

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
1 Was ist ein Steckverbinder?	17
2 Steckverbinder-Bestandteile	19
3 Unterschiedliche Anslusstechniken	21
3.1 Einlöten	21
3.2 Durchlöten	21
3.3 Auflöten	21
3.4 Einpresstechnik	22
3.5 Anlöten	22
3.6 Anschweißen	23
3.7 Anschrauben	23
3.8 Crimpen	23
3.9 Schneidklemmtechnik	24
4 Isolatormaterialien	25
4.1 PBT	30
4.2 PA	30
4.3 LCP	31
4.4 PPS	31
4.5 PC	31
4.6 Produktion von Steckverbindergehäusen	31
4.7 Reel-to-Reel-Verarbeitung	31
4.8 Krematoriumseffekte	32
5 Kontaktmaterialien	33
5.1 Kupfer	34
5.2 Messing	34
5.3 Federnde Legierungen	34
5.4 Relaxation der Federkräfte	34
5.5 Kontakte	36
6 Kontaktpunkt	37
7 Verschiedene Kontaktoberflächen	39
7.1 Nickel	39
7.2 Gold	40
7.3 Palladium	40
7.4 Silber	40
7.5 Zinn	40
7.6 Multilayer	41
7.7 Nickel-Sperrschicht	41

7.8	Kontakte aus vorveredelten Bandmaterialien	41
7.9	Kontaktgabe zwischen unterschiedlichen Kontaktoberflächen	42
8	Kontaktwiderstand	49
8.1	Kontaktwiderstand und Temperatur	53
8.2	Kontaktwiderstand und Korrosion	54
8.3	Kontaktwiderstand und Reibkorrosion	54
8.4	Kontaktwiderstand und Steckzyklen	55
8.5	Filme auf den Kontaktoberflächen	56
8.6	Ein niedriger Kontaktwiderstand ist wichtig	56
9	Abschirmmaßnahmen	59
9.1	Elektromagnetische Verträglichkeit	60
9.2	Der EMV-Schirmfaktor	62
9.3	Pseudo-Koaxial-Pinbelegung zur Optimierung der Signalintegrität	64
10	Verriegelung der Steckverbinder	69
11	Gehäuse und Mechanik	73
11.1	Positionscodierungen	73
11.2	Vorzentrierungen	74
11.3	Steckkompatibilität	75
11.4	Inverse Stecksysteme	76
11.5	Soft- und hartmetrische Rückwand-Leiterplattensysteme	76
11.6	Wasserdichte Ausführungen	77
11.7	Explosionengeschützte Steckverbinder	79
12	Warum werden neue Steckverbinder entwickelt?	81
13	Steckverbinder in der Leistungselektronik	83
13.1	Beispiel Kühlung durch Anschlussleitungen	84
13.2	Beispiel Kühlung durch Kupfer in der Leiterplatte	84
13.3	Thermische Simulation für den Extremfall	85
13.4	Hot Plugging in der Leistungselektronik	86
13.5	Stromverträglichkeit im Grenzbereich	87
14	Steckverbinder für hohe Datenraten	91
14.1	Warum werden diese Signale als differenzielles Paar übertragen?	91
14.2	Wie überträgt man digitale Signale?	91
14.3	Was muss bei den Übertragungsstrecken beachtet werden?	94
14.4	Warum sind Impedanz-Stoßstellen kritisch?	95
14.5	Neben- oder Übersprechen bei hohen Datenraten	96
14.6	Signal-Störabstand – Warum ist Nebensprechen so kritisch?	97
14.7	Simulation in der Steckverbinderindustrie	99
14.8	Signalübertragung bei hohen Datenraten	101
14.9	S-Parameter	105
14.10	S-Parameter im unsymmetrischen Betrieb (single ended)	105

14.11 S-Parameter im Mischbetrieb	106
14.12 Verifikation von S-Parametern nach der Simulation	109
14.13 Was sind Augendiagramme?	110
14.14 Einfluss der Leiterplatte	112
15 Weiterverarbeitung von Steckverbindern im Fertigungsprozess	115
15.1 Lötvorgänge bei unterschiedlichen Leiterplatten-Löttechniken	115
15.2 Steckverbinder auf Leiterplatten in Einpresstechnik setzen	116
15.3 Anschluss von Drähten, Litzen und Kabeln an Steckverbinder	117
16 Steckverbinderauswahl	119
16.1 Einsatzfall	119
16.1.1 Ein-/Ausgabe-Steckverbinder	119
16.1.2 Leiterplattensteckverbinder	119
16.1.3 Leiterplattenverbinder	120
16.1.4 Rückwandleiterplatten-Steckverbinder	120
16.1.5 Mezzanine Steckverbinder	121
16.1.6 Weitere Steckverbinder	122
16.2 Checkliste	123

Expertenbeiträge

1 Steckverbinder qualifizieren und bewerten	129
Dipl.-Ing. (FH) TILMAN HEINISCH / Dr.-Ing. UTE HÖRMANN	
1.1 Anforderungen an Steckverbinder	129
1.2 Anforderungen an das Prüflabor	129
1.3 Normen, Standards, Prüfprogramme	130
1.4 Bewertungskriterien und Prüfmethode(n)	131
1.4.1 Durchgangswiderstand	131
1.4.2 Isolationswiderstand und Spannungsfestigkeit	131
1.4.3 Klimatische Prüfungen	132
1.4.4 Mechanische Prüfungen	132
1.4.5 Strombelastbarkeit / Derating	134
1.5 Fehler- und Schadensanalyse an Stecksystemen	135
1.5.1 Widerstandserhöhende Schichten	136
1.5.2 Whisker	139
1.5.3 Produktionsfehler an Crimpverbindern und Stecksystemen	141
2 Einpresstechnik	145
Dipl.-Wirt.-Ing. SANDRA GAST	
2.1 Reparaturfähigkeit	146
2.2 Leiterplattenoberflächen	146
2.3 Lochaufbau	147
2.4 Oberflächenbeschichtung der Kontakte und der Einpresszone	147
2.5 Leiterplattendesign: Mindestabstand und Leiterbahnenverlauf	148
2.6 Einpressprozess	148
2.7 Pressen	150

2.8	Zuverlässigkeit der Einpresstechnik	150
2.9	Anwendungsbeispiele	151
2.9.1	Von High Speed bis High Current	151
2.9.2	Anwendungsbeispiele zur Schock- und Vibrationsbeständigkeit	151
3	Whisker in der Einpresstechnik	153
	Dr. ERIKA CRANDALL	
3.1	Whisker	153
3.2	Historie der Zinn-Whisker	154
3.3	Whisker-Wachstumstheorie & Wachstums-Mechanismen	155
3.4	Whisker-Wachstum bei Einpress-Verbindungen	157
3.5	Whisker-Risikobewertung	161
3.6	Standards / Normen	164
4	Oberflächen für Einpresspins	169
	Dr. ISABELL BURESCH	
4.1	Sn-haltige Oberflächen	170
4.1.1	Sn mit/ohne Ni-Zwischenschicht	170
4.1.2	SnAg-Oberflächen	173
4.2	Sn-freie Einpresstechnik	176
4.2.1	Rein-Ni-Oberflächen	177
4.2.2	Indium	177
4.2.3	Bismut	179
4.3	Zusammenfassung	181
5	Komponentendesign für die automatisierte Kabelsatzfertigung	183
	Dipl.-Ing. (FH) ADRIAN HEDIGER	
5.1	In Zukunft gibt es keine Alternative mehr zur automatisierten Fertigung	183
5.2	Neue Herausforderungen und Chancen für Entwickler von Kabelsätzen und Komponenten	183
5.3	Die große Herausforderung ist die Geschwindigkeit der Automaten	184
5.4	Die heute noch gültigen Prüfnormen sind unzeitgemäß	184
5.5	Fasungen und Rundungen erleichtern den Einführprozess	184
5.6	Generelle Anforderungen an die Stecker	185
5.7	Flächen für die optische Vermessung	186
5.8	Vorsicht mit vor- und rückversetzten Kammereingängen!	187
5.9	Zusätzliche Fixierung für Einzeladerabdichtungen	188
5.10	Tipps für Kammereinläufe und Übergänge in den Stecker	189
5.11	Empfehlungen für Konstruktionen von Steckern mit Dichtmatten	190
5.12	Keine Kunst, sobald man das Prinzip kennt	192
6	Werkstoffe für Steckverbinderkontakte	193
	Dr. ISABELL BURESCH	
6.1	Warum Kupferlegierungen?	193
6.2	Applikationsspezifische Eigenschaften (Fokus auf Bandwerkstoffe)	195
6.2.1	Leitfähigkeit	196
6.2.2	Festigkeit	196
6.2.3	Biegebarkeit	197

6.2.4	Spannungsrelaxation	199
6.2.5	Biegewechselfestigkeit	201
6.2.6	Federbiegegrenze	202
6.2.7	Kosten	202
6.3	Kupferwerkstoffe für Stanz-Biegekontakte	203
6.3.1	Reinkupfersorten	203
6.3.2	Mischkristallhärtende Kupferwerkstoffe	204
6.3.3	Ausscheidungshärtende Kupferwerkstoffe	209
6.4	Kupferwerkstoffe für spanend hergestellte Kontakte	216
7	Kontaktphysik	221
	Dr.-Ing. MICHAEL LEIDNER / Dr.-Ing. HELGE SCHMIDT	
7.1	Einleitung	221
7.2	Der Engewiderstand nach HOLM	221
5.3	Reale versus scheinbare Kontaktfläche	225
7.4	Morphologie des Kontaktpunktes und elektrische Leitvorgänge	227
7.4.1	Bereiche der reinen metallischen Berührung	228
7.4.2	Bereiche der reinen quasimetallischen Berührung	229
7.4.3	Isolierende Kontaktfläche	229
7.4.4	Frittung und Dry-Circuit-Messbedingungen	230
7.5	Simulation der realen Kontaktfläche	230
7.5.1	Der rein Hertzsche Kontakt	233
7.5.2	Einfluss der Schichtabfolge	234
7.5.3	Einfluss der Oberflächentopographie	235
7.5.4	Messung und Simulation des Engewiderstandes	236
7.5.5	Stromdichteverteilung innerhalb des Kontaktpunktes	238
7.5.6	Innere mechanische Spannungen / Verschleißverhalten	239
7.6	Verschleiß	241
7.6.1	Beginnender Verschleiß im fixen Kontaktpunkt	241
7.6.2	Triboverschleiß und Fretting-Korrosion	243
8	Oberflächen für Steckverbinderkontakte	245
	Dr.-Ing. HELGE SCHMIDT / Dr. ISABELL BURESCH	
8.1	Anforderungen an die Oberflächen für Steckverbinder	245
8.2	Kontaktmaterialien für Steckverbinder	246
8.2.1	Gold	246
8.2.2	Platin und Rhodium	246
8.2.3	Palladium	247
8.2.4	Silber	247
8.2.5	Zinn	247
8.2.6	Nickel	247
8.3	Hartgold-Oberflächen für Steckverbinder	248
8.3.1	Nickel-Zwischenschicht	249
8.3.2	Poren	249
8.3.3	Temperaturverhalten	251
8.3.4	Normalkräfte und Reibung	252
8.3.5	Verschleißverhalten	253

8.4	Palladium oder Palladium-Nickel mit Goldflash	254
8.4.1	Temperaturverhalten	256
8.5	Nickel-Phosphor-Goldflash	257
8.6	Silber	258
8.6.1	Härte	260
8.6.2	Normalkräfte und Reibung	262
8.6.3	Verschleißverhalten	262
8.6.4	Temperaturverhalten	263
8.7	Zinnbasierte Beschichtungen	265
8.7.1	Zinn als Kontaktoberfläche	265
8.7.2	Funktionelle Eigenschaften von Zinnoberflächen	273
8.7.3	Eigenschaftsoptimierung von Zinnoberflächen für Steckkontakte	277
8.8	Zusammenfassung und Einsatzempfehlungen	284
8.8.1	Übersicht	284
8.8.2	Kreuzbarkeit / Kreuzkompatibilität von Kontaktoberflächen	284
9	Neue hochleistungsfähige Beschichtungen für Steckverbindersysteme – Es muss nicht immer «edel» sein	287
	SASCHA MÖLLER / THOMAS WIELSCH / MARCEL MAINKA	
9.1	Einleitung	287
9.2	Experimentelles	288
9.2.1	Probenherstellung	288
9.2.2	Tribologische Untersuchungen	288
9.3	Ergebnisse und Diskussion	289
9.3.1	Schichtaufbau des Multilayer-Systems	289
9.3.2	Makroreibung	290
9.3.3	Mikroreibung (Fretting)	296
9.3.4	Applikationsversuche	300
9.4	Ausblick	307
10	Technologische Herausforderungen bei der Anwendung von Koaxialsteckverbindern bei hohen Datenraten	309
	Dipl.-Ing. BERND ROSENBERGER	
10.1	Einleitung	309
10.2	Stand der Technik heute	310
10.2.1	Serie BNC / TNC	310
10.2.2	Serie N	310
10.2.3	Serie QN	311
10.2.4	Serie Snap N	311
10.2.5	Serie 7–16	311
10.2.6	Subminiatur-Koaxial-Steckverbinderserien für unterschiedliche Anwendungsbereiche	312
10.2.7	Koaxiale Leiterplatten-Steckverbinder	312
10.3	Neue koaxiale Steckverbinder für Mobilfunk-Anwendungen	312
10.3.1	Koaxiales Stecksystem 4.3–10	313
10.4	Koaxiale Steckverbinder Board-to-board «blind mate»	313
10.4.1	Serie SMP	314
10.4.2	Ergänzungen Serien Mini-SMP / WSMP / Z-SMP	314

10.4.3 Toleranzausgleich mit Board-to-board-Verbindern	315
10.5 Integrierte Lösungen von Koaxialsteckverbindern im Automobil FAKRA	317
10.5.1 FAKRA-Steckverbindersystem	317
10.5.2 HFM® – High-Speed-FAKRA-Steckverbinder und FAKRA-Mini	318
10.6 Koax-Verbindung für Übergang von Glasfaser auf elektrische Leitung	318
10.6.1 WSMP – ein extrem breitbandiges rechtwinkliges Stecker-Array bis 100 GHz	318
10.7 Zusammenfassung: Die Grenzen der Koaxialtechnik	319
11 USB-C – Eine Steckverbindung, nicht nur für USB-Anwendungen!	321
TIMO DREYER	
11.1 Typische Anwendungen	321
11.2 Image vs. Fakten	323
11.3 Lowcost: Nein danke!	323
11.4 Mechanische Performance	324
11.5 EMV	325
11.6 SuperSpeed USB 20 GBit/s	325
11.7 Die Schirmung der Steckverbindung	330
11.8 Bei der Auswahl des Steckers zu beachten	331
11.9 Die weitere Evolution des USB: «USB4»	332
12 M12 Push-Pull Steckverbinder nach IEC 61076-2-012	335
Dipl.-Ing. (FH) MANUELA GUTMANN	
12.1 Einleitung	335
12.2 Metrische M12-Rundsteckverbinder	335
12.3 Der Weg zum M12 Push-Pull	335
12.4 Die Funktionsweise des Inner Push-Pull	337
12.5 Vorteile des Systems	337
12.6 Geräteintegration	339
12.7 Fazit und Ausblick	340
13 Steckverbinder für Single Pair Ethernet	341
Dipl.-Ing. MATTHIAS FRITSCHÉ	
13.1 Die aktuellen IEEE802.3 Standards für SPE	341
13.2 Auslegung der elektrischen Kennwerte	345
13.3 Technische Ausführung der SPE Verbindungstechnik nach IEC 63171-6	346
13.4 SPE Verbindungstechnik nach IEC 63171-1	348
13.5 SPE Verbindungstechnik nach IEC 63171-4	349
13.6 SPE Verbindungstechnik nach IEC 63171-2 und -5	350
13.7 SPE Verbindungstechnik für Automotive Anwendungen	350
14 Wird Single Pair Ethernet den RJ45 verdrängen?	351
SILKE LÖDIGE / KLAUS LEUCHS / RALF TILLMANNS / SIMON SEEREINER	
14.1 Ethernet Netzwerke im Gebäude	351
14.2 Ethernet wandert in industrielle Anwendungen	351
14.3 Ethernet erreicht die Feldebene	353
14.4 Die Automobilindustrie als Treiber für Single Pair Ethernet	353
14.5 Unterschiedliche Anwendungsfelder für Single Pair Ethernet	354

14.6	Vorteile von SPE in der Industrie	355
14.7	Steckverbinder für Single Pair Ethernet	356
14.8	Grundlegende elektrische Eigenschaften von SPE Steckverbindern	358
14.8.1	Impedanz	358
14.8.2	Spannungsfestigkeit	359
14.8.3	Übertragungstechnische Eigenschaften	359
14.9	Vergleich RJ45- und SPE-Steckverbinder	361
14.10	Zukunft der Kommunikationsschnittstellen	364
15	Steckverbinder für neue Fahrzeugarchitekturen und Bordnetze	365
	Dipl.-Ing. (FH) UWE HAUCK	
15.1	Neue Fahrzeugarchitekturen und die Veränderungen im Bordnetz	365
15.2	Anforderungen an Hochvolt-Verbindungssysteme	367
15.3	Betriebssicherheit	368
15.3.1	Elektrische Sicherheit	368
15.3.2	Mechanische Sicherheit	371
15.3.3	Funktionale Sicherheit	372
15.4	Applikationen	373
15.4.1	HV-Bordnetz	374
15.4.2	Batterie	376
15.4.3	Ladetechnologie	382
15.5	Ausblick	385
16	Qualitätsabsicherung der Dichtheit von Steckverbindern im Produktionsprozess	387
	Dr. JOACHIM LAPSIEN	
16.1	Steckverbinder	387
16.1.1	Vielfältige Einsatzbereiche und extreme Anforderungen an Steckverbinder	387
16.1.2	Undichtheiten an Steckverbindern	388
16.2	Dichtheitsprüfung im Labor	388
16.2.1	Laborprüfungen – Typprüfung und IP-Schutzarten	388
16.2.2	Vor- und Nachteile der Typprüfung im Labor	389
16.3	Dichtheitsprüfung im Produktionsprozess	390
16.3.1	Stückprüfungen	390
16.3.2	Zusammenhang zwischen Dichtheit, Leckrate und Lochgröße	390
16.3.3	Auswahl des Prüfmediums	391
16.3.4	Dichtheitsprüfung mit dem Prüfmedium Druckluft	391
16.3.5	Vor- und Nachteile der produktionsbegleitenden Stückprüfung	393
16.4	Dichtheitsprüfung von Steckverbindern	394
16.4.1	Adaption von Steckverbindern	394
16.4.2	Zustand des Steckverbinders und geeignete Prüfmethode	395
16.5	Optimierungen	398
16.6	Typprüfung versus Stückprüfung	399
17	Entwicklungen für Spezialanwendungen	401
	M.Eng. Dipl.-Ing. (FH) BERND SPORER	

18 Thermische Charakteristik eines Steckverbinders	409
Dipl.-Ing. (FH) TOBIAS BEST	
19 CAE-Simulation als unterstützendes Werkzeug im Entwicklungsprozess für Steckverbinder	413
Dipl. Ing. (FH) THOMAS IBERER	
19.1 Einsatz der CAE-Simulation im Entwicklungsprozess	413
19.2 Die Verfahren der CAE-Simulation zur Steckverbinderentwicklung	413
19.2.1 Feldsimulation	414
19.2.2 Kopplung physikalischer Domänen – «Multiphysiksimulation»	415
19.2.3 Simulation von Übertragungsstrecken und Signalformen	416
19.3 Durchführung einer CAE-Simulation am Beispiel der elektromagnetischen Feldsimulation von Steckverbindern	418
19.3.1 Modellvorbereitung (Preprocessing)	418
19.3.2 Analyse (Solution)	420
19.3.3 Ergebnisauswertung (Postprocessing)	422
19.4 Potenzial der parametrischen Simulation in der Produktentwicklung	423
20 Modulare Steckverbinder:	
Kompakte und flexible Schnittstellen für Produktionsanlagen	425
HEIKO MEIER	
20.1 Entstehung modularer Steckverbinder	426
20.2 Aufbau modularer Steckverbinder-Programme	426
20.3 Modulare Verbindungen für modulare Maschinen	426
20.4 Vielfältige Optionen für eine Schnittstelle	427
20.5 Platz sparen bei der Lichtwellenleiter-Übertragung	427
20.6 Einfache Anschlussstechnik für schnelle Installationen	427
20.7 Modular und smart für die Netzwerkkommunikation	428
20.8 Empfindliche Elektronik schützen, Anlagenverfügbarkeit verbessern	428
21 Optische Steckverbindungen für die Kommunikationsnetze	431
M.Sc ETH Masch.-Ing. ALEKSANDAR OPACIC	
21.1 Definition	431
21.2 Struktur und Funktion eines optischen Steckverbinders, Parameter	431
21.3 Struktur und Funktion eines Mittelstücks / Adapters	435
21.4 Struktur und Funktion optischer Steckverbindungen, Parameter der Einfügedämpfung	436
21.5 Grenzwerte und Qualitäten der optischen Steckverbindungen	440
21.6 Steckverbinder und Kabel	441
21.7 Simplex-, Duplex- und Mehrfasersteckverbinder, Anwendungsbereiche	442
21.8 Patchkabel und Pigtailes	443
21.9 Standards	444
22 Die Steckbinderauswahl in der digitalen Welt	445
Dipl.-Wirtsch.-Ing. KAI NOTTÉ	
22.1 Produktinformationen in Textform	445

22.1.1 Die klassische Produktbeschreibung	445
22.1.2 Elektronische Kataloge	446
22.2 Produktinformationen, visuell dargestellt	446
22.2.1 Zeichnungen und 3D-Modelle	446
22.2.2 Grafische Daten	447
22.2.3 Produktfotografien	447
22.3 Produktinformationen suchen und finden	448
22.3.1 Hersteller	448
22.3.2 Distributoren	449
22.3.3 Andere Plattformen	449
22.4 Die Zukunft	450
23 Die etwas andere Verbindung – Kabellose Übertragung	451
Dipl.-Ing. MATHIAS WECHLIN	
23.1 Die elektrische Zahnbürste – Das erste kabellose Ladesystem mit Massenverbreitung	451
23.2 Was zeichnet induktive kabellose Übertragungssysteme aus?	456
23.3 Praxisbeispiel Elektromobilität	456
23.4 Megatrends mit kabellosen Übertragungslösungen begegnen	459
Management Statement von HARTING: Wir gestalten unsere Zukunft mit Connectivity*!	461
Schlusswort	467
Abkürzungen	469
Lebensläufe der Autoren	473
Literaturverzeichnis	481
Quellenverzeichnis	493
Glossar	495

1 Was ist ein Steckverbinder?

ROBERT S. MROCKZKOWSKI, ein weltweit anerkannter Steckverbinder-Guru, beschreibt in seinem *Electronic Connector Handbook* [1] die Funktion einer elektrischen Steckverbindung wie folgt:

«Ein elektrischer Steckverbinder ist eine elektromechanische Vorrichtung, die eine Trennstelle zwischen zwei Komponenten eines elektronischen Systems ermöglicht, ohne einen nicht akzeptablen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems zu verursachen.»

Was will er uns damit sagen?

Zuerst müssen wir feststellen, dass ein Steckverbinder nur in seltenen Fällen eine optimale Lösung der Problemstellung ist. Beim Einsatz von Steckverbindern muss immer ein Kompromiss eingegangen werden – sei es im mechanischen Aufbau oder auch für die elektrische Signalführung.

Unter diesem Aspekt versucht man die Steckverbindung in Bezug auf Impedanz, Frequenzeigenschaften, Übergangswiderständen und Lebensdauererwartungen so zu gestalten, dass die Anforderungen an das Gesamtsystem unter ökonomischen Gesichtspunkten erfüllt wird.

Da die Trennstellen auch physikalischen (Steckzyklen, Schock und Vibration) und chemischen (Korrosions-) Anforderungen gerecht werden müssen, muss man die Kontaktmaterialien auf Kupferbasis (Leitfähigkeit) wie Messing, Phosphorbronze oder Neusilber mit Oberflächen versehen, die einen möglichst geringen Kontaktübergangswiderstand bei gleichzeitiger Korrosionsfestigkeit und Abriebfestigkeit über die Lebensdauer des Gesamtsystems erreichen.

Uns werden diese Kompromisse im Folgenden weiterhin begleiten. Viele Anwender meinen, ein Hersteller würde ihnen eine Steckverbindung speziell für ihren Anwendungsfall designen. Auch wenn der Anwender Werkzeugkosten bezahlt, ist dies nur in den seltensten Fällen machbar. Der Hersteller wird den Markt untersuchen, ob derartige Anwendungsfälle global auftreten. Und selbst wenn dem so ist, wird er nur zögerlich zustimmen, weil die Neuentwicklung einer Steckverbindung heutzutage in die Millionen geht und andererseits der Anwender früher oder später eine Second Source verlangt, sei es aus Gründen der Preiskontrolle oder sei es wirklich aus Gründen der Versorgungssicherheit.

Warum sind Neuentwicklungen von Steckverbindungen so teuer? Weil der Kunde ein optimales Produkt in reproduzierbarer Qualität verlangt, das nicht mehr durch Handarbeit gefertigt werden kann, sondern mit Kamera-überwachten Stanzwerkzeugen, integrierten Spritz- oder Umspritz-Werkzeugen und vollautomatischen Assemblage-Werkzeugen hergestellt werden muss.

Deshalb ist es für den Anwender sinnvoll, sich auf existierende Produkte zu konzentrieren. Manchmal sind es Kleinigkeiten, wie zum Beispiel Temperaturbereiche, die den Einsatz existierender Produkte verhindern. In solchen Fällen sollte der Anwender durchaus mit dem Hersteller sprechen, weil Produkte für einen spezifizierten Markt entwickelt werden und dieser Markt unter Umständen geringere Anforderungen hat als der aktuelle Einsatzfall.

In solchen Fällen wird der Hersteller eventuell seine Zustimmung erteilen, auch wenn sich dies nicht in einer überarbeiteten Produktspezifikation niederschlägt. Eine neue Produktspezifikation würde auch eine neue Produktqualifikation bedeuten, was wiederum sehr kostenintensiv ist.

TIPP

Wenn Sie vertieftes Interesse am Ablauf von Steckverbinderqualifikationen und Fehlerbildern haben, dann lesen Sie den Expertenbeitrag 1 «Steckverbinder qualifizieren und bewerten» in diesem Buch.



In Kürze

Eine optimale Auswahl eines Produktes für einen speziellen Anwendungsfall ist wichtig, um eine kostengünstige Lösung für das vorhandene Steckverbinderproblem zu finden. Dieses Buch soll Ihnen bei Auswahl und Entscheidung helfen.

2 Steckverbinder-Bestandteile

Schauen wir uns eine Steckverbindung im Detail an (Bild 2.1), so stellen wir fest, dass folgende Einzelteile berücksichtigt werden müssen:

- Anslusstechnik Stiftkontakt
- Isolator Stiftkontakt
- Basismaterial Stiftkontakt
- Oberfläche Stiftkontakt
- Oberfläche Buchsenkontakt
- Basismaterial Buchsenkontakt
- Isolator Buchsenkontakt
- Anslusstechnik Buchsenkontakt
- Schirmung der Steckverbindung (- - - -)
- Gehäuse und Verriegelung

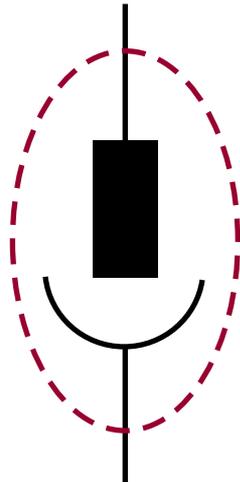


Bild 2.1 Elemente eines Steckverbinders

Zuerst wollen wir uns der Anslusstechnik widmen; dabei unterscheiden wir typischerweise

- Löten,
- Schweißen,
- Schrauben,
- Einpressen,
- Crimpen und
- Schneidklemmen.

3 Unterschiedliche Anschlusstechniken

Beim Löten unterscheiden wir zwischen Einlöten, Durchlöten, Auflöten und Anlöten.

3.1 Einlöten

Einlöten ist der Schwall- oder Wellenlötvorgang, wenn ein bedrahtetes Bauelement zum Beispiel in eine Einlagen-Leiterplatte eingelötet wird. Diese Technologie ist heute kaum mehr in Gebrauch. Ausnahmen bilden Leiterplatten, die beispielsweise in einfache Haushaltsgeräte, Hobbywerkzeuge o.Ä. verbaut werden.

3.2 Durchlöten

Durchlöten ist eine Technik, bei der die Lotpaste über ein durchkontaktiertes Loch aufgebracht wird, in das anschließend ein bedrahtetes Bauelement durchgesteckt wird, das anschließend im Reflow-Prozess gelötet wird. Diese Technik nennt sich auch **Pin-in-Paste** (PiP) oder **Through-Hole-Reflow** (THR) und bedingt, dass die Leiterplatten durchkontaktierte Löcher aufweisen und die Bauelemente reflowfähig sind, d.h. Temperaturen von +260 °C aushalten.

Außerdem muss berücksichtigt werden, dass die über der Leiterplatte aufgebrachte Lotpastenfläche groß genug ist (oft durch das Rastermaß minus 0,2 mm Trennsteg in der Schablone begrenzt), um den Zwischenraum zwischen dem durchkontaktierten Loch und dem Anschlusspin des Bauelements auszufüllen. In der Kalkulation muss das Schrumpfen der Lotpaste (ca. 50% vom Volumen) während des Reflow-Vorgangs berücksichtigt werden.

Weitere Randbedingungen sind ein Abstand von 0,25 mm zwischen dem Steckverbindergehäuse und der Leiterplatte im Bereich des Lotpastendrucks (Abstandsfüßchen) sowie ein maximaler Durchstieg der Anschlusspins durch die Leiterplatte von 1 mm; dadurch wird vermieden, dass sich Lotpaste am Pinende ansammelt, die dann im Lötbereich fehlen würde.

Schließlich ist es angebracht, diese Bauelemente in Bestückungsgurten anzuliefern, damit sie mit Pick&Place-Maschinen vollautomatisch bestückt werden können.

3.3 Auflöten

Das Auflöten, üblicherweise als SMT-Technologie genannt, ist heute Stand der Technik. SMT-Technologie hat den Vorteil, dass unter dem Bauelement bei Mehrlagen-Leiterplatten Leiterbahnen verlaufen können und dass die B-Seite der Leiterplatte ebenfalls mit Komponenten bestückt werden kann.

Die Leiterplatten werden mithilfe von Schablonen mit dem Pastendruck versehen, anschließend werden die Komponenten platziert und schließlich im Reflow-Verfahren gelötet.

Der Komponentenhersteller gibt das Layout für die Löt pads vor. Die Größe des Pastendrucks wird meistens durch In-House-Richtlinien definiert, die auch Lötstopplacke u.Ä. berücksichtigen.

SMT-Technologie ist auf Bauelemente-Längen von maximal 50 mm begrenzt, weil sich Leiterplatten während des Reflow-Prozesses durchbiegen können und dadurch bei größeren

Bauelementen offene Lötstellen entstehen. Wenn 50-mm-Bauelemente verarbeitet werden müssen, bieten sich die Einpresstechnik oder das PIP/THR-Verfahren an.

Neben dem Löten können Anschlusspins auch Leiterplatten mit Einpresstechnik kontaktieren.

3.4 Einpresstechnik

Die Einpresstechnik hat ihren Ursprung in den 1970er-Jahren, als Baugruppensysteme für Telekommunikation und militärische Anwendungen noch in Wire-Wrap-Technik auf der Rückwandleiterplatte verdrahtet wurden. Damals begann man, solide Pfosten in Leiterplatten mit durchkontaktierten Löchern einzupressen. Es war schnell klar, dass diese Technik sehr viel Stress in die Leiterplatten bringt – insbesondere, weil man auch Reparaturmöglichkeiten evtl. beschädigter Steckverbinder berücksichtigen musste.

Deshalb entwickelte man flexible Einpresszonen. In den 1990er-Jahren konkurrierten über 20 verschiedene Ausführungen für das durchkontaktierte Loch von 1,05 mm Durchmesser, und jeder Hersteller von Steckverbindern behauptete, seine Konstruktion sei die einzig wahre.

Damals lagen die Steckverbinderraster bei 2,54 mm oder 2,5 mm. Aufgrund der immer höher werdenden Packungsdichte mussten die Lochdurchmesser reduziert werden und heute wird Einpresstechnik hauptsächlich als gestanztes Nadelöhr (EoN = *Eye of a Needle*) für Lochdurchmesser von 0,31 mm bis 1,05 mm angeboten. Bei den Lochdurchmessern handelt es sich um Fertigmaße (*finished hole diameter* des PTH = *Plated Through Hole*). Im bleifreien Zeitalter werden die ursprünglich großen Lochtoleranzen nicht mehr benötigt; man setzt auf chemisch verzinnete oder ENIG (*Electroless Nickel Gold*)-Leiterplattenoberflächen, und Leiterplattenhersteller wissen, dass die Fertigmaße der durchkontaktierten Löcher im oberen Bereich des Toleranzbandes liegen müssen, weil chemisch verzinnete Oberflächen rauer sind als die früheren bleihaltigen HAL (*Hot Air Leveling*)-Oberflächen und demzufolge der Einpressvorgang im unteren Toleranzband kritisch werden kann.



TIPP

Der Expertenbeitrag 2 «Einpresstechnik» in diesem Buch gibt detaillierte Informationen über diese Technik.

Den Anschluss von Drähten, Litzen und Kabeln an Steckverbinder beschreiben die folgenden Abschnitte.

3.5 Anlöten

Das Anlöten ist der traditionelle Lötprozess mit LötKolben und Löt Draht. Die vorverzinnte Litze wird in den Löttopf eingebracht oder durch die Lötöse gesteckt und durch Zugabe von Löt Draht verlötet. Lötanschlüsse von Litzenleitern müssen zusätzlich mit einer Knickschutztülle (Schrumpfschlauch) versehen werden, da sonst beim Biegen des Litzenleiters hinter der Lötstelle einzelne Litzen abbrechen können. Schirmanbindungen sollten mit Kupferfolie und Beilaufdraht ausgeführt werden.

Neben dem Löten können Drähte auch angeschweißt, angeschraubt oder angecrimpt werden.

3.6 Anschweißen

Das Anschweißen von Drähten – sei es durch Widerstandsschweißen oder durch Ultraschallschweißen – ist ein aufwendiger Prozess, der aber automatisiert werden kann. Schweißen wird immer dann eingesetzt, wenn entweder der Übergangswiderstand einer Crimpverbindung zu instabil ist (beispielsweise bei einem ABS-Sensor, der hoher Vibration ausgesetzt ist) oder der Übergangswiderstand einer Crimpverbindung zu groß ist (beispielsweise bei Litzenleitern über 25 mm² im Hochstromeinsatz).

3.7 Anschrauben

Das Anschrauben von Drähten findet nicht nur in der Installationstechnik statt. Mehr und mehr Klemmleisten für elektronische Leiterplatten kommen zum Einsatz – sowohl als einteilige Klemmleisten als auch in zweiteiliger Ausführung, jeweils mit eingelöteten Pins. Bezüglich der Schraube ist zu beachten, dass die Klemmstelle den Litzenleiter nicht beschädigt (keine Schrauben direkt auf den Litzenleiter) oder dass Aderendhülsen Verwendung finden.

Eine einfachere Klemmung von Drähten ist der Einsatz von Käfigzugfedern. Je nach Ausführungen und Querschnitt gibt es Käfigzugfedern für direkte Kontaktierung (Draht einfach einstecken) oder für größere Querschnitte mit Ver- und Entriegelungstasten.

3.8 Crimpen

Das Crimpen von Kontakten an Drähte ist sicherlich die am weitesten verbreitete Anschließtechnik. Dabei wird der Draht in einen Stripper-Crimper eingeführt und dort ein Kontakt – vorzugsweise mit Drahtcrimp und Isolationscrimp – direkt an dem Drahtende aufgebracht. Das Bündel der angecrimpten Kontakte wird danach manuell oder mit Hilfe von Farberkennung der Drahtisolierungen im Automaten in die korrekten Positionen des Steckverbindergehäuses eingeschnappt. Hat der Kontakt keinen Isolationscrimp, ist auch hier das Aufbringen einer Knickschutztülle (Schrumpfschlauch) erforderlich!

Drahtquerschnitt (mm² oder AWG), Crimpkontakt und Werkzeugeinstellung müssen aufeinander abgestimmt werden.

Da das Crimpen eine Art Kaltverschweißung der Einzeldrähte eines Litzenleiters darstellt, muss die Überwachung der Crimpmaschine regelmäßig durch Höhen- und Breitenkontrolle des Crimps sowie durch Messen der Abzugskräfte erfolgen.

Crimpen ist eine Kaltverformung des Kontaktmaterials, weshalb Zinnbronze zu bevorzugen ist. Messing bildet beim Crimpen Mikrorisse, die langfristig zu Korrosion führen können.

Volldraht kann nicht im Crimpkontakt verarbeitet werden, da keine Kaltverschweißung stattfindet!

TIPP

Der Expertenbeitrag 5 «Komponentendesign für die automatisierte Kabelsatzfertigung» in diesem Buch gibt detaillierte Informationen über diese Technik.



3.9 Schneidklemmtechnik

Bei der Schneidklemmtechnik werden gleichzeitig mehrere Drähte – vorzugsweise von einem Flachbandkabel – an einen Steckverbinder kontaktiert. Hier müssen Drahtquerschnitt und Kontaktgabel genau aufeinander abgestimmt sein. Die Kerbschlagfestigkeit der Aderisolierung wirkt sich ebenfalls wesentlich auf die Qualität der Schneidklemmtechnik aus.

Geschirmte Flachbandkabel sind teuer und schwierig zu verarbeiten, weshalb Rundkabel angeboten werden, die im Inneren verdrehte Aderpaare führen. Eine einfachere Lösung sind zusätzliche Masseleitungen im Flachbandkabel, die es erlauben, über kurze Distanzen akzeptable Schirmung zu erreichen:

Zusätzliche Masseleitungen (G = Ground)

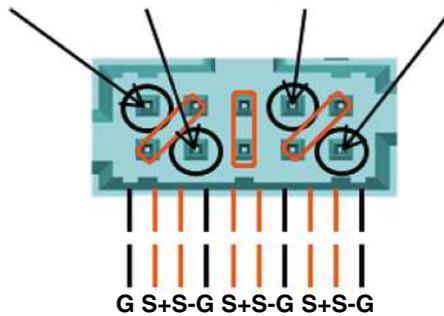


Bild 3.1 In dieser Anordnung haben die differenziellen Paare eines Flachbandkabels mit 1 mm Raster 105 Ω Impedanz!

4 Isolatormaterialien

Dieses Kapitel betrachtet Materialien, die die Kontakte auf Position halten. Dabei sind die wesentlichen Auswahlkriterien die mechanische Stabilität, die elektrischen Eigenschaften, die Verarbeitung der Materialien bei der Steckverbinderherstellung und schließlich das Verhalten der Materialien der Weiterverarbeitung der Steckverbindung, zum Beispiel im Reflow-Lötprozess.

In früheren Zeiten hat man Speckstein (zuletzt im Bügeleisen-Stecker verwendet) und Bakelit (eines der ersten Isolatormaterialien mit sehr langer Prozesszeit) eingesetzt. Später wurden dann Duroplaste (zum Beispiel Diallylphthalat) besonders bei militärischen Steckverbindungen eingesetzt. Heutzutage werden nur noch Thermoplaste verarbeitet, weil die Prozesszeiten kurz sind und diese Materialien die wesentlichen Anforderungen für den Steckverbinderhersteller erfüllen.

Folgende Punkte der Materialauswahl müssen beim Steckverbinderdesign berücksichtigt werden:

- Durchschlagfestigkeit (Überschlagsspannung),
- Oberflächenwiderstand (Isolationswiderstand),
- stabile Abmessungen (Raster, Position, Verriegelung, Codierung),
- Kriechstromfestigkeit (bei erhöhten Temperaturen),
- Zug- und Druckkräfte,
- Kerbschlagzähigkeit,
- Temperaturstabilität bei kurzfristiger Überlastung,
- Langzeitstabilität bei thermischer Alterung,
- chemisch stabil bei Produktion und in der Anwendung,
- flammhemmend und selbstverlöschend.

Für Anwendungen bei höheren Datenraten ist auch die Dielektrizitätskonstante wichtig, um Signalintegrität und Übertragungseigenschaften sicherzustellen und Laufzeitverzögerungen, Dämpfung und Signalverzerrungen zu vermeiden.

Die in Tabelle 4.1 gelb markierten Kunststoffe sind als Isolatormaterialien für Steckverbinder geeignet.

Auch die am häufigsten in Steckverbindern eingesetzten Kunststoffe haben ihre Grenzen.

Tabelle 4.1 Alle gängigen Thermoplaste, wobei die für die Steckverbindungen wesentlichen Kunststoffe gelb markiert sind [Q.1]

Name	Kürzel	Typ	Chemische Beständigkeit	Eigenschaften
Acrylester-Styrol-Acrylnitril	ASA			
Acrylnitril-Butadien-Styrol	ABS	Besser als PS 3	Alterungsbeständig, hohe elektrische Durchschlagsfestigkeit bis 120kV/mm, sonst wie SAN	Bis 95 °C, Armaturen, Batteriekästen, Schutzhelme
Casein-Kunststoffe, Kunsthorn	CS, CSF			
Celluloseacetat, Celluloseacetatbutyrat, Celluloseacetatpropionat, Celluloseacetatphthalat	CA, CAB, CAP	Benzin, Benzol, Trichlorethylen	Unterschiedlich je nach Carbonsäure bei Veresterung, hart, zäh, geschmacksfrei, schalldämmend	< 80 °C, Folien, Gerätegehäuse, Werkzeuggriffe, Brillengestelle, Zigarettensfilter
Cellulosehydrat	CH			
Cellulosenitrat	CN			
Cyclo-Olefin-Copolymere	COC		Hohe Steifigkeit, Festigkeit und Härte, niedrige Dichte	65–175 °C
Ethylen-Tetrafluorethylen	ETFE		Langzeitgebrauchstemperatur: –190 bis +155 °C (kurzzeit. 200 °C)	Kabelisolierung, Auskleidung von Behältern, Armaturen und Pumpen für die Chemieindustrie, Zahnräder, Laborzubehör
Ethylen-Chlortrifluorethylen	ECTFE			Chemische Industrie
Fluorethylenpropylen	FEP		Langzeitgebrauchstemperatur: –200 bis +205 °C (kurzzeit. +250 °C)	Kabelisolierung, Schläuche, Beschichtungen, Auskleidung von Behältern und Armaturen für die Chemieindustrie, Formteile
Flüssigkristall-Polymere	LCP			
High Impact Polystyrene	HIPS		Hochschlagfest	Gerätegehäuse von Fernsehern, Computer
Modifizierte Fluoralkoxy-Polymere	MFA			Chemieindustrie, Laborzubehör, Elektrotechnik, als korrosionshemmende Metallbeschichtung Gefäßmaterialien, Kabelisolierung, Auskleidung von Behältern, Armaturen und Pumpen, Laborzubehör, Schläuche, Füllkörper

Name	Kürzel	Typ	Chemische Beständigkeit	Eigenschaften
Perfluoralkoxy-Polymere	PFA	Fluorkunststoff mit höchster Temperatur- und Chemikalienbeständigkeit	Langzeitgebrauchstemperatur: -200...+260 °C	
Polyamid	PA, Bio-PA	Alkohol, Kraftstoff, Öl, schwache Laugen, Säure, Salze	Hart, sehr zäh, abriebfest, gleitfähig, maßbeständig hohe Festigkeit, Steifigkeit und Härte, gute Witterungsbeständigkeit	Bis 100 °C formbeständig, Druckschläuche, Dichtungen, Feinwerktechnik, Lager, Fasern, Zahnräder
Polybutylenterephthalat	PBT			Technische Teile für Automobilbau und Elektrotechnik
Polycarbonat	PC	Alkohol, Benzin, Öl, schwache Säuren	Hart, steif, schwer entflammbar, wärmeformbeständig, formstabil, glasklar, elektrisch isolierend, transparent	< 135 °C, schlagzäh bis -100 °C, Gehäuse, Wasserflaschen, Auto-mobil-verschiebung, optische Linsen, CDs
Polychlorotrifluorethylen	PCTFE			
Polyetherimid	PEI		Gute chem. Beständigkeit, transparent, zäh	Bis + 170 °C
Polyetherketone	PEK, PEEK u.a.			Zahnimplantate
Polyethersulfon	PES		Fest, steif, zäh, gute chem. Beständigkeit	Bis + 180 °C
Polyethylen	PE, Bio-PE	Benzol, Laugen, Lösungsmittel, Säuren, witterungsbeständig	Weich, flexibel (PE-LD) bis steif, unzerbrechlich (PE-HD), durchscheinend, Geruchsfrei	Bis 80 °C (PE-LD) bzw. bis 100 °C (PE-HD), Dichtungen, Folien, Isoliermaterial, Rohre, Flaschen
Polyethylenterephthalat	PET		Hohe Steifigkeit und Härte, lackierfähige Oberfläche, witterungsstabil, hohe Formbeständigkeit in der Wärme	Flaschen
Polyimid	PI	Fast alle Lösungsmittel, jedoch keine Laugen	Abriebfest, sehr gute Gleit- und elektrische Eigenschaften (Isolierung), sehr geringe Gasdurchlässigkeit	-240 bis 280 °C, Formgebung durch Sintern, Dichtungen, Lager
Polylactid (Polymilchsäure)	PLA		Biobasiert, biologisch abbaubar	Verpackungsfolien, Kunststoffbesteck, Kunststoffbecher, Verbrauchsmaterialien, Flaschen, Fasern und Gewebe, Teebeutel
Polymethacrylimid	PMIMI			
Polytrimethylenterephthalat	PTT			

Tabelle 4.1 Alle gängigen Thermoplaste, wobei die für die Steckverbindungen wesentlichen Kunststoffe gelb markiert sind [Q.1] – Fortsetzung

Name	Kürzel	Typ	Chemische Beständigkeit	Eigenschaften
Polymethylmethacrylat	PMMA	Schwere Laugen, Säuren, Benzin, witterungs-beständig	Hart, spröde, splittert nicht, alterungsbeständig, transparent	-40 bis 90 °C, Modelle, Leuchten, Sicherheitsverglasung
Polymethylpenten	PMP	Säuren, Laugen	Hohe Transparenz, UV-durchlässig, geringe Oberflächenspannung, geringe Wasseraufnahme	Laborgeräte, Kosmetikbehälter, Spritzen
Polyoxymethylen oder Polyacetal	POM	Fast alle Lösungsmittel	Hart, zäh, gleitfähig, teilkristallin, geringe Wasseraufnahme, maßbeständig	-50 bis 120 °C, Armaturen, Beschläge, Lager, Zahnräder
Polyphenylenether	PPE oder PPO		Gute chemische Beständigkeit	Bis 100 °C
Polyphenylsulfid	PPS			
Polyphthalamid	PPA			
Polypropylen	PP	Benzol, Laugen, Lösungsmittel, Säuren, witterungs-beständig	Hart, unzerbrechlich, teilkristallin, geruchs- und geschmacksfrei	Beständig von 0 bis 130 °C, Batteriekästen, Waschmaschinenteile
Polystyrol	PS	Alkohol, Laugen, Öl, Säuren, Wasser	Hart, spröde, glasklar, geruchs- und geschmacksfrei, färbbar	Bis 80 °C, Isolierfolien, Spielwaren, Verpackungen, Zeichengeräte
Polystyrol geschäumt	PS-E	Alkohol, Laugen, Öl, Säuren, Wasser	Geringe Dichte, Schall und Wärmedämmung	Platten für Wärme- und Schallschutz, Verpackungen
Polystyrol schlagfest	SB	Wie PS	Schlagfest, schwer zerbrechlich, Versprödung durch Licht und Wärme, sonst wie PS	Bis 70 °C, Behälter, Elektroinstallationen, Geräte- und Tiefziehteile
Polysulfon	PSU		Zäh, transparent, gute elektr. Eigenschaften, hohe Festigkeit	-40 bis 150 °C, Medizin, Haushalt
Polytetrafluorethylen	PTFE	Hervorragende Beständigkeit	Hart, zäh, teilkristallin, keine Wasseraufnahme, sehr gute elektrische Eigenschaften (Isolierung), nicht benetzbar (hydrophob)	-90 bis 350 °C, Formgebung durch Sintern, Beschichtungen, Dichtungen Isolierfolien, Lager, Schläuche
Polyvinylacetat	PVAC			Weißleim (Holzleim)
Polyvinylchlorid (Hart-PVC)	PVC-U	Alkohol, Laugen, Säuren, Mineralöl, Benzin	Abriebfest, hornartig, zäh	Bis 60 °C, Rohre, Fittings, Folien, Hohlkörper, Batteriekästen

Name	Kürzel	Typ	Chemische Beständigkeit	Eigenschaften
Polyvinylchlorid (Weich-PVC)	PVC-P	Etwas geringer beständig als PVC-U	Abriebfest, gummi- bis lederartig, keine Wasseraufnahme	Bis 80 °C, Bekleidung, Bodenbelag, Folien, elektrische Isolierung
Polyvinylidenfluorid	PVDF		Langzeitgebrauchstemperatur: -60 - +150 °C Fluorgehalt: ca. 57 %	Dichtung, Membran, Verpackungsfolie, Rohre, Ventile und Pumpenauskleidungen, Schläuche, Gleitschienen
Styrol-Acrylnitril- Copolymerisat	SAN	Ätherische Öle, sonst wie PS	Sehr schlagzäh, steif, stabil, Temperaturwechsel-fest	Bis 95 °C, Batteriegehäusen, Gerätegehäuse, Spielwaren
Thermoplastische Stärke	TPS		Biobasiert, biologisch abbaubar	Verpackungsfolien, Extrusionsteile, Golf-Tees, Kunststoffbesteck
Polyhydroxyalkanoate	PHA	Feuchtigkeit, UV-Licht	Biobasiert, biologisch abbaubar; spröde und steif bis elastisch, Aroma-Barriere, ähnlich PP	Bis ca. 180 °C, (Lebensmittel)-verpackungen, medizinisches Nahtmaterial, Implantate
Polyhydroxybutyrat	PHB	Feuchtigkeit, UV-Licht	Biobasiert, biologisch abbaubar; spröde und steif bis elastisch, Aroma-Barriere, ähnlich PP	Bis ca. 180 °C, (Lebensmittel)-verpackungen, medizinisches Nahtmaterial, Implantate
Ethylen-Propylen-Copolymer	EPM		Schmelzfähig	-200 bis 300 °C
Polyester				Polyester ist eine Gruppe von diversen Polymeren, wie z.B. Polycarbonat (PC), PET oder PBT
Polyether-Block-Amid	PEBA			
Styrol-Butadien-Styrol	SBS			
Thermoplastisches Polyurethan	TPU oder TPE-U			

4.1 PBT

PBT (Polybutylenterephthalat) ist sehr kerbschlagfest und wird deshalb gern für Automobilanwendungen eingesetzt. PBT ist nur für Wellenlötung geeignet.

Reflow-Verfahren scheiden bei PBT generell aus. Steckverbinder aus PBT haben deshalb üblicherweise Einpresszonen an den Pins, um in mehrlagigen ECU-Leiterplatten verarbeitet werden zu können.

4.2 PA

PA (Polyamid = Nylon) hält nur bedingt Reflow-Temperaturen stand. Nylon 6/6 ist das temperaturstabilste PA. Es ist allerdings nicht für Wellenlötung geeignet, wenn die Einpresszapfen durch die Leiterplatte ragen (Bild 4.1).



Bild 4.1 Verbrannte Einpresszapfen und Zinnkügelchen bei Nylongehäusen nach dem Wellenlöten

Leider ist PA hygroskopisch und saugt Feuchtigkeit aus der Luft wie ein Schwamm, was bei feuchten Gehäusen zur Blisterbildung (auch Popcorn-Effekt genannt) während des Reflow-Prozesses führt. Nach feuchter Lagerung empfiehlt sich eine Vorbehandlung der Produkte (Wärmebehandlung oder Backen), was die Feuchtigkeit im PA reduziert.

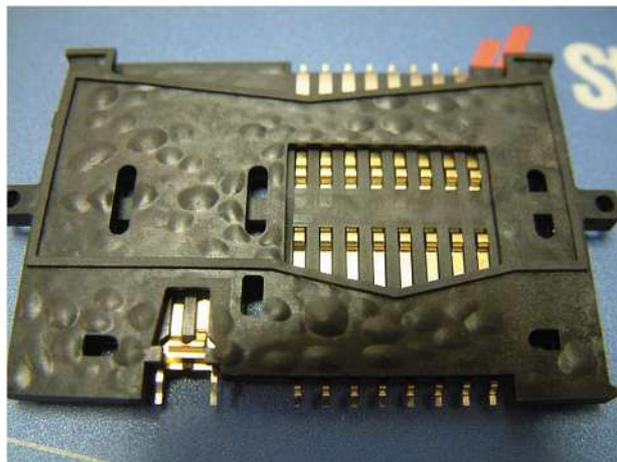


Bild 4.2 Blisterbildung durch Feuchtigkeit im Kunststoff nach dem Reflow-Prozess

4.3 LCP

LCP (Liquid Crystal Polymer) hat eine Glasübergangstemperatur $>+275$ °C und ist deshalb für problemloses Reflow-Löten bekannt. Es ist optimal, wenn dünnste Wandstärken (0,2 mm und darunter) gefordert sind. Allerdings ist LCP bei dickeren Wandstärken problematisch, weil Einfallstellen entstehen. Deshalb müssen Spritzgussformen speziell für LCP designet werden.

4.4 PPS

PPS (Polyphenylensulfid) hat ebenfalls eine sehr hohe Temperaturbeständigkeit. Allerdings greift es die Spritzgussformen an und ist teuer.

4.5 PC

PC (Polycarbonat) hat eine höhere Glasübergangstemperatur als PA und ist deshalb reflowfähig. Es ist relativ teuer. PC kann klarsichtig sein und wird deshalb gern für RJ45-Stecker und Lichtleiter verwendet, allerdings wird es im Reflow-Prozess milchig. Und es wird von Ammoniak zersetzt (zerbröselt), weshalb der Einsatz von RJ45-Steckern in Solarinvertoren in landwirtschaftlicher Umgebung (Kuhstall) fragwürdig ist.

4.6 Produktion von Steckverbindergehäusen

Die Produktion von Steckverbindergehäusen findet in Spritzgussmaschinen statt, deren Werkzeuge mit zwei-, vier-, acht- oder 16-fachen Kavitäten ausgelegt sind. Durch diese Mehrfachwerkzeuge werden die Herstellungskosten gesenkt, weil in jedem Spritzzyklus (ca. 25 Sekunden) die entsprechende Anzahl von Steckverbindergehäusen gefertigt wird. Die Kavitäten sind mit sogenannten Nestnummern gekennzeichnet, so dass im Fehlerfall eine Rückverfolgung von guten und schlechten Produkten möglich ist.

Anschließend werden diese Steckverbindergehäuse als Schüttgut auf Vibratoren vereinzelt und den Assemblageautomaten zugeführt, die die Kontaktbestückung übernehmen.

4.7 Reel-to-Reel-Verarbeitung

Neuere Technologien favorisieren die Reel-to-Reel-Verarbeitung. Hierbei umspritzen die Spritzautomaten Kontaktbänder, wie sie aus der Galvanik kommen, im Mehrfach-Umspritzverfahren (z.B. zehn Umspritzungen in einem 15-Sekunden-Zyklus). Die umspritzten Kontaktbänder werden wiederum aufgewickelt und dem Assemblageautomaten zugeführt, der dann aus den sogenannten Wafern den eigentlichen Steckverbinder zusammenbaut.

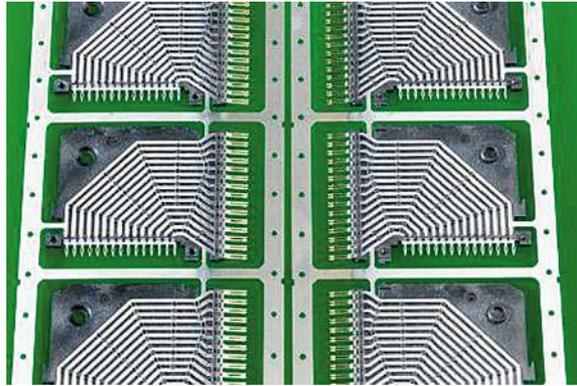


Bild 4.3 Diese Technik erlaubt es, u.a. ein Dielektrikum aus Luft zwischen einem differentiellen Paar aufzubauen, das exzellente Hochfrequenzeigenschaften hat.

4.8 Krematoriumseffekte

Bei SMT-Steckverbindern – selbst aus LCP – muss außerdem bedacht werden, dass während des Reflow-Prozesses sogenannte Krematoriumseffekte auftreten: Das Bauteil bewegt sich durch die Hitze des Reflow-Ofens, und Bewegungen über 0,15 mm können zum Abreißen des flüssigen Lots und damit zu Lötfehlern führen (Bild 4.4).

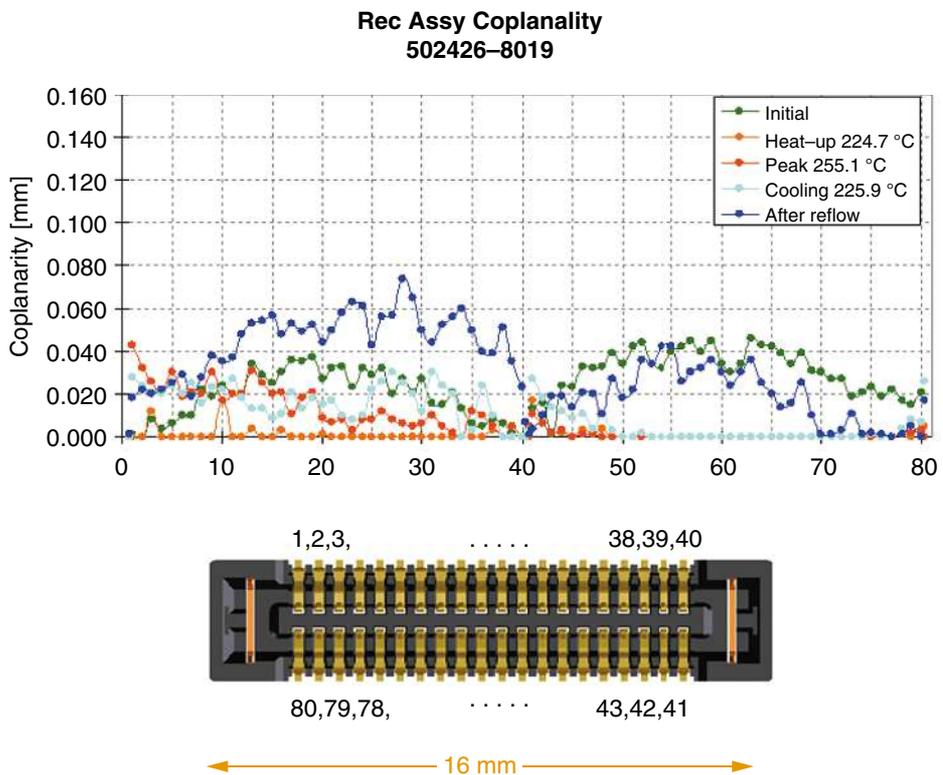


Bild 4.4 Krematoriumseffekt von Steckverbindern mit LCP-Gehäuse während des Reflow-Prozesses

5 Kontaktmaterialien

An die Kontaktbasismaterialien werden elektrische, mechanische und Lebensdauer-Anforderungen gestellt.

Geringer Durchgangswiderstand und damit eine minimale Erwärmung bei Stromdurchfluss erfordern eine gute elektrische Leitfähigkeit bei Stift und Buchse im Anschlussbereich und im Kontaktbereich.

Für den federnden Buchsenkontakt ist eine geringe Relaxation über die Lebensdauer erforderlich. Diese Relaxation ist abhängig von der Umgebungstemperatur im Kontaktbereich und somit auch von der Strombelastung und der daraus resultierenden Temperaturüberhöhung im Kontaktbereich.

Das Design muss die Verarbeitung des Kontaktes im Herstellungsprozess berücksichtigen. Als typische Herstellungsverfahren kennen wir Drehen, Stanzen, Stauchen oder Tiefziehen des Basismaterials.

TIPP

Ausführliche Informationen über die Basismaterialien erfahren Sie im Expertenbeitrag 6 «Werkstoffe für Steckverbinderkontakte» in diesem Buch.



Basismaterialien sind für elektrische Kontaktoberflächen ungeeignet. Deshalb muss eine Oberflächenveredelung vorgesehen werden, die über die Lebensdauer des Kontaktsystems den Kontaktwiderstand garantiert, Korrosion im Kontaktpunkt vermeidet und Reibkorrosion minimiert.

Außerdem wollen wir einen geringen Kontaktwiderstand (der durch die Kontaktnormalkraft bestimmt ist) bei erträglichen Steck- und Ziehkräften des Gesamtsystems erreichen.

Tabelle 5.1 Gegenüberstellung der in Frage kommenden Kontaktbasismaterialien [7] (* = Federmaterial)

Material	Elektrische Leitfähigkeit	Elektrischer Widerstand	Widerstandsänderung	Wärmeleitfähigkeit
	σ in S/m	10 mm 1×1 mm	α in Ω /K	W/(m·K)
Silber	$61,39 \cdot 10^6$	0,16 m Ω	$3,8 \cdot 10^{-3}$	418
Kupfer	$\geq 58,0 \cdot 10^6$	0,17 m Ω	$3,9 \cdot 10^{-3}$	380
Gold	$44,0 \cdot 10^6$	0,23 m Ω	$3,7 \cdot 10^{-3}$	311
Aluminium	$36,59 \cdot 10^6$	0,27 m Ω	$4,0 \cdot 10^{-3}$	200
HL-Leg CuNi3Si1Mg *	$25,0 \cdot 10^6$	0,40 m Ω	$1,8 \cdot 10^{-3}$	190
Messing CuZn37	$\approx 15,5 \cdot 10^6$	0,64 m Ω	$1,6 \cdot 10^{-3}$	120
Eisen	$10,02 \cdot 10^6$	1,00 m Ω	$6,6 \cdot 10^{-3}$	50
Zinn	$9,1 \cdot 10^6$	1,10 m Ω	$4,6 \cdot 10^{-3}$	65
Bronze CuSn6/8 *	$9,0/6,5 \cdot 10^6$	1,1/1,5 m Ω	$0,6 \cdot 10^{-3}$	58
Neusilber CuNi9Sn2 *	$6,4 \cdot 10^6$	1,56 m Ω	$0,6 \cdot 10^{-3}$	48
Blei	$4,69 \cdot 10^6$	2,13 m Ω	$4,2 \cdot 10^{-3}$	35
Edelstahl	$1,4 \cdot 10^6$	7,14 m Ω	$\approx 3 \cdot 10^{-3}$	20

5.1 Kupfer

Wie nicht anders zu erwarten, erkennen wir, dass Kupfer das preiswerteste Basismaterial mit bester Leitfähigkeit ist. Allerdings ist Reinkupfer weich und deshalb schlecht als Kontaktmaterial geeignet.

5.2 Messing

Messing hat geringe Federeigenschaften und ist deshalb vorrangig für nicht federnde Kontaktteile und bedingt für Buchsenkontakte geeignet. Vorsicht ist bei Crimpkontakten angesagt, weil Messing zu Mikrorissen im Crimpbereich neigt und Korrosion über die Lebensdauer in diesen Mikrorissen stattfindet!

5.3 Federnde Legierungen

Federnde Legierungen sind Neusilber, Bronze oder Hochleistungslegierungen (Zeile 5 in Tabelle 5.1). Die Auswahl der federnden Legierungen ist immer ein Kompromiss zwischen Leitfähigkeit, Federeigenschaften, Festigkeit und Langzeitverhalten.

Die Leitfähigkeit bestimmt die Temperaturüberhöhung bei einem gegebenen Strom. Die Temperatur beeinflusst wiederum die Relaxation über die Lebensdauer und somit die Federeigenschaften des Kontaktes. Nachlassende Federeigenschaften reduzieren die Kontaktnormalkraft, was zu einer Erhöhung des Übergangswiderstandes führt, der eine zusätzliche Temperaturüberhöhung erzeugt, was schließlich im Ausfall des Kontaktsystems endet – ein Teufelskreis!

5.4 Relaxation der Federkräfte

Betrachtet man die Relaxation der Federkräfte, so erkennt man bei Raumtemperatur kaum Unterschiede im Verhalten über die Zeit. Bei höheren Temperaturen über +80 °C verhalten sich die Materialien sehr unterschiedlich (Bild 5.1).

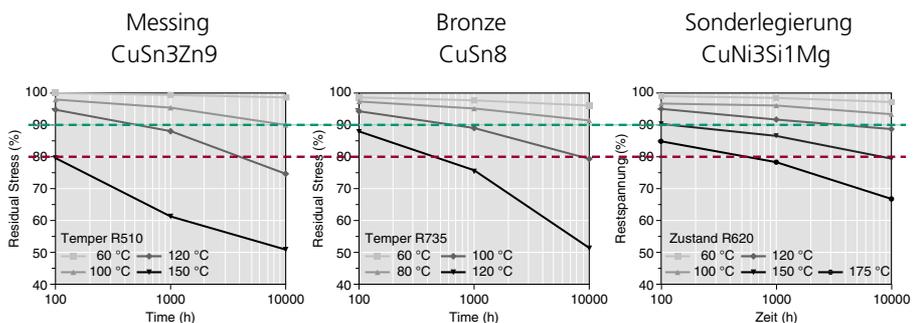


Bild 5.1 Unterschiedliche Relaxation bei Messing, Bronze und Sonderlegierung [Q.2]

Die grüne Linie zeigt uns eine unbedenkliche Relaxation von 10%, die rote Linie sei als Grenzwert der Relaxation bei 80% der ursprünglichen Federkraft angenommen. Während die

Sonderlegierung erst nach 10 000 Stunden Betrieb bei einer Kontakttemperatur von 150 °C die 80%-Grenze erreicht, wird bei Bronze und Messing eine Limitierung der Kontakttemperatur auf 100 °C notwendig. Wir sprechen hier bewusst über Kontakttemperatur und nicht über Umgebungstemperatur, da ja in der Kontaktkammer aufgrund der durch den Kontaktwiderstand erzeugten Wärmeenergie höhere Temperaturen herrschen.

Heutzutage zeigt man derartige Zusammenhänge nicht mehr durch parametrisierte Tabellen, sondern durch den Larsson-Miller-Parameter:

$$P = (20 + \log(t)) \cdot T + 273 \cdot 0,001$$

Den Parameter P für das entsprechende Federmaterial erhält man vom Halbzeughersteller, die Zeit t ist in Stunden anzusetzen, die Temperatur T in Grad Celsius.

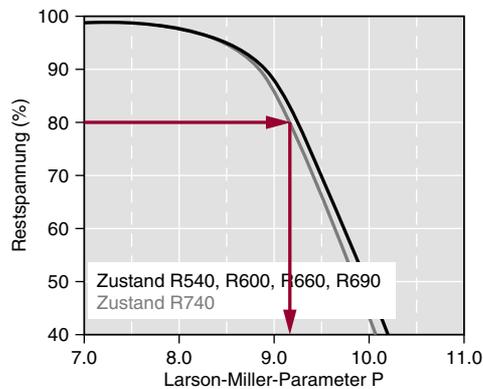


Bild 5.2 Bei einem Grenzwert von 80% erhält man z.B. für Bronze CuSn8 einen Larsson-Miller Parameter von 9,1.

Legt man sich eine Excel-Tabelle mit den Formeln an, so kann man vorwärts oder rückwärts die maximale Kontakttemperatur bei einer vorgegebenen Lebensdauer oder die zu erwartende Lebensdauer bei einer vorgegebenen Kontakttemperatur ermitteln (Tabelle 5.2).

Tabelle 5.2 Ermittlung der maximalen Kontakttemperatur über die erforderliche Lebensdauer bzw. eine zu erwartende Lebensdauer bei einer vorgegebenen Kontakttemperatur, jeweils für einen vorgegebenen Werkstoff bei definierter Relaxation

Für $P = 9,1$ (max. 80% Federkraft verbleibend) gilt:				← CuSn8 C52100	
Zeit "t":	10000	Stunden	► Temperatur "T"	106,2	°C
Temperatur "T":	85	°C	► Zeit "t"	262418,5	Stunden

5.5 Kontakte

Kontakte können in unterschiedlichsten Herstellungsverfahren produziert werden (Bild 5.3).

- Drehen  Rund- und Koax-Kontakte
- Stanzen  alle Kontakte (Box Rund Messer)
- Stauchen preiswert aber ungenau  für Kontaktstifte
- Tiefziehen  ... auch für Leistungskontakte: 
- Alu-Druckguss  nur für Gehäuse

Bild 5.3 Herstellungsverfahren für Kontakte

Besonders erwähnenswert ist die Herstellung von tiefgezogenen Buchsenkontakten aus Reinkupfer (roter Pfeil), die anschließend mit einer Edelstahlüberfeder ihre Federkraft erhalten.

6 Kontaktpunkt

Der Kontaktpunkt besteht aus einer Berührung viele kleiner Kontaktflecken (Bild 6.1).

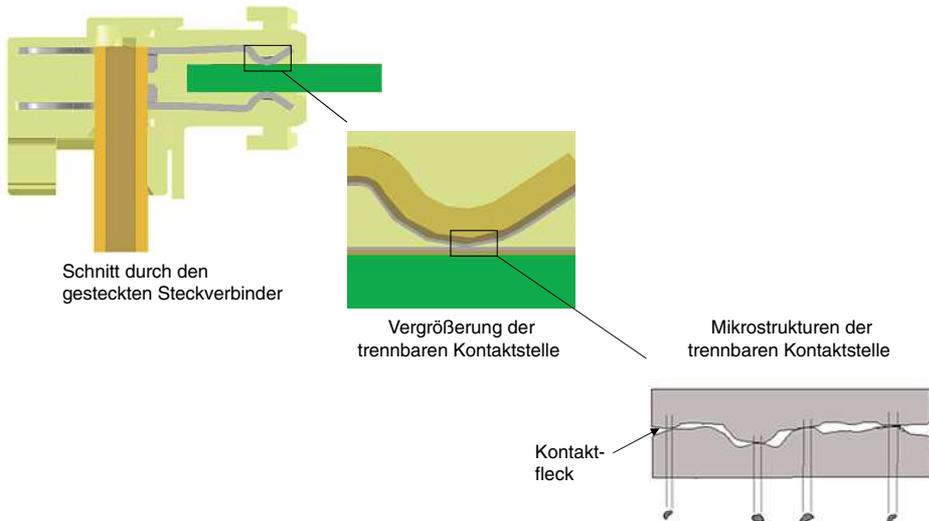


Bild 6.1 Analyse eines Kontaktpunktes

Diese Kontaktflecken (Bild 6.2) sind Einengungsbereiche für den Strom in der Kontaktstelle und der eigentliche Grund für den Kontaktübergangswiderstand. Der Strom muss sich also durch diese Kontaktflecken seinen Weg suchen.

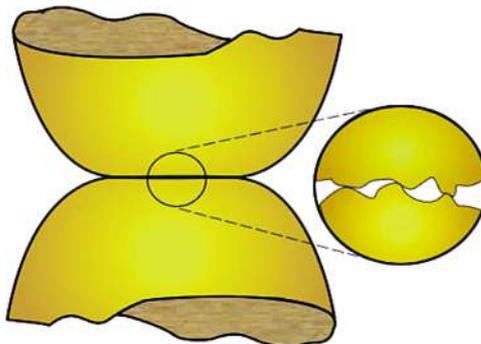


Bild 6.2 Kontaktflecken

In den Einengungsbereichen laufen viele Stromlinien parallel und zwingen sich durch die Kontaktflecken (Bild 6.3).

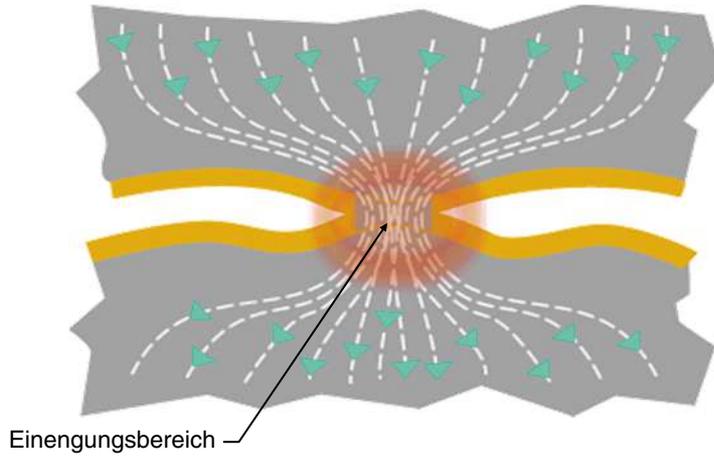


Bild 6.3 Strombündelung im Einengungsbereich

Aufgrund dieses Effektes kann man nicht beliebig viel Strom über einen Kontaktpunkt leiten. Man muss also bei Hochstrom-Steckverbindungen mehrere Kontakte parallelschalten!



TIPP

Informationen über die physikalischen Eigenheiten der Kontakte im Detail erfahren Sie im Expertenbeitrag 7 «Kontaktphysik» in diesem Buch.

7 Verschiedene Kontaktoberflächen

Korrosion ist das große Problem bei Steckverbinderkontakten – egal, ob einzelne Kontaktflecken durch Korrosion blockiert werden oder ob der gesamte Kontakt ausfällt. Aus diesem Grund werden Kontaktbasismaterialien generell durch Oberflächenbehandlung gegen Korrosion geschützt.

TIPP

Informationen über Kontaktoberflächen in Einzelheiten erfahren Sie im Expertenbeitrag 8 «Oberflächen für Steckverbinderkontakte» in diesem Buch.



Es gibt edle Metalle wie Gold, Palladium oder Silber. Aus Kostengründen versucht man die veredelten Kontaktpunkte so dünn wie möglich zu machen. Dünne Oberflächen unter 2 µm sind galvanisch nicht porenfrei aufzubringen, weshalb es einer sogenannten Sperrschicht unter den Kontaktoberflächen bedarf, die verhindert, dass die unedlen Atome der Basismaterialien durch die dünne Veredelung an die Oberfläche wandern und sich dort Korrosion bildet, die die Anzahl der Kontaktflecken reduziert und damit den Kontaktübergangswiderstand erhöht. Als preiswerte und zuverlässige Sperrschicht hat sich Unternickelung in Schichtstärken um 2 µm erwiesen.

7.1 Nickel

Die Nickel-Sperrschichten sorgen dafür, dass Atome der Kontaktbasismaterialien nicht in die Funktionsschicht an der Kontaktoberfläche gelangen und dort intermetallische Phasen oder Korrosion erzeugen können. Den Vorgang nennt man Diffusion; er ist die Bewegung von Teilchen innerhalb einer Substanz. Sie beruht nicht auf äußeren Kräften, sondern ist rein thermisch bedingt und wird in der Literatur als Brownsche Molekularbewegung beschrieben. Durch diese thermische Fluktuation findet ein bedingter Platzwechsel von Atomen oder Ionen statt, der im Laufe der Zeit zur Durchmischung zweier oder mehrerer Stoffe führt.

INTERNET

Siehe auch Diffusion in: http://de.wikibooks.org/wiki/Werkstoffkunde_Metall/_Innerer_Aufbau/_Legierung#Zweistoffsysteme_mit_vollst.C3.A4ndiger_Unl.C3.B6slichkeit
[Short-URL: bit.ly/2JkciIE]



Aufgrund seiner besonderen Eigenschaften ist Nickel für viele Anwendungen als Überzugsmaterial besonders gut geeignet. Nickel ist gegen Luft, Wasser, verdünnte Säuren und die meisten Laugen – aber nicht gegen Salpetersäure, konzentrierte Salzsäure und Ammoniak – beständig. Allerdings ist der Kontaktübergangswiderstand bei Nickeloberflächen zu hoch für Elektronikanwendungen, aber gut genug für die Schuko-Netzstecker.

Die Nickel-Sperrschicht verhindert, dass Atome der unedlen Basismetalle durch die (dünne) Oberflächenveredelung diffundieren und Korrosionsablagerungen bilden.

Allerdings dürfen Basismaterialien mit derartig aufgetragenen Sperrschichten nicht mehr stark verformt werden, weil die Nickelsperrschichten sonst aufbrechen würden. Auch bei verzinneten Kontakten hat sich die Einbringung von Nickelsperrschichten bewährt, um bei Durchrieb Korrosionssicherheit zu erhalten.

7.2 Gold

Gold ist nach wie vor die am weitesten verbreitete Veredelung in der Kontakttechnologie und wird üblicherweise als Hartvergoldung (Kobalt-dotiert) mit $0,1\ \mu\text{m}$ (für Consumer-Produkte), $0,38\ \mu\text{m}$ (für Büroprodukte) und $0,76\ \mu\text{m}$ (für professionelle Produkte) Schichtstärke aufgebracht. Die «krummen» Werte kommen aus der Umrechnung von Inch in Mikrometer ($0,76\ \mu\text{m} = 30\ \mu\text{Inch}$). Besonders wichtig bei der Abscheidung der Oberflächen in der Galvanik ist die Porenfreiheit. Poren in der Oberfläche erlauben es den unedlen Atomen des Kontakt-Basismaterials, an die Oberfläche zu kommen und Korrosion aufzubauen. Aus diesem Grund verwendet man unter dem Gold eine Nickel-Sperrschicht, die wir uns noch im Detail ansehen.

7.3 Palladium

Palladium als Oberfläche hat in reinem Zustand die Eigenschaft, mit Hilfe von Stickstoff aus der Luft sogenanntes Brown Powder abzuscheiden, was einen hohen Kontaktübergangswiderstand zur Folge hat. Palladium-Nickel (Pd-Ni) zeigt keinen Brown-Powder-Effekt und ist deshalb ebenfalls als Kontaktoberfläche geeignet. Palladium wurde in den 1990er-Jahren als Goldersatz in Erwägung gezogen, weil damals Palladium weit billiger war als Gold. Zwischenzeitlich haben sich die Rohstoffpreise relativiert und Palladium-Nickel wird dort eingesetzt, wo es auf besonders harte Oberflächen für viele Steckzyklen ankommt. Um zu verhindern, dass der Nickelanteil der Pd-Ni-Legierung passiviert, müssen Palladium-Nickel-Oberflächen mit einer Hauchvergoldung geschützt werden.

7.4 Silber

Silber ist das Edelmetall mit der besten Leitfähigkeit, weshalb man Silberoberflächen besonders oft bei Hochstromverbindern und Stromschienen einsetzt. Silber reagiert mit dem Schwefel in der Luft zu leitfähigem Silbersulfid (Ag_2S) mit brauner Oberfläche (Anlaufen von Silberbesteck). Je länger dieser Vorgang dauert, desto mehr Silber wird umgesetzt, was zu einer Reduzierung der Silberdicke führt. Dies ist für die Funktion unkritisch, solange der Steckverbinder im gesteckten Zustand ruht. Allerdings fällt das Silbersulfid dann beim nächsten Steckvorgang ab und die Oberfläche ist beschädigt. Deshalb werden Silberschichten immer $>2\ \mu\text{m}$ aufgetragen.

Gold, Palladium und Silber funktionieren bei Kontaktnormalkräften über $0,4\ \text{N}$.

7.5 Zinn

Zinn ist die preiswerteste Oberfläche, um Korrosion zu vermeiden. Allerdings bildet Zinn Oxide, die durchgerieben werden müssen, was wesentlich höhere Kontaktnormalkräfte erfordert (größer $2\ \text{N}$). Zinn hat außerdem die Eigenschaft der Whisker-Bildung – ein unangenehmer Effekt, der bei Temperaturschwankungen auftritt und feine Härchen von bis zu $0,3\ \text{mm}$ Länge erzeugt. Um Whisker-Bildung nach der Elektrolyse zu vermeiden, werden den Galvanikbädern Additive zugesetzt. Whisker-Bildung tritt nicht auf, wenn galvanische Oberflächen wärmebehandelt werden oder einen Reflow-Prozess durchlaufen. Auch feuerverzinnte Oberflächen zeigen keine Whisker-Bildung. Wegen der höheren Kontaktnormalkräfte haben verzinnte Steckverbinder höhere Steck- und Ziehkräfte.

Zinn funktioniert bei Kontaktnormalkräften über $2\ \text{N}$.

7.6 Multilayer

In den letzten Jahren arbeitet man auch an Zinn-Silber-Legierungen, sogenannten Multilayern, in der Oberfläche, um preiswert goldähnliches Verhalten der Kontakte zu erreichen.

TIPP

Nähere Informationen über die Oberfläche erfahren Sie im Expertenbeitrag 9 «Neue hochleistungsfähige Beschichtungen für Steckverbindersysteme» in diesem Buch.



7.7 Nickel-Sperrschicht

Alle genannten Oberflächenbehandlungen erfordern eine Nickel-Sperrschicht, die das Wandern von unedlen Atomen aus dem Basismaterial in die Oberfläche blockiert. Da jedoch Nickelsperrschichten insbesondere bei Anwendungen im Magnetfeld stören, gibt es besondere Oberflächen für den Einsatz in der **Magnetresonanztomographie (MRT)**:

- Phosphor-Nickel-Oberflächen sind antimagnetisch, ebenso die ursprünglich im Militärbereich eingesetzten
- Oberflächen mit dicken Goldschichten ($\sim 2 \mu\text{m}$) über Kupfer-Zwischenschichten.

7.8 Kontakte aus vorveredelten Bandmaterialien

Kontakte aus vorveredelten (streifenvergoldeten) Bandmaterialien können preiswerter hergestellt werden, weil ein zusätzlicher Veredelungsprozess nach dem Stanzvorgang eingespart wird. In solchen Fällen gilt es die Stanzkanten möglichst weit entfernt von den Kontaktpunkten zu designen, damit Korrosion nicht in der Nähe vom Kontaktpunkt stattfindet. Rohe Stanzkanten bei derartig gefertigten Einlöt-Steckverbindern können Lötprobleme am Pinende bereiten!

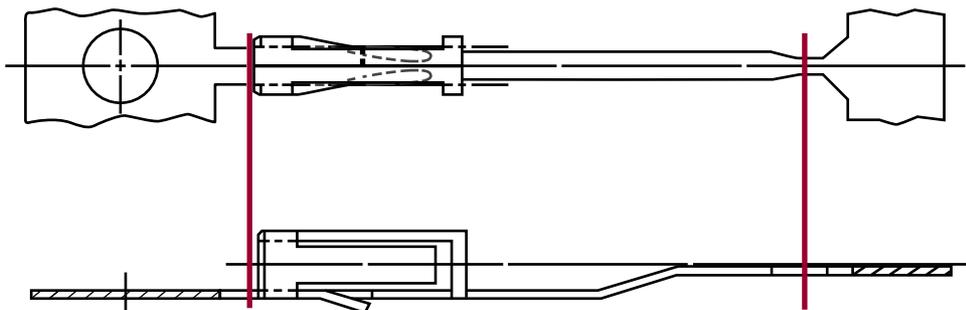


Bild 7.1 Offene Stanzkanten im Kontakt- und Einlötbereich

Außerdem ist zu beachten, dass streifenvernickelte Bänder bei anschließenden Biegevorgängen aufbrechen können, d.h., die Unternickelung kann bei kleinen Biegeradien aufplatzen und die Nickelsperre verliert ihre Funktion.

7.9 Kontaktgabe zwischen unterschiedlichen Kontaktoberflächen

Die Kontaktgabe zwischen zwei unterschiedlichen Kontaktoberflächen sollte in jedem Fall vermieden werden. Insbesondere Gold mit Zinn erzeugt unter Einfluss von Feuchte gemäß der elektrochemischen Spannungsreihe eine EMK von 1,56 V, was in analogen Systemen zu Spannungsverfälschungen führt und digitale Systeme bei der Signalerkennung irritiert. Bei der Kombination von Silber und Zinn ist diese EMK 0,94 Volt. Neueste Forschungen zeigen, dass wärmebehandelte Zinn-Silber-Legierungen dieses Problem umgehen können.

Derartige Fehlkombinationen sind insbesondere bei FFC-Leitungen (verzinnt) mit FFC-Steckverbindern (vergoldet) zu finden. Bei Kombinationen von Steckverbindern werden immer dann Fehler gemacht, wenn eine Kostenreduzierungsmaßnahme von Gold auf Zinn und die Paarungen im Feld nicht sichergestellt werden können (Ersatzteile usw.).

In Kürze

Kontaktoberflächen müssen immer identisch sein und sind je nach Einsatzfall abzuwägen. Vergoldete Kontakte sind die beste Lösung, aber preiswertere verzinnte Oberflächen bieten sich ebenfalls als Lösung an – vorausgesetzt, Mikrobewegungen werden vermieden und die geringeren Steckzyklen und die höheren Steck- und Ziehkräfte sind akzeptabel.

Um die bisher gängigen und «erlaubten» Kombinationen von edlen und unedlen Kontaktoberflächen weiter zu untersuchen, sind wir etwas tiefer in die Physik eingestiegen und haben besonders die Tatsache, dass Silber mit Zinn und Silber mit Gold «erlaubt» sind, jedoch Zinn mit Gold eine nicht erlaubte Kombination sind, unter die Lupe genommen:

«Edle und unedle Ehen» – kann man unterschiedliche Oberflächen verheiraten?

Wir sind uns bewusst, dass die folgende These in Bezug auf gemischte Kontaktoberflächen auf wackeligen Beinen steht. Oberflächlich betrachtet würde bei einem normalen Kontaktübergangswiderstand von 5 Milliohm und einer inneren elektromotorischen Kraft von 1 V ein Ausgleichsstrom von 200 A fließen. Dies ist sicher nicht der Fall! Vielleicht ergibt sich aus den theoretischen Betrachtungen und den praktischen Erfahrungen ein Ansatz, das Verhalten von gemischten Kontaktoberflächen weiter zu analysieren.

Kontakt Grundmaterialien sind unedel und korrosionsanfällig. Messing oder Phosphorbronze erzeugen Patina und Grünspan. Deshalb werden diese Grundmaterialien oberflächenbehandelt: Mit Gold, Palladium, Palladium-Nickel, Silber oder Zinn. Wegen der dünnen veredelten Oberflächen werden diese unternickelt, um Molekülwanderung aus dem Basismaterial auf die Oberfläche zu unterbinden.

Der Hintergrund für diese Unternickelung ist die brownische Molekularbewegung. Durch thermische Einflüsse «bewegen sich» Atome innerhalb von Kristallgittern in Metallen. An den Grenzflächen unterschiedlicher Metalle können Atome in das Gitter des Nachbarmetalls wandern. Diese Diffusion wird durch den Diffusionskoeffizienten beschrieben, der umso kleiner ist, je größer

die Aktivierungsenergie für die Wanderung bei einer definierten Temperatur ist. Fremdatome diffundieren durch dünne Metallüberzüge, was als Interdiffusion beschrieben wird.

Die Diffusion von Kupfer in Nickel ($D = 1,3 \times 10^{-22} \text{ m}^2/\text{s}$ bei $500 \text{ }^\circ\text{C}$) ist extrem gering, sie wird bei niedrigen Temperaturen entschleunigt.

Tabelle 7.1 zeigt eine Übersicht der Diffusionsgeschwindigkeiten unterschiedlicher Metallatome in andere Gastmetalle (engl.: *host metals*):

Tabelle 7.1 Diffusionsgeschwindigkeiten unterschiedlicher Metallatome
 [Quelle: <http://www.engineeringenotes.com/metallurgy/diffusion/diffusion-meaning-types-and-mechanisms-solids-metallurgy>]

Diffusing species	Host metal	$D_0 \text{ (m}^2/\text{s)}$	Activation energy Q		Calculated values	
			kJ/mole	eV/atom	T(°C)	D (m ² /s)
Fe	α-Fe (B.C.C.)	2.8×10^{-4}	251	2.60	500	3.0×10^{-21}
					900	1.8×10^{-15}
Fe	γ-Fe (F.C.C.)	5.0×10^{-5}	284	2.94	900	1.1×10^{-17}
					1100	7.8×10^{-16}
C	α-Fe	6.2×10^{-7}	80	0.83	500	2.4×10^{-12}
					900	1.7×10^{-10}
C	γ-Fe	2.3×10^{-5}	148	1.53	900	5.9×10^{-12}
					1100	5.3×10^{-11}
Cu	Cu	7.8×10^{-5}	211	2.19	500	4.2×10^{-19}
Zn	Cu	2.4×10^{-5}	189	1.96	500	4.0×10^{-18}
Al	Al	2.3×10^{-4}	144	1.49	500	4.2×10^{-14}
Cu	Al	6.5×10^{-5}	136	1.41	500	4.1×10^{-14}
Mg	Al	1.2×10^{-4}	131	1.35	500	1.9×10^{-13}
Cu	Ni	2.7×10^{-5}	256	2.65	500	1.3×10^{-22}

Damit sich keine Differenzspannung an den Kontaktoberflächen aufbaut, sollten die Oberflächenpaare einer Steckverbindung mit dem gleichen Material veredelt sein – also Gold auf Gold, Silber auf Silber oder Zinn auf Zinn.

Wenn wir die elektrochemischen Spannungsreihe betrachten, hat jedes Element ein Standardpotenzial E^0 , welches relativ zum Wasserstoff gemessen ist. Wasserstoff hat das Standardpotenzial 0 V. Werden nun zwei unterschiedliche Metallelektroden in eine Lösung eingetaucht und elektrisch leitend verbunden (Ionenbrücke), so kann man an den beiden Elektroden eine Spannung messen. Es ist aber zusätzlich zu den beiden sich berührenden Metallelektroden zumindest Feuchtigkeit an der Kontaktstelle notwendig. Die erzeugte Spannung führt zu Ionenwanderung und im Extremfall auch zu Korrosion.

Damit ergeben sich bei den infrage kommenden Kontaktoberflächen folgende Differenzspannungen:

- Gold ↔ Silber: $1,42\text{V} \text{ minus } 0,80\text{V} = 0,64 \text{ V}$
- Silber ↔ Zinn: $0,80\text{V} \text{ minus } (-0,14\text{V}) = 0,94\text{V}$
- Gold ↔ Zinn: $1,42\text{V} \text{ minus } (-0,14\text{V}) = 1,56 \text{ V}$

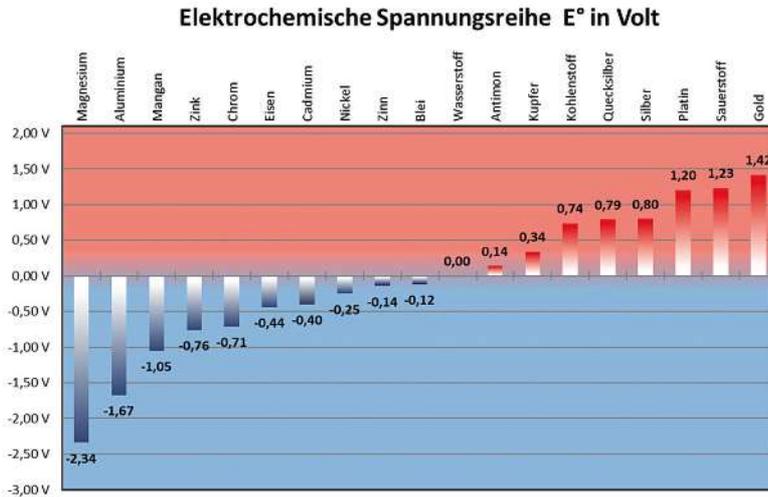


Bild 7.2 Elektrochemische Spannungsreihe E° in Volt
[Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Elektrochemische_Spannungsreihe]

Es fällt auf, dass bei den «erlaubten» Kombinationen die maximale Differenzspannung 0,94 V ist, während bei der «unerlaubten» Kombination Gold mit Zinn die Differenzspannung 1,56 V beträgt.

Was könnte hinter diesen Beobachtungen stecken?

Die PEM-Elektrolyse hat im Zuge der Erforschung von neuen Speichertechnologien für erneuerbare Energien an Aktualität gewonnen.

Wind- und Solar-Kraftwerke erzeugen Energie oft dann, wenn sie nicht gebraucht wird. Durch die PEM-Elektrolyse kann aus Wasser mit der überschüssigen Energie Wasserstoff und Sauerstoff erzeugt werden. Diese Gase können gespeichert und später auf unterschiedliche Weise in Energie zurück gewandelt werden (vgl. Bild 7.3).

Funktionsprinzip PEM-Elektrolyse

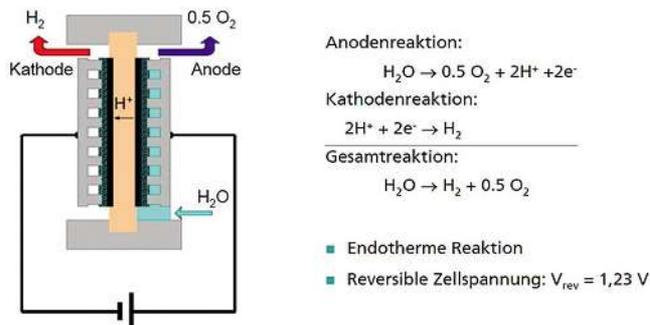


Bild 7.3 Funktionsprinzip PEM-Elektrolyse
[Quelle DLR: https://elib.dlr.de/75764/1/Wasserelektrolyse_Ulmer_Gesprach_3.5.2012_GS.pdf]

Das Funktionsprinzip der PEM-Elektrolyse zeigt, dass Feuchtigkeit allein nicht zu Korrosion führen kann. Da das Wasser eine Zersetzungsspannung von 1,23 V hat, wird bei Spannungsdifferenzen unter 1,23 V kein Zerfall von zwei Molekülen eingeleitet. Es wird also keine Korrosion im herkömmlichen Sinne stattfinden.

Im Umkehrschluss wird bei Spannungen über 1,23 V eine Zersetzung der Wassermoleküle stattfinden, die Korrosion hervorrufen kann. Solange wir also Oberflächen paaren, welche eine kleinere EMK als 1,23 V generieren, sollte Kontaktkorrosion kein Problem sein.

Also sind die Paarungen Gold mit Silber oder Silber mit Zinn akzeptabel, während bei der Paarung Gold mit Zinn mit 1,56 V eine Ersetzung der Wassermoleküle, und damit unter Umständen Korrosion, hervorgerufen werden kann.

Leider liegen in diesem Bereich (noch) nicht genügend Erfahrungen vor, um diese theoretischen Betrachtungen zu untermauern.

TIPP

Im diesem Praxishandbuch Steckverbinder bewertet Dipl. Ing. Helge Schmidt im Kapitel 8.8 (Zusammenfassung und Einsatzempfehlungen Seite 284) auch die Hintergründe für diese Kreuzbarkeiten.



Beispiele aus der Praxis bezüglich unterschiedlichen Kontaktoberflächen:

Hochstrom-Steckverbinder

Eine Hochstrom-Steckverbinderfamilie mit verzinnnten Kontaktoberflächen wird für obsolet erklärt, weil sich Reibkorrosionsprobleme im Einsatz bei starker Vibration aufgetan haben. Die gleiche Steckverbinderfamilie ist mit vergoldeten Kontaktoberflächen lieferbar. Ein Mischen Gold ↔ Zinn kann aus bekannten Gründen nicht empfohlen werden. Ein Umstieg auf vergoldete Kontakte und eine Bevorratung der obsoleten verzinnnten Kontakte scheitert an der Logistik bezüglich der Ersatzteilversorgung im Feld. Die Hochstrom-Steckverbinderfamilie wird jetzt in Serie mit versilberten Kontakten geliefert. Damit ist ein Umsteigen vom obsoleten, aber im Feld befindlichen, verzinnnten Kontakten auf versilberte Ersatzleitungen möglich! Die Paarung Gold ↔ Silber wäre zwar auch möglich, macht jedoch keinen Sinn.

FFC-Verbinder

Ein Kunde berichtet über Probleme mit einem FPC-Steckverbinder (engl.: *Flexible Printed Circuit*), welcher die Verbindung eines industriellen Touchscreens zum Elektronikbord realisiert:

- Die digitalen Tastbefehle funktionieren immer.
- Bei den «analogen» Wischfunktionen treten stochastische Störungen auf.

Nach längerer Diskussion stellt sich heraus, dass der FPC-Anschluss des Touchscreens vergoldete Anschlüsse hat, während der eingesetzte FPC-Steckverbinder verzinnnte Kontakte besitzt. Nach der Empfehlung auf das baugleiche vergoldete FPC-Produkt umzustellen, kam leider keine Rückmeldung.

Warum funktionieren die digitalen Tastbefehle während im analogen Bereich Störungen auftreten?

Die elektromotorische Kraft in der trennbaren Kontaktstelle wird (bei Feuchteinfluss und je nach Oberflächenpaarung) eine kleine oder größere Differenzspannung aufbauen. Die dadurch mögliche Signalverfälschung sollte vermieden werden, indem gleiche Oberflächen gepaart werden. Selbst die geringe Differenz EMK von 0,64 V zwischen Gold und Silber kann kritisch werden, was in den drei untenstehenden Beispielen anhand eines 3,3-V-LVT-Signales gezeigt wird.

Identische Oberflächen

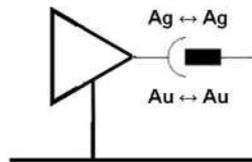


Bild 7.4a

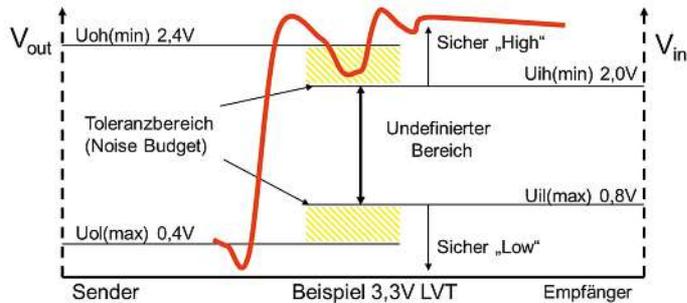


Bild 7.4b

Unterschiedliche Oberflächen Ag > Au

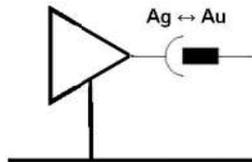


Bild 7.5a

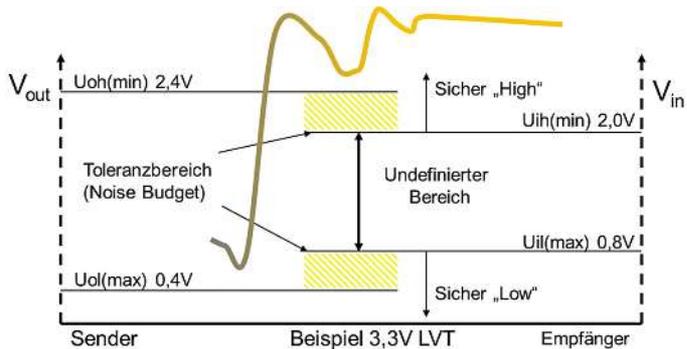


Bild 7.5b

Unterschiedliche Oberflächen $A_u > A_g$

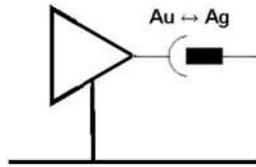


Bild 7.6a

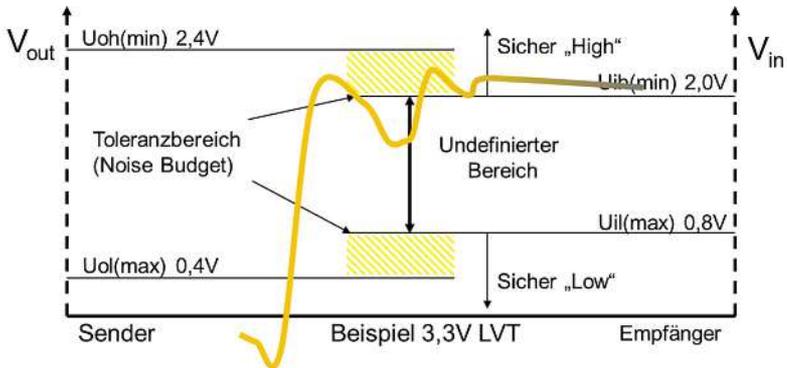


Bild 7.6b

8 Kontaktwiderstand

Bevor wir den Kontaktwiderstand im Detail betrachten, müssen wir uns über den Einfluss der unterschiedlichen Oberflächenbehandlungen in Bezug auf den Kontaktwiderstand im Klaren sein.

Die 1990 herausgegebene Arbeit [2] enthält die theoretischen Ableitungen hierzu.

Der Ausdruck für den Kontaktwiderstand R_C bei einer definierten Stromeinschnürung ist von HOLM wie folgt abgeleitet worden:

$$R_C = \frac{\rho}{\pi \cdot a} \cdot \arctan\left(\frac{h}{a}\right) \quad (\text{Gl. 8.1})$$

Dabei ist ρ der spez. Materialwiderstand, h die Einschnürungstiefe (d.h. die Materialdicke) und a der Radius der Berührungsfläche, die von der senkrecht wirkenden Kraft F_C (Kontaktnormalkraft) erzeugt wird. Da die Materialdicke h wesentlich größer ist als der Radius a der Berührungsfläche, geht der \arctan gegen $\pi/2$, so dass sich näherungsweise der Kontaktwiderstand R_C ergibt zu:

$$R_C = \frac{\rho}{2 \cdot a}$$

Für den Radius a der Berührungsfläche gilt, abgeleitet vom Hertztheorem nach dem Konvexradius r :

$$a = 1,1 \cdot \left(\frac{F_C \cdot r}{E}\right)^{1/3}$$

Dabei ist E das Materialmodul nach YOUNG.

Setzt man nun den Radius vom Hertztheorem in die Kontaktwiderstandsformel nach HOLM ein, so erhält man:

$$R_C = \frac{\rho}{(2,2r^{1/3} \cdot E^{-1/3})} \cdot F_C^{-1/3} \quad \text{oder} \quad R_C = k_C \cdot F_C^{-n} \quad (\text{Gl. 8.2})$$

wobei k_C die Materialkonstante, F_C die Kontaktnormalkraft und n der Faktor $1/3$ ist.

Wir stellen also fest, dass der Kontaktwiderstand von der dritten Wurzel der Kontaktnormalkraft abhängig ist.

Wenn jetzt das Basismaterial (mit dem spezifischen Widerstand ρ_m) mit einem metallischen Überzug (mit dem spezifischen Widerstand ρ_f der Dicke e) versehen wird, dann sind im Kontaktpunkt zwei Einschnürungen in Serie in den beiden Materialschichten vorhanden, das Basismaterial der Dicke h und die Überzugsschichtstärke e . Demzufolge kann man aus Gl. 8.1 den Gesamtwiderstand R_{CC} ableiten als:

$$R_{CC} = \frac{1}{\pi \cdot a} \cdot \left(\rho_m \cdot \arctan\left(\frac{h}{a}\right) + \rho_f \cdot \arctan\left(\frac{e}{a}\right) \right)$$

... oder analog zur obigen Ableitung mit dem Radius vom Hertztheorem zu diesem Ergebnis kommen:

$$R_{CC} = \frac{1}{(1,1\pi r^{1/3} \cdot E^{-1/3})} \cdot \left(\rho_m \cdot \arctan\left(\frac{h}{a}\right) + \rho_f \cdot \arctan\left(\frac{e}{a}\right) \right) \cdot F_c^{-1/3} \quad (\text{Gl. 8.3})$$

Dabei ist E jetzt das Materialmodul des Überzuges nach YOUNG. Es gilt, dass bei hohen Kontaktkräften $a \gg e$ ist und $h \gg e$ ist.

Betrachtet man die Steck- und Ziehkraft (oder Reibkraft) des Kontaktes, so wirkt beim Stecken mit einer gegebenen Kontaktnormalkraft F_c die folgende Reibkraft F_i entgegen:

$$F_i = \Psi \cdot S$$

wobei Ψ die Reibungskonstante pro Materialoberfläche und S die Kontaktfläche ist.

Diese Fläche ist

$$S = \pi \cdot a^2 = 1,21 \cdot \pi \cdot \left(\frac{F_c \cdot r}{E} \right)^{2/3}$$

Der Reibkoeffizient ist umgekehrt proportional der Materialhärte H ($\Psi = 1/H$), so dass sich folgende Abhängigkeit der Reibkraft von der Kontaktnormalkraft ergibt:

$$F_i = 1,21 \cdot \pi \cdot H \cdot f \left(\frac{r}{E} \right)^{2/3} \cdot F_c^{2/3}$$

Wie angenommen, reduziert sich der Kontaktwiderstand bei höherer Kontaktnormalkraft mit dem Exponenten $\sqrt[3]{r}$, gleichzeitig erhöhen sich aber die Steck- und Ziehkraft mit dem Exponenten $\sqrt[3]{2}$. Es muss also ein Kompromiss von Kontaktnormalkraft und Steck- und Ziehkraft eingegangen werden.

Wie man aus dem Diagramm für verzinnte Oberflächen (Bild 8.1) ersehen kann, nimmt der Kontaktübergangswiderstand bei Erhöhung der Kontaktnormalkraft ab und geht in Sättigung. Bei weiterer Erhöhung der Kontaktnormalkraft wird kein niedrigerer Kontaktübergangswiderstand erreicht. Jedoch würden sich die Steck- und Ziehkraft des Kontaktes sowie der Abrieb der Oberfläche erhöhen und damit die Anzahl der möglichen Steckzyklen über die Lebensdauer reduziert werden, was nicht erwünscht ist.

Aufgrund der Berechnungen aus der Hertzschen Flächenpressung haben sich minimale Kontaktnormalkräfte von 0,4 Newton (40 Gramm) bei Gold-, Palladium-Nickel- und Silberoberflächen und 2 Newton (200 Gramm) bei verzinneten Oberflächen – jeweils zum Lebensdauerende betrachtet – bewährt.

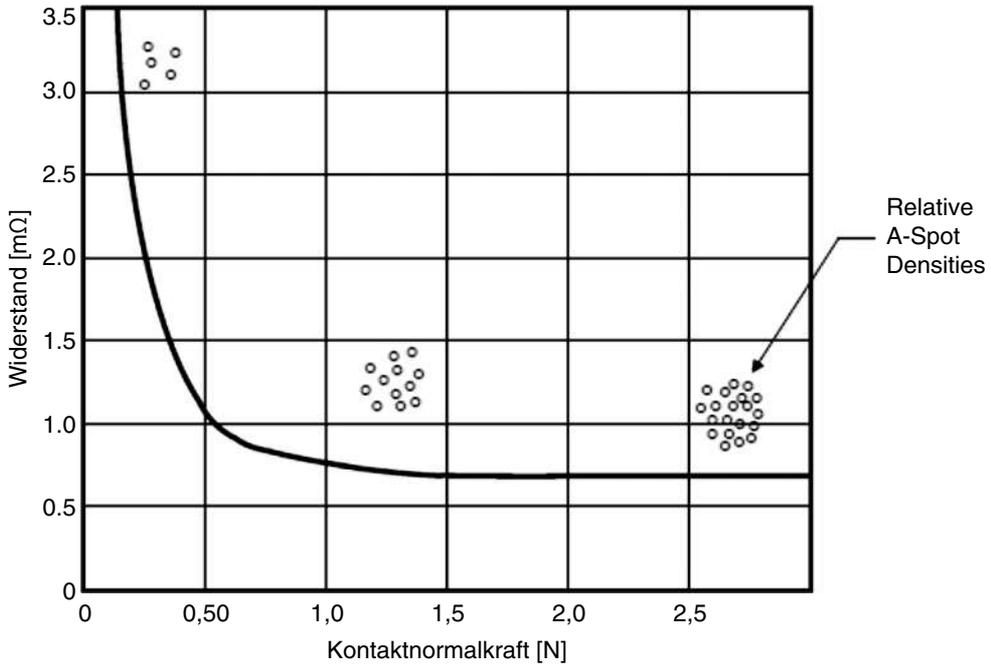


Bild 8.1 Kontaktwiderstand in Abhängigkeit von der Kontaktnormalkraft bei verzinneten Oberflächen

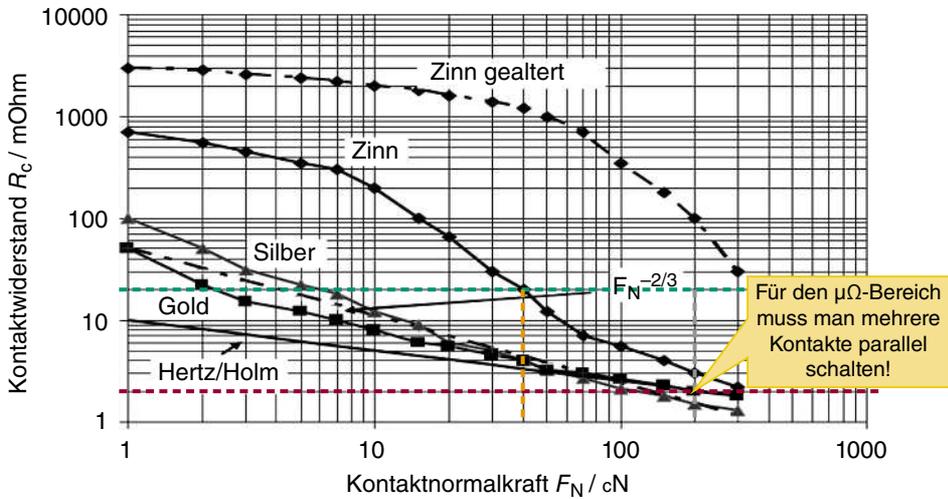


Bild 8.2 Kontaktwiderstand in Abhängigkeit der Kontaktnormalkraft für unterschiedliche Oberflächen [Q.4]

Dieses Diagramm (Bild 8.2) zeigt die Abhängigkeit des Kontaktwiderstandes von der Kontaktnormalkraft für Gold, Silber, Zinn und gealtertem Zinn. Die grüne horizontale Linie liegt bei 20 Milliohm und zeigt damit die akzeptable Grenze für Signalsteckverbinder und Kleinleistungssteckverbinder. Man sieht deutlich, dass sich daraus die entsprechenden Minimalkontakte

kräfte (über die gesamte Lebensdauer) für Gold von 0,4 N (gelbe Vertikale) und für Zinn von 2 N (graue Vertikale) ermitteln lassen. Die Kurve für gealterten Zinn liegt außerhalb des Arbeitsbereiches, weshalb es kritisch ist, im Feld nicht gesteckte Steckverbinder (z.B. Servicestecker) mit Zinnoberflächen zu versehen.

Die braune horizontale Linie bei 2 Milliohm zeigt den Grenzwert für Leistungssteckverbinder an. Man erkennt, dass derartig niedrige Kontaktübergangswiderstände nicht durch einen Kontaktpunkt realisiert werden können.

Die Abhängigkeiten in Bezug auf den Kontaktübergangswiderstand sind im Folgenden aufgelistet:

- Die Kontaktnormalkraft und Kontaktgeometrie entscheiden über die Verteilung der Kontaktflecken.
- Die Oberflächenveredelung über die gesamte Kontaktfläche beeinflusst die Anzahl und die Verteilung der Kontaktflecken.
- Die Oberflächenrauigkeit ist maßgeblich für die Anzahl der Kontaktflecken pro Flächeneinheit verantwortlich.
- Die Kontaktnormalkraft beeinflusst die Steck- und Ziehkräfte des Einzelkontaktes, aber auch die maximalen Steckzyklen des Steckverbindersystems.
- Die Oberflächenveredelung wird also von den notwendigen Steckzyklen und den geforderten Steck- und Ziehkräften und somit vom Einsatzfall definiert.

In der Praxis werden Kontaktübergangswiderstände im jungfräulichen Zustand von maximal 20 Milliohm gefordert. Nach Absolvierung von Steckzyklen-, Umwelt- und Lebensdauertests wird eine weitere Variation des Übergangswiderstandes von 5 Milliohm (Gold und Silber) bzw. 20 Milliohm (Zinn) zugelassen. Diese Grenzwerte können also mit Zinn-, Silber- oder Goldkontakten eingehalten werden. Bei Hochstromkontakten (40 Milliohm Übergangswiderstand bei 10 A würden eine Verlustleistung von 4 W zur Folge haben) müssen mehrere Kontaktfedern parallelgeschaltet werden, um die Temperaturüberhöhung im Kontaktpunkt unter Kontrolle zu halten. Hier scheiden dann Zinnoberflächen aus.

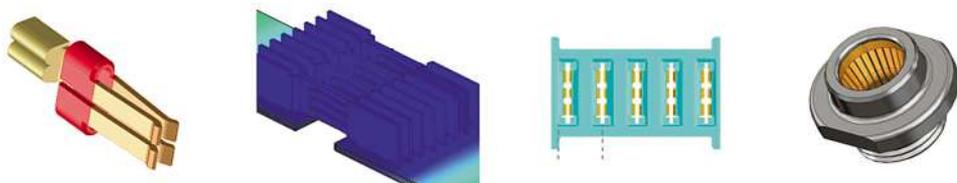


Bild 8.3 Unterschiedliche Parallelkontaktausführungen

Die Kontaktnormalkräfte müssen entsprechend den Oberflächen eingestellt werden. Gold ist mit 0,4 N zufrieden, Zinn benötigt 2,0 N Kontaktnormalkraft (CNF) – beide Werte nach Relaxation, d.h. über die gesamte Lebensdauer.

Die Steck- und Ziehkräfte betragen maximal 80% der Kontaktnormalkräfte, so dass man für den gesamten Steckverbinder (n Kontakte inkl. Gehäuse) mit $0,8 \cdot n \cdot \text{CNF}$ rechnen kann.

Beim ersten Steckvorgang im Neuzustand rechnet man bei Gold bis zu 1 N pro Kontakt und bei Zinn bis zu 5 N pro Kontakt.

8.1 Kontaktwiderstand und Temperatur

Wie schon bei den Kontaktmaterialien erwähnt, haben Strombelastung und die aufgrund des Kontaktwiderstandes generierte Temperaturüberhöhung immensen Einfluss auf die Federeigenschaften und die Kontaktnormalkraft und durch die Relaxation bedingt auf die Lebensdauer des gesamten Steckverbindersystems.

Die Temperaturüberhöhung durch den Strom beschleunigt die Relaxation des Basismaterials, somit muss bei der Lebensdauerbetrachtung auch die Strombelastung des Kontaktes berücksichtigt werden (Derating). Nach UL-Norm wird der Nennstrom definiert, wenn die Temperaturüberhöhung 30 °C am Kontaktpunkt erreicht. Es gilt:

$$f \text{ (Strom und Wärmeabfuhr)} \rightarrow T_{\text{Kontaktpunkt}} - T_{\text{Umgebung}} = T_{\text{Erhöhung}}$$

$$f \text{ (Material und Lebensdauer)} \rightarrow T_{\text{maximal}} - T_{\text{Erhöhung}} = T_{\text{Arbeitsbereich}}$$

Beispielprodukt bei 10 A → 30 °C Erhöhung + 24 °C Umgebung = 54 °C Kontaktpunkt

Beispiellegierung CuNi2Si +115 °C maximal – 30 °C Erhöhung = +85 °C

Arbeitsbereich → bei 10 A

Tabelle 8.1 Die Larsson-Miller-Parameter-Analyse aus Lebensdauererwartung oder Kontakttemperatur

Für P = 9,5 (max. 85% Federkraft verbleibend) gilt:			← CuNi2Si C70260		
Zeit "t":	200000	Stunden	► Temperatur "T"	102,5	°C
Temperatur "T":	115	°C	► Zeit "t"	30516,6	Stunden

Die Larsson-Miller-Parameter-Analyse des Beispiels zeigt, dass bei andauernder Temperatur von +115 °C im Kontaktpunkt, die bei 10 A Dauerstrom und einer dauerhaften Umgebungstemperatur von +85 °C erreicht wird, eine Lebensdauererwartung von über 30 000 Stunden zu erwarten ist, wenn man eine Relaxation der Federkraft von 15% als zulässig definiert.

Bei schwankenden Umgebungstemperaturen oder unterschiedlichen Strömen kann man mit dem geometrischen Mittelwert rechnen, also:

Zeit A · Temperatur bei Strom A plus Zeit B · Temperatur bei Strom B plus Zeit C · Temperatur bei Strom C geteilt durch Gesamtzeit A + B + C gleich Durchschnittstemperatur

Mit der Durchschnittstemperatur geht man dann in die Larsson-Miller-Analyse und ermittelt die zu erwartenden Lebensdauer.

Die Deratingkurve nach IEC/EN 60 512-5-2 baut hier zusätzlich noch eine Sicherheit von 20% (von der Base Curve zur De-rate Curve) ein (Bild 8.4).

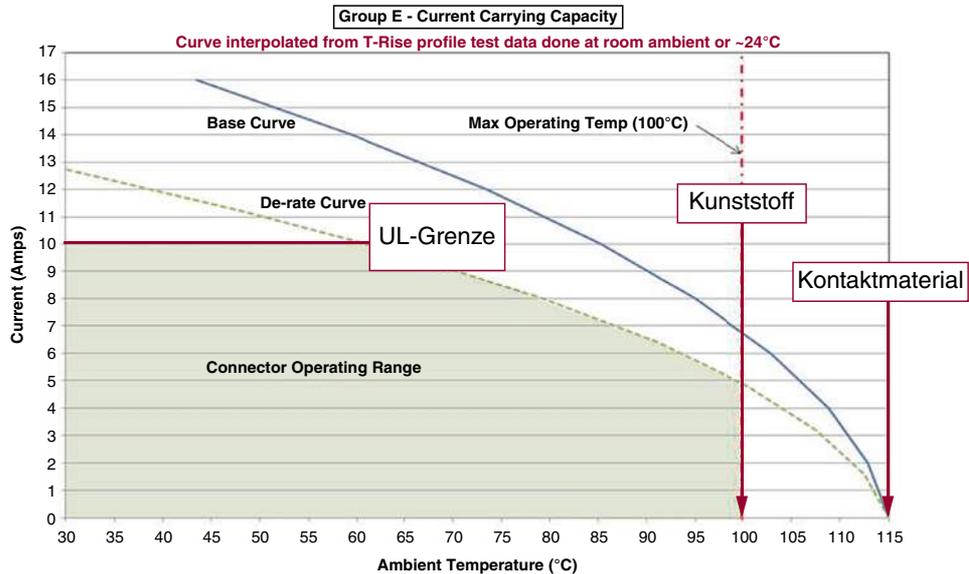


Bild 8.4 Ermittlung einer Deratingkurve nach IEC / EN 60 512-5-2

Dabei sind die Grenzwerte die UL-Grenze im unteren Temperaturbereich (kann überschritten werden, wenn UL nicht vorgeschrieben ist), der Kunststoff des Gehäuses (bezüglich der maximalen Umgebungstemperatur) und das Kontaktmaterial (in Bezug auf Relaxation und Lebensdauer des Steckverbindersystems).

8.2 Kontaktwiderstand und Korrosion

Korrosion (zer-)stört den Kontaktwiderstand. Es gibt keine 100-prozentige Sicherheit gegenüber aggressiver Atmosphäre, aber akzeptierte Tests zur Nachbildung. Üblicherweise wird die aggressive Atmosphäre mit Hilfe von **Mixed Flow Gas Tests** (MFG) simuliert. Es gibt vier unterschiedliche Tests: ASTM/EIA/IEC/Telcordia mit vier Gasen: NO₂, H₂S, Cl₂ und SO₂.

Da die Basismaterialien unedel sind, müssen die Kontaktoberflächenveredelungen von unten geschützt werden: Die Nickel-Sperrschicht hat sich bewährt!

8.3 Kontaktwiderstand und Reibkorrosion

Reibkorrosion (Bewegungen der Kontakte gegeneinander im µm-Bereich) erzeugen einen Kontaktwiderstandsanstieg, was besonders bei Backplane-(Rückwandleiterplatten) und Mezzanine (Verbindungen zweier Parallel-Leiterplatten)-Anwendungen zu beobachten ist. Durch Mikrobewegungen zwischen Kontaktfeder und Stiftkontakt, hervorgerufen durch Vibration oder durch Temperaturänderungen, wird die Zinnoberfläche aus dem Kontaktpunkt geschoben (Schneepflugeffekt). Dabei entsteht Zinnoxid, das ab 500 Mikrobewegungen sichtbar ist und ab ca. 5000 Mikrobewegungen zu einem Totalausfall des Kontaktes führt (Bild 8.5). Dieser Effekt ist ziemlich

unabhängig von der Kontaktform. Er tritt auch wesentlich später bei Gold- oder Silberoberflächen auf. Allerdings handelt es sich hier um Durchrieb der veredelten Oberflächen. Reibkorrosion kann aber auch bei Drahtanschlüssen auftreten, wenn Schock oder Vibration über die Drähte auf das gesteckte Kontaktpärchen wirken!

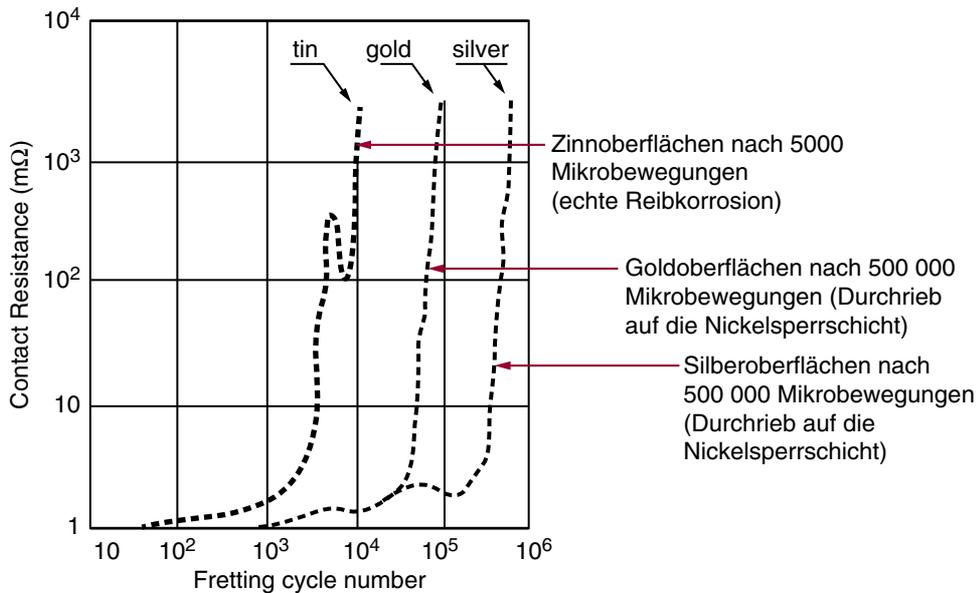


Bild 8.5 [2]

Reibkorrosion kann durch Kontaktöle (Befettung, engl.: *lubrication*) um den Faktor 3 hinausgezögert, aber nicht vermieden werden. Deshalb ist es wichtig, den mechanischen Aufbau um den Steckverbinder so zu wählen, dass Schock- und Vibrationseinflüsse vom Steckverbinderpärchen ferngehalten werden, Temperaturschwankungen der Mechanik nicht in Steck- und Ziehrichtung wirken und Kabelanschlüsse mechanisch durch Kabelabfangeschellen fixiert werden.

Gute Verriegelungen und Dichtungen gegen Feuchtigkeit – wie sie in automobilen Applikationen zum Einsatz kommen – geben dem Steckverbinderpärchen ebenfalls Schutz gegen Reibkorrosion.

Weitere Informationen zum Thema Reibkorrosion findet man auch in [2] und [3].

8.4 Kontaktwiderstand und Steckzyklen

Die Bewertung eines Stecksystems über die Lebensdauer wird – ausgehend von dem jungfräulichen Kontaktübergangswiderstand von 20 Milliohm und einer Variation von weiteren 5 Milliohm durch Stresstests wie Temperaturzyklen, feuchte Wärme, Schock und Vibration, Steckzyklen u.a.m. – heute wie folgt gesehen:

1,2 μm Goldoberfläche über 2 μm Nickelsperrschicht → High Class 500 Steckzyklen*
 0,76 μm Goldoberfläche über 2 μm Nickelsperrschicht → Normal Class 250 Steckzyklen*
 0,38 μm Goldoberfläche über 2 μm Nickelsperrschicht → Office Class 250 Steckzyklen
 0,1 μm Hauchvergoldung über 2 μm Nickelsperrschicht → Consumer Class 100 Steckzyklen
 2 μm Zinnoberfläche über 2 μm Nickelsperrschicht → Low Cost Class 25 Steckzyklen
 Aus Kostengründen werden auch hauchvergoldete Palladium-Nickel-Oberflächen eingesetzt, die ein ähnliches Stehvermögen zeigen wie Goldoberflächen und aufgrund ihrer Härte eine etwas höhere Steckzyklenanzahl zulassen.

* Diese Klassifizierungen umfassen zusätzliche Korrosionstests mit aggressiven Gasen (sogenannte Mixed Flow Gas = MFG Tests), wie in Abschnitt 8.2 erwähnt.

Erhöhte Steckzyklen werden oft durch gelockerte Kontaktübergangswiderstände erreicht, z.B. beim USB, wo der Grenzwert des Kontaktübergangswiderstandes von 20 Milliohm auf 50 Milliohm erweitert wurde.

8.5 Filme auf den Kontaktoberflächen

Auf der Kontaktstelle befinden sich üblicherweise Filme von Oxiden oder durch Korrosion. Diese Filme sind entweder sofort vorhanden oder entstehen während der Lebensdauer. Die Zusammensetzung der Filme, ihre Struktur und Dicke werden von den veredelten Oberflächen und den Einsatzbedingungen bestimmt. Auch Umwelt, Temperatur und Feuchte beeinflussen die Entwicklung der Filme wesentlich. Diese Filme müssen beseitigt werden, weil sie üblicherweise einen höheren Kontaktübergangswiderstand zur Folge haben und die Anzahl der Kontaktflecken reduzieren.

8.6 Ein niedriger Kontaktwiderstand ist wichtig

In analogen Systemen erzeugt ein hoher Kontaktübergangswiderstand Spannungsabweichungen, die sich durch Rauschen ausdrücken (10...30 m Ω sind auf Telefonleitungen hörbar).

Bei digitalen Systemen erhöht ein hoher Kontaktübergangswiderstand den «Ground Bounce» und damit das Risiko von Datenverlusten (die BER = **Bit Error Rate** nimmt zu).

In der Leistungselektronik erhöht ein hoher Kontaktübergangswiderstand die Verlustleistung und reduziert dadurch die Stromtragfähigkeit (indirekt durch beschleunigte Relaxation des Federkontaktes und damit reduzierte Lebensdauererwartung).

Der Kontaktwiderstand und die Lebensdauer des Steckverbinders sind von vielen Faktoren abhängig:

- Kontaktoberflächen,
- Kontaktnormalkraft und Relaxation,
- Umgebungstemperatur und Schadgase,
- Schock und Vibration (dadurch Reibkorrosion oder Durchrieb),
- Steckzyklen typisch 25 – 50 – 250 – 500 maximal (20 m Ω initial +5 m Ω Umwelteinflüsse) für verzinnte – hauchvergoldete – 0,38 μm vergoldete – 0,76 μm vergoldete Steckverbinder.

Höhere Steckzyklen erfordern Kompromisse in der elektrischen Spezifikation, wie z.B. beim USB-Verbinder, wo nur 50 m Ω Kontaktübergangswiderstand gefordert werden.

Zusammenfassung physikalischer Grundlagen

- Elektrische Kontakte benötigen Kontaktnormalkraft.
- Diese wird durch federnde Elemente erzeugt.
- Federelemente erweichen bei Temperatur.
- Relaxation reduziert die Federkräfte.
- Federmaterialien reagieren unterschiedlich.
- Der Larsson-Miller-Parameter beschreibt die Relaxation der Federkraft in Abhängigkeit von der Arbeitstemperatur.
- Durch den Stromfluss über das Federelement erwärmt sich dieses zusätzlich zur Umgebungstemperatur.
- Diese Temperaturüberhöhung ist eine konstante Größe (Energiezufuhr) – egal, ob bei Raumtemperatur oder bei höheren Umgebungstemperaturen.

9 Abschirmmaßnahmen

Werden in einem Steckverbinder mehrere Signale gleichzeitig übertragen, so ist darauf zu achten, dass das Übersprechen dieser Signale minimiert wird. Dies geschieht durch das Einbringen von Abschirmblechen zwischen den Kontakten bei höheren Anforderungen oder – im einfacheren Fall – durch zusätzliche Kontakte, die auf Signalmasse gelegt werden.

Was ist Übersprechen?

Übersprechen geschieht durch kapazitive Kopplung zweier Signale oder durch induktive Kopplung der Signalleitungen. Im ersten Fall spricht man von Nahnebensprechen oder NEXT (phasengleich), die induktive Kopplung erzeugt Fernübersprechen oder FEXT (phasengedreht).

Wir erkennen das grüne Nutzsignal, das im oberen Leiter von links nach rechts läuft und dort gedämpft ankommt (Bild 9.1).



Bild 9.1 Nahnebensprechen und Fernübersprechen von zwei massebezogenen Leitern

Das rote Nahnebensprechen (NEXT) wird das Nachbarsignal phasengleich überlagern und somit stören. Das gelbe Fernübersprechen (FEXT) wird das Nachbarsignal phasenversetzt stören.

Im einfachen Fall wird man Massekontakte (G) um das zu schirmende Signal setzen, was zwar zusätzliche Kontakte bedingt, aber je nach Anwendungsfall eine preiswerte Schirmlösung sein kann. Das rote Empfängersignal (R) und das rote Sendesignal (T) werden somit durch Massekontakte (G) isoliert (Bild 9.2).

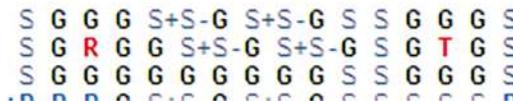


Bild 9.2 Pseudo-Koaxial-Beschaltung in einem Stiffeld

Die Schirmdämpfung einer solchen Anordnung liegt bei 40 dB oder mehr. Wenn eine bessere Schirmdämpfung erforderlich ist, kommt man oft um den Einsatz eines koaxialen Steckverbinders nicht herum (Bild 9.3).