



GÜNTER KNOBLAUCH
UND 15 MITAUTOREN



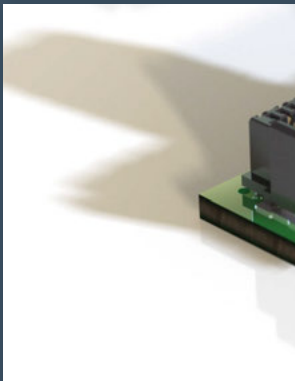
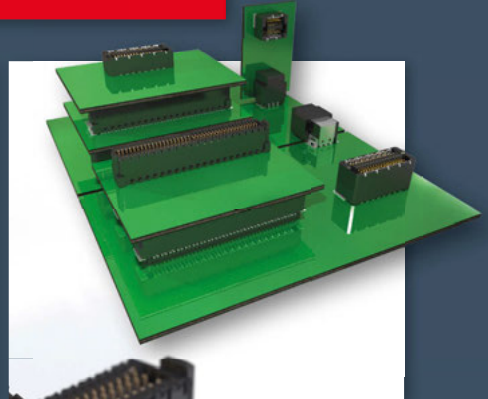
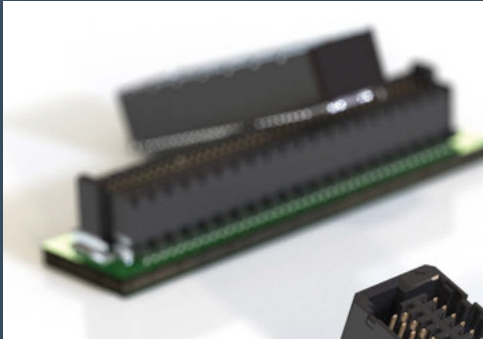
Steckverbinder

**Theorie der Kontakte,
neue Technologien, Produkte
und Management-Konzepte**

5., durchgesehene Auflage

expert ›

ept-Steckverbinder



ept GmbH: 45 Jahre Steckverbinder-KnowHow

ept steht für „elektronische Präzisionstechnik“: Nutzen Sie unsere Kompetenz in der elektrischen und mechanischen Leiterplattenverbindung durch Einpresstechnik- oder SMT-Steckverbinder. Auf Basis innovativer Produktideen und erstklassiger Fertigungstechnik bietet ept Ihnen im Bereich Steckverbinder und Verarbeitungstechnologie umfangreiche Komplettlösungen aus einer Hand.

Robust, kontaktsicher, individuell – das ist ept, the better connection.



Steckverbinder

Günter Knoblauch und 15 Mitautoren

Steckverbinder

Theorie der Kontakte, neue Technologien,
Produkte und Management-Konzepte

5., durchgesehene Auflage



Kontakt & Studium

Band 583

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Wilfried J. Bartz

Dipl.-Ing. Hans-Joachim Mesenholl

expert ›

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.



© 2019 · expert verlag GmbH
Dischingerweg 5 · D-72070 Tübingen

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Alle Informationen in diesem Buch wurden mit großer Sorgfalt erstellt. Fehler können dennoch nicht völlig ausgeschlossen werden. Weder Verlag noch Autoren oder Herausgeber übernehmen deshalb eine Gewährleistung für die Korrektheit des Inhaltes und haften nicht für fehlerhafte Angaben und deren Folgen.

Internet: www.expertverlag.de
eMail: info@verlag.expert

Printed in Germany

ISBN 978-3-8169-3484-4 (Print)
ISBN 978-3-8169-8484-9 (ePDF)

Vorwort zum Buch

Steckverbinder

Theorie der Kontakte, neue Technologien, neue Produkte, und Management-Konzepte

Geleitwort zur 5. Auflage des Bandes Steckverbinder

Die 2016 erschienene 4. Auflage des Bandes „**Steckverbinder II**“ wies eine umfangreiche Überarbeitung auf. Beiträge wurden aktualisiert, neues und ergänzendes Bildmaterial eingefügt und neue Themen aufgenommen. Der aktuelle technische und technologische Stand in weiten Bereichen wird aufgezeigt. Deshalb war es nicht überraschend, dass die 4. Auflage sehr schnell vergriffen war.

Die jetzt vorliegende 5. Auflage enthält weitere Abbildungen in Farbe – wo das Quellmaterial dies sinnvoll zulässt – und weist kleinere Korrekturen auf. Darüber hinaus wurden wichtige Punkte aus dem nicht mehr erhältlichen Band Steckverbinder I übernommen.

Diese 5. Auflage erscheint auch zu einem besonderen Ereignis: Dem 50-jährigen Jubiläum der Steckverbinder-Seminare an der Technischen Akademie Esslingen. Das in einer sehr langen Tradition stehende, von Prof. Dr.-Ing. Eugen Schäfer im Jahre 1969 begründete Seminar „*Steckverbinder*“ wurde von mir im Jahr 1996 übernommen und wird heute – wenn auch in veränderter Form – von Dr. Katzier geführt.

Vorwort zum Inhalt

Die Entwicklungsingenieure haben die Aufgabe, den für die Applikation in Technik und Übertragungseigenschaften am besten passenden Steckverbinder auszuwählen oder dessen Entwicklung anzustoßen. Vertrieb und Marketing streben Kundennutzen und Wettbewerbsvorteile an. Die Qualitätssicherung verlangt, dass der Steckverbinder im praktischen Einsatz unter allen Betriebsbedingungen zuverlässig funktioniert. Und der Kaufmann wünscht sich, dass er möglichst wenig kostet.

Das Buch soll hierbei Ingenieuren in Entwicklung und Qualitätssicherung sowie Mitarbeitern aus Vertrieb und dem kaufmännischen Bereich Hilfestellung bei ihren Arbeitsaufgaben und Entscheidungen geben.

Steckverbinder finden wir in allen Bereichen unserer heutigen Industriegesellschaft. Dabei spielt es keine Rolle, ob es sich um Unterhaltungselektronik, Geräte der Kommunikations-, Medizin- und Verkehrstechnik oder andere High-Tech-Applikationen handelt. Gemeinsam ist all diesen unterschiedlichen Anwendungen: Die Steckverbinder müssen selbst unter extremen Einsatzbedingungen die *Kontaktsicherheit* garantieren.

Steckverbinder übernehmen die Aufgabe, sowohl Geräte (Interfaces) als auch Baugruppen innerhalb der Geräte oder auch einzelne elektronische Bauteile elektrisch miteinander zu verbinden. Dabei müssen die funktionalen Erfordernisse des Einsatzes (Verbindungsfunktion) mit den technischen Anforderungen an die Steckverbinder (Bauform, Abmessungen, Funktionalität, Leistungsdaten) und den wirtschaftlichen Zwängen (Montageeigenschaften, Servicefreundlichkeit und Kosten) in Einklang gebracht werden.

Die rasante Entwicklung auf dem Gebiet der Elektronik – fortschreitende Miniaturisierung bei den Halbleiterbauelementen, gesteigerte Funktionalität und Leistungsdaten, daraus resultierende erweiterte Frequenzspektren – erforderten neue Konzepte und Lösungen bei den Steckverbindern. Die Baugrößen wurden kleiner, Bauformen den Applikationen angepasst, die Kontaktanzahl wurde gesteigert bei gleichzeitig verringertem Raster. Die Signalführung, Schirmung, Filterung, Verarbeitung und Anschlusstechniken aufwändiger. Die Prüf- und Messtechnik musste diesen Wandel bereits vor dem Vorliegen der neuen Produkte vollzogen haben.

Zum Einsatz kommen heute aber auch neue Kunststoffe, neue Feder- und Kontaktstrukturen. Die Veredelung der Oberflächen der Kontaktelemente mussten ebenso wie die eingesetzten Materialien und technologischen Verfahren den neuen Konstruktionen und Anforderungen aus den Anwendungen angepasst werden.

Eine weitere bedeutende Neuentwicklung stellte seit Anfang der 80er Jahre der Steckverbinder für die Lichtwellenleitertechnik (LWL) dar. Die faseroptische Nachrichtenübertragung erforderte Steckverbinder, deren Verbindungselemente mit absoluter Genauigkeit unterhalb des 1µm-Bereiches gefertigt werden mussten. Dazu galt es aber

auch die entsprechende Messtechnik zu entwickeln – bis dahin waren derartig genaue Messungen/Messverfahren nicht benötigt worden.

Ende der 80er Jahre wurden Konzepte und Verfahren entwickelt, deren Ziel es war, Steckverbinderfunktion, Leiterplatte und Gehäuse als eine Einheit zu betrachten und in ein *Element* zu integrieren (Moulded Interconnect Devices). Die Mikrostrukturtechnik (LIGA-Verfahren) ermöglicht die Herstellung kleinster und gleichzeitig präziser Steckverbinder. Und für schnelle Mustererstellung von Kontaktträgern kann man heute zu Druckverfahren mittels PC greifen.

Die Beiträge vermitteln Wissen zur Theorie des Kontaktes, zur Technologie der Herstellung und Verarbeitung von Kontakten und Steckverbindern. Es werden Hinweise dazu gegeben, wie bei der Spezifikation der Steckverbinder und deren Konstruktion, bei der Auswahl des Kontaktmaterials und der Kunststoffe vorzugehen ist. Für den Einsatz bei höheren Frequenzen helfen elektrische Simulationsverfahren, die Gestaltung des Stecker-Designs als auch die Einheit Leiterplatte Steckverbinder zu optimieren. Untersuchungsmethoden und Testverfahren zur Ermittlung des Langzeitverhaltens dienen der Absicherung der zuverlässigen Funktion der Steckverbinder im Einsatz. Der Vorstellung wichtiger Steckverbinderfamilien wurde angemessen Platz eingeräumt.

Dem *expert verlag* gebührt Anerkennung dafür, die Thematik Steckverbinder in zwei eigenständigen Büchern in der Buchreihe *Kontakt & Studium* einem breiten Personenkreis zugänglich gemacht zu haben.

Günter Knoblauch
Neuried, Oktober 2019

Inhaltsverzeichnis

Vorwort

1 Theorie der elektrischen Kontakte 1

Helmar Ulbricht

1.1	Der elektrische Kontakt	1
1.1.1	Der ruhende Kontakt	1
1.1.2	Engewiderstand und Kontaktkraft	6
1.1.3	Der fremdschichtbehaftete Kontakt	7
1.1.4	Der Kontaktwiderstand	9
1.1.5	Die R-U-Kennlinien von Kontakten	10
1.2	Stabilitätsbereiche elektrischer Kontakte	13
1.3	Literaturverzeichnis	15

2 Innovationsmanagement zur erfolgreichen Entwicklung und Vermarktung von Steckverbindern..... 16

Ralf Knoll

2.1	Einleitung	16
2.1.1	Wachstumsmarkt Photonik.....	17
2.1.2	Neuartigkeit von Produkten – erfolgsabhängiger Innovationsgrad	18
2.2	Aktuelle Trends im Steckermarkt – einige Beispiele	21
2.3	Gesetze des Marktes und dessen Innovationsoptionen	23
2.3.1	Innovationshemmende Eigenschaften des Marktes	24
2.3.2	Verhaltensmöglichkeiten – erste Innovationsoption	27
2.3.3	Globalisierung, Wettbewerbsdruck – zweite Innovationsoption.....	29
2.3.4	Normen, Zeitpunkt, schwache Signale – dritte Innovationsoption	30
2.4	Aktueller Integrationsgrad von Innovationsfunktionen	33
2.4.1	Bedeutung von Methodenwissen wird oft unterschätzt	33
2.4.2	Aufwendungen für Innovation werden oft falsch eingeschätzt.....	34
2.5	Ursachen von Innovationswiderständen	37
2.5.1	Rationale Widerstände gegen Innovationen.....	37
2.5.2	Psychologische Innovationswiderstände in Unternehmen	38
2.5.3	Innovationswiderstände durch Verwaltungen und Gremien	40
2.6	Kurzdarstellung der strategischen Produktplanung	45
2.6.1	Potentialfindung und Analyse der Position der Produkte im Wettbewerb.....	47
2.6.2	Etablierte Produktfindungs-Strategien.....	53
2.6.3	Spezielles Projektmanagement für Innovationsprojekte.....	59
2.7	Verbesserung von Innovationsprozessen, Innovationsfunktionen und Innovationskulturen	65

2.8	Ausgliederung der Innovationsfunktion	70
2.8.1	Auslagerung der strategischen Frühaufklärung.....	71
2.8.2	Öffnung von Innovationsprozessen und Ideenkanälen	71
2.8.3	Strategische Informationspolitik	72
2.9	Literatur	73

3 Innovationsmanagement in der Praxis: Elektrische und optische Steckverbinder für die Ethernet-Verkabelung 75

Ralf Knoll, Gwillem Mosedale

3.1	Einführung.....	75
3.2	Normen und Innovation	75
3.2.1	Das Beispiel RJ-45.....	75
3.2.2	Small-Form-Factor (SFF) Steckverbinder	76
3.2.3	Analyse der SFF-Steckverbinder in Bezug auf Innovation	77
3.2.4	Den Innovationsgrad richtig wählen	79
3.2.5	Innovationsmanagement bei 3M	79
3.2.6	Methodenwissen Innovationsmanagement	80
3.3	Innovations- und Entwicklungspotentiale für die Zukunft	81
3.3.1	Modulare (Hybrid) Stecker	81
3.3.2	Optische Stecker für raue Umweltbedingungen	84
3.3.3	Optische Stecker für Bandgap-Fasern	85
3.3.4	Stecker mit Höchstintegration und O/E-Wandler.....	86
3.3.5	Faserstecker für Hochleistungs- und DWDM-Anwendungen	88
3.4	Zusammenfassung und Ausblick	88

4 Steckverbinder und Kabelbaum Applikationen für motornahe Automobilanwendungen..... 91

Michael Römer

4.1	Einleitung	91
4.2	Bosch-Mikro-Kontakte (BMK).....	92
4.3	Bosch-Sensor-Kontakte (BSK).....	93
4.4	Bosch-Matrix-Kontakt	94
4.5	Bosch-Clean Body-Kontakte	94
4.6	Niederpolige Steckverbinder für Komponenten und Module	95
4.7	Der flexible Kabelkanal mit integrierter Steckverbindung	97
4.8	Bauform mit hoher Schüttelfestigkeit für Hochpolige Steckverbinder.....	98
4.9	Motorsteuergeräte mit 154-poligen Steckverbindungen.....	99
4.10	Qualität und Zuverlässigkeit	100
4.11	Nullfehlerstrategie	101
4.12	Ausblick auf neue Anwendungsfelder im Kfz	102

5 Koaxiale Steckverbinder im Mobilfunkbereich 103

Romeo Premerlani

5.1	Verwendung von koaxialen Verbindungen im Mobilfunkbereich	103
5.2	Anforderungen an die koaxiale Verbindungstechnik im Mobilfunkumfeld ..	105
5.3	Elektrische Anforderungen	106
5.4	Mechanische Anforderungen	109
5.5	Umwelt-Anforderungen	109
5.6	Produktrelevante Markteinflüsse im Mobilfunkmarkt	111
5.7	Konstruktive Ansätze als Antwort auf die Markt- und Kundenbedürfnisse ..	112
5.7.1	Miniaturisierung und Einsatz von neuen Fertigungstechnologien	112
5.7.2	Kosteneffektive, mehrfache Leiterplatten-Leiterplatten Verbindungen auf engstem Raum.....	113
5.7.3	Reduktion von Montagezeiten.....	113
5.8	Passive intermodulationsarme Verbindungen	115
5.8.1	MMCX-, MMBX-Steckverbinder – Technische Umsetzung der Ansätze ..	117
5.8.2	Quick-Lock Verbinder Familie QMA, QN.....	119
5.8.3	Intermodulationsarme Verbindungssysteme SUHNER Quick-Fit und SUHNER LISCA	121
5.9	Technischer Ausblick	124
5.10	Literatur	124

6 THR-Steckverbinder für SMD-Fertigungsprozesse 125

Magnus Henzler

6.1	Einleitung	125
6.2	Grundlagen der THR-Technik	125
6.2.1	Warum THR-Technik?	125
6.2.2	Pin-in-Paste-Verfahren	125
6.2.3	THR im SMT-Fertigungsprozess.....	126
6.2.4	Anforderungen an das THR-Bauteil	127
6.3	Verarbeitung von THR-Steckverbindern	128
6.3.1	Leiterplatten-Layout und Schablonen-Design	128
6.3.2	Bestückung	129
6.3.3	Reflow-Löten	131
6.3.4	Inspektion der Lötstelle	132
6.4	Beispiele für THR/SMT-Steckverbinder	133
6.5	Einsatz von Lotformteilen mit SMT- und THR-Steckverbindern	135
6.5.1	Preforms oder Lotformteile.....	135
6.5.2	Ausgleich von LP-Toleranzen mit Preforms	136
6.5.3	Versuchsdurchführung mit SMT-Steckverbindern	136
6.5.4	Versuchsauswertung.....	137
6.5.5	Versuchsdurchführung mit THR-Steckverbindern und Preforms.....	139
6.5.6	Fazit	139
6.6	Testplatte.....	139
6.7	Zusammenfassung und Checkliste für den THR-Einsatz.....	140

7 Industrie-Steckverbinder 142

Herbert Junck

7.1	Einleitung	142
7.1.1	Definition	142
7.1.2	Anwendung	142
7.1.3	Geschichte	143
7.2	Aufbau	144
7.2.1	Gehäuse.....	144
7.2.2	Bauarten.....	144
7.2.3	Bauformen.....	147
7.2.4	Baugrößen	148
7.2.5	Verriegelung	151
7.2.6	EMV-Gehäuse.....	154
7.2.7	Abdichtung	156
7.2.8	Codierung.....	157
7.2.9	Innenanwendungen.....	159
7.3	Kontakteinsatz.....	165
7.3.1	Isolierkörper	165
7.3.1.1	Spannung.....	166
7.3.1.2	Luftstrecken.....	166
7.3.1.3	Kriechstrecken	167
7.3.1.4	Bemessungsstrom	168
7.3.1.5	Festlegung des Bemessungsstroms (Derating-Kurve).....	169
7.3.1.6	Schutz gegen elektrischen Schlag	170
7.3.1.7	Schutz durch PELV	171
7.3.2	Bauformen.....	172
7.3.2.1	Monoblock.....	172
7.3.2.2	Monoblock kombiniert	176
7.3.2.3	Modulares Steckverbinder-System	178
7.4	Anschlussarten.....	192
7.4.1	Schraubanschluss	192
7.4.2	Käfigzugfederanschluss	194
7.4.3	Crimpschluss.....	194
7.4.4	Einpressverbindung	198
7.4.5	Wickelanschluss.....	198
7.4.6	Schneidkemmanschluss	198
7.4.7	HARAX® Schneidklemmanschluss.....	199
7.4.8	Flachsteckanschluss	200
7.4.9	Werkstoffe	200
7.5	Konfektionierung	205
7.5.1	Werkzeuge	205
7.5.2	Montagehinweise und Kennwerte	206
7.6	Hinweise auf Normen und Vorschriften	210
7.7	Nachwort.....	210

8 Aspekte zur Elektromagnetischen Verträglichkeit von Steckverbindern (EMV und EMI) 211

Peter Pauli

8.1	Einleitung	211
8.2	EMV-Probleme im Zusammenhang mit Steckverbindern.....	213
8.3	Die Schirmdämpfung von Steckverbindern	214
8.3.1	Messgrößen zur Beschreibung der Schirmwirkung.....	214
8.3.1.1	Der Schirmfaktor	214
8.3.1.2	Die Schirmdämpfung a_s	214
8.3.1.3	Kopplungsimpedanz bzw. Transferimpedanz.....	215
8.3.2	Physikalische Grundlagen zur Schirmwirkung	216
8.3.2.1	Abschirmung elektrischer Felder	216
8.3.2.2	Abschirmung magnetischer Felder.....	217
8.3.2.3	Der Skin-Effekt.....	219
8.3.3	Messverfahren zur Ermittlung der Schirmung von Steckverbindern (RF-leakage)	220
8.4	Modingeffekte bei Steckverbindern	225
8.5	Intermodulationseffekte, hervorgerufen durch Steckverbinder.....	227
8.5.1	Einführung und Definitionen	227
8.5.2	Messgeräte und Messanordnung.....	229
8.6	Zusammenfassung.....	230
8.7	Literaturangaben	231

9 Qualifizierung von Steckverbindern 232

Tilman Heinisch

9.1	Nachweis der Eignung eines Stecksystems für das vorgesehene Einsatzprofil	232
9.2	Anforderungen an Steckverbinder.....	232
9.3	Wer führt Qualifizierungstests durch?	233
9.4	Normen und Standards	233
9.5	Qualifikation, Re-Qualifikation, Stichprobe	235
9.6	Schwachstellen und Fehler	236
9.6.1	Fehlerquelle Einpresszone.....	237
9.6.2	Fehlerquellen bei anderen Anschlusstechniken	240
9.6.3	Fehler im Steckbereich	241
9.7	Prüfmethoden.....	244
9.7.1	Vibration	244
9.7.2	Schockprüfung	245
9.7.3	Kontaktunterbrechung.....	245
9.7.4	Spannungsfestigkeit.....	246
9.7.5	Isolationswiderstand.....	247
9.7.6	Wärme, Kälte, Feuchte Wärme	247

9.7.7	Strombelastbarkeit / Derating	247
9.7.8	Industrieklima / Schadgas	248
9.8	Literatur	250

10 Kundenspezifischer Steckverbinder – eine besondere Herausforderung 251

Georg Staperfeld, Joachim Belz

10.1	Einleitung	251
10.2	Produktkategorien Märkte mit besonderen Anforderungen	252
10.3	Märkte und Steckverbinder in der Anwendung mit ihren besonderen Anforderungen	254
10.4	Der Entwicklungsprozess von kundenspezifischen Steckverbindern und seine Entwicklungswerkzeuge	259
10.4.1	Kundenkontakt	259
10.4.2	Konzept- und Angebotsphase	259
10.4.3	Produktentwicklungsphase	260
10.5	Werkzeuge und Netzwerke in der Konstruktion und Fertigung	265
10.5.1	Entwicklungskompetenz	265
10.5.2	Finite-Elemente-Methode FEM-Simulation	266
10.5.3	Prüflabor	268
10.6	Die Zusammenarbeit bei der Entwicklung kundenspezifischer Steckverbinder	274

11 Theorie und Kenngrößen koaxialer Verbindungen..... 275

Bernd Rosenberger

11.1	Einführung und Begriffserläuterungen	275
11.2	Koaxiale Leitungen	277
11.2.1	Grundlagen zur Theorie	277
11.2.2	Kenngrößen koaxialer Leitungen	279
11.2.3	Leitungen mit Reflexionen	281
11.3	Koaxiale Kabel	283
11.3.1	Anforderungen und Kenngrößen	283
11.3.2	Optimaler Wellenwiderstand	285
11.3.3	Kabelaufbau	286
11.4	Koaxiale Steckverbinder	287
11.4.1	Aufbau koaxialer Steckverbinder	287
11.4.2	Kabelbefestigung, Kabelhaltekraft	288
11.4.3	Innenleiter-Festhaltung	289
11.4.4	Steckverbinder für Leiterplatten	290
11.4.5	Steckverbinder für Semi-Rigid-Kabel	290
11.4.6	Schutzgrad (nach DIN 40050)	291
11.5	Zusammenfassung	292

12 Zukünftige Anforderungen an die Eigenschaften und Verfügbarkeit von Steckverbindern..... 293

Helmut Katzier

12.1 Einleitung293
 12.2 Anforderungen im Bereich der Telekommunikation293
 12.2.1 Chip-Technologie296
 12.2.2 Elektrische Anforderungen298
 12.3 Einfluss der Leiterplattentechnologie302
 12.4 Standardisierung elektronischer Komponenten.....310
 12.5 Umweltfreundliche Produkte312
 12.6 Zusammenarbeit im Hardware-Entwicklungsprozess315
 12.7 Zusammenfassung.....317
 12.8 Literatur318

13 Elektrische Kontakte in der Praxis..... 319

Helmar Ulbricht

13.1 Anforderungen an elektrische Kontakte319
 13.2 Ursachen von Kontaktproblemen319
 13.2.1 Konstruktionsfehler319
 13.2.2 Fertigungsfehler326
 13.2.3 Anwenderfehler328
 13.2.4 Fremdschichten.....328
 13.3 Schadgasprüfungen331
 13.3.1 Entwicklung der Korrosionstests335
 13.3.2 Der Aufbau von Schadgas-Prüfeinrichtungen338
 13.3.3 Beispiele für Ergebnisse von Korrosionsprüfungen.....341
 13.4 Literaturverzeichnis343

14 Qualifizierung von Steckverbindern – aus Anwendersicht..... 347

Helmar Ulbricht

14.1 Von der Qualitätssicherung zur Qualitätsverbesserung347
 14.2 Qualifizierung von Bauelementen349
 14.2.1 Elemente eines Beurteilungsplans (Rahmen)351
 14.2.1.1 Produktmerkmale351
 14.2.1.2 Funktionsmerkmale352
 14.2.1.3 Merkmale des Betriebsverhaltens353

14.3	Beurteilungen und Prüfungen.....	353
14.3.1	Sichtprüfung.....	353
14.3.2	Kontaktwerkstoff.....	356
14.3.3	Schichtaufbau/Schichtdickenmessungen.....	357
14.3.4	Kontaktkraftmessung.....	357
14.3.5	Flussmitteldichtheit.....	359
14.3.6	Waschbarkeit.....	362
14.3.7	Temperaturschock (SMD).....	363
14.3.8	Überprüfung des Betriebsverhaltens durch eine Klimafolge.....	365
14.3.9	Reibkorrosion.....	366
14.4	Ablauf einer Bauelementequalifizierung.....	366
14.4.1	Flankierende Maßnahmen.....	373
14.5	Ausblick und Zusammenfassung.....	374
14.6	Literaturverzeichnis.....	375

15 Oberflächenbearbeitung von Kontaktwerkstoffen 377

Joachim Bischoff, Thomas Frey

15.1	Galvanotechnik – Definition und Bedeutung.....	377
15.2	Grundlagen der Galvanik und Elektrochemie.....	379
15.3	Voraussetzungen für ein Beschichtungssystem.....	381
15.3.1	Voraussetzung an die Konstruktion und Werkstoffauswahl.....	381
15.3.2	Mechanische und physikalische Eigenschaften der Grundwerkstoffe/Überzugsmetalle.....	382
15.3.2.1	Anforderungen an den Grundwerkstoff.....	382
15.3.2.2	Anforderungen an das Überzugsmetall.....	385
15.4	Wechselwirkung der Schicht- und Grundwerkstoffkombination.....	385
15.4.1	Verformbarkeit.....	386
15.4.2	Korrosion.....	386
15.4.3	Verschleiß, Abrasion.....	387
15.4.4	Festlegung der Spezifikation und Bestellangaben.....	388
15.5	Schichtwerkstoffe.....	388
15.6	Verfahren zur galvanischen Beschichtung von elektronischen Bauteilen.....	390
15.7	Bandgalvanisierung.....	394
15.7.1	Unterschiede und Vorteile gegenüber der Einzelteilgalvanik.....	394
15.7.2	Aufbau einer Bandgalvanisieranlage.....	394
15.7.3	Selektives Tauchverfahren.....	396
15.7.4	Selektivrad.....	397
15.7.5	Riemenzelle.....	398
15.7.6	Regenbogenzelle (Rainbow Cell).....	399
15.7.7	Selektive Streifenzelle (Central Wave).....	400
15.7.8	Klebetchnik.....	400
15.7.9	Brush-Plating-Verfahren.....	400
15.7.10	Spot-Technik.....	402
15.8	Qualitätskreis für galvanisch beschichtete Bauteile.....	404
15.9	Literatur.....	405

16 Technologische Herausforderungen bei Applikationen von Koaxialsteckverbindern 406

Bernd Rosenberger

16.1 Die Herausforderung 406

16.2 Signal Integrity 407

16.2.1 Definition der Signal Integrity für elektrische Leitungs- und Verbindungssysteme 408

16.2.2 Umsetzung 410

16.3 Nachhaltigkeitsbetrachtung für elektrische Verbindungselemente und Kabel 410

16.4 Das 4.3-10-Koaxial Steckersystem 411

16.5 Ergebnisse einer Grundlagenstudie bei Rosenberger für eine koaxiale Bondtechnologie innerhalb eines IC Gehäuses 412

16.6 Integrierte Lösungen von Koaxialsteckverbindern im Automobil FAKRA (FAKRA = Fachkreis Automobil) 414

16.7 Literaturverzeichnis 415

17 Lichtwellenleiter-Steckverbinder – Funktionsprinzipien und Verarbeitung optischer Steckverbinder 416

Günter Knoblauch

17.1 Entwicklung und Bedeutung optischer Steckverbinder 416

17.2 Aufgabe optischer Steckverbinder im Übertragungssystem 417

17.3 Prinzipien trennbarer LWL-Steckverbindungen 419

17.4 Einfügungsdämpfung einer Steckverbindung 421

17.5 Einflussgrößen auf die Steckerdämpfung 426

17.5.1 Allgemeine Einflussgrößen auf die Dämpfung einer Steckverbindung 426

17.5.2 Faserspezifische Einflussgrößen auf die Steckerdämpfung 427

17.5.3 Fresnel-Verluste 428

17.5.4 Einfluss der Steckerstirnflächenpolitur 429

17.5.5 Mechanische Toleranzen Steckerstift – Verbindungselement 429

17.5.6 Koppelverluste bei Faserbündelleitungen 430

17.6 Steckverbindermontage 430

17.6.1 Werksmontage 430

17.6.2 Feldmontage 431

17.6.3 Qualitätssicherung 432

17.7 Montagebedingte Einflussgrößen auf Dämpfung und Qualität der Steckverbinder 433

17.7.1 Faserdurchmesser, Faserfehler 433

17.7.2 Faser- und Kabelpräparation 433

17.7.3 Stirnflächenradius / PC-Design 434

17.7.4 Schleif- und Polierfehler 435

17.8	Bauformen von LWL-Steckverbindern	435
17.8.1	Ausführungsform für Monomode- und Multimode-Steckverbinder	435
17.8.2	Standardisierte Bauformen.....	437
17.8.3	Spezifische Bauformen aus den Anfänger der LWL-Technik.....	449
17.8.4	Besonderheiten bei LWL-Steckverbindern	451
17.8.5	Steckverbinder für Kunststofffasern und Faserbündelleitungen	453
17.9	Steckverbinder und Spleißtechnik.....	454
17.10	LWL-Steckverbinder aus der Sicht des Anwenders	457
17.11	Zusammenfassung und Ausblick	457

Stichwortregister.....	460
-------------------------------	------------

Autorenverzeichnis	467
---------------------------------	------------

1 Theorie der elektrischen Kontakte

Helmar Ulbricht

1.1 Der elektrische Kontakt

Definitionsgemäß ist ein „Elektrischer Kontakt“ ein Zustand, der durch die Berührung zweier elektrisch leitender Kontaktstücke zum Zwecke der Stromleitung oder Informationsübertragung entsteht. Aufgabe der Kontaktstücke ist es, einen elektrischen Kontakt herzustellen oder aufzuheben. Im Sprachgebrauch wird diese Abgrenzung jedoch vielfach nicht beachtet und es hat sich weitgehend durchgesetzt, den Begriff „Kontakt“ auch für die Kontaktelemente zu verwenden, wenn aus der Wortbildung eindeutig hervorgeht, dass es sich um etwas Gegenständliches handelt (z. B. Kontaktwerkstoff, Kontaktniet, Ruhekontakt usw.).

1.1.1 Der ruhende Kontakt

Wenn sich zwei elektrisch leitende Teile berühren, dann tritt ein Effekt auf, der am Beispiel in Bild 1.1 deutlich gemacht werden soll. Ein elektrischer Strom I , der durch einen metallischen Stab mit dem Durchmesser d und der Länge l fließt, verursacht an den Enden des Stabes einen Spannungsabfall U_l , der nach dem Ohm'schen Gesetz proportional zum elektrischem Widerstand R des Stabes ist – s. Bild 1.1a.

Drückt man jedoch zwei solcher Stäbe mit einer Kraft P gegeneinander, dann ist bei einem Strom I der Spannungsabfall U_2 an dieser Anordnung um einen Betrag $I \cdot \Delta R$ größer als die Summe der Spannungen an den beiden einzelnen Stäben. D. h. zu dem Widerstand der Stäbe $2 \cdot R$ ist ein Anteil ΔR hinzugekommen – s. Bild 1.1b. Dieser zusätzliche Widerstand ΔR wird als Kontaktwiderstand R_K bezeichnet – die Tatsache, dass dieser Begriff, bereits um 1860 von Werner v. Siemens geprägt wurde, macht deutlich, dass die Probleme mit diesem Phänomen so alt sind wie die Elektrotechnik selbst. Verursacht wird der Kontaktwiderstand durch die Rauigkeit jeder Festkörperoberfläche – im physikalischen Sinne. Presst man nämlich zwei Kontaktstücke mit der Kraft P gegeneinander, dann berühren sie sich nicht auf der ganzen scheinbaren Kontaktfläche, sondern bedingt durch die mikroskopisch kleinen erhabenen Stellen nur partiell. Da die Flächenpressung an diesen Mikrospitzen weit oberhalb der Fließgrenze des Materials liegt, werden sie verformt; dabei wird auch Material teilweise in benachbarte Täler abgedrängt. Es stellt sich ein stationärer Zustand zwischen den Bereichen ein, in denen ein elektrischer Kontakt besteht, und dem Rest der scheinbaren Kontaktfläche, der an der Kontaktgabe überhaupt nicht beteiligt ist. Die Kontakttheorie unterscheidet daher in ihrer Terminologie zwischen der „scheinbaren Kontaktfläche (A_s)“, darunter versteht man den Teil der Fläche auf den Kontaktstücken, an dem sie sich – makroskopisch gesehen – berühren und der „tragenden Kontaktfläche (A_t)“, die der Summe aller mikroskopischen Berührungsflächen entspricht. Das sind die Teile der scheinbaren Kontaktfläche, auf denen die Kontaktkraft wirksam wird. In dieser wiederum wird als „wirksame Kontaktfläche (A_w)“ der Teil der tragenden Kontaktflächen bezeichnet, in dem auch tatsächlich

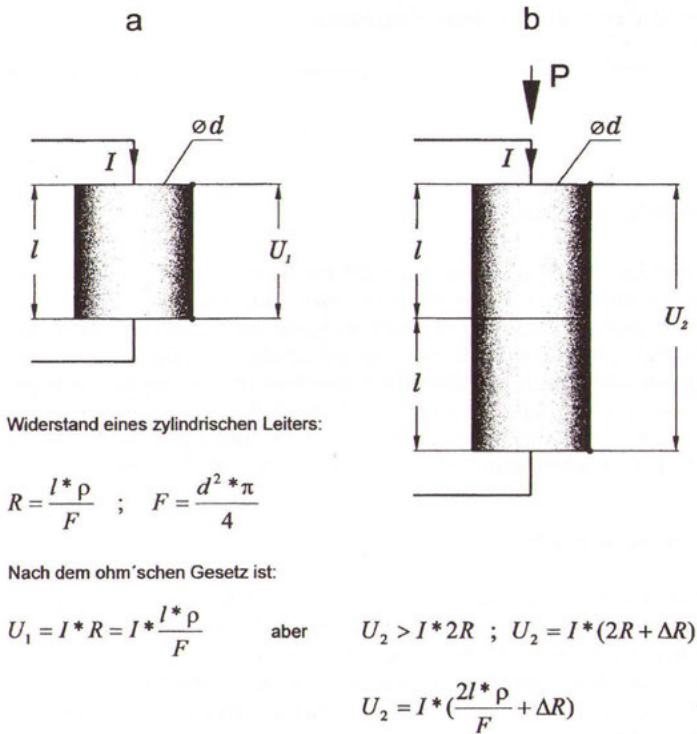


Bild 1.1: Zur Entstehung des „Kontaktwiderstandes“

eine Stromleitung stattfindet; sie ist die Summe aller stromführungsfähigen Einzelflächen, den sog. Mikroflächen oder „*a-spots*“ (Bild 1.2). Nur diese „*wirksamen Kontaktflächen*“ sorgen für den Stromübergang von dem einen zum anderen Kontaktstück. Im Idealfall sind „*tragende Kontaktflächen*“ und „*wirksame Kontaktflächen*“ identisch. Die Widerstandserhöhung einer solchen Kontaktanordnung mit echten metallischen Berührungsflächen wird Engewiderstand R_E genannt. Nach Holm [5] ergibt die exakte Rechnung für eine ideale kreisförmige elektrisch leitende Kontaktfläche zweier Kontaktstücke als Äquipotentialflächen konfokaler Ellipsoide, aus denen der Engewiderstand bestimmt werden kann:

$$R_E = \frac{\rho}{2a}$$

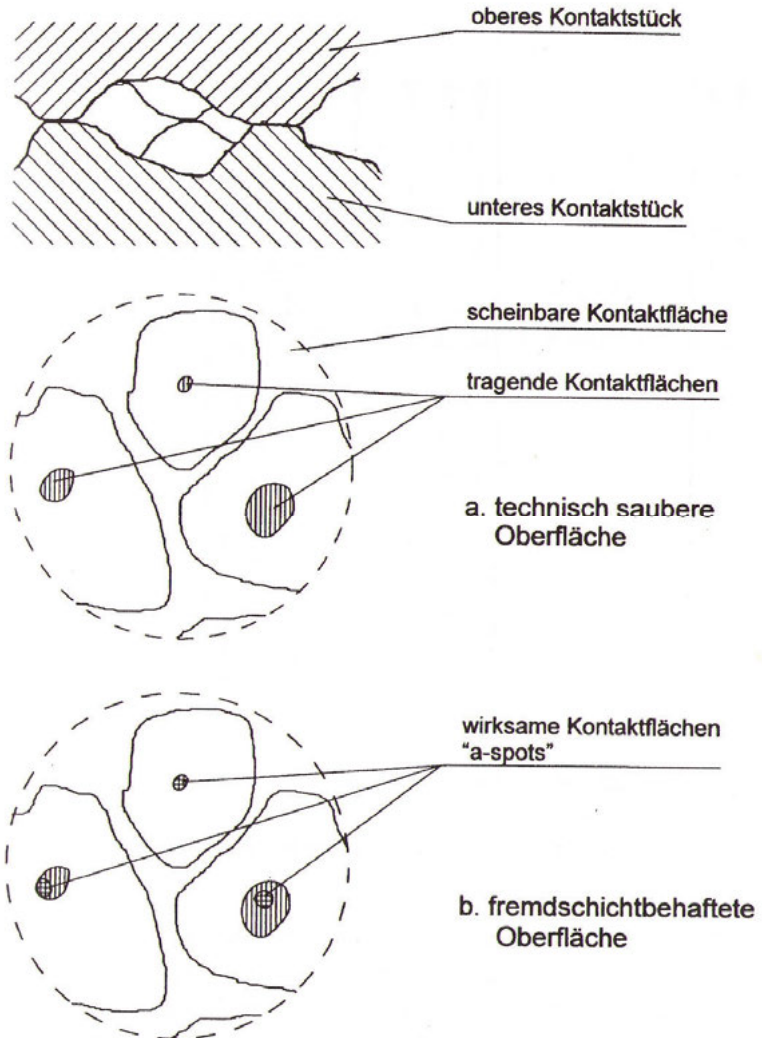


Bild 1.2: Mikrostruktur einer Kontaktoberfläche

Darin ist ρ der spezifische Widerstand des Kontaktwerkstoffes in Ωcm und a der Radius in cm der kreisförmig gedachten Kontaktfläche. Der Engewiderstand ist also kein Oberflächen-, sondern ein Volumeneffekt im Bereich der Engstelle eines elektrischen Stromdurchgangs, der durch ein Ellipsoid beschrieben wird.

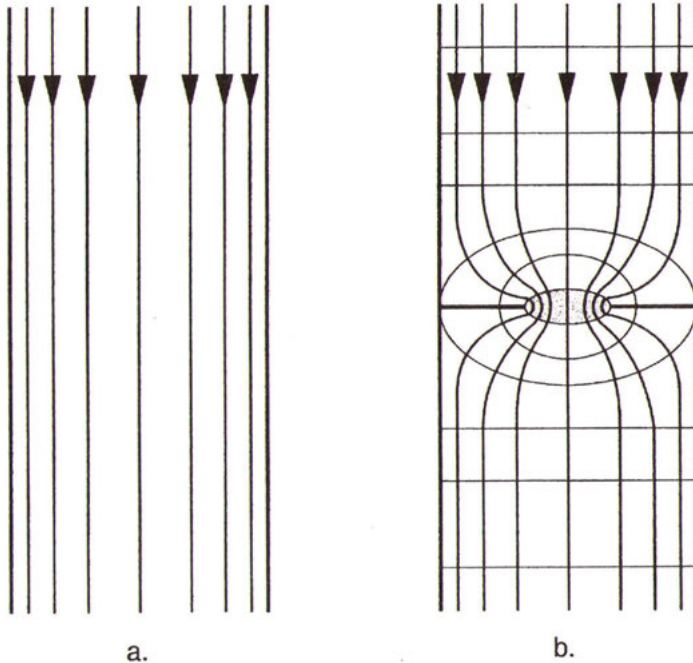
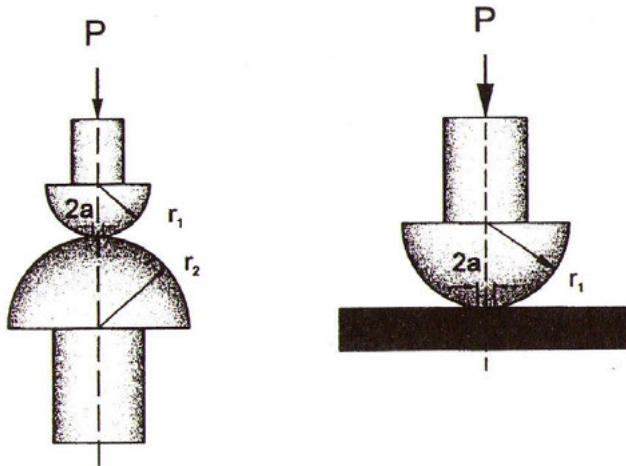


Bild 1.3: Schematische Darstellung der Stromfäden
 a. in einem homogenen Leiter
 b. in einer Stromenge mit den dazugehörigen Potentialflächen [3]

Unter der Annahme, dass die Abstände zwischen den Mikroflächen ausreichend groß sind, so dass die Wechselwirkungen der durch diese a-spots fließenden Ströme zu vernachlässigen sind, kann diese Beziehung näherungsweise auch für beliebig geformte Kontakte verwendet werden; der Radius a der „tragenden Kontaktfläche“ ist dann der Radius in cm der kreisförmig gedachten Kontaktfläche, die sich mit Hilfe der aus der Festigkeitslehre bekannten Hertz'schen Gleichungen für die Berührung zweier Körper (Kugel-Kugel; Kugel-Platte; gekreuzte Stäbe etc.) berechnen lässt – Bild 1.4 zeigt ein Beispiel. Diese Fläche repräsentiert in erster Näherung die Summe aller tragenden Einzelflächen.

Wesentlich exakter ist die von Greenwood und Mitarbeitern formulierte Theorie des Engewiderstandes, die zusätzlich die Wechselwirkung zwischen den durch die Mikroflächen fließenden Ströme berücksichtigt, und die davon ausgeht, dass die Mikroflächen mit unterschiedlichen Radien ungleichmäßig in der scheinbaren Kontaktfläche verteilt liegen [3]; [4].



Nach Hertz ist a:

$$a = \sqrt[3]{\frac{3}{2} P * \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} \right) + \left(\frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right) * \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)^{-1}}$$

P: Kontaktkraft
 μ_1, μ_2 : Kehrwerte der Poisson-Zahlen der Kontaktstücke
 E_1, E_2 : E-Module der Kontaktstücke
 r_1, r_2 : Radien der Kontaktstücke

mit $\mu_1 = \mu_2 = 0,3$; $E_1 = E_2$ und $\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} = \frac{1}{r}$ wird:

$$a = 1,11 * \sqrt[3]{\frac{P * r}{E}}$$

Bild 1.4: Bestimmung der tragenden Kontaktfläche

1.1.2 Engewiderstand und Kontaktkraft

Da der Engewiderstand eine statistische Größe ist, die von der Zahl, Größe und Verteilung der Mikroflächen abhängig ist, kann für eine vorgegebene Kontaktkraft nur der wahrscheinlichste Wert des Engewiderstandes (Mittelwert) angegeben werden.

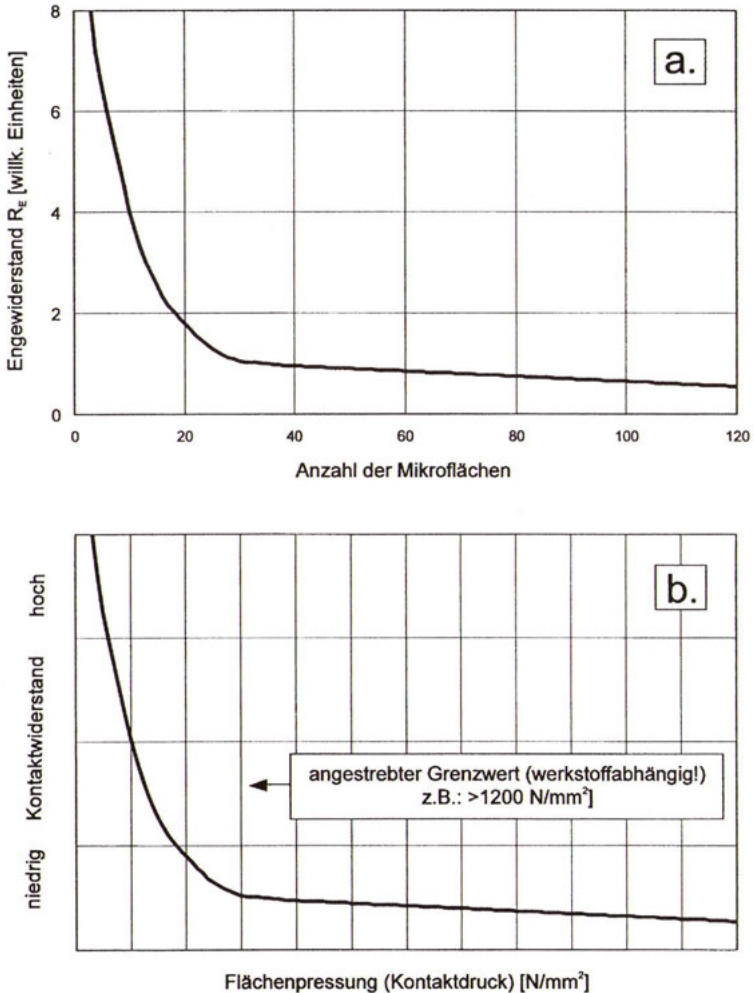


Bild 1.5: Abhängigkeit des Enge-/Kontaktwiderstandes
 a. von der Anzahl der Mikroflächen (a-spots)
 b. von der Flächenpressung (des Kontaktdrucks)

Variiert die Kontaktkraft, dann ändert sich auch Zahl, Größe und Verteilung der Mikroflächen und damit auch dieser wahrscheinlichste Wert. Bild 1.5a zeigt die Abhängigkeit des Engewiderstandes von der Anzahl der Mikroflächen. Die Lage der Flächen und deren unterschiedliche Größe ist hierbei nicht berücksichtigt [6]; [7]. Nimmt die Anzahl der a-spots von 100 auf etwa 40 ab, dann verändert sich der Engewiderstand kaum, bei einer weiteren Reduzierung steigt er jedoch steil an, u.U. bis zum totalen Ausfall der Verbindung. D. h. bei hohen Kontaktkräften mit vielen Mikroflächen, wie sie in Schraub- und Klemmverbindungen üblich sind, ist der Engewiderstand praktisch eine Konstante; während bei niedrigen Kontaktkräften, wie sie beispielsweise in Steckverbindern oder Relais auftreten, eine größere Streuung zu höheren Werten des Kontaktwiderstandes auch bei fremschichtfreien Kontaktflächen zu erwarten ist. Da die Größe der a-spots, ihre Anzahl und ihre Lage zueinander schwierig zu bestimmen sind, lässt sich der Engewiderstand mit hinreichender Genauigkeit nach der folgenden – empirisch gefundenen – Beziehung abschätzen, die den Zusammenhang zwischen Engewiderstand, Härte der Kontaktstücke und Kontaktkraft beschreibt [6].

$$R_E = 0,89 \frac{\rho_1 + \rho_2}{2} \sqrt{\frac{H}{P_K}}$$

Darin sind ρ_1 und ρ_2 die spezifischen Widerstände der Kontaktwerkstoffe in Ωcm ; H die Kontakthärte in N/cm^2 und P_K die Kontaktkraft in N.

Für die Zuverlässigkeit eines Kontaktes ist jedoch nicht die Kontaktkraft, sondern der Kontaktdruck (die Flächenpressung) von besonderer Bedeutung. Untersuchungen haben ergeben, dass sich die Abhängigkeit des Kontaktwiderstandes vom Kontaktdruck ähnlich verhält wie die von der Anzahl der Mikroflächen – Bild 1.5b. Anzustreben ist ein Wert im flachen Teil der Kurve, da in diesem Bereich Druckänderungen nur einen geringen Einfluss auf den Kontaktwiderstand haben. Für den anzustrebenden Grenzwert lassen sich leider keine allgemeinverbindlichen Angaben machen, da er nicht nur vom Werkstoff selbst (Härte und Duktilität sowie deren Änderung durch Kaltverformung), sondern auch von der Rauigkeit der Oberfläche und den Eigenschaften des Untergrundes abhängt.

1.1.3 Der fremschichtbehaftete Kontakt

An sich ist jede reine Metalloberfläche außer im Ultrahochvakuum mit mehreren Lagen Fremdmolekülen bedeckt, die den Kontaktwiderstand jedoch nur geringfügig beeinflussen. Dickere Ablagerungen, die die Eigenschaften der Kontaktoberfläche merklich verändern, werden als Fremdschichten bezeichnet. Sie verursachen eine Zunahme des Kontaktwiderstandes durch den sog. Fremdschichtwiderstand R_F . Die Bedeckung der Kontaktflächen reicht von monomolekularen Adsorptionsschichten in einer Dicke von einigen 10^{-10} m, bis hin zu dicken, sichtbaren Korrosionsschichten, die z. T. kristallin sind ($d > 10^{-6}$ m). Nach Holm [5] lassen sich die Oberflächen von Kontaktstücken folgendermaßen klassifizieren:

- Metallische Berührungsflächen (a-spots), die nur den Engewiderstand verursachen;

- Quasimetallische Berührungsflächen, die mit einer adsorbierten Gashaut bedeckt sind, durch die Elektronen verlustlos tunneln können (sie sind also elektrisch von a nicht zu unterscheiden);
- halbleitende Fremdschichten;
- mechanisch tragende Fremdschichten, mit hohem Widerstand bis hin zur Isolation.

Fremdschichten oder sonstige Verunreinigungen verringern in der wahren Berührungsfläche den Flächenanteil für den ungestörten Stromübergang; d. h. der Kontaktwiderstand R_K steigt an; es kommt ein Anteil durch den sog. Fremdschichtwiderstand R_F hinzu, der von der Dicke sowie den elektrischen Eigenschaften der Schicht abhängt. Nach Holm [5] ist der Fremdschichtwiderstand einer kreisförmigen Berührungsstelle, die gleichmäßig mit einem dünnen Film überzogen ist, näherungsweise

$$R_F = \frac{\sigma}{\pi a^2}$$

Darin ist σ der Hautwiderstand der Fremdschicht in Ωcm^2 und a der Radius der Berührungsfläche in cm.

Kontaktwerkstoff	σ_1 [Ωcm^2] einige Sekunden nach dem Schaben	σ_2 [Ωcm^2] nach 14 tägiger Lagerung an Luft
Gold	0	5×10^{-9}
Silber	0	5×10^{-9}
Platin	5×10^{-9}	
Nickel	2×10^{-8}	
Iridium	4×10^{-8}	
Silber-Palladium 70/30	5×10^{-9}	
Platin-Iridium 90/10	5×10^{-9}	
Platin-Iridium 80/20	5×10^{-9}	
Platin-Nickel 92/8	1×10^{-8}	

Tabelle 1.1: Hautwiderstand geschabter Kontaktstücke [1]

In Tabelle 1.1 sind Werte für den Hautwiderstand einiger Kontaktwerkstoffe zusammengestellt. Werden die Fremdschichten durch chemische Oberflächenreaktionen gebildet, dann ist zu beachten, dass diese im Allgemeinen wesentlich dicker sind; sie

wachsen zudem häufig noch stetig über lange Zeiträume und sie behindern den Stromfluss merklich – u.U. bis zur vollständigen Isolation. Auf Werkstoffen, wie sie üblicherweise für elektrische Kontakte verwendet werden, haben solche Fremdschichten meist die Eigenschaften von Halbleitern. Es handelt sich dabei im Wesentlichen um Metalloxide und -sulfide, die beide zu den Störstellenhalbleitern zählen. Eine typische Eigenschaft dieser Gruppe ist neben der außerordentlich starken Änderung des spezifischen Widerstandes bei minimalen Abweichungen ihres inneren Aufbaus (Stöchiometrie) der negative Temperaturkoeffizient des spezifischen Widerstandes.

Oxid	ρ (Oxid) [Ωcm]	Metall	ρ (Metall) [Ωcm]
WO ₃	$1 \times 10^1 \dots 1 \times 10^{12}$	W	5×10^{-6}
Cu ₂ O	$1 \times 10^3 \dots 1 \times 10^{10}$	Cu	$1,5 \times 10^{-6}$
NiO	$1 \times 10^3 \dots 1 \times 10^8$	Ni	6×10^{-4}

Tabelle 1.2: Spezifische Widerstände einiger Metalloxide im Vergleich zum Metall [1]

Tabelle 1.2 zeigt, in welchen Wertebereichen die spezifischen Widerstände solcher Schichten im Vergleich zum reinen Metall liegen können. Zur Berechnung des Fremdschichtwiderstandes muss in diesem Fall der spezifische Widerstand der Fremdschicht herangezogen werden. Kesselring [8] formulierte dafür eine empirische Beziehung zwischen dem Kontaktwiderstand und der Kontaktkraft, die auch die Mikrogeometrie der Kontaktflächen berücksichtigt:

$$R_F = K\rho P^{-n}$$

Hierin ist K eine Konstante, die den Zustand der Kontaktfläche beschreibt (z. B. für Kupfer feingebürstet ist $K = 45$, grobgebürstet $K = 110$ und sandgestrahlt $K = 150$); ρ der spezifische Widerstand der Fremdschicht und P die Kontaktkraft; der Exponent n liegt zwischen 0,9 und 1.

1.1.4 Der Kontaktwiderstand

Der Engewiderstand R_E mit Beiträgen von a und b nach der Holm'schen Klassifizierung und der Fremdschichtwiderstand R_F mit Beiträgen nach c und d bestimmen zusammen den Kontaktwiderstand. Es ist in erster Näherung:

$$R_K = R_E + R_F$$

Wenn $R_F \gg R_E$ wird, dann ist es nicht mehr zulässig die beiden Terme zu addieren, da Enge- und Fremdschichtwiderstand unter dieser Bedingung nicht mehr unabhängig voneinander sind. Addiert man zum Kontaktwiderstand noch die Bahnwiderstände der Kontaktfedern und Anschlüsse hinzu, dann erhält man den Durchgangswiderstand R_D ;

das ist der Widerstand, der zwischen den äußeren Anschlüssen einer Kontaktanordnung gemessen werden kann.

1.1.5 Die R-U-Kennlinien von Kontakten

Erhöht man kontinuierlich den Strom durch einen elektrischen Kontakt, dann nimmt nicht nur der Spannungsabfall an der Kontaktstelle zu, sondern durch die in der Enge-

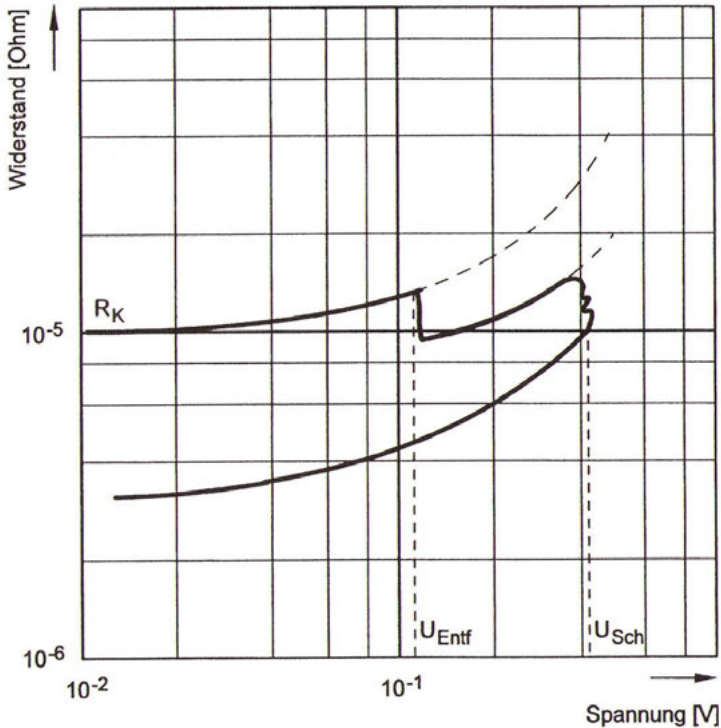


Bild 1.6: Typische R-U-Kennlinie eines metallisch sauberen Kontaktes

stelle umgesetzte Leistung auch die Temperatur und damit aufgrund des positiven Temperaturkoeffizienten des Kontaktmaterials der Kontaktwiderstand – s. Bild 1.6.

Wird die Entfestigungstemperatur des Kontaktwerkstoffes erreicht, erweicht das Material und die Kontaktfläche vergrößert sich unter Einwirkung der Kontaktkraft schlagartig, so dass der Kontaktwiderstand absinkt. Wird der Strom weiter erhöht, dann steigt der Kontaktwiderstand wieder aufgrund des positiven Temperaturkoeffizienten an, bis die Schmelztemperatur in der Engstelle erreicht ist, die schmelzflüssige Kontaktstelle sich abrupt vergrößert und der Kontaktwiderstand auf einen Minimalwert abfällt. Während der Widerstandesverlauf im Bereich der aufsteigenden Äste reversibel ist, ist der das nach dem Erreichen der Schmelztemperatur nicht mehr. Die