

	DIN IEC 61340-1 (VDE 0300-1)	DIN
	Diese Norm ist zugleich eine VDE-Bestimmung im Sinne von VDE 0022. Sie ist nach Durchführung des vom VDE-Präsidium beschlossenen Genehmigungsverfahrens unter der oben angeführten Nummer in das VDE-Vorschriftenwerk aufgenommen und in der „etz Elektrotechnik + Automation“ bekannt gegeben worden.	VDE

ICS 17.220.20; 29.020

Einsprüche bis 2007-08-31

Entwurf

Richtlinie zu den Grundlagen elektrostatischer Vorgänge und deren Messungen (IEC 101/240/CD:2006)

Guide to the principles of electrostatic phenomena and their measurement
(IEC 101/240/CD:2006)

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfes besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise als Datei per E-Mail an **dke@vde.com** in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter **www.dke.de/stellungnahme** abgerufen werden
- oder in Papierform an die DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE, Stresemannallee 15, 60596 Frankfurt am Main.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevante Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 68 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE

– Entwurf –

E DIN IEC 61340-1 (VDE 0300-1):2007-07

Beginn der Gültigkeit

Diese Norm gilt ab ...

Nationales Vorwort

Das internationale Dokument IEC 101/240/CD:2006 „Guide to the principles of electrostatic phenomena and their measurement“ (CD, en: Committee Draft) ist unverändert in diesen Norm-Entwurf übernommen worden. Dieser Norm-Entwurf enthält eine noch nicht autorisierte deutsche Übersetzung.

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung des CD entsprechend der diesbezüglich durch die IEC erteilten Erlaubnis beigefügt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen IEC-Text.

Das internationale Dokument wurde vom TC 101 „Electrostatics“ der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) erarbeitet und den nationalen Komitees zur Stellungnahme vorgelegt.

Die IEC und das Europäische Komitee für Elektrotechnische Normung (CENELEC) haben vereinbart, dass ein auf IEC-Ebene erarbeiteter Entwurf für eine Internationale Norm zeitgleich (parallel) bei IEC und CENELEC zur Umfrage (CDV-Stadium) und Abstimmung als FDIS (en: Final Draft International Standard) bzw. Schluss-Entwurf für eine Europäische Norm gestellt wird, um eine Beschleunigung und Straffung der Normungsarbeit zu erreichen. Dokumente, die bei CENELEC als Europäische Norm angenommen und ratifiziert werden, sind unverändert als Deutsche Normen zu übernehmen.

Da der Abstimmungszeitraum für einen FDIS bzw. Schluss-Entwurf prEN nur 2 Monate beträgt, und dann keine sachlichen Stellungnahmen mehr abgegeben werden können, sondern nur noch eine „JA/NEIN“-Entscheidung möglich ist, wobei eine „NEIN“-Entscheidung fundiert begründet werden muss, wird bereits der CD als DIN-Norm-Entwurf veröffentlicht, um die Stellungnahmen aus der Öffentlichkeit frühzeitig berücksichtigen zu können.

Für diesen Norm-Entwurf ist das nationale Arbeitsgremium K 185 „Elektrostatik“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE (<http://www.dke.de>) zuständig.

Nationaler Anhang NA (informativ)

Zusammenhang mit Europäischen und Internationalen Normen

Für den Fall einer undatierten Verweisung im normativen Text (Verweisung auf eine Norm ohne Angabe des Ausgabedatums und ohne Hinweis auf eine Abschnittsnummer, eine Tabelle, ein Bild usw.) bezieht sich die Verweisung auf die jeweils neueste gültige Ausgabe der in Bezug genommenen Norm.

Für den Fall einer datierten Verweisung im normativen Text bezieht sich die Verweisung immer auf die in Bezug genommene Ausgabe der Norm.

Eine Information über den Zusammenhang der zitierten Normen mit den entsprechenden Deutschen Normen ist in Tabelle NA.1 wiedergegeben.

Tabelle NA.1

Europäische Norm	Internationale Norm	Deutsche Norm	Klassifikation im VDE-Vorschriftenwerk
CLC/TR 50404:2003	–	–	–
EN 60068-1:1994	IEC 60068-1:1988 + Corr.:1988 + A1:1992	DIN EN 60068-1:1995-03	–
EN 60079-10:2003	IEC 60079-10:2002	DIN EN 60079-10 (VDE 0165-101):2004-08	VDE 0165-101
EN 60079-17:2003	IEC 60079-17:2002	DIN EN 60079-17 (VDE 0165-10-1):2004-06	VDE 0165-10-1
–	IEC 60721-2-1:2002	–	–

Tabelle NA.1 (fortgesetzt)

Europäische Norm	Internationale Norm	Deutsche Norm	Klassifikation im VDE-Vorschriftenwerk
EN 61340-2-1:2002	IEC 61340-2-1:2002	DIN EN 61340-2-1 (VDE 0300-2-1):2003-06	VDE 0300-2-1
EN 61340-2-3:2000	IEC 61340-2-3:2000	DIN EN 61340-2-3 (VDE 0300-2-3):2000-12	VDE 0300-2-3
EN 61340-3-1:2002	IEC 61340-3-1:2002	DIN EN 61340-3-1 (VDE 0300-3-1):2003-02	VDE 0300-3-1
EN 61340-3-2:2002	IEC 61340-3-2:2002	DIN EN 61340-3-2 (VDE 0300-3-2):2003-02	VDE 0300-3-2
EN 61340-4-4:2005	IEC 61340-4-4:2005	DIN EN 61340-4-4 (VDE 0300-4-4):2006-07	VDE 0300-4-4
–	IEC 61892-7:1997	–	–

Nationaler Anhang NB (informativ)

Literaturhinweise

DIN EN 60068-1:1995-03, *Umweltprüfungen – Teil 1: Allgemeines und Leitfaden* (IEC 60068-1:1988 + Corrigendum 1988 + A1:1992); Deutsche Fassung EN 60068-1:1994

DIN EN 60079-10 (VDE 0165-101):2004-08, *Elektrische Betriebsmittel für gasexplosionsgefährdete Bereiche – Teil 10: Einteilung der explosionsgefährdeten Bereiche* (IEC 60079-10:2002); Deutsche Fassung EN 60079-10:2003

DIN EN 60079-17 (VDE 0165-10-1):2004-06, *Elektrische Betriebsmittel für gasexplosionsgefährdete Bereiche – Teil 17: Prüfung und Instandhaltung elektrischer Anlagen in explosionsgefährdeten Bereichen (ausgenommen Grubenbaue)* (IEC 60079-17:2002); Deutsche Fassung EN 60079-17:2003

DIN EN 61340-2-1 (VDE 0300-2-1):2003-06, *Elektrostatik – Teil 2-1: Messverfahren – Fähigkeit von Materialien und Erzeugnissen, elektrostatische Ladungen abzuleiten* (IEC 61340-2-1:2002); Deutsche Fassung EN 61340-2-1:2002

DIN EN 61340-2-3 (VDE 0300-2-3):2000-12, *Elektrostatik – Teil 2-3: Prüfverfahren zur Bestimmung des Widerstandes und des spezifischen Widerstandes von festen planen Werkstoffen, die zur Vermeidung elektrostatischer Aufladung verwendet werden* (IEC 61340-2-3:2000); Deutsche Fassung EN 61340-2-3:2000

DIN EN 61340-3-1 (VDE 0300-3-1):2003-02, *Elektrostatik – Teil 3-1: Verfahren zur Simulation elektrostatischer Entladung – Human Body Model (HBM) – Bauelementprüfung* (IEC 61340-3-1:2002); Deutsche Fassung EN 61340-3-1:2002

DIN EN 61340-3-2 (VDE 0300-3-2):2003-02, *Elektrostatik – Teil 3-2: Verfahren zur Simulation elektrostatischer Entladung – Machine Model (MM) – Bauelementprüfung* (IEC 61340-3-2:2002); Deutsche Fassung EN 61340-3-2:2002

DIN EN 61340-4-4 (VDE 0300-4-4):2006-07, *Elektrostatik – Teil 4-4: Normprüfverfahren für spezielle Anwendungen – Einordnung flexibler Schüttgutbehälter (FIBC) in elektrostatischer Hinsicht* (IEC 61340-4-4:2005); Deutsche Fassung EN 61340-4-4:2005

Richtlinie zu den Grundlagen elektrostatischer Vorgänge und deren Messungen

Inhalt

	Seite
Einleitung.....	6
1 Anwendungsbereich	6
2 Normative Verweisungen.....	6
3 Begriffe.....	6
4 Grundlagen statischer Elektrizität.....	11
4.1 Allgemein	11
4.2 Kontaktaufladung.....	11
4.3 Aufladung durch Influenz	12
4.4 Ladungsübertragung durch Leitung.....	12
4.5 Ladungsspeicherung.....	12
4.6 Ladungsabfluss bei Isolatoren	13
4.7 Elektrische Leitung in Materialien von sehr hohem spezifischen Widerstand.....	15
4.8 Einfluss umgebender Feuchtigkeit.....	16
4.9 Elektrostatische Entladungen	17
4.10 Zündung entzündlicher Gase, Stäube und Flüssigkeiten	19
4.11 Mechanische Kräfte im elektrostatischen Feld	19
5 Elektrostatische Probleme und Gefahren	19
5.1 Allgemein	19
5.2 Elektronische Bauteile und Systeme	20
5.3 Elektrostatische Gefahren	21
5.4 Physiologische Empfindung.....	23
5.5 Nachbilden elektrostatischer Entladungen	23
6 Allgemeine Lösungen bei Problemen und Gefahren.....	25
6.1 Allgemein	25
6.2 Übliche Ansätze	25
7 Nutzenanwendung elektrostatischer Effekte	26
8 Allgemeine Betrachtungsweisen von Messungen	27
8.1 Allgemein	27
8.2 Elektrisches Feld.....	27
8.3 Potential	28
8.4 Ladung	29
8.5 Ladungsdichte.....	30
8.6 Ladungszерfall.....	30
8.7 Widerstand und spezifischer Widerstand	31
8.8 Aufladbarkeit	32
8.9 Abschirmung	32
8.10 Strom	32
8.11 Energie kapazitiver Entladungen	33
8.12 Zündenergie.....	33
8.13 Kapazität	34
8.14 Elektrische Festigkeit	34
9 Literaturhinweise.....	34

	Seite
Bild 1 – Elektrisches Ersatzschaltbild eines elektrostatisch aufgeladenen Leiters.....	13
Bild 2 – Potentialquellen und Ladungsfluss, vorausgesetzt, die bewegliche Ladung ist positiv	14
Bild 3 – Die schematische Zeichnung eines Metall-Isolator-Metall Systems zeigt:.....	16
Bild 4 – Schaltkreis zur Nachbildung elektrostatischer Entladungen	23
Tabelle 1 – Typische elektrische Kapazitätswerte.....	18
Tabelle 2 – Empfindungsschwellen und physische Reaktionen von Personen zu Entladungen	23
Tabelle 3 – Typische Werte von Modellen für die ESD-Nachbildung.....	25
Tabelle 4 – Typische Werte für verschiedene Modelle.....	25

Einleitung

In diesem Technischen Report sind die für die Elektrostatik gebräuchlichsten Begriffe zusammengestellt. Spezialbegriffe wurden nicht aufgenommen, sie lassen sich in den entsprechenden Normen finden.

1 Anwendungsbereich

Dieser technische Report beschreibt die grundlegenden Begriffe elektrostatischer Erscheinungen einschließlich Ladungserzeugung, -erhaltung und -ableitung sowie elektrostatische Entladungen. Schlüsselbegriffe, die zur Beschreibung von Einzelheiten in dieser und mit ihr zusammenhängenden Normen verwendet werden, sind definiert. Methoden zur Messung elektrostatischer Phänomene und damit zusammenhängender Materialeigenschaften werden allgemein dargestellt. Gefahren und Probleme, die mit elektrostatischen Phänomenen in Verbindung stehen und deren grundsätzliche Überwachung werden skizziert. Nützliche Anwendungen elektrostatischer Effekte sind gelistet.

Die tatsächliche Lebenserwartung derart bewerteter Materialien ist abhängig von ihrer Umgebung und ihren Einsatzbedingungen.

Aufgabe dieses Technischen Reportes ist es, bei der Entwicklung in Zusammenhang stehender Elektrostatik-Normen als Nachschlagewerk zu dienen und eine Anleitung für den Endbenutzer zu geben.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

CLC/TR 50404:2003, *Electrostatics – Code of practice for the avoidance of hazards due to static electricity*

IEC 60068-1:1998, *Environmental testing – Part 1: General and guidance*

IEC 60079-10:2002, *Electrical apparatus for explosive gas atmospheres – Part 10: Classification of hazardous areas*

IEC 60079-17:2002, *Electrical apparatus for explosive gas atmospheres – Part 17: Inspection and maintenance of electrical installations in hazardous areas (other than mines)*

IEC 60721-2-1:2002, *Classification of environmental conditions – Part 2-1: Environmental conditions appearing in nature – Temperature and humidity*

IEC 61340-2-1:2002, *Electrostatics – Part 2-1: Measurement methods – Ability of materials and products to dissipate static electric charge*

IEC 61340-2-3:2000, *Electrostatics – Part 2-3: Methods of test for determining the resistance and resistivity of solid planar materials used to avoid electrostatic charge accumulation*

IEC 61340-3-1:2002, *Electrostatics – Part 3-1: Methods for simulation of electrostatic effects – Human body model (HBM) – Component testing*

IEC 61340-3-2:2002, *Electrostatics – Part 3-2: Methods for simulation of electrostatic effects – Machine model (MM) – Component testing*

IEC 61340-4-4:2005, *Electrostatics – Part 4-4: Standard test methods for specific applications – Electrostatic classification of flexible intermediate bulk containers (FIBC)*

IEC 61892-7:1997, *Mobile and fixed offshore units – Electrical installations – Part 7: Hazardous areas*

3 Begriffe

3.1

antistatisches Material

Ein Material mit einer solchen Vorbehandlung, dass ein müheloses Abfließen von Ladungen bei Erdkontakt möglich ist, oder das nicht leicht Ladung durch Kontakt annehmen wird

ANMERKUNG Ein „antistatisches“ Material wird die quantitative Anforderung eines entweder „ableitfähigen“ oder „astatischen“ Materials erfüllen (siehe 3.12 und 3.13 in diesem technischen Dokument).

3.2

antistatischer Zusatz oder Füllstoff sowie antistatische Behandlung

Eine zugefügte Substanz oder eine Anwendung bei Flüssigkeiten oder Feststoffen, um die Neigung zur Ansammlung von Ladungen infolge Kontakt oder Reibung zu verringern oder die Ableitung von Ladungen zu beschleunigen, um so die Eigenschaft zur Bindung signifikanter Ladungen zu verringern, falls Kontakt zur Erde besteht

3.3

„low charging material“ (gering aufladbares Material)

Ein Material mit geringer Neigung zur Ladungstrennung infolge Kontakt mit oder Reiben gegen andere Materialien

ANMERKUNG Um elektrostatische Risiken unter Kontrolle zu halten, ist es wichtig, dass die in einer anerkannten Prüfmethode ermittelte maximale Oberflächenladungsdichte unter einem entsprechenden „Sicherheitsgrenzwert“ bleibt.

3.3.1

„low charging“ (gering aufladbar)

Verpackung mit einer die Ladungserzeugung verringernden Eigenschaft

ANMERKUNG Die Begriffe astatisch und antistatisch sollten wegen der unterschiedlichen existierenden Bedeutungen vermieden werden; deshalb wird in dieser Veröffentlichung der Begriff „low charging“ (gering aufladbar) verwendet.

[3.18.1 in IEC 61340-5-1]

3.4

Masseverbindung

1 – Anwendung einer Verbindung oder Verbindungen zwischen Leitern, um durchgehende elektrische Leitfähigkeit sicher zu stellen

2 – Verbindung nicht isolierender Elemente unter Verwendung eines Leiters

[3.3 in IEC 61340-5-1]

3.5

Durchbruch

Fehler, zumindest vorübergehend, der isolierenden Eigenschaften eines isolierenden Mediums unter elektrischer Beanspruchung

3.6

Durchbruchspannung

Spannung, bei welcher, unter vorgeschriebenen Prüf- oder Betriebsbedingungen, ein Durchbruch erfolgt

3.7

Ladungszerfall

Abfließen von Ladung über oder durch ein Material an der Stelle, wo die Ladung aufgebracht wurde, woraus eine Verringerung der Ladungsdichte oder des Oberflächenpotentials resultiert

ANMERKUNG Ladungszerfallzeit des Oberflächenpotentials, üblicherweise durch Beobachtung ermittelt (siehe 8.3.2).

3.8

Ladungszerfallzeit

Zeit, die nötig ist, damit die örtliche Ladungsdichte oder das Oberflächenpotential von einem definierten hohen Wert auf einen definierten niedrigeren Wert abfallen kann

3.9

Leitfähigkeit

Dimension: $S \cdot m^{-1} = 1/(\Omega \cdot m)$, reziproker Wert des Durchgangswiderstandes ($\Omega \cdot m$)

3.10

Leiter oder leitfähiges Material

Material mit ausreichend hoher Leitfähigkeit, so dass Potentialdifferenzen zwischen jedwedem Teil nicht hinreichend groß sind, um von praktischer Bedeutung zu sein

– Entwurf –

E DIN IEC 61340-1 (VDE 0300-1):2007-07

3.10.1

elektrostatisch leitfähig

Verpackungen mit einem Oberflächenwiderstand von $\geq 1 \times 10^2 \Omega$ und $< 1 \times 10^5 \Omega$

[3.18.3 in IEC 61340-5-1]

3.11

ableitfähiges Material

Material, das es der Ladung ermöglicht, über seine Oberfläche und/oder durch sein Volumen innerhalb einer Zeit abzufließen, die kurz ist, im Vergleich zur Zeit der Ladungserzeugung oder der Zeit, innerhalb derer diese Ladung ein elektrostatisches Problem herbeiführen kann

3.11.1

elektrostatisch ableitfähig

Verpackungen mit einem Oberflächenwiderstand $\geq 1 \times 10^5 \Omega$ und $< 1 \times 10^{11} \Omega$

[3.18.4 in IEC 61340-5-1]

3.12

Erde/Erdung

Elektrische Verbindung (Masseverbindung) eines Leiters zum Hauptpotentialausgleich, um Erdpotential sicher zu stellen (siehe auch 3.23 in diesem Technischen Report)

3.13

Verbindungspunkt zur Erde

Kontaktpunkt, der festgelegt ist, um Einrichtungen oder Personen zu erden

3.13.1

erdungsfähiger Punkt

Anschluss an einen Fußbodenbelag, der eine Verbindung zur Erde ermöglicht

[3.3 in IEC 61340-4-1]

3.13.2

erdungsfähiger Punkt

festgelegter Punkt, der an die EPA-Erde angeschlossen werden kann

[3.16 in IEC 61340-5-1]

3.14

elektrostatische Entladung (ESD)

Der plötzliche Übergang elektrostatischer Ladung infolge von unmittelbarem Kontakt oder Durchschlag zwischen Körpern unterschiedlichen elektrostatischen Potentials

oder

elektrostatische Entladung (ESD)

Übergang von Ladung zwischen Körpern unterschiedlichen elektrostatischen Potentials verursacht durch unmittelbaren Kontakt oder durch Influenz eines elektrostatischen Feldes

3.15

Bauelement, empfindlich gegen elektrostatische Entladung (ESDS)

diskretes Bauelement, Halbleiter, integrierter Schaltkreis oder andere Baugruppe, die durch eine unmittelbar treffende oder in der Nähe ablaufende elektrostatische Entladung geschädigt werden kann

oder

Bauelement, empfindlich gegen elektrostatische Entladung (ESDS)

diskretes Bauelement, integrierte Schaltung oder Baugruppe, die durch elektrostatische Felder oder elektrostatische Entladung während routinemäßiger Entladung, Prüfung und Transport geschädigt werden kann

3.16

gemeinsamer ESD Erdungspunkt

Ein gemeinsamer Anschlusspunkt, an dem alle Teile einer ESD-Schutzzone angeschlossen sind

EPA Erdungseinrichtung

gemeinsame Einrichtung, an die alle Elemente in der ESD-Schutzzone elektrisch angeschlossen sind

3.17

ESD Schutzzone (EPA)

Bereich, in dem ESDS mit einem Minimalrisiko an Schädigung infolge elektrostatischer Felder oder Entladungen gehandhabt werden können

ESD Schutzzone (EPA)

Bereich, in dem ESDS mit einem akzeptablen Schädigungsrisiko infolge elektrostatischer Felder oder Entladungen gehandhabt werden können

3.18

ESDS Verpackungsmaterialien

Alle Materialien, in die ESDS in engem Kontakt oder geringem Abstand für Transport oder Lagerung verpackt werden - einschließlich Beutel, Schachteln, Kästen, Umhüllungen, Magazinen, Polsterungen, Schaumstoffe, loses Füllmaterial usw.

Verpackungsmaterialien

Materialien, in die ESDS verpackt werden für Transport oder Lagerung - einschließlich Beutel, Schachteln, Kästen, Umhüllungen, Magazinen, Polsterungen, Schaumstoffe, loses Füllmaterial usw.

3.19

ESDS Spannungsempfindlichkeitsschwelle

Die maximale Spannung, bei der die ESDS keinen ESD-Schaden erleiden

3.20

arbeiten im Feldbereich

Handhabung von ESDS außerhalb einer ständigen EPA (siehe 3.17)

arbeiten im Feldbereich

Handhabung von ESDS innerhalb einer zeitweiligen EPA

3.21

entzündliches Material

Gase, Dämpfe, Flüssigkeiten, Stäube oder Feststoffe, die Brände oder Explosionen verursachen können, falls eine geeignete Zündquelle, wie elektrostatische Entladung, vorhanden ist

entzündliche Substanz

Gas, Dampf, Flüssigkeit, Feststoff oder Gemische daraus, die bei Anwesenheit einer Zündquelle zu einer fortschreitenden Verbrennung führen

3.22

Bekleidung

Kleidungsstück wie z. B. Mantel, Jacke und Kittel, Kapuze, Hose, Overall oder Mütze

3.23

Erde

1 – synonym mit Erdung (siehe 3.12)

Erde

2 – leitfähige Masse der Erde, deren elektrisches Potential an jedem Punkt konventionell als Null angenommen wird

3.24

Erdungskabel

flexible elektrische Verbindung zwischen dem Erdanschlusspunkt und der Erdungseinrichtung

3.24.1

EPA Erdungskabel

elektrische Verbindung zwischen dem EPA Erdungspunkt, der Arbeitsoberfläche oder anderen Ausrüstungsgegenständen und der EPA Erdungseinrichtung

[3.9 in IEC 61340-5-1]

3.25

gefährliche Spannungsschwelle

die geringste kapazitiv gespeicherte Spannung, bei der eine elektrostatische Gefahr oder ein elektrostatisches Risiko besteht

3.25.1

ESDS-Spannungsempfindlichkeitsschwelle

maximale Spannung, bei der die ESDS keinen ESD-Schaden erleiden

[3.11 in IEC 61340-5-1]

3.25.2

ESDS-Spannungsempfindlichkeitsschwelle einer Baugruppe

das empfindlichste ESDS auf einer Baugruppe

[3.12 in IEC 61340-5-1]

3.26

explosionsgefährdeter Bereich

Bereich, in dem entzündliches Material in solchen Mengen vorhanden ist oder vermutet wird, dass spezielle Schutzmaßnahmen gegen eine Entzündung erforderlich sind

explosionsgefährdeter Bereich

Bereich, in dem explosionsfähige Gasatmosphären in solchen Mengen vorhanden oder zu erwarten sind, dass spezielle Schutzmaßnahmen erforderlich werden für die Konstruktion, Installation und den Einsatz elektrischer Geräte

[IEV 426-03-01, geändert]

3.27

zündfähig

fähig, ein in seiner Zusammensetzung bekanntes entzündbares Gemisch zu zünden

3.28

Isolator

Material mit sehr geringer Ladungsbeweglichkeit, so dass jedwede Ladung an der Oberfläche für lange Zeit dort bestehen bleibt

3.29

Ion

atomares oder molekulares Teilchen, das elektrische Ladung trägt

3.30

spezifische Ladung

Ladungsmenge bezogen auf Masseinheit (C/ kg)

3.31

Mindestzündenergie

1 – niedrigste elektrische Energie einer kapazitiven Funkenentladung, die ein definiertes Gemisch aus entzündlichem Material mit Luft oder Sauerstoff zünden kann, ermittelt durch ein festgelegtes Prüfverfahren

2 – niedrigste elektrische Energie einer Funkenentladung, die nötig ist, um ein gasförmiges Gemisch zu entzünden, wie in der Prüfvorschrift ASTM E582 festgelegt

[siehe 3.6 in IEC 61340-4-4]

3.32

Ladungsausgleich

Abfließen von Ladung über und/oder durch feste, flüssige oder gasförmige Materialien, aus der eine Verringerung der Oberflächenladungsdichte und des Potentials resultieren

3.33

Abschirmmaterial

Material, das, integriert in ein Gehäuse, eine starke Abschwächung von schnellen, mit Funkenentladungen zusammenhängenden elektrischen Feldänderungen bewirkt, in der Nähe oder außerhalb des Gehäuses

3.34

abschirmendes Packmaterial

aus Abschirmmaterial hergestelltes Packmaterial, das Schutz bietet gegen elektrostatische Entladungen außerhalb des Beutels/Behälters von ESDS (siehe 3.15) bei Lagerung und Transport

3.35

Oberflächenladungsdichte

Ladungsmenge, bezogen auf die Flächeneinheit bei Feststoffen oder Flüssigkeiten (C/m^2)

3.36

spezifischer Oberflächenwiderstand

entspricht dem Oberflächenwiderstand eines Quadrates, bei dem die Elektroden an zwei gegenüberliegenden Seiten angebracht sind (Ω)

3.37

Reibungsaufladung

Erzeugung elektrostatischer Ladung, die entsteht, durch Kontakt von zwei Materialien oder deren Reibung aneinander

Trennaufladung/Reibungsaufladung

elektrischer Ladungsvorgang, bei dem Ladung erzeugt wird durch Trennung zuvor in Kontakt gewesener fester oder flüssiger Oberflächen oder aerosolbeladener Gase

3.38

Volumenladungsdichte

Ladungsmenge, bezogen auf die Volumeneinheit bei Feststoffen, Flüssigkeiten oder Gasen (C/m^3)

3.39

spezifischer Durchgangswiderstand

entspricht dem Widerstand eines Würfels von 1 m^3 , bei dem die Elektroden an zwei gegenüberliegenden Flächen angebracht sind (Ωm)

4 Grundlagen statischer Elektrizität

4.1 Allgemein

Die Hauptursache elektrostatischer Aufladung ist Trennaufladung (Reibungsaufladung). Wenn zwei zunächst ungeladene Stoffe in Kontakt gebracht werden, kommt es im Allgemeinen in ihrer gemeinsamen Grenzfläche zu einem Übertritt von Ladung. Beim Trennen trägt jede Oberfläche eine Ladung gleicher Höhe, jedoch von gegensinniger Polarität. Leitfähige oder ableitfähige Stoffe können durch Influenz aufgeladen werden, wenn sie sich in einem elektrischen Feld befinden, das in der Umgebung gebildet wird durch andere geladene Stoffe oder Leiter auf hohem Potential. Jeder Gegenstand kann aufgeladen werden, wenn sich geladene Teilchen oder Moleküle darauf ansammeln.

Es ist äußerst wichtig, sich dieses Phänomens bewusst zu sein, um die richtigen Testverfahren anzuwenden und die daraus resultierenden Daten eindeutig zu interpretieren. In Bezug auf die Auswahl von Elektroden ist es notwendig, die Strommesseinrichtungen gegen den anfänglichen kapazitiven Impuls zu schützen und die Messzeit zu notieren. Letzteres sollte natürlich den praktischen Umständen angemessen sein, für welche die Daten benötigt werden. Wo es nötig erscheint, sind in dieser Anleitung weitere Empfehlungen mit Beschreibungen der jeweiligen Testverfahren eingefügt.

4.2 Kontaktaufladung

Kontaktaufladung kann eintreten an den Grenzflächen zwischen Feststoffen, Flüssigkeiten und solchen zwischen Feststoff und Flüssigkeit. Reine Gase können auf diese Weise nicht aufgeladen werden. Falls ein Gas jedoch Feststoffteilchen enthält oder darin Flüssigkeitströpfchen suspendiert sind, können diese durch Kontakt aufgeladen werden, so dass ein solches Gas elektrostatische Ladung tragen kann, die von diesen Teilchen bewirkt ist.

Bei unterschiedlichen Feststoffen, anfangs nicht geladen und normalerweise Erdpotential aufweisend, kommt es zu einem geringen Ladungstransfer von einem Material zum anderen, wenn sie in Kontakt geraten. Werden sie getrennt, verbleibt eine positive Restladung auf der einen und eine negative auf der anderen Oberfläche. Die Ladungsmenge steigt mit zunehmender Kontaktfläche, zunehmendem Anpressdruck und durch Reibung.

Die übertretende Ladung zwischen Materialien lässt sich nach Polarität und Höhe in einer Zusammenstellung ordnen, der Triboelektrischen Reihe. Es ist zu erwarten, dass sich ein Material positiv auflädt gegen ein tiefer gelistetes Material und negativ gegen Materialien, die in der Serie höher angeordnet sind. Es ist zu beachten, dass der Rang eines Materials in der Triboelektrischen Reihe ein Näherungswert ist, abhängig von den

Prüfbedingungen. Erwähnt werden muss auch, dass zwei Proben aus gleichem Material, gegeneinander gerieben, ebenfalls recht hoch aufgeladen werden können.

Die beiden Materialien sind gegensinnig aufgeladen und dementsprechend herrscht zwischen ihnen ein elektrisches Feld. Werden die Materialien dann getrennt, ist Energie aufzuwenden, um die Anziehungskräfte der ungleichnamigen Ladungen zu überwinden, und die Potentialdifferenz zwischen ihnen steigt linear mit dem Abstand. Diese höhere Potentialdifferenz hat die Tendenz, Ladungen über letzte Kontaktstellen auszugleichen. Falls es sich um zwei Leiter handelt, ist der Ladungsausgleich quasi vollständig und es bleibt nach dem Trennvorgang keine Ladung von erkennbarer Höhe auf den jeweiligen Materialien zurück. Falls bei den voneinander getrennten Materialien das eine oder beide Nichtleiter sind, findet kein vollständiger Ladungsausgleich statt, und die getrennten Materialien behalten einen Teil ihrer Ladung. Auch wenn nur eine geringe Ladungsmenge beteiligt ist, so kann doch das durch Trennung entstehende Ladungspotential leicht viele Kilovolt erreichen, denn, wenn die Oberflächen in Kontakt sind, ist der Abstand zwischen den Ladungen äußerst gering. Da Oberflächen normalerweise eine Rauigkeit aufweisen, wird die Aufladung größer, wenn Reibung und/oder Druck beteiligt sind bei Kontakt und Trennung, denn damit wird die effektive Kontaktfläche vergrößert. Hier ist zu beachten, dass die effektive Kontaktfläche in ihrer Größe stark von der sich darstellenden Kontaktfläche abweicht. Sie können sich durch eine oder mehrere Größenordnungen unterscheiden.

Kontaktaufladung ist bei Flüssigkeiten im Wesentlichen derselbe Vorgang, er kann jedoch abhängen von der Anwesenheit von Ionen oder submikroskopischer geladener Teilchen (letztere sind im Allgemeinen weniger wichtig). Ionen (oder Teilchen) einer Polarität können an der Grenzfläche absorbiert werden und ziehen dann Ionen gegensinniger Polarität an, die eine diffuse Ladungsschicht in der Flüssigkeit dicht an der Oberfläche bildet. Wenn dann die Flüssigkeit eine Bewegung relativ zur Grenzfläche erfährt, schleppt sie einige dieser diffusen Ladungen mit und bewirkt derart eine Trennung gegensinniger Ladung.

Dabei wird, wie auch bei den Feststoffen, durch die zur Trennung benötigte Energie eine hohe Spannung erzeugt, vorausgesetzt, die Flüssigkeit ist hinreichend isolierend, um eine Rekombination zu verhindern. Diese Vorgänge können sowohl an den Grenzflächen fest/flüssig als auch flüssig/flüssig stattfinden.

4.3 Aufladung durch Influenz

Um jedes aufgeladene Objekt herum befindet sich ein elektrisches Feld. Ein Leiter oder ein ableitfähiges Material, das in dieses Feld eingebracht wird, ändert die Verteilung des Feldes in seiner Umgebung, wodurch gleichzeitig eine Umverteilung der Ladungen im Material unter dem Einfluss des Feldes stattfindet. Falls es isoliert ist, erhält der Leiter ein Potential, abhängig von seiner Position im Feld. Veranlasst durch dieses Potential ist das Material in der Lage, eine elektrostatische Entladung herbeizuführen, verbunden mit einer Umverteilung der auf ihm vorhandenen Ladung. Falls das Material bereits im Feld z. B. kurzzeitig geerdet wird, verringert sich sein Potential auf Null, und es verbleibt ein Ungleichgewicht von Ladung auf ihm. Wenn das so isolierte Material, auch gegen Erde isoliert, aus der Umgebung des ursprünglich geladenen Objektes entfernt wird, so setzt das die verbleibende Ladung frei und ermöglicht eine elektrostatische Entladung. Man sagt, dass das leitfähige Objekt nach diesem Vorgang durch Influenz aufgeladen worden ist. Eine Entladung von einem solchen Objekt kann gefährlich sein, z. B. in dem Fall, dass eine isolierte Person nahe an elektrostatisch aufgeladenen Materialien vorbeigeht.

4.4 Ladungsübertragung durch Leitung

Immer, wenn ein geladenes Objekt mit einem anderen Objekt in Kontakt kommt, wird die Gesamtladung in dem Maße zwischen ihnen aufgeteilt, wie es ihre Leitfähigkeiten und Kapazitäten gestatten. Dies ist eine potentielle Quelle elektrostatischer Aufladungen und Beispiele sind aufgeladene Sprühnebel, Nebel oder Stäube, die auf Feststoffe aufprallen oder sich dort ablagern. Eine gleichartige Ladungsübertragung kann auch stattfinden, wenn ein Strom von Gasionen auf ein Objekt trifft.

4.5 Ladungsspeicherung

Sogar nach Trennung beim Aufladungsvorgang werden sich elektrostatische Aufladungen schnell ausgleichen, entweder unmittelbar oder über Erde, wenn sie nicht daran gehindert werden. Wenn sich eine Ladung auf einem Nichtleiter befindet wird sie durch die Wirksamkeit des Materialwiderstandes selbst gebunden. Um die Ladung auf einem Leiter zu binden, muss er von anderen Leitern und von Erde isoliert sein.

Reine Gase wie Luft sind unter Normalbedingungen Nichtleiter und darin suspendierte Teilchen oder Tröpfchen in Staubwolken, Nebeln oder Sprühnebeln können ihre Ladungen, unabhängig von der Leitfähigkeit der Partikel selbst, über sehr lange Zeiträume erhalten.

In allen Fällen verschwindet die Ladung in dem Maße, wie es durch die Widerstände der Nichtleiter im System und die Kapazitäten der Leiter vorgegeben wird. Dieser Vorgang wird als Relaxation bezeichnet. Widerstand, spezifischer Widerstand, Leitfähigkeit oder Ladungserfallzeit, die elektrostatische Probleme hervorrufen können, hängen weitgehend vom zu betrachtenden System ab und werden später besprochen.

In vielen industriellen Abläufen kommt es häufig zu einer fortwährenden Erzeugung elektrostatischer Ladungen, die sich dann auf einem Isolator oder einem isolierten Leiter ansammeln. Beispiele dafür sind ein ständiger Strom aufgeladener Flüssigkeiten oder Pulver in einen isolierten Metallbehälter hinein oder Gehen einer Person über einen isolierenden Fußbodenbelag. Das Potential auf dem isolierten Leiter ergibt sich aus der Bilanz von zufließender und abfließender Ladung. Das elektrische Ersatzschaltbild ist in Bild 1 gezeigt und das Potential des Leiters ist gegeben durch die Beziehung:

$$V = I \cdot R \cdot \left(1 - e^{\frac{-t}{R \cdot C}} \right)$$

Dabei ist

V Potential des Leiters (V)

I elektrostatischer Aufladestrom (A)

R Ableitwiderstand zur Erde (Ω)

t Zeit nach Beginn der Aufladung (s)

C Kapazität (F)

Das höchste Potential ist erreicht, wenn $t \gg RC$ ist und daraus folgt:

$$V_{\max} = I \cdot R.$$

Die Kapazität eines isolierten Objekts und sein Ableitwiderstand zur Erde oder die Entladungszeit können gemessen werden, um herauszufinden, ob sich Aufladungen in erkennbarer Höhe ansammeln können. Das ist nicht möglich für Stäube und Nebel, wenn sie in Luft suspendiert sind.

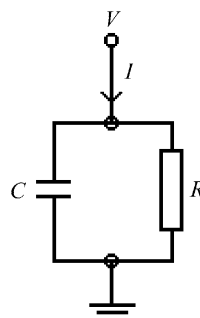


Bild 1 – Elektrisches Ersatzschaltbild eines elektrostatisch aufgeladenen Leiters

Darin ist die Annahme enthalten, dass der Widerstand oder die Ladungserfallzeit eines isolierenden Materials für sich allein bewertet wird. Das ist nicht immer der Fall. Der Widerstandswert kann sich bei gegebener Potentialdifferenz mit der Zeit ändern und dementsprechend kann die Ladungserfallzeit eine Funktion der elektrischen Beanspruchung (oder Höhe der Ladung) werden. Diese Wirkungen können ebenfalls stark beeinflusst werden durch Temperatur und Umgebungsfeuchtigkeit (Verweis hinzufügen).

4.6 Ladungsabfluss bei Isolatoren

Isolatoren sind schlechte elektrische Leiter, denn es gibt nur wenige Ladungsträger, die sich frei durch das Material bewegen können. Sowohl bereits vorhandene (intrinsische) als auch zugesetzte Ladungsträger sind in der Struktur angelagert (trapped). Das ist dargestellt in Bild 2, worin sich die Ladungsträger in einer Potentialquelle der Tiefe W (trap) befinden. Die Quelle wird abgeflacht durch die störende Anwesenheit des elektrischen Feldes E und setzt Ladungsträger in Feldrichtung frei. Durch Springen von einer Quelle zur nächsten bewegt sich der Ladungsträger weiter. Die freie Beweglichkeit der Träger (zwischen den Traps) kann recht hoch sein, aber die offensichtliche Fließbeweglichkeit der Träger durch das Material wird begrenzt durch ihre Freisetzungsrage.

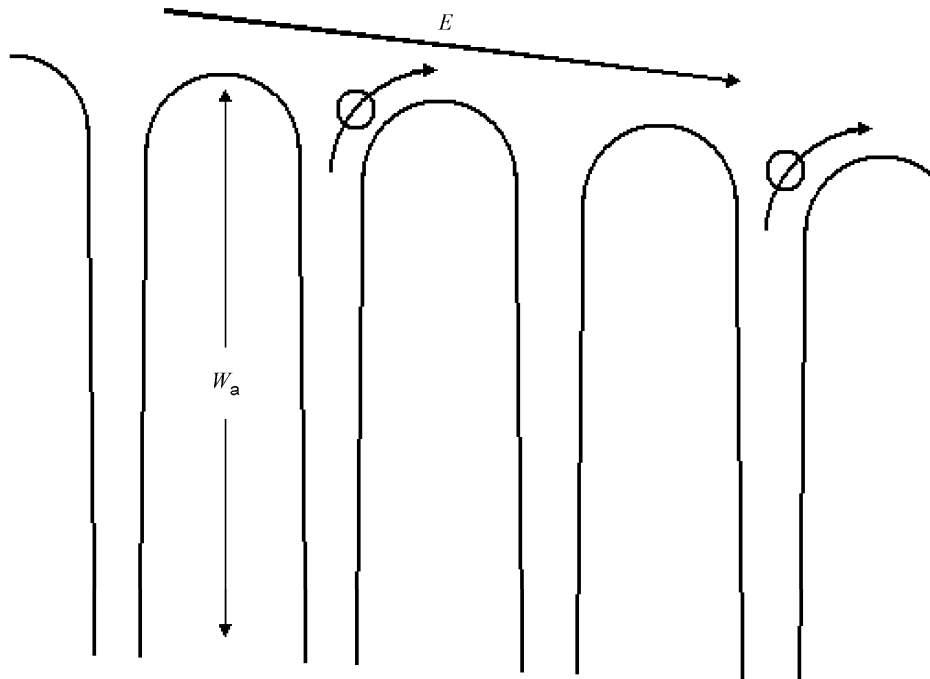


Bild 2 – Potentialquellen und Ladungsfluss, vorausgesetzt, die bewegliche Ladung ist positiv

Die Energiedifferenz W_a ist dem chemischen Potential zur Spitze der Potentialquelle entnommen.

Die Wahrscheinlichkeit P einer Freisetzung von der Quelle nimmt mit steigender Temperatur zu und kann ausgedrückt werden durch die Arrhenius-Gleichung:

$$P = e^{-\frac{W_a}{k_B \cdot T}}$$

Dabei ist

W_a molekulare Aktivierungsenergie

$k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K Boltzmann-Konstante

T absolute Temperatur

Die mittlere Beweglichkeit der Ladungsträger (oder Geschwindigkeit pro Feldstärkeinheit) μ wird beschrieben durch:

$$\mu_+ = \mu_0 e^{-\frac{W_a^+}{k_B \cdot T}}$$

Darin stellt μ_0 eine Konstante dar.

Die Leitfähigkeit c ist gegeben durch:

$$c = (n_+ \cdot \mu_+ + n_- \cdot \mu_-) \cdot e$$

wobei n und e die Ladungsdichte bzw. die Ladung darstellen. Der Index (+) kennzeichnet den positiven Ladungskanal, wohingegen ein Index (-) den negativen Kanal kennzeichnen würde.

Konstantes Feld und konstante Ladungsträgerdichte vorausgesetzt, ist die Leitfähigkeit offensichtlich einwertig. Das wird der Fall sein bei einem verhältnismäßig leitfähigen (oder ableitfähigen) Material und damit ergibt sich die Stromdichte J (A/m²) für ein elektrisches Feld E zu:

$$J = c \cdot E$$

Die Stromdichte entspricht dem Ladungsabfluss von der Oberfläche und so sind entsprechend für die Oberflächenladung mit einer Ladungsdichte σ (C/m²) die Beziehungen zwischen Ladungsdichte; Feld E; Leitfähigkeit c ; Stromdichte J und Ladungszerfall:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r}$$
$$J = c \cdot \left(\frac{\sigma}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r} \right)$$
$$\sigma = \sigma_0 \cdot e^{-c \cdot \frac{t}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r}}$$

wobei ϵ_r die relative Permittivität des Materials und ϵ_0 die absolute Permittivität ($\epsilon_0 = 8,85$ pF/m) ist, σ_0 ist die Anfangsladungsdichte bei $t = 0$ und t ist die Zeit, verstrichen zwischen der anfänglichen Ladungsmessung σ_0 und der Messzeit von σ .

Bei diesen Materialien verläuft der Ladungsabfluss exponentiell und damit ergibt sich die Zeitkonstante aus dem Produkt von Permittivität und spezifischem Widerstand ($1/c$) des Materials.

Ladungsträger, die das isolierende Material verlassen, verringern die Anzahl der zur Leitung verfügbaren wenigen intrinsischen Ladungsträger, ebenso wie in dem Falle eines aufgeladenen Materials das antreibende Feld verringert wird. Offensichtlich verringert sich mit der Zeit die Leitfähigkeit, aber der Verlauf dieser Verringerung ist kaum vorhersagbar. Ein häufig zu beobachtender Verlauf ist ein schneller Ladungsabbau in kurzer Zeit, gefolgt von einer Verlangsamung, der in einigen Fällen sogar zu einer konstanten Restladung führt.

Da die Beweglichkeit mit der Temperatur ansteigt, ist es wichtig, beim Bestimmen elektrostatischer Parameter die Temperatur zu vermerken. Die nähere Umgebung hat auch einen großen Einfluss, wie später berichtet werden soll.

4.7 Elektrische Leitung in Materialien von sehr hohem spezifischen Widerstand

Beim Anlegen einer konstanten Potentialdifferenz an Metallelektroden mit Zwischenlagen aus isolierendem oder ableitfähigem Material kommt es zu einem sofortigen, sehr hohen kapazitiven Ladungsstrom, der rasch abfällt, abhängig vom Scheinwiderstand des Ladekreises. Entsprechend dieser schnellen zeitlichen Änderung verringert sich der Strom stetig bis zu einem Gleichgewichtswert. Höhe und Dauer der Stromverringerung stehen normalerweise in Beziehung zueinander. Bei einem guten Isolator kann sich die Stromverringerung über beträchtliche Zeit und mehrere Größenordnungen erstrecken, aber bei eher leitfähigen Materialien können beide Effekte vernachlässigbar sein. Im anschaulichen Experiment kann der festgestellte Strom von Elektrode zu Elektrode auch durch die Oberflächeneigenschaften des Isolierstoffes beeinflusst werden. So könnte der Strom nicht durch den Isolator fließen sondern über dessen Ränder verlaufen.

Der Durchfluss eines stetigen elektrischen Stroms durch das Elektrode-Isolator-Elektrode System setzt ein Gleichgewicht voraus zwischen dem Transport elektrischer Ladungsträger von den Elektroden in den Isolator hinein und wieder heraus und dem Transport der Träger durch das Material. Die Menge der transportierten Ladungsträger bei jedem dieser Abläufe wird bestimmt durch das elektrische Feld zur Erlangung eines fortdauernden Stromes, der nötig ist, für den stetigen Erhalt von Raumladung zur Erzeugung des nötigen örtlichen Feldes. In einem hochisolierenden Feststoff ist wegen des Mangels an Trägern die Menge zugesetzter Träger größer als die der sich hindurchbewegenden. Andererseits könnte bei einer Flüssigkeit, die einige Ionenarten aufweist, der bewegte Anteil größer sein als die eingebrachte. In jedem Falle verdichtet sich die Raumladung in Elektrodennähe, um dementsprechend die Übertragung von den Elektroden entweder zu verlangsamen oder zu aktivieren. In Bild 3 ist dies schematisch dargestellt.

Letztenendes sind die Effekte gleich, ein hoher Anfangsstrom, um Raumladungen herbeizuführen, gefolgt von einem stetigen Abfall bis zum Endwert.

Wie auch immer die Temperatur den Ladungseintrag von der Elektrode beeinflusst, erfordert die Temperaturabhängigkeit der Trägerbeweglichkeit in Isolatoren, dass letztendlich alle diese Einflüsse auch temperaturabhängig sind. Tatsächlich können sich die beobachteten Vorgänge für gute Isolatoren bei höheren Temperaturen umkehren, das bedeutet, der Stromfluss kann größer sein als der eingebrachte Strom. Jedoch, in Übereinstimmung mit der erhöhten Leitfähigkeit sind sowohl Höhe als auch Dauer des

– Entwurf –

E DIN IEC 61340-1 (VDE 0300-1):2007-07

Verlaufs verringert. Als Hinweis gilt, dass die Temperaturabhängigkeit dieser Effekte gering ist bei geringen Temperaturänderungen.

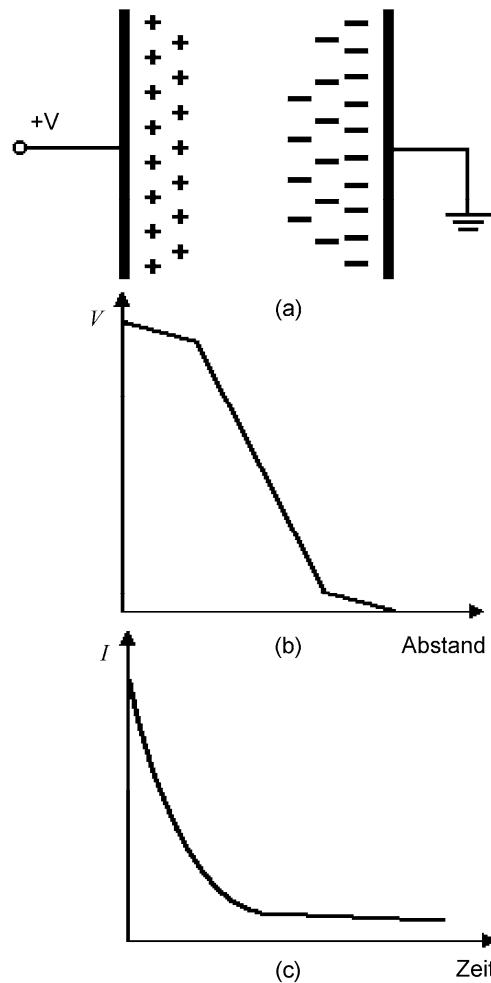


Bild 3 – Die schematische Zeichnung eines Metall-Isolator-Metall Systems zeigt:

- (a) Ladungsträger Eintrag und Transport in ein Metall-Isolator-Metall System;
- (b) Potentialverteilung, und
- (c) Stromverlauf

4.8 Einfluss umgebender Feuchtigkeit

4.8.1 Allgemein

Alle Materialien absorbieren bis zu einem gewissen Maße Wasser aus der Atmosphäre und im Falle von Isolatoren kann das die Entladung stark beschleunigen. An der Oberfläche von Materialien absorbiertes Wasser ist grundsätzlich die Ursache für eine Oberflächenleitfähigkeit, zu unterscheiden von der im Materialinneren. Der gut beobachtete aber immer noch schlecht verstandene Vorgang ist, dass die Leitfähigkeit mit der Menge absorbierten Wassers ansteigt, oder praktisch gesehen, die Leitfähigkeit steigt mit der Feuchtigkeit. Das lässt sich sogar unter verhältnismäßig trockenen Bedingungen (r.F. < 20 %) feststellen, wo Wasser nur in molekularer Form und nicht als freie Wasserschicht vorhanden ist.

In Bezug auf das zuvor besprochene Prinzip der Ladungsbewegung könnte das Wasser freie Ladungsträger beisteuern und den Vorgang der Ladungsträgerbindung des Materials beeinflussen, oder beides. Würde der Vorgang lediglich Ladungsträger liefern, dann könnte eine lineare Abhängigkeit zwischen Leitfähigkeit und Konzentration des absorbierten Wassers erwartet werden.

Falls das hoch polarisierte Wassermolekül in das Gefüge an der Trägerbindung absorbiert wird, kann es die Tiefe der Potentialquelle deutlich verringern. Angenommen, die Tiefe der Quelle wird um den

Faktor δ verringert, der linear von der relativen Feuchtigkeit abhängt, so kann die Leitfähigkeit ausgedrückt werden durch

$$c = c_0 \cdot e^{-\frac{W_a - \delta}{k_B \cdot T}}$$

oder

$$c = c_1 \cdot e^{\frac{\delta}{k_B T}}$$

wobei c_0 und c_1 Konstanten darstellen.

Das sagt eine exponentielle Abhängigkeit der Leitfähigkeit von der relativen Feuchtigkeit voraus und lässt sich über einen weiten Bereich der Leitfähigkeit und für eine große Anzahl von Isolierstoffen beobachten. Falls elektrostatische Parameter bei wenigstens zwei verschiedenen relativen Feuchtigkeiten (bei gleicher Temperatur) gemessen werden, dann lassen sich die Eigenschaften für alle anderen Feuchtigkeiten abschätzen.

4.8.2 In situ Messungen

Messungen unter praktischen Bedingungen lassen sich nicht einfach bei verschiedenen Feuchtigkeiten durchführen, aber die vorherrschenden Bedingungen sollten erfasst werden.

4.9 Elektrostatische Entladungen

4.9.1 Allgemein

Eine elektrostatische Entladung findet statt, wenn das elektrische Feld die Durchbruchfeldstärke des umgebenden Gases, normalerweise Luft, übersteigt. Als Anhaltswert beträgt die Durchbruchfeldstärke für flache Oberflächen oder solche mit großem Radius bei Abständen von 10 mm oder mehr unter atmosphärischen Bedingungen etwa 3 MV/m.

Die elektrostatischen Entladungen unterscheiden sich stark nach ihrer Art und sind im Einzelnen abhängig von den sie verursachenden Umständen. Die verschiedenen Entladungsarten lassen sich einordnen, wie in 4.9.2 bis 4.9.6 beschrieben, wenn auch die Abgrenzung zwischen den unterschiedlichen Arten nicht vollkommen eindeutig ist.

4.9.2 Funkenentladungen

Ein Funke ist eine elektrische Entladung zwischen zwei isolierten Leitern. Er ist gekennzeichnet durch einen gut ausgeprägten leuchtenden Entladungskanal mit hoher Stromdichte. Das Gas im Kanal ist über seine gesamte Länge vollständig ionisiert. Die Entladung verläuft sehr schnell und kann zu einem hörbaren „Knack“ führen. Die zwischen dem Finger einer Person und einem großen Metallteil zu beobachtende Entladung ist ein typisches Beispiel.

Die Potentialdifferenz zwischen den Leitern ist erforderlich, um ein Feld zu erzeugen, das die elektrische Festigkeit der umgebenden Atmosphäre übersteigt, abhängig von Form und Abstand zwischen den Leitern.

Der Stromverlauf in einem Funken ist nur begrenzt durch den Scheinwiderstand im äußeren Stromkreis und somit wird die gesamte Ladung auf den Elektroden in den Funken gezogen. So verbraucht der Funke in den meisten praktischen Fällen nahezu die gesamte verfügbare Energie, die sich errechnet zu:

$$W = \frac{1}{2} \cdot Q \cdot V \text{ oder } W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V^2 \text{ oder } W = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q^2}{C}$$

darin ist W die verbrauchte Energie (J), Q die Ladungsmenge auf dem Leiter (C), V sein Potential (V) und C die Kapazität zur Erde (F).

Das ist die maximal verfügbare Energie. Jeder Widerstand im Entladestromkreis verringert die Energie im Funken und verlängert seine Dauer. In Tabelle 1 sind typische Kapazitätswerte für Leiter aufgeführt.

Tabelle 1 – Typische elektrische Kapazitätswerte

Objekt	Kapazität x 10 ⁻¹² F
Sehr kleine Metallteile (Schrauben, Nägel)	1 bis 10
Kleine Metallteile (Schaufelblatt, Schlauchdüse)	10 bis 20
Kleine Behälter (Eimer, 50 l Fass)	10 bis 100
Mittelgroße Behälter (250 bis 500 l)	50 bis 300
Menschlicher Körper	100 bis 300
Große Anlagenteile (Reaktionsbehälter) eng umgeben von geerdeten Bauteilen	100 bis 1000
Fahrzeuge	800 bis 1200

4.9.3 Coronaentladungen

Diese Entladungsart ist Leitern mit scharfen Spitzen oder Kanten zugeordnet. Sie kommen zustande, wenn ein solcher geerdeter Leiter einem hoch aufgeladenen Objekt angenähert wird, oder auch, wenn der Leiter auf ein hohes Potential gebracht wird. Diese Entladung ergibt sich aus dem Sachverhalt, dass in der Nähe der scharfen Oberfläche das Feld sehr hoch und über der Durchbruchfestigkeit (3MV/m) ist.

Weil das Feld sich sehr rasch mit dem Abstand vom Leiter verringert, erstreckt sich der Bereich der Ionisation nicht weit davon. Es kann sich zum geladenen Objekt hin ausrichten, oder, im Falle eines hohen Potentials auf dem Leiter, einfach in den Raum orientieren.

Coronaentladungen sind schlecht zu sehen, aber unter gedämpfter Beleuchtung kann unmittelbar an der Spitze ein Glimmen wahrgenommen werden. Außerhalb des ionisierten Bereiches können die Ionen entsprechend ihrer Polarität und der Feldrichtung fortreiben.

Das von einer aufgeladenen Oberfläche ausgehende Feld kann nahe an geerdeten scharfen Spitzen Coronaentladungen hervorrufen, dabei Ionen von gegensinniger Polarität aus der Entladung anziehen und derart die Ladung auf der Oberfläche verringern. Dieser Vorgang wird sich nur so lange fortsetzen, wie das Feld an der Spitze über dem Schwellwert für Coronaentladung liegt und daher ist eine vollständige Entladung nicht möglich.

Die Coronaentladung kann auch Ladung auf eine Oberfläche oder einen Gegenstand übertragen. Diese Wirkung kann bewusst genutzt werden oder ungewollt Gefahren herbeiführen.

4.9.4 Büschelentladungen

Diese Entladungsart kann auftreten wenn sich runde (im Gegensatz zu scharfen) geerdete Leiter einem aufgeladenen isolierenden Material annähern (z. B. zwischen dem Finger einer Person und einer Kunststoffoberfläche oder zwischen einem metallenen Füllrohr und der Flüssigkeitsoberfläche in einem Tank).

Die Entladungen sind von kurzer Dauer und können unter geeigneten Bedingungen gesehen und gehört werden. Im Gegensatz zu Funkenentladungen neigen sie dazu, nur einen kleinen Anteil der mit dem System verbundenen Ladung einzubeziehen, und die Entladung bringt nicht notwendigerweise die beiden Objekte auf gleiches Potential.

4.9.5 Gleit(stiel)büschelentladungen

Gleitbüschelentladungen können auftreten an hochisolierenden Kunststofffolien, Wänden und Beschichtungen von Einrichtungen oder Behältern mit hoher Ladungsdichte von gegensinniger Polarität an den beiden Oberflächen des Isolators. Die Entladung kann ausgelöst werden, entweder durch einen sich der Oberfläche annähernden leitfähigen Gegenstand oder einen Durchschlag des Dielektrikums. Falls das elektrische Feld im Dielektrikum infolge der Ladung an seiner Oberfläche den Durchschlagswert des Dielektrikums erreicht, kommt es zu einer spontanen Entladung, die zu einem Loch in der Folie/Beschichtung führt. Ausgehend von diesem Loch (oder der Entladung zum angenäherten Objekt hin) entsteht ein sehr hohes oberflächenparallel orientiertes elektrisches Feld am Dielektrikum, das eine Reihe starker Gleitentladungen auslöst und dabei den größten Teil der Oberflächenladung freisetzt.

Eine dielektrische Folie mit Ladungen gegensinniger Polarität auf ihren Oberflächen findet ihre Entsprechung in einem Parallelplattenkondensator mit der dielektrischen Folie zwischen den Platten. Die in Gleitbüschelentladungen freigesetzte Energie kann daher einfach aus der gespeicherten Energie errechnet

werden. Die gleichwertige Kapazität C_e einer dielektrischen Folie der Fläche A , Schichtdicke d und relativer Permittivität ε , eine Oberflächenladungsdichte σ bindend ist:

$$C_e = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{A}{d}$$

Für eine Ladungsdichte σ ist die gesamte Ladung $Q = \sigma \cdot A$. Als Beispiel angenommen:

$d = 75 \mu\text{m}$, $A = 0,5 \text{ m}^2$, $\varepsilon = 2$ und Oberflächenladungsdichte $\sigma = 10^{-3} \text{ C/m}^2$, beträgt die gespeicherte Energie:

$$W = \frac{1}{2} \cdot C_e \cdot V^2,$$

$$W = \frac{1}{2} \cdot \frac{q^2}{C_e},$$

$$W = \left[A \cdot \frac{d}{2} \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \right] \cdot \sigma^2 = 1 \text{ J}.$$

Gleitbüschelentladungen lassen sich vermeiden, wenn sichergestellt wird, dass die Durchbruchspannung über alle hochohmigen Wandungen und Schichten kleiner ist als 4 kV.

Im Beispiel ist das Potential 4,12 kV. Deutet das darauf hin, dass es durch eine Verringerung der Ladungsdichte auf ein Potential knapp unter 4 kV und damit der Energie 0,94 J, nicht zu einer Gleitbüschelentladung gekommen wäre?

4.9.6 Schüttkegelentladungen

Diese Entladungsart ist zu bemerken, wenn z. B. Granulat von hohem Widerstand in ein Silo gefüllt wird. Wenn aufgeladene Teilchen, wie Kunststoffgranulat, in ein Silo gefördert werden, kommt es zu einer Ladungsansammlung am Schüttkegel. Das von dieser Ladung ausgehende Feld übt abstoßende Kräfte auf die gleichsinnig geladenen Teilchen aus, die auf den Schüttkegel fallen. Weil die Schwerkraft der Teilchen gegen die abstoßenden Kräfte einwirkt, kommt es zu einem Anstieg der Ladungsdichte des Schüttgutes am Schüttkegel. Falls in diesem Bereich die Durchbruchfeldstärke für Luft erreicht wird und weiterhin geladene Teilchen auf den Schüttkegel fallen, werden Entladungen einsetzen, die zur leitfähigen geerdeten Silowand hin orientiert sind.

4.10 Zündung entzündlicher Gase, Stäube und Flüssigkeiten

Die Zündung entzündlicher Atmosphären ist für die Beurteilung der Sicherheit industrieller Prozesse von großer Bedeutung.

4.11 Mechanische Kräfte im elektrostatischen Feld

Ein durch elektrostatische Aufladung hervorgerufenen elektrisches Feld kann auf Objekte in seiner Umgebung eine mechanische Kraft ausüben. Dünne Folien, aufgeladen auf einige Mikrocoulomb pro Quadratmeter, können an Metallen in der Nähe haften, während Staubteilchen bereits angezogen werden können durch Felder, ausgehend von Ladungsdichten, die eine Größenordnung geringer sind.

Die Kraftwirkung geladener Teilchen in der Nähe eines ebenen geerdeten Blechs kann z. B. nach dem Coulomb-Gesetz berechnet werden:

$$F = \frac{q^2}{16 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot d^2}$$

Darin sind: q die Ladung des Teilchens, d sein Abstand zum Blech.

5 Elektrostatische Probleme und Gefahren

5.1 Allgemein

Elektrostatische Aufladungen unterscheiden sich sehr in Art und Weise und dementsprechend können ihre Auswirkungen als Ursachen elektrostatischer Probleme sehr verschieden sein. Entladungen zwischen metallenen Anlageteilen, wie z. B. Funken zwischen geladenen Teilen und Erde verursachen die größten Schäden. Jedoch auch Entladungen von aufgeladenen Isolierstoffen können nachteilig sein. Durchschläge

E DIN IEC 61340-1 (VDE 0300-1):2007-07

der Isolierschichten von Halbleitern können bereits bei Spannungen unter 50 V eintreten und andere Schäden wie Materialschmelze erfordern nur wenige Mikrojoule an Energie. Allgemein wird an Flüssigkeit oder Feststoff gebundene Ladung dann zu einem Problem, wenn sie plötzlich zu einem anderen Teil, oder häufiger, zur Erde entladen wird.

In medizinischen Reinräumen, die für die Chirurgie genutzt werden und während der Produktion von Pharmazeutika, können bei der Überwachung von Verschmutzung spezielle Anforderungen gestellt werden, so auch die Überwachung statischer Elektrizität einzubeziehen, um ein Aufladen von Teilchen zu vermeiden.

5.2 Elektronische Bauteile und Systeme

5.2.1 Allgemein

Die elektrostatische Entladung (ESD) ist eine der ernsthaftesten Bedrohungen elektronischer Bauteile und Systeme. Elektronische Bauteile haben gegenüber ESD einen weiten Empfindlichkeitsbereich. Beispiele für die anfälligsten Typen sind: Halbleiter, Leseköpfe (magnetoresistiv), Dünnschichtwiderstände. Bereits ein geringes elektrostatisches Potential von 10 V kann zum Ausfall bestimmter Bauteile führen.

Wegen dieser hohen Empfindlichkeit kann angenommen werden, dass alle Arten elektrostatischer Entladungen empfindliche elektronische Bauteile beschädigen können.

5.2.2 Schadensarten

ESD-Schäden können zu sofortigem fatalen Versagen, verdecktem Versagen oder geringem Versagen führen.

Fatales Versagen führt sofort zu Zerstörung oder Ausfall eines Bauteiles, wodurch die Bauteile oder das System nicht mehr funktionieren oder nicht mehr den Anforderungen genügen.

Ein Bauteil mit verdecktem Versagen kann zwar Änderungen in ihren Eigenschaften aufweisen, doch trotzdem noch den Anforderungen genügen. Sie kann jedoch durch das ESD-Ereignis vorgeschädigt werden. Ein Bauteil mit verdecktem Versagen kann empfindlicher werden für nachfolgende ESD oder andere Beanspruchungen. Es besteht daher eine zunehmende Wahrscheinlichkeit für solche Bauteile, vorzeitig auszufallen.

Zu geringen Fehlern kommt es, wenn ein programmiertes Bauteil ESD ausgesetzt ist und ihr installiertes Programm ändert. Infolge durchgeleiteter oder eingestrahlter elektromagnetischer Störungen, verursacht durch elektrostatische Entladungen, können falsche Signale im System auftreten.

5.2.3 Fatale und verdeckte Fehlermechanismen

Die Schadenshöhe eines Bauteils ist entweder potential- oder energiebezogen, entsprechend der Fehlerart. Die verschiedenen Arten der Bauteile und Halbleitergruppen sind empfindlich gegen unterschiedliche Fehlermechanismen.

Eine der häufigsten Fehlermechanismen ist auf Durchschlag zurückzuführen: Oxidation der Isolierung, Poren im Dielektrikum, Übergang im Halbleiter (Durchbrennen oder Kurzschluss). Ein weiterer, häufiger Fehlermechanismus hängt zusammen mit Aufschmelzen der Metallisierungen infolge hoher durch ESD verursachter Ströme.

Beispiele von Bauteilen, die für dielektrische Durchschläge besonders empfindlich sind: MOSFET (Metalloxidhalbleiterfeldeffekttransistor), MOS IC, ICs mit überlappenden Metallisierungen; Kondensatoren (insbesondere MOS). Typische Fehlerarten sind elektrischer Kurzschluss oder zunehmender Ableitstrom (herabgesetztes I/V -Verhalten).

Beispiele von Bauteilen, die für Metallisierungsfehler besonders empfindlich sind: HF-Transistoren und ICs. Eine typische Fehlerart ist der offene Stromkreis.

Da alle diese Fehlermechanismen abhängen von der geometrischen Größe der dielektrischen Schicht, anderen Isolierschichten, Durchlassbreite und Dicke der Metallisierung usw. ist anzunehmen, dass die Entwicklung der ESD-Empfindlichkeit von Halbleitern mit der Zeit zunehmen wird. Doch für einige Arten von Bauteilen sind zur Verringerung ihrer ESD-Empfindlichkeit verbesserte ESD-Schutzkreise an den Kontaktstiften geschaffen worden.

5.2.4 Probleme und Gefahren in verschiedenen Abschnitten des Lebenszyklus

Alle elektronischen Systeme können beim Gebrauch durch elektrostatische Entladungen geschädigt werden. Ein unmittelbares Auftreffen einer starken Entladung auf irgendein Teil des Systems kann Ströme und Energien erzeugen, die hoch genug sind, die Bauteile zu schädigen, falls die Entladungsströme nicht unmittelbar zur Erde abgeleitet werden.

Ein System kann sogar geschädigt werden, durch eine Entladung in seiner Umgebung. Die Entladung bewirkt ein magnetisches Feld, das Ströme im System herbeiführen kann. Diese Ströme können schädigen oder sie können zu „geringen Fehlern“ führen, d.h., die Information ist gestört durch wertlose Impulse. Die Programmierung bestimmter Bauteile kann auch irreversibel geändert sein.

Eine Entladung könnte weit entfernt vom System gegen ein Kabel oder eine Steuereinrichtung eintreten, und die Störung (Hochspannungsimpuls) wird in das System übertragen.

Während der Herstellung von Elektronik ist die Handhabung empfindlicher elektronischer Bauelemente und Baugruppen sehr heikel. In solcher Umgebung ist die Elektronik vielen Gefahren ausgesetzt: aufgeladene Beschäftigte, Kleidung, nicht geerdete Maschinenteile, Kunststoffbeutel und -behälter, Kunststoffbauteile usw. Wie unter 4.9 beschrieben hat eine Funkenentladung die größte schädigende Auswirkung. Eine solche Entladung kann verursacht werden von einem aufgeladenen Beschäftigten beim Berühren eines gedruckten Schaltkreises.

Auch eine Ladung auf dem Bauteil selbst kann schädlich sein. Ein von Kunststoff umschlossener Halbleiter lässt sich durch Reiben seiner Oberfläche leicht aufladen, z.B. mit einem Finger oder einem Kunststoffbeutel. Diese Ladung auf der Oberfläche des Kunststoffgehäuses beeinflusst eine Spannung auf die Leiter des Halbleiters und die Kontaktstifte. Beim Berühren eines Kontaktstiftes mit einem metallenen Werkzeug oder einem Finger kommt es zu einer schnellen Entladung. Weil die Kapazität des Kontaktstiftes klein ist und die Kapazität des Werkzeugs oder Fingers (Beschäftigter) viel höher, ist die Entladung sehr schnell und verursacht einen hohen Strom. Selbst wenn die Entladung eine nur sehr geringe Energie aufweist, kann doch der hohe Strom beim Durchfließen in den kleinen Schaltkreisen Schaden anrichten.

Während der Herstellung der Bauteile gibt es zusätzliche Probleme, verursacht durch elektrostatische Aufladung. Halbleiter müssen während der Herstellung extrem sauber sein, und die Oberfläche ist zu schützen. Wenn der Halbleiter aufgeladen ist, zieht er Staub aus der Luft an. Das gleiche Problem besteht in anderen Bereichen der Elektronik, z. B. Verunreinigung von Disketten und deren Laufwerken, elektro-optisch.

5.2.5 Bestimmung des Empfindlichkeitsniveaus von Bauteilen

Das Niveau, bei dem ein Bauteil durch eine elektrostatische Aufladung beschädigt wird, hängt ab von der Konstruktion des Bauteils und von den Besonderheiten der Entladung. Vielfältige Entladungen können auftreten aber drei Arten sind definiert als repräsentativ für alle Arten, auch wenn damit nicht alle möglichen Kenngrößen erfasst werden, die eine Entladung beeinflussen:

- HBM (human body model) Modell unter Einbeziehung des menschlichen Körpers – Körperentladung
- MM (machine model) Maschinenmodell
- CDM (charged device model) Modell vom geladenen Objekt – Geräteentladungsmodell

Die Modelle legen das Empfindlichkeitsniveau fest als die Spannung an einem Kondensator oder am Bauteil selbst.

Die Empfindlichkeitsniveaus wie sie für die drei Modelle eingeführt sind, entsprechen einander zwischen MM und HBM, während zum CDM keine Beziehung besteht. Die Empfindlichkeit gegenüber einer MM-Entladung ist allgemein höher als gegenüber einer HBM-Entladung und die Empfindlichkeit auf eine CDM-Entladung ist höher als zur MM-Entladung (Lit. [3]).

5.3 Elektrostatische Gefahren

5.3.1 Allgemein

Elektrostatische Entladungen können entzündliche Gase, Stäube und Flüssigkeiten entzünden. Für die Entzündung verantwortlich ist die hochgradige Hitze im Entladungskanal.

5.3.2 Funkenentladungen von leitfähigen Gegenständen

Die näherungsweise Berechnung der Energie einer Funkenentladung kann z. B. für ein ungeerdetes Metallfass durchgeführt werden, das aus einer Mühle mit Pulver beschickt wird. In einem solchen Fall könnte