

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Elektrostatische Aufladung	1
1.2	Elektrostatische Entladung (ESD)	2
2	Problemstellung	5
3	Versuchstechnik	7
3.1	Anforderungen an die Versuchstechnik	8
3.1.1	Bandbreite	8
3.1.2	Feldmessung	10
3.1.3	Geschwindigkeit der Annäherung und Lichtbogenlänge	12
3.2	Meßaufnehmer.....	12
3.2.1	Elektrischer Feldsensor.....	13
3.2.2	Magnetischer Feldsensor	17
3.2.3	Stromsensor	22
3.2.4	Entfernungs- und Geschwindigkeitsmessung.....	25
3.3	Meßaufbauten	29
3.3.1	Feldmeßplatz	29
3.3.2	Meßaufbau zur Erfassung des Lichtbogenwiderstandes.....	30
3.3.3	Impedanzmeßaufbau.....	33
3.3.4	Meßaufbau zur Kalibration der Feldsensoren.....	35
4	Der Luftdurchschlag unter den Bedingungen der ESD	36
4.1	Phasen der Durchschlagentwicklung.....	37
4.1.2	Trennung in Initiierungs- und Durchschlagphase.....	41
4.2	Initiierungsphase	44
4.2.1	Lichtbogenlänge	44
4.2.1.1	Lichtbogenlänge bei unbewegten Elektroden.....	44
4.2.1.2	Lichtbogenlänge bei bewegten Elektroden.....	45
4.2.2	Statistische Streuzeit bei ESD	47
4.2.2.1	Einfluß energiereicher Strahlung und des Funkenstreckenvolumens.....	54
4.2.2.2	Einfluß des Photoeffektes	49
4.2.2.3	Einfluß von Vorentladungen.....	50
4.2.2.4	Einfluß von Oberflächeneffekten und der	

	Elektrodenfläche	50
	4.2.2.5 Einfluß der Feldemission.....	52
	4.2.2.6 Einfluß der Luftfeuchte.....	52
	4.2.3 Einfluß der Geschwindigkeit auf die Lichtbogenlänge	55
	4.2.4 Interpretation früherer Erklärungen der schlechten Reproduzierbarkeit.....	57
	4.2.5 Klassifizierung von Entladungen anhand der relativen Lichtbogenlänge.....	58
	4.2.5.1 ESD Klasseneinteilung gemäß der relativen Lichtbogenlänge.....	59
	4.2.5.2 Interpretation bestehender Klasseneinteilung nach dem Gesichtspunkt der relativen Lichtbogenlänge	60
4.3	Durchschlagphase.....	62
	4.3.1 Gesetze zur Beschreibung der resistiven Phase.....	62
	4.3.1.1 Gesetz von Toepler	62
	4.3.1.2 Erweiterung des Toeplerschen Gesetzes.....	64
	4.3.1.3 Gesetz von Rompe und Weizel.....	66
	4.3.1.4 Gesetz von Braginski	68
	4.3.1.5 t^3 Gesetz.....	68
	4.3.2 Anforderungen an die Modellierung von ESD	69
	4.3.3 Meßtechnischer Vergleich der Modelle.....	69
	4.3.3.1 Anwendbarkeit des Toeplerschen Gesetzes sowie des t^3 Gesetzes	72
	4.3.3.2 Anwendbarkeit des Gesetzes nach Rompe und Weizel und des erweiterten Toeplerschen Modells.....	73
	4.3.4 Arbeiten anderer Autoren zu Lichtbogenmodellen bei ESD	81
	4.3.4.1 Ergebnisse von Daout et. al	81
	4.3.4.2 Ergebnisse von Renninger	83
5	Simulation der ESD	85
	5.1 Berechnung des eingespeisten Stroms durch Ersatzschaltbilder.....	85
	5.2 Berechnung der transienten Felder	90
	5.2.1 Bisherige Verfahren zur Berechnung indirekter ESD	90
	5.2.2 Berechnung der transienten Felder mittels der Methode der Momente.....	91
	5.2.2.1 Numerische Berechnung des Entladevorgangs.....	92
	5.2.2.2 Behandlung der Randbedingungen und Anfangswerte	97

5.2.2.3	Bestimmung des elektrischen und des magnetischen Feldes im Raum	99
5.2.3	Verifikation der Berechnungsmethode.....	100
5.2.3.1	Verifikation ohne Lichtbogen.....	100
5.2.3.2	Verifikation bei Berücksichtigung des Lichtbogens.....	101
5.3	Vergleich der Simulationsmethoden.....	102
6	Minimal mögliche Anstiegszeit bei ESD.....	104
6.1	Theorie zur Unter- und Obergrenze der Anstiegszeit.....	104
6.2	Berechnung der Grenze der Anstiegszeit	106
7	Störintensität transienter Felder der ESD	110
7.1	Bisherige Erkenntnisse	110
7.2	Begriff der 'Störintensität'	112
7.3	Einfluß der wesentlichen Parameter auf die Störintensität.....	113
7.3.1	Einfluß der Lichtbogenlänge und der Ladespannung auf die Störintensität.....	113
7.3.2	Einfluß des Abstandes vom Entladeort	120
7.3.2.1	Nahfeld - Fernfeld Übergang	120
7.3.2.2	Einfluß der Lichtbogenlänge auf dieEntfernungsabhängigkeit.....	122
7.3.2.3	Entfernungsabhängigkeit des 'initial peak' von ESD-Simulatoren (contact mode).....	124
7.3.2.4	Entfernungsabhängigkeit bei ESD-Simulatoren für Zeiträume nach dem 'initial peak'.....	126
7.4	Vergleichende Untersuchungen der Entladungen des Menschen, von Gegenständen und Simulatoren.....	126
7.4.1	Vergleich verschiedener Simulatoren gemäß IEC-801-2	126
7.4.2	ESD von Gegenständen im Vergleich mit der ESD von Simulatoren	128
7.4.3	Vergleich der transienten Felder der ESD des Menschen mit der ESD von Simulatoren gemäß IEC-801-2.....	131
8	Ausblick	134
9	Zusammenfassung	137
	Literaturverzeichnis	140