

# Inhalt

<b>0</b>	<b>Einleitung – Vorbemerkungen</b> .....	<b>11</b>
	<b>Vorwort zur 4. Auflage</b> .....	<b>15</b>
<b>1</b>	<b>Grundbegriffe</b> .....	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>Physikalische Grundlagen</b> .....	<b>27</b>
2.1	Grundgrößen des elektrostatischen Felds .....	27
2.1.1	Elektrische Ladung $Q$ .....	27
2.1.2	Elektrischer Strom $I$ .....	31
2.1.3	Stromdichte $S$ .....	31
2.1.4	Potential $\varphi$ .....	33
2.1.5	Elektrische Spannung $U$ .....	34
2.1.6	Elektrischer Widerstand $R$ .....	35
2.1.7	Elektrische Energie $W$ .....	36
2.1.8	Elektrische Leistung $P$ .....	37
2.2	Elektrostatisches Feld .....	38
2.2.1	Leiter im elektrostatischen Feld .....	40
2.2.2	Verschiebungsflussdichte $\Psi$ .....	41
2.3	Beziehung zwischen Kapazität, Ladung, Spannung (Kondensator) .....	44
2.4	Energie im elektrostatischen Feld .....	47
2.5	Bewegung freier Ladungen im elektrostatischen Feld .....	48
2.6	Reibungselektrizität und Kontaktspannung .....	48
2.6.1	Reibungselektrizität .....	49
2.6.2	Kontaktspannung .....	49
<b>3</b>	<b>Entstehen von elektrostatischen Aufladungen</b> .....	<b>53</b>
3.1	Allgemeine Entstehungsmechanismen .....	53
3.2	Allgemeine Entladungsmechanismen .....	60
3.2.1	Typische Personenentladung .....	60
3.2.2	Allgemeine Entladungsarten .....	62

<b>4</b>	<b>Einflussmechanismen elektrostatischer Entladungsvorgänge auf elektronische Bauelemente. . . . .</b>	<b>67</b>
4.1	Human Body Model – Körper-Entladungsmodell. . . . .	68
4.2	Charged Device Model – Modell vom geladenen Objekt . . . . .	73
4.3	Machine Model (MM) . . . . .	81
4.4	Field Induced Model – Entstehung elektrostatischer Ladungen durch ein elektrisches Feld . . . . .	85
4.5	Weitere Entladungsmodelle – Einzelbauelemente . . . . .	86
4.6	Weitere Entladungsmodelle – Geräte . . . . .	88
4.7	Zusammenfassung . . . . .	89
<b>5</b>	<b>Wirkungen von ESD auf elektronische Bauelemente. . . . .</b>	<b>91</b>
5.1	Aufbau und Wirkungsweise elektronischer Bauelemente . . . . .	91
5.1.1	Halbleiter allgemein. . . . .	91
5.1.2	Leiter . . . . .	92
5.1.3	Halbleiter . . . . .	92
5.1.4	Isolator . . . . .	93
5.1.5	Halbleiter – Aufbau und Wirkungsweise . . . . .	93
5.1.6	PN-Übergang – Diode . . . . .	95
5.1.7	NPN- bzw. PNP-Übergang – Transistor . . . . .	96
5.1.8	Feldeffekttransistor . . . . .	97
5.2	Entladung an einem MOS-Transistor . . . . .	100
5.2.1	Praktische MOS-Anordnungen . . . . .	100
5.2.2	Entladung an einem MOS-Transistor . . . . .	101
5.2.3	Entladung an einem Leistungs-MOS-Transistor . . . . .	102
5.3	Latente Fehler oder Degradation . . . . .	104
5.4	Wirkungen von ESD auf bipolare Bauelemente . . . . .	107
5.4.1	<i>Wunsch-Bell</i> -Modell zum Bestimmen von ESD-Fehlern . . . . .	107
5.4.2	Berechnen der ESD-Spannungsschwelle von PN-Übergängen. . . . .	108
<b>6</b>	<b>Fehlermodelle elektronischer Bauelemente . . . . .</b>	<b>113</b>
6.1	Thermischer Durchbruch . . . . .	114
6.2	Dielektrischer Durchbruch. . . . .	115
6.3	Aufschmelzen der Metallisierung . . . . .	116
<b>7</b>	<b>Schutzmaßnahmen . . . . .</b>	<b>119</b>
7.1.	Integrierte Schutzschaltungen . . . . .	119
7.1.1	Widerstandsnetzwerk. . . . .	120
7.1.2	Diodenkombination . . . . .	121
7.1.3	Widerstands-Dioden-Kombination . . . . .	121

7.1.4	Feldplattenelektrode . . . . .	122
7.1.5	Punch-through-Transistor mit dünnem Gate-Oxid . . . . .	123
7.1.6	Punch-through-Transistor mit dickem Gate-Oxid (dicker Oxid-Anreicherungs-sperrschicht-Transistor) . . . . .	125
7.1.7	Praktische Schutzschaltungsanordnungen . . . . .	125
7.2	Technologische Schutzmaßnahmen . . . . .	126
7.3	Organisatorische Schutzmaßnahmen . . . . .	128
7.3.1	Gestalten der Arbeitsplätze, Arbeitsräume und Arbeitsbereiche . . .	130
7.3.2	Anforderungen an einen ableitfähigen Arbeitstisch . . . . .	133
7.3.3	Anforderungen an einen ableitfähigen Arbeitsstuhl . . . . .	134
7.3.4	Anforderungen an den ableitfähigen Fußboden . . . . .	135
7.3.5	Anforderungen an die Handgelenkerdung . . . . .	140
7.3.6	Anforderungen an die Erdungseinrichtung . . . . .	141
7.3.7	Anforderungen an die Personenausrüstung – ESD-gerechte Bekleidung und ableitfähige Schuhe . . . . .	143
7.3.8	Anforderungen an Lagereinrichtungen . . . . .	145
7.3.9	Anforderungen an die Abgrenzung und Kennzeichnung . . . . .	146
7.3.10	Kontrolle der Luftfeuchtigkeit . . . . .	148
7.3.11	Ionisation . . . . .	148
7.4	ESD-gerechte Ausführung von Maschinen und Anlagen . . . . .	154
7.5	Verhalten der Arbeitskräfte . . . . .	156
7.6	Leitfähige und ableitfähige Verpackungen . . . . .	158
7.6.1	Allgemeines . . . . .	158
7.6.2	Folien . . . . .	159
7.6.2.1	Anforderungen und Eigenschaften von Folien . . . . .	159
7.6.2.2	Nicht aufladbare Folien . . . . .	160
7.6.2.3	Leitfähige Folien . . . . .	161
7.6.2.4	Elektrostatisch abschirmende Folien . . . . .	161
7.6.3	Versandstangen, Trays, Reels . . . . .	163
7.6.4	Wirkung von Antistatika . . . . .	164
7.7	Aufgaben und Kontrollfunktionen eines ESD-Koordinators – Überprüfungsrichtlinien . . . . .	166
7.8	ESD-Kontrollsystem (ECS) – 5-Stufen-Plan . . . . .	169
<b>8</b>	<b>Technische Merkblätter für den ESD-Komplex . . . . .</b>	<b>175</b>
<b>9</b>	<b>Messverfahren . . . . .</b>	<b>195</b>
9.1	Messen der elektrostatischen Ladung . . . . .	195
9.2	Messen der elektrischen Feldstärke in einem elektrostatischen Feld . . . . .	199

9.3	Messen von Oberflächen- und Ableitwiderständen . . . . .	206
9.3.1	Anwendungshinweise für den Einsatz der im Folgenden beschriebenen Messverfahren und Messprinzipien . . . . .	209
9.3.2	Messen von Oberflächenwiderständen . . . . .	211
9.3.3	Messen von Ableitwiderständen . . . . .	218
9.3.4	Messen von Volumenwiderständen . . . . .	224
9.3.5	Sonstige Messverfahren . . . . .	227
9.4	Praktische Messungen und Messvorschriften für Ableit- und Oberflächenwiderstände zum Ermitteln der Wirksamkeit der ESD-Kontrollmaßnahmen . . . . .	229
9.4.1	ESD-gerechte Fußböden . . . . .	230
9.4.1.1	Ableitwiderstand von Fußböden . . . . .	230
9.4.1.2	Oberflächenwiderstand von Fußböden und Materialien für Fußböden . . . . .	232
9.4.2	ESD-gerechte Arbeitsoberflächen . . . . .	233
9.4.2.1	Ableitwiderstand von Arbeitsoberflächen . . . . .	233
9.4.2.2	Oberflächenwiderstand von Arbeitsoberflächen und Materialien für Arbeitsoberflächen . . . . .	235
9.4.2.3	Regaloberflächen . . . . .	235
9.4.3	Prüfen von Transportwagen . . . . .	237
9.4.4	Prüfen von ESD-gerechten Stühlen . . . . .	237
9.4.5	Prüfen ESD-gerechter Bekleidung . . . . .	239
9.4.5.1	Schuhwerk . . . . .	239
9.4.5.2	Arbeitsbekleidung . . . . .	241
9.4.5.3	Handschuhe und Fingerlinge . . . . .	244
9.4.6	Werkzeuge . . . . .	246
9.4.7	Verpackungsmaterialien . . . . .	247
9.4.7.1	ESD-gerechte Folien . . . . .	247
9.4.7.2	Wellpappe, leitfähig beschichtet . . . . .	248
9.4.7.3	IC-Versandstangen, Rollen, Gurte usw. . . . .	249
9.5	Messen der Aufladbarkeit von Materialien . . . . .	249
9.5.1	Aufladbarkeit von Bodenbelägen . . . . .	249
9.5.2	Aufladung von Personen beim Gehen über einen Fußboden . . . . .	250
9.5.3	Aufladbarkeit von Arbeitsplatzoberflächen . . . . .	252
9.6	Bestimmen der Materialeigenschaften von Verpackungsmaterialien . . . . .	253
9.6.1	Oberflächenwiderstand . . . . .	254
9.6.2	Volumenwiderstand . . . . .	255
9.6.3	Abschirmverhalten . . . . .	257

9.6.4	Ableitzeitmessung – Static decay time . . . . .	257
9.7	Entladezeit-Ionisatoren . . . . .	260
9.8	Luftfeuchtigkeit und Temperatur . . . . .	263
9.9	Einige Probleme beim Messen elektrostatischer Kenngrößen . . . . .	264
<b>10</b>	<b>ESD-Normung. . . . .</b>	<b>265</b>
10.1	Stand und Tendenzen bei der ESD-Normung. . . . .	265
10.2	ESD-Normung DIN EN 61340-5-1 (VDE 0300-5-1) und DIN EN 61340-5-1 Beiblatt 1 (VDE 0300-5-1 Beiblatt 1) . . . . .	270
10.2.1	Anwendungsbereich . . . . .	270
10.2.2	Grundspezifikation – Allgemeine Anforderungen – Allgemeines . . . . .	271
10.2.3	Definitionen . . . . .	272
10.2.4	ESD-Kontrollprogramm . . . . .	275
10.2.4.1	Anforderungen an ein ESD-Kontrollprogramm . . . . .	275
10.2.4.2	ESD-Koordinator . . . . .	276
10.2.4.3	Anpassung. . . . .	276
10.2.4.4	ESD-Kontrollprogramm . . . . .	277
10.2.4.5	Anforderungen an die ESD-Schutzzone (EPA) . . . . .	282
10.2.4.6	Kennzeichnung von ESDS-, ESD-gerechten Materialien und Ausrüstungen sowie ESD-Arbeitsplätzen und -Bereichen . . . . .	302
10.3	Anforderungen an ESD-gerechte Transportmittel und Verpackungen . . . . .	306
10.4	ESD-Kontrollmaßnahmen bei Einkauf, Wareneingang, Lagerung . . . . .	309
10.5	Schulung des Personals. . . . .	310
10.6	Qualitätsverantwortung. . . . .	311
10.7	Normgerechte Mess- und Prüfverfahren für ESD-Kontrollmaßnahmen und Materialien, die in einer EPA eingesetzt werden sollen . . . . .	316
10.7.1	Widerstandsmessungen. . . . .	316
10.7.1.1	Oberflächenwiderstand . . . . .	317
10.7.1.2	Ableitwiderstand. . . . .	318
10.7.1.3	Vergleich und Beurteilung der Messverfahren für Ableit- und Oberflächenwiderstände . . . . .	318
10.7.2	Tägliche Kontrolle von Handgelenk-Erdungsarmbändern und Schuhen. . . . .	318
10.7.3	Normgerechtes Prüfen von Materialien und Ausrüstungen . . . . .	320
10.8	Besondere Anforderungen . . . . .	320
10.8.1	Anforderungen bei niedriger Luftfeuchtigkeit . . . . .	320
10.8.2	Anforderungen an ESD-gerechte Reinraumbereiche . . . . .	321

10.8.3	Anforderungen an Bereiche, in denen mit offenen Spannungen gearbeitet wird. ....	321
10.9	Muster für ein ESD-Kontrollprogramm .....	322
<b>11</b>	<b>Praktische Messungen und Erfahrungen .....</b>	<b>335</b>
11.1	Erfahrungen bei der Messung von Fußböden sowie Arbeitsplatzoberflächen nach der aktuellen ESD-Norm DIN EN 61340-5-1 (VDE 0300-5-1) .....	335
11.2	Erfahrungen bei der Messung von Verpackungsmaterialien für elektronische Bauelemente und Baugruppen nach der aktuellen ESD-Norm DIN EN 61340-5-1 (VDE 0300-5-1) und der DIN EN 61340-5-3 (VDE 0300-5-3) .....	349
<b>12</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>357</b>
	<b>Stichwortverzeichnis .....</b>	<b>365</b>