

THEMENHEFT
ionisation





Statische Elektrizität

Statische Elektrizität ist ein häufig auftretendes Phänomen. Die elektrostatischen Grundprinzipien tendieren zunächst einmal in Richtung Gleichgewicht zwischen positiven und negativen Ladungen. Damit repräsentieren elektrisch neutrale Gegenstände einen natürlichen Ausgangszustand.

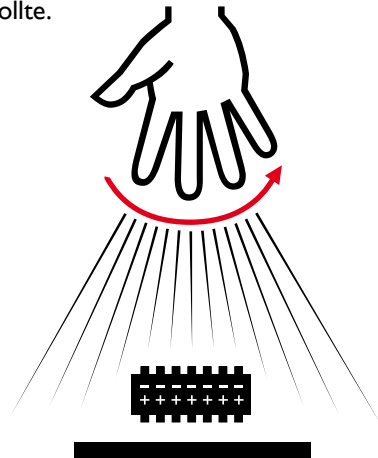
Statische Aufladung tritt auf, wenn Moleküle auf der Oberfläche eines Gegenstandes aufgeladen oder polarisiert werden. Die Aufladung kann ein negatives (Elektronenüberschuss) oder positives (Elektronenmangel) Vorzeichen haben. Jede Materialart kann mit statischer Elektrizität aufgeladen werden. Die bekanntesten Erzeugungsmechanismen für statische Elektrizität sind die Induktion und die reibungselektrische (triboelektrische) Aufladung.

Materialien, in denen sich elektrische Ladungen bewegen, werden elektrische Leiter genannt. Nichtleitende (elektrisch isolierende) Materialien erlauben hingegen keine Elektronenbewegung. Die meisten Metalle sind vorzügliche elektrische Leiter. Kunststoffe, Quarz und Glas sind typische Nichtleiter.

Aufladung durch Induktion

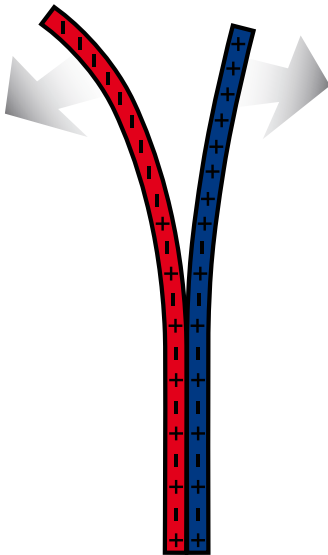
Induktionseffekte basieren auf bewegten elektrischen Feldern. Das Bewegen eines Gegenstandes durch ein elektrostatisches Feld führt grundsätzlich zur Ausbildung einer Oberflächenladung. Eine Berührung zwischen aufgeladenem Gegenstand und Quelle des elektrischen Feldes findet dabei nicht statt. Die Ladungspolarität des Gegenstandes nach Induktion ist exakt entgegengesetzt zur Polarität des ursächlichen Feldes.

Ist der aufgeladene Gegenstand ein geerdeter elektrischer Leiter, fließt die erzeugte Induktionsladung schnell ab. Bei einem Nichtleiter verbleibt die Induktionsladung auf der Oberfläche – selbst dann, wenn der Nichtleiter geerdet sein sollte.



Triboelektrische Aufladung

Der häufigste ladungserzeugende Störeffekt ist die Aufladung durch Reibung oder durch Kontakt. An diesem triboelektrischen Effekt sind mindestens zwei Materialien beteiligt, deren Grenzschichten miteinander Kontakt haben. Bei Trennung der Kontaktpartner verliert eine Oberfläche Elektronen und wird positiv aufgeladen, während das Gegenstück die Elektronen aufnimmt und eine negative Aufladung erfährt. Sind die getrennten Oberflächen elektrische Isolatoren oder ungeerdet, bleiben die getrennten Ladungen erhalten.



Ob Feststoff, Gas, Flüssigkeit, Leiter oder Nichtleiter – jedes Material kann reibungselektrisch (triboelektrisch) geladen werden. Spannungshöhe und Ladungspolarität sind allerdings abhängig von spezifischen Materialeigenschaften. Neben der chemischen Materialidentität sind für die Effektivität der Ladungserzeugung folgende Aspekte relevant:

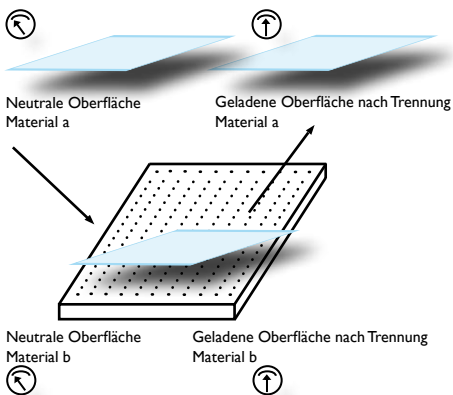
- Zustand der Oberflächen
- Größe der Kontaktflächen/Reibungsflächen
- Druck zwischen den Oberflächen
- Geschwindigkeit der Trennung des Reibens

Glatte Oberflächen erzeugen gewöhnlich größere Aufladungen. Größere Oberflächen, höhere Geschwindigkeiten und höhere Anpressdrücke unterstützen ebenfalls hohe Aufladungen. Die ausgebildeten Spannungen können durchaus in den Megavolt-Bereich (10^6 Volt) gehen. Die chemische Materialidentität bestimmt wesentlich die Ladungserzeugung. Ein wichtiges Werkzeug zur Materialcharakterisierung ist in diesem Zusammenhang die triboelektrische Reihe.



Triboelektrische Reihe

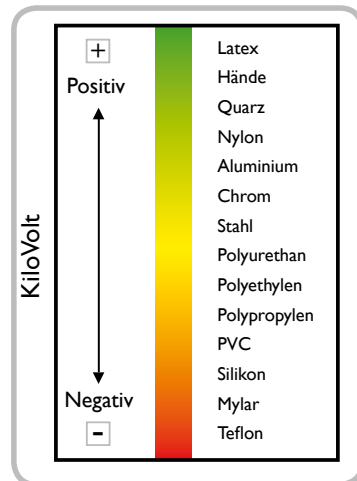
Diese Materialliste stellt dar, mit welcher Effektivität ein Material (von einem Kontaktpartner) positiv oder negativ geladen werden kann. Kontaktoberflächen aus dem oberen Teil der Reihe werden positiv aufgeladen, Partner aus dem unteren Abschnitt enden mit Elektronenüberschuss. Je weiter die Materialpaare in der Liste voneinander entfernt sind, desto effektiver erfolgt die Ladungsbildung. Gleichnamige Partner erzeugen – als Spezialfall der Liste – keine Trennungsladungen. Gemäß dieser Reihe erfahren gute Isolationsstoffe wie Plexiglas und Teflon Aufladungen von teilweise auf mehr als 25.000 V (negativ). Glas kann im gleichen Größenordnungsbebereich aufgeladen sein – allerdings mit gegensätzlicher (positiver) Polarität.



4

Ein hocheffizientes Paar zur triboelektrischen Ladungserzeugung sind demnach Glas und Teflon.

Elektrische Leiter sind Bestandteil der triboelektrischen Reihe. Die Ladungserzeugung auf einem Leiter ist allerdings nur dann nachzuweisen, wenn keine Erdung vorliegt. Eingangs wurde erwähnt, dass die Natur grundsätzlich zu einem Ladungsausgleich tendiert. Dieser Ladungsausgleich wird auch stattfinden. Selbst wenn der Prozess zur Ladungserzeugung sich oft nur in Sekundenbruchteilen vollzieht, kann die Neutralisierung viele Stunden dauern.



Triboelektrische Reihe

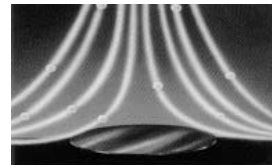


Verschmutzung reiner Produkte

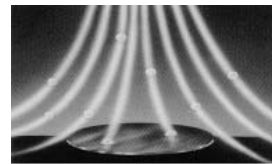
In zunehmendem Maße werden Produkte in technisch reinen Räumen gefertigt. Gut etablierte Normenwerke (ISO 14644) definieren Reinheit und zulässige Restverschmutzung dieser Reinraumumgebungen. Jedem Reinraumkonzept liegt die Luftversorgung mit feinstgefilterter Luft zugrunde. Allerdings senkt die Luftaufbereitung in Raumluftechnischen Anlagen den natürlichen Ionengehalt der zugeführten Luft. Dadurch – und durch die Absenkung der Luftfeuchtigkeit – verliert die Reinraumluft ihre Eigenschaft, elektrostatisch ausgleichend zu wirken.

Verstärkt wird die Problematik dadurch, dass in Reinräumen verwendete Stoffe (typisch: Kunststoffe, Quarz, Keramik, Glas und Silizium) häufig leicht aufgeladen werden können. Deshalb sind moderne Reinraumbedingungen die ideale Umgebung zum Studium elektrostatischer Ladungseffekte. Niedrige Luftfeuchtigkeit und Mangel an Erdungsmöglichkeiten sorgen dafür, dass Ladungen an Materialien und Maschinen lange erhalten bleiben. Aufgeladene Produkt- oder Arbeitsflächen ziehen Partikel der Restverunreinigungen aus der Reinraumluft an.

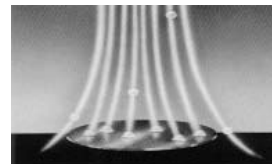
Haftet ein Partikel erst einmal einer aufgeladenen Oberfläche an, kann sich die Entfernung als sehr schwierig erweisen. Partikelniederschlag auf Produktoberflächen mit hohen Sauberkeitsanforderungen führt zu hohen Ausfallkosten. Studien (www.esd-management.com) belegen eindeutig, dass elektrostatische Ladungen im Reinraum ein wesentlicher Grund für Verschmutzungen von Waferoberflächen sind. Die Partikelbelastung an der Oberfläche kann die eigentlich spezifizierte ISO Reinraumklasse lokal um bis zu zwei Reinraumklassen verschlechtern.



Ohne statische Aufladung



Wafer auf 500V



Wafer auf 4000V



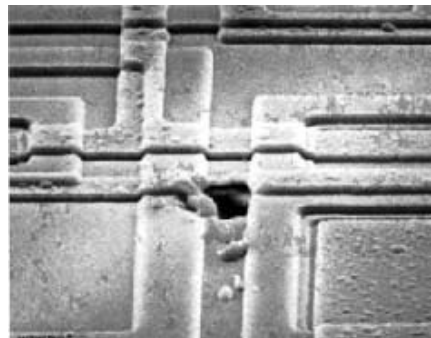
Elektrostatische Entladungen (ESD)

Elektrostatische Entladungen sind in zunehmendem Maße verantwortlich für die Beschädigung/Zerstörung von integrierten Schaltungen und kleinstrukturierten Bauelementen. Dies geschieht in den Prozessstufen Produktion, Verpackung und Prüfung. Da die Strukturgrößen von Bauteilen und die Betriebsspannungen integrierter Schaltungen stetig kleiner werden, steigt auch die Anfälligkeit für elektrostatische Entladungen.

Kurzschlüsse oder (teil)verdampfte Leiterbahnen sind drastische Belege für die zerstörerische Wirkung von ESD-Ereignissen. Das rechte Foto repräsentiert ein typisches Schadensmuster. Im zweiten Foto ist sogar eine Metallbrücke zu erkennen, die sich durch elektrostatische Entladung und Aufschmelzung zwischen den beiden Leitungen gebildet hat.



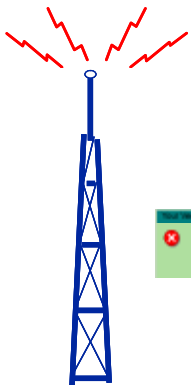
Studien (www.esd-management.com) zeigen, dass elektrostatische Entladungen nicht nur eine direkte Verringerung des Produktionsertrages verursachen. Viel kritischer ist ein Szenario, in dem ESD-induzierte Teilschädigungen mit üblichen Komponententests nicht entdeckt werden. Spätere Ausfälle im Produkteinsatz treiben die Kosten durch Reparatur und Austausch leicht auf das 100fache gegenüber produktionsnah entdeckten Defekten. Nach industriellen Schätzungen kommen auf jeden in der Produktion gefundenen Defekt zwei bis fünf Defekte nach Auslieferung.





Fehler/Stillstand automatisierter Produktionsanlagen

Der zunehmend höhere Automatisierungsgrad moderner Produktionsmaschinen bedingt eine steigende Anfälligkeit für elektrostatische Entladungen. Kernstücke jeglicher Automatisierungstechnik sind komplexe Mikroprozessoren und Mikrocontroller. Elektrostatische Entladungen, die bis vor Kurzem vielleicht „nur“ Schaltkreise auf einem Wafer zerstörten, sind zunehmend in der Lage, die Ablaufsteuerung in Mikrocontrollern zu stören. Dabei genügt die elektrostatische Störentladung an einer Stelle der robotergesteuerten Montagestraße, um den gesamten Prozessablauf der Fertigungsstrecke zu stoppen.



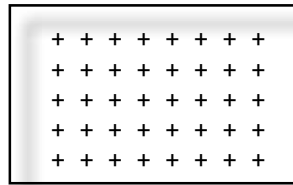
Das Management elektrostatischer Ladungen

In der Praxis ist es unmöglich, statische Elektrizität von Produktionsanlagen gänzlich fernzuhalten. Im Vordergrund sollte vielmehr das wohlüberlegte Management elektrostatischer Ladungen stehen. Wichtigste Vorbetrachtung ist, inwieweit die aufgeladenen Materialien elektrisch leitend oder isolierend sind. Elektrostatische Ladungen an leitfähigen Materialien wird durch Erdungsmaßnahmen begegnet. Personal ist mittels antistatischer Kleidung zu erden, unterstützt durch das Tragen von Erdungsbändern an Hand- und Fußgelenken. Arbeitsplätze lassen sich über geerdete Tischplatten, Matten sowie leitende Böden absichern. Bei Isolatoren – auf deren Oberflächen sich Ladungen nicht bewegen können – wirkt das Erdungskonzept nicht. In etlichen Fällen hilft der Kunstgriff, die Oberfläche eines Isolators „künstlich“ leitfähig zu machen. Antistatische Oberflächenadditive sorgen für eine begrenzte Elektronenleitfähigkeit und erlauben schließlich den Ladungsabbau durch Erdung. In diesem Zusammenhang wird auch von dissipativen Materialien gesprochen.

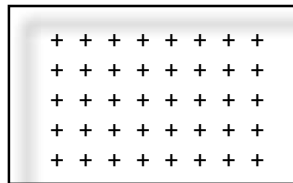


Dauerhafter Gebrauch dieser dissipativen Materialien kann allerdings die anti-statische Eigenschaft stark abschwächen – das Produkt verhält sich irgendwann wieder wie ein Isolator. Auch können einige der Zusatzstoffe zur Kontamination des Reinraumes führen (Stichwort: luftgetragene Molekulare Kontamination).

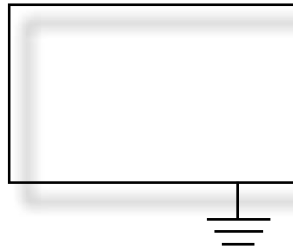
Eine denkbare Anhebung der Reinraum-Luftfeuchtigkeit ist eine teure und ineffiziente Methode zur Steigerung der Luftleitfähigkeit. Im pharmazeutischen Reinraumumfeld steigert die höhere Luftfeuchtigkeit das Risiko von Bakterienwachstum und verbietet sich damit von vornherein.



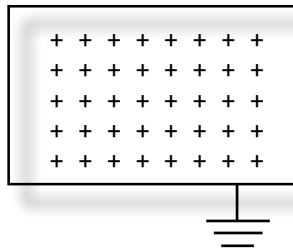
Isolierter Leiter - Geladen +



Isolator - Geladen +



Geerdeter Leiter - Neutral



Geerdeter Isolator - Weiterhin geladen

Aktive Luftionisation

In kritischen Umgebungen ist aktive Luftionisation die ideale Methode zur Kontrolle und Neutralisierung elektrostatischer Ladungen. Sogenannte Ionisatoren durchsetzen die Reinraumluft derart intensiv mit Ionen, dass statische Ladungen an Isolatoren und ungeerdeten Leitern abgebaut werden.



Luftionen und der Ionisierungsvorgang

Luftionen sind Moleküle, die ein Elektron verloren oder hinzugewonnen haben. Solche Ionen sind bereits in der „natürlichen“ Luft vorhanden, werden aber bei Filterung und technischer Aufbereitung entfernt. In natürlicher Umgebung entstehen Luftionen vorwiegend durch ionisierende Strahlung. Trotzdem ist Raumluft normalerweise ein recht guter Isolator mit einem spezifischen Widerstand von über 10^{15} Ohm/Meter. Durch Steigerung der Ionenzahl kann der spezifische Widerstand der Luft auf 10^{11} Ohm/Meter gesenkt werden – Resultat ist eine verbesserte elektrische Leitfähigkeit.



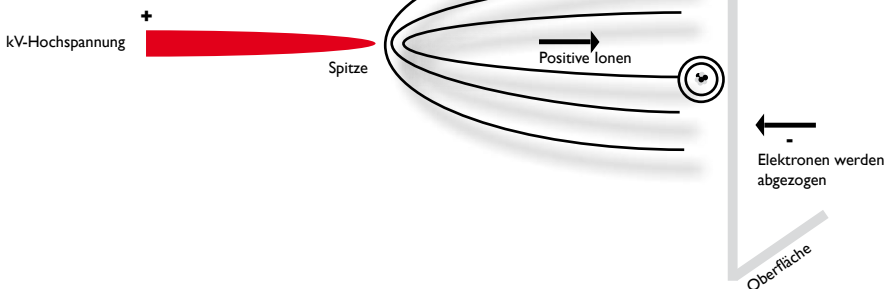


Ladungserzeugung durch Koronarentladung

In technischen Anwendungen steht die Ionenerzeugung durch „Koronarentladung“ im Vordergrund. Koronarentladungen lassen sich beobachten, wenn eine spitz zulaufende Elektrode mit hoher elektrischer Spannung (im Kilovolt-Bereich) beaufschlagt wird.

Durch die hohe elektrische Feldstärke an der Spitze können die Luftmoleküle lokal ionisiert werden. Es entsteht – räumlich stark begrenzt – ein Plasma. Das Koronarplasma dient als Reservoir für Luftionen und somit als Grundlage für den technischen Ionisationsvorgang.

Gelangen diese künstlich erzeugten Ionen auf eine geladene Oberfläche, zieht die Fläche Ionen der gegensätzlichen Polarität an. Dadurch wird die ursprünglich vorhandene statische Oberflächenelektrizität neutralisiert.

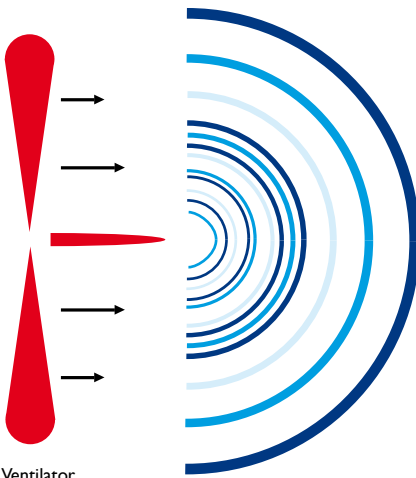


Bipolare Ionisation

Da Störladungen in Arbeitsbereichen sich nicht auf eine Polarität beschränken, sind zur neutralisierenden Ionisation positive und negative Luftionen zu erzeugen. Es gibt verschiedene Methoden zur bipolaren Ionisation. Die Entscheidung für oder gegen eine bestimmte Methode hängt von der jeweiligen Prozessumgebung und von "Sonderparametern" ab. Dementsprechend haben sich auch verschiedene technische Verfahren zur Ionenverteilung etabliert. Nachfolgend werden die wichtigsten Techniken mit samt ihren bevorzugten Einsatzgebieten vorgestellt.

Wechselstrom-Ionisatoren

Hochspannung wird an mehrere Emittstellen angelegt und die Polarität dieser Hochspannung alterniert mit der Netzfrequenz 50 Hz. Diese Wechselstromtechnik wird bevorzugt bei Ionisiergebläsen, Ionisierstäben und Druckgasionisatoren verwendet. In diesen Fällen sind die Luftgeschwindigkeiten hoch genug, um die gebildeten Ionen schnell von den Emitterspitzen zu entfernen. Bei zu langsamem Lufttransport bestünde die Gefahr einer Ionenrekombination: Schließlich werden an den Emitterspitzen in einem Abstand von nur 10 Millisekunden (50 Hz) Ionen der gegenteiligen Polarität erzeugt.



Gleichstrom-Ionisatoren

Bei dieser Methode existieren für jede Polarität getrennte Emitterspitzen. Positive Hochspannung wird fortwährend an eine Emittergruppe, negative Hochspannung fortwährend an eine andere Gruppe angelegt. Gleichstromtechniken werden in Ionisationsapparaten eingesetzt, die den Wechselstromionisatoren sehr ähnlich sind. Jedoch benötigt das Gleichstromprinzip viel geringere Luftströmungen. Eine korrekte Berechnung des räumlichen Abstands ungleichnamiger Emitterpunkte vorausgesetzt, ist das Rekombinationsrisiko dieses Verfahrens wesentlich niedriger.

Der Abstand von Gleichstrom-Ionisatoren zur kritischen Oberfläche darf allerdings ein gewisses (apparativ festgelegtes) Minimum nicht unterschreiten. Andernfalls besteht die Möglichkeit, dass lokale „Hot Spots“ (Bereiche mit einem Ionengleichgewicht) entstehen.



Getakteter Gleichstrom

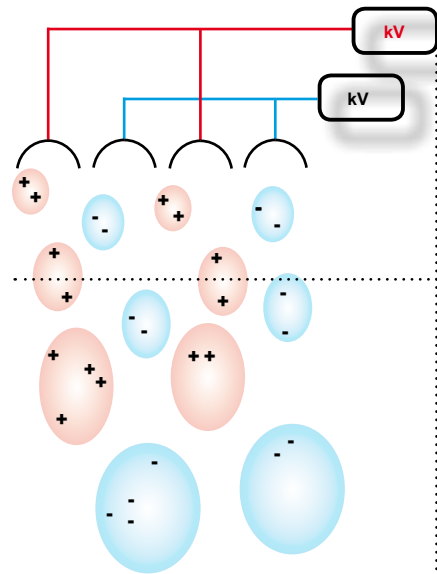
Positive und negative Emittierstellen werden abwechselnd ein- und ausgeschaltet. Die jeweiligen Schaltphasen umfassen hierbei wohldefinierte Zeitintervalle. Mit diesem Verfahren werden positive und negative Ionenwolken erzeugt, deren räumliche und zeitliche Ausdehnung exakt vorgegeben werden kann.

Die Vorteile dieses Systems sind seine Flexibilität und Vielseitigkeit, denn die Taktzeiten werden auf die jeweiligen Luftströmungsbedingungen abgestimmt.

Wenn zum Beispiel geringe Luftströmungen vorhanden sind, ist ggf. eine längere Einschaltzeit notwendig, um den Ionen die Gelegenheit zu geben, den Arbeitsbereich zu erreichen. Rekombination würde in diesem Fall durch längere Auszeiten vor der nächsten Umpolung vermieden.

In bestimmten Umgebungen kann ein größerer Anteil einer Polarität erforderlich sein – mit dem getakteten Gleichstrom kann dann jede Polarität so lange wie nötig eingeschaltet bleiben.

Hauptsächliches Einsatzgebiet dieser Techniken sind sogenannte Raumionisationssysteme. Hier werden an den Filterdecken der Reinräume Ionisationssysteme montiert. Diese Deckenemitter nutzen die Strömung der endständigen Filter, um Ionen zu den Produktoberflächen zu bringen. Prinzipbedingt sind die Entfernungen zwischen Deckenemitter und Produktoberfläche sehr groß (einige Meter). Der hohen Rekombinationsgefahr über weite Wegstrecken wird mit der getakteten Gleichstromtechnik begegnet.



Ionisierende Strahlung

Ionisationssysteme können auch auf ionisierender Strahlung basieren. Strahlungsquelle ist dann entweder eine kompakte Röntgenröhre oder ein α -Strahl.

Die Röntgenröhre sendet niederenergetische Röntgenstrahlung aus („soft x-ray“), während z. B. Polonium 210 ionisierte Heliumkerne („Alphastrahler“) emittiert.

Röntgenstrahlung bzw. Alphastrahlung sind ihrerseits in der Lage, mit hoher Effizienz Luftmoleküle zu ionisieren. Aufgrund des dokumentarischen Aufwandes beim Umgang mit solchen Ionisator-techniken wird der Einsatz immer weiter – zugunsten der Koronarsysteme – eingeschränkt.

Anwendung von Ionisationssystemen

Zum effizienten Einsatz von Ionisatoren sind einige wichtige Nebenbedingungen einzuhalten.

Luftströmung

Ionisatoren benötigen für die ordnungsgemäße Funktion (im Normalfall) eine Luftströmung. Andernfalls droht die Gefahr von Ladungsrekombination, bevor es überhaupt zu einer Neutralisierung von kritischen Oberflächen kommt. Entweder nutzen Ionisatoren die vorhandene Luftströmung des Reinraumes (der Laminarflow-Kabine, des Prozesstools) oder sie werden mit einem eigenen Gebläse ausgestattet (Ventilator oder Druckluft). Bei Einsatz von Ionisatoren mit eigenem Gebläse ist zu prüfen, inwieweit die vorhandene Reinraumklasse den Einsatz des Gebläseionisators mit motorgetriebenem Ventilator erlaubt.

Stromverteilung und Kontrolle

Ionisiergeräte benötigen die Einspeisung von 220 Volt oder 24 Volt Wechselspannung. Für jeden Ionisator muss diese Versorgung sichergestellt werden. Hochspannungen für die Emitterspitzen werden dann intern erzeugt – eine externe Einspeisung von Hochspannung ist nicht länger zeitgemäß und sollte vermieden werden.



Zuverlässigkeit und Wartung

Komplexere Ionisationsanlagen realisieren die Versorgung über einen zentralen Controller – im Idealfall auch mittels Niederspannungsverdrahtung. Standardanwendungen können mit der Ab-Werk-Einstellung für die Emitterspannungen gefahren werden. In kritischen Arbeitsbereichen oder in Bereichen mit stark schwankenden Störionisationen wird durch Feineinstellungen jeder Emitterspitze eine exakte Regelung des Ionengleichgewichtes erreicht.

Materialien für Emitterspitzen

Die Koronarentladung ist ein hochenergetischer Prozess zur Plasmabildung. Daher ist es nur eine Frage der Zeit, bis herkömmliche metallische Emitterspitzen erodieren. In diesem Fall entsteht eine partikelgetragene Kontamination mit Fragmentgrößen im Mikrometerbereich. Solche Metallpartikel können – in hochreinen Reinraumumgebungen – die Produktqualität stören. Emitterspitzen aus kristallinem Silizium erzeugen weniger Partikel. Speziell im Umfeld eines siliziumbasierten Produktionsprozesses erweisen sich diese Emissionen als unkritisch. Die Anforderungen des Produktionsumfeldes sollten auf jeden Fall immer in die Auswahl des Emittersmaterials eingehen.

Ionisatoren müssen regelmäßig gewartet werden. Der Anwender hat festzulegen (mit empfehlender Unterstützung des Lieferanten), wie oft diese Wartung durchzuführen ist. Ferner ist zu regeln, ob dieser Service vom Lieferanten oder dem Personal des Anwenders durchgeführt wird. PMT Partikel-Messtechnik bietet seinen Kunden einen umfassenden Beratungs- und Wartungsservice für die PMT-Ionisationsanlagen an. Dienstleistungen können einzeln beauftragt oder über maßgeschneiderte Wartungsverträge abgerufen werden.

Prüfung und Bewertung

Definierte Bewertungssysteme und rückführbare Prüfmittel sind die einzige Möglichkeit, Vorgaben für die gewünschte Effizienz von Ionisationssystemen festzuschreiben und nach der Installation zu verifizieren.

PMT Partikel-Messtechnik bietet Unterstützung bei der Spezifizierung von Luftionisatoren und bei der Definition eines kundenspezifischen Bewertungssystems. Mit rückführbar kalibrierten Prüfmitteln werden die Leistungsdaten eines installierten Ionisationssystems Punkt für Punkt verifiziert und in einem Leistungszertifikat zusammengefasst.

Regelwerke und Richtlinien zur Ionisation

Das wichtigste Prüfmittel ist als „Charged Plate Monitor“ (CPM) bekannt. Der CPM besitzt eine isolierte, leitfähige Platte, die mit einer bekannten Spannung aufgeladen wird. Die Elektronik des CPM misst fortwährend die Ladenspannung und (ab einem Starttrigger) die Zeit, die das Ionisiergerät benötigt, um die Ladung auf 10 % des ursprünglichen Wertes zu verringern.

Im Allgemeinen wird die CPM-Platte auf 1.000 Volt aufgeladen und die Entladezeit bis zum Erreichen der 100-Volt-Marke gemessen. Bei normaler Luft (60 % relative Feuchte) liegt die Abfallgeschwindigkeit bei ca. 12 Stunden.

Eine Ionisieranlage erreicht das gleiche Ergebnis (Laminarströmung zum Ionen-transport vorausgesetzt) in 10 bis 60 Sekunden. In einem strömungslosen Reinraum erfolgt der Spannungsabbau in einem Intervall zwischen 50 und 500 Sekunden. Bei einer präzise dosierten Luftionisation können Gebläse dasselbe Ergebnis in 5 bis 20 Sekunden, Druckluftionisiervorsätze sogar in 1 bis 2 Sekunden erzielen.

Ein wesentliches Regelwerk zum Thema Prüfverfahren für Materialien in ESD-Bereichen ist die europäische Normenreihe EN 61340. Die verschiedenen Normteile unterstützen Anwender bei der Auswahl geeigneter Schutzmaßnahmen. Insbesondere nehmen IEC 61340-5-1 und IEC 61340-5-2 verbesserte Messmethoden auf, die bisher noch nicht berücksichtigt wurden. Weiterentwickelte Ansätze gibt es auch bei der Ableitung elektrostatischer Aufladungen über den Fußboden. ANSI/ESD S 20.20 ist ein Standard, der die administrativen und technischen Ansprüche an ESD-Kontrollprogramme beschreibt. Die beschriebenen Kontrollprogramme erstrecken sich auf die Aktivitäten Produktion, Montage, Verpackung, Beschriftung, Service und Prüfung.

Lesen Sie mehr unter:

www.esd-management.com

Der Leitfaden SEMI E -0998 zur Kontrolle elektrostatischer Aufladungen in (Halbleiter-) Produktionsequipment empfiehlt elektrostatische Grenzwerte. Dies erfolgt mit besonderem Augenmerk auf die Verfügbarkeit von Fertigungsanlagen. Er gibt Anlagenbauern Hinweise zum Design elektrostatischer Kontrollmechanismen in ihren Tools.

PMT Partikel-Messtechnik GmbH
Schafwäsche 8 · 71296 Heimsheim
Tel. +49 70 33 53 74-0
Fax +49 70 33 53 74-22
E-Mail: info@pmt.eu
www.pmt.eu

PMT Benelux N.V./S.A.
Haachtsesteenweg 378 bus 01
1910 Kampenhout, Belgium
Tel. +32 16 65 92 92
Fax +32 16 65 22 05
E-Mail: info@pmtbenelux.com
www.pmtbenelux.com

PMT France SAS
Immeuble Le Castellan
1 rue de la Belette
91410 Dourdan, France
Tel. +33 1 64 55 13 00
Fax +33 1 64 55 13 01
E-Mail: contact@pmtfrance.fr
www.pmtfrance.fr

PMT Particle Measuring
Technique (GB) Ltd.
Willow End Park · Malvern
Worcestershire WR13 6NN, UK
Tel. +44 16 84 31 29 51
Fax +44 16 84 31 29 69
E-Mail: info@pmtgb.com
www.pmtgb.com

Der Autor übernimmt keinerlei Gewähr für die Aktualität, Korrektheit, Vollständigkeit oder Qualität der bereitgestellten Informationen. Haftungsansprüche gegen den Autor, welche sich auf Schäden materieller oder ideeller Art beziehen, die durch die Nutzung oder Nichtnutzung der dargebotenen Informationen bzw. durch die Nutzung fehlerhafter und unvollständiger Informationen verursacht wurden, sind grundsätzlich ausgeschlossen.