

Wolfgang Schubert, Dipl.-Ing., iP³-Leipzig Institut für Druck, Verarbeitung und Verpackung, Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig (HTWK), Leipzig, Deutschland
Atsushi Ohsawa, Prof., Fachbereich Elektrotechnik und Elektronik, Tokyo Denki University, Tokyo, Japan

Beseitigung elektrostatischer Aufladungen auf Materialbahnen in Produktionsmaschinen

Abstrakt

Die Beseitigung elektrostatischer Aufladungen, insbesondere auf Materialbahnen, ist von entscheidender Bedeutung für die Vermeidung von Zünd- und Verletzungsgefahren in der Industrie. Dazu ist der Einsatz von Entladungstäben (Ionisatoren) eine wichtige Methode.

Die Möglichkeit einer störenden elektrostatischen Entladung in einer Produktionsmaschine ist stets vorhanden. Dabei ist es völlig uninteressant, ob es sich um „neue“ oder „recycelte“ Materialien handelt. Die messtechnische Erfassung von Aufladungen auf Materialbahnen wird diskutiert und das besondere Phänomen der Superbüschelentladung beschrieben. Auch die sinnvolle Anordnung aktiver Ionisatoren wird erläutert und begründet.

1 Einleitung

Wenn statische Elektrizität wirklich statisch wäre, könnten wir sie ignorieren. Zeigt sie sich jedoch von ihrer dynamischen Seite, so erleben wir sie in Form von elektrischen Schlägen, als Gasentladungen zur Zündung brennbarer Atmosphären in der Industrie, Produktschäden, Beschichtungsfehler, Ausspritzen von Farbe u.v.a.m. Täglich werden weltweit Millionen von Metern unterschiedlichster Materialien beschichtet, bedruckt und verarbeitet – als Bahn von Rolle zu Rolle. Die Naturgesetze der Physik und Chemie sind allgegenwärtig, und an unzähligen Stellen in Maschinen und Anlagen entstehen durch Kontakt und Trennung von Materialien elektrostatische Aufladungen. Diese sind nicht nur störend und qualitätsmindernd, sondern können auch zu schweren Bränden und Personenschäden führen. In diesem Beitrag werden häufig auftretende Probleme bei Bahnprozessen untersucht und experimentell nachgewiesen. Ein besonderes Merkmal dieser Probleme sind isolierte leitfähige Bahnoberflächen oder Fragmente, die zu Entladungen führen können, die brennbare Materialien entzünden.

Die Messungen des elektrischen Feldes und die Visualisierung der positiven und negativen Ladungsverteilung auf der Bahnoberfläche sind die Basis für den richtigen Einsatz von Ionisatoren.

Die Visualisierung geht auf das Jahr 1777 zurück, als G. C. Lichtenberg erkannte, dass elektrostatische Entladungen faszinierende Phänomene sind, die als dicht beieinander liegende positive und negative Oberflächenladungen sichtbar gemacht werden können [1]. Um Produktionsstörungen und Schäden erfolgreich vorzubeugen, ist es wichtig, die Faktoren, die die Entstehung elektrostatischer Ladungen beeinflussen, zu verstehen. In den Normen IEC TS 60079-32-1 [2] und NFPA 77 [3] wird die Beseitigung von Ladungen mit passiven und aktiven Ionisatoren empfohlen. Doch ist nicht jeder auf dem Markt erhältliche Ionisator für jede Anwendung geeignet.

Das Ziel dieses Artikels ist es, den effektiven Einsatz und die Platzierung von Ionisatoren zu beschreiben. Dazu ist es notwendig die Entstehung und den Verlauf elektrischer Feldlinien zu verstehen, denn nur so können die Ergebnisse von Messungen mit einem elektrostatischen Feldmeter verstanden und richtig interpretiert werden und damit auch die Anordnung von Ionisatoren.

Um die häufig beim Aufwickeln von Materialbahnen auftretenden starken elektrostatischen Entladungen zu erklären, wird der Begriff der Superbüschelentladung [4, 5] eingeführt und der Entladungsmechanismus erklärt.

2 Elektrostatische Entladung auf Materialbahnen

2.1 Grundlagen und Einflussfaktoren

Für das Verständnis der Entstehung elektrostatischer Aufladung auf Materialbahnen, ist es notwendig, die Einflussfaktoren und den Mechanismus im Detail zu beschreiben (s. Abb. 1). An jeder Trennlinie L einer Bahn – von der Abrollung über die Leitwalzen und Beschichtungswerke [6] – gibt es den Elektronenaustausch zwischen dem Donator D (in diesem Fall die Walze) und dem Akzeptor A (in diesem Fall die Materialbahn). Die Bahn kann aber auch ein Donator und die Leitwalze ein Akzeptor sein.

Beim Aufwickeln der Bahn treten weitere Phänomene auf, die im Folgenden beschrieben werden (s. Abschnitt 2.2). Bei Bahnprozessen haben wir die Einflüsse vom Material mit seiner Dicke, den Oberflächen- und Volumenwiderständen (R_s und R_v), der Oberflächenrauigkeit, den Bestandteilen der Materialbahn und der Bahnspannung. Die Kontaktpaare zur Bahn, wie Gummi, beschichtete Walzen oder blanke Metallwalzen, beeinflussen den Prozess ebenfalls. Die wichtigsten Faktoren sind die Geschwindigkeit der Bahn, die Kontaktintensität (z.B. Anpressdruck oder Bahnspannung) aber auch die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit sollten berücksichtigt werden.

Die Bahn wird über angetriebene und nicht angetriebene Walzen durch die Anlage geführt. I.d.R. besteht eine Differenz zwischen der Bahngeschwindigkeit v und der Umfangsgeschwindigkeit v_u der Leitwalze ($v_u < v$ oder $v_u > v$). Durch die Relativbewegung zwischen der Oberfläche der Bahn und der Oberfläche der Walze entstehen je nach

Bahnspannung und Umschlingung mehr Kontaktpunkte. Je größer die Differenz zwischen v und v_u ist, desto größer ist der Schlupf oder die Reibung und damit die elektrostatische Aufladung. Zur Führung der Bahn werden häufig auch Presswalzen mit einem Anpressdruck p eingesetzt.

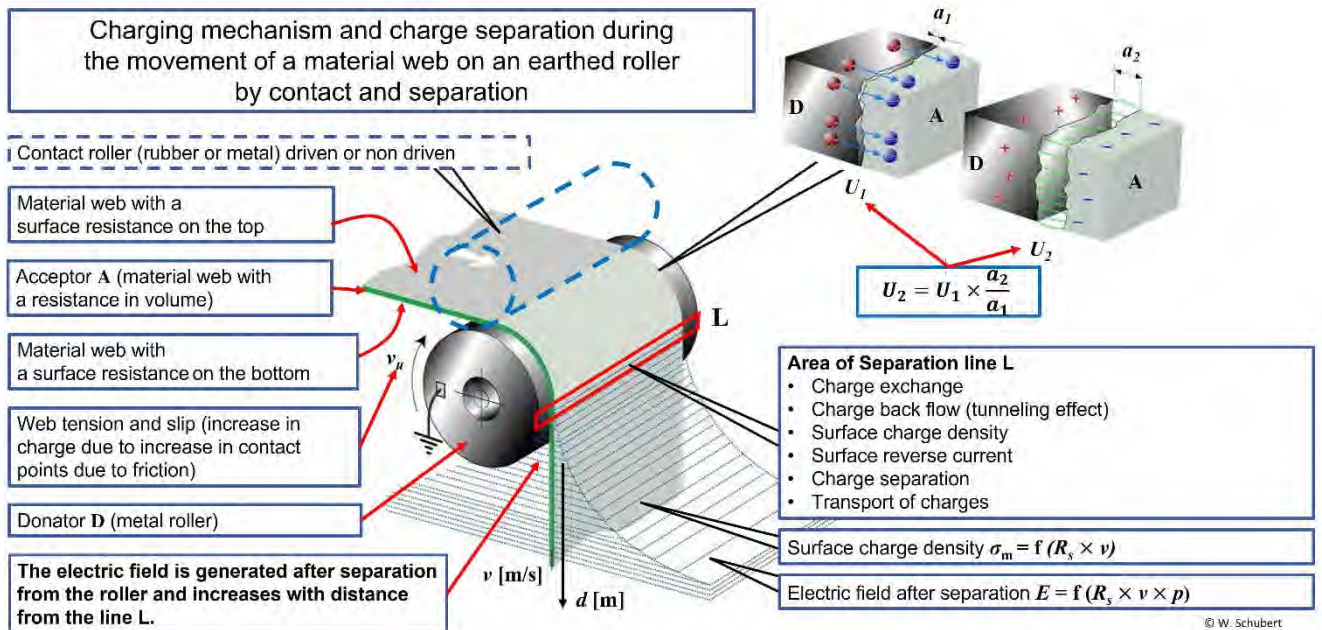


Abb. 1: Trennen der Materialbahn von einer Leitwalze

An der Trennlinie L sind sechs Prozesse (Abb. 1) für die Entstehung der elektrostatischen Ladung Q von entscheidender Bedeutung. Im Abstand $a_1 < 10^{-9}$ m zwischen zwei Materialien gibt es i.d.R. keine sauberen Oberflächen. Sie sind immer mit Partikeln und Molekülen aus der Umgebung verunreinigt und weisen daher unterschiedliche, über die Oberfläche verteilte Emissionsenergien auf, die für die auftretenden Größen und Polaritäten verantwortlich sind.

An der Grenzfläche bildet sich die Oberflächenladungsdichte σ_L aus. Diese Ladungsdichte kann aufgrund der Ladungsbindung an einer geerdeten Walze größer als σ_{\max} sein.

An dieser Trennlinie L tritt, in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit v und dem Kontaktpaar, ein Oberflächenrückstrom I_R auf, dessen Ursache weiter zu untersuchen ist.

Nach Verlassen der Trennlinie ist die Ladung nicht mehr gebunden. Die Grenzladungsdichte von $\sigma_{\max} = 2,6 \times 10^{-5}$ C/m² ist der höchste unter atmosphärischen Bedingungen erreichbarer Wert einer elektrischen Ladungsdichte an einer Oberfläche (Ladungsbedeckung) und kann nicht mehr überschritten werden [7]. Die Oberflächenladungsdichte σ_L an der Trennlinie nimmt auf den Wert σ_m ab, solange ein Oberflächenrückstrom I_R möglich ist. Dieser ist abhängig von der Leitfähigkeit der Leitwalze, der Geschwindigkeit v , dem Oberflächenwiderstand der Bahn ρ_s und dem Abstand d .

Der Oberflächenwiderstand kann auf der Oberseite der Bahn ganz anders sein als auf der Unterseite. Zum Beispiel kann ein Verbund aus Aluminium, Wachs und

Pergamentersatzpapier einen Widerstand von $10^4 \Omega$ auf der Aluminiumseite und $10^{14} \Omega$ auf der Papierseite aufweisen. Dennoch sind auch bei niedrigen Geschwindigkeiten hohe Aufladungen möglich.

σ_m ist definiert als die mit der Materialbahn abtransportierte mittlere Oberflächenladungsdichte. Sie ist eine Funktion des Oberflächenwiderstandes R_s und der Bahngeschwindigkeit v . Wird für die Materialbahn ein Widerstand von $R_s = 10^{12} \Omega$ und eine Geschwindigkeit von nur $v = 1 \text{ m/s}$ angenommen, so errechnet sich nach der in [7] abgeleiteten Gleichung (1) ein theoretischer Wert von $24,6 \mu\text{C}/\text{m}^2$.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max}}{1 + \frac{1}{2 \varepsilon_0 R_s v}} = 2.46 \times 10^{-5} \text{ C}/\text{m}^2 \quad (1)$$

Wenn wir dies für weitere Bahngeschwindigkeiten berechnen, erhalten wir eine Kurve gem. Abb. 2.

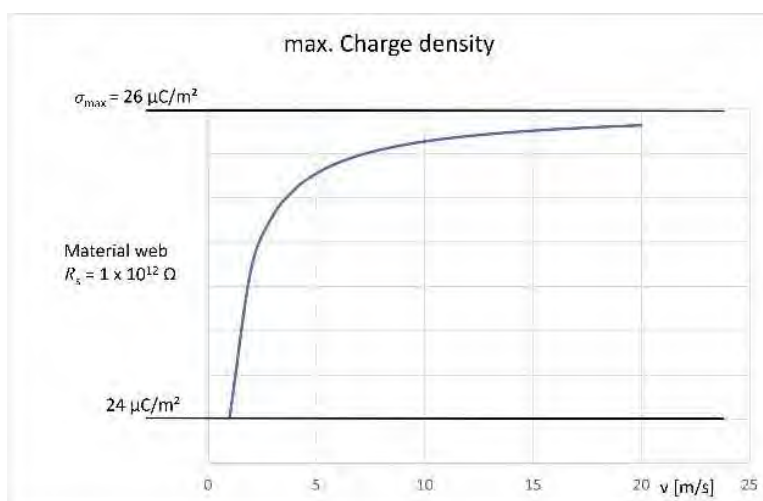


Abb. 2: Ladungsdichte σ_m bei verschiedenen Geschwindigkeiten

Die in Abb. 1 dargestellte Situation veranschaulicht die vielen Faktoren, die eine Ladungsbildung auf der Materialbahn beeinflussen. Die Potentialdifferenz zwischen den Kontakten liegt im mV-Bereich bei einem Abstand von 10^{-9} m und weniger. Wenn beispielsweise für die Spannung $U_1 = 1 \text{ mV}$ zwischen der Walze und der Bahn bei einem Abstand $a_1 = 1 \text{ nm}$ angenommen wird, so kann unter Verwendung von Gleichung (2) bei einem Abstand $a_2 = 2 \text{ cm}$ für U_2 ein Potentialanstieg von 20 kV errechnet werden.

$$U_2 = U_1 \frac{a_2}{a_1} \quad (2)$$

Die Ladung Q zwischen dem Kontaktpaar aus Bahn und Walze lässt sich gemäß folgender Formel berechnen:

$$Q = C \times U \quad (3)$$

Die Vorstellung, dass die Ladung Q auf der Bahn nach der Trennlinie konstant ist, trifft in der Praxis jedoch nie zu. Sie ist eine Funktion des Oberflächenrückstroms I_R und hängt von den Materialeigenschaften (z.B. Ableitfähigkeit und Permittivität ε) der Kontaktpaare und der Trenngeschwindigkeit ab. Weitere Untersuchungen sind erforderlich.

Durch die Einbringung von Energie E zur Trennung der Materialien nimmt die Kapazität C ab und das Potential U zu:

$$E = \frac{1}{2} C \times U^2 \quad (4)$$

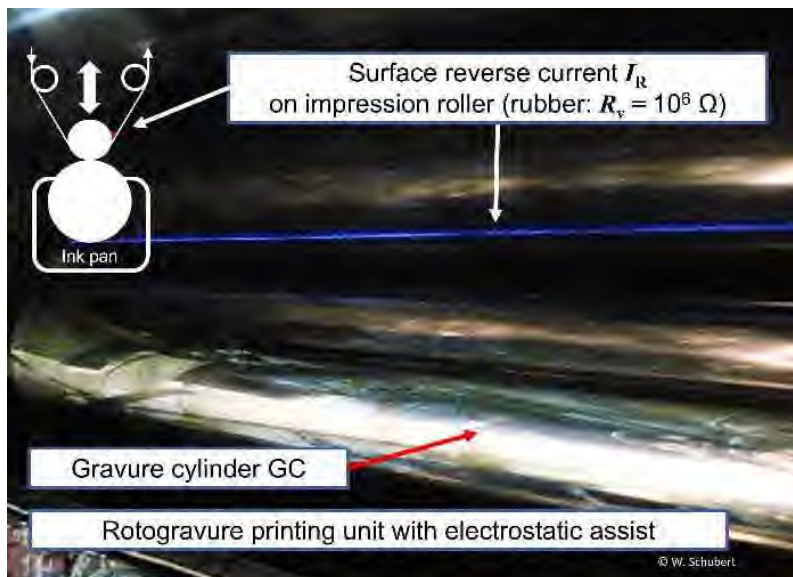


Abb. 3: Oberflächenrückstrom in einer Tiefdruckmaschine Albert TR5 mit elektrostatischer Druckhilfe (Foto: H. Künzig, 1978)

In Abb. 3 ist deutlich eine Glimmentladung als blaue Linie an der Trennlinie der Materialbahn vom Presseur als Folge des Oberflächenrückstroms I_R zu erkennen. Dies ist eine typische Situation des Bahnverlaufs in einer Tiefdruckmaschine. Diese Aufnahme war nur möglich, weil die Materialbahn transparent war. Die Geschwindigkeit der Bahn betrug etwa 8 m/s. Die Eigenschaften der Folie können nicht rekonstruiert werden. Bisher wurden keine weiteren Studien zum möglichen Rückstrom durchgeführt, sodass keine Daten verfügbar sind.

2.2 Superbüschelentladung auf der Materialbahn

Materialbahnen, einschließlich Textil-, Verbundstoff- oder Gewebbahnen, werden i.d.R. nach einem Produktionsprozess wieder aufgewickelt. Diese hochohmigen Bahnen werden an jeder Trennstelle (z.B. Beschichtungseinheit, Führungsrollen, Spanngruppen usw.) durch Kontakt und Trennung aufgeladen. Ohne die Beseitigung der elektrostatischen Aufladung werden die individuellen Ladungen der Bahn in der fertigen Rolle durch die mechanische Kraft der Bahnspannung akkumuliert.

Die Erfahrung hat gezeigt, dass diese Rollen oft so hoch aufgeladen sind, dass die unvermeidliche Berührung bei der Handhabung der Rollen, d.h. in der Regel durch eine geerdete Person, bei der Annäherung zu starken elektrostatischen Entladungen führt, auch wenn auf der Bahnoberfläche vor dem Aufwickeln nur wenige Kilovolt Potential gemessen werden. Solche Entladungen auf Personen können zu Folgeunfällen führen. Nicht nur das

Personal ist durch einen Stromschlag gefährdet¹, sondern auch die Qualität des Produktes kann beeinträchtigt werden.

Die Erfahrung hat auch gezeigt, dass die Ansammlung elektrischer Ladungen während des Aufwickelns dazu führen kann, dass eine bereits fertiggestellte und gelagerte Rolle teleskopiert (die Lagen verschieben sich gegeneinander) und dadurch unbrauchbar wird. Schon minimale Schwankungen der Bahnspannung bewirken Relativbewegungen zwischen den einzelnen Lagen der fertigen Folienrolle. Der hohe mechanische Druck zwischen den einzelnen Lagen verursacht Reibung und eine Zunahme der Kontaktpunkte für den Elektronenaustausch, was beim Abwickeln der Rolle stets zu einer hohen Trennaufladung führt. Es wurden schon feinste Löcher im Inneren der Rolle beobachtet, die zu Materialschäden führen². Bei starker Ladungsakkumulation bei Folien kann es durch Superbüschelentladungen zur Wickelachse zur kompletten „Verschweißung“ der Bahn und somit zum Totalschaden kommen.

Beim Aufwickeln der Bahn wird die Oberflächenladung der Vorder- und Rückseite der Bahn für jede Polarität addiert und mechanisch komprimiert. Das an der Außenseite der Rolle gemessene Feld setzt sich aus den Feldern der Oberflächenladungen und den Feldern der Ladungen im Inneren der Rolle zusammen (Überlagerungsprinzip). Der Gesamtbetrag der inneren Ladungen, der zum elektrischen Feld an der Außenseite der Rolle beiträgt, kann größer sein als der durch die Oberflächenladungen verursachte.

Aufgrund des meist hohen Widerstands des Materials kann die Ladung auf der Materialoberfläche nicht abgeleitet werden. Dies kann dazu führen, dass sich die Ladung auf der Materialoberfläche bis zu einem unerwünschten Grad ansammelt. Wenn die Durchschlagfeldstärke E_b , d.h. die Grenzladungsdichte ($\sigma_{\max} = 26 \mu\text{C}/\text{m}^2$) überschritten wird, kommt es zur Entladung. Daraus ergibt sich (unter bestimmten Voraussetzungen wie Klima, atmosphärischem Druck, Verunreinigungen, Abstände zu geerdeten Gegenständen u.a.)

$$E_b = \frac{\sigma_{\max}}{\epsilon_0} \approx 3 \text{ MV/m} \quad (5)$$

Somit drückt die Gleichung (5) die maximale Grenzladungsdichte an der Oberfläche aus, die durch die Durchschlagfeldstärke der Luft begrenzt ist. In der Praxis sind jedoch Ladungen auf beiden Seiten der Isolierfläche (Bahn) vorhanden, die sich gegenseitig beeinflussen (vgl. Abb. 20). Die Vektorsumme der elektrischen Felder aufgrund der Ladungen auf beiden Seiten der Oberfläche kann zu einer Entladung auf einer Oberfläche führen, obwohl die Oberflächenladungsdichte auf einer Seite kleiner als σ_{\max} ist. Darüber hinaus kann die Akkumulation von Oberflächenladungen viele lokale Entladungen auf der Bahn verursachen.

¹ Hinweis: Der Einfluss von elektrostatischen Feldern oder Überschlügen auf Personen wird in IEC 60479-2 [8] behandelt.

² Persönliche Mitteilung von H. Künzig: "Bei einer Untersuchung wurde festgestellt, dass die Beschichtung einer Folie in der Nähe des Rollenkerne oder der Wickelachse fehlerhaft war. Die optische Prüfung der unbeschichteten Folie zeigte Dendriten, die in einer kleinen Pore endeten. Beim Übereinanderlegen der Schichten konnten die Poren bis zur Wickelachse zurückverfolgt werden."

Diese sind i.d.R. nicht sichtbar, was zu komplizierten Oberflächenladungsverteilungen mit lokal positiver und negativer Polarität auf beiden Seiten führt (s. Abb. 6).

Teilentladungen können auch auf der Seite der Rolle zur Wickelachse hin auftreten. Bei beiden Arten von Entladungen verbleibt der größte Teil der Ladung innerhalb der Rolle, da sie aufgrund des hohen Widerstands der Materialien nur teilweise entladen werden kann [5]. Infolgedessen wird das elektrische Feld an der Oberfläche aufgrund der Überlagerung der Ladungen im Inneren der Rolle während der Entladung aufrechterhalten. Dies kann zu einer hochenergetischen Entladung führen, die einen starken elektrostatischen Schock und die Entzündung brennbarer Atmosphären verursachen kann. In diesem Fall kann sich die Polarität der Oberflächenladung auf dem Wickel umkehren.

Ähnlich verhält es sich beispielsweise mit dem Stapeln von elektrostatisch aufgeladenen Kunststoffschalen. Bei der Untersuchung eines Vorfalls in der Industrie wurde festgestellt, dass das "Stapeln" dieser Schalen zu einer Ladungsansammlung führte. Eine Person verursachte eine starke Entladung, indem sie ihre Hand dem Stapel annäherte und durch die Superbüschelentladung zu Boden ging.

Eine Definition des Prozesses der Ladungsakkumulation durch mechanische Kräfte, insbesondere auf Materialbahnen, ist nicht bekannt. Um den Mechanismus der Akkumulation von Ladungen gleicher Polarität zu erklären, wird die Gravitation herangezogen, die die abstoßenden Coulombkräfte zu überwinden vermag. Die Ladungsakkumulation bei der Befüllung eines FIBC (flexible intermediate bulk container) mit z.B. Kunststoffgranulat ist ein solches Beispiel (das wird als Schüttkegelentladung bezeichnet).

Eine aufgerollte Bahn ist ein typisches Beispiel, bei dem die Gravitation durch eine mechanische Kraft ersetzt wird. Resultierend daraus wird die folgende Definition der Superbüschelentladung vorgeschlagen:

Eine äußere Kraft (Schwerkraft oder (angewandte) mechanische Kraft) überwindet die abstoßenden Coulombkräfte einer großen Anzahl von Einzelladungen gleicher Polarität, die auf isolierenden Materialien vorhanden sein können, und bildet ein "System". Dies hat zur Folge, dass eine wesentlich höhere Ladungsdichte und Ladungsakkumulation erreicht werden kann, als wenn keine äußere Kraft vorhanden wäre. Die Anwesenheit eines entfernten geerdeten Leiters bindet die Ladung. Eine Superbüschelentladung tritt auf, wenn die Durchschlagsfeldstärke ($> 3 \text{ MV/m}$) überschritten wird. Auch die Annäherung an einen geerdeten, leitfähigen Gegenstand (z.B. eine Person) führt zu einer Superbüschelentladung.

In beiden Fällen wird nur ein Teil der im System vorhandenen Ladung in eine hochenergetische Entladung umgewandelt. An der äußeren Oberfläche des Systems (wo die Entladung stattgefunden hat) kann es dann zu einer Umpolung kommen. Ein großer Teil der Ladung verbleibt im Inneren des Systems.

In den zuvor beschriebenen Fällen kommt es bei Annäherung eines geerdeten Leiters (z.B. einer Person) an das Objekt zu zahlreichen intermittierenden elektrostatischen Gasentladungen mit einem hohen Energiegehalt. Dabei bleiben die Ladungen innerhalb der Objekte (Bahn, FIBC, Schalen-Stapel) erhalten, die Oberflächen werden scheinbar entladen und deren Polarität kann sich dadurch umkehren [18]. Das bedeutet, dass eine Superbüschelentladung i.d.R. hohe Energie freisetzen und viele elektrostatische Gefahren verursachen kann.

Der Übergang von einer Büschelentladung zu einer Superbüschelentladung und zu einer Gleitstielbüschelentladung lässt sich mit der Aufzeichnung von Stromkurven der jeweiligen Entladungen nachweisen [9, S. 89 ff.]. Wird eine isolierende Platte mit einer rückseitig entfernten geerdeten Platte monopolar aufgeladen, kommt es bei Annäherung einer geerdeten Elektrode zu einer Büschelentladung. Ist die geerdete Rückplatte näher (z.B. 10 ... 1 cm), so tritt bei Annäherung der geerdeten Elektrode eine Superbüschelentladung auf, ist die geerdete Platte sehr viel näher (z.B. $\ll 1$ mm), so tritt eine Gleitstielbüschelentladung auf.

Der Mechanismus einer Superbüschelentladung lässt sich am besten durch oszillografische Aufzeichnung des Entladungsstromes bestimmen.

Experimentell kann das mit folgendem Aufbau erreicht werden: Fünf oder mehr dünnwandige Kunststoffröhrchen aus dem gleichen Material, die durch Reiben, z.B. mit einem Lammfell, auf die gleiche Polarität aufgeladen werden, stoßen sich ab, wenn sie zwischen zwei isolierende Gabeln gebracht werden [5]. Die Coulombkraft bewirkt, dass die Röhrchen übereinander schweben (s. Abb. 4-1).

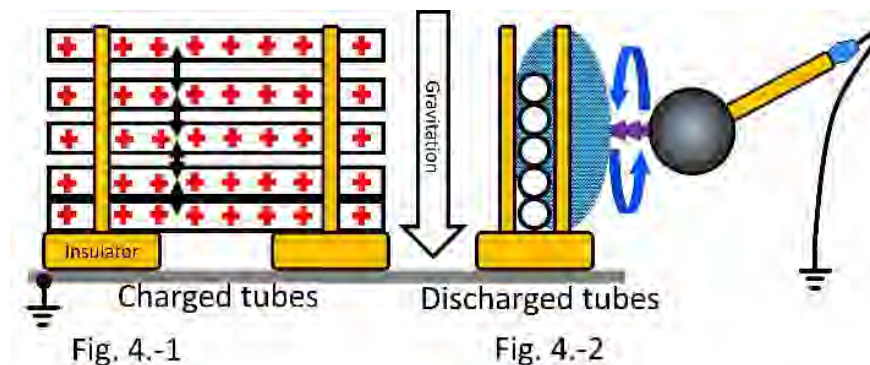


Abb. 4: Dieses Experiment ist ein Modell dafür, wie Objekte Ladungen gleicher Polarität akkumulieren [10, S. 358]

Obwohl die maximale Grenzladungsdichte σ_{\max} nicht an jeder Röhre erreicht werden kann, führt die Akkumulation von Ladung aufgrund der Schwerkraft oder der mechanischen Kraft zur Überwindung der abstoßenden Coulombkraft zu einem viel höheren elektrischen Feld. Bei Annäherung einer geerdeten Kugel-Elektrode wird eine viel stärkere Büschelentladung ausgelöst. Daher wurde hierfür der Begriff "Superbüschelentladung" kreiert [4]. Beim Auslösen dieser Entladung fallen die Röhren in den Gabeln zusammen (s. Abb. 4-2).

Bei einer energiereichen Superbüschelentladung wird ein elektromagnetischer Impuls erzeugt, der mit einem Funkenempfänger detektiert werden kann. Wenn dieser Entladungsstrom hoch genug ist, um ein starkes Magnetfeld zu erzeugen, verursacht er einen Pinch-Effekt, der zur Gaserwärmung führt [11]. Die Superbüschelentladung ist eine mögliche Zündquelle in entflammaren Atmosphären [5].

3 Arten von Ionisatoren

Entladungsstäbe (Ionisatoren) werden in passive und aktive Elektroden unterteilt.

3.1 Passive Ionisatoren

Als "passive" Ionisatoren werden alle Lösungen mit geerdeten und scharfen Spitzen oder Kanten bezeichnet. Deren Entladewirkung basiert auf dem Prinzip der Coronaentladung. Jede Spitze kann über einen Vorwiderstand geerdet werden. Es kann sich auch um ableitfähige Bürsten mit niedriger oder hoher Bürstendichte handeln. Bei der Verwendung von passiven Ionisatoren sollte sich der Benutzer immer über den Verlauf der Feldlinien im Klaren sein (s. Abb. 5). Das heißt, je geringer die Anzahl der Spitzen ist, desto höher ist die Konzentration der Feldlinien für die Corona-Einsatzspannung und damit die Entladewirkung. Die optimale Anzahl der einzeln freistehenden Spitzen pro Zentimeter hängt vom Abstand der zu entladenden Fläche und von der gegenseitigen Beeinflussung benachbarter Spitzen ab.

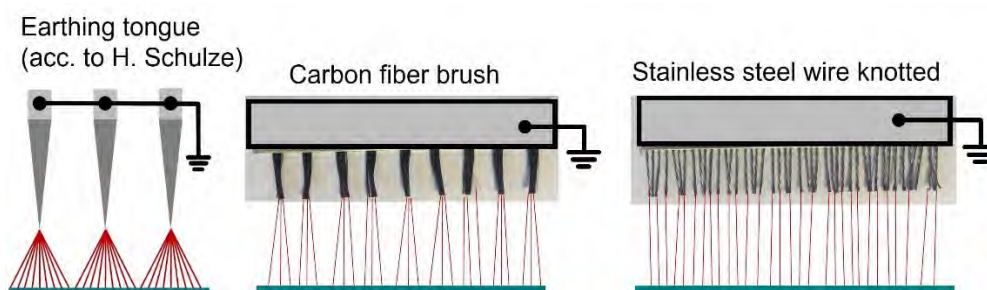


Abb. 5: Feldlinienkonzentration an passiven Spitzen mit unterschiedlichen Bürstendichten [9, S. 205 ff.]

3.2 Aktive Ionisatoren

Entladeelektroden werden als "aktiv" bezeichnet, wenn ihre Emissionsspitzen über einen Strombegrenzer (i.d.R. Widerstände) mit einer ausreichend hohen Spannung [kV] verbunden sind. Der Anschluss erfolgt entweder über eine externe Hochspannungsversorgung oder über einen internen Hochspannungsgenerator.

Das Funktionsprinzip des Ionisators bei Normaldruck beruht darauf, dass bei Überschreiten der Durchschlagsfestigkeit der Luft (3000 V/mm, s. Formel 5) Ladungsträger an der Spitze des Ionisators austreten und eine Stoßionisation auslösen. Durch die Stoßionisation der Elektronen werden Valenzelektronen aus ihren äußeren Bahnen gelöst, die Umgebung

beginnt blau zu leuchten; die Luft wird ionisiert – die Elektronen stehen für den Ladungstransport zur Verfügung und die Luft wird leitfähig.

Auf dem Markt gibt es viele verschiedene Varianten. Entweder werden die Spitzenreihen mit Wechselstrom (AC-Ionisator) oder separat mit \pm DC versorgt. Die aktiven Ionisatoren haben i.d.R. unterschiedliche Eigenschaften, die einzeln oder in Kombination verwendet werden können:

- Manuelle Änderung der Frequenz der AC-Hochspannung am Netzgerät,
- Änderung der AC-Hochspannungsfrequenz durch Messung des Entladestroms,
- Änderung der AC- oder DC-Hochspannung 5 kV ... 50 kV manuell oder automatisch durch Messung des Entladestroms,
- Änderung des Verhältnisses von positiver und negativer Spannung zur Steuerung von positiv und negativ.

4 Anordnung der Ionisatoren

4.1 Grundlegende Anforderungen

In einer Produktionsmaschine, die Materialbahnen verarbeitet, müssen an vielen Stellen, an denen mit Produktionsstörungen oder Zündgefahren zu rechnen ist, Ionisatoren angebracht werden. Die Erfahrung hat gezeigt, dass Ionisatoren häufig fehlen, falsch platziert sind und/oder an Stellen angebracht sind, an denen keine Störungen oder Zündgefahren durch elektrostatische Aufladung zu erwarten sind. Empirische Lösungen für die richtige Platzierung haben sich in der Vergangenheit durchgesetzt und können nun messtechnisch begründet werden.

Nach dem Abwickeln der Bahn von einer Rolle oder dem Ablösen von einer Leitwalze liegen Ladungen unterschiedlicher Größe und Polarität auf den Materialbahnoberflächen dicht beieinander. Wenn man mit einem geeigneten Influenz-Elektrofeldmeter (EFM) in konstantem Abstand über die Breite der Bahn geht, kann man die unterschiedlichen Feldstärken schnell erkennen. Das EFM kann auch für kontinuierliche Messungen verwendet werden [11, S. 61 ff.].

4.1.1 Ladungsverteilung auf Oberflächen

Die Ladungsverteilung auf einer Folie kann durch Bestäuben der Oberfläche mit feinem Pulver sichtbar gemacht werden (s. Abb. 6). Um auch die Polaritätsverteilung sichtbar zu machen, wird ein Pulvergemisch mit zwei unterschiedlich gefärbten Komponenten verwendet – in diesem Fall mit Karminrot gefärbte Schwefelblüte (+) und mit Methylblau gefärbtes Lycopodium (–) [10, S. 245 ff.].

Wird eine solche Mischung auf eine geladene Oberfläche gestreut, so werden die negativ geladenen Teilchen von den positiv geladenen Teilen der Oberfläche angezogen und

umgekehrt. Es kann damit gezeigt werden, dass positive und negative Ladungen sehr nahe (im Millimeter bzw. Sub-mm-Bereich) beieinander liegen und zwischen ihnen eine Entladung stattfindet.

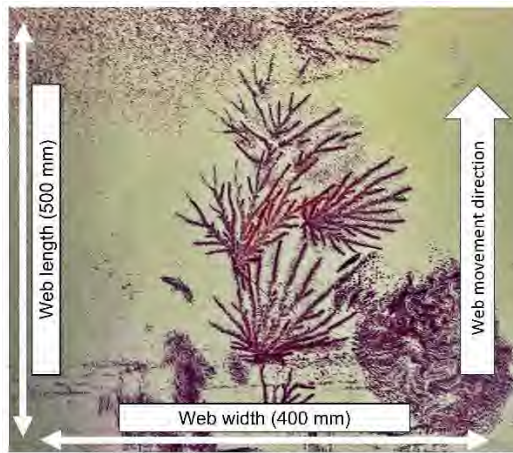


Abb. 6: Ladungsverteilung auf einer Polycarbonat-Folie nach dem Abwickeln von Hand, mit ausgeprägten Dendriten, die die positiven Ladungen kennzeichnen. Der "trübe" Bereich zeigt negative Ladungen an.

Eine Aufzeichnung des E-Feldes auf der Bahn nach einer Leitwalze [6, 12] hat gezeigt, dass Ladungsprofile unterschiedlicher Polarität und Verteilung in unmittelbarer Nähe und in Subsekunden- oder Submillimeterabständen entlang des Bahnverlaufs auftreten (s. Abb. 7), sowohl in Bahnbreite als auch in Laufrichtung.

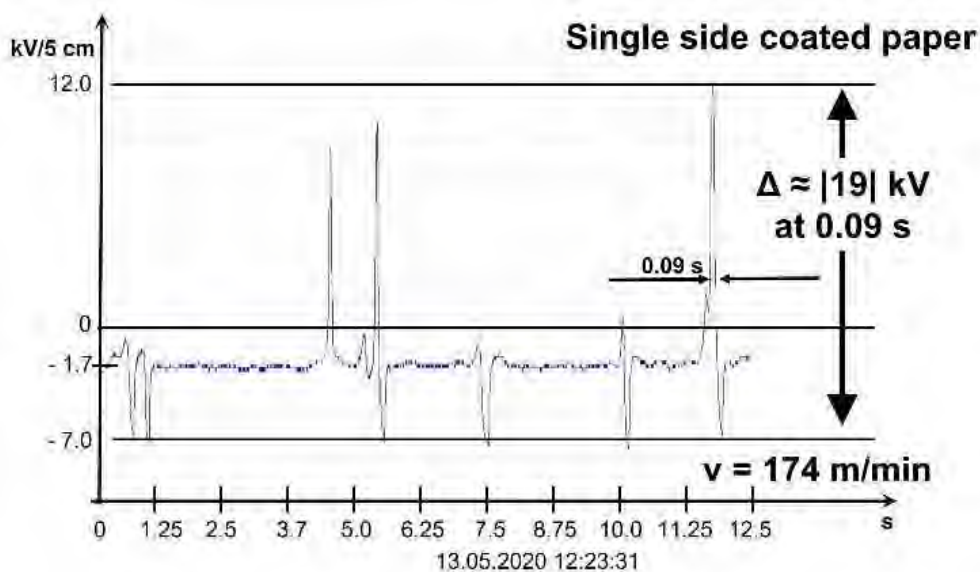


Abb. 7: Aufzeichnung des auf der Bahn nach einer Leitwalze gemessenen elektrischen Feldes [6]

Viele Ionisatoren auf dem Markt werben damit, dass es möglich ist, elektrische Felder mit einem im Ionisator eingebauten Sensor zu erkennen und durch Anpassung der Ionenemission eine bessere Entladung zu erreichen. Die als "closed loop" oder mit "in-line Messung" angebotenen Ionisatoren sind in Frage zu stellen:

Ein Ionisator kann unmöglich auf ein derart häufig schwankendes elektrisches Feld auf einer Bahn reagieren. Auch wenn man einen Sensor (Feldmeter) in der Nähe des Ionisators anbringt, kann dieser nur einen schmalen Streifen der Bahn erfassen. Er kann die unterschiedlichen Polaritäten eines E-Feldes, die wie oben beschrieben nahe beieinander liegen, nicht erkennen.

Selbst wenn ein derartiger Regelkreis funktionieren sollte, so steuert er die Elektrode über die gesamte Bahnbreite, obwohl nur ein schmaler Bereich erfasst wurde.

Die in Abb. 7 dargestellte Ladungsverteilung auf der Bahn lässt die zuvor beschriebenen Systeme nicht zu. Daher ist die Behauptung einer "besseren Entladung" der Bahn physikalisch nicht haltbar.

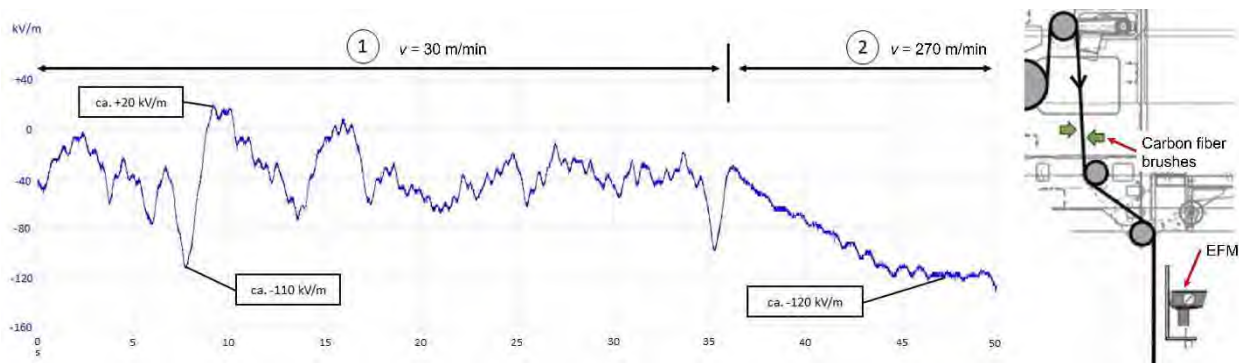


Abb. 8: Feldstärke an einer PET-Folie [13]

Die große Varianz in der Verteilung der E-Feldstärke während des Anfahrens (1, $v = 30$ m/min) und der Beschleunigung (2) der Produktion in einer Tiefdruckmaschine wurde an einer $12 \mu\text{m}$ PET-Folie mit einem EFM-Messabstand von 100 mm deutlich dargestellt (s. Abb. 8). In dieser Tiefdruckmaschine waren geerdete Kohlefaserbürsten als passive Entladung installiert und konnten aus Sicherheitsgründen (Brand- und Explosionsgefahr) für die Messungen nicht entfernt werden (vgl. Bahnlauf Abb. 8).

Nach diesem Passiv-Ionisator musste die Bahn bis zur Messstelle noch durch zwei Umlenkwalzen laufen, wobei die Vorder- und Rückseite der Folie die Umlenkwalzen in einem Winkel von etwa 60 Grad umschlossen.

Um Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen zu vermeiden, empfiehlt die internationale Norm [2] ein maximal zulässiges E-Feld von 200 kV/m. Es ist in Abb. 8 zu erkennen, dass bereits bei $v = 270$ m/min trotz passiver Ionisatoren vor der Messstelle -120 kV/m gemessen wurden (bei höheren Geschwindigkeiten sogar bis zu -300 kV/m). Daher ist die richtige Platzierung von Ionisatoren zwingend notwendig.

4.1.2 Ladungsverteilung an der Trennungslinie

Wenn eine Bahn eine Maschine durchläuft, werden ständig Partikel (Wassermoleküle, Staub, Gummiabrieb usw.) von den Walzen und der Bahnoberfläche abgelagert und wieder mitgerissen. Die Bedingungen an der Trennlinie sind daher völlig chaotisch und erzeugen

eine Vielzahl von Adhäsions- und Ablösebedingungen, die mit dem Bahnspannungsprofil-Scanner (oWTP) erfasst werden können (Abb. 9). Der oWTP-Scanner (optical Web Tension Profile) kann zur Ermittlung der materialabhängigen Ablösebedingungen eingesetzt werden [11, S. 243 ff.], [15].

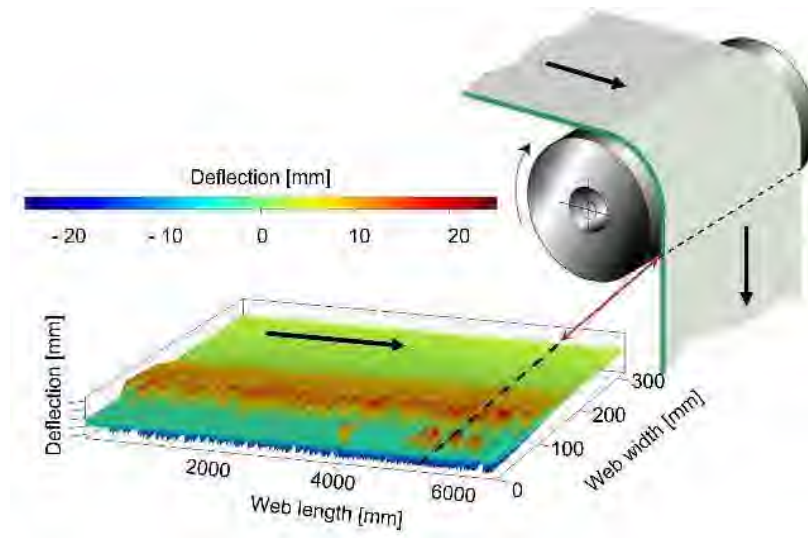


Abb. 9: Messungen mit oWTP-Scanner des Fraunhofer IVV, Dresden [15]

Diese Trennlinie wird als "Delta" bezeichnet und stellt eine beliebige Dreiecksform dar (s. Abb. 10) [10, p. 85].

An der Trennlinie sind sehr starke Auslenkungen zwischen Walze und Folie zu erkennen (Abb. 9: Auslenkung farblich visualisiert von -20 mm bis +20 mm). Aus der Visualisierung des Trennverhaltens kann geschlossen werden, dass die Polarität und das Potential der Oberflächenladung stark variieren. Dies bestätigt die praktischen Erfahrungen mit dem EFM. Weitere Untersuchungen sollen dies verifizieren.

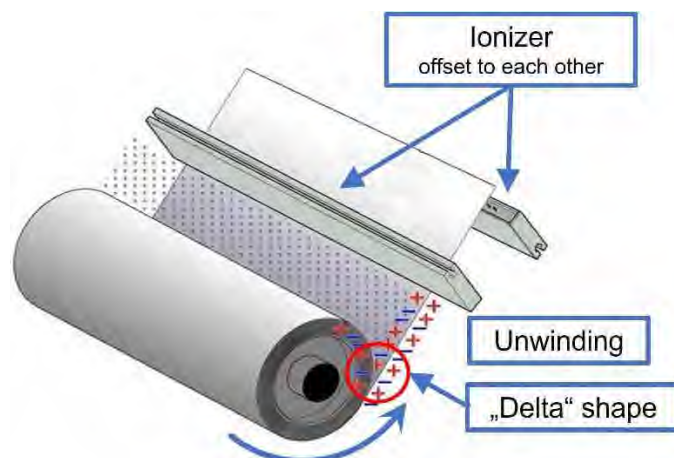


Abb. 9: Anordnung der Ionisatoren beim Abwickeln [14]

Häufig wird versucht, die Oberflächenladungen auf beiden Seiten der Bahn gleichzeitig zu neutralisieren, indem der Ionisator auf die Bahntrennlinie einer Rolle ausgerichtet wird. Ist die Arbeitsrichtung eines Ionisators genau auf das Delta ausgerichtet, würden die sich schnell

ändernden Ablösebedingungen der Bahn von der Walze durch die Frequenz des Ionisators überlagert. Somit würden die vom Ionisator abgegebenen positiven und negativen Ionen kaum zur Neutralisierung von der Bahn angezogen werden können.

4.1.3 Einfluss des Materials

Die Anordnung der Ionisatoren wird zwangsläufig auch durch das verwendete Hauptmaterial (Papier, Folie, Vlies oder Verbundstoffe) beeinflusst. Das bedeutet, dass bei normalen Papieren und Folien auch in explosionsgefährdeten Bereichen i.d.R. aktive Ionisatoren eingesetzt werden. Dagegen dürfen bei Verbundmaterialien mit leitfähigen Schichten und bei Vorhandensein von brennbaren Lösungsmitteln nur passive Ionisatoren verwendet werden (s. Abschnitt 3.3).

Materialien sind immer nach ihren elektrostatischen Eigenschaften und ihrem Kontakt- und Trennverhalten zu klassifizieren. Bei teilgestrichenen oder bedruckten Papieren kann es z.B. ausreichend sein, die Ladung auf einer Seite zu neutralisieren. Dies liegt daran, dass der endliche Widerstand des Substrats dafür sorgt, dass beide Seiten in relativ kurzer Zeit ein Ladungsgleichgewicht erreichen. Dasselbe gilt für poröse Materialien.

Die Eigenschaften und das Verhalten können jedoch je nach Herstellungsschritt sehr unterschiedlich sein. So ist z.B. eine mit schwarzer Farbe (Ruß) beschichtete Oberfläche als isolierter Leiter anzusehen.

Bei Folien oder anderen nicht porösen Materialien, die z.B. beidseitig vollflächig bedruckt oder beschichtet sind, müssen erfahrungsgemäß beide Seiten mit versetzten Ionisatoren entladen werden (s. Abb. 11). Bei der Installation von Ionisatoren in brennbarer Atmosphäre ist die Zündgefahr (Ex-Zone) zu beachten.

4.2 Optimale Platzierung

Es ist bekannt, dass die Beseitigung elektrostatischer Aufladungen in fast allen Bereichen der Industrie eine schwierige Aufgabe ist. Dabei müssen für die spezifischen Bedingungen (Material, Geschwindigkeit, Umgebung) die geeigneten Ionisatoren ausgewählt werden. Bei allen isolierenden Materialien ist es i.d.R. erforderlich, die Bahn auf beiden Seiten zu entladen [12, 16]. Bei Verarbeitungsprozessen mit brennbaren Lösemitteln ist die richtige Platzierung der Ionisatoren von größter Bedeutung, um Zündgefahren durch elektrostatische Aufladung zu vermeiden. Dies wird auch in der IEC/TS 60079-32-1 [2, S. 12.5.3] und in der TRGS 727 [16] beschrieben.

Die elektrostatische Aufladung einer Bahn kann nahezu optimal beseitigt oder stark minimiert werden, wenn die Ionisatoren wie in Abb. 11 dargestellt, angeordnet werden.

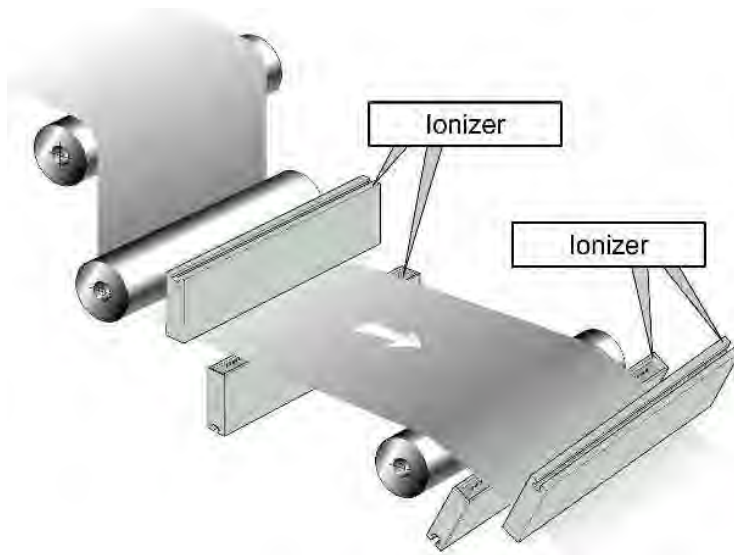


Abb. 11: Ideale Platzierung der Ionisatoren [14]

Der erste Ionisator in Laufrichtung sollte sich auf der Seite nach der letzten Trennlinie befinden (s. Abb. 11). Dies kann die Trennlinie einer Rolle oder einer Leitwalze sein. Die Stärke des E-Feldes auf der Bahn ist auf der Seite der Trennlinie immer höher als auf der Außenseite der Materialbahn (s. Abb. 1). Wie bereits erwähnt, ist es bei nicht porösen Materialien (z.B. Folien oder vollflächig bedruckten Papierbahnen) immer besser, beidseitig zu entladen, da oft nicht bekannt ist, auf welcher Seite sich die höhere statische Aufladung angesammelt hat. Geerdete Maschinenteile in der Nähe der Materialbahn und des Ionisators können die Wirksamkeit eines Ionisators verringern, indem sie das Feld so verändern, dass ein Großteil der vom Ionisator abgegebenen Ionen von den geerdeten Maschinenteilen angezogen wird. Dadurch steht nur noch ein nicht ausreichender "Rest" der Ionen zur Neutralisierung zur Verfügung. Mit anderen Worten, bei der Analyse der Installationsbedingungen von Ionisatoren ist es notwendig, in "Feldlinien" zu denken, sodass das E-Feld, das vom geladenen Material ausgeht, die Spitzen des Ionisators ohne Ablenkung erreichen kann („sehen“) kann.

Es ist nochmals darauf hinzuweisen, dass beide Seiten der Bahn vor dem Aufwickeln unbedingt ausreichend entladen werden müssen, um gefährliche Superbüschelentladungen an der Wickelstelle zu vermeiden (s. Abb. 12).



Abb. 12: Hörbare Superbüschelentladung bei der Wiederaufrüllung mit einer Bahngeschwindigkeit von 40 m/min

Eine Superbüschelentladung kann sowohl auf der Außenseite der Rolle als auch auf der Innenseite (als Funkenentladung) direkt zur geerdeten Wickelachse erfolgen (s.o.). Sie kann sich zu einer Gleitstielbüschelentladung ausweiten. Diese Entladung führt dann zur Funkenbildung im Kugellager der Wickelwelle und damit zu Elektrokorrosion (s. Abb. 14).

4.3 Elektrostatische Entladung von Verbundwerkstoffen

Elektrisch leitfähige Schichten werden zunehmend in Verbundwerkstoffen eingesetzt. Dies können Aluminiumfolien als Barrierschicht oder andere elektrisch leitfähige Schichten sein, wie z.B. Folien mit ITO-Funktionsschichten (Indium-Zinn-Oxid) im Bereich der flexiblen Elektronik. Dabei ist es unerheblich, ob sich die Metallfolie oder die metallisierte Schicht auf der Außenseite befindet oder in den Verbund eingebettet ist (s. Abb. 13). Beim Einsatz von aktiven Ionisatoren wird die Luft vor den Spitzen leitfähig, sodass über die freiliegenden Kanten des Verbundwerkstoffes Ladung in die hohe elektrische Kapazität der leitfähigen Schicht eingebracht wird. Das gleiche gilt, wenn Corona-Vorbehandlungsgeräte zur Verbesserung der Oberflächenenergie eingesetzt werden.



Abb. 13: Verbundwerkstoff mit eingebettetem Aluminium

Unabhängig davon, ob sich der Leiter innen oder außen befindet, wird die Ladung auf diesem Leiter beeinflusst und erzeugt einen kapazitiven Verschiebungsstrom, der dann zu einer periodischen (z.B. 50 Hz) Funkenemission in die sehr nahe Erde führen kann. Dies geschieht i.d.R. an der offenen Kante der beschnittenen Bahn zu einer blanken Metalloberfläche (z.B. Führungsrolle). Diese Entladungen verursachen Elektrokorrosion in den Kugellagern. Daher sollten aktive Ionisatoren nicht auf Verbundwerkstoffen mit leitenden

Schichten verwendet werden. Dies gilt insbesondere für Herstellungsverfahren, bei denen brennbare Lösungsmittel verwendet werden.

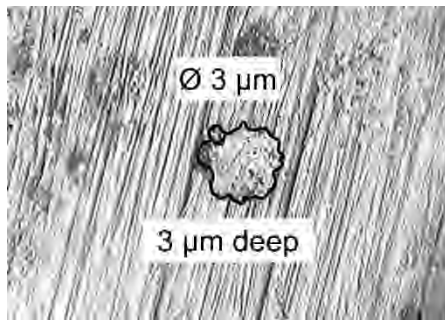


Abb. 14: Elektrokorrosion durch Verbundwerkstoff auf der Oberfläche einer Führungsrolle. (Foto: Ergebnis einer Schadensuntersuchung)

Eine besondere Gefahr besteht, wenn Teile der leitfähigen Schicht (Metallfragmente) aufgrund von Defekten im Verbundmaterial elektrisch isoliert, d.h. nicht über die leitfähige Schicht geerdet sind. Eine weitere Gefahr besteht, wenn nur Teile der Oberfläche metallisiert sind oder leitende Metallpigmentschichten aufweisen. Diese elektrisch isolierten Segmente oder Fragmente speichern Ladung und können zündfähige Funken erzeugen, wenn sie eine ausreichende Kapazität haben, wie bei einer Branduntersuchung festgestellt wurde. Elektrisch gesehen wirken diese metallischen Fragmente wie ein Kondensator mit der Kapazität C , dessen gespeicherte Ladung durch eine energiereiche Funkenentladung schnell entladen wird (Formel 5). Daher können bei der Verarbeitung von lösungsmittelhaltigen Materialien die Lösungsmitteldämpfe durch einen Funken entzündet werden.

Ein Aluminiumetikett (7×10 cm), das üblicherweise für den automatischen Rollenwechsel verwendet wird, hat z.B. eine Kapazität von 15 pF (Abstand zur Erde: 1 cm). Wird die Kapazität auf "nur" 5000 V aufgeladen, wird eine Energie von $\approx 1,9$ mJ freigesetzt (viele brennbare Flüssigkeiten haben eine Mindestzündenergie (MZE) $< 0,3$ mJ).

Daher muss die sogenannte "5000-Volt-Regel" in Frage gestellt werden [17].

Sollen in den Bahnen verschiedenste Materialien verarbeitet werden, müssen für Isoliermaterialien aktive Ionisatoren und für Verbundmaterialien passive Ionisatoren vorgesehen werden.

Dies kann durch eine ausgeschaltete aktive Entladeelektroden erreicht werden, bei denen die Elektrodenspitzen über Widerstände mit der Hochspannungsversorgung verbunden sind, oder einen anderen passiven Entladepfad haben (s. Abschnitt 3.1). Ionisatoren mit einer eingebauten Hochspannungsversorgung, die direkt an die Spitzen angeschlossen ist, erfüllen diese Anforderung jedoch nicht. Daher können diese Ionisatoren in entflammaren Atmosphären eine Zündung verursachen. Die eingebaute Spannungsversorgung arbeitet mit einer Hochspannungskaskade und dieser Teil ist nicht "offen" zur Erde, so dass keine passive Funktion möglich ist.

Materialbahnen mit offenen leitfähigen Seitenkanten können auch seitlich mit geerdeten leitfähigen Bürsten kontaktiert werden (s. Abb. 5), wenn sich darin keine isolierten leitfähigen Fragmente befinden.

5 Messtechnische Erfassung

Wenn eine Materialbahn durch eine Maschine geführt wird, durchlaufen sowohl die Ober- als auch die Unterseite der Bahn mehrere Trennlinien mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften (Gummi, beschichtete Oberflächen usw.). Dadurch entstehen auf beiden Seiten der Bahn elektrostatische Ladungen, die unterschiedlich groß und unterschiedlich polar oder gleich polar sein können (s. Abb. 7 und 8). Bei Folienbahnen spricht man von "bipolaren Ladungsschichten", die durch die Dicke der Folie entsprechend ihrer Dielektrizitätskonstante voneinander getrennt sind und so einen Kondensator bilden (s. Abb. 15).

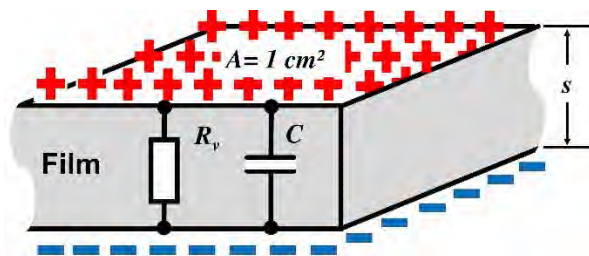


Abb. 15: Ersatzschaltbild von bipolaren Ladungsschichten [10, S. 60] (R_v : Volumenwiderstand, C : Kapazität, s : Schichtdicke)

Ein EFM wird zur Messung der elektrischen Feldstärke verwendet. Das gemessene E-Feld ist immer die Vektorsumme der E-Felder auf beiden Seiten der Bahn [11, S. 60 ff.]. Will man diese Felder getrennt messen, muss man auf beiden Seiten der Bahn mit Homogenisierungsplatten im Abstand $a = a'$ messen, wie in Abb. 16-3 gezeigt (wobei $L \times L \gg a$). In der Praxis kann diese ideale Homogenisierung in Produktionsmaschinen jedoch fast nie erreicht werden.

Da der Körper des EFM geerdet ist, werden die E-Felder, die durch die Oberflächenladungen auf beiden Seiten der Isolierfolie verursacht werden, zum EFM (Abb. 16-1) bzw. zur geerdeten Messperson geleitet. Eine solche Messung ohne Homogenisierung kann keine realen Werte liefern (Abb. 16-1), sondern nur Hinweise auf die zu erwartenden Größenordnungen geben, oder nur das, was dem EFM in diesem Moment als Vektorsumme des E-Feldes auf einer sich bewegenden Bahn zur Verfügung steht.

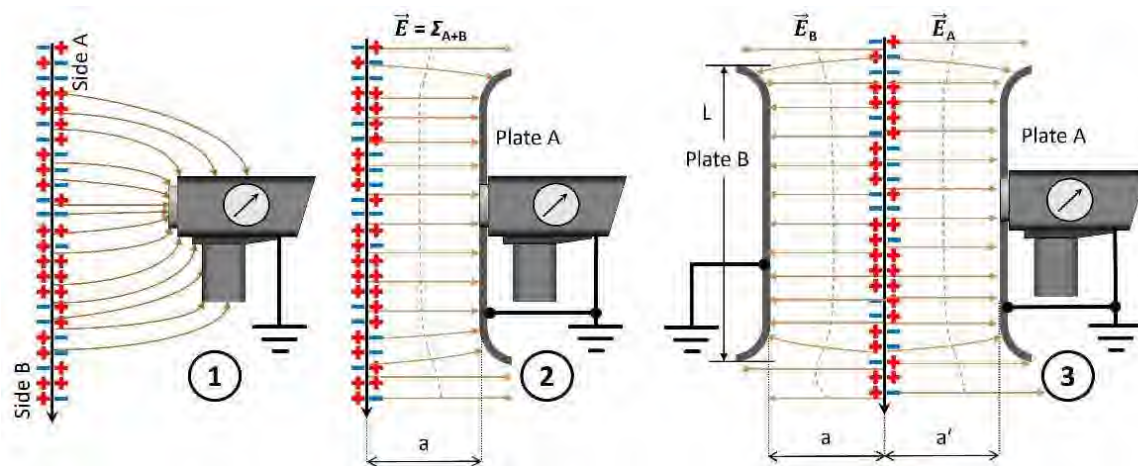


Abb. 16: Ideale Homogenisierung für die Messung des E-Feldes [10, S. 189]

Wird das EFM mit einer Homogenisierungsplatte A versehen, kann zwar die Vektorsumme mit dem EFM bestimmt werden (Abb. 16-2), aber die gemessene Feldstärke ist zu hoch oder zu niedrig. Wird auf der gegenüberliegenden Seite eine weitere geerdete Platte B angebracht (Abb. 16-3), so werden die E-Felder der gegenüberliegenden Fläche auf die Platte B gerichtet. Die E-Felder der dem Feldmeter zugewandten Seite sind auf die geerdete Platte A und das EFM gerichtet (Abb. 16-3). Das bedeutet, dass bei Einhaltung der Abstände $a = a'$ nur das E-Feld auf der Seite der Bahn erfasst wird, die dem EFM zugewandt ist! Schon bei geringem Bahnflattern (z.B. bei Geschwindigkeitsänderungen) ändert sich der Abstand zwischen Bahn und Platten, sodass die für die Homogenisierung wesentliche Bedingung $a = a'$ nicht erfüllt werden kann.

Aus diesem Grund wird häufig ein Messaufbau gewählt, bei dem das EFM oder ein anderes Messgerät genau gegenüber der Walze angeordnet ist (Abb. 17). Mit einer solchen Anordnung ist es immer möglich, Messwerte für laufende Bahnen zu erhalten. Diese Messwerte sind jedoch i.d.R. nicht aussagekräftig, da der Erfassungsbereich des EFM weit über die Kontaktfläche zwischen Bahn und Walze hinausgeht und alle Felder der ein- und auslaufenden Bahn in die angezeigten Messwerte einfließen.

Das von einer Bahn ausgehende Feld wird nach der Formel $E = U/a$ berechnet und ist immer auf das nächstgelegene Erdpotential ausgerichtet. Wenn die Bahn die geerdete Walze berührt, reduziert sich der Abstand a auf die Dicke des Materials und das Feld liegt nur innerhalb der Materialdicke. Das von der aufgeladenen Bahn ausgehende Feld erzeugt durch Influenz eine Spiegelladung (Bildladung) auf der leitfähigen Walze im Kontaktbereich zwischen Bahn und geerdeter Walze [11, p. 37]. Elektrostatik zu verstehen heißt, in "Feldlinien-Bildern" zu denken und diese sind immer auf die nächstgelegene Erde gerichtet. Daher kann die Aufladung einer Bahn nur wie in Abb. 16-1 gezeigt gemessen werden, mit all den Nachteilen des Messaufbaus.

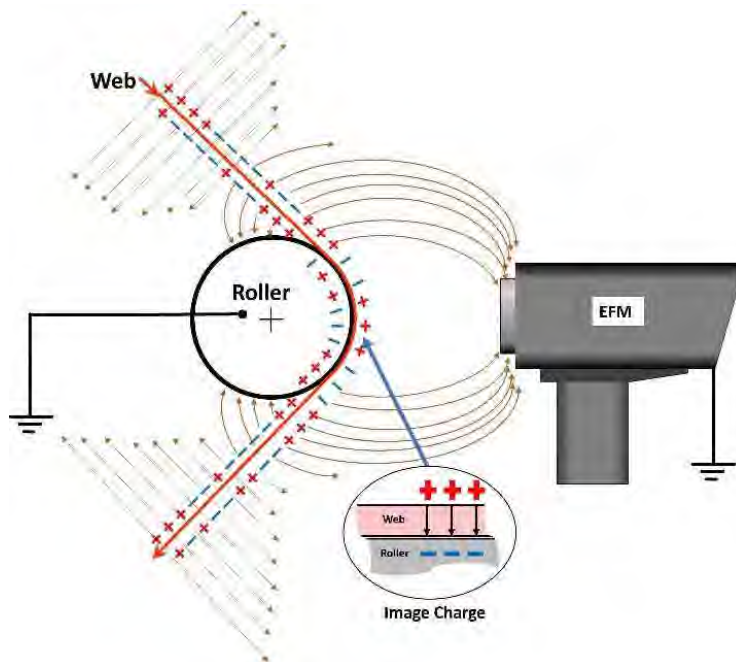


Abb. 17: Erfassungsbereich eines E-Feldmeters gegenüber einer geerdeten Walze (Durch Influenz wird die Ladung der aufliegenden Bahn mit Umkehrung des Vorzeichens gespiegelt.)

Abb. 18 zeigt ein Beispiel für eine idealisierte mögliche Situation, in der eine einseitige Entladung unzureichend ist. Wenn z.B. $+14 \text{ kV/m}$ an der Oberseite einer Bahn und -13 kV/m an der Unterseite separat gemessen werden können (wie in Abb. 16-3), beträgt das an der Oberseite der Bahn gemessene E-Feld nur $+1 \text{ kV/m}$. Daher werden von den vom Ionisator abgegebenen „Ionen“ nur so viele negative Teilchen genutzt, dass die $+1 \text{ kV/m}$ neutralisiert werden. Wenn eine Oberfläche positiv und die andere negativ in gleicher Potentialhöhe geladen ist, heißt das, dass die Summe zwischen beiden Seiten gleich Null ist, d.h., dass auf jeder Fläche Ladungen mit demselben Absolutwert verbleiben.

Wenn wir nun die Wirksamkeit des Ionisators mit einem EFM messen, sehen wir, dass der Messwert vor dem Ionisator $+1 \text{ kV/m}$ und hinter dem Ionisator im Idealfall $\pm 0 \text{ kV/m}$ beträgt, die Bahn aber nicht entladen wurde.

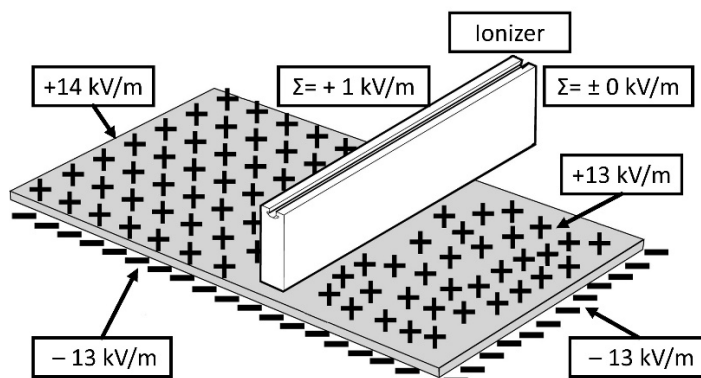


Abb. 18: Einseitige Entladung - ungünstig - man kann eine bipolare Ladungsschicht erhalten

Abb. 19 zeigt ebenfalls eine idealisierte Darstellung der Neutralisierung von Bahnladungen. Praktische Erfahrungen und Messungen haben gezeigt, dass mit der gewählten Anordnung der Ionisatoren eine effektive Neutralisierung der Bahn bis hinunter zu einigen Volt möglich ist. Weitere Untersuchungen sollten durchgeführt werden, um festzustellen, wie verschiedene Ionisator-Typen eingesetzt werden können.

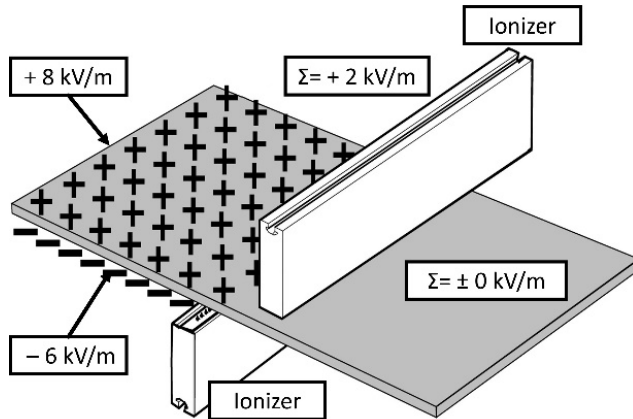


Abb. 19: Beidseitige Entladung - optimal

Bei einer gestaffelten Anordnung (s. Abb. 11) sollten die Ionisatoren mindestens zwei Entladungsstabbreiten voneinander entfernt sein. Diese Anordnung verhindert, dass sich die Entladungsstäbe gegenseitig beeinflussen, wie es bei gegenüberliegend angeordneten sein würde.

Wie in Abschnitt 4.1.1 erwähnt, können Ionisatoren mit eingebauten Netzteilen durch von der Bahn kommende Ladungsspitzen beschädigt werden (s. Abb. 6 und 7). Die Verwendung von Ionisatoren mit einem separaten Hochspannungsnetzteil ist in der Industrie üblich. Oft wird mehr als ein Ionisator an ein einziges Netzteil angeschlossen. Dabei spielt es keine Rolle, ob es sich um einen AC- oder DC-Ionisator handelt. Das heißt, dass alle Ionisatoren zur gleichen Zeit an ihren Spitzen die gleiche Spannung und Polarität haben. Wenn sich zwei dieser Ionisatoren gegenüberstehen, geben sie beide gleichzeitig Ionen mit der gleichen Polarität ab. Dadurch entsteht eine abstoßende Coulombkraft und der Entladungseffekt kann verloren gehen.

Wenn der Unterschied oder die absolute Potentialdifferenz zwischen beiden Seiten der bipolar geladenen Folie gegen Null geht, wie in Abb. 20 dargestellt, wird die Entladung bei isolierenden Folien mit sehr hohem Widerstand schwierig.

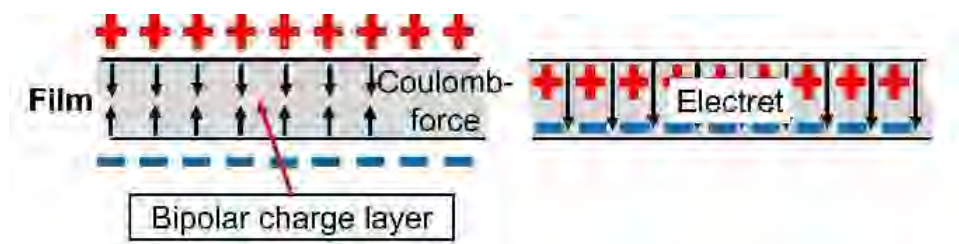


Abb. 20: Bipolare Ladungsschicht

Man stelle sich z.B. vor, dass auf der Oberseite einer Bahn $-15,3 \text{ kV/m}$ vorhanden sind und auf der Unterseite $+15,1 \text{ kV/m}$, dann beträgt die vektorielle Potentialdifferenz $30,4 \text{ kV}$! Das Potential, das gegenüber einem EFM bzw. einem Ionisator wirksam wird, beträgt jedoch nur 200 V . Und nur diese 200 V werden durch den Ionisator neutralisiert. Deshalb bleibt auch eine Entladung mit Ionisatoren auf beiden Seiten in den meisten Fällen wirkungslos.

"Eine solch hohe Potentialdifferenz an einer Bahn ist i.d.R. nicht messbar, eine Entladung fast unmöglich, das E-Feld ist in der Foliendicke der Bahn gebunden! Dennoch kann es lebensgefährlich sein, wenn eine solche hochohmige Folie bei der Verarbeitung auf beiden Seiten gleichhohe Ladung entgegengesetzter Polarität trägt. Zum Beispiel eine Seite $+20 \text{ kV/m}$, die gegenüberliegende Seite -20 kV/m . Von außen nicht messbar, entspricht dies bei einer Foliendicke von $100 \mu\text{m}$ $E = U/a = 4 \times 10^4 \text{ V}/10^{-4} \text{ m}$ einer (theoretischen) elektrischen Feldstärke von $4 \times 10^8 \text{ V/m}$, oder einfacher ausgedrückt $400 \text{ Millionen V/m}$. Wird eine solche Folie z.B. in einer Zentralzylinder-Flexodruckmaschine (Abb. 23) beidseitig mit den Fingern der Hand berührt, ist ein Arbeitsunfall mit bleibenden Lähmungen verständlich. Auch innerhalb der Flexodruckmaschine sind Gleitstielbüschelentladungen sehr wahrscheinlich! (s. Abb. 21)

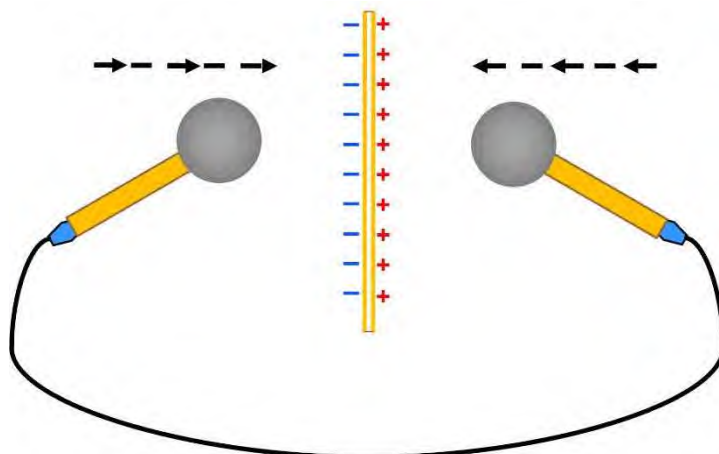


Abb. 21: Demonstration einer Gleitstielbüschelentladung an einer bipolaren Ladungsschicht von Günter und Sylvia Lüttgens [11, Seite 167]. Diese hochisolierende Folie trägt in diesem Fall die bipolare Ladung nur im mittleren Bereich, sodass sie wie im Bild mit der Hand gehalten werden kann. **(Bitte nicht nachmachen!)**

Die hohe Feldstärke wirkt innerhalb der geringen Schichtdicke. Sie kann daher nicht mit einem EFM als E-Feld gemessen werden (s. Abb. 19). Die Potentialhöhe als auch die Polarität \pm kann mit einem geeigneten Messaufbau nachgewiesen werden. Weitere praktische Lösungen für solche Probleme sind den Autoren bisher nicht bekannt. Eine einzige bekannte jedoch nur bedingt nutzbare Möglichkeit ist es, die Bahn zu erwärmen und danach sofort durch eine kühle „Feuchtekkammer“ zu führen, um die Kondensationsfeuchte als ableitfähige Schicht auf der Bahn zu nutzen.

Bei Verbundstoffen mit Aluminiumfolie sind elektrostatische Aufladungen mit dem EFM kaum messbar, wenn das Aluminium über einen Kontakt in einem Bereich der Maschine ausreichend geerdet ist. Die elektrischen Feldlinien sind dann auf die geerdete Aluminiumfolie gerichtet.

6 Stoffbahnen und ihr Gefahrenpotential

Aufgrund der Ergebnisse einer Brandursachenuntersuchung bei einem Beschichtungsprozess ist es notwendig, auf die Anforderungen aus IEC/TS 60079-32-1 [2] und der deutschen TRGS 727 [16] einzugehen [9, S. 225]. Dort wird ausschließlich von Folien und Papierbahnen gesprochen. Nach Ansicht der Autoren müssen alle Materialbahnen berücksichtigt werden. Denn nicht nur Folien- und Papierbahnen werden in großem Umfang beschichtet, sondern auch textile Materialbahnen. Diese textilen Materialien bestehen i.d.R. aus hochisolierenden Kunststofffasern und werden mit den unterschiedlichsten Substraten beschichtet, die sich in brennbaren Lösungsmitteln auflösen lassen (z.B. Aramidgewebe für Gummidichtungen u. ä.).

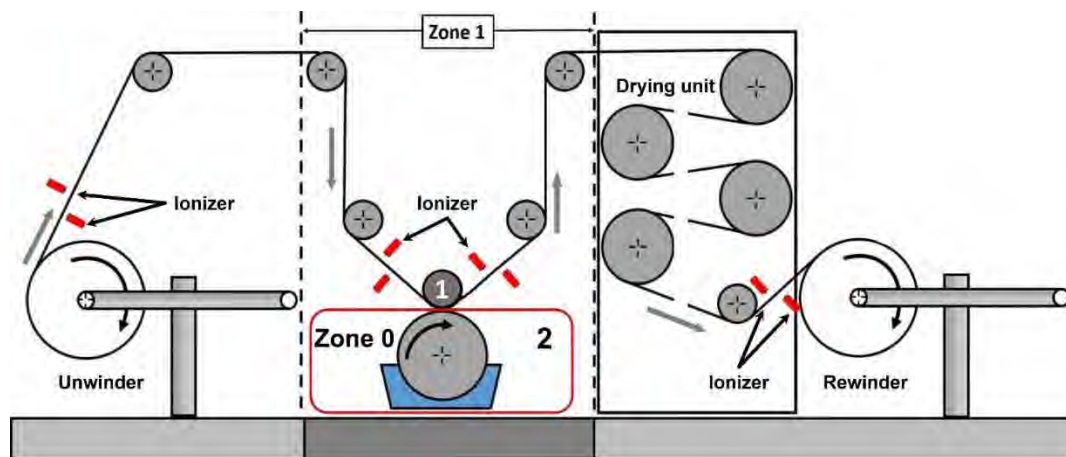


Abb. 22: Verarbeitungsmaschine für Materialbahnen (angepasste Darstellung nach [16])

Die in Abb. 22 gezeigte Anordnung von Ionisatoren ist als Beispiel zu betrachten. Daraus ergibt sich für alle Anwender und Konstrukteure die Notwendigkeit, die Platzierung der gezeigten Ionisatoren an die spezifischen Gegebenheiten der jeweiligen Maschine anzupassen. Zum Beispiel muss der Konstrukteur einer Zentralzylinder-Flexodruckmaschine (s. Abb. 23) den Zentralzylinder mit der Position 1 (dem Presseur) gleichsetzen. Die Print unit (Druckeinheit) bestehend aus Kammerrakel, Rasterwalze und Druck-Sleeve ist mit der Position 2 der Abb. 22 gleichzusetzen. Demnach sind nach dem Druckwerk Nr.10 Ionisatoren einzubauen.

Eine Anordnung von Entladeelektroden zwischen den Druckwerken ist nicht zielführend, da das elektrische Feld der Bahn immer auf die nächstgelegene Erde, in diesem Fall den Zentralzylinder, gerichtet ist. (Um eine Bahn entladen zu können, müssen beide Seiten frei zugänglich für Entladeelektroden sein, d.h. eine Seite darf weder auf geerdeten Flächen noch in wenigen Millimetern davon einseitig vorbeigeführt werden.) Die von einem aktiven Ionisator emittierten "Ionen" werden also nicht von der geladenen Bahnoberfläche angezogen. Auch ein passiver Ionisator wird keine Wirkung haben, da das elektrische Feld auf den geerdeten Zentralzylinder gerichtet ist.

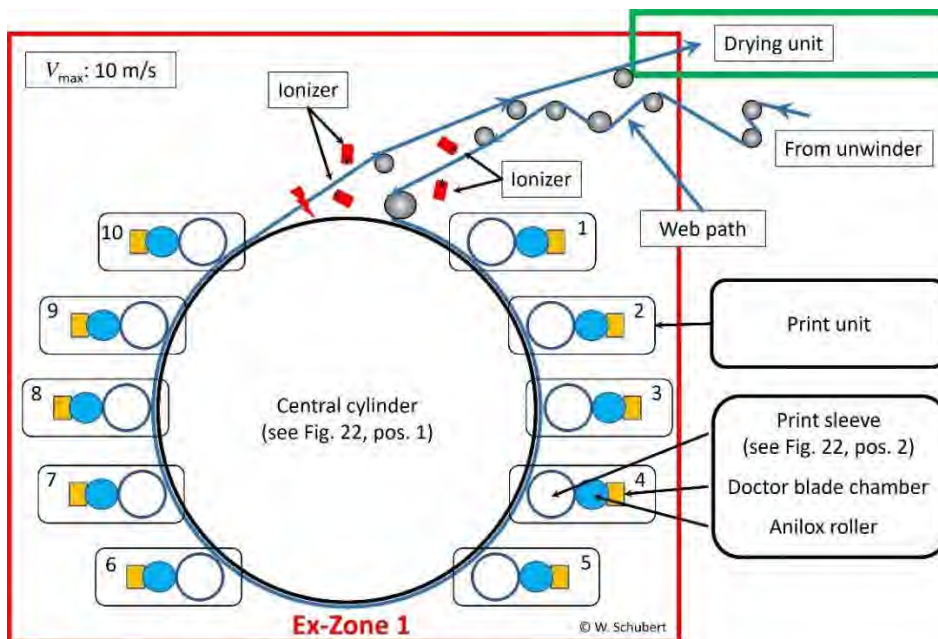


Abb. 23: Schematische Darstellung einer Zentralzylinder-Flexodruckmaschine.

7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die richtige Platzierung und Auswahl von Ionisatoren ist der Schlüssel zur Bahnverarbeitung. Es werden die vielen Faktoren aufgezeigt, die eine elektrostatische Aufladung während der Bahnverarbeitung verursachen. Die Möglichkeiten der elektrostatischen Entladung in Bahnverarbeitungsmaschinen werden diskutiert. Um die Gefahren und möglichen Probleme beim Aufwickeln aufgeladener Bahnen zu verstehen, wird der Mechanismus der Superbüschelentladung beschrieben.

Es werden weitere Untersuchungen unter Produktionsbedingungen vorgeschlagen, insbesondere zur Verteilung elektrostatischer Ladungen beim Ablösen der Bahn von einer Leitwalze. Das gleiche gilt für die Untersuchung der Funktionsweise der zahlreichen Ionisatoren, die auf dem Markt erhältlich sind.

Literatur

- [1] Hermann, C., (2016) *Das physikalische Kabinett zur Görlitz - Diss.*, Gunter Oertel Verlag, ISBN 978-3-944560-27-4]
- [2] IEC/TS 60079-32-1: 2013 *Explosive atmospheres – Part 32-1: Electrostatic hazards, guidance*
- [3] NFPA 77, (2019) *Recommended Practice on Static Electricity*, Edition, 2019
- [4] Lüttgens, G., Wilson, N., (1997) *Electrostatic hazards*, Butterworth-Heinemann
<https://doi.org/10.1016/B978-075062782-5/50003-7>
- [5] Forestier, S., Dien, J.-M., Glor, M., (2016) *Ignition of a cloud of dry powder using super brush discharges*, Chemical Engineering Transactions Vol. 48, AIDIC, Italy]
- [6] Schubert, W., Engisch, L., v. Pidoll, U., (2022) *Electrostatic charging phenomenon material web, electro field meter measurements in a production machine and their interpretation* (DOI: 10.1016/j.elstat.2022.103681)
- [7] Gabel, M., Schön, G., (1970) *Elektrostatische Aufladung von Papier beim Rotationsdruck*, Advances in Static Electricity, Vol. 1, Proceedings of the 1st Internat. Conference on Static Electricity, Österreichischer Verband für Elektrotechnik, Vienna, p. 82-95
- [8] IEC 60479-2:2019 *Effects of current on human beings and livestock - Part 2 ED 2* (CD 2020): Special aspects
- [9] Lüttgens, G., et al, (2020) *Statische Elektrizität*, WILEY VCH
- [10] Schubert, W., Lüttgens, G., (2022) *Praxislexikon Statische Elektrizität*, expert Verlag, (DOI: 10.24053/9783816985068)
- [11] Lüttgens, G., Lüttgens, S., Schubert, W., (2017) *Static Electricity*, WILEY VCH
- [12] Ohsawa, A., (2013) *Computer simulations of insulator charge neutralisations with a corona ioniser – Influence of initial surface charge distribution*, J. Electrostat. 71287-293
- [13] Götz, A., (2022) *Electrostatic charges on moving material webs in production machines, Master thesis*, Technical University of Applied Sciences, Amberg-Weiden, Germany
- [14] Eltex Elektrostatik GmbH, *Training and seminar material*, Weil am Rhein, Germany
- [15] Fraunhofer Institute for Process Engineering and Packaging IVV (2013), Dresden, Germany
- [16] DGUV Information 213-060, TRGS 727 *Vermeidung von Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladung* (TRBS 213-060 Prevention of ignition hazards due to electrostatic charges)
- [17] Seaver, A., (1995) *Analysis of electrostatic measurements on non-conducting webs*, Journal of Electrostatics, Volume 35, Issues 2–3, Pages 231-243,
[https://doi.org/10.1016/0304-3886\(95\)00040-H](https://doi.org/10.1016/0304-3886(95)00040-H).
- [18] Lowke, JJ and Morrow R, (1995) *Theoretical Analysis of Removal of Oxides of Sulphur and Nitrogen in Pulsed Operation of Electrostatic Precipitators*, IEEE Trans Plasma Sci 23, 4