Placement}} \cdot \Pi_{\text{Application}} \cdot \Pi_{\text{Ruggedising}})^{0.511 \cdot \ln(C_{\text{sensitivity}})}$$

7.3.4.1.8.1 $\Pi_{\text{Placement}}$

Einfluss der Komponentenfunktion, nicht der physikalischen Natur der Sicherung. Hier wurde die Sicherung als „Analog power interface func.“ definiert.

	$\Pi_{\text{Placement}}$
Digital non-interface function	1,0
Digital interface function	1,6
Low-level analog non-interface function	1,3
Low-level analog interface function	2,0
Power analog non-interface function	1,6
Power analog interface function	2,5

Tabelle 7-32: $\Pi_{\text{Placement}}$

7.3.4.1.8.2 $\Pi_{\text{Application}}$

Verwendungsumgebung (z. B. Fahrzeug)

Innerhalb dieser Anwendungsgruppe gibt es eine Anzahl von Auswahlkriterien, die drei Levels beschreiben. Jedes Kriterium hat einen eigenen Überstressanteil. Neu ist die Überlegung, zwischen tauschbaren und nicht tauschbaren Sicherungen zu unterscheiden. Stecksicherungen sind dem Kunden zugänglich und daher leicht und einfach austauschbar, während Schraubsicherungen vorrangig den Servicewerkstätten vorbehalten sind oder gar nicht zugänglich sind, da beim Ausfall auch die gesamte Box mit Sicherungsinhalt getauscht werden kann. Daher wird bei der Berechnung abgefragt, ob es sich um eine Steck- oder Schraubsicherung handelt. Der Hauptunterschied in der Berechnung betrifft den Anteil.

Criterion	Non-Serviceable	Serviceable
User Type	Same	
User qualification level		
System Mobility	Different	
Product manipulation		
System electrical network	Same	
Product exposure to human activity		
Exposure to machine disturbances		
Exposure to weather		

Tabelle 7-33: $\Pi_{\text{Application}}$

7.3.4.1.8.3 $\Pi_{\text{Ruggedising}}$

Die Überlastungsbetrachtung bezieht sich auf die Beantwortung allgemeiner Zustimmungsfra­gen bei den folgenden vier Levels:

- L1 = keine Empfehlung (definitive Risiken für die Lebenserwartung)
- L2 = teilweise Empfehlung (potenzielle Risiken für die Lebenserwartung)
- L3 = zutreffende Empfehlung (einige Risiken für die Lebenserwartung)
- L4 = volle Empfehlung (kontrollierte Lebenserwartung)

RUGGEDNESS (FIDES pp102-103)				
Item #: Recommendation (P102-103) -> re-ordered P292-2943 ->>	FIDES Page	Weight	Satisfaction (0-> 3)	Σ (Weight.Satis)
169. Write complete procedures for implementation & maintenance	463	7		
157. Provide training and manage maintenance of skills for use/maintenance	451	7		
158. Check that product specific procedures & biz. rules have appropriate mo....	452	7		
168. Review maintenance operations of final user and deal with recommendation ...	462	4		
156. Verification of environmental specs for completeness, using analyses ...	450	4		
164. Justification that environmental specs are respected	458	4		
165. Verify prod. improvement process (eg. HAST) to limit environmental sens...	459	7		
167. Perform process analysis of implementation and maintenance operation...	461	4		
170. Respects a standard (eg. EN2282) when dealing with power supplies	464	4		
166. Analyzes failure cases that could lead to a failure propagation	460	4		
163. Includes production, storage & maintenance environments in product ...	457	4		
160. Comprehend risks of product under test being deteriorated by failures ...	454	4		
162. Use appropriate prevention to handle reasonably predictable abnormal ...	456	4		
161. Identifies and uses prevention for reasonably predictable aggressions ...	455	4		
159. Design dependable electrical protection devices	453	4		
171. Respects a standard dealing with conducted & radiated e/m disturbance ...	465	3		

Tabelle 7-34: $\Pi_{\text{Ruggedness}}$ (Extraction)

7.3.4.1.8.4 $C_{\text{Sensitivity}}$

Der $C_{\text{Sensitivity}}$ Faktor ist die Summe der Überstressfaktoren, welche mit den jeweiligen Felddatenfaktoren multipliziert werden.

$$C_{\text{Sensitivity}} = a \times \text{MOS} + b \times \text{EOS} + c \times \text{TOS}$$

Sensitivity Factors		Weight Factors		$C_{\text{Sensitivity}}$
EOS	6	α	72,5%	
MOS	6	β	22,5%	
TOS	6	γ	5%	
				6

Tabelle 7-35: $C_{\text{Sensitivity}}$

7.3.4.1.8.5 Betriebsmodi

Während der FIDES Guide für „Automotive – Engine Control Device“ insgesamt sechs Modi definiert (Seite 105 im FIDES Guide [5]), wäre der Vorschlag, für Sicherungen die folgenden fünf Modi zu nutzen:

- a) Fahrmodus
- b) Lademodus (DC-Laden)
- c) Vorkonditionierungsmodus
- d) Laden im Netzbetrieb
- e) Parkmodus

Die Modi können je nach Applikation variieren, jedoch ist eine Erweiterung durchaus sinnvoll. Weitere Erweiterungen können im Bereich von Tag/Nacht, Jahreszeiten oder Fahrmodi wie Spitzenlast, Berg- oder Autofahrten liegen.

Hier sind entsprechende Anpassungen der Belastungsprofile zu den jeweiligen Parametern notwendig, wie zum Beispiel Temperatur, Zyklen oder Angaben zur Stromstärke. Darüber hinaus ist die definierte Lebensdauer in Stunden auf die jeweiligen Modi aufzuteilen. Bisherige Festlegungen für die Lebensdauer sind 15 Jahre mit einer Gesamtbetriebszeit von 141.400 Betriebsstunden. Der Fahrmodus wird mit 8000 Stunden definiert, während die verbleibenden Stunden auf die vier anderen Modi aufzuteilen sind. Sollten Modi nicht genutzt werden, wie zum Beispiel fehlendes Laden beim Verbrenner, können diese ignoriert oder auf null gesetzt werden. Die Betriebsstunden der Gesamtbetriebszeit sind dann auf die verbleibenden Modi aufzuteilen.

Für jeden Betriebsmodus ergibt sich eine Ausfallrate, die im relevanten Betriebszustand berücksichtigt werden muss oder im Missionsprofil mit ihrer Gewichtung anteilig zur Missionsausfallrate beiträgt

7.3.4.2 Π_{PM} (Part Manufacturing factor)

Part Manufacturing beinhaltet folgende Anteile mit der jeweiligen Relevanz.

Score	QA _{manufacturer}	QA _{component}	RA _{component}	Experience
4				Very low risk
3	Higher	Higher	Reliable – Level A	Low risk
2	Equivalent	Equivalent	Reliable – Level B	Risk
1	Lower	N/A for fuses	Reliable	High Risk
0	Much lower	Much lower	Unreliable	
Default	2	2	2	1

Tabelle 7-36: Manufacturing Score

7.3.4.2.1 $\Pi_{Process}$

Die Ermittlung des $\Pi_{Process}$ -Faktors erfolgt über ein Audit gemäß FIDES Guide [5]. Das Audit ist in Phasen unterteilt und wurde für die passive elektrische Sicherung wie folgt gegenüber der FIDES-Tabelle angepasst:

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

Tabelle 7-37: Auditphasen und ihre Anteile

Fragen in den Kapiteln „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 im FIDES Guide [5] ab Seite 271 aufgelistet. Hinweise für die Einstufung erhält man im FIDES Guide [5] ab Seite 294.

Wenn kein Audit durchgeführt wird, kann der Process_grade mit 0,33 (wie im FIDES Guide empfohlen) angenommen werden.

7.3.5 Quantitatives Fehlermodell

Für Sicherungen können drei verschiedene Ausfallarten ausgemacht werden:

- Sicherung löst zu früh aus gegenüber dem definierten Kennlinienbereich
- Sicherung löst zu spät aus gegenüber dem definierten Kennlinienbereich
- Sicherung löst gar nicht aus

Das Hauptmerkmal liegt auf dem zu frühen Auslösen, da bedingt durch die Stressfaktoren und die damit einwirkende 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 Sicherungen wie in Tabelle 7-38.

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%

Tabelle 7-38: Ausfallarten der Sicherung

7.4 Funktionsbaugruppe Schraubkontaktierung

Schraubkontaktierungen können wie folgt in Klassen unterschieden werden:

- **Klasse I:** Masseverbindung mit Stahl- oder Alu Bolzen
- **Klasse II:** Potentialverbindung (Versorgungsanschluss)

7.4.1 Beschreibung der Funktionsbaugruppe

Im Folgenden wird nur die Klasse I berücksichtigt.

7.4.2 Genaue Beschreibung der Verwendungsart (Use Case)

Im Folgenden wird nur die Klasse I berücksichtigt.

7.4.3 Übersicht zu den Klassen

7.4.3.1 Klasse I: Masseverbindung

7.4.3.1.1 Beschreibung der Klasse I: Masseverbindung

7.4.3.1.1.1 Beschreibung der Funktionsbaugruppe Masseverbindung

Die Systemgrenze der Funktionsbaugruppe „Schraubkontaktierung“ ist in Abbildung 7-31 durch die gestrichelten Linien dargestellt. Die Baugruppe umfasst die Schweißverbindung zur Fahrzeugkarosserie oder zum Fahrzeugrahmen sowie die Schraubverbindung, bestehend aus Bolzen, Mutter, Kabelschuh, sowie die Verbindung zur Leitung, einschließlich einer eventuell vorhandenen Abdichtung. Der Einfluss der Verbindung zur Leitung ist zu vernachlässigen, da der Crimp nachgelötet wurde. Bereiche außerhalb der gestrichelten Linie werden nicht berücksichtigt.

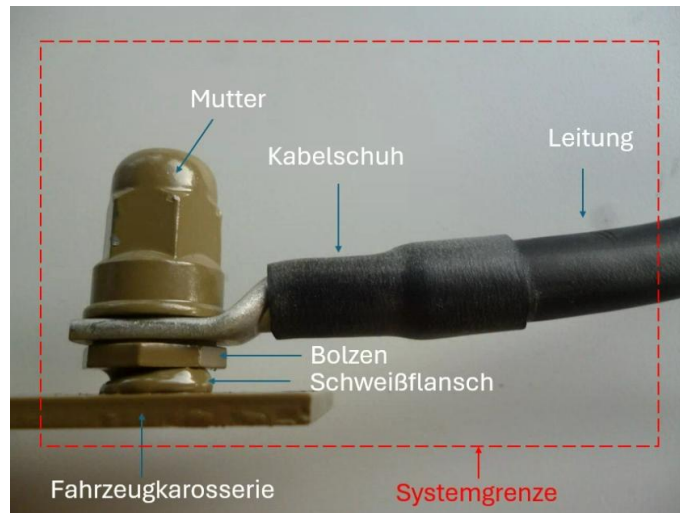


Abbildung 7-31: Systemgrenze Schraubkontakte

Die Schraubkontakte können wahlweise mit einer offenen oder einer geschlossenen Mutter ausgeführt werden. In Abbildung 7-32 ist ein Schraubbolzen mit geschlossener Mutter dargestellt.

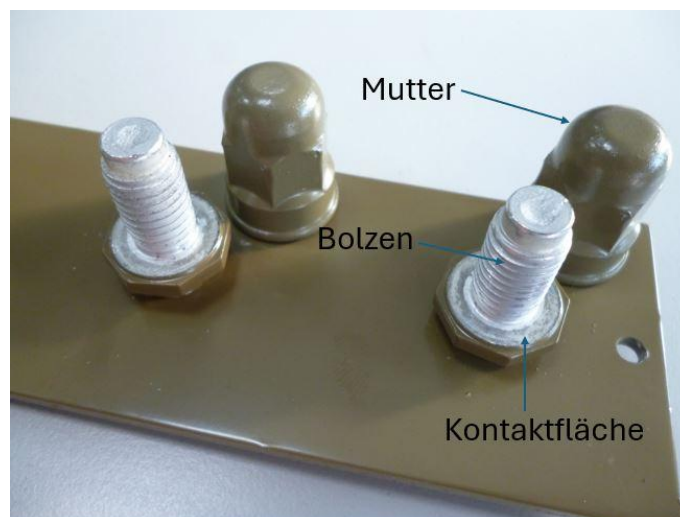


Abbildung 7-32: Darstellung eines Schweißbolzens eines Schraubkontakts mit Mutter und Kontaktfläche

Funktionen der Komponente

Die Funktion von Schweißbolzen besteht darin, eine stromtragfähige und möglichst niederohmige Verbindung zur Fahrzeugkarosserie oder zum Fahrzeugrahmen herzustellen. Der Strom fließt dabei über den Kabelschuh durch den Bolzen und über die Schweißverbindung am Bolzenfuß zur Karosserie oder zum Rahmen des Fahrzeugs (siehe Abbildung 7-33).

Die Bolzenmutter hat die Aufgabe, den Kabelschuh mechanisch am Bolzen zu fixieren und den erforderlichen Anpressdruck (Kontaktkraft) zwischen der Kontaktfläche des Kabelschuhs und der des Bolzens sicherzustellen.

Die Geometrie und Materialoberfläche der Kontaktflächen von Kabelschuh und Bolzen sollten optimal aufeinander abgestimmt sein.

Das Karosserieblech oder der Fahrzeugrahmen dient als Masse-Rückleitung und ist mit dem Minuspol der 12V- oder 48V-Batterie verbunden.

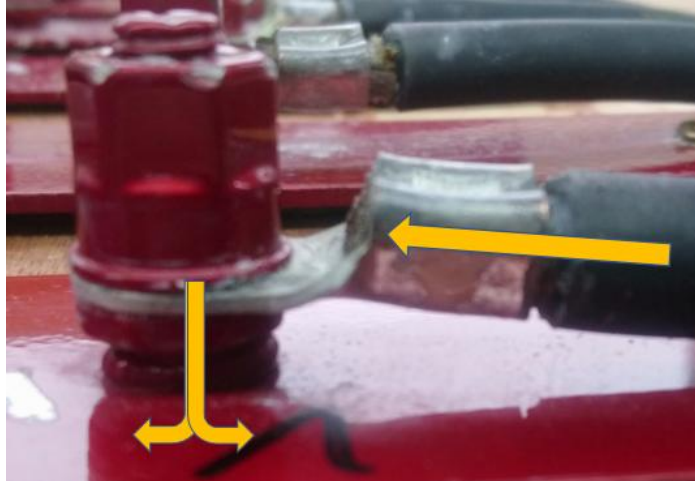


Abbildung 7-33: Stromfad am Schraubkontakt

7.4.3.1.1.2 Genaue Beschreibung der Verwendungsart (Use Case)

Schraubkontakte dienen dazu, eine elektrische Verbindung herzustellen, insbesondere bei Massebolzen, die eine Verbindung zur Fahrzeugkarosserie sicherstellen. Der Stromfluss erfolgt dabei vom Kabelschuh über den Bolzen und die Schweißverbindung zur Masse der Karosserie. Die Masseanbindung wird über eine lackfreie Kontaktfläche realisiert. Um die Lackfreiheit an den Kontaktierungsstellen der Massebolzen sicherzustellen, werden vor dem Lackiervorgang der Karosserie Abdeckkappen oder Muttern angebracht.

Die Kabelschuhe müssen eben und gratfrei und mit einer verzinnten Oberfläche versehen sein. Bei der Verwendung von vorverzinntem Material oder blanken Stanzkanten ist gemäß den bestehenden Qualitätsanforderungen auf einen korrekten Einsatz in Bezug auf den Korrosionsschutz zu achten. Pro Bolzen sollten maximal vier Kabelschuhe verwendet werden. Die genaue Anzahl richtet sich nach der Dicke der Kabelschuhe und der Gewindelänge. Die minimale Gewindelänge des Bolzens innerhalb der Mutter sollte mindestens dem 1-fachen Gewindedurchmesser entsprechen.

Über die gesamte Lebensdauer der Verbindung muss ein möglichst geringer Übergangswiderstand gewährleistet sein. Um ein übermäßiges Setzverhalten und damit einen Anstieg des Widerstands zu vermeiden, wird der Einsatz von Schraubwerkzeugen gemäß VDI/VDE 2862 empfohlen. In Werkstätten ist alternativ auch die Verwendung eines Drehmomentschlüssels zulässig.

Es gibt zwei mögliche Anzugsverfahren. Grundsätzlich sind in beiden Fällen die OEM-Spezifikationen zu erfüllen:

- **Anzug bis in den elastischen Bereich:** Hierbei wird das Drehmoment gemäß VDI 2230 festgelegt, sodass der Anzug im elastischen Bereich bleibt.
- **Anzug bis in den plastischen Bereich:** Dieses Verfahren umfasst das Anziehen mit einem definierten Drehmoment plus einem zusätzlichen Drehwinkel, um in den plastischen Bereich vorzudringen.

Massebolzen müssen während der gesamten Fahrzeuglebensdauer thermischen, mechanischen und chemischen Beanspruchungen standhalten. Sie sind sowohl für 12 V als auch für 48 V ausgelegt und für einen Temperaturbereich von -40 °C bis +130 °C geeignet.

7.4.3.1.1.3 Technische Daten

Technische Daten für verwendete Bolzen:

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 1x Gewindedurchmesser
M6	0,8				
M8	1,0				
M10	1,2				

Tabelle 7-39: Technische Daten für Stahlbolzen

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 1x Gewindedurchmesser
M10	2,5	EN AW-5186		EN AW-5052	Maximal 4 Min Einschraubtiefe der Mutter 1x Gewindedurchmesser

Tabelle 7-40: Technische Daten für Aluminiumbolzen

7.4.3.1.2 Anforderungen bezüglich Lebenszyklus der Funktionsbaugruppe

Für den Lebenszyklus der Massebolzen werden die folgenden Phasen unterschieden, die jeweils unterschiedliche Belastungen und Forderungen mit sich bringen:

- Herstellung der Bauteile
- Transport und Logistik
- Lagerung
- Schweißen beim Automobilhersteller und Kontrolle der Schweißung
- KTL-Prozess, Trocknung und Lackierung
- Demontage der Mutter und überprüfen der Kontaktfläche
- Verbindungsprozess Kabelschuh an Leitung
- Montage der Kabelschuhe, Verschrauben mit EC-Schrauber und lagerrichtige Montage mit Verdrehschutz
- Kundenbetrieb des Fahrzeugs
- Nacharbeit bei Reparatur
- Demontage und Recycling

7.4.3.1.2.1 Schraubverbindung

In Fahrzeugbordnetzen werden Schraubverbindungen unter anderem in Stromverteilern, Sicherungsboxen, Aggregate-Anschlüssen und Massekontaktierungen eingesetzt.

Die Auslegung der Schraubverbindungen muss so erfolgen, dass sie robust gegenüber typischen Belastungen im Betrieb sind, wie beispielsweise Vibrationen, thermischen Belastungen oder chemischen Einflüssen.

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

7.4.3.1.2.1.1 Materialauswahl

Schraubelemente werden aus einem Kaltstauchdraht nach DIN EN 10269 oder auch nach DIN EN10263-4 gefertigt. Zum Einsatz kommen Stähle mit einem Kohlenstoffanteil von weniger als 0,25%. Muttern werden aus einem niedrig legierten Kaltstauchdraht nach DIN EN 10263-2 hergestellt. Alternativ können auch Drähte nach SAE J403 verwendet werden. Dabei kommen Werkstoffe wie C10, C15 oder auch AISI1010 und AISI1015 sowie vergleichbare Drähte zum Einsatz.

Vergütung

Schraubelemente werden nach DIN EN ISO 898-1 auf die Güte 8.8 oder wahlweise auch auf 10.9 vergütet.

Oberfläche

Schraubelemente werden ausschließlich mit galvanischen Oberflächenbeschichtungen versehen. Zum Einsatz kommen hier Zinn-Zink-, Zink-Nickel- oder auch Zink-Beschichtungen. Der Aufbau der Oberfläche besteht stets aus einer Grundbeschichtung, einer Passivierung und, je nach Bedarf, einer zusätzlichen Gleitmittelbeschichtung. Die Oberfläche entspricht immer der OEM-Spezifikation.

7.4.3.1.2.1.2 Herstellungsprozess

Bolzen werden überwiegend durch Kaltumformung hergestellt. Die Fertigung erfolgt in einem mehrstufigem Umformprozess, bei dem die Geometrie ausgeprägt wird. Das Gewinde wird in einem Walzprozess gefertigt. Anschließend werden die Schraubkontakte vergütet und beschichtet.

Die Muttern werden ebenfalls durch Kaltumformung hergestellt. Das Gewinde wird entweder geschnitten oder, je nach Bedarf, geformt. Nach der Kaltumformung werden die Muttern direkt beschichtet.

Nach dem Beschichten von Bolzen und Muttern werden die beiden Komponenten miteinander verschraubt.

7.4.3.1.2.2 Kabelschuhe

In Fahrzeugbordnetzen werden Kabelschuhe unter anderem in Stromverteilern, Sicherungsboxen, Aggregate-Anschlüssen und Massekontaktierungen eingesetzt.

Es wird zwischen Rohrkabelschuhen, die aus Kupferrohr in einem speziellen Stanzprozess hergestellt werden, und Stanzkabelschuhen, die aus Bandmaterial in Folgeverbundwerkzeugen produziert werden, unterschieden. Stanzkabelschuhe können sowohl als Einzelteile als auch als Bandware endlos gefertigt werden – mit dem Vorteil einer komfortablen Verarbeitung im Kontaktierungsprozess der Leitung (Crimpen). Weitere Ausführungsformen wie Schmiede- oder Fließpressteile werden in dieser Untersuchung nicht berücksichtigt.

Beispiele für Kabelschuhe können der nachfolgenden Abbildung 7-34: Beispiele für Kabelschuhe entnommen werden.



Abbildung 7-34: Beispiele für Kabelschuhe

7.4.3.1.2.2.1 Material

Als Grundmaterial für Rohrkabelschuhe wird im Wesentlichen reines Kupfer eingesetzt. Für Stanzkabelschuhe kommen gut leitfähige Buntmetalllegierungen wie z. B. Messing, vorzugsweise jedoch Kupfer-Eisen-Legierungen, zum Einsatz. CuFe-Legierungen weisen eine bessere elektrische Leitfähigkeit auf und sind für höhere Temperaturbereiche geeignet.

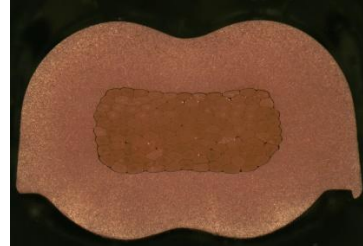
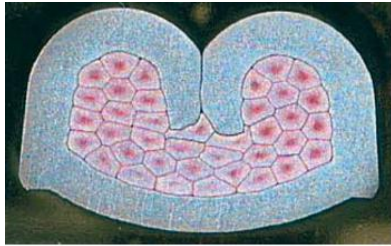
7.4.3.1.2.2.2 Oberflächenschutz

Die Kontaktierungsqualität und die Langzeitstabilität hängen wesentlich vom Oberflächenschutz der Bauteile ab. Da der Kontaktwiderstand der Schraubverbindung von der Kontaktkraft und den Eigenschaften der Oberfläche abhängt, sind geeignete Korrosionsschutzmaßnahmen zu treffen. In der Regel werden Kabelschuhe mit mindestens 6 µm Schichtdicke galvanisch verzinkt und mit einer Diffusionssperre aus Nickel ausgeführt oder feuerverzinkt. Darüber hinaus sind die möglichen Einflüsse elektrochemischer Korrosion zu berücksichtigen. Alle Komponenten (Bolzen, Mutter, Kabelschuh) müssen geeignete Oberflächen aufweisen.

Unbeschichtete Kabelschuhe aus Messing, Kupfer oder versilberte Kabelschuhe sollten nicht verwendet werden, da die Spannungsdifferenz zu groß ist.

7.4.3.1.2.2.3 Leitungskontaktierung

Die Kontaktierung zur Leitung im Leitungssatz erfolgt in der Regel durch den Crimp-Prozess. Dieser wird nach den Vorgaben des jeweiligen OEMs durchgeführt und entsprechend den Prüfvorgaben validiert. Es werden nur vom jeweiligen OEM freigegebene Komponenten und Kontaktierungsverfahren eingesetzt. Zur Stabilisierung der Crimpverbindung gegen Relaxation unter Alterungs- und Temperatureinflüssen kommen spezielle Crimp-Geometrien zum Einsatz.



Stanzkabelschuh gecrimpt

Rohrkabelschuh gecrimpt

Abbildung 7-35: Beispiele für Kabelschuhe mit Kontaktierung

Sofern das Nachlöten von Crimpverbindungen im Einzelfall vom Endkunden gefordert wird, ist es gemäß den Spezifikationen und technischen Regeln vorzunehmen. Insbesondere ist das Eindringen von Lot in den Leitungsverband hinter dem Kontaktteil sowie die Benetzung der Anschraubfläche zu vermeiden. Weitere Verbindungstechnologien wie stoffschlüssige Verfahren (Ultraschallschweißen, Widerstandsschweißen, usw.) werden in dieser Untersuchung nicht betrachtet.

7.4.3.1.2.2.4 Isolierung/Abdichtung

Schrumpfschläuche mit und ohne Innenkleber werden zur Isolierung, Abdichtung und bei Rohrkabelschuhen zusätzlich zum Schutz der Leitung an der Crimpverbindung gegen Schwingbelastungen eingesetzt. Schrumpfschläuche sind gemäß den Herstellervorgaben und den Endkundenanforderungen zu verarbeiten.

7.4.3.1.2.2.5 Dynamische Belastung

Schwingbelastungen sind durch konstruktive Maßnahmen im Leitungssatzdesign zu vermeiden.

7.4.3.1.2.3 Anforderung an Transport and Logistik

Beim Transport ist sicherzustellen, dass keine Beschädigungen an den Bauteilen auftreten. Dazu ist eine ordnungsgemäße Verpackung der Bauteile gemäß den geltenden Vorschriften der Bauteilhersteller vorzusehen.

7.4.3.1.2.4 Anforderung an die Lagerung

Die Lagerung soll in trockenen, leicht beheizten Räumen mit niedriger Luftfeuchtigkeit erfolgen. Korrosionsfördernde Mittel oder Betriebsstoffe (z. B. Salze) in der Umgebungsluft sind unbedingt zu vermeiden. Für die Verwendbarkeit von original verpackten Schraubkontakten/Kabelschuhen bestehen keine zeitlichen Einschränkungen, solange sie in ihrer Verpackung gelagert werden. Teile, die im Zuführer verbleiben, werden regelmäßig entsorgt. Der Grund hierfür ist, dass die ständige Reibung der Schweißbolzen zueinander die Oberflächenbeschichtung beschädigt.

7.4.3.1.2.5 Anforderung Schweißen

Schweißbolzen werden gemäß dem Prinzip „Hubzündung“ geschweißt. Der Schweißprozess wird dabei unter anderen anhand folgender Parameter überwacht: Bolzen auf Werkstück, Lichtbogenspannung, Schweißstrom, Schweißzeit, Hubhöhe, Durchdringung.

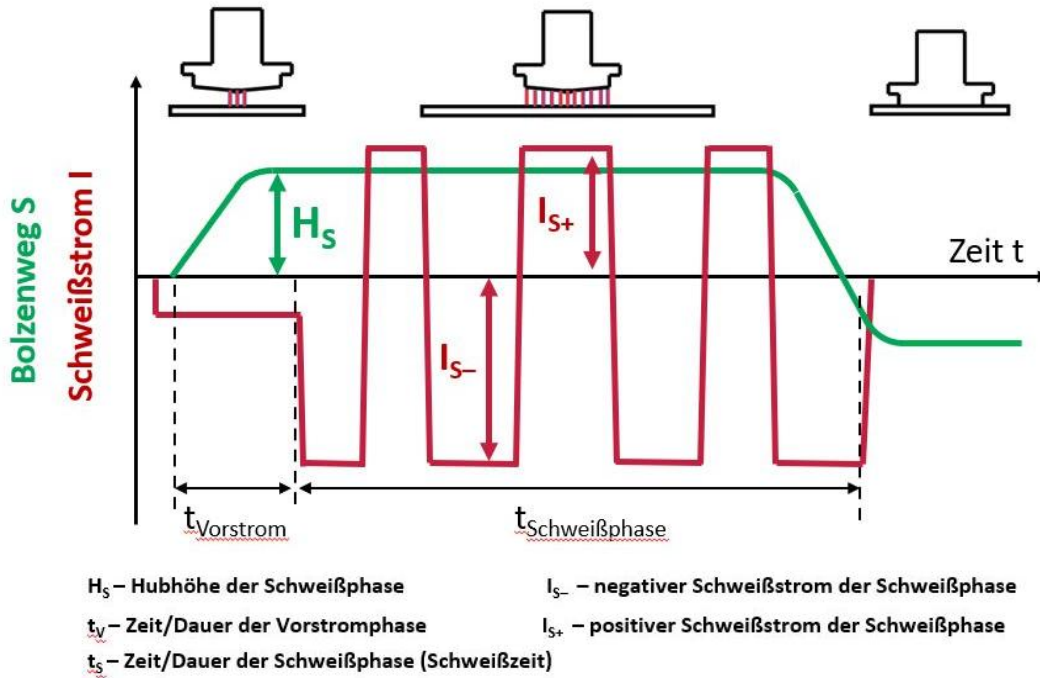


Abbildung 7-36: Schweißprozess bei Schraubkontakten

Für die Beurteilung der Schweißeynung von Stählen sind folgende Faktoren relevant:

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

Schweißbolzen werden auf niedriglegierte Stähle sowie auf feste bis hochfeste Stähle verschweißt. Die Abbildung 7-37 zeigt eine Übersicht der im Karosseriebau verwendeten Stähle.

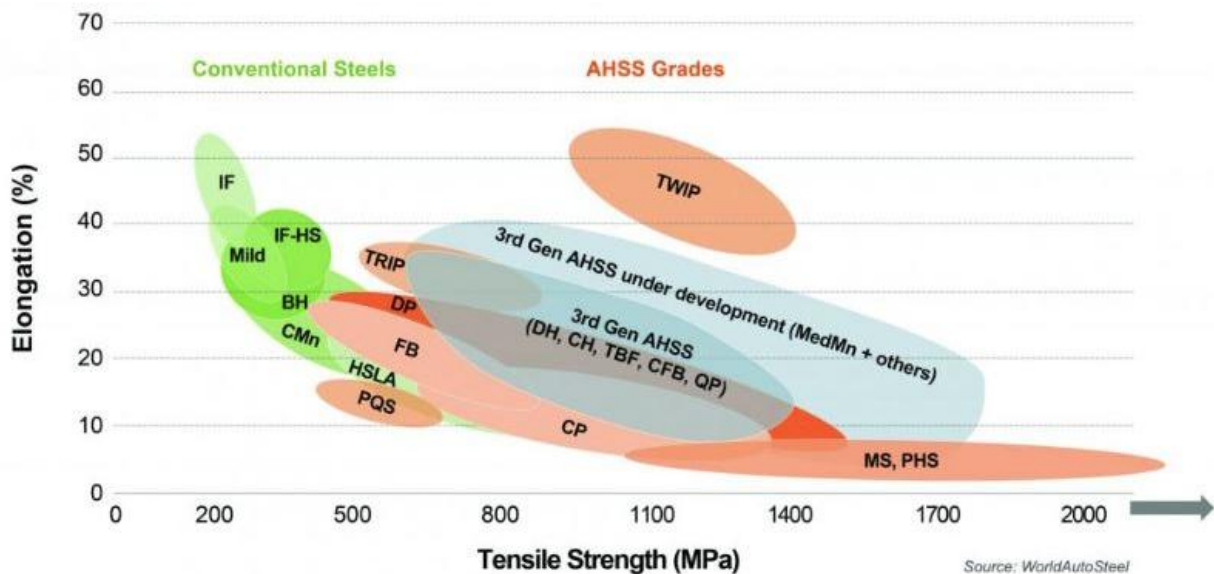


Abbildung 7-37: Zugfestigkeit und Bruchdehnung von Werkstoffen

Die Oberflächeneigenschaften der Bauteile haben einen entscheidenden Einfluss auf die Güte des Schweißergebnisses. Schmierstoffe wie Öle, Fette oder Trockenschmierstoffe wirken sich mit Bezug auf ihre Menge und Verteilung auf der Bauteiloberfläche maßgeblich auf das Schweißergebnis aus. Diese überwiegend kohlenwasserstoffhaltigen Stoffe beeinflussen unter anderem die Höhe der entstehenden Schweißenergie sowie die Qualität der Schweißzone. Daher müssen diese filmartigen Kontaminationen bei der Festlegung der Schweißparameter berücksichtigt werden. Sind sie nicht homogen verteilt oder in zu hoher Menge vorhanden, wird eine Behandlung des Bauteils vor dem Schweißprozess empfohlen. Andere Verunreinigungen, wie metallische Fremdpartikel, können den Lichtbogen ableiten oder zum Erlöschen bringen. Deshalb wird in solchen Fällen ebenfalls eine Reinigung des Bauteils vor dem Schweißprozess angeraten.

Oberflächenbehandlungen müssen den Vorgaben der VDA 230-213 entsprechen. Die Stahlblechdicke hängt vom Flanschdurchmesser des Schraubkontakts ab.

Es gelten folgende minimale Blechdicken.

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

Tabelle 7-41: Minimale Blechdicken bei Schraubkontakten

7.4.3.1.2.6 Kontrolle der Schweißung

Die Schweißung der Schweißbolzen erfolgt über dessen Schweißflansch. Der Bolzen wird mit Hilfe eines Werkzeugs über den Achtkant auf Torsion belastet. Die folgende Darstellung zeigt den Prüfablauf. Das Prüfmoment für die Schweißung muss oberhalb des Nennanzugmoments liegen.

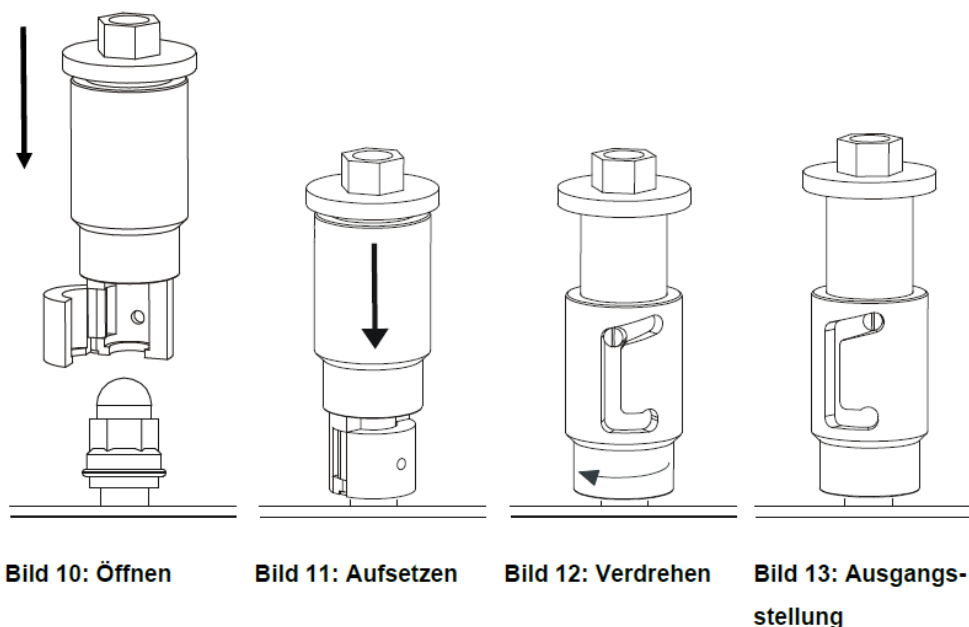


Abbildung 7-38: Prüfablauf Verschraubung

7.4.3.1.2.7 Anforderung an KTL-Prozess, Trocknung und Lackierung

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

7.4.3.1.2.8 Demontage der Mutter

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

7.4.3.1.2.9 Anforderung an die Kontaktfläche

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



Abbildung 7-39: noch zulässige Lackreste auf Kontaktfläche

Die Kontaktfläche von Bolzen und Mutter muss so ausgebildet sein, dass sie nach der Lackierung frei von Lack ist. Lack im Randbereich, wie oben gezeigt, ist zulässig. Eine durchgehende oder großflächige Kontamination mit Lack ist unzulässig.

7.4.3.1.2.10 Kontaktierungsprozess Kabelschuh an Leitung

Die Verarbeitung der Kabelschuhe ist gemäß der OEM-Spezifikation auszuführen. In der Regel werden Kabelschuhe im Crimp-Verfahren verarbeitet, insbesondere im Motorraumbereich (Nassbereich), wo sie nach dem Crimp-Prozess zusätzlich verlötet werden. Außerdem werden die Kabelschuhe im Nassbereich mit einem wasserdichten Schrumpfschlauch mit Innenkleber abgedichtet. Bevorzugt werden, insbesondere bei größeren Leitungsquerschnitten ($\geq 10 \text{ mm}^2$), Rohrkabelschuhe verwendet, die durch Verpressen mit der Leitung kontaktiert werden. Bei Einsatz von Rohrkabelschuhen mit Sichtloch, zur Kontrolle der Leitungsposition innerhalb des Kabelschuhs, sind diese Öffnungen in Nassbereichen mit flüssigem Lot zu verschließen.

7.4.3.1.2.11 Anforderungen an die Montage von Kabelschuhen

Der Schweißbolzen ist so ausgelegt, dass er einen oder mehrere Kabelschuhe aufnehmen kann. Bei kleineren Leitungsquerschnitten ist es üblich, mehrere Kabelschuhe übereinanderzulegen, während bei größeren Leitungsquerschnitten in der Regel nur ein Kabelschuh aufgelegt wird. In der Praxis werden üblicherweise maximal vier Kabelschuhe übereinandergelegt. Dabei ist die verbleibende Mindestgewindetiefe in der Mutter zu beachten. Eine geeignete Verdrehsicherung für eine lagegerechte Montage ist vorzusehen, darf jedoch den Schraubprozess nicht behindern. Die Anzahl der Kabelschuhe richtet sich nach der Dicke der Kabelschuhe. Bei Mehrfachbelegung ist die Reihenfolge der Verschraubung gemäß der Spezifikation des OEMs auszuführen. Bei Verwendung unterschiedlicher Materialkombinationen zwischen Kabelschuh und Bolzen bzw. Mutter ist auf die Kontaktkorrosion aufgrund der elektrochemischen Spannungsreihe zu achten. Die zulässigen Materialkombinationen sind den Spezifikationen des OEMs zu entnehmen.

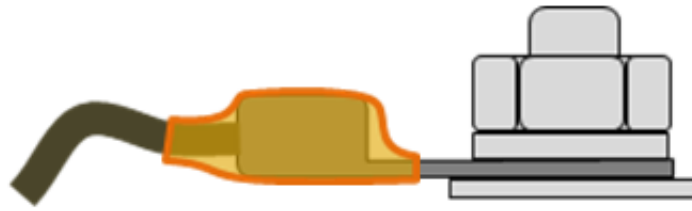


Abbildung 7-40: Darstellung Schraubverbindung

7.4.3.1.2.12 Anforderung Verschrauben mit EC-Schrauber

Schraubverbindungen müssen mit Schraubwerkzeugen gemäß VDI/VDE 2862 hergestellt werden. Bei der Verschraubung ist auf den Einfluss der Schraubtoleranzen der Schraubwerkzeuge auf die zulässige Gesamttoleranz zu achten. Für die Montage gibt es zwei verschiedene Schraubmöglichkeiten. Für nachträgliche Verschraubungen in Werkstätten ist auch eine Verschraubung mit einem Drehmomentschlüssel zulässig. OEM-spezifische Normen sind dabei zusätzlich zu berücksichtigen.

- **Elastische Verschraubung auf Drehmoment:**
Für die elastische Verschraubung gilt als Obergrenze die Streckgrenze $R_{p0,2}$. Diese Streckgrenze ist in Vorversuchen mit Originalbauteilen zu ermitteln. Im Schraubverfahren muss das Drehmoment auf maximal 90 % der Streckgrenze ausgelegt werden. Alternativ kann auch das Verfahren nach VDI 2230 angewendet werden. Für die Verschraubung ist ein EC-Schrauber mit niedriger Schraubtoleranz (Klasse II oder besser) zu verwenden.
- **Plastische Verschraubung. Drehmoment + Drehwinkel:**
Bei der plastischen Verschraubung wird gezielt bis in den plastischen Bereich angezogen und anschließend um einen vorgegebenen Winkel weitergedreht. Die Streckgrenze und der plastische Bereich sind in Vorversuchen mit Originalbauteilen zu ermitteln. Auch der Drehwinkel ist in Vorversuchen in Abhängigkeit von der Anzahl der gewünschten Wiederhol-Verschraubungen zu evaluieren. Bei diesem Verfahren lassen sich höhere Klemmkräfte erzeugen als bei der elastischen Verschraubung. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, dass der Abfall der Klemmkraft geringer ist als bei der elastischen Verschraubung. Die Verschraubung ist so gestaltet, dass eine mehrmalige Demontage und Montage möglich sind. Die Anzahl der Verschraubungen ist mit dem OEM abzustimmen.

7.4.3.1.2.13 Anforderungen im Kundenbetrieb und bei Reparatur

Durch den Betrieb des Fahrzeugs beim Kunden ergeben sich aus dem Fahrprofil und den Umwelteinflüssen Anforderungen an die Schraubkontakte. Die Anforderungen der OEMs hinsichtlich Instandsetzung und Reparatur sind zu beachten. Schraubkontakte können bei Bedarf geöffnet, gereinigt und erneut verschraubt werden.

7.4.3.1.3 Einzuhaltende Eigenschaften der Funktionsbaugruppe

Die Funktion einer Schraubverbindung besteht darin, eine robuste, jedoch bei Bedarf lösbare elektrische Verbindung zu gewährleisten, die einen bestimmten Widerstandswert nicht überschreitet. Als Ausfallkriterium wird der Kontaktwiderstand (Übergangswiderstand) betrachtet. Steigt dieser Widerstand an, beispielsweise durch Klemmkraftabbau oder chemische Reaktionen wie Korrosion und Oxidation, wird die Funktion der Schraubverbindung beeinträchtigt. Der Kontaktwiderstand muss daher unter einem zuvor festgelegten Grenzwert bleiben.

7.4.3.1.4 Fehlermodell

Für diese Schraubverbindungen sind im Wesentlichen vier Ausfallarten identifiziert worden:

- Stromunterbrechung durch Bruch innerhalb der Systemgrenze (Bolzen, Kabelschuh, Leitung)
- Intermittierender Kontakt durch Bruch und Wiederkontaktierung
- Widerstandserhöhung durch Verlust der Stromtragfähigkeit in der Schraubverbindung (Kraftabbau, Diffusionsvorgänge, elektrochemische Korrosion)
- Kontaktierung eines anderen Spannungspotentials durch den aufgrund eines Bruchs frei beweglichen Leitungsanteil (auch als Kurzschluss bezeichnet)

Die Details zur Analyse und Festlegung können der Anlage 4.1 entnommen werden.

7.4.3.1.5 Ausfallrate

Für die Berechnung der Ausfallraten der Schraubkontaktierungen wird ein angepasstes FIDES-Modell für „connectors“ verwendet, um die Funktionsbaugruppe der Masseverbindungen darzustellen.

Als Repräsentant wird eine typische Masseverbindung als Referenz betrachtet. Die Daten sowie die Auswertungen und Validierungen zu dem Repräsentanten können der Anlage 4 entnommen werden.

Die Basisausfallrate, die sich für Konnektoren allgemein aus λ_{Type} , $\Pi_{\text{Connection}}$, Π_{Contact} und Π_{Cycle} ergibt, wird hier direkt und anhand von Vergleichsrechnungen mit anderen Komponenten angepasst. Die Expertengruppe setzt für eine Masseverbindung

$$\lambda_0 = 0,025 \text{ FIT}$$

fest. Dies ergibt sich aus den Anteilen der Verschweißung des Massebolzen mit 0,005 FIT, der Verschraubung mit 0,011 FIT und dem Kabelschuh mit 0,009 FIT. Analog zum Vorgehen bei Steckverbindern (siehe Kapitel 7.2) wird dabei das Verhältnis von zufälligen Ursachen zu systematischen Ursachen von 1 zu 10 abgeschätzt.

Die für Konnektoren und damit für Schraubverbindungen im Automobil relevanten Ausfallmechanismen und Modelle, die im FIDES Guide [5] angesetzt werden, sind Tabelle 7-42 zu entnehmen.

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 nach FIDES, Punktebewertung nach Fragenkatalog

Tabelle 7-42: Fehlerursachen und deren Modellierung gemäß FIDES

Dabei hat gegenüber der FIDES-Klasse „Konnektoren“ (siehe FIDES Guide [5]) eine Anpassung der im Folgenden orange hervorgehobenen Faktoren stattgefunden, die den physikalischen Aktivierungstemperaturen entsprechen:

$$\Pi_{Thermal} = 0,58 \cdot e^{18522 \cdot 0,1 \cdot \left[\frac{1}{273+T_0} - \frac{1}{273+T_{board-ambient}+\Delta T} \right]} \quad \text{in einer Betriebsphase,}$$

$$\Pi_{TCy} = 0,04 \cdot \left(\frac{24 \cdot N_{annual-cy}}{2 \cdot t_{annual}} \right) \cdot \left(\frac{\min(\theta_{cy}; 2)}{2} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{\Delta T_{cycling}}{20} \right)^{1,9} e^{8490 \cdot \left[\frac{1}{273+20+T_0} - \frac{1}{273+T_{max-cycling}} \right]},$$

$$\Pi_{RH} = 0,13 \cdot \left(\frac{RH_{ambient}}{70} \right)^{4,4} \cdot e^{10612,5 \cdot 0,8 \cdot \left[\frac{1}{273+T_0} - \frac{1}{273+T_{board-ambient}} \right]}.$$

Die für Schraubverbindungen spezifischen Aktivierungstemperaturen wurden aus kombinierten Überlastmessungen (Widerstandsmessungen nach abwechselnder Stromtragfähigkeitsbelastung und Klimawechseltests nach einer OEM-Vorschrift bei 30 Mustern) eines Verschraubungsmaschinenherstellers statistisch ermittelt. Da nur bereits vorliegende Messdaten analysiert werden konnten, war es nicht möglich, die Aktivierungstemperaturen in Π_{TCy} und in Π_{RH} separat aus den Klimawechseltests zu berechnen.

Der hier verwendete Exponent 1,9 in der Norris-Landzberg-Korrektur, der Coffin-Manson-Gleichung für das „Temperature Cycling“ von Lötverbindungen, wird aufgrund des geringen Einflusses auf die Nachkommastellen der Ausfallrate beibehalten.

Bis auf Π_{Chem} (siehe Kapitel 6) sind diese Formeln spezifisch für Konnektoren. Des Weiteren gilt unverändert wie für Konnektoren gemäß FIDES:

$$\Pi_{Thermal} = 0 \quad \text{in einer Nicht-Betriebsphase,}$$

$$\Pi_{Mech} = 0,05 \cdot \left(\frac{G_{RMS}}{0,5} \right)^{1,5}.$$

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

$$\Pi_{placement} = 1$$

$$C_{sensitivity} = 4,4$$

Zusätzlich erhält man für die Schraubverbindung durch Auswertung des Kriterienkatalogs im FIDES Guide [5] für die Anwendungssituation „Automobil, nicht direkt am Motor“:

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

bzw. „Automobil, direkt am Motor“:

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

Für die Audit-Faktoren ergeben sich folgende kleinere Anpassungen des FIDES-Modells: Π_{PM} bestimmt sich über Zertifizierungen von Schweißanlagenherstellern, Verschraubungsanlagenherstellern, Kabelschuhherstellern, Konfektionären und Automobilherstellern.

Was das Audit für $\Pi_{Process}$ betrifft, so sind für Schraubverbindungen alle sieben FIDES-Phasen relevant, und hier sind keine Anpassungen in der „Contribution Phase“ (in %) notwendig.

Bei $\Pi_{Process}$ und $\Pi_{ruggedising}$ können je nach beteiligten Parteien einige Auditfragen entfallen. Weitere Anpassungen am Fragenkatalog werden nicht vorgeschlagen.

7.4.3.1.6 Fehlerverteilung

Die hier betrachtete Fehlerverteilung ist auf Masseverbindungen begrenzt. Der Kurzschluss mit anderen elektrischen Potenzialen wird für die Bewertung des Masseanschlusses ausgeschlossen, da in der Regel Kontaktstellen mit anderem elektrischen Potenzial gegenüber Masse geschützt sind. Es ist daher unwahrscheinlich, dass diese kontaktiert werden.

Gemäß einer Expertenbefragung treten die verbleibenden Ausfallarten in etwa gleicher Häufigkeit auf (siehe nachfolgende Tabelle):

Unterbrechung	30 %	Bruch innerhalb der Systemgrenze (Leitung, Kabelschuh, Bolzen)
Intermittierender Kontakt	35 %	Bruch mit intermittierendem Kontakt
Erhöhter Widerstand	35 %	Kraftabbau in der Schraubverbindung, Interdiffusion, chemische Reaktion an der Schraubfläche, Reibverschleiß, Elektromigration
Kurzschluss	n.a.	ist bei Masseverbindungen konstruktiv ausgeschlossen

Tabelle 7-43: Fehlerverteilung Masseverbindung

7.4.3.2 Klasse II: Potentialverbindung

Zurückgestellt auf die nächste Ausgabe.

7.4.4 Tabellen und Berechnungsformeln

Für die Berechnung der Ausfallrate zur Klasse I gelten die Formeln nach Kapitel 7.4.3.1.5. Der resultierende Wert für die Masseverbindung beträgt unter Berücksichtigung der Default-Werte:

$$\lambda_{\text{Phys}} = 0.13 \text{ FIT}$$

$$\lambda_{\text{gesamt}} = 0.84 \text{ FIT}$$

Für die Verteilung der Ausfallarten wird auf die Tabelle 7-43 verwiesen.

7.5 Nicht lösbare elektrische Verbindung

7.5.1 Beschreibung der Funktionsbaugruppe (Bauteil oder Baugruppe)

Elektrische Verbindungen dienen dazu, Bauteile physisch und insbesondere elektrisch leitend miteinander zu verbinden. Sie ermöglichen die Übertragung von Leistungs- und/oder Signalströmen. Dabei sollte der Durchgangswiderstand möglichst gering sein und sich im Laufe der Zeit (z. B. durch Alterung) nur minimal verändern.

Dieser Abschnitt behandelt elektrische Verbindungen zwischen Leitungen, die in Bordnetzen von Fahrzeugen verwendet werden. Um eine elektrische Isolation gegenüber der Umgebung (z. B. Karosserie) sicherzustellen, werden Umhüllungen wie Klebeband oder Schrumpfschlauch eingesetzt. Für Hochvolt-Anwendungen (HV) stehen auch alternative Isolierungstechnologien, wie beispielsweise Gehäuse, zur Verfügung, die vergleichbare Eigenschaften gegen Umwelteinflüsse aufweisen.

Um Korrosion zu vermeiden, ist in Bereichen mit Medienexposition (z. B. Motorraum, Stoßfänger) eine Abdichtung erforderlich. Schrumpfschläuche mit zusätzlichem Innenkleber sind hierbei gebräuchlich. Der Fokus dieses Dokuments liegt auf Leitung-Leitung-Verbindungen. Terminal-Leitung- und Terminal-Terminal-Verbindungen sind in dieser Ausgabe des Technischen Leitfadens nicht enthalten.

7.5.2 Genaue Beschreibung der Verwendungsart (Use Case)

Übliche Verfahren und Verbindungselemente zur Herstellung stoffschlüssiger und kraftschlüssiger Verbindungen zwischen elektrischen Leitungen umfassen:

- Ultraschallschweißen
- Widerstandsschweißen
- Röhrchen / Quetschverbinder
- Crimpverbinder

Hinweis: Röhrchen-/Quetsch- und Crimpverbindungen sowie offene Crimphülsen, die kraftschlüssige Verbindungen erzeugen, werden hier nicht weiter betrachtet, da diese immer seltener verwendet werden.

7.5.3 Übersicht zu den Klassen

Nicht lösbare elektrische Verbindungen können wie folgt in Klassen unterteilt werden:

- **Klasse I:** Ultraschallgeschweißte Splice-Verbindungen (USS)
- **Klasse II:** Widerstandsgeschweißte Splice-Verbindungen (WSS)
- **Klasse III:** Kraftschlüssige und mechanische Verbindungen

Dabei werden insbesondere die Einflüsse von Verbindungen mit Isolier- und Abdichtelementen (siehe Kapitel 7.5.3.4) berücksichtigt, wodurch folgende Unterklassen entstehen:

Klasse Ia: Gedichteter ultraschallgeschweißter Splice

Stoffschlüssige bzw. teil-stoffschlüssige elektrische Verbinder, die mit Ultraschallschweißapparaten geschweißt werden. Für den Einsatz im Feuchtraum erfolgt die Abdichtung durch einen geeigneten Schrumpfschlauch mit Innenkleber. Dieses Produkt ist so 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 Einsatz im Trockenraum erfolgt die Isolierung durch ein Isolierklebeband (Tapen) oder einen geeigneten Schrumpfschlauch ohne Innenkleber.

Klasse IIa: Gedichteter widerstandsgeschweißter Splice

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

Klasse IIb: Ungedichteter widerstandsgeschweißter Splice

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

Klasse III: Kraftschlüssige und mechanische Verbindungen

Kraft- und formschlüssige Verbindungen, z.B. mittels Crimp, werden derzeit nicht betrachtet.

Unterklassen, abhängig vom Querschnitt:

Zusätzlich zu den oben genannten Klassen werden weitere Unterklassen unterschieden, die abhängig von den Leitungsquerschnitten definiert sind: Unterklasse 1 für kleine Querschnitte und Unterklasse 2 für große Querschnitte (siehe Tabelle 7-44 für weitere Details).

Unterklasse	Kleine Querschnitte (Referenz-Splice 1x 0,75mm ² & 2x 0,5 mm ²)	Große Querschnitte (Referenz-Splice 1x 35mm ² & 2x 10 mm ²)
Gedichtet	Ia1	Ia2 (nicht betrachtet)
	IIa1	IIa2 (nicht betrachtet)
Ungedichtet	Ib1	Ib2
	IIb1	IIb2

Tabelle 7-44: Unterklassen nach Dichtung bzw. Querschnitt bei Splice-Verbindungen

7.5.3.1 Klasse I: Ultraschallgeschweißte Splice-Verbindung (USS)

7.5.3.1.1 Beschreibung der Klasse

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 7-41 dargestellt.



Abbildung 7-41: Beispielhafte ultraschallgeschweißte Splice: 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, was durch mikroskopische Aufnahmen ersichtlich ist (siehe Abbildung 7-42).

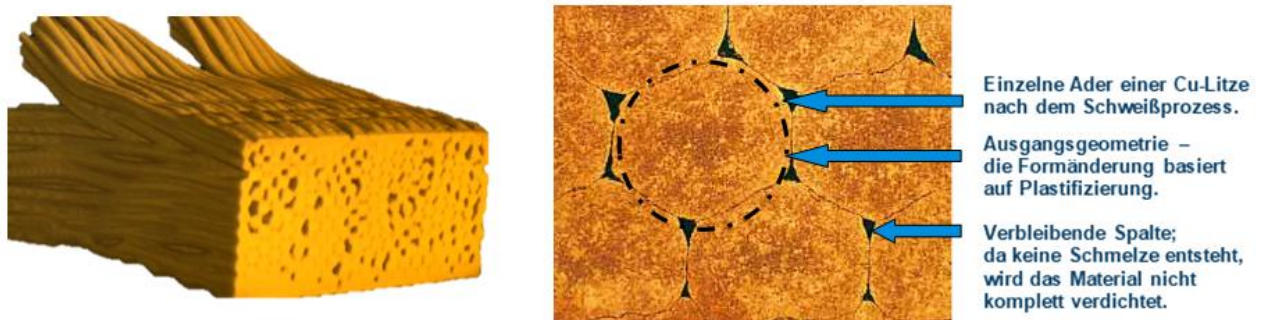


Abbildung 7-42: Ultraschallgeschweißte Splice-Verbindung

Vorteile des Ultraschallschweißens liegen beispielsweise in einer metallischen Verbindung hoher Qualität mit exzellenten elektrischen Eigenschaften in der Verbindungszone. Verschiedene Materialdicken und artfremde Materialien können miteinander verschweißt werden (z. B. Al und Cu). Die thermische Belastung der Füge-teile ist gering. Der Prozess ist energieeffizient und erlaubt kurze Zyklen. Es wird kein Zusatzmaterial (z. B. Lötinn, Schutzgas) benötigt.

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

7.5.3.1.1.1 Beschreibung der Systemgrenze

Bei der Definition der Systemgrenzen ist sicherzustellen, dass einerseits auch Bereiche, die durch den Schweißprozess sowie 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. mitbe-trachtet werden. Felddaten bezüglich der Zuverlässigkeit von Splice-Verbindungen sind höchstens auf einer umfassenderen Ebene (z. B. Komponenten) verfügbar.

Um Schalleinflüsse zu vermeiden, wird empfohlen zwischen der Ultraschallschweißung und ein angrenzen-des Element (z. B. Kontaktteil) einen Mindestabstand (siehe Abbildung 7-43, beispielhaft > 400 mm) einzu-halten.

Abbildung 7-43 zeigt die Systemgrenze einer Splice-Verbindung (Endknoten):

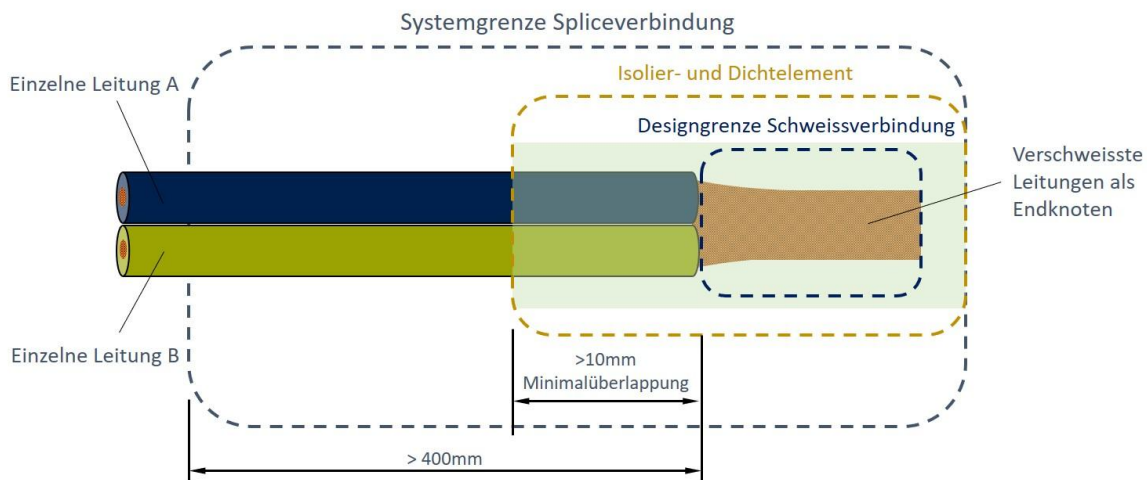


Abbildung 7-43: Skizze einer ultraschallgeschweißten Splice-Verbindung in Form eines Endknotens

7.5.3.1.1.2 Beschreibung der Verbindung zu anderen Funktionsbaugruppen

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

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

Eine Ausfallart einer geschweißten Kontaktierung kann demgemäß durch die relative Erhöhung (z.B. um ei-nen Faktor 2 gegenüber dem Neuzustand) des Durchgangswiderstands (für Splice ist dies der Widerstand an den Kontaktflächen zwischen den Drähten, ohne Zuleitung) bzw. das Überschreiten eines (ebenfalls bau-größenabhängigen) absoluten Grenzwerts eines Widerstands beschrieben werden.

7.5.3.1.2 Anforderungen bezüglich Lebenszyklus für Splice-Verbindungen

Für den Lebenszyklus von Splice-Verbindungen werden folgende Phasen unterschieden, in denen verschiedene Belastungen und Anforderungen an die Verbindungen gestellt werden:

- Design
- Materialauswahl
- Materiallagerung und -transport, Materiallogistik
- Konfektion: Herstellung der Verbindung
- Konfektion: Isolation der Verbindung
- Konfektion: Leitungssatzfertigung
- 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 Splice-Verbindungen gestellt, die unabhängig von Phasen generell zu erfüllen sind.

7.5.3.1.2.1 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 7-45 entnommen werden. In Bezug auf die akzeptierten Kombinationen von verschiedenen Nennquerschnitten der miteinander zu verschweißenden Leitungen sei auf die Spezifikationen der Automobilhersteller (OEMs) verwiesen.

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

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

Tabelle 7-45: Empfehlungen für das Design für Splice-Verbindungen

7.5.3.1.2.2 Materialauswahl

Die Leitungen werden gemäß entsprechenden, von den OEMs vorgeschriebenen Prüfungen bzw. Spezifikationen qualifiziert (siehe hierzu auch Kapitel 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 Freigabeprüfungen zu wiederholen.

Angaben zu Materialien für Isolier- und Dichtelemente sind in Kapitel 7.5.3.4 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, verschmutzt 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 sollte 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.

7.5.3.1.2.3 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 von Bedeutung. Die Art der Lagerung und entsprechende Lagerfristsbeschränkungen sind zu beachten. Hohe Lagertemperaturen und eine lange Lagerdauer haben einen negativen Einfluss auf die Schweißbarkeit der Leitung-(siehe 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.

7.5.3.1.2.4 Konfektion: Herstellung der Verbindung

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

Bei der Vorbereitung der Leitungen und der anschließenden Knotenerstellung ist korrektes und sauberes Arbeiten zwingend erforderlich.

Die folgenden Punkte sollen jederzeit eingehalten werden.

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

Die produzierten Verbindungen sind zu Beginn der Produktion sowie 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. Besonders symmetrische Splice sollten durch Vorrichtungen (oder auch softwareseitig) an der Schweißmaschine oder gegebenenfalls durch entsprechendes Splice-Design vermieden werden.

Beschädigungen der Splice während der Konfektion sind grundsätzlich zu vermeiden.

Identifizierung:

Für jeden Splice muss eine eindeutige Identifizierung zur Gewährleistung der Rückverfolgbarkeit möglich sein. Die Details und der Umfang der Rückverfolgbarkeit sind in Abstimmung mit dem jeweiligen OEM festzulegen.

Geometrie:

OEM-Spezifikationen bezüglich der geometrischen Dimensionen (z.B. Breite, Höhe und Toleranzen) müssen beachtet werden. Zusätzlich geben die OEMs Mindestanforderungen an Belastungen durch Kräfte (z.B. Zug, Schälens) für Splice-Verbindungen vor.

7.5.3.1.2.5 Konfektion: Isolation der Verbindung

Der mechanische Schutz wird durch eine Umhüllung (z.B. Schrumpfschlauch, Tapen) erreicht. Beim Einsatz im Feuchtraum ist eine gedichtete Splice-Verbindung (z.B. Schrumpfschlauch mit geeignetem Innenkleber) erforderlich. Im Trockenraum reicht ein Umwickeln mit Isolierklebeband oder die Verwendung eines Schrumpfschlauchs ohne Innenkleber aus.

Neben äußeren Einflüssen wie Temperatur- und Schwingungsbelastungen sind auch Medien (Gas, Flüssigkeit, Partikel in verschiedenen Aggregatzuständen) zu berücksichtigen.

Funktionen der Funktionsbaugruppe

Isolation:

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

Das Dichtungs- und Isolationselement (z.B. Schrumpfschlauch, Tape) wird gemäß den OEM-Spezifikationen eingesetzt, die Anforderungen wie Dichtheits- und Temperaturklassen umfassen.

7.5.3.1.2.6 Konfektion: Leitungssatzfertigung

Bei der Leitungssatzfertigung werden typischerweise vorgefertigte Einzelleitungen oder Teilleitungssätze auf Fertigungs- oder Formbrettern zu einem vollständigen Leitungssatz montiert. Dabei werden die in der Vorfertigung produzierten Splice, zusammen mit den durch die Splice verbundenen Leitungen, auf dem Form- bzw. Montagebrett ausgelegt. Möglicherweise werden Splice direkt am Formbrett geschweißt und isoliert.

Zusätzlich werden bei der Leitungssatzfertigung weitere Komponenten montiert (z. B. Sicherungsboxen, Kabelhalter/-führungen), Verlegebereiche der Leitungen werden mit Klebebändern zum Bündeln und ggf. auch zum Schutz der Leitungen umwickelt. Weitere Arbeitsschritte werden durchgeführt, bis der Leitungssatz vom Formbrett genommen wird. Anschließend kann der Leitungssatz weiteren Arbeitsschritten unterzogen werden (z. B. elektrische Endprüfung) und wird anschließend verpackt. Durch diese Tätigkeiten können mechanische Belastungen bzw. Überlastungen am Splice entstehen. Eine Beschädigung oder Beeinträchtigung der Splice-Qualität muss unbedingt vermieden werden.

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

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

Der Splice bzw. die verschweißten Leitungen sind im Fahrzeug gemäß der Spezifikation zu befestigen, um übermäßige mechanische Vibrationen zu vermeiden.

Nachbesserungen an Splice-Verbindungen nach dem Konfektionierungsprozess sind nicht zulässig. Beschädigte Leitungssätze müssen vollständig durch neue Leitungssätze ersetzt werden. Nach dem Ersatz ist eine Funktionsprüfung durchzuführen.

7.5.3.1.2.8 Kundenbetrieb des Fahrzeugs

Im Kundenbetrieb des Fahrzeugs entstehen durch das Fahrprofil des Kunden sowie durch die Umwelteinflüsse auf das Fahrzeug spezifische Anforderungen an die Splice-Verbindungen. Diese Anforderungen können je nach Hersteller variieren.

7.5.3.1.2.9 Instandsetzung und Reparatur, Nacharbeit im Fahrzeugbetrieb

Die Instandsetzung, Reparatur und Nacharbeit von elektrischen Splice-Verbindungen am endgeprüften Leitungssatz sind nicht gestattet. Bei einem Bauteilersatz oder einer Nacharbeit ist anschließend eine Funktionsprüfung durchzuführen.

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

7.5.3.1.2.10 Anforderungen an Demontage und Entsorgung

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

7.5.3.1.2.11 Anforderungen an die Wiederverwendung

Die Wiederverwendung von Splice-Verbindungen ist ausdrücklich ausgeschlossen.

7.5.3.1.3 Einzuhaltende Eigenschaften

Die einzuhaltenden Eigenschaften umfassen die Durchgangswiderstandswerte vor und nach der Belastung.

7.5.3.1.4 Fehlermodell für Splice-Verbindungen

Die Funktion einer Splice-Verbindung besteht darin, eine dauerhafte elektrische Verbindung zu gewährleisten. Als Kriterium für die Zuverlässigkeit wird vor allem ihr Durchgangswiderstand herangezogen. Steigt dieser (z. B. durch Bildung von Oxidschichten oder mechanische Lockerung), wird die Funktion der Verbindung beeinträchtigt. Ein offener Kontakt bedeutet einen unendlich großen Widerstand. Zuverlässigkeit bedeutet in diesem Kontext, dass der Durchgangswiderstand der Splice-Verbindung mindestens über eine bestimmte Zeit unter einem festgelegten Grenzwert bleibt.

Bei Fehlern ist zwischen den eigentlichen Ursachen und den Fehlerbildern, also der Art und Weise, wie sich die Fehler bemerkbar machen, zu unterscheiden:

Ein Fehlerbild ist der erhöhte Widerstand, der durch Messung oder sichtbare Korrosion festgestellt werden kann. Dieser erhöhte Widerstand kann bis zur Leitungsunterbrechung führen, was sich durch einen Wackelkontakt oder eine dauerhafte Unterbrechung äußern kann, erkennbar durch das teilweise oder vollständige Auseinanderfallen des Splice oder das Abtrennen einzelner Leitungen. Ein weiteres, unabhängiges Fehlerbild ist der Kurzschluss, der durch zerstörte Isolation, Kriechströme oder das Eindringen eines Drahtes sichtbar wird.

Die Ursachen für Fehler in Splice-Verbindungen können vielfältiger Natur sein, sowohl in elektrischer, chemischer, thermischer als auch mechanischer Hinsicht oder durch eine Kombination dieser Effekte. Elektrische Überlastungen, wie zu hohe Stromstärken, oder direkte thermische Überlastung, etwa durch unzureichende Kühlung, können zu Schäden an der Isolation führen, die im schlimmsten Fall zum Schmelzen oder Verglühen des Splices führen können.

Chemische Ursachen für Fehler sind Korrosion, die entweder durch Feuchtigkeit in der Umgebung (klimatische Einflüsse) oder durch Eindringen von Feuchtigkeit, Säuren oder Laugen in die Verbindung entstehen. Zudem sind die Verbindungsstellen potenzielle Lokalelemente, bei denen galvanische (elektrochemische) Effekte auftreten können.

Mechanische Fehlerquellen entstehen durch Vibrationen (Schwingungsermüdung) oder durch inzidente Schläge. Weitere mechanische Belastungen können durch Reibung, Zugkräfte, Schälkräfte (Abschälen), Quetschen oder Aufscheuern durch scharfkantige Elemente im Verlegeweg verursacht werden. Ein mechanisches Eindringen eines Drahtes in die Verbindung ist ebenfalls eine mögliche Fehlerquelle. Schließlich gibt es auch thermo-mechanische Ermüdungs-Effekte: Ein regelmäßiger Wechsel zwischen Kälte und Wärme kann dazu führen, dass sich Verbindungsstellen lockern.

Diese Alterungsmechanismen, die die Zuverlässigkeit des geschweißten Splice beeinflussen können, sind in nachfolgender Tabelle 7-46 aufgeführt. Dabei können sich verschiedene Ursachen für die Degradation auch gegenseitig überlagern.

Material	Mechanismus
Leiter (Metalle) insbesondere am Stoffschluss	<ul style="list-style-type: none"> • Kriechen • Chemische Reaktionen (Korrosion) • Ermüdung • Kontaminationen • Schälen, Abrasion • Brückenbildung
Leitungsisolation (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

Tabelle 7-46: Degradationsmechanismen in Splice-Verbindungen

Da Splice-Verbindungen als unlösbar konzipiert sind und bestimmte physikalische Effekte auch in Ruhezeiten ablaufen, müssen einige Alterungsmechanismen auch außerhalb der Betriebszeiten berücksichtigt werden. In diesen Standzeiten wirken Temperaturwechsel-Effekte, chemische Reaktionen und Einflüsse durch relative Feuchtigkeit. Hingegen spielen rein mechanische (wie Vibrationen) und thermale (bzw. thermisch-elektrische) Mechanismen im Ruhezustand keine Rolle.

7.5.3.1.5 Ausfallrate von Splice-Verbindungen

Gemäß der Diskussion in Kapitel 6.4 wird die Ausfallrate für Splice hier nach FIDES Guide [5] ermittelt. Die auf diese Weise bestimmte Ausfallrate wird anschließend durch beschleunigte Tests und die Auswertung von Felddaten untermauert.

Die alleinige messtechnische Bestimmung (auch unter Verwendung von Beschleunigungsmethoden) oder die Bestimmung durch Auswertung von Felddaten (spezifische Beobachtungen liegen nicht vor) ist aufgrund der geringen Anzahl an Ausfällen schwierig. Die erforderliche statistische Signifikanz würde eine zu große Stichprobengröße bzw. eine zu lange Mess- bzw. Beobachtungsdauer erfordern.

Die allgemeine Methodik nach FIDES Guide [5] ist in Kapitel 6.4 beschrieben. Im Folgenden werden nur für Splice spezifische Aspekte dargestellt. Dabei wird eine Systemlösung betrachtet, d. h. eine Splice-Verbindung (USS oder WSS), die mit einer (repräsentativen) Schweißanlage und den entsprechenden Einrichtungen zur Prozessüberwachung bzw. Bedienhilfen geschweißt wird. Von den elektronischen Komponenten der FIDES kommen die Splice-Verbindungen den „connectors“ am nächsten, auf denen im Folgenden aufgebaut wird. Als Repräsentant wird ein sogenannter Referenz-Splice betrachtet, von dem ausgehend Ausfallraten verwandter Splice (z. B. bei geänderter Leitungsanzahl) mithilfe der im Kapitel 7.5.3.1.5.1 beschriebenen Formeln bestimmt werden können.

Zu den in Kapitel 7.5.3.1.4 gelisteten Fehlerursachen existieren verschiedene Modelle, bei denen die Ursachen getrennt betrachtet werden. Die für Splice-Verbindungen im Automobil relevanten Ausfallmechanismen und Modelle, die im FIDES Guide [5] angesetzt werden, sind Tabelle 7-47 zu entnehmen. Die konkreten Formeln folgen in Tabelle 7-48.

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 nach FIDES, Punktbewertung nach Fragenkatalog

Tabelle 7-47: Fehlerursachen und deren Modellierung gemäß FIDES

Anpassung von Π_{Chem} , Π_{TCy} , Π_{RH} und Π_{Mech} für einen Schrumpfschlauch mit Innenkleber

Für Feuchträume ist es oft sinnvoll und üblich, Splice-Verbindungen mit einem Schrumpfschlauch (heat shrink) mit Innenkleber zu versiegeln. Die Funktionen des Schrumpfschlauchs sind:

- Abdichtung gegenüber der Umwelt (insbesondere Schutz gegen chemische Reagenzien und Isolation von Kontaktstellen) und
- Sicherstellung der mechanischen Festigkeit der Schweißverbindung.

Diese Aspekte werden jedoch nicht im FIDES-Modell abgebildet. Die Funktion a. betrifft in Π_{Chem} den Faktor Π_{prot} für das „Product protection level“, sowie Π_{TCy} (Temperaturwechsel) und Π_{RH} (Feuchte-chemisch), während b. die mechanische Alterung Π_{Mech} betrifft.

Als Anpassung wird daher bei Dichtung durch einen Schrumpfschlauch mit Innenkleber wie folgt vorgegangen:

- In Π_{Chem} wird der Beitrag Π_{prot} auf 0,5 gesetzt (als Mittelwert zwischen hermetischem Abschluss mit $\Pi_{\text{prot}} = 0$ und nicht hermetischem Abschluss mit $\Pi_{\text{prot}} = 1$), d.h. Π_{chem} wird halbiert.
- Π_{TCy} wird halbiert.
- Π_{RH} wird halbiert.
- In Π_{Mech} wird der Beitrag G_{RMS} mit einem Faktor 0,5 multipliziert. Da G_{RMS} quadratisch eingeht, wird Π_{Mech} mit einem Faktor von 0,25 multipliziert.

Was thermo-elektrische Effekte betrifft, ist die Eigenschaft der Dichtung, die Wärmeabgabe des Splice zu verringern, nachteilig. Umgekehrt wird auch der Einfluss von Wärme von außen 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 exakt verrechnet werden kann. Es stellt sich jedoch heraus, dass die hier verfolgte vereinfachte Anpassung von Π_{Chem} , Π_{TCy} , Π_{RH} und Π_{Mech} quantitativ eine ähnliche Reduzierung der Ausfallrate bewirkt.

Die dämpfende Eigenschaft eines Tapes oder einer Isolationskappe wird vernachlässigt, weshalb Π_{Mech} in diesem Fall nicht angepasst wird.

Weitere Einflussgrößen auf die Verbindungsqualität lassen sich in einer ersten Einteilung den Bereichen Entwurf und Produktion zuordnen. Weitere Details sind in Kapitel 7.5.3.1.2 zu finden.

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

7.5.3.1.5.1 Konkrete Anwendung der FIDES auf Splice-Verbindungen

Als Grundlage 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 wurde jedoch nicht speziell für Splice-Verbindungen in der Automobilindustrie entwickelt. Das FIDES-Basis-Modell (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 im FIDES Guide [5] für Splice-Verbindungen die Klasse „connectors“ für die Entwicklung eines „Evaluation Guide Calculation Sheets“ zugrunde gelegt. Modifikationen sind im Bereich des „Connection Type“ erforderlich, da hier kein Stoffschluss vorgesehen ist, sowie im Bereich des elektrischen Temperaturanstiegs.

- **Basisausfallrate:**

Es ergeben sich insbesondere folgende nachgelagerte Anpassungen des FIDES-Modells für Splice-Verbindungen. Zunächst wird $\lambda_{\text{Physical}}$ betrachtet, das im Wesentlichen die physikalischen Fehlerursachen der Splice-Verbindung abbildet. Der Charakter einer stoffschlüssigen, metallischen Verbindung fließt jedoch bisher nur indirekt in das FIDES-Modell ein und muss entsprechend modelliert werden. Für die Basisausfallrate gilt hier:

$$\lambda_{0_Splice} = \lambda_{\text{Type}} \cdot \Pi_{\text{Connection}} \cdot \Pi_{\text{Contact}} \cdot \Pi_{\text{Cycle}}$$

- **λ_{Type} :**

Im Modell für eine Splice-Verbindung gilt:

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

- $\Pi_{\text{Connection}}$:

Der Faktor $\Pi_{\text{Connection}}$ (im FIDES Guide [5] auch als Π_{Report} bezeichnet) ist nach Typ zu setzen (siehe FIDES Guide [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 vollstoffschlüssige metallurgische Verbindung vor, die besser als eine kraftschlüssige Verbindung (mit $\Pi_{\text{Connection}} = 1,0$ gemäß FIDES Guide) zu bewerten ist. Daher wird hier aufgrund von vergleichenden Versuchen (siehe Kapitel 7.5.3.1.5.2) für geschweißte Splice-Verbindungen ein $\Pi_{\text{Connection}} = 0,5$ angenommen.

- Π_{Contact} :

Für die Abhängigkeit der Basis-Ausfallrate von der Anzahl der Leitungen gilt:

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

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

- **Steckzyklen:**

Da Splice-Verbindungen unlösbar sind, wird die Anzahl der Steckzyklen gemäß FIDES Guide [5] durch den folgenden Wert ersetzt:

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

- Die physikalischen Beschleunigungsformeln und die führenden prozentualen Gewichtungsfaktoren für Konnektoren sind in Tabelle 7-48 zu finden. Die Formeln gelten für einen nicht gedichteten Splice. Eine Anpassung der Formeln bei Verwendung eines Schrumpfschlauchs zur Abdichtung wird bereits in Kapitel 7.5.3.1.5 direkt vor diesem Abschnitt beschrieben.

Factors contributing to physical stresses

Π_{Thermal}	$= 0,58 \cdot e^{11604 \cdot 0,1 \cdot \left[\frac{1}{273+T_0} - \frac{1}{273+T_{\text{board-ambient}+\Delta T} \right]}$	in an operating phase
	$= 0$	in a non-operating phase
Π_{TCy}	$= 0,04 \cdot \left(\frac{24 \cdot N_{\text{annual-cy}}}{2 \cdot t_{\text{annual}}} \right) \cdot \left(\frac{\min(\theta_{\text{cy}}, 2)}{2} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{\Delta T_{\text{cycling}}}{20} \right)^{1,9} \cdot e^{1414 \cdot \left[\frac{1}{273+20+T_0} - \frac{1}{273+T_{\text{max-cycling}}} \right]}$	
Π_{Mech}	$= 0,05 \cdot \left(\frac{G_{\text{RMS}}}{0,5} \right)^{1,5}$	
Π_{RH}	$= 0,13 \cdot \left(\frac{RH_{\text{ambient}}}{70} \right)^{4,4} \cdot e^{11604 \cdot 0,8 \cdot \left[\frac{1}{273+T_0} - \frac{1}{273+T_{\text{board-ambient}}} \right]}$	
Π_{Chem}	$= 0,20 \cdot \Pi_{\text{sal}} \cdot \Pi_{\text{envir}} \cdot \Pi_{\text{zone}} \cdot \Pi_{\text{prot}}$	

where

RH_{ambient}	humidity associated with a phase (%) Note: The relative humidity at a splice at an equipment interface may be different from the relative humidity at other items in the equipment.
$T_{\text{board-ambient}}$	average board/ambient temperature during a phase (°C)
$\Delta T_{\text{cycling}}$	amplitude of variation associated with a cycling phase (°C)
$T_{\text{max-cycling}}$	maximum temperature during a cycling phase (°C)
$N_{\text{annual-cy}}$	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}	$T_{\text{board-ambient}} + \Delta T$

Tabelle 7-48: Physikalische Beschleunigungsfaktoren für Konnektoren, die für Splice gelten (nach FIDES [5]).

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

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

$$\Pi_{placement} = 1$$

$$C_{sensitivity} = 4,4$$

Und für Splice erhält man durch Auswertung des Kriterienkatalogs des FIDES Guide [5] für die Anwendungssituation (Automobil, nicht direkt am Motor):

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

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

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

Durch Messungen kann die Anpassung von λ_{Type} bzw. $\Pi_{Connection}$ (gegenüber „Connectors“ aus dem FIDES Guide [5]) für Splice-Verbindungen abgesichert werden (siehe Kapitel 7.5.3.1.5.2).

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

- Π_{PM} bestimmt sich über Zertifizierungen von Schweißanlagenherstellern und Konfektionären. Für $QA_{component}$ gelten gemäß FIDES Guide [5] hier als spezifische Kriterien:

$QA_{component}$ factor:

Component quality assurance level	Position relative to the start of the art	$QA_{component}$
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: Telecordia GR1217-CORE, MIL-C-xxxxx, MIL-DTL-xxxxx ARINC 600 & 80x, AECMA, ...	Higher	2
Conforming with one of the EIA, IEC, SAE, BS standards	Equivalent	1
Non information	Lower	0

- Was das Audit für $\Pi_{Proc(ess)}$ 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:

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

Tabelle 7-49: Auditphasen und Ihre Anteile

- Bei Π_{Proc} und $\Pi_{ruggedising}$ können je nach beteiligten Parteien einige Auditfragen entfallen. Weitere Anpassungen am Fragenkatalog wurden nicht vorgenommen.

7.5.3.1.5.2 Überprüfung der Ausfallrate gemäß FIDES durch beschleunigte Laborversuche

Zur Validierung der mit dem FIDES Guide [5] bestimmten Ausfallraten wurden Laborversuche mit erhöhter Belastung (siehe Kapitel 6.3) für gedichtete und nicht gedichtete Splice-Verbindungen durchgeführt.

Bei der Beschleunigung durch verfeinerten Nachweis sind 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-Verbindungen im Labor wird durch zyklische Wärme- und Stromimpulsbelastung 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 und mechanisch belasten. 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, es sei denn, ein Totalausfall soll abgewartet werden.

Bei den durch Ultraschall- und Widerstandsschweißung verbundenen Komponenten handelt es sich um eine (teilweise) stoffschlüssige Schweißverbindung (siehe z. B. Abbildung 7-42 und Abbildung 7-47). Wegen der Ausdehnungsdifferenzen (z. B. aufgrund von Inhomogenitäten) würde ein Temperaturschock die Schweißstelle mechanisch erheblich belasten und damit beschleunigend wirken.

7.5.3.1.5.2.1 Labortechnische Validierung der Ausfallrate für Splice (kleiner Querschnitt)

In Vorversuchen mit Durchgangssplice kleiner Querschnitte (Unterklassen Ia1, Ib1, IIa1 und IIa2) hat sich bestätigt, dass die elektrischen Eigenschaften die Qualität der Verbindung insgesamt gut beschreiben. Als Ausfallkriterium wurde hier die Verdopplung des Durchgangswiderstands seit Beginn der Messung festgelegt. Für die Messpunkte wurden verschiedene physikalische Modelle zur Widerstandserhöhung aus der Literatur herangezogen.

Für geschweißte Splice (USS mit/ohne Schrumpfschlauch, WSS ohne Schrumpfschlauch) konnte in ersten Messreihen für kleine Querschnitte überprüft werden, dass die nach FIDES Guide [5] errechneten physikalischen Ausfallraten als obere Schranken in dieser Größenordnung realistisch sind. Insbesondere konnte gezeigt werden, dass die Ergänzung der FIDES um $\Pi_{Connection}$ für geschweißte Splice (siehe Kapitel 7.5.3.1.5.1, $\Pi_{Connection}$) im Vergleich zum im FIDES Guide [5] für gecrimpte Splice angegebenen $\Pi_{Connection}$ -Wert gerechtfertigt ist. Von gecrimpten Splice wurden zwei verschiedene Typen hierzu als Referenz getestet.

Inwieweit die Beschleunigung des Ausfallmechanismus reproduzierbar ist und sich die Ausfallraten gemäß FIDES Guide [5] anhand von Messungen weiter verbessern lassen, kann jedoch erst durch entsprechende Langzeitversuche mit ausreichender Komponentenanzahl statistisch signifikant nachgewiesen werden.

7.5.3.1.5.2.2 Labortechnische Validierung der Ausfallrate für geschweißte Splice (großer Querschnitt)

Werden anstelle kleiner Querschnitte die Splice der Unterklassen Ib2 und IIb2 (mit großen Querschnitten) im Labor betrachtet, erhöhen sich die Ströme, die erforderlich sind, um die gleiche Erwärmung in derselben Zeit im größeren Splice (mit geringerem ohmschem Widerstand) zu erzielen. Es müssen Ströme bis zu 5500 A bei Überlast schnell, sicher und wiederholgenau geschaltet werden. Um die Übertragbarkeit auf den Einsatz im Fahrzeug-Bordnetz zu gewährleisten, besteht zudem die Forderung nach Gleichstrom als Energiequelle, was die Erzeugung hoher Stromstärken zusätzlich erschwert.

Analog zu den Laborversuchen für die Unterklassen Ia1, Ib1, IIa1 und IIa2 wurde ein Durchgangssplice (siehe Abbildung 7-44) untersucht, wobei aus messtechnischen Gründen auf jeder Seite zwei Anschlüsse erforderlich sind – jeweils für die Belastung und für die Messung. Als Ausfallkriterium wurde dasselbe Maß wie bei den Unterklassen kleiner Querschnitte zugrunde gelegt, nämlich die Verdoppelung des Durchgangswiderstands.

Für geschweißte Splice mit großen Querschnitten (USS ohne Dichtung, WSS ohne Dichtung) wurde in zwei voneinander unabhängigen Messreihen auf dem Hochstrom-Teststand kein Ausfall beobachtet. Daher können die nach FIDES Guide [5] errechneten physikalischen Ausfallraten unter Berücksichtigung der Toleranzen und Messunsicherheiten als obere Schranke bestätigt werden.

Die statistischen Schwankungen der Messungen konnten durch eine Optimierung der Messmethode (Spannungsabgriffe an verzinnten Potenzial-Ausgleichsringen, zeitabhängige Messung bei hohem Messstrom mit Normierung auf 20°C, Wiederholmessung) sowie durch mechanische Vorkonditionierung der Splice (Leitungen um 90° abgewinkelt, um die Anlagenflächen der Übergangsbereiche Litzen-Schweißung zu minimieren) auf ein akzeptables Maß reduziert werden.

Zusätzlich wurde der Einfluss von Burn-In-Effekten durch Wärmelagerungsversuche untersucht, quantitativ abgeschätzt und in die Hochrechnung der experimentellen Ausfallraten mit einbezogen. Der untersuchte Zeitraum lässt sich durch die Zeitraffung mittels Puls- und Stromüberlast (Gleichsetzen der Energiebilanz der Betriebsphase im typischen Nutzungsprofil – siehe Tabelle 6-1 und Impuls) auf 9 bis 68 Jahre Lebensdauer projizieren, je nach Messreihe auf dem Hochstrom-Teststand. Es wurde festgestellt, dass durch Überlast keine zusätzlichen Ausfallarten angeregt wurden, die nicht auch im Realbetrieb beobachtet werden.

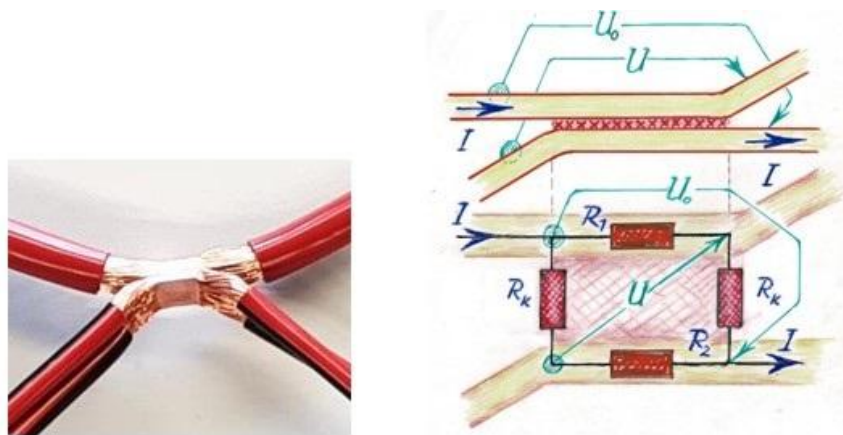


Abbildung 7-44: Foto eines Durchgangssplines mit großem Querschnitt (links) mit dem dazugehörigen Modell (rechts oben) und einem vereinfachten Ersatzschaltbild (rechts unten), einschließlich der Bezeichnungen für die Messgrößen (I: gemessener Strom, U: gemessene Spannung der Stromquelle)

Das Ziel ist die Berechnung des Durchgangswiderstands über den Kontaktersatzwiderstand R_K des Splines. Die jeweiligen Leitungswiderstände R_1 und R_2 im geschweißten Splice sind ebenfalls unbekannt.

Die folgenden Abbildungen gemäß Abbildung 7-45 zeigen das Vorgehen bei der Längs-, Quer- und Diagonalmessung, die den Längswiderstand R_L , den Querwiderstand R_Q und den Diagonalwiderstand R_D ergeben:

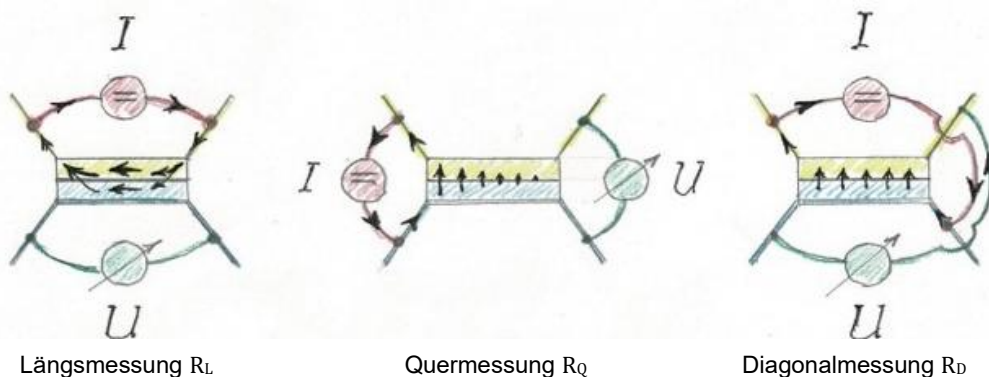


Abbildung 7-45: Messung des Längswiderstands R_L , Querwiderstands R_Q und Diagonalwiderstands R_D . Die Pfeile im Knoten veranschaulichen die Stromdichte und -richtung.

Es wurden Messungen sowohl im Strompfad als auch außerhalb des Strompfades durchgeführt. Dabei wurden die Messungen in den Anordnungen längs/quer, diagonal/quer sowie längs/diagonal ausgewertet. Im Hochstrom-Teststand wurden sowohl Inline- als auch Offline-Messungen durchgeführt (für die geometrischen Bezeichnungen siehe Abbildung 7-45).

In diesem Modell ist R_K (typische Größenordnung $10^{-7} \Omega$) der Kontaktersatzwiderstand, d.h. der zusätzliche Widerstand des gesamten Splice, geteilt durch 2 (aufgrund der Parallelschaltung im Ersatzschaltbild). R_{12} ist der Widerstand eines Leiters (hier $R_{12} = R_1 \approx R_2$ als näherungsweise gleich angenommen) ohne Verspleißung (siehe Abbildung 7-44, oben rechts).

Der Querwiderstand R_Q (typ. Größenordnung $10^{-8} \Omega$) wird wie in Abbildung 7-44 dargestellt gemessen. Ebenso sind dort der Längswiderstand R_L (typ. Größenordnung $2 - 5 \cdot 10^{-6} \Omega$) und der Diagonalwiderstand R_D illustriert.

Aufgrund der Definition gilt:

$$R_L = R_D + R_Q$$

Daher lässt sich aus zwei der drei gemessenen Widerstände der Kontaktersatzwiderstand R_K nach der entsprechenden Formel berechnen:

Mit R_L und R_Q :

$$R_K = 2 \left(R_Q + \sqrt{R_L R_Q} \right)$$

Mit R_D und R_Q :

$$R_K = 2 \left(R_Q + \sqrt{(R_D + R_Q) R_Q} \right)$$

Mit R_L und R_D :

$$R_K = 2 \left(R_L - R_D + \sqrt{R_L (R_L - R_D)} \right)$$

Beurteilung der Formeln:

- Die Kombinationen von Längs-/Querwiderstand (R_L und R_Q) sowie Diagonal-/Querwiderstand (R_D und R_Q) sind numerisch stabil. Diese Formeln sind für die Berechnung vorzuziehen.
- Die Kombination Längs-/Diagonalwiderstand (R_L und R_D) führt zu einer Fehlerfortpflanzung (Auslöschungseffekt). Diese Formel sollte vermieden werden.

Die weitere Auswertung wurde mithilfe von Offline-Messungen (außerhalb des Strompfades) unter Verwendung der Kombination Längs-/Querwiderstand durchgeführt.

Fazit Versuche Splice große Querschnitte:

Bei sämtlichen durchgeführten Versuchen – sowohl auf dem Hochstrom-Teststand als auch während der Wärmelagerung – wurde kein Ausfall eines Splice gemäß dem definierten Ausfallkriterium beobachtet. Die Versuche wurden schrittweise weiterentwickelt, wobei jede Messreihe mit neuen Splice begonnen wurde.

Insgesamt wurden vier verschiedene, voneinander unabhängige Messreihen durchgeführt (zwei auf dem Hochstrom-Teststand und zwei bei Wärmelagerung). Aus der Veränderung des Kontaktersatzwiderstands wurden unter Worst-Case-Bedingungen experimentelle Ausfallraten berechnet. Für die statistischen Hochrechnungen wurden unterschiedliche mathematische Modelle getestet und die geeignetsten angewendet.

Die experimentell ermittelten Ausfallraten lagen im Vergleich jeweils signifikant unter den theoretisch berechneten Werten, was deren Plausibilität weiter untermauert.

Unter den untersuchten Probanden befanden sich sowohl ein- als auch zweistufig geschweißte Splice. Mehrstufige Splice, wie sie beispielsweise zur Vermeidung von Side-Splice eingesetzt werden, wurden daher ebenfalls als Prozessvariante berücksichtigt.

7.5.3.1.5.3 Diskussion der experimentellen Untermauerung

Die theoretisch berechneten Ausfallraten für beide Querschnitte und Schweißtechnologien umfassen gemäß FIDES Guide [5] das gesamte physikalische Fehlermodell. Dafür wurde das Fehlermodell der item-family „Konnektoren“ mit Anpassungen und die zugehörige Gewichtung der Einflussfaktoren unverändert übernommen.

Die bisher durchgeführten Überlastexperimente decken von den physikalischen Einflussfaktoren nach FIDES Guide [5] insbesondere thermo-elektrische Effekte ab, die mit einer Gewichtung von 58 % den größten Anteil haben. Aufgrund des erzielten Temperaturhubs im Splice-Knoten konnte jedoch kein ebenso hoher Zeitraffungsfaktor wie bei den thermo-elektrischen Effekten erreicht werden. Thermo-zyklische Effekte konnten somit in den Versuchen nur begleitend berücksichtigt werden, wobei diese gemäß FIDES-Standard lediglich mit 4 % gewichtet sind.

Durch die Wechselwirkungen der elektromagnetischen Felder im Hochstrom-Teststand erfahren die Splice bei jedem Puls erhebliche Auslenkungen, welche zusätzliche Vibrationen induzieren. Daraus ergibt sich die Annahme eines induzierten mechanischen Effekts, der gemäß FIDES Guide [5] mit 5 % gewichtet wird. Insgesamt decken die durchgeführten Experimente Effekte mit einer Gewichtung von 67 % gemäß FIDES Guide [5] ab.

Chemische Effekte (Gewichtung 20 %) werden gemäß FIDES Guide [5] durch einen kurzen Fragenkatalog adressiert. Offene Punkte bleiben noch bei Effekten durch relative Feuchte (Gewichtung 13 %), wobei der Einsatzbereich sowie die Abdichtung zu berücksichtigen sind.

7.5.3.1.5.4 Überprüfung der Ausfallrate gemäß FIDES durch Auswertung von Felddaten

Zur Validierung der gemäß FIDES bestimmten Ausfallraten wurden Felddaten zu Ausfällen und Nicht-Ausfällen zusammengestellt und statistisch ausgewertet.

Hierzu haben mehrere Konfektionäre Angaben zu Produktionszahlen sowie zu typischerweise verbauten Splice bereitgestellt. Die erhobenen Datensätze umfassen eine Mischung aus USS/WSS, kleinen/großen Querschnitten sowie gedichteten/ungedichteten Varianten.

Die Betriebsprofile der Datensätze repräsentieren die typische Nutzung in der Praxis und bieten damit einen realistischen Vergleich zu den standardisierten Betriebsprofilen (bei 25°C gemäß Tabelle 6-1). Für die Berechnung des Stichprobenmittels und des Konfidenzintervalls wird auf die Methodik in Kapitel 6.2 verwiesen.

Bei einem gegebenen Konfidenzniveau von 90 % wird die obere Schranke des Konfidenzintervalls als Schätzung für die Ausfallrate $\lambda_{(\text{gesamt})}$ herangezogen. Dabei ergibt sich unter der Annahme eines fiktiven zufälligen Ausfalls sowie unter Berücksichtigung der in Kapitel 6.2 erläuterten Dunkelziffern:

$$\lambda_{\text{Phys}} < 0,06 \text{ FIT.}$$

Dieser Wert liegt zwar über den in den Labortests bestimmten Ausfallraten, jedoch etwas unter den gemäß FIDES Guide [5] berechneten Ausfallraten (siehe auch Anlage 5).

Bei künftig steigenden Stückzahlen und weiterhin keinen zufälligen Ausfällen würde die Ausfallrate aus Felddaten sinken. Der Zugang über Felddaten etabliert die, im FIDES Guide [5] grundsätzlich offene und bei Labortests nicht ausreichend gezeigte, Konfidenz der Ausfallrate zu einem Niveau von 90%.

Für eine konservative Abschätzung werden die Ausfallraten gemäß FIDES Guide [5] verwendet, jeweils differenziert nach den Kombinationen USS/WSS, kleinen/großen Querschnitten und gedichteten/ungedichteten Splice.

7.5.3.1.6 Fehlerverteilungen

Da in den vorliegenden Ergebnissen keine Ausfälle aufgetreten sind, kann keine Verteilung der Ausfallarten angegeben werden.

7.5.3.2 Klasse II: Widerstandsgeschweißte Splice-Verbindung (WSS)

7.5.3.2.1 Beschreibung der Klasse

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 elektrischen Widerstand und den daraus resultierenden Strom in der Schweißzone erzeugt wird.

Der Schweißstrom wird applikationsbedingt festgelegt und kann von wenigen kA bis zu 50 kA und mehr betragen. Die Energieübertragung erfolgt zwischen zwei Elektroden (Ober- und Unterelektrode), die an die Geometrie des herzustellenden Splice angepasst sind. Die benötigte Energie zum Kompaktieren bzw. Verschweißen eines Splice ist bei gleichen Geometrien (Höhe, Breite, Länge) und gleichen Materialien stets konstant. Durch das Einbringen der Wärme wird das Leitungsmaterial aufgeweicht, und in Verbindung mit dem Schweißdruck entsteht eine stoffschlüssige Verbindung.

Diverse nationale und herstellereigene Normen sowie Spezifikationen beschreiben die Anforderungen und Testmethoden zur Herstellung von Splice. Beispielhafte Splice-Verbindungen sind in Abbildung 7-46 dargestellt.

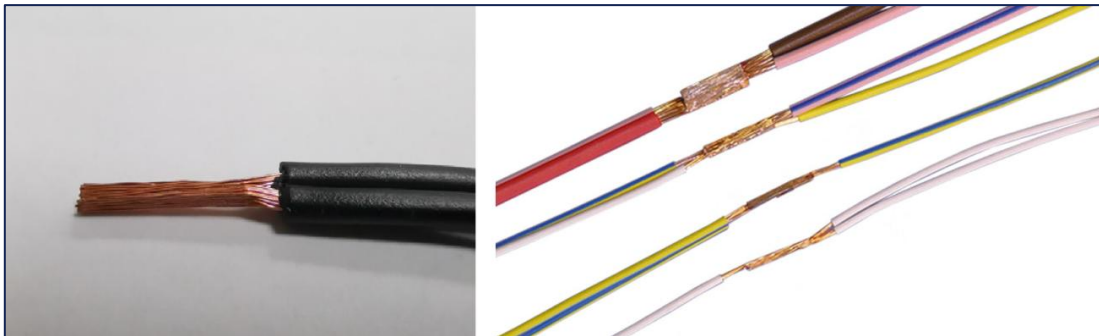


Abbildung 7-46: Beispielhafte widerstandsgeschweißte Splice: Endknoten links, Durchgangsknoten rechts.

In Bezug auf die Physik der Kontaktstelle handelt es sich um eine stoffschlüssige Verbindung (siehe Abbildung 7-47). Es handelt sich um eine metallurgische Verbindung, die durch intermolekulare Kräfte entsteht. Die resultierende Verbindung ist größtenteils stoffschlüssig, was durch mikroskopische Aufnahmen ersichtlich ist.

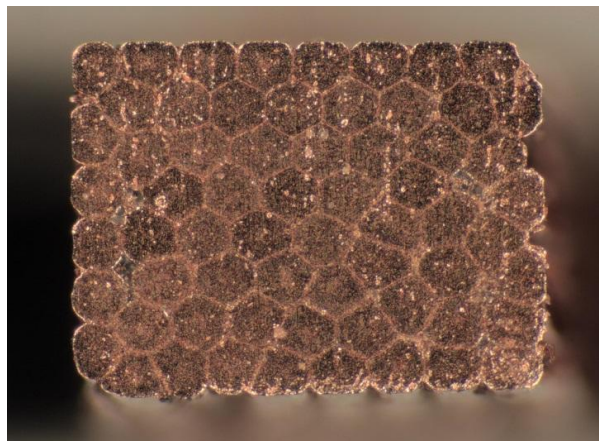


Abbildung 7-47: Widerstandsgeschweißte Splice-Verbindung

Vorteile des Widerstandsschweißens liegen beispielsweise in einer metallischen Verbindung hoher Qualität mit exzellenten elektrischen Eigenschaften in der Verbindungszone bei verschiedenen Materialdicken und Oberflächen. So können beispielsweise verzinn-, vernickelte-, und versilberte Litzen und deren unterschiedliche Kombinationen verbunden werden. Hierbei ist eine Verunreinigung durch Fette, Öle oder Fremdpartikel, etc. unerheblich für die Qualität des Splice. In einem Splice können Leiter mit deutlich unterschiedlichen Querschnitten in einer kurzen Zykluszeit verarbeitet werden.

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.

7.5.3.2.1.1 Beschreibung der 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 7-48 dargestellt.

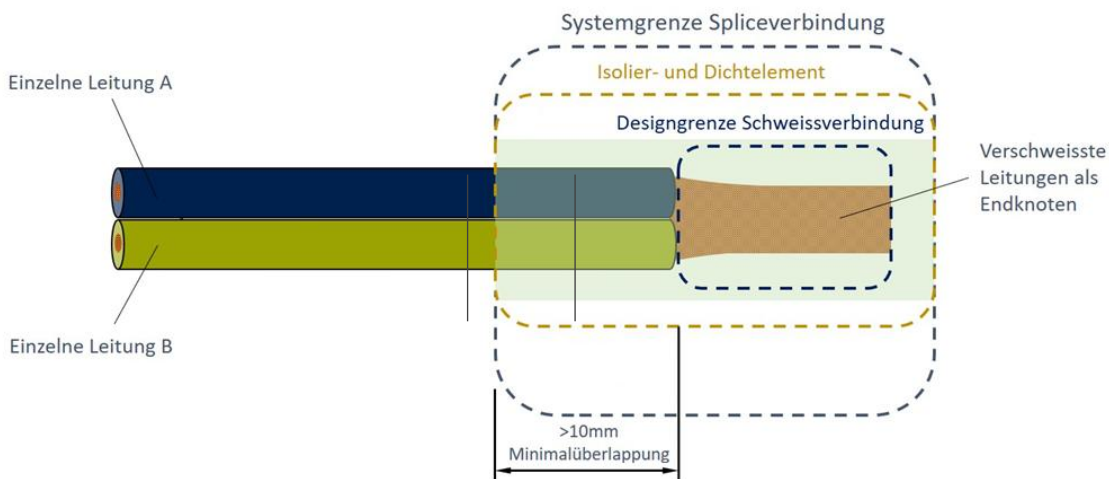


Abbildung 7-48: Skizze einer widerstandsgeschweißten Splice-Verbindung in Form eines Endknotens

7.5.3.2.1.2 Beschreibung der Verbindung zu anderen Funktionsbaugruppen

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

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 demnach durch die relative Erhöhung (z. B. um einen Faktor von 2 im Vergleich zum Neuzustand) des Durchgangswiderstands oder das Überschreiten eines (ebenfalls baugrößenabhängigen) absoluten Grenzwerts beschrieben werden.

7.5.3.2.1.3 Isolation/Abdichtelement

Siehe Kapitel 7.5.3.4.

7.5.3.2.2 Anforderungen bezüglich Lebenszyklus

Siehe Kapitel 7.5.3.1.2.

7.5.3.2.3 Einzuhaltende Eigenschaften

Siehe Kapitel 7.5.3.1.3.

7.5.3.2.4 Fehlermodell

Siehe Kapitel 7.5.3.1.4.

7.5.3.2.5 Ausfallrate

Siehe Kapitel 7.5.3.1.5.

7.5.3.2.6 Fehlerverteilung

Siehe Kapitel 7.5.3.1.6.

7.5.3.3 Klasse III: Kraftschlüssige und mechanische Verbindungen

Kraftschlüssige und mechanische Verbindungen wie beispielsweise mittels Crimp, werden derzeit nicht betrachtet.

7.5.3.4 Isolation/Abdichtelement

7.5.3.4.1 Beschreibung der Funktion

Splice-Verbindungen müssen aufgrund möglicher Umgebungseinflüsse geschützt werden, um die elektrischen Eigenschaften zu sichern, die mechanische Stabilität zu gewährleisten, Vibrationen am Kontaktpunkt zu dämpfen und Korrosion zu verhindern. Mögliche Einflüsse sind beispielsweise direkter Feuchtigkeitseintritt oder solcher, der durch Kapillarwirkung bedingt ist. Dieser Schutz kann sowohl im Feucht- als auch im Trockenbereich erforderlich sein. Im Feuchtbereich kommen Schrumpfschläuche mit Innenkleber zum Einsatz, während im Trockenbereich auch Schrumpfschläuche ohne Innenkleber oder vergleichbare Produkte verwendet werden können. Darüber hinaus dient das Abdichtelement als Berührschutz, Kurzschlusschutz und mechanischer Schutz für die Verbindungsstelle.

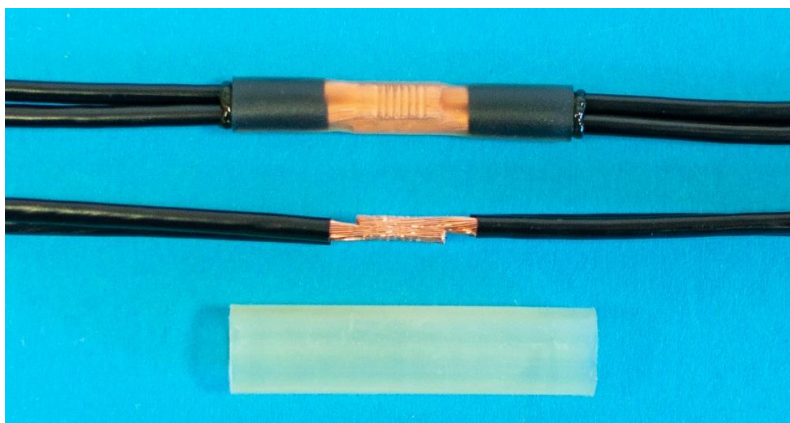


Abbildung 7-49: Schrumpfschläuche

7.5.3.4.2 Materialauswahl, Werkstoffe

Die zu verwendenden Werkstoffe für Schrumpfschläuche werden entsprechend der Dauereinsatztemperatur und Dichtigkeitsklasse ausgewählt. Dabei muss der Innenkleber sicher mit der Kabelisolierung, z. B. PVC, PE oder XLPE, verkleben.

Als Werkstoffe für Schrumpfschläuche mit Innenkleber kommen für den Mantelwerkstoff strahlenvernetzte, modifizierte Polyolefine und für den Innenkleber thermoplastische Schmelzklebstoffe zum Einsatz. Die Schrumpfschläuche werden im Co-Extrusionsprozess hergestellt, um sicherzustellen, dass der Mantelwerkstoff und der Schmelzklebwerkstoff nach der Standardverarbeitung fest miteinander verbunden bleiben.

Wird die Anzahl der anwenderspezifischen Vorgaben bei einer Spliceverbindung überschritten, muss zusätzlich Schmelzkleber in die abzudichtende Schweißstelle eingebracht werden. Dies erfolgt mit geeigneten Schmelzkleberprofilteilen, die vorzugsweise aus dem gleichen Werkstoff wie der Innenkleber der Schrumpfschläuche bestehen. Menge und Formgebung des Schmelzklebers hängen vom Querschnittsaufbau ab.

7.5.3.4.3 Lagerung

Die Anforderungen an die Lagerung beziehen sich auf den Zeitraum vor der Verarbeitung des Schrumpfschlauchs. Dabei ist das Alter der verwendeten Produkte von Bedeutung und entsprechende Lagerfristbeschränkungen müssen beachtet werden.

Es ist sicherzustellen, dass die Verpackung und Lagerung gemäß den geltenden Vorschriften der Schrumpfschlauchhersteller, Konfektionäre und OEMs ordnungsgemäß erfolgt.

7.5.3.4.4 Design

Bei der Isolierung von Splice-Verbindungen müssen bestimmte Voraussetzungen für eine zuverlässige Abdichtung und Isolation berücksichtigt werden. Dazu gehören die geeignete Auswahl des Schrumpfschlauchs mit Innenkleber, wie z. B. die Schlauchgröße, Abschnittslänge, Farbe, Temperaturklasse, Dichtigkeitsklasse sowie die Beachtung der OEM-Freigaben und gegebenenfalls der Einsatz zusätzlicher Schmelzkleberelemente.

Vorbereitung der Einzeladern

Die Abisolierlänge (B) wird applikationsspezifisch festgelegt. Diese Festlegung gilt für alle Einzelleitungen des Splices. In der folgenden Darstellung ist beispielhaft eine Abisolierlänge von 14 mm +1 definiert. Bei der weiteren Verarbeitung ist darauf zu achten, dass keine einzelnen Kupferdrähte herausstehen. Beim späteren Schrumpfen könnten diese Drähte durch den Schrumpfschlauch stechen und die Splice-Verbindung unbrauchbar machen.

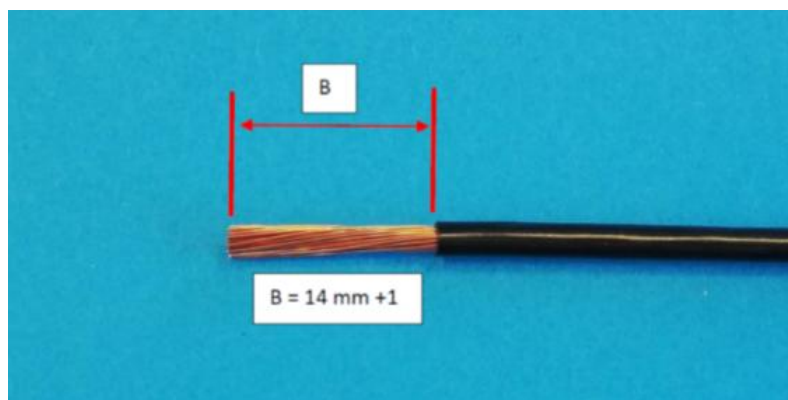


Abbildung 7-50: Länge der Abisolierung

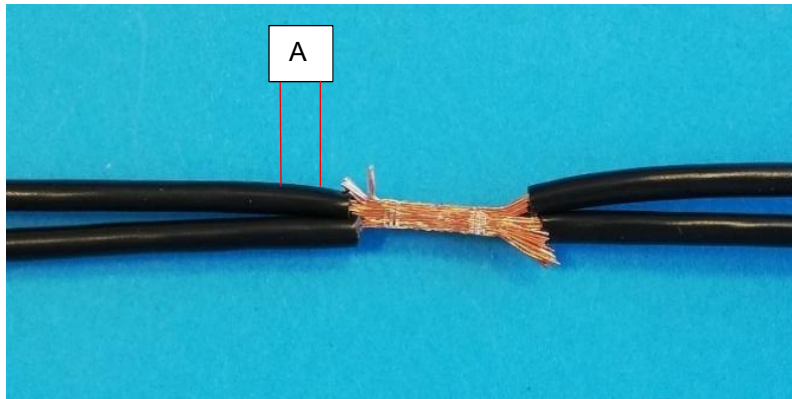


Abbildung 7-51: Abstand (A) zu gering und abstehende Einzeldrähte

7.5.3.4.5 Herstellung der Splice-Verbindung

Beim Schweißvorgang muss sichergestellt werden, dass ein freier Abstand von 3 bis 5 mm zwischen der Abisolierung und dem Schweißpunkt eingehalten wird. Dadurch kann der Kleber beim Schrumpfvorgang zwischen die Adern fließen, die Abdichtung gewährleisten und den geforderten Schutz bieten.



Abbildung 7-52: Kleberaustritt am Schrumpfschlauchende

Ein Kleberaustritt an den Schlauchenden stellt kein Qualitätskriterium für die Dichtigkeit dar (siehe Verarbeitungsanleitung der Schrumpfschlauchhersteller). Bei der Positionierung der Schlauchabschnitte muss die Verarbeitungsanleitung der Schrumpfschlauchhersteller beachtet werden. Die Länge L des Schrumpfschlau- ches mit Kleber ergibt sich aus der Länge C der Schweißstelle zuzüglich 2 x A (3-5mm) sowie 2 x D (Mini- mumüberlappung auf der Kabelisolierung von mehr als 10 mm je Seite).

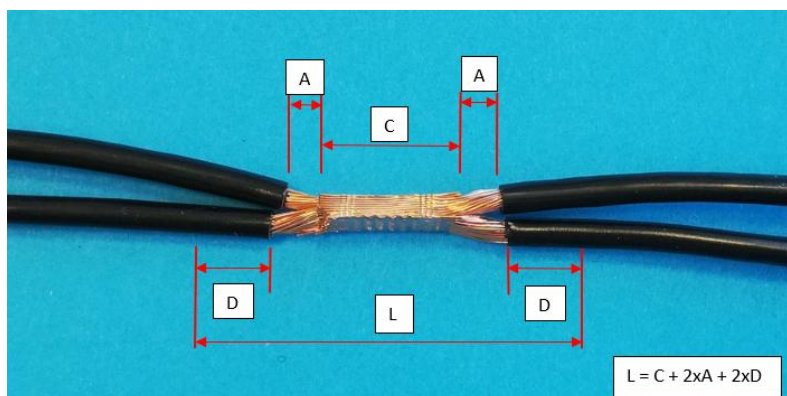


Abbildung 7-53: Länge des Schrumpfschlauchabschnitts

7.5.3.4.6 Verarbeitungsparameter

Um eine reproduzierbare Dichtigkeit zu gewährleisten, muss die Kleberschmelze eine bestimmte Temperatur erreichen. Erst bei dieser Temperatur kann die Schmelze in die Hohlräume fließen, oder der Schrumpfschlauch drückt die Schmelze in die Hohlräume.

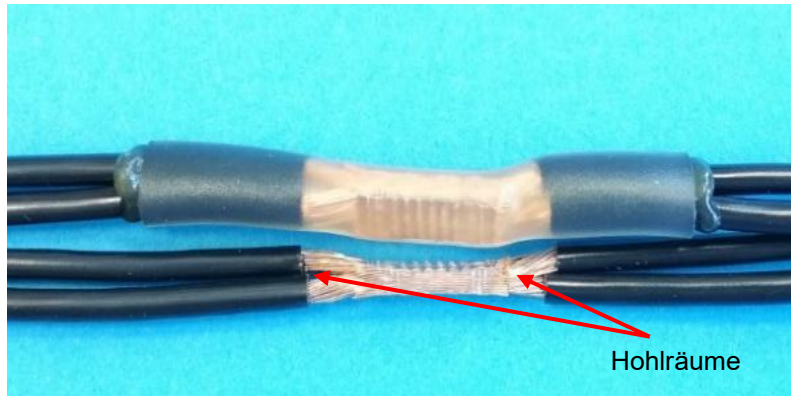


Abbildung 7-54: Hohlräume am Schrumpfschlauch

Es sind die Herstellerempfehlungen bezüglich der Schrumpfschlauchgröße, der Verarbeitungsparameter und der Dichtstellenprüfung zu beachten.

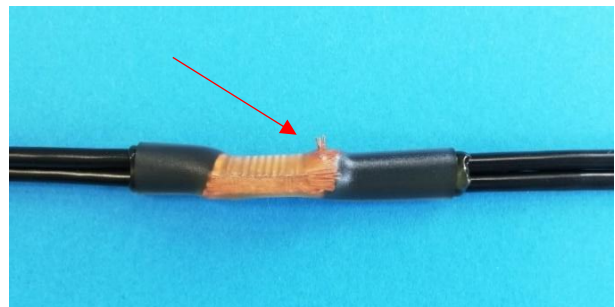
Zur Durchführung des Schrumpfprozesses sind geeignete Betriebsmittel zu verwenden, um stets reproduzierbare Ergebnisse zu gewährleisten. Die Auswahl der passenden Geräte- und Heiztechnik erfolgt in Abstimmung zwischen Kabelkonfektionär und Schrumpfschlauchhersteller.

7.5.3.4.7 Auszuschließende Fehler

Die folgenden Abbildungen zeigen typische Verarbeitungsfehler.



Schrumpfzeit zu kurz



Durchstecher



Überlappung zu kurz



Schrumpfung zu heiß oder zu lange



Zum Vergleich: Schrumpfergebnis in Ordnung

Abbildung 7-55: Fehlerbilder Schrumpfschlauch

7.5.3.4.8 Einfluss auf Ausfallrate und Ausfallarten

Der Einfluss des Schrumpfschlauchs auf die Ausfallrate wird bei der Berechnung der Funktionsbaugruppe der Splice-Verbindungen berücksichtigt. Darüber hinaus werden in den in Kapitel 7.5.3.1.5.2 beschriebenen Versuchen Splice-Verbindungen sowohl ohne als auch mit Schrumpfschlauch untersucht.

7.5.4 Tabellen und Berechnungsformeln

In folgender Tabelle 7-50 ist eine Zusammenfassung der Ausfallraten von nicht lösbaren elektrischen Verbindungen dargestellt. Typischerweise relevante Werte sind fett hervorgehoben. Für Details siehe die jeweiligen Kapitel oben.

FIT Raten für Splice gemäß FIDES mit Anpassung (untermauert durch Laborversuche + Felddaten mit 90% Konfidenz)								
FIT Raten (worst case Zugang, hier FIDES) in 1 FIT				λ_{Phys}	λ_{Gesamt}			
Dichtung	Querschnitt	Typ Schweißung	Klasse im Whitepaper	Ohne Π_{PM} , Π_{Proc} ; mit Defalut für $\Pi_{ruggedising}$	Default-Werte statt Audit	Audit bestmöglich	Audit real	Audit schlechtestmöglich
ungedichtet	klein	USS	Ib1	0,060	0,39	0,020	0,18	1,091
		WSS	IIb1	0,060	0,39	0,020	0,18	1,091
	groß	USS	Ib2	0,062	0,40	0,021	n.b.	1,117
		WSS	IIb2	0,062	0,40	0,021	n.b.	1,117
gedichtet	klein	USS	Ia1	0,032	0,20	0,011	0,094	0,579
		WSS	IIa1	0,032	0,20	0,011	0,094	0,579
	groß	USS	Ia2	nicht betrachtet (n.b.)				
		WSS	IIa2	nicht betrachtet (n.b.)				

Tabelle 7-50: Übersicht der Ausfallraten für Splice-Verbindungen

Da in den vorliegenden Ergebnissen keine Ausfälle aufgetreten sind, kann keine Verteilung der Ausfallart angegeben werden.

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 Anwendungsbeispiel

Mit den im vorliegenden Dokument dargestellten Funktionsbaugruppen lässt sich ein Bordnetz in ein Mosaik an Funktionsbaugruppen zerlegen und so auch mathematisch beschreiben. Als Hilfestellung dienen dazu die festgelegten Systemgrenzen.

Als Beispiel dient ein einfacher Stromkreis von einem Energiespeicher über zwei Stromverteiler (mit Potentialverbindungen und Sicherungen) zu einem Aggregat und weiter über die Masseanbindung wieder zum Energiespeicher. Die Leitungen werden dabei von einem Steckkontakt und Splice verlängert.

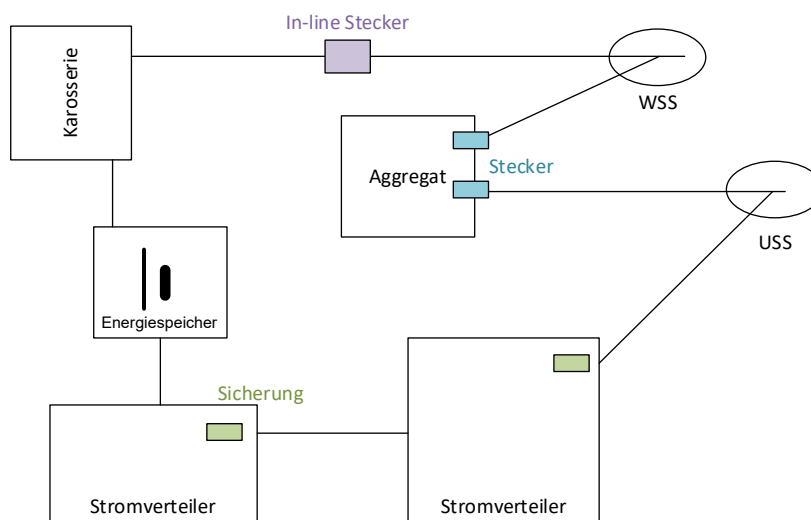


Abbildung 9-1: Strompfad im Bordnetz, schematisch

Ausgehend von dieser Darstellung einer beispielhaften, stark vereinfachten Bordnetzarchitektur mit einem Pfad (siehe Abbildung 9-1) lässt sich das Bordnetz über die dargestellten Funktionsbaugruppen, wie in Abbildung 9-2 dargestellt, beschreiben.

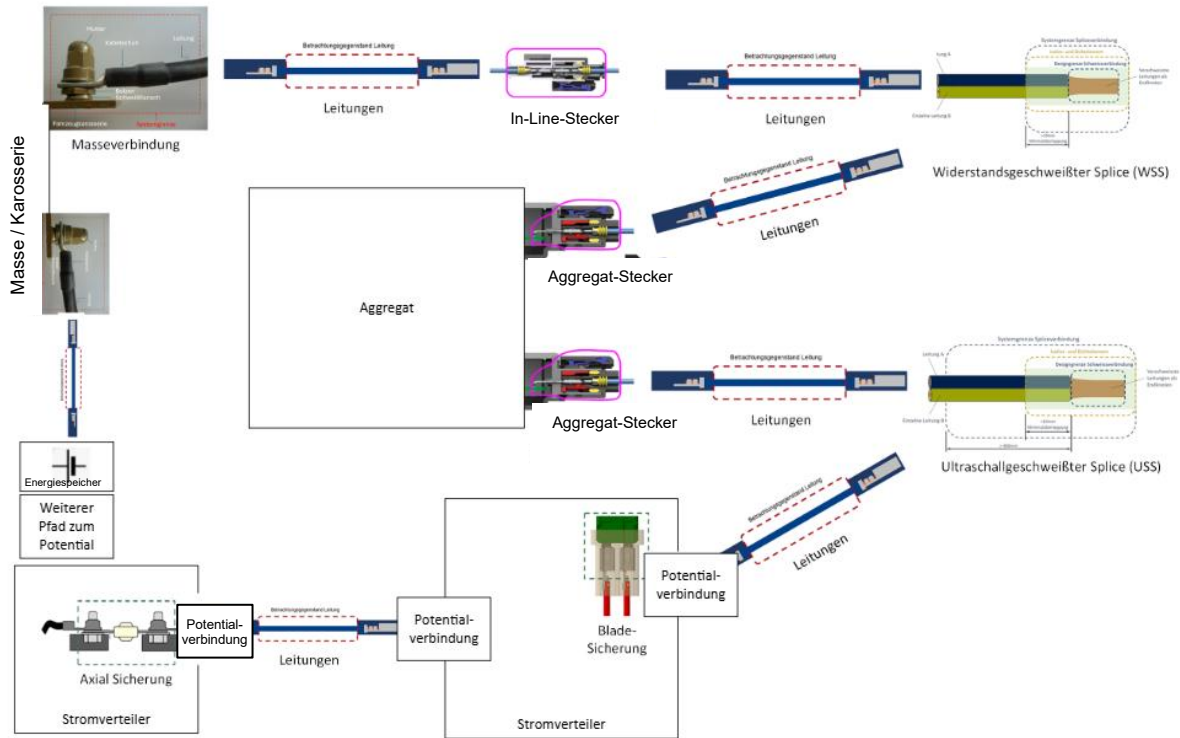


Abbildung 9-2: Anwendungsbeispiel

Zu den Funktionsbaugruppen sind im jeweils zugehörigen Kapitel dieses Leitfadens die mathematischen Beschreibungen für die Berechnung der Ausfallraten und zugehörige Fehlerverteilungen enthalten (soweit diese bereits betrachtet wurden).

10 Arbeitsgruppenmitglieder

Ansprechpartner

Matthias Mederer
Projektmanager Mobilität
Cluster Automotive Bayern
Bayern Innovativ GmbH
Am Tullnaupark 8
90402 Nürnberg
Tel.: +49 911 20671-244
matthias.mederer@bayern-innovativ.de

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

Dokumentintegration

Thomas Gabler
Kugler Maag CIE GmbH
Leibnizstr. 11
70806 Kornwestheim

Bernd Pfeufer
TÜV SÜD Auto Service GmbH
Daimlerstraße 11
85748 Garching

Die Überarbeitung und Vereinheitlichung der Formeln im Leitfaden wurde von der Firma PSS übernommen.

Bildquellen: PSS - Physical Software Solutions, KBE, Schulte & Co., Tucker, Schunk Sonosystems, Strunk Connect, KOSTAL Kontakt Systeme, TE Connectivity

Teilnehmende Unternehmen, nicht arbeitsgruppenspezifisch angeführt:

Aptiv Services Deutschland GmbH	MOLEX Deutschland GmbH
AUDI AG	Nexans autoelectric GmbH
BMW Group	One Mobility Autokabel GmbH
Coficab Deutschland GmbH	Physical Software Solutions GmbH
DRÄXLMAIER Group	Prysmian Kabel und Systeme GmbH
DSG-Canusa GmbH	Rosenberger Hochfrequenztechnik GmbH & Co. KG
FEP Fahrzeugelektrik Pirna GmbH & Co. KG	Schulte & Co. GmbH
Fujikura Automotive Europe GmbH	Schunk Sonosystems GmbH
Gebauer & Griller Kabelwerke Ges.m.b.H	Strunk Connect automated solutions GmbH & Co. KG
KBE Elektrotechnik GmbH	Sumitomo Electric Bordnetze SE
KOSTAL Kontakt Systeme GmbH	TE Connectivity Germany GmbH
Kugler Maag CIE by UL Solutions	TELSONIC AG
Lear Corporation Engineering GmbH	Tucker GmbH - STANLEY Engineered Fastening
LEONI Bordnetz-Systeme GmbH	TÜV SÜD Auto Service GmbH
LEONI Kabel GmbH	Universität der Bundeswehr München
Littelfuse Europe GmbH	VOITAS Engineering GmbH
MAGNA STEYR Fahrzeugtechnik GmbH & Co. KG	Volkswagen AG
MD ELEKTRONIK GmbH	Yazaki Systems Technologies GmbH

Anlagen

Anlage 1 Anhang für elektrische Leitungen

Wird auf zukünftige Versionen des Leitfadens zurückgestellt.

Anlage 2 Anhang für Stecksysteme

Wird auf zukünftige Versionen des Leitfadens zurückgestellt.

Anlage 3 Anhang für Sicherungen

A.3.1 Übersicht Axial-Terminal-Sicherungstypen

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









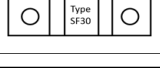
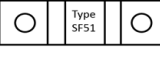
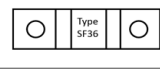
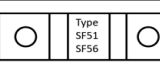


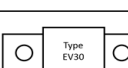
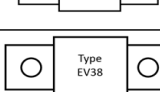
Fuse Type	Standard ISO	Terminal Size	ISO Tyoe	Picture	Fast/Slow Acting	Fuse Ratings	Max. Voltage	Max. Int. Current	Ambient Temperature	Fuse Material Plating	Fuse Material
Blade Type	8820-3 8820-10	2.8 mm	N		F	5A - 30A	32 V	1000A	-40 °C to + 125 °C -40 °C to + 105 °C	Ag Sn	Zn
			F		F	2A - 30A	32 V	1000A	-40 °C to + 125 °C -40 °C to + 105 °C	Ag Sn	Zn
		6.3 mm	C		F	1A - 40A	32 V	1000A	-40 °C to + 125 °C -40 °C to + 105 °C	Ag Sn	Zn
			L		S	20A - 60A	32 V	1000A	-40 °C to + 125 °C	Ag	Zn
		8 mm	E		S	20A - 80A	32 V	1000A	-40 °C to + 125 °C -40 °C to + 105 °C	Ag Sn	Zn
Female Contacts	8820-4	2.8 mm to 6.3 mm			S	15A - 60A	32 V	1000A	-40 °C to + 125 °C	na	Cu Alloy
		6.3 mm	A1S		S	20A - 60A	32 V	1000A	-40 °C to + 125 °C	na	Cu Alloy
		6.3 mm	A1S		S	20A - 60A	32 V	1000A	-40 °C to + 125 °C	na	Cu Alloy
Axial Terminals SF30/SF51	8820-5	M5/M6	SF30		S	30A - 200A	32 V	1000A	-40 °C to + 125 °C	Sn	Cu Alloy
		M8	SF51		S	80A - 500A	32 V	2000A	-40 °C to + 125 °C	Sn	Cu Alloy
Axial Terminals SF36/SF51/56	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
Bolt-in Contacts	8820-8 (partly)	M5	EV10		S	10A - 50A	500 V	20 kA	-40 °C to + 125 °C	Sn	Cu Alloy
		M6	EV20		S	60A - 150A	500 V	16 kA	-40 °C to + 125 °C	Sn	Cu Alloy
		M6/M8	EV30		S	150A - 250A	500 V	30 kA	-40 °C to + 125 °C	Ni	Cu Alloy
		M6/M8	EV38		S	150A - 250A	500 V	30 kA	-40 °C to + 125 °C	Ni	Cu Alloy

Tabelle A.3-1: Überblick über gängige Automobil-Sicherungen

A.3.2 Berechnungsbeispiel Sicherungen

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 sowie das Kapitel 7.3 „Passive Elektrische Sicherungen“.

Für die sinnvolle Berechnung der Ausfallrate sind Eingangsdaten notwendig, die für eine exemplarische Applikation sinnvoll sind. Neben den für den zu berechnenden 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 Beispiel wurden teilweise Default-Werte aus den FIDES-2009-Guidelines entnommen und, wenn nicht vorhanden, aus den möglichen Auswahlfeldern für die Sicherung selektiert, wie zum Beispiel $\Pi_{\text{placement}}$ mit dem Wert von 2,5.

Eingangsdaten müssen von den nachfolgenden Parteien erbracht werden:

- Sicherungshersteller
- Sicherungsbox-Hersteller (typischerweise Tier-1 Lieferant)
- OEM

Daten vom Sicherungshersteller sind:

- a) Temperaturerhöhung der Sicherung beim definierten Strom (entspricht einer klassischen Temperaturerhöhungskurve)
- b) Grenztemperatur des Bauteils, in der Regel die Temperatur des Sicherungsschmelzleiters
- c) Π_{Process} -Ergebnisse
- d) $\Pi_{\text{Parts_Manufacturing}}$ -Ergebnisse

Daten vom Sicherungsboxhersteller sind:

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

Daten vom OEM sind:

- a) Lebensdauer in Stunden für alle Modi
- b) Durchschnittliche Umgebungstemperatur in der Sicherungsbox aus den LV124-Temperaturkollektiven [17]
- c) Anzahl der Temperaturzyklen pro Tag
- d) Durchschnittliche Temperaturänderung (dT) der Umgebung in der Sicherungsbox basierend auf dem Einbauort (siehe LV124 [17])
- e) Maximale Umgebungstemperatur der Sicherungsbox aus dem Temperaturkollektiv LV124 [17]
- f) Strombelastungsdauer, Strombelastungsdauer (Peak) oder Zyklusstrom
- g) Bevorzugter Sicherungstyp
- h) Information, ob es sich um eine wechselbare Sicherung handelt, also für den Endkunden zugänglich

Weitere Parameter sind für dieses Beispiel wie folgt gewählt:

Grundformel:

$$\lambda = \lambda_{Physical} \cdot \Pi_{PM} \cdot \Pi_{Process}$$

$$\lambda_{Physical} = \lambda_0 \cdot \left(\sum \Pi_{acceleration} \right) \cdot \Pi_{induced}$$

Basiswerte:

- $\lambda_{0,Fuse} = 0,5$
- $\Pi_{acceleration}$ setzt sich zusammen aus:

$$\Pi_{acceleration} = \Pi_{Thermal} + \Pi_{TCy} + \Pi_{Mech} + \Pi_{RH} + \Pi_{Chem} + \Pi_{Puls}$$

(Die beiden neuen Stressgruppen werden hier noch nicht berücksichtigt wie im Hauptteil beschrieben.)

- $\Pi_{induced}$ wird wie folgt berechnet:

$$\Pi_{induced} = \left(\Pi_{placement} \cdot \Pi_{application} \cdot \Pi_{ruggedising} \right)^{0,511 \cdot \ln(C_{Sensitivity,Fuse})}$$

Eingesetzte Werte:

- $\Pi_{placement} = 2,5$
- $\Pi_{application} = 1,6$
- $\Pi_{ruggedising} = 1,7$
- $C_{Sensitivity,Fuse} = 5,9$

Ergebnis: $\Pi_{induced} = 5,69$

Berechnung der physikalischen Ausfallrate:

$$\lambda_{Physical} = 0,5 * 16,94 * 5,69 = 48,2$$

$$\lambda_{Physical} = 48,2$$

Prozess- und Herstellfaktoren

- $\Pi_{PM} = 0,8$
- $\Pi_{Process} = 1,8$

Endergebnis

$$\lambda = \lambda_{Physical} * \Pi_{PM} * \Pi_{Process}$$

$$\lambda = 48,2 * 0,8 * 1,8$$

$$\lambda = 69,4 \text{ FIT}$$

Berechnungsbeispiel für den Fahrbetrieb:

$\Pi_{thermoelectrical}$:

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

Die Parameter P₁ bis P₅ sind in Tabelle 7-27 beschrieben.

T_{FuseElement} ist die absolute Temperatur des Sicherungsschmelzleiters. Sie setzt sich aus folgenden Temperaturbeiträge zusammen:

- Temperaturerhöhung des Schmelzleiters durch den Applikationsstrom (vom OEM zu benennen). In diesem Beispiel wird die 100A-Sicherung mit 50A betrieben und erwärmt sich dabei um 30 K. Zusätzlich wird ein Sicherheitsfaktor von 20 Prozent berücksichtigt, wie er üblicherweise im Derating-Standard angewendet wird.
- Zusätzliche Temperaturerhöhung durch Erwärmung der Sicherungsbox, welche aus der Eigenerwärmung der Box kommt, hier mit 20 K.
(Hinweis: Die im Temperaturkollektiv angegebenen Temperaturen enthalten schon den Temperaturhub des Innenraums und werden daher nicht berücksichtigt.)
- Durchschnittliche Umgebungstemperatur aus dem OEM-Temperaturkollektiv, hier Innenraum T1 mit 35°C.

Temperature Distribution Profiles				
Distribution [%]	T1	T2	T3	T4
	Temperature [°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
Average Values	35	43,75	54,85	69,65

Tabelle A.3-2: Beispiel Temperaturkollektiv Innenraum

Berechnung der Schmelzleitertemperatur

$$T_{FuseElement} = 30 \text{ K} \times 1,2 + 20 \text{ K} + 35^\circ\text{C}$$

$$T_{FuseElement} = 91^\circ\text{C}$$

Berechnung von $\Pi_{thermoelectrical}$

$$\Pi_{thermoelectrical} = 0,13 \cdot 1 \cdot e^{11604K/EV \cdot 0,9eV \cdot \left[\frac{1}{80^\circ\text{C} + 273K} - \frac{1}{(91^\circ\text{C} + 273K)} \right]}$$

$$\Pi_{thermoelectrical} = 0,318$$

Berechnung von Π_{TCy}

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

Die Parameter P₆ bis P₁₀ sind in Tabelle 7-28 beschrieben.

$\Delta T_{cycling}$ (Average dT ambient temperature rise [K]) ist die typische Delta-Durchschnittstemperaturerhöhung am Einbauort der Sicherung im Fahrzeug (gemäß OEM-Spezifikationen). Sie setzt sich aus folgenden Temperaturanteilen zusammen:

- a) Eigenerwärmung im Fahrzeug, hier im Beispiel die Innenraumtemperaturerhöhung von 36 K
- b) Zusätzliche Eigenerwärmung innerhalb der Sicherungsbox, hier 20 K

Temperature Collecitve for different installation locations		
Installation Locations	Profile No.	Temperature swing delta in [K]
Interior, without special requirement	1	36
Body-mounted part, without special requirement	1	36
Interior exposed to solar ratiation	2	46
Body-mounted part, roof	2	46
Engine compartment, but not on the engine	3	60
On the radiator	3	60
Engine-mounted parts	4	75
Gearbox-mounted parts	4	75

Tabelle A.3-3: Temperaturkollektive für unterschiedliche Lagen

Berechnung der Gesamt-Temperaturerhöhung

36 K + 20 K

$$\Delta T_{cycling} = 56 \text{ K}$$

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

- a) maximale Umgebungstemperatur der Box, typischerweise aus dem Temperaturkollektiv zu wählen, in diesem Beispiel 105°C.
- b) Eigenerwärmung innerhalb der Box mit 20 K

Damit ergibt sich ein maximaler Umgebungswert von:

$$105^\circ\text{C} + 20 \text{ K} = 125^\circ\text{C}$$

Weitere Festlegungen sind:

- Nannual-cy = Zyklusanzahl pro Jahr als Produkt aus Jahrestagen und Zyklen pro Tag, hier 365 d * 2 Zyklen = **730**
- tannual = Stunden im Jahr, hier 24 h x 365 d = **8760**
- $\min(\theta_{cy,2})$ = Stunden pro Tag geteilt durch Zyklen pro Tag, in diesem Beispiel 1,5 h/d und 3 cy/d = **0,73**
- $T_{max-cycling}$ = maximale Umgebungstemperatur der Box, hier **125°C**
- $dT_{cycling}$ = durchschnittliche Temperaturerhöhung als Summe aus dem Temperaturhub $T_2 = 36 \text{ K}$ und der zusätzlichen Temperaturerhöhung von 20 K, also 36 K + 20 K = **56 K**

$$\Pi_{TCy} = 0,51 \cdot \left(\frac{12 \cdot 365d \cdot 2cy}{24h \cdot 365d} \right) \cdot \left(\frac{0,73}{2} \right)^{0,33} \cdot \left(\frac{56K}{20K} \right)^{2,7} \cdot e^{1414 \cdot \left[\frac{1}{(273K+20K+20K)} - \frac{1}{(125^\circ\text{C}+273)} \right]}$$

$$\Pi_{TCy} = 15,42$$

Berechnung von $\Pi_{Mechanical}$

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

Die Parameter P_{11} bis P_{13} sind in Tabelle 7-29 beschrieben.

Für das Berechnungsbeispiel wurde ein Vibrations-Rauschprofil an der Sicherung mit einem Wert von **3,5 g RMS** verwendet.

$$\Pi_{Mech} = 0,06 \cdot \left(\frac{3,5}{0,5}\right)^{1,5} =$$

$$\Pi_{Mech} = 1,11$$

Berechnung von Π_{RH}

Die relative Feuchtebelastung wird mit folgender Formel berechnet:

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

(Die Parameter P_{14} bis P_{17} sind in Tabelle 7-29 beschrieben)

Da in diesem Beispiel für alle Stressgruppen der Fahrmodus betrachtet wird, wird das Gesamtergebnis für diese Stressgruppe gemäß FIDES mit 0 angesetzt.

Im FIDES Guide ist hierzu angegeben:

In an operating phase: $\Pi_{RH} = 0$.

$$\Pi_{RH} = 0$$

Berechnung von Π_{Chem}

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

Für dieses Beispiel gelten folgende Bewertungen:

- $\Pi_{sal} = Low = 1$
- $\Pi_{prot} = Moderate = 1,5$
- $\Pi_{zone} = Low = 1$
- $\Pi_{envir} = Non Hermetic = 1$
- $P_{18} = 0,06$

Der Parameter P_{18} ist in Tabelle 7-29 beschrieben.

$$\Pi_{Chem} = 0,06 \times 1 \times 1,5 \times 1 \times 1$$

$$\Pi_{Chem} = 0,09$$

Anlage 4 Anhang für Schraubverbindungen

A.4.1 Analyse der Fehlermodelle

Die Expertengruppe hat für die Schraubverbindung ein allgemein gültiges qualitatives Fehlermodell erstellt. Die unterschiedlichen Ausfallarten sind den folgenden Tabellen zu entnehmen. Auf dieser Basis sind die Betrachtungen zu den Ausfällen durchgeführt worden. Die Reihenfolge der Auflistung entspricht keiner Wertung.

Ausfallart	Ursache(n)	Physics of Failure
Unterbrechung (open) Detailliert: Kein Stromfluss	<ul style="list-style-type: none"> • Kontaktbruch zwischen Leitung und Kabelschuh 	<ul style="list-style-type: none"> • Mechanische Belastung zu hoch <ul style="list-style-type: none"> – Last ist zu hoch (Leitungsabfangung, Steifigkeit, etc.) – Dimensionierung fehlerhaft bzw. nicht optimal – Nicht erwartete Belastung • Korrosion • Thermische Belastung zu „extrem“ (zu hoch, schwankend, etc.) • Spezifikationsfehler • Verarbeitungsfehler in der Verbindungstechnik
	<ul style="list-style-type: none"> • Kontaktbruch zwischen Bolzen und Kabelschuh 	<ul style="list-style-type: none"> • Anschraubmoment/Klemmkraft zu hoch • Korrosion • Mechanische Belastung zu hoch <ul style="list-style-type: none"> – Last ist zu hoch (Leitungsabfangung, Steifigkeit, etc.) – Dimensionierung fehlerhaft bzw. nicht optimal – Nicht erwartete Belastung – Schwingbelastung • Thermische Belastung zu „extrem“ (zu hoch, schwankend, etc.) • Spezifikationsfehler
	<ul style="list-style-type: none"> • Kontaktbruch zwischen Karosserie und Bolzen 	<ul style="list-style-type: none"> • Anschraubmoment zu hoch • Korrosion • Mechanische Belastung zu hoch <ul style="list-style-type: none"> – Schwingbelastung (Materialermüdung) – Dimensionierung der Schweißstelle fehlerhaft (zu klein oder zu groß) • Spezifikationsfehler • Montagefehler (falsche Doku, falscher Einbau, falsches Werkzeug, etc.) • Thermische Belastung zu „extrem“ (zu hoch, schwankend, etc.)
Intermittierend (Intermittent) Detailliert: Zufälliger Spannungseinbruch und Unterbrechung des Stromflusses	<ul style="list-style-type: none"> • Kontaktbruch zwischen Leitung und Kabelschuh, welcher aufgrund äußerer Effekte wieder zu einem Kontakt führt. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mechanische Belastung zu hoch <ul style="list-style-type: none"> – Last ist zu hoch (Leitungsabfangung, Steifigkeit, etc.) – Dimensionierung fehlerhaft bzw. nicht optimal – Nicht erwartete Belastung • Korrosion • Thermische Belastung zu „extrem“ (zu hoch, schwankend, etc.) • Spezifikationsfehler • Verarbeitungsfehler in der Verbindungstechnik
	<ul style="list-style-type: none"> • Kontaktbruch zwischen Bolzen und Kontakt, welcher aufgrund äußerer Effekte wieder zu einem Kontakt führt. 	<ul style="list-style-type: none"> • Anschraubmoment/Klemmkraft zu hoch • Korrosion • Mechanische Belastung zu hoch <ul style="list-style-type: none"> – Last ist zu hoch (Leitungsabfangung, Steifigkeit, etc.) – Dimensionierung fehlerhaft bzw. nicht optimal – Nicht erwartete Belastung – Schwingbelastung • Thermische Belastung zu „extrem“ (zu hoch, schwankend, etc.) • Spezifikationsfehler

	<ul style="list-style-type: none"> • Kontaktbruch zwischen Karosserie und Bolzen, welcher aufgrund äußerer Effekte wieder zu einem Kontakt führt. 	<ul style="list-style-type: none"> • Anschraubmoment zu hoch • Korrosion • Mechanische Belastung zu hoch <ul style="list-style-type: none"> – Schwingbelastung (Materialermüdung) – Dimensionierung der Schweißstelle fehlerhaft (zu klein oder zu groß) • Spezifikationsfehler • Montagefehler (falsche Doku, falscher Einbau, falsches Werkzeug, etc.) • Thermische Belastung zu „extrem“ (zu hoch, schwankend, etc.)
	<ul style="list-style-type: none"> • Mutter hat sich gelöst (Änderung der Klemmkraft) 	<ul style="list-style-type: none"> • Werkzeug- und Montagefehler • Veränderung der Reibeigenschaften von Bolzen, Mutter und Kabelschuh • Spezifikationsfehler • Unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten
<p>Widerstandserhöhung (Increased)</p> <p>Detailliert: Stromfluss findet statt, jedoch ist eine Unterversorgung an dem Verbraucher zu erwarten.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Kraftabbau, erst beim Unterschreiten einer bestimmten Klemmkraft findet eine deutliche Widerstandserhöhung statt 	<ul style="list-style-type: none"> • Relaxation des Bolzens (Klemmkraft und Anzugsmoment sind linear verknüpft) • Vibration + Bewegung an der Leitung mit Folge Lösen der Verbindung • Widerstands - Erhöhung (Enge Widerstand) durch Reduzierung der Strompfade/Kontaktpunkte (thermisch) • thermisch durch unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten der Materialien verursachtes Lösen der Verbindung (• Der Reibwert der Paarung zwischen Mutter und Gewindebolzen kann zu klein sein (Reibkoeffizient kleiner als ca. 0,1 bis 0,18) à Gewindereibung • Der Reibwert zwischen Mutter und Kabelschuh zu gering à Kopfreibung • Bei sinkender Gesamtreibung und zu niedriger Klemmkraft wird ein Selbstlösen erreicht.
	<ul style="list-style-type: none"> • Interdiffusion (chemischer Prozess zwischen Kabelschuh, Leitung und Bolzen) 	<ul style="list-style-type: none"> • Widerstandserhöhung durch Diffusionszone (thermisch, Dauertemperatur ca. ab 150° dominant)
	<ul style="list-style-type: none"> • Chemische Reaktionen (als Folge des Kraftabbaus) 	<ul style="list-style-type: none"> • Eindringen von Medien und/oder Sauerstoff zwischen den Kontaktpartnern • Widerstandserhöhung an Kontaktfläche durch Korrosion/Oxydation (chemisch)
	<ul style="list-style-type: none"> • Reibverschleiß (als Folge des Kraftabbaus) 	<ul style="list-style-type: none"> • Relativbewegung zwischen den Kontaktpartnern: Kommt durch Vibration und Bewegung an der Leitung und thermisch durch unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten der Materialien • Fretting durch Relativbewegungen • Durch Fretting werden die Kontaktschichten (Oberflächen) abgetragen → Widerstandserhöhung
	<ul style="list-style-type: none"> • Elektromigration 	<ul style="list-style-type: none"> • Durch hohen Stromdichte angeregte Materialwanderungen führt zu Mischzonen, welche eine andere Leitfähigkeit besitzen. Deswegen wird sich der Leitwiderstand erhöhen. Relevant in folgenden Größenordnungen: Alu 500 kA/cm² Cu 2.500 kA/cm²
<p>Short (Kurzschluss)</p> <p>Detailliert: Es wird ein anderes Spannungspotential durch den Leitungsanteil kontaktiert. Hinweis: Auf oberer Ebene kann das bedeuten:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Spannung am Verbraucher sinkt leicht ab (Delta U ist klein) 	<ul style="list-style-type: none"> • Fehler an Isolation Leitung → Isolationswiderstand zu gering 	<ul style="list-style-type: none"> • Mechanische Druck- und Vibrationsbelastung • Thermische Überlast in Kombination mit mechanischem Druck • Aufnahme von Feuchtigkeit
	<ul style="list-style-type: none"> • Fehler an Isolation Schrumpfschlauch → Isolationswiderstand zu gering 	<ul style="list-style-type: none"> • Chemische Reaktionen (Oxidation) • Verhärtung, Versprödung • Diffusion • Zustandsänderung (Schmelzen) • Abrasion
<p>An einer beliebigen Stelle entsteht ein Bruch oder Abriss und dadurch ein Kontakt mit einem anderen metallischen Bauteil (evtl. auch Abbruch des Bolzens)</p>		

<ul style="list-style-type: none"> Spannung am Verbraucher sinkt stark ab (Delta U ist groß) Auftreten von Lichtbögen bei sehr hoher Spannungsdifferenz an der Fehlstelle 	<ul style="list-style-type: none"> Kontaktbruch (zwischen Leitung und Bolzen) 	<ul style="list-style-type: none"> Mechanische Belastung zu hoch <ul style="list-style-type: none"> Last ist zu hoch (Leistungsabfangung, Steifigkeit, etc.) Dimensionierung fehlerhaft bzw. nicht optimal Nicht erwartete Belastung Korrosion Thermische Belastung zu „extrem“ (zu hoch, schwankend, etc.) Spezifikationsfehler
	<ul style="list-style-type: none"> Kontaktbruch (zwischen Bolzen und Kontakt) 	<ul style="list-style-type: none"> Anschraubmoment/Klemmkraft zu hoch Korrosion Mechanische Belastung zu hoch <ul style="list-style-type: none"> Last ist zu hoch (Leistungsabfangung, Steifigkeit, etc.) Dimensionierung fehlerhaft bzw. nicht optimal Nicht erwartete Belastung Schwingbelastung Thermische Belastung zu „extrem“ (zu hoch, schwankend, etc.) Spezifikationsfehler
	<ul style="list-style-type: none"> Kontaktbruch (zwischen Karosserie und Bolzen) 	<ul style="list-style-type: none"> Aufschaubmoment zu hoch Korrosion Mechanische Belastung zu hoch <ul style="list-style-type: none"> Schwingbelastung (Materialermüdung) Dimensionierung der Schweißstelle fehlerhaft (zu klein oder zu groß) Spezifikationsfehler Montagefehler (falsche Doku, falscher Einbau, falsches Werkzeug, etc.) Thermische Belastung zu „extrem“ (zu hoch, schwankend, etc.)
	<ul style="list-style-type: none"> Leitungsabriss 	<ul style="list-style-type: none"> Mechanische Belastung zu hoch <ul style="list-style-type: none"> Last ist zu hoch (Leistungsabfangung, Steifigkeit, etc.) Dimensionierung fehlerhaft bzw. nicht optimal Nicht erwartete Belastung Korrosion Thermische Belastung zu „extrem“ (zu hoch, schwankend, etc.) Spezifikationsfehler Verarbeitungsfehler in der Verbindungstechnik <ul style="list-style-type: none"> (Lötzinn zu tief in Leitung → Steifigkeit und Riss) Schrumpfschlauch Isocrimp

Tabelle A.4-1: Funktions- und Fehlermodelle für Schraubverbindungen

A.4.2 Ausfallrate einer Masseverbindung

A.4.2.1 Beispiel: Ausfallrate einer Masseverbindung

Um eine einfache Handhabung für möglichst viele Masseverbindungen zu ermöglichen, wird eine geeignete Referenz definiert. Diese Referenz-Masseverbindung stellt einen charakteristischen Vertreter für die entsprechende „Item Family“ dar. Für bestimmte Merkmale (Attribute) bzw. Parameter kann innerhalb der „Item Family“ davon ausgegangen werden, dass die Zuverlässigkeits-Erwartungswerte ähnlicher Varianten jenen der Referenz-Masseverbindung entsprechen.

Die Merkmale der Referenz-Masseverbindung und deren Verwendung sind wie folgt definiert:

- Flansch- und Hutmuttern
- Rohrkabelschuhe
- Kabelschuh an Kupferleitung, gecrimpt und nachgelötet
- Funktion: Masseverbindung für Energieversorgung, prinzipiell lösbar
- Einbauort: Alle Bauräume bis auf Motor/Getriebe, d.h. $\Pi_{\text{induced}} = 5.23$
- Elektrische Belastung bis 10 A, entsprechend den durchgeführten Tests
- Zufällige Vibrationen mit spektraler Beschleunigungsdichte bis $G_{\text{RMS}} = 3,1 \text{ g}^2/\text{Hz}$
- Betriebsprofil bei 25°C gemäß Tabelle 6-1

A.4.2.2 Vorgehen gemäß FIDES mit Anpassungen durch Tests

Die Ausfallraten aus den Versuchen ergeben eine physikalische Ausfallrate. Allerdings wurde die Anzahl der Baukomponenten-Stunden für eine Konfidenz von 90 % als zu gering eingeschätzt:

$$\lambda_{\text{Phys}} = 0,13 \text{ FIT}$$

Für Π_{Proc} , Π_{PM} und $\Pi_{\text{ruggedising}}$ können vorerst die Default-Werte aus dem FIDES Guide [5] verwendet werden:

$$\Pi_{\text{Proc}} = 4,0$$

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

$$\Pi_{\text{ruggedising}} = 1.7 \text{ (fließt in } \Pi_{\text{induced}} \text{ und damit in } \lambda_{\text{Phys}} \text{ ein)}$$

Zukünftig könnte eine Präzisierung durch Auditierungen erfolgen, wodurch die FIT-Rate möglicherweise verbessert werden könnte.

Insgesamt ergibt sich aus

$$\lambda_{\text{gesamt}} = \lambda_{\text{Phys}} \cdot \Pi_{\text{Proc}} \cdot \Pi_{\text{PM}}$$

als erster Wert:

$$\lambda_{\text{gesamt}} = 0,84 \text{ FIT}$$

(Je nach Audit (Best-Case bzw. Worst-Case) kann sich ein Wert zwischen 0,066 FIT und 2,11 FIT ergeben.)

Dies stimmt mit der Expertenschätzung überein, dass die FIT-Rate einer Schraubverbindung unter der einer Steckverbindung liegt.

A.4.2.3 Vorgehen mithilfe von Felddaten

Für das gesamte System bestehend aus Massebolzen, Schraubverbindung und Kabelschuh (wie oben definiert) wurden Felddaten analysiert. Eine allgemeine Vorgehensweise ist in Kapitel 6.2 beschrieben.

Die Auswertungskennzahlen aus den Felddaten wurden für einen Zeitraum von sechs Jahren zur Verfügung gestellt. Aus den betrachteten Felddaten und den zugrunde gelegten Annahmen wurden folgende Werte abgeleitet:

- Jährlich produzierte Massebolzen in West- und Mitteleuropa über einen Zeitraum von vier Jahren, umgerechnet auf den Garantiezeitraum von drei Jahren.
- Etwa 15-20 Massebolzen pro Fahrzeug.
- Reklamationen: Unberechtigt und berechtigt (innerhalb des betrachteten 6 Jahreszeitraums).

Annahmen:

- Der betrachtete Zeitraum mit einer vollständigen Anzahl an Komponenten- Massebolzen unter Garantie (Garantiezeitraum 3 Jahre) erstreckt sich über vier Jahre.
- Ein produzierter Massebolzen entspricht einer verbauten Masseverbindung, wobei eine Schätzung der Dunkelziffer berücksichtigt wird.
- Eine nicht zu vernachlässigende Dunkelziffer im Garantiezeitraum muss ebenfalls angenommen werden. Es wird vermutet, dass nicht alle produzierten bzw. ausgelieferten Massebolzen verbaut wurden. Ebenso dürften nicht alle Reklamationen gemeldet worden sein.
- Das typische Betriebsprofil gemäß FIDES für Pkw im Privatgebrauch ohne Ladefunktion in Mitteleuropa (25°C) (siehe Tabelle 6-1).
- Etwa 95 % der Fahrzeuge haben ein typisches Betriebsprofil, davon sind ca. 50 % in Mitteleuropa im Einsatz.
- Konfidenzniveau von $v = 90\%$.

Aus den Felddaten für die gesamte Massenverbindung bei einem zufälligen Fehler ergibt sich:

$$\lambda_{\text{Phys}} = 0,086 \text{ FIT}$$

$$\lambda_{\text{gesamt}} = 0,65 \text{ FIT}$$

Diese Werte stimmen gut mit der mittels FIDES (inklusive Testanpassungen) ermittelten FIT-Rate von $\lambda_{\text{gesamt}} = 0,84 \text{ FIT}$ überein. Um auf der sicheren Seite zu bleiben, wird vorerst der höhere Wert verwendet.

Anlage 5 Anhang für nicht lösbare elektrische Verbindungen

A.5.1 Ausfallrate für eine Referenz-Splice-Kombination mit kleinem Querschnitt

Um eine Übertragung auf möglichst viele Splice-Varianten zu ermöglichen, wird eine Referenz definiert. Dieser Referenz-Splice ist ein charakteristischer Vertreter einer Klasse (siehe Kapitel 7.5). Für bestimmte Merkmale (Attribute) bzw. Parameter kann innerhalb dieser Klasse (vgl. folgende Aufzählung) angenommen werden, dass die Erwartungswerte für die Zuverlässigkeit ähnlicher Splice-Knoten der Zuverlässigkeit des Referenz-Splices entsprechen.

Die Merkmale für den Referenz-Splice und dessen Verwendung sind wie folgt 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 Ausfallratenberechnung nicht relevant)
- Funktion: Energieversorgung
- Einbauort: alle Bauräume außer Motorblock und Getriebe
- Elektrische Belastung bis 5 A
- Betriebsprofil, bei 25°C gemäß Tabelle 6-1

A.5.1.1 Beispiel: Ausfallrate für USS mit kleinem Querschnitt

Für ein typisches Betriebsprofil (bei 25°C gemäß Tabelle 6-1) ergibt sich mit FIDES für den Referenz-Splice der Unterklasse Ib1 ein physikalischer Anteil λ_{Phys} der Ausfallrate im Intervall 0,040 FIT bis 0,068 FIT. Hierbei fließt ein Audit zu $\Pi_{\text{ruggedising}}$ gemäß der Formel in Abbildung 6-1 näherungsweise multiplikativ ein.

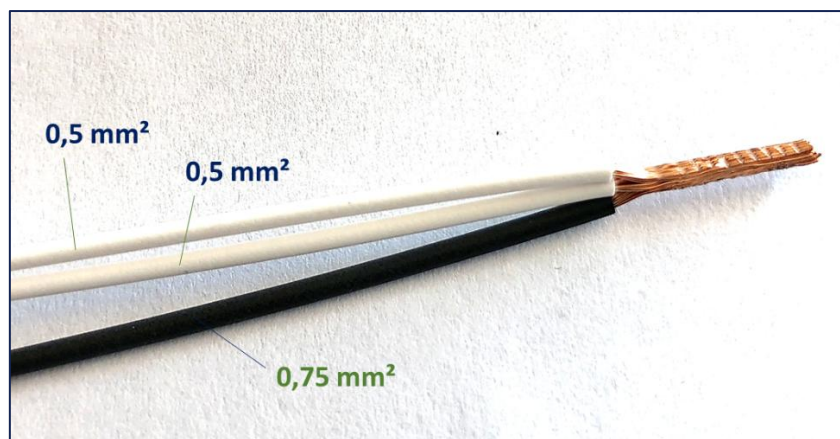


Abbildung A.5-1: Darstellung Referenz-Splice (ultraschallgeschweißt), dargestellt ohne Isolationskappe

Bei Berechnung mit dem Default-Wert nach FIDES Guide [5] für $\Pi_{\text{ruggedising}} = 1,7$ ergibt sich:

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

und unter Verwendung der Default-Werte für Π_{PM} und Π_{Proc} gemäß FIDES Guide [5]:

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

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.

Für den spezifischen Referenz-Splice ergibt sich:

$$\lambda_{\text{Phys}} = 0,050 \text{ FIT (mit auditiertem } \Pi_{\text{ruggedising}})$$

und

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

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 Ib1).

Für einen gedichteten ultraschallgeschweißten Splice mit Schrumpfschlauch (Klasse Ia1) ergeben sich gemäß der Anpassung des FIDES (siehe Kapitel 7.5.3.1.5) 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 $\Pi_{\text{ruggedising}}$, Π_{PM} und Π_{Proc} ergibt sich:

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

und

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

Unter Einbeziehung von Audits sind beispielsweise folgende FIT-Raten und besser möglich:

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

und

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

Hinweis: Das gilt unter zusätzlichen Annahmen für das Schrumpfschlauch-Verarbeitungsgerät.

A.5.1.2 Beispiel: Ausfallrate für WSS mit kleinem Querschnitt

Für ein typisches Betriebsprofil (bei 25°C gemäß Tabelle 6-1) wird mit FIDES für den Referenz-Splice der physikalische Anteil λ_{Phys} der Ausfallrate auf ein Intervall von 0,040 FIT bis 0,068 FIT bestimmt. In dieser Berechnung wird der Default-Wert für $\Pi_{\text{ruggedising}}$ (Einfluss von Zuverlässigkeits- und Robustheitsüberlegungen auf das Design) gemäß der Formel in Abbildung 6-1 multiplikativ berücksichtigt.

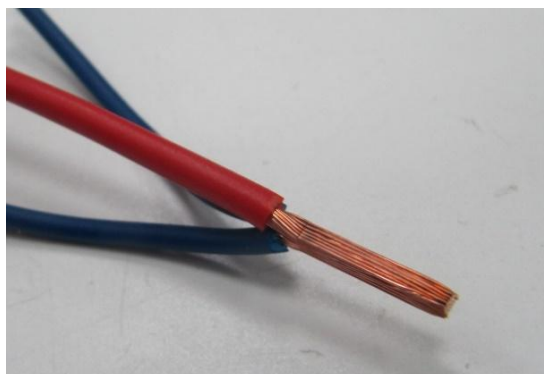


Abbildung A.5-2: Darstellung Referenz-Splice (widerstandsgeschweißt), dargestellt ohne Isolationskappe

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 Guide [5] für $\Pi_{\text{ruggedising}} = 1,7$ ergibt sich

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

Unter der Verwendung der Default-Werte für Π_{PM} und Π_{Proc} gemäß FIDES Guide [5] ergibt sich:

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

Für den spezifischen Referenz-Splice ergibt sich:

$$\lambda_{\text{Phys}} = 0,050 \text{ FIT (mit auditiertem } \Pi_{\text{ruggedising}})$$

und

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

Die zuvor genannten Ausfallraten beziehen sich auf einen ungedichteten widerstandsgeschweißten Splice (Klasse IIb).

Für einen widerstandsgeschweißten Splice, gedichtet mit Schrumpfschlauch (Klasse IIa1), ergeben sich gemäß der Anpassung des FIDES Guide [5] (siehe Kapitel 7.5.3.1.5) 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 folgende FIT-Raten und besser möglich:

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

und

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

Hinweis: Das gilt unter zusätzlichen Annahmen für das Schrumpfschlauch-Verarbeitungsgerät.

A.5.2 Ausfallrate für eine Referenz-Splice-Kombination mit großem Querschnitt

Wie bereits bei den kleinen Querschnitten beschrieben, wird auch für große Querschnitte ein Referenz-Splice definiert. Für bestimmte Merkmale (Attribute) bzw. Parameter kann innerhalb einer Unterklasse (vgl. folgende Aufzählung) angenommen werden, dass die Erwartungswerte der Zuverlässigkeit ähnlicher Splice-Varianten der Zuverlässigkeit des Referenz-Splices entsprechen.

Die Merkmale für den Referenz-Splice (siehe Abbildung A.5-3) und dessen Verwendung sind wie folgt definiert:

- Durchgangsknoten
- Verbindung von Cu-Leitern zu Cu-Leitern
- Leitungen: 1x 35mm² und 2x 10mm² (1x FLRY 35/T105, 2x FLRY 10/T105)
- Isolation durch Tape (eine genauere Spezifikation des Materials und der Geometrie ist gemäß FIDES für die Ausfallratenberechnung nicht relevant)
- Funktion: Energieversorgung (12 V)
- Einbauort: alle Bauräume außer Motorblock und Getriebe
- Elektrische Belastung bis 110 A (ca. 70% von 160 A max.)
- Zufällige Vibrationen mit spektraler Beschleunigungsdichte bis $G_{RMS} = 3,1 \text{ g}^2/\text{Hz}$
- Betriebsprofil bei 25°C gemäß Tabelle 6-1
- Der Splice wird ein- oder zweistufig geschweißt

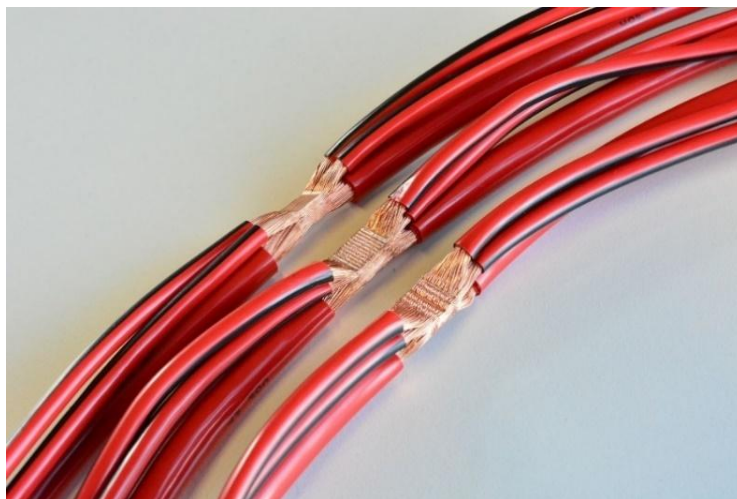


Abbildung A.5-3: Darstellung Referenz-Splice 1x 35 -2x 10 (2 ultraschallgeschweißte, 1 widerstandsgeschweißter Splice; dargestellt ohne Tape)

Im Vergleich zum Referenz-Splice kleiner Querschnitte wird hier anstelle einer Isolationskappe ein Tape verwendet. Aufgrund der größeren Leiterquerschnitte ist die maximale elektrische Belastbarkeit entsprechend höher. Für Anwendungen mit großen Querschnitten sind daher angepasste Referenz-Automaten zu verwenden.

Durch präzise Anpassung der Schweißparameter wird sichergestellt, dass auch bei großen Querschnitten mit entsprechend größeren Kontaktflächen eine hochwertige stoffschlüssige Verbindung entsteht. Es wird vorausgesetzt, dass die in Kapitel 7.5.3 beschriebenen Best-Practice-Vorgaben berücksichtigt werden.

In der theoretischen Ausfallratenberechnung ergeben sich für große Querschnitte insbesondere aufgrund thermo-elektrischer Effekte abweichende Werte, die zu einer numerischen Erhöhung im Bereich der Nachkommastellen führen können.

Bei der Auditierung von Prozessen ist zu berücksichtigen, dass audit-spezifische, maschinenbezogene Fragen für Unterklassen kleiner und großer Querschnitte separat bewertet werden müssen. Für die Unterklassen 1 und 2 werden aus technischen Gründen unterschiedliche Schweißautomaten als Referenz herangezogen.

A.5.2.1 Beispiel: Ausfallrate für einen USS mit großem Querschnitt

Für ein typisches Betriebsprofil (bei 25°C gemäß Tabelle 6-1) wird mit der FIDES für den Referenzsplice der Unterklasse Ib2 als physikalischer Anteil λ_{Phys} der Ausfallrate ein Intervall von 0,041 FIT bis 0,070 FIT berechnet. Dabei fließt auch ein Audit zu $\Pi_{\text{ruggedising}}$ ein, wodurch dieses Intervall zustande kommt.

Für $\lambda_{\text{(gesamt)}}$ ergibt sich mit den Wertebereichen für Π_{PM} und Π_{Proc} aus λ_{Phys} ein Intervall von 0,021 FIT bis 1,117 FIT.

Bei Berechnung mit dem Default-Wert nach FIDES Guide [5] für $\Pi_{\text{ruggedising}} = 1,7$ ergibt sich:

$$\lambda_{\text{Phys}} = 0,062 \text{ FIT}$$

Unter der Verwendung der Default-Werte für Π_{PM} und Π_{Proc} gemäß FIDES Guide [5] ergibt sich:

$$\lambda_{\text{(gesamt)}} = 0,40 \text{ FIT.}$$

Die zuvor genannten Ausfallraten beziehen sich auf einen ungedichteten ultraschallgeschweißten Splice mit großem Querschnitt (Unterklasse Ib2).

A.5.2.2 Beispiel: Ausfallrate für einen WSS mit großem Querschnitt

Für ein typisches Betriebsprofil (bei 25°C gemäß Tabelle 6-1) wird mit der FIDES für den Referenzsplice der Unterklasse Ib2 der physikalischer Anteil λ_{Phys} der Ausfallrate auf ein Intervall von 0,041 FIT bis 0,070 FIT bestimmt. In diese Berechnung fließt auch ein Audit zu $\Pi_{\text{ruggedising}}$ ein, wodurch dieses Intervall zustande kommt.

Für $\lambda_{\text{(gesamt)}}$ ergibt sich, basierend auf den Wertebereichen für Π_{PM} und Π_{Proc} aus λ_{Phys} , ein Intervall von 0,021 FIT bis 1,117 FIT.

Bei Berechnung mit dem Default-Wert nach FIDES Guide [5] für $\Pi_{\text{ruggedising}} = 1,7$ ergibt sich

$$\lambda_{\text{Phys}} = 0,062 \text{ FIT}$$

Unter der Verwendung der Default-Werte für Π_{PM} und Π_{Proc} gemäß FIDES Guide [5] ergibt sich:

$$\lambda_{\text{(gesamt)}} = 0,40 \text{ FIT.}$$

Die zuvor genannten Ausfallraten beziehen sich auf einen ungedichteten widerstandsgeschweißten Splice (Unterklasse Ib2).