

Messung und Bewertung von Ionisiergeräten

Wolfgang Stadler¹, Rainer Pfeifle², Arman Vassighi³

- (1) Intel Germany Services GmbH, Am Campeon 10–12, 85579 Neubiberg, Deutschland
- (2) Wolfgang Warmbier GmbH & Co. KG, Untere Gießwiesen 21, 78247 Hilzingen, Deutschland
- (3) Intel Corp., 5000 W. Chandler Blvd, Chandler, AZ 85226, United States of America

Zusammenfassung – Für die Qualifikation und regelmäßige Überprüfung von Ionisiergeräten werden Charged Plate Monitore (CPMs) eingesetzt, die in internationalen Normen definiert sind. Durch die Verarbeitung von einer zunehmenden Menge von sehr empfindlichen Bauteilen mit einer CDM-Festigkeit von unter 10 V steigen auch die Anforderungen an Ionisiergeräte. In dieser Arbeit werden verschiedene Parameter von Ionisiergeräten mit unterschiedlichen CPMs untersucht. Es zeigt sich, dass die heutigen CPMs nicht notwendigerweise für alle Messungen von Ionisiergeräten geeignet sind und in der Normierung Änderungen eingebracht werden müssen, damit die CPMs den heutigen Anforderungen genügen.

Abstract – Charged plate monitors (CPMs), which are defined in international standards, are used for the qualification and compliance verification of ionizers. Due to the processing of an increasing amount of very sensitive components with a CDM robustness of less than 10 V, the requirements for ionizers are also increasing. In this work, various parameters of ionizers are investigated with different CPMs. It is shown that today's CPMs are not necessarily suitable for all measurements of ionizers and, therefore, changes must be made to the standardization so that the CPMs meet today's requirements.

1 Einleitung

Ionisierung wird häufig eingesetzt, um Ladungen auf prozessrelevanten Isolatoren, auf ungeerdeten Leitern oder auf ESD-empfindlichen Bauteilen (ESDS) zu reduzieren. Dazu werden Ionisiergeräte unterschiedlicher Bauarten eingesetzt; sehr häufig basiert die zugrundeliegende Technik auf einer Koronaentladung im hohen elektrischen Feld. Ionisiergeräte mit Koronaentladungstechnik lassen sich grob in vier Kategorien einteilen, je nach der eingesetzten Hochspannung: Gleichstrom-Hochspannung („DC Steady State“), gepulste Gleichstrom-Hochspannung („pulsed DC“), Wechselspannung („AC“) und Hochfrequenz-Wechselspannung („HF-AC“).

Alle Ionisiergeräte werden heute nach den Industrienormen IEC 61340-4-7 [1] oder ANSI/ESD STM3.1 [2] qualifiziert. Dabei werden mithilfe eines Charged Plate Monitors (CPM) die Ladungsabbauzeit und die Offsetspannung an verschiedenen definierten Testpunkten mit unterschiedlicher Entfernung und räumlicher Anordnung zum Ionisiergerät bestimmt. In den aktuellen ESD-Kontrollprogramm-Normen IEC 61340-5-1 [3] und ANSI/ESD S20.20 [4] wird festgelegt, dass der Betrag der Offsetspannung weniger als 35 V betragen muss, die Ladungsabbauzeit richtet sich nach dem

realen Anwendungsfall bzw. muss weniger als 20 s betragen (IEC 61340-5-1 [3]).

Diese Industrienormen IEC 61340-4-7 [1] und ANSI/ESD STM3.1 [2] zählen zu den ältesten ESD-Normen und werden mehr oder weniger unverändert seit mehr als 30 Jahren angewendet, obgleich sich die Technologie der Ionisiergeräte wie auch die Anwendungen in dieser Zeit grundlegend geändert haben. Daraus ergeben sich zwangsläufig einige Probleme, die hier in diesem Beitrag kurz diskutiert werden sollen:

1. Die CDM-Empfindlichkeit von Bauelementen kann niedriger sein als die in den ESD-Kontrollprogramm-Normen definierte Offsetspannung von Ionisatoren. In sogenannten „Die-to-Die-Prozessen“ kann die CDM-Empfindlichkeit der Schnittstellen zwischen den Chipllets unter 5 V betragen, damit darf zwangsläufig auch die Offsetspannung diesen Wert nicht übersteigen. Sind die heutigen CPMs in der Lage, Offsetspannungen unter 10 V genau genug zu messen?
2. Joshua Yoo *et al.* haben gezeigt [5], dass die heutigen CPMs bestenfalls für DC-Ionisiergeräte („DC Steady State“) oder DC-Ionisiergeräte mit sehr geringer Pulsfrequenz („pulsed DC“) geeignet sind. Die CPMs sind nicht schnell genug, der wechselnden Spannung von

Tab. 1: Zusammenstellung der Parameter der verwendeten CPMs und Kontaktvoltmeter aus den Datenblättern

Name	Typ ¹	Plattenelektrode [mm]	Kapazität Platte ² [pF]	Spannungsbereich [V]	U _{start} [V]	U _{end} [V]	DC-Genauigkeit	Bandbreite [Hz]
SF1	SF	150 × 150 25 × 25	20 20	0 – 1100	programmierbar, 1-V-Schritte		0,1 % Endwert (1.1 V) Auflösung 0,1 V	80
SF2	SF	150 × 150 25 × 25	20 20	0 – 1100	programmierbar, 1-V-Schritte		0,1 % Endwert (1.1 V) Auflösung 1 V	10
SF3	SF	150 × 150 25 × 25	20 20	0 – 1020	programmierbar, 1-V-Schritte		0,1 % Endwert (1.1 V) Auflösung 1 V	80
SF4	SF	150 × 150	20	0 – 1160	250, 500, 1000	35, 50, 100	Auflösung 1 V	50
SF5	SF	(60 × 60)	48	0 – 265	250	100	Auflösung 1 V	50
FM1	FM	150 × 150	20	0 – 4000	500 – 1000	0 – 500	Auflösung 1 V	1
FM2	FM	150 × 150	20	0 – 5000	1000 – 5000	0 – 1000	Auflösung 1 V	1
HH1	FM	82,5 × 82,5	20	0 – 2000 (0 – 20000)	1000	10, 50, 100	5 % Messwert Auflösung 1 V	5
HH2	FM	82,5 × 82,5	20	0 – 2000 (0 – 20000)	1000	10, 50, 100	5 % Messwert Auflösung 1 V	5
HH3	FM	75 × 150	20	0 – 4000	1000	100	Auflösung 1 V	1
HH4	SF	60 × 16	12	0 – 265	250	100	Auflösung 1 V	50
KVM	KVM	–	–	0 – 2000	–	–	1 % Endwert (20 V) Auflösung 1 V	1000

¹ SF = Spannungsfolger, FM = Feldmühle, KVM = Kontaktvoltmeter, HH = Handgeräte („hand held“)

² Kapazität im eingebauten Zustand

HF-AC-Ionisiergeräte oder auch DC-Ionisiergeräten mit schneller Pulsfrequenz zu folgen und geben damit eine deutlich zu geringe Spitzenspannung aus.

- In den ESD-Normen sind Ladungsabbauzeiten von +1000 V zu +100 V und von -1000 V zu -100 V definiert. In der realen Anwendung kann sowohl die Anfangsspannung als auch die Endspannung von diesen Werten abweichen. Optimalerweise sollte die Ladungsabbauzeit immer bis zur maximalen erlaubten Offsetspannung erfolgen.
- Entscheidend ist der Ladungsabbau und die (zeitabhängige) Offsetspannung in der Anwendung, also an dem Ort, an dem die Ladung abgebaut werden soll. Diese Untersuchungen sollten im Rahmen einer ESD-Risikobewertung bei der Abnahme des Prozesses durchgeführt werden. Dazu sind die 150 mm × 150 mm großen Plattenelektroden der CPMs, die zur Qualifikation eingesetzt werden, in den meisten Fällen viel zu groß. Außerdem sollte die Platte in etwa die Größe des ESDS aufweisen, um nachzubilden, was das ESDS in der Anwendung „sieht“.

Nach einer kurzen Beschreibung des Versuchsaufbaus und der verwendeten Geräte (Kapitel 2),

werden in Kapitel 3 die Messergebnisse zusammengefasst. Folgende Ergebnisse sind für diese Arbeit ausgewählt worden:

- Messung von kleinen Offsetspannungen (Abschnitt 3.1),
- Messung von AC-Signalen von Ionisiergeräten (Abschnitt 3.2),
- Messung der Ladungsabbauzeit unter verschiedenen Bedingungen (Abschnitt 3.3),
- Einfluss der Plattengröße und der Ausrichtung der Plattenelektrode (Abschnitt 3.4).

Kapitel 4 fasst einige Ideen für Arbeit in den Normierungsgremien zusammen.

2 Experimenteller Aufbau

Die Messungen wurden in zwei verschiedenen Laboren durchgeführt. Für die Messungen wurden verschiedene CPMs (Spannungsfolger und Feldmühlentyp) eingesetzt. Die wesentlichen Eigenschaften der verwendeten CPMs sind in Tab. 1 zusammengefasst. Bei einigen CPMs wich die Plattengröße von dem in den Normen für die Produktqualifikation spezifizierten Werte [1][2] von 150 mm × 150 mm ab (SF5, alle Handgeräte HH)

bzw. konnte durch eine Plattenelektrode mit kleineren Abmessungen ersetzt werden (SF1, SF2, SF3).

In einigen Versuchen konnten nur Geräte mit einem analogen Ausgang verwendet werden, da Start- und Endspannungen „manuell“ über ein Datenerfassungsprogramm ausgewertet wurden. Zum Vergleich ist ein Kontaktvoltmeter aufgenommen, das die Spannung entweder an leitfähigen oder dissipativen Objekten messen kann.

Für die Messungen von verschiedenen Tischgebläseionisiergeräten außerhalb von Prozessgeräten, wurden Messanordnungen ähnlich zu IEC 61340-4-7 [1] oder ANSI/ESD STM3.1 [2] verwendet, siehe Abb. 1.

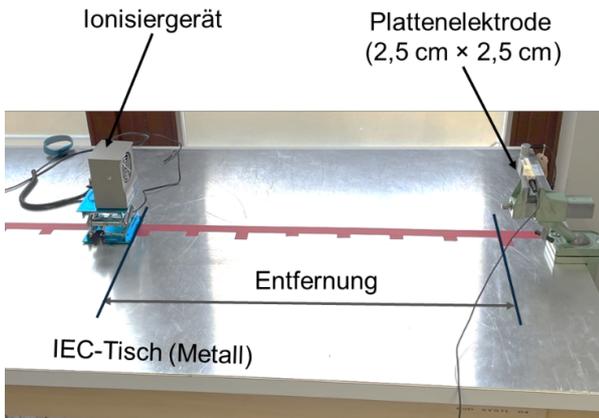


Abb. 1: Messaufbau für die vergleichenden CPM-Messungen von Tischgebläseionisiergeräten.

3 Versuchsergebnisse

3.1 Messung von kleinen Offsetspannungen

In einem ersten Schritt wurden mit einer DC-Spannungsquelle (Genauigkeit besser als 0,1 % der eingestellten Spannung) Spannungen im Bereich vom 0 bis 20 V an die Plattenelektrode angelegt und die Offsetspannung der CPMs laut Bedienungsanleitung gemessen. Dabei wurde die Messdauer für die Offsetspannung entweder im CPM auf 60 s eingestellt oder der Wert nach 60 s nach einer grafischen Darstellung der Werte ausgelesen. Die CPMs wurden – wenn möglich – vor der Messung nach Bedienungsanleitung mithilfe einer mindestens 1,0 m × 1,0 m großen geerdeten Fläche genullt. SF1 und SF2 wurden mit den Plattenelektroden mit 150 mm × 150 mm gemessen. Beim Kontaktvoltmeter wurde die Spannung an einer etwa 2,5 cm × 2,5 cm großen Metallplatte gemessen. Die Abweichungen der gemessenen Werte von den eingestellten Werten sind in Abb. 2 dargestellt.

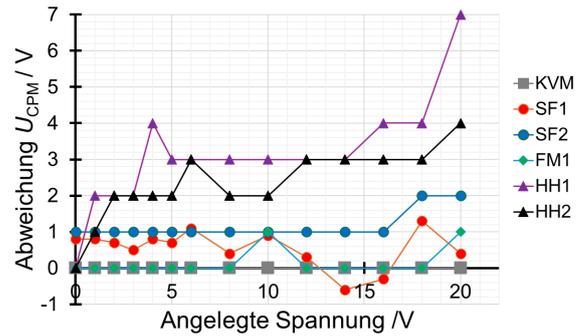


Abb. 2: Abweichung der Spannung an der Plattenelektrode von verschiedenen CPMs von der fest angelegter Gleichspannung.

Das Kontaktvoltmeter zeigt im gesamten gemessenen Bereich eine sehr genaue Übereinstimmung mit der angelegten Spannung, obwohl aufgrund der Datenblattspezifikation eine viel größere Abweichung zu erwarten gewesen werden. Die Spannungsfolger-CPMs SF1 und SF2 sowie der Feldmühlen-CPM FM1 sind im gesamten Messbereich ebenfalls relativ genau, bis zu einer angelegten Spannung von 15 V beträgt die Abweichung maximal 1 V. Für Spannungen von 5 V ergibt dies eine Abweichung von 20 %. Die beiden „Handheld“-Geräte zeigen im Bereich unter 10 V Abweichungen von den angelegten Spannungen von 2 V bis 4 V (40 % bis 60 % bei 5 V) und sind daher in diesem Messbereich nur für grobe Abschätzungen geeignet.

SF1 gibt neben der Offsetspannung als Mittelwert über den gewählten Messbereich auch die Differenz aus dem maximal und minimal gemessenen Spannungswert (Spitzen-Spitzen-Spannung) aus. Erstaunlicherweise lag die Spitzen-Spitzen-Spannung immer im Bereich von 10 V. Um dieses Phänomen genauer zu ergründen, wurde die Plattenelektrode von SF1 hart geerdet und die Offsetspannung noch einmal gemessen. Abb. 3 zeigt das Ergebnis dieses Versuchs. Dabei wurde, um die Datenanzahl zu reduzieren, ein gleitender Mittelwert berechnet.

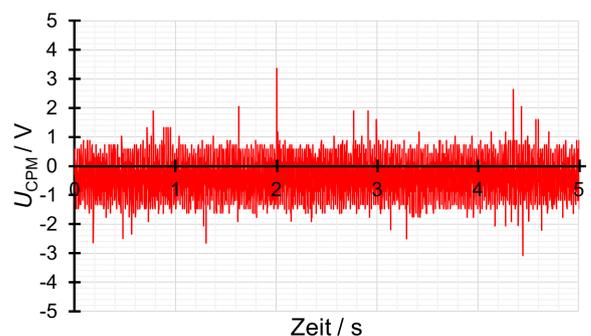


Abb. 3: Gemessenes und dargestelltes Spannungssignal des CPMs SF1 mit einer geerdeten Plattenelektrode.

Innerhalb der Messperiode von nur 5 s wird eine Spitzen-Spitzen-Spannung von +10,4 V gemessen. Durch die Mittelwertbildung sind die Spitzenwerte in der Grafik Abb. 3 deutlich niedriger, die gemessenen Spannungswerte weichen aber immer noch deutlich vom erwarteten Wert einer geerdeten Platte (0 V) ab. Die gemittelte Offsetspannung liegt bei -0,5 V.

Es ist offensichtlich, dass mit diesen stark schwankenden gemessenen Spannungen an der Plattenelektrode eine zuverlässige Messung von AC- oder gepulsten Gleichstrom-Ionisiergeräten zumindest bei kleinen Spannungen nicht möglich ist, auch wenn die gemittelte Offsetspannung den wirklichen Wert relativ gut wiedergibt.

Eine weitere Messmöglichkeit bieten die in den Ionisiergeräten eingebauten analogen Ausgänge. Die Ausgänge wandeln die an der Plattenelektrode anliegende Spannung intern in einem Verhältnis von typischerweise 1:100 bis 1:200 in ein analoges Ausgangssignal um, das über einen A/D-Wandler oder ein Oszilloskop ausgelesen werden kann. Abb. 4 zeigt als Beispiel das analoge Ausgangssignal des CPM SF1, aufgenommen mit einem Spannungstastkopf an einem 350-MHz-Oszilloskop.

Während das Oszilloskop bei direkter Verbindung des Spannungstastkopfes zur geerdeten Plattenelektrode nur ein Rauschen von maximal 200 mV zeigte, ist das Rauschen des analogen Ausgangs zwei Größenordnungen größer. Am Analogausgang des CPMs wurde mit dem Oszilloskop eine Spitzen-Spitzen-Spannungen von 26 V gemessen – also noch einmal deutlich höher als das Signal, das vom CPM auf der Anzeige direkt ausgegeben wurde. Der Mittelwert ist etwa 1 V und liegt wieder im erwarteten Bereich. Tab. 2 vergleicht die Mittelwerte und die Spitzen-Spitzen-Spannungen einiger ausgewählter CPMs.

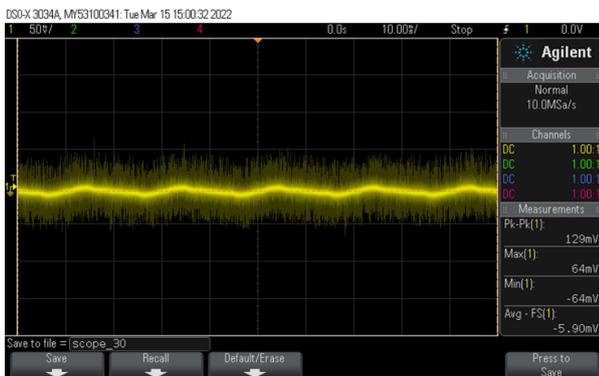


Abb. 4: Spannungssignal des analogen Ausgangs des CPMs SF1 mit einer geerdeten Plattenelektrode.

Tab. 2: Offsetspannungen und Spitzenspannung ausgelesen am analogen Ausgang der CPMs mit einem 350-MHz-Oszilloskop.

Name	Offsetspannung [V]	Spitzen-Spitzen-Spannung [V]
SF1	1,0	26
SF2	0,4	22
FM1	0,5	6,5
HH1	-0,5	45
HH2	0,5	16
CVM	0,1	20

Bei allen CPMs ist das Rauschen für die Messung von AC-Signalen bei Offsetspannungen unter 10 V viel zu hoch. Selbst für die Überprüfung der Einhaltung der Grenzwerte für die Offsetspannung von ± 35 V [3][4] ist für AC- oder gepulste Gleichstrom-Ionisiergeräte das Rauschen immer noch viel zu groß. Das Kontaktvoltmeter zeigt ebenfalls ein großes Rauschen. Offensichtlich sind die analogen Ausgangssignale der CPMs wie auch der analoge Ausgang des Kontaktvoltmeters nicht für kleine Spannungen optimiert.

Eine mögliche Lösung wird im folgenden Kapitel vorgestellt.

3.2 Messung von AC-Signalen von Ionisiergeräten

Aus Tab. 1 ist offensichtlich, dass aufgrund der maximalen Bandbreite von Signalen, die die CPMs noch auflösen können, eigentlich nur das Kontaktvoltmeter und mit Einschränkungen auch noch die Spannungsfolger-Typen SF1, SF3, SF4 und SF5 für die Messung von AC-Ionisiergeräten in Frage kommen. Für HF-AC-Ionisiergeräte mit einer Frequenz bis zu mehreren Kilohertz ist keines der hier untersuchten Geräte geeignet. Der analoge Ausgang der Geräte ist offensichtlich schnell genug, für Messungen im Bereich von unter 10 V ist das Rauschen auf dem analogen Ausgang aber zu groß.

Das Auslesen der Spannung auf der Plattenelektrode erfordert eine sehr hohe Eingangsimpedanz des auslesenden Geräts, das mit der Plattenelektrode verbunden wird. Dadurch wird verhindert, dass Ladung von der Plattenelektrode durch die Ausleseelektronik abfließt. Dies ist bei beiden CPM-Typen und auch beim Kontaktvoltmeter der Fall. Damit ist auch klar, dass es nicht einfach möglich ist, ein Oszilloskop an die Plattenelektrode anzuschließen. Die 20-pF-Kapazität der Plattenelektrode wird über einen 1-M Ω -Eingang mit einer

Zeitkonstante von $\tau = R \times C = 1 \text{ M}\Omega \times 20 \text{ pF} = 20 \text{ }\mu\text{s}$ entladen. Das ist zu kurz, um schnelle AC-Signale mit voller, unverfälschter Signalhöhe aufnehmen zu können. Ein entsprechend großer Vorwiderstand vor dem Eingang des Oszilloskops oder ein Abschwächer reduzieren die Signalstärke auf einen Wert, der unter das Rauschen des Oszilloskops fällt.

Eine mögliche Alternative ist der Einsatz eines Operationsverstärkers. Der hochohmige Eingang des Operationsverstärkers wird an die Plattenelektrode angeschlossen und der Operationsverstärker wird als Spannungsfollower betrieben, das Oszilloskop wird an den Ausgang der Operationsverstärkerschaltung angeschlossen. Der Operationsverstärker kann anhand der elektrischen Parameter im Datenblatt für den Anwendungsbereich ausgewählt werden. Wenn die zu messende Spannung auf 15 V beschränkt werden kann, dann finden sich viele Operationsverstärker mit einer Eingangsimpedanz von $10^{12} \text{ }\Omega$ und höher. Ein einfaches Beispiel ist der Typ LMC6041 mit einer Eingangsimpedanz von $10^{13} \text{ }\Omega$ und einer Betriebsspannung von 4,5 V bis 15,5 V. Damit kann im Bereich bis 15 V gut gemessen werden. Ein Beispiel für die Messung einer geerdeten Plattenelektrode mit diesem Operationsverstärker zeigt Abb. 5.

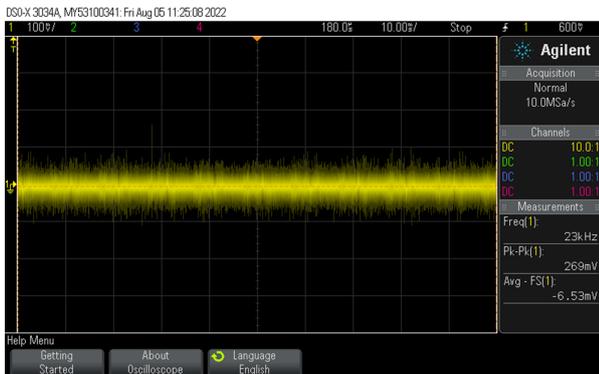


Abb. 5: Spannungssignal des Ausgangs eines Operationsverstärkers LMC6041 mit einer geerdeten Plattenelektrode.

Trotz des primitiven experimentellen Laboraufbaus betrug das elektronische Rauschen nur noch 270 mV, die Offsetspannung wurde zu -6,5 mV gemessen, fast zwei Größenordnungen geringer als das Rauschen der analogen Ausgänge (siehe Abb. 4). Werden an der Plattenelektrode mit einer DC-Spannungsquelle beispielsweise 2,0 V angelegt, werden am Ausgang des Operationsverstärkers genau 2,0 V und eine Spitzen-Spitzen-Spannung von nur 70 mV gemessen. Der CPM FM1 misst unter gleichen Bedingungen eine Offsetspannung von 2.2 V und eine Spitzen-Spitzen-Spannung von etwa 5 V.

Der Aufbau mit dem Operationsverstärker wurde dann mit einer AC-Spannungen von 8 V und unterschiedlichen Frequenzen gemessen. Abb. 6 zeigt die gemessenen Amplituden des AC-Signals in Abhängigkeit von der Frequenz.

Bis zu einer Frequenz von etwa 1 kHz zeigte sich nur eine sehr geringfügige Abnahme der gemessenen Amplitude. Zweifelsohne können Operationsverstärker gefunden werden, die einen noch höheren Frequenzbereich abdecken können.

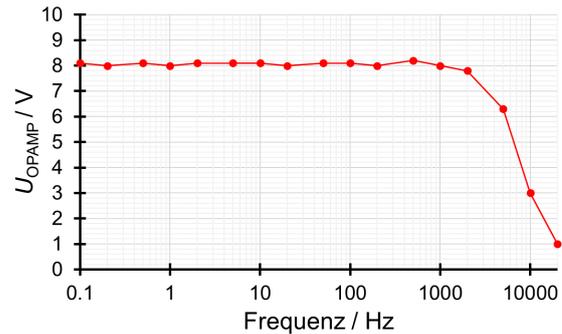


Abb. 6: Amplitude eines AC-Signals eines AC-Spannungsgenerators gemessen mit einem Operationsverstärker an einer Plattenelektrode (150 mm × 150 mm) bei unterschiedlichen AC-Frequenzen.

In [5] wurde gezeigt, dass auch Gleichstrom-Ionisiergeräte ein signifikante Spitzen-Spitzen-Spannungen aufweisen können. In der Untersuchung in [5] wurde bei einem Ionisiergerät im Abstand von 30 cm Spitzen-Spitzen-Spannungen von bis zu 40 V bei einer Frequenz von etwa 5 kHz auf einer Plattenelektrode mit einem Oszilloskop gemessen. Dieses Verhalten wurde bei keinem der hier untersuchten DC-Ionisiergeräten gefunden, auch nicht, wenn die Plattenelektrode nur 10 cm von dem Ionisiergerät entfernt angebracht wurde. Dies ist ein wichtiger Befund für den Einsatz der hier untersuchten DC-Ionisiergeräte. Es kann davon ausgegangen werden, dass das ESD-empfindliche Bauteil in einer Entfernung von zum Ionisiergerät von 10 cm oder mehr keine schädlichen hochfrequenten Spannungen sieht, die im Falle einer Kontaktierung mit einem leitfähigen Objekt zu einem ESD-Schaden führen könnten. Die erwarteten hohen Spitzen-Spitzen-Spannungen von AC-Ionisiergeräten konnten mit diesem Aufbau wegen der Spannungsbegrenzung des Operationsverstärkers nicht gemessen werden.

Der Operationsverstärker wurde auch an kleine Metallplatten angeschlossen, die ähnlich wie in ANSI/ESD SP3.4 [6] beschrieben ist, in Prozessanlagen eingesetzt werden können. Dadurch wird gewährleistet, dass der CPM genau die Auf- und Entladung sieht, die auch ein ESDS ähnlicher

Größe im Prozess sieht. Auch hier konnten für die hier untersuchten DC-Ionisiergeräte keinerlei schädliche Spitzen-Spitzen-Spannungen detektiert werden.

3.3 Messung der Ladungsabbauzeit unter verschiedenen Bedingungen

Die Messverfahren für die Ladungsabbauzeit, die in den internationalen ESD-Normen für unterschiedliche Typen von Ionisiergeräten definiert ist, sind gedacht, verschiedene Ionisiergeräte unter gut definierten Bedingungen miteinander zu vergleichen. Diese Qualifikationstests geben aber praktisch keine Aussage darüber, ob das Ionisiergerät in einer bestimmten Anwendung, beispielsweise in einer automatisierten Prozessanlage, den Anforderungen der Anwendung genügt.

In einem Prozess kann sowohl die Spannung, die vor der Ionisierung im Prozess auftritt, als auch die maximal im Prozess erlaubte Spannung von dem Startwert (± 1000 V) und dem Endwert im Qualifikationstest (± 100 V) abweichen. Daher mag es notwendig sein, Start- und Endwert für einen Abnahmetest, der das ESD-Risiko in einem Prozess bewertet, anzupassen. Sollten beispielsweise ungeerdete Leiter im Prozess ein Risiko darstellen, dann ist nach IEC 61340-5-1 [3] und ANSI/ESD S20.20 [4] darauf zu achten, dass die Aufladung dieser Leiter 35 V nicht übersteigt. Daher wäre ein Endwert von 35 V für den Ladungsabbautest zu wählen. Oft ist auch die initiale Aufladung des ESDS im Prozess anders als die „voreingestellten“ ± 1000 V, daher sollte auch der Startwert auf den anwendungsbezogenen Wert eingestellt werden. Bei niedrigeren Startwerten wird damit eine Überdimensionierung der Ionisiergeräte im Prozess vermieden, bei höheren Startwerten muss sichergestellt werden, dass der Ladungsabbau auf einen Endwert in der durch den Prozess vorgegebenen Ladungsabbauzeit geschehen kann.

Abb. 7 zeigt die Ladungsabbauzeit von einer einstellbaren Startspannung (1000 V bis 5500 V) auf eine Endspannung von 100 V und Abb. 8 die Ladungsabbauzeit von einer Startspannung von 1000 V auf unterschiedliche Endspannungen. Die Messungen wurden mit dem CPM FM1 durchgeführt, das Ionisiergerät wurden mit zwei Gebläsestufen („niedrig“ und „hoch“) betrieben. Für die Messungen in Abb. 7 wurde die Plattenelektrode mit einer externen Hochspannungsquelle auf die gewünschte Startspannung aufgeladen, die Spannung am analogen Ausgang des CPMs über einen Analog-Digital-Wandler an ein Datenerfassungsprogramm übertragen und dann die Zeitdauer bestimmt zwischen dem Ende des Aufladevorgangs

und dem Zeitpunkt, an dem eine Endspannung von 100 V erreicht wurde. Die Messungen in Abb. 8 wurden mit dem integrierten Timer des CPMs durchgeführt.

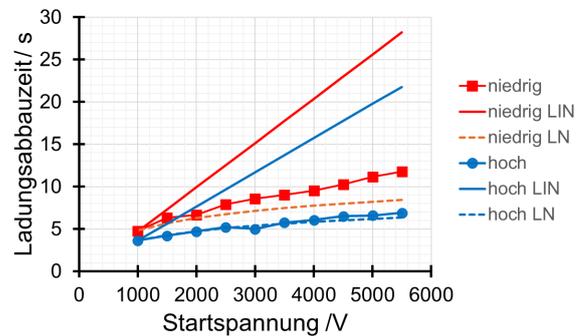


Abb. 7: Ladungsabbauzeit eines Ionisiergeräts gemessen mit FMI mit Gebläsestufen „hoch“ und „niedrig“ bei verschiedenen Startspannungen auf eine Endspannung von 100 V. Zum Vergleich: Rechnung mit linearer (LIN) und logarithmischer (LN) Abhängigkeit.

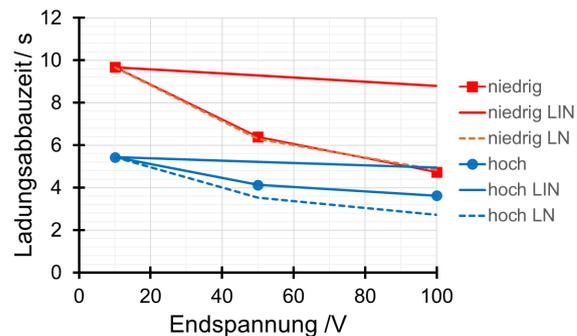


Abb. 8: Ladungsabbauzeit eines Ionisiergeräts mit Gebläsestufen „hoch“ und „niedrig“ von einer Startspannung von 1000 V auf verschiedenen Endspannungen gemessen mit FMI. Zum Vergleich: Rechnung mit linearer (LIN) und logarithmischer (LN) Abhängigkeit.

Die Kurven in den Abb. 7 und Abb. 8 lassen sich durch einfache physikalische Gesetzmäßigkeiten annähern: Das Ionisiergerät emittiert einen näherungsweise konstanten Ionendriftstrom J . Der Ionendriftstrom, der auf die Plattenelektrode trifft, ist u. a. vom Abstand der Plattenelektrode zum Ionisiergerät abhängig. Dieser Ionendriftstrom führt auf der Plattenelektrode (mit der Fläche A) zu einer konstanten Ladungsabbaurate. Gleichzeitig ziehen die Ladungen auf der Plattenelektrode durch das elektrostatische Feld die Ionen an (Coulomb-Gesetz), beispielsweise Ionen, die sonst durch den Luftstrom ohne das elektrostatische Feld der Plattenelektrode an der Plattenelektrode vorbeifließen würden. Diese beiden physikalischen Effekte führen zu einer zeitlichen Änderung der Ladungen auf der Plattenelektrode $q(t)$ und lassen sich mathematisch vereinfacht durch folgende Differentialgleichung beschreiben:

$$\frac{dq(t)}{dt} + JA + k \frac{4\pi\epsilon_r\epsilon_0}{r^2} q(t) = 0 \quad (1)$$

Dabei ist k eine Konstante, r der Abstand von der Plattenelektrode zum Ionisiergerät, ϵ_r die relative Dielektrizitätskonstante und ϵ_0 die elektrische Feldkonstante. Die Ionenstromdichte lässt sich mit der Geschwindigkeit v , der Ionendichte c und der Ionenladung q_{ion} umwandeln zu

$$JA = q_{\text{ion}} c v A = k_1 = \text{konst} \quad (2)$$

Mit der Beziehung von Spannung U zu Ladung q

$$q(t) = C U(t) \quad (3)$$

erhält man schließlich mit der Kapazität der Plattenelektrode C

$$\frac{dU(t)}{dt} C + k_1 + k_2 C U(t) = 0 \quad (4)$$

mit der bei einem bestimmten Abstand von der Plattenelektrode zum Ionisiergerät definierten Konstanten k_2 .

Wenn der Ionendriftstrom dominiert, dann vereinfacht sich Gleichung 4 zu

$$\frac{dU(t)}{dt} C + k_1 = 0 \quad \text{und} \quad U(t) = U_0 - \frac{k_1}{C} t \quad (5)$$

Wenn also der Ladungsabbau durch den Ionendriftstrom bestimmt wird, ist die Ladungsabbauzeit Δt

$$\Delta t = \frac{U_0 - U_{\text{end}}}{k_1} C \quad (6)$$

Die Ladungsabbauzeit hängt also außer vom Anfangs- und Endwert der Spannung auch von der Kapazität der Plattenelektrode ab sowie von der Fläche der Plattenelektrode, die in der Konstante k_1 enthalten ist.

Für den Falle, dass die Coulomb-Anziehung den Ladungsabbau dominiert, vereinfacht sich Gleichung 4 zu

$$\frac{dU(t)}{dt} C + k_2 C U(t) = 0 \quad \text{und} \quad U(t) = U_0 e^{-k_2 t} \quad (7)$$

Daraus ergibt sich für diesen Fall eine Ladungsabbauzeit von

$$\Delta t = \frac{1}{k_2} \ln \frac{U_0}{U_{\text{end}}} \quad (8)$$

Für diesen Fall ist die Ladungsabbauzeit in erster Näherung unabhängig von der Kapazität der Plattenelektrode und durch die Konstante k_2 abhängig vom Quadrat der Entfernung der Plattenelektrode vom Ionisiergerät.

In Abb. 8 ist gut zu erkennen, dass bei niedriger Gebläsestufe, also auch geringerem Ionendriftstrom, der Ladungsabbau für das untersuchte

Ionisiergerät durch die Coulomb-Anziehung dominiert. Bei höherer Gebläseleistung werden aus geometrischen Gründen mehr Ionen durch die Driftbewegung im Gebläse auf die Platte treffen, dadurch ist ein linearer Anteil zu sehen.

Die Ladungsabbauzeit hängt auch vom Abstand der Plattenelektrode zum Ionisiergerät ab. Abb. 9 zeigt eine Versuchsreihe mit einem Tischgebläseionisiergerät mit CPM SF1 im Abstand von 15 cm bis 60 cm. Die Startspannung war jeweils fest auf 1000 V, die Endspannung variabel.

Aus den Daten der Abb. 9 wurden die Ladungsabbauzeiten von 1000 V auf 35 V und von 1000 V auf 10 V ins Verhältnis zur „Standardladungsabbauzeit“ von 1000 V auf 100 V gesetzt (Tab. 3).

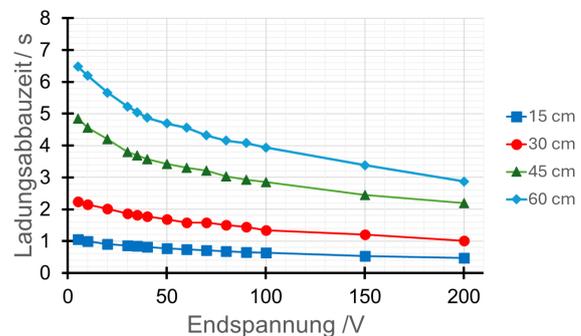


Abb. 9: Ladungsabbauzeit gemessen mit SF1 in verschiedenen Abständen der Plattenelektrode zum Ionisiergerät A von einer Startspannung von 1000 V auf eine variable Endspannung.

Tab. 3: Verhältnisse der Ladungsabbauzeiten von 1000 V auf 35 V bzw. 10 V zur Ladungsabbauzeit von 1000 V auf 100 V mit verschiedenen Abständen der Plattenelektrode vom Ionisiergerät.

Abstand	Verhältnis zur Ladungsabbauzeit 1000 V → 100 V	
	1000 V → 35 V	1000 V → 10 V
15 cm	1.31	1.57
30 cm	1.35	1.60
45 cm	1.30	1.60
60 cm	1.28	1.57

Wendet man die Gleichung 6 auf die Start- und Endspannungen an, dann ergibt sich für den Grenzfall des Ladungsabbaus ausschließlich durch den Ionendriftstrom des Ionisiergeräts für eine Endspannung von 35 V ein Verhältnis zur Ladungsabbauzeit auf 100 V von

$$\frac{1000 \text{ V} - 35 \text{ V}}{1000 \text{ V} - 10 \text{ V}} = 1,07$$

und für eine Endspannung von 10 V von

$$\frac{1000 \text{ V} - 10 \text{ V}}{1000 \text{ V} - 100 \text{ V}} = 1,10$$

Für den Grenzfall des Ladungsabbaus ausschließlich durch die Coulomb-Anziehung berechnet sich das Verhältnis der Ladungsabbauzeit für eine Endspannung von 35 V Ladungsabbauzeit auf 100 V nach Gleichung 8 zu

$$\ln \frac{1000 \text{ V}}{35 \text{ V}} / \ln \frac{1000 \text{ V}}{100 \text{ V}} = 1,46$$

und

$$\ln \frac{1000 \text{ V}}{10 \text{ V}} / \ln \frac{1000 \text{ V}}{100 \text{ V}} = 2,0$$

Bei der Dissipation der Ladung auf der Plattenelektrode durch den Ionendriftstrom ist angenommen, dass die Ionenstromdichte unabhängig von der Entfernung der zu entladenden Objekts zum Ionisiergerät immer konstant ist, was natürlich in der Realität nicht der Fall ist. Ohne Feldeinwirkung verbreitert sich der Ionenstrahl mit zunehmendem Abstand vom Ionisiergerät und damit nimmt die Ionenstromdichte ab.

Mit dem logarithmischen Zusammenhang nach Gleichung 8 bedeutet diese, dass die Entladung von 1000 V auf 100 V genauso lange dauert wie die Entladung von 100 V auf 10 V oder beispielsweise von 350 V auf 35 V. Die Dissipation der Ladung ausschließlich durch die Coulomb-Anziehung, also ohne Ionendriftstrom, kann immer als „worst case“ gerechnet werden; in realen Anwendungen ist die Ladungsabbauzeit durch den zusätzlichen Effekt des Ionendriftstroms schneller. Wenn in einer Anwendung die Ladungsabbauzeit für einen Start- und einen Endwert bekannt ist, kann der „worst case“ für beliebige andere Start- und Endwerte mithilfe des logarithmischen Zusammenhangs berechnet werden.

In einer weiteren Versuchsreihe wurde die Ladungsabbauzeit dreier verschiedener Ionisiergeräte (A, B, C) mit verschiedenen CPMs im Abstand von 15 cm bis 60 cm gemessen. Alle hier untersuchten CPMs waren mit einer 150 mm × 150 mm großen Plattenelektrode bestückt. Die Ionisiergeräte B und C hatten einen ähnlichen Formfaktor und wurden mit den zwei Gebläsestufen „niedrig“ und „hoch“ gemessen, wobei „niedrig“ der minimal einstellbaren Gebläseleistung und „hoch“ der maximal einstellbaren Gebläseleistung entspricht. Ionisiergerät A hatten einen sehr viel kleineren Formfaktor als B und C für Anwendungen in Prozessanlagen und keine einstellbare Gebläsestufen. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Abb. 10 dargestellt.

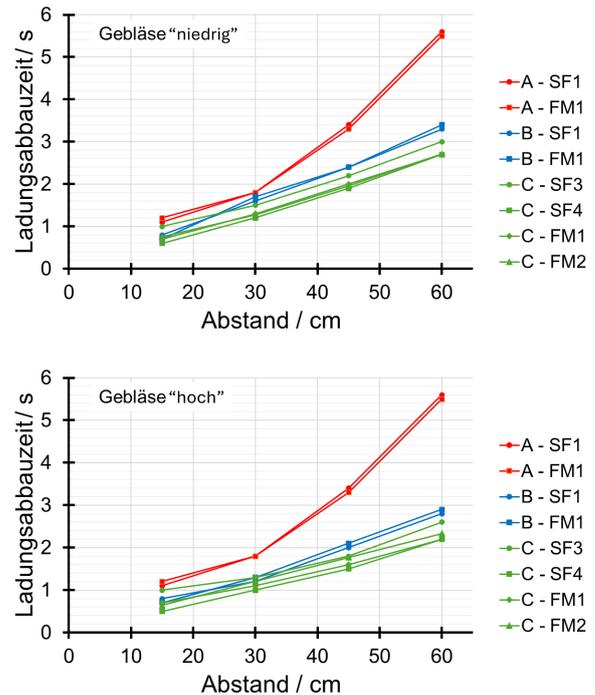


Abb. 10: Ladungsabbauzeit verschiedener Ionisiergeräte (A, B, C) in verschiedenen Abständen der Plattenelektrode vom Ionisiergerät gemessen mit niedriger (oben) und hoher (unten) Gebläseleistung. Ionisiergerät A hat nur eine Gebläsestufe.

Für die Ionisiergeräte B und C liegen die Ladungsabbauzeiten eng beieinander, Ionisiergerät B ist tendenziell etwas langsamer als C. Wie erwartet ist Ionisiergerät A deutlich langsamer. Die Messwerte mit den verschiedenen CPMs weisen für nur eine sehr geringe Abweichung vom Mittelwert auf. Für die Ionisiergeräte A und B ist die Abweichung der gemessenen Ladungsabbauzeiten vom Mittelwert unter 7 % bei einem Abstand der Plattenelektrode zum Ionisiergerät von 15 cm und unter 3 % für größere Abstände. Dies ist bei den kurzen Zeiten (der Mittelwert der Ladungsabbauzeiten bei 15 cm Abstand für die Ionisiergeräte A und B liegen bei etwa 1 s) eine ausgezeichnete Übereinstimmung. Bei Ionisiergerät C ist die Abweichung deutlich größer (bis zu 40 % bei 15 cm Abstand und 10 % bei 60 cm Abstand). Dies liegt hauptsächlich an der Abweichung von SF3 zu den anderen CPMs. SF3 hat wohl Schwierigkeiten, sehr kurze Zeiten akkurat zu messen.

Für die längeren Ladungsabbauzeiten bei größeren Abständen der Plattenelektrode vom Ionisiergerät spielen mehrere Faktoren eine Rolle. Zum einen nimmt die Driftgeschwindigkeit der Ionen mit größerem Abstand durch Reibungsverluste ab. Dadurch treffen bei zunehmendem Abstand auch weniger Ionen auf die Plattenelektrode und die Ladungsabbauzeit verlängert sich. In 30 cm Abstand vom Ionisiergerät liegen typische Luftgeschwin-

digkeiten eines Tischgebläseionisiergeräts wie Typ B und C bei 0,5–2 m/s in der Mitte des Luftstroms. Vergrößert man den Abstand von der Plattenelektrode zum Ionisiergerät von 30 cm auf 60 cm, so nimmt die Luftgeschwindigkeit bei Ionisiergerät C um einen Faktor von etwa 1,5 ab. Die gemessenen Verhältnisse der Ladungsabbauzeiten von 30 cm auf 60 cm Abstand liegen bei den Ionisiergeräten B und C bei etwa 2, unabhängig von der Gebläseleistung. Neben der Abnahme der Luftgeschwindigkeit spielt wahrscheinlich auch die Zunahme der Strahlweite von 30 cm auf 60 cm eine Rolle. Für Typ C ist das Verhältnis der Ladungsabbauzeiten von 30 cm auf 60 cm Abstand etwa 3, was darauf hinweist, dass die Luftgeschwindigkeit durch das viel kleinere Gebläse in stärkerem Maße abnimmt.

3.4 Einfluss der Größe und der Ausrichtung der Plattenelektrode

In vielen praktischen Anwendungen, insbesondere bei der Verarbeitung von integrierten Schaltungen (ICs), ist die 150 mm × 150 mm große Plattenelektrode viel größer als das ESDS, von dem die Ladung dissipiert werden soll. Damit werden auch im Vergleich zur Anwendung mit der großen Plattenelektrode mehr Ionen eingefangen, was ggf. zu einer zu schnellen Ladeabbauzeit führen würde. Außerdem können sehr häufig die 150 mm × 150 mm große Plattenelektroden nicht in die Prozessausrüstung gebracht werden, da dafür nicht genügend Platz vorhanden ist. Für Abnahmemessungen oder zur Prozessbewertung ist es daher oft besser, kleinere Plattenelektroden zu verwenden. Abb. 11 zeigt eine Versuchsreihe mit mehreren CPMs mit unterschiedlicher Größe der Plattenelektrode.

Nach den Überlegungen in Abschnitt gibt es zwei Grenzfälle: Wenn der Ladungsabbau durch den Ionenstrom bestimmt wird, dann sollte es keine Abhängigkeit der Ladungsabbauzeit von der Platten-größe geben (gestrichelte Linien in Abb. 11). Wenn die Coulomb-Anziehung den Ladungsabbau bestimmt, dann ist die Ladungsabbauzeit umgekehrt proportional zur Fläche der Plattenelektrode (durchgezogene Linien in Abb. 11). Abb. 11 bestätigt die schon vorher gefundenen Ergebnisse, dass zumindest bis zu einer Plattenelektroden-größe von 225 cm² („Normgröße“ 150 mm × 150 mm nach [1][2]) bis 68 cm² die Coulomb-Anziehung den Ladungsabbau dominiert. Für eine Plattengrößen von 25 mm × 25 mm (zum Beispiel wie in [6] spezifiziert) nimmt die Ladungsabbauzeit für beide Abstände signifikant ab, obgleich die Kapazität ebenfalls 20 pF beträgt.

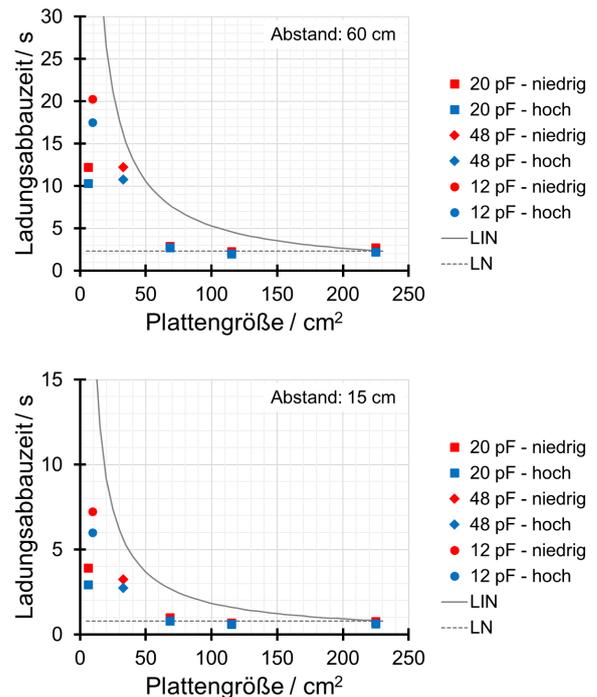


Abb. 11: Ladungsabbauzeit eines Ionisiergeräts mit zwei Gebläseleistungen („niedrig“, „hoch“) in 15 cm Abstand (unten) und 60 cm Abstand (oben) der Plattenelektrode vom Ionisiergerät (Typ C) gemessen mit CPMs mit verschiedener Plattengröße.

Das Verhältnis der Ladungsabbauzeiten von großer zu kleiner Plattenelektrode liegt für diesen Versuchsaufbau für das gewählte Ionisiergerät bei 4,9 (Gebläse „niedrig“) und 4,8 (Gebläse „hoch“) für 15 cm bzw. bei 4,5 und 4,7 für 60 cm. Das Verhältnis der Plattenelektrodenflächen ist 225 cm² / 6,3 cm² ≈ 37, weitaus größer als die gemessenen Verhältnisse der Ladungsabbauzeiten. In einem zweiten Ionisiergerät (Typ A) mit ähnlichem Versuchsaufbau wurden ebenfalls ein Verhältnis der Ladungsabbauzeiten von etwa 5 gemessen. Dieses Verhältnis kann nicht mit einfachen Abschätzungen begründet werden. Es ist auch offensichtlich, dass in einem anderen „Versuchsaufbau“, beispielsweise in einer Prozessausrüstung, das Verhältnis deutlich abweichen kann.

In Abb. 11 sind auch die Ladungsabbauzeiten von zwei CPMs aufgenommen, deren Plattenelektrodenkapazitäten von der „Standardkapazität“ von 20 pF abweichen. Für diese CPMs ist noch schwieriger, die Ladungsabbauzeiten vorherzusagen, da sich der Einfluss mehrere Parameter überlagert.

Die Ausrichtung der Plattenelektrode zum Luftstrahl kann ebenfalls einen wesentlichen Einfluss auf die Ladungsabbauzeiten haben. Die extremen Einstellungen sind die Ausrichtung der Plattenelektrode senkrecht zum Luftstrahl und parallel zum Luftstrahl, siehe Abb. 12.

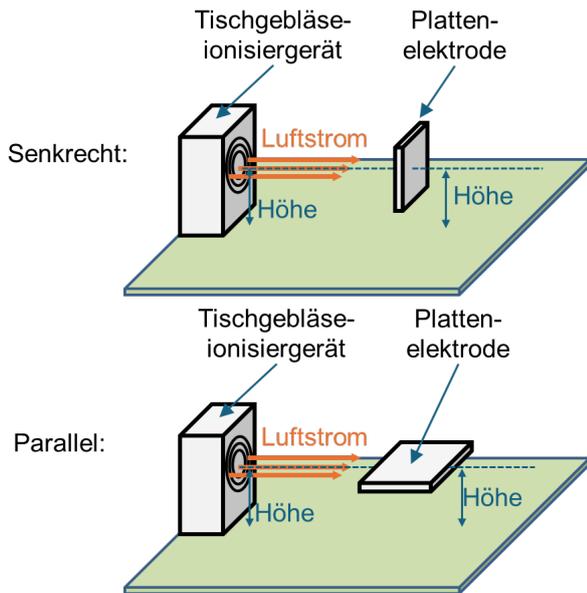


Abb. 12: Schematische Darstellung der Ausrichtung der Plattenelektrode senkrecht zum Luftstrahl des Ionisiergeräts (oben) und parallel zum Luftstrahl des Ionisiergeräts (unten). Die geometrische Mitte der Plattenelektrode ist auf die Mitte des Ionisiergeräts ausgerichtet.

Während die Ausrichtung in den Qualifikationstests nach [1][2] definiert ist, um verschiedene Ionisierungsgeräte zu vergleichen, ist die Ausrichtung für die regelmäßige Überprüfung („Compliance Verification“) weniger offensichtlich. Die Standards für die regelmäßige Überprüfung IEC TS 61340-5-4 [7] und ESD TR53 [8] fordern, dass die Plattenelektrode an dem Ort positioniert wird, an dem die Ladung abgebaut werden soll, und die Plattenelektrode senkrecht zum Luftstrom des Ionisierungsgeräts ausgerichtet werden soll. Diese Ausrichtung ist sinnvoll, wenn die korrekte Funktion des Ionisierungsgeräts überprüft werden soll und daher mit einer Anfangsbedingung verglichen werden soll. Aber es gibt keinen Aufschluss darüber, ob das Objekt, von dem die Ladung abgebaut werden soll, auch den Ionenstrahl tatsächlich sieht. Kleine Änderungen im Winkel des Luftstrahls können einen erheblichen Einfluss auf die Ladungsabbauzeit eines Objekts haben, das sich parallel zum Luftstrahl befindet. Diese kritischen Änderungen werden mit einer Plattenelektrode, die senkrecht zum Luftstrahl ausgerichtet ist, sehr wahrscheinlich nicht erfasst. Für Abnahmemessungen und Prozessbewertung ist klar, dass die Plattenelektrode parallel zu der Oberfläche des Objekts ausgerichtet werden muss, von dem die Ladung abgebaut werden soll – unabhängig vom Luftstrahl.

Abb. 13 zeigt einige Beispiele für das Verhältnis der Ladungsabbauzeiten mit Plattenelektrode parallel oder senkrecht zum Luftstrahl. Eine positive

Prozentzahl bedeutet, dass die Ladungsabbauzeit mit Plattenelektrode parallel zum Luftstrahl größer ist als die Ladungsabbauzeit mit Plattenelektrode senkrecht zum Luftstrahl.

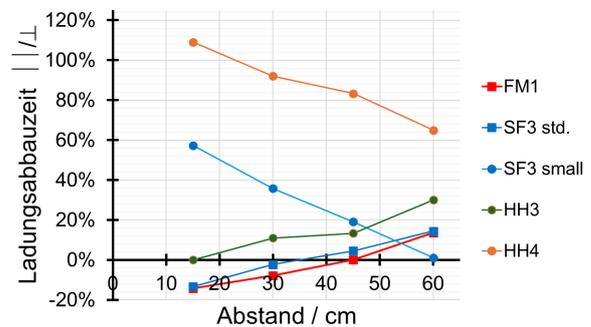


Abb. 13: Verhältnis der Ladungsabbauzeiten mit der Plattenelektrode senkrecht und parallel zum Luftstrahl für verschiedene ausgewählte CPMs.

Drei der gemessenen CPMs zeigen nur eine geringe Abweichung zwischen paralleler und senkrechter Ausrichtung der Plattenelektrode zum Luftstrom. Es muss berücksichtigt werden, dass es bedingt durch die Messanordnung zu Abweichungen kommen. Der Abstand der Plattenelektrode in paralleler Ausrichtung wurde von der geometrischen Mitte der Plattenelektrode aus zum Ionisiergerät genommen, damit ist ein Teil der Plattenelektrode bei der parallelen Ausrichtung näher am Ionisiergerät als bei der senkrechten Ausrichtung. Dies kann erklären, dass bei kleinen Abständen und großen Plattenelektroden die parallele Ausrichtung zu kleineren Ladungsabbauzeiten führt.

CPMs mit kleiner Plattenelektrode zeigen eine sehr starke Abweichung der Ladungsabbauzeiten bei kleinen Abständen der Plattenelektrode zum Ionisiergerät. Wenn man die in [6] vorgeschlagene Plattenelektrode einsetzt, bekommt man bei 15 cm Abstand der Plattenelektrode zum Ionisiergerät eine Abweichung von 60 %. Dies liegt wahrscheinlich daran, dass bei paralleler Ausrichtung und der hohen Luftgeschwindigkeit weniger Ionen direkt auf die Platte treffen. Bei größeren Abständen nimmt die Luftgeschwindigkeit ab und es werden mehr Ionen durch die Coulomb-Anziehung eingefangen, auch Ionen, die nicht direkt die Platte treffen wie im Fall der senkrechten Ausrichtung.

Für eine Prozessbewertung ist eine große Abweichung wie hier für kleine Plattenelektroden und kleine Abstände kritisch. Kleine Plattenelektroden, die viel eher der Größe eines ESD-empfindlichen Bauelements (beispielsweise ein IC) entsprechen, und kleine Abstände vom Ionisiergerät zum ESD-empfindlichen Bauelement ist ein häufiges Szenario in automatisierten Prozessausrüstungen. Hier

würde eine Messung mit einer großen Platte senkrecht zum Luftstrahl in einer gefährlichen Unterschätzung der Ladungsabbauzeit resultieren.

4 Vorschläge für die Normierung

Hier sollen kurz verschiedene Anregungen zusammengefasst werden, die sich aus den hier gezeigten Messungen ergeben.

Die Bewertung von Ionisiergeräten soll die reale Gefährdung von ESD-empfindlichen Bauelementen im Prozess durch das Ionisiergerät offenlegen. Dazu gehört die Offsetspannung der Ionisiergeräte. Nach den aktuellen Vorhersagen (siehe zum Beispiel [9]) werden in den nächsten Jahren sog. „Die-to-die-Interfaces“ prozessiert, die eine CDM-Festigkeit von nur noch 3 V aufweisen. Um sicherzustellen, dass die Offsetspannung von Ionisiergeräten unterhalb dieser Schwelle liegt, muss ein Messverfahren in der Lage sein, zum einen in einem Bereich von unter 5 V genau genug zu messen und zum anderen auch hochfrequente Ausschläge zu erfassen. Es ist offensichtlich, dass der Einsatz der heutigen CPMs über einen großen Spannungsbereich, der wegen der Messung der Ladungsabbauzeit nach [1] und [2] erforderlich ist, auf Kosten eines Rauschens bei kleinen Spannungen geht. Eine Lösung kann also sein, die Anwendungen des CPMs auf zwei Bereiche aufzuteilen: Ein CPM, der für die Messung der Ladungsabbauzeit über einen großen Spannungsbereich (beispielsweise von 100 V bis 1000V) optimiert ist, und ein CPM, der auf die Messung der Offsetspannung bis maximal 35 V optimiert ist und dabei Frequenzen, wie sie in den heutigen Ionisiergeräten verwendet werden, auflösen kann. Die erforderliche Messgenauigkeit und die Bandbreite sollten in den Normen definiert sein.

Wenn Ionisierung eingesetzt wird, um Ladung von ESD-empfindlichen Bauteilen zu neutralisieren, dann ist es für prozessnahe Abnahmemessungen wichtig, dass zum einen Start- und Endspannung an den wirklichen Gegebenheiten im Prozess angepasst werden kann und zum anderen Plattenelektroden in einer Größe zu verwenden, die dem ESD-empfindlichen Bauteil entspricht. Wenn es sich bei dem ESD-empfindlichen Bauteil um eine bestückte Platine handelt, ist die 150 mm × 150 mm große Plattenelektrode sicher eine gute Annäherung, für IC hingegen müssen deutlich kleinere Plattenelektroden eingesetzt werden. Zumindest für die regelmäßige Überprüfung der Ionisierung wie in [7] und [8] beschrieben, sollten kleinere Plattenelektroden und an den Prozess angepasste Start- und Endspannung aufgenommen werden. Dabei ist es uner-

heblich, ob eine Korrelation zwischen einer kleineren Plattenelektrode und der Plattenelektrode nach [1] und [2] besteht. Die Grenzwerte aus der regelmäßigen Überprüfung sind abhängig von der Anwendung und durch Prozessbewertung zu bestimmen.

Literatur

- [1] IEC 61340-4-7:2017, *Electrostatics – Part 4-7: Standard test methods for specific applications – Ionization*; auch: DIN EN 61340-4-7:2018-01; VDE 0300-4-7:2018-01, *Elektrostatik – Teil 4-7: Standard-Prüfverfahren für spezielle Anwendungen – Ionisation*.
- [2] ANSI/ESD STM3.1-2015, *ESD Association Standard Test Method for the Protection of Electrostatic Discharge Susceptible Items – Ionization*.
- [3] IEC 61340-5-1:2024, *Elektrostatik – Teil 5-1: Electrostatics – Part 5-1: Protection of electronic devices from electrostatic phenomena – General requirements*.
- [4] ANSI/ESD S20.20-2021, *Protection of Electrical and Electronic Parts, Assemblies and Equipment (Excluding Electrically Initiated Explosive Devices)*.
- [5] Joshua (YongHoon) Yoo, Ethan (YoungChul) Choi and Elly (SoYoung) Koo, “CPM Test Limitation Study for AC, Pulsed AC and High Frequency AC Ionizers vs. DC Based Ionizers”. EOS/ESD Symposium, 2019.
- [6] ANSI/ESD SP3.4-2016, *Periodic Verification of Air Ionizer Performance Using a Small Test Fixture*.
- [7] IEC TS 61340-5-4:2021, *Electrostatics – Part 5-4, Protection of electronic devices from electrostatic phenomena – Compliance verification*.
- [8] ESD TR53-01-22, *Compliance Verification of ESD Control Items*.
- [9] Industry Council on ESD Target Levels, *White Paper 2: A Case for Lowering Component Level CDM ESD Specifications and Requirements – Part II: Die-to-Die Interfaces*, Nov. 2023.