



Abb. 1 – Großflächiges ESD-Ereignis, Palo Alto Observatorium

Geringe Luftfeuchte und hohe Oberflächenwiderstände sind die Hauptursachen für die Entstehung unerwünschter, elektrischer Oberflächen-Ladungen im Fertigungsumfeld einer Halbleiter-Fertigung. Dieser Aufsatz beschreibt in seinem ersten Teil die negativen Auswirkungen solcher Ladungen auf die erforderliche Prozess-Reinheit der Silizium-Scheiben (Wafern). Außerdem werden die exponierten Orte aufgezeigt, an welchen Stellen im Fertigungs-Ablauf elektrische Entladungsvorgänge (ESD electro-static-discharge) die Ursache von Beschädigungen der gefertigten Halbleiter-Produkte sein können.

Elektrische Oberflächen-Ladungen

im Fertigungs-Umfeld der Halbleiter-Industrie

*Lodevicus Hermans,
Win Labuda*

Inhalt

I	Oberflächenladungen in der Wafer-FAB	1 - 16
II	Triboelektrische Ladungen des Reinraum-Verbrauchs-Materials	17 - 28
III	Physikalische Grundlagen der Triboelektrizität	28 - 30

Gravierende Fertigungs-Probleme entstehen insbesondere dann, wenn infolge von ESD-Ereignissen die elektronischen Steuerungseinheiten der Fertigungsanlagen ausfallen oder schlimmer noch - Veränderungen der programmierten Prozess-Schritte auftreten. Die Auswirkungen korrekter Maßnahmen, wie beispielsweise der Einsatz von Luftionisatoren in unmittelbarer Anlagenähe werden erläutert.

Der zweite Teil des Aufsatzes ist solchen elektrischen Ladungs- und ESD-Erscheinungen gewidmet, die in Verbindung mit dem Einsatz von Reinraum-Verbrauchsmaterial auftreten können. Dabei werden insbesondere die Produktgruppen Reinigungstücher und Reinraum-Papier berücksichtigt. Im dritten Teil werden für interessierte Leser die physikalischen Grundlagen der Entstehung von elektrischen Flächenladungen und Entladungen beschrieben.

Teil I:

ESD-Ereignisse zeigen sich uns beispielsweise als Blitzentladungen während eines Gewitters. Bei solchen Makro-Entladungs-Vorgängen entstehen

Hauptursachen für die elektrostatische Aufladung:

→ Aufladung durch Reibung (Triboelektrische Aufladung)

Typische elektrostatische Aufladungen (Volt)	Relative Luftfeuchte
Ereignis / Tätigkeit	10% 40% 80%
Gehen über Teppichboden	35.000 15.000 1.500
Teflonhorde aus Reinstwasser herausnehmen (Bild A)	20.000
Trägerrahmen mit Folie bespannen (Bild B)	40.000

→ Aufladung durch Influenz (Kontaktlose Ladungstrennung)

Beispiele: Aufrichten von Haaren am Fernsehbildschirm
Anziehen von Partikeln durch aufgeladene Gegenstände

Abb. 2

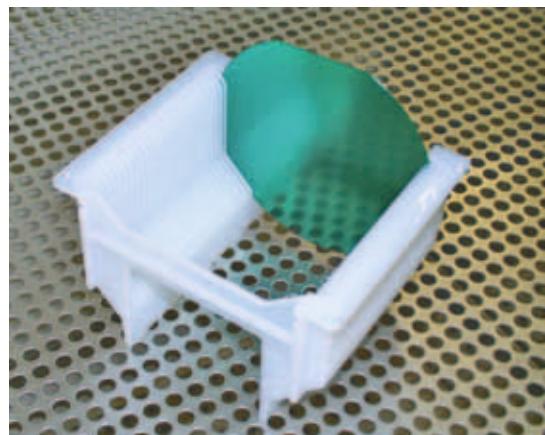


Abb. 2 A



Abb. 2 B

sogar Leistungen von einigen tausend Kilowatt. Auch die Zerstörung des deutschen Luftschiffs „Hindenburg“ ist auf ein ESD-Ereignis zurückzuführen. Dieser Zeppelin befand sich 1937 auf der Reise von Europa in die USA. Wetterbedingt hatte sich das Flugobjekt stark aufgeladen, obwohl die Außenhaut elektrisch leitend ausgeführt war. In dieser Außenhaut war jedoch ein Riss entstanden und beim Herannähern an den Landemast im amerikanischen Lakehurst kam es zu einer Funkenentladung. Dadurch verursacht explodierte der Wasserstoffinhalt des Luftschiffs, und es kam zu der bekannten Katastrophe.

Elektrische Ladungen entstehen hauptsächlich durch Reibung (triboelektrische Ladung). Einige Beispiele aus dem täglichen Leben:

- Das Gehen über einen Teppich kann die elektrische Ladung der Person bewirken, welche sich dann bei Berührung von Metallteilen (Türdrücker) „schlagartig“ entlädt.
- Auch das Aussteigen aus einem Auto kann solche Ladungs / Entladungsvorgänge bewirken.

Ab ca. 3.000 Volt Ladungspotential ist die Entladung für einen Menschen spürbar. Die Höhe einer elektrischen Flächenladung korreliert jedoch deutlich mit der Umgebungs-Luftfeuch-

Partikelkontamination von Si-Wafern durch elektrostatische Aufladung

Auslegezeit: 2,5 Std. im Wafertest, Reinraumklasse 1000

Deutlich erhöhte Partikelkontamination der Si-Wafer bei vorhandenem Oberflächenpotential

Influenzwirkung von Wafer 2 auf Wafer 1 bewirkt eine inhomogene Partikelverteilung auf Wafer 1

Verstärkte Partikelablagerung auf Oberflächen im Nahbereich von aufgeladenen Gegenständen

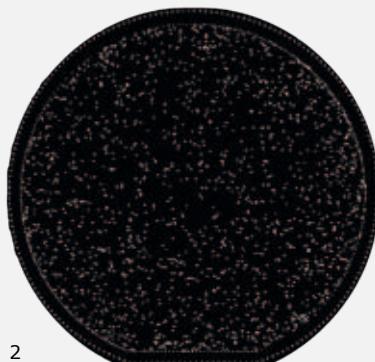
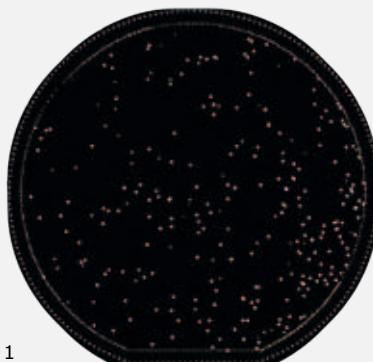


Abb. 3



Abb. 3 A < 0,1 kV Aufladung 1,5 kV

te. In einer trockenen Umgebung können sich elektrostatische Felder hoher Potentiale bilden. Das Fertigungs-Umfeld einer Halbleiterproduktion, ist deshalb besonders gefährdet, weil die Luftfeuchte dort in der Regel unter 50% liegt. Eine andere Ursache für die Entstehung elektrischer Oberflächenladungen ist die Influenz. Im Gegensatz zur reibungsverursachten tribo-

elektrischen Ladung ist Influenz eine kontaktlose Ladungsübertragung.

Wir kennen alle das Phänomen der aufgerichteten Haare, wenn wir mit dem unbekleideten Arm in die Nähe eines Fernsehbildschirmes geraten. (Vgl. auch Von der Waals-Generator). Aufgeladene Gegenstände haben in der Halbleiterfertigung oftmals unerwünschte Auswirkungen:

1. Sie ziehen Partikel an, welche die erforderliche Oberflächenreinheit beeinträchtigen.
2. Sie sind die Ursache von Funkenentladungen welche die gefertigten Produkte beschädigen.

Physikalische Grundlagen

Experimente

In der Abb. 2 sind die Ladungsphänomene nochmals zusammengefasst. Die Partikelkontamination der SiliziumScheiben führt beim

Partikelkontamination von Si-Wafern durch elektrostatische Aufladung

Typische Handbewegung während der Halbleiter-Produktion (200 x)



Potential < 0,1 kV



Potential 1,5 kV

Reinraumklasse 10, Lam. Flow 0.35 m/s

Im Normalfall werden im Reinraum Schutzhandschuhe getragen. In diesem Versuch wurde darauf verzichtet, um Partikel zu generieren.

Deutlich erhöhte Partikelkontamination der Si-Wafer bei vorhandenem Oberflächenpotential.



Ionisationssysteme im Waferhandling-Bereich mit Aufladung erforderlich.

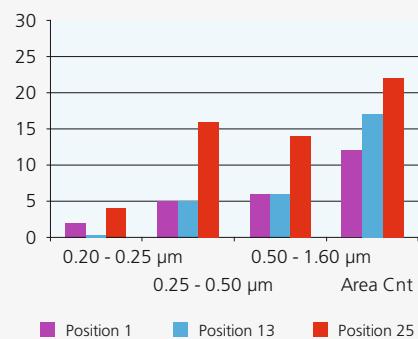
Abb. 4

Partikelkontamination von Si-Wafern durch elektrostatische Aufladung

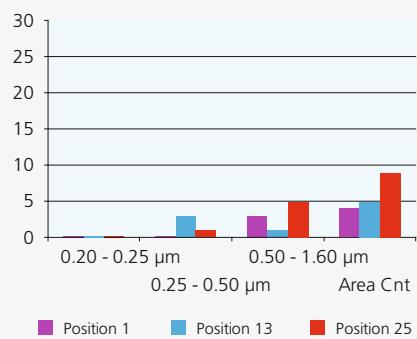


Partikelzunahme auf Wafer im Lager-Regal für PFA-Horden. Auslegezeit in RRK 10:24 Std.

Ionisator ausgeschaltet. 3,5 kV



Ionisator eingeschaltet. 0,1 kV



→ sind Ionisationssysteme über den Hordenlagerplätze in der Nasschemie erforderlich.

Abb. 5

Der Einbau eines Ionisators führt zur Partikelreduzierung im Ofenbereich

Aufladung des Waferhandlers führt zu Defektdichte-Problemen im Bereich Ofentechnik.

Der Waferhandler ist nicht leitend: Reibung Handler / Wafer Aufladung

Abb. 6



Abb. 6 A Vertikal Diffusionsofen

fertigen Chip zum Ausfall, insbesondere dann, wenn die Kontamination große Partikel, so genannte „Killerpartikel“ enthält. Durch das nachfolgend beschriebene Experiment wird der Einfluss der Ladungen auf die Partikelkontamination deutlich gemacht:

Zwei Silizium-Prüfscheiben werden unter Umgebungsbedingungen der Reinraumklasse 1.000 auf unterschiedliche Wafer-Kassetten positioniert.

Eine Wafer-Kassette besteht aus leitendem Polycarbonat; die andere aus nicht leitendem Teflon (PTFE) und ist elektrisch geladen. Ein Teil der elektrischen Ladung der Kassette hat sich automatisch auf die Scheibe übertragen (Influenz). Beide Kassetten stehen nebeneinander auf einem elektrisch leitenden Tisch. Das Ergebnis der Partikelzählung nach 2,5

Aufladung des Quarzbootes beim Beladen der Testwafer, ohne Ionisation

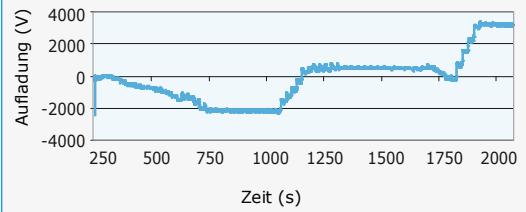


Abb. 6 B

Stunden Auslegezeit zeigt eine um den Faktor 10 höhere Partikelkontamination auf der geladenen Scheibe. PTFE-Kassetten sind für die Halbleiterfertigung, besonders bei den Nassätz- und nachfolgenden Reinigungsprozessen wegen ihrer Materialeigenschaften unentbehrlich. Nach Möglichkeit sollten jedoch entweder leitfähige Kassetten eingesetzt oder geeignete Ionisationssysteme installiert werden.

In der Abb. 4 wird ein zweites Experiment verdeutlicht. Diesmal werden unter Reinraumklasse 10-Bedingungen wiederum zwei Scheiben auf die beiden Wafer-Kassetten positioniert. Die Partikelquelle ist nun jedoch die typische Handbewegung einer Person im Reinraum. Durch die Handbewegung entsteht zwischen dem Bündchen des Reinraum-Overalls und dem Unterarm der Person eine gewisse Menge von Hautabrieb. Bei der nicht aufgeladenen Scheibe werden die Hautabrieb-Partikel durch die laminare Luftströmung vertikal, an der Scheibe vorbei, nach unten abgeführt. (Abstand Wafer – Hand ca. 10 cm). Die aufgeladene Scheibe auf der PTFE-Kassette hingegen zieht die Partikel an, und es zeigt sich auf der Scheibe eine deutlich erhöhte Partikelkontamination.

Elektrische Ladungen im Fertigungs-Prozess

Beispiel 1: Wie bereits erwähnt, sind besonders im Bereich der nasschemischen Reinigungsprozesse oftmals Teflon-Kassetten im Einsatz. Diese Kassetten werden in speziellen Hordenlagerplätzen in unmittelbarer Nähe der Reinigungsanlagen aufbewahrt. Durch die geringe Luftfeuchte und die laminare Luftströmung laden sich die Kassetten bis zu einem Potential von 20.000 Volt auf und ziehen somit Partikel an. Dabei ist der Mensch, der mit diesen Kassetten arbeitet die größte Partikelquelle. Von der Kassettenoberfläche werden die Partikel dann während des nachfolgenden Reinigungsprozesses in die Flüssigkeit abgegeben, wodurch es wiederum zur Kontamination der Wafer kommt.

Zur Verhinderung solcher Aufladungen werden von mehreren Herstellern Luftionisatoren angeboten. Wie solche Systeme funktionieren, zeigt Abb. 5. Die Partikelkontamination der Kassetten wird indirekt mit Hilfe von drei Siliziumscheiben gemessen, welche in diesen Kassetten 24 Stunden lang gelagert werden. Der Einfluss von Luftionisatoren auf die Partikelkontamination ist durch diese Anordnung deutlich messbar. Insbesondere die Anzahl von Partikeln $> 2 \mu\text{m}$, also echter Killerpartikel, sind bei eingeschaltetem Ionisator deutlich reduziert. Als Ergebnis lässt sich feststellen: Ionisationssysteme welche über den Kassettenlagerplätzen der Reinigungsprozesse montiert sind, reduzieren die Partikelkontamination.

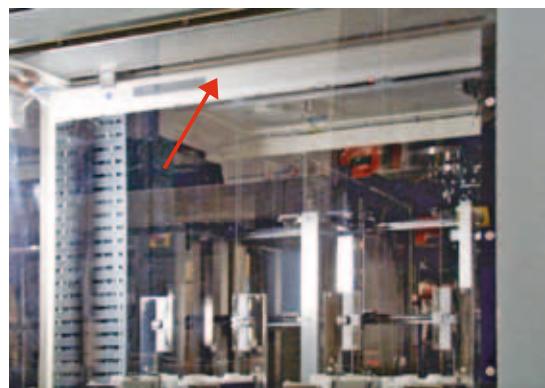


Abb. 7 Integrierter Ionisator über I/O Station eliminiert Aufladung des Waferhandlers

Beispiel 2: Eine weitere Partikelquelle, welche durch den Einbau eines Ionisators beseitigt wurde, zeigt Abb. 6.

Bei einem Vertikal-Diffusionsofen treten auf der Scheibenoberfläche immer wieder Domänen hoher Partikelkonzentration auf. Die Ursache hierfür wurde im Rahmen der Defekt-Analyse entdeckt: Elektrostatische Aufladung der Scheiben. Der Waferhandler, welcher die Scheiben aus der Kassette entnimmt und in das Quarzboot befördert war in diesem Falle nicht leitend ausgeführt. Durch die Reibung zwischen Waferhandler und Scheibenrückseite entsteht eine Ladung, welche beim Abgeben des Wafers an das Quarzboot weitergegeben wird.

Bei einer Prüfsequenz mit 100 Scheiben konnten in Abhängigkeit von der Waferbeschaffenheit der Rückseiten (Poly – Silizium, Nitrid, ...) sowohl positive als auch negative Ladungen dieses Boots festgestellt werden. Nach der Installation eines Ionisators über der I/O-Station des Diffusionsofens wurde die Ladung des Waferhandlers und somit auch des Quarzboots eliminiert. Dies ergibt sich eindeutig aus den Defektdichte-Daten nach Einbau des Ionisators (Abb. 7).

Beispiel 3: Die Auswirkungen eines defekten Ionisationsgerätes werden in der Abb. 8 gezeigt. Aus der Abb. ist der Defektdichtetrend der Siliziumscheiben innerhalb eines bestimmten Zeitraums bei einem Nassätzmodul ersichtlich. Wegen der hohen Partikelkontami-

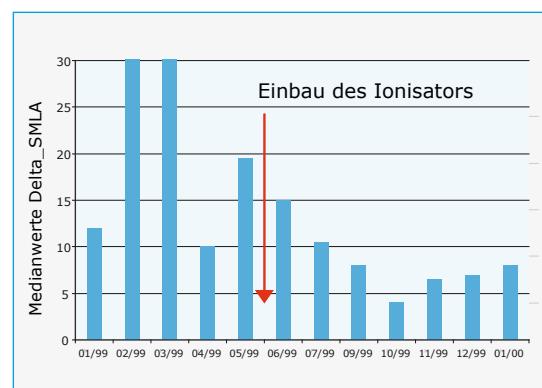


Abb. 7 A Defektdichtetrend nach Ionisatoreneinbau treten keine Partikelbursts mehr auf

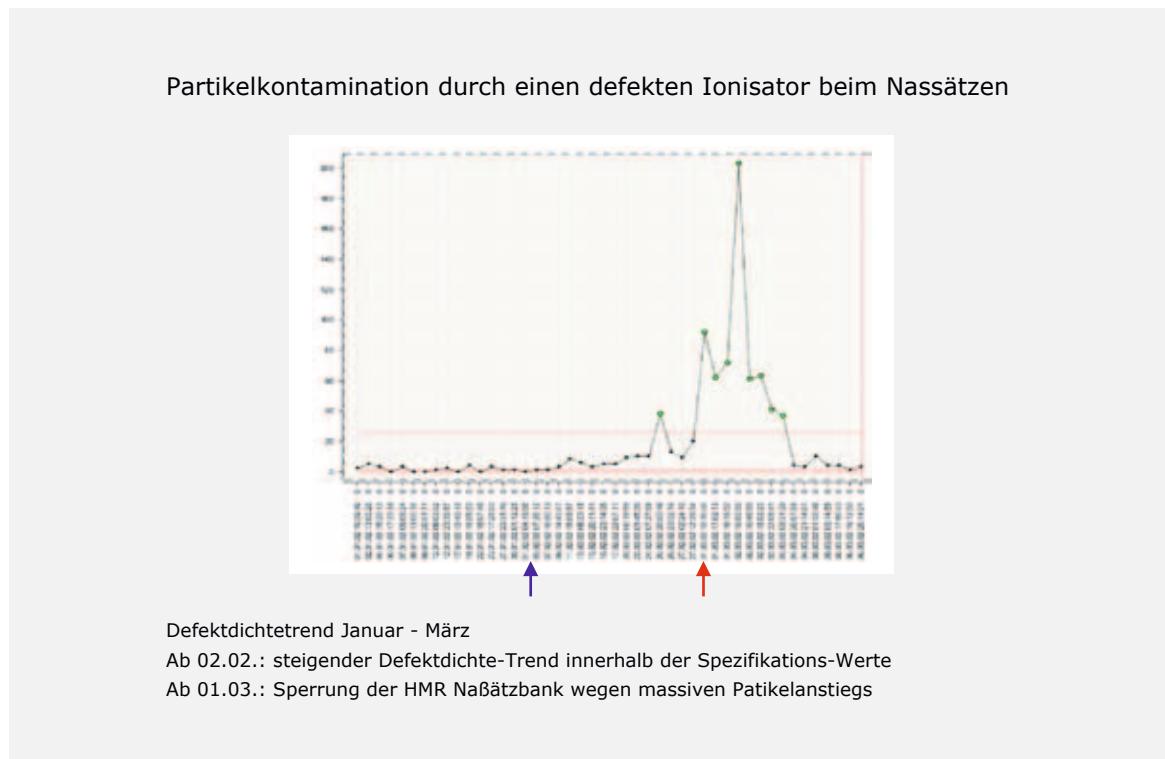


Abb. 8



Abb. 8 A HMR Nassätzbank

nation musste dieses Modul aus der Fertigung genommen werden. Durch Prüfen der einzelnen Ätz- bzw. Reinigungsmodule wurde der darin befindliche Trockner als Partikelquelle lokalisiert. Die Identifizierung dieses Ionisators als Partikelquelle gelang durch Partikelmes- sungen vor und nach dem Ionisator. Auch die durchgeführten EDX-Analysen der Partikel deuteten eindeutig in Richtung Ioni-

sator. Bei genauer Betrachtung wurden kaum sichtbare Funkenüberschläge zwischen den Ionisatornadeln sichtbar. Nach Austausch des defekten Ionisators erreichte der Defektdichte- wert wieder den vorgeschriebenen Wert (s.o.).

Es sind verschiedene Typen von Ionisatoren erhältlich. In einer Halbleiterfabrik müssen solche Ionisatoren nicht flächendeckend montiert sein, sondern lediglich dort, wo unerwünschte Ladungen festgestellt werden. Diese Systeme können sowohl unter der Filterdecke, innerhalb von Minienvironments oder direkt im Halbleiter-Equipment installiert werden (Abb. 10).

Sonderfälle gibt es in Stickstoffleitungen, bei Trocknungsanlagen oder mit Ventilatorausführung, wo keine Luftströmung zum Ionentransport zur Verfügung steht.

Beispiel 4: Eine weitere Auswirkung elektro- statischer Ladungen auf die Halbleiter-Produk- tion ist eine direkte Schädigung von Mikro- strukturen durch Entladungsscheinungen (ESD-Ereignisse), (Abb. 11).



Abb. 9

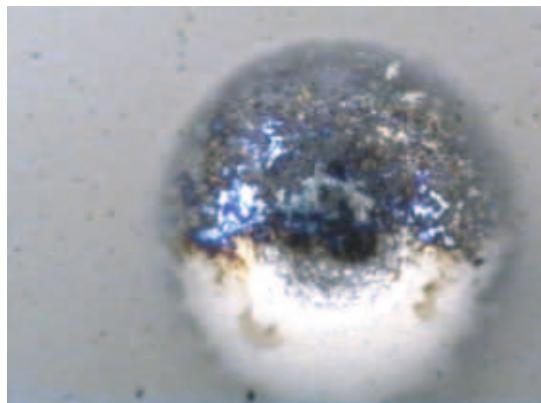


Abb. 9 A Defekte Ionisationsspitze

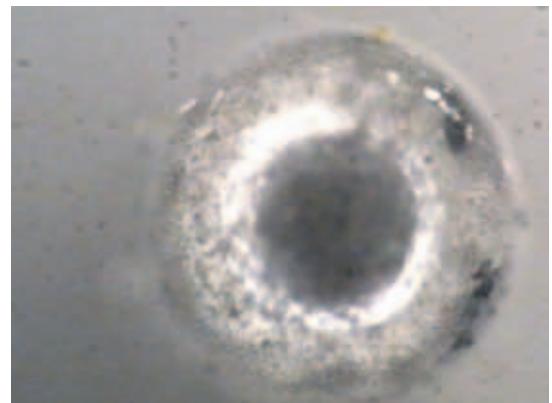


Abb. 8 B Funktionierende Spitze

Bei bestimmten Technologien mit einer Floating-Aluminium-Strukturierung auf Gate-Oxyd, zeigte jeweils ein Wafer von 25 Stück Ausfälle bei der Waferprüfung. Das Problem war eine Gate-Oxyd-Schädigung in der Mitte des Wafers. Die Ursachenforschung im Prozessablauf führte zu einer bestimmten Anlage, wo Wafer mit Reinstwasser gespült und anschließend mit

Stickstoff getrocknet wurden; einem sogenannten Rinserdryer.

Aus Abb. 12 ist der Prozessablauf ersichtlich. Die Wafer wurden in einer PTFE-Kassette bei 500 Umdrehungen/ min. mit Reinstwasser gespült und anschließend bei 1.400 Upm mit ionisiertem Stickstoff getrocknet. Die PTFE-

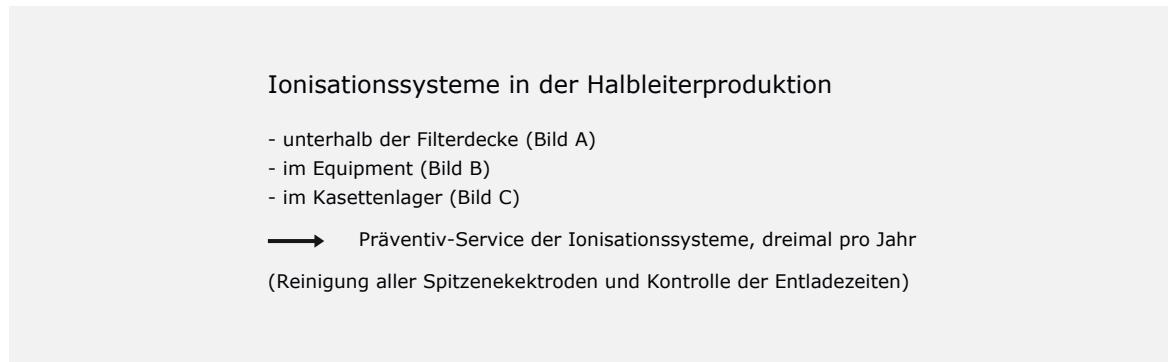


Abb. 10



Abb. 10 A



Abb. 10 B



Abb. 10 C

Kassetten wurden unterhalb eines Luftionisators gelagert und waren somit aufladungsfrei. Aufladungsmessungen am Anfang bzw. am Ende des Rinserdryer-Prozesses zeigten keinerlei Aufladung sowohl der Scheiben als auch der PTFE-Kassette. Erst bei einer Prozess-Pause während des Wasserspülens konnte eine hohe Potentialdifferenz von ca. 10.000 Volt zwischen Wafer-Kassette und Scheibe gemessen werden. Die Kassette lud sich durch das Spülen mit Reinstwasser auf und dort lag die Ursache für die Gate-Oxide-Schädigung.

Abb. 13 zeigt den schematischen Ablauf dieses ESD-Ereignis: Eine Ladungstrennung durch Influenz (Antenneneffekt) schädigt das sehr dünne Gate-Oxyd. Jetzt war erklärlich, warum stets nur eine Scheibe und nur die Scheibe in Position 25 der Kassette dieses Problem aufwies. Diese Scheibe stand in unmittelbarer Nähe der großen Fläche der Teflonhorde. Hier war das höchste Aufladungspotential vorhanden.



Abb. 11

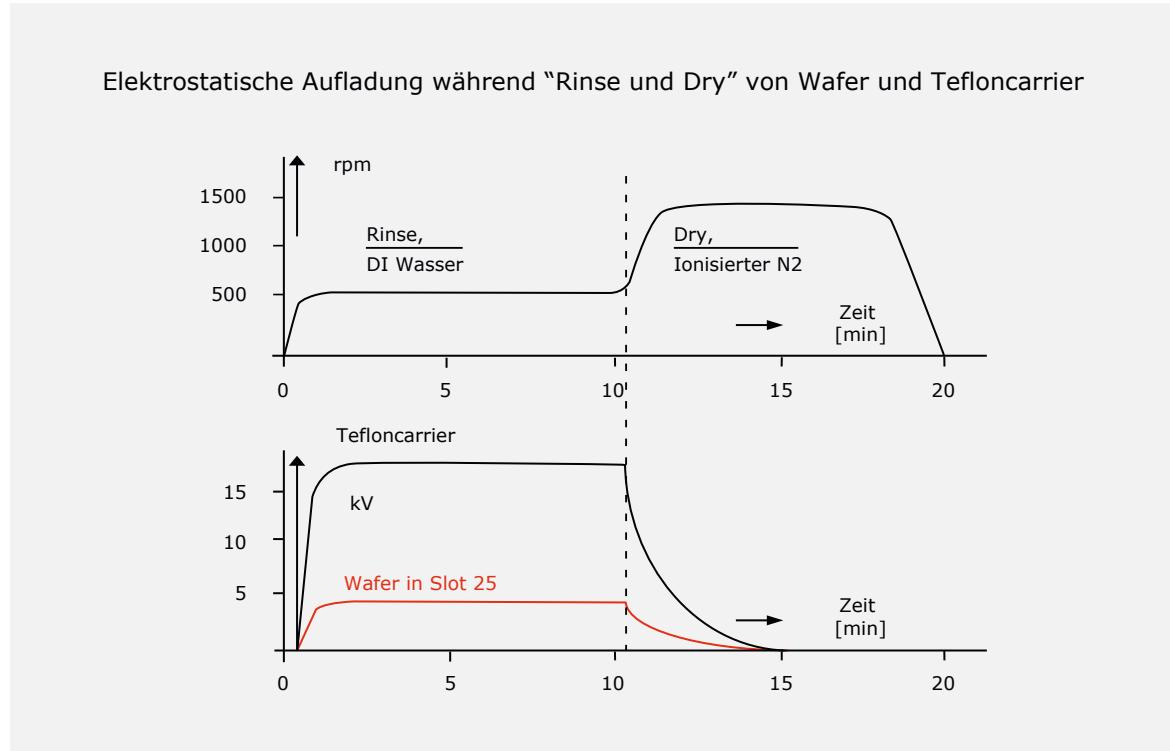


Abb. 12

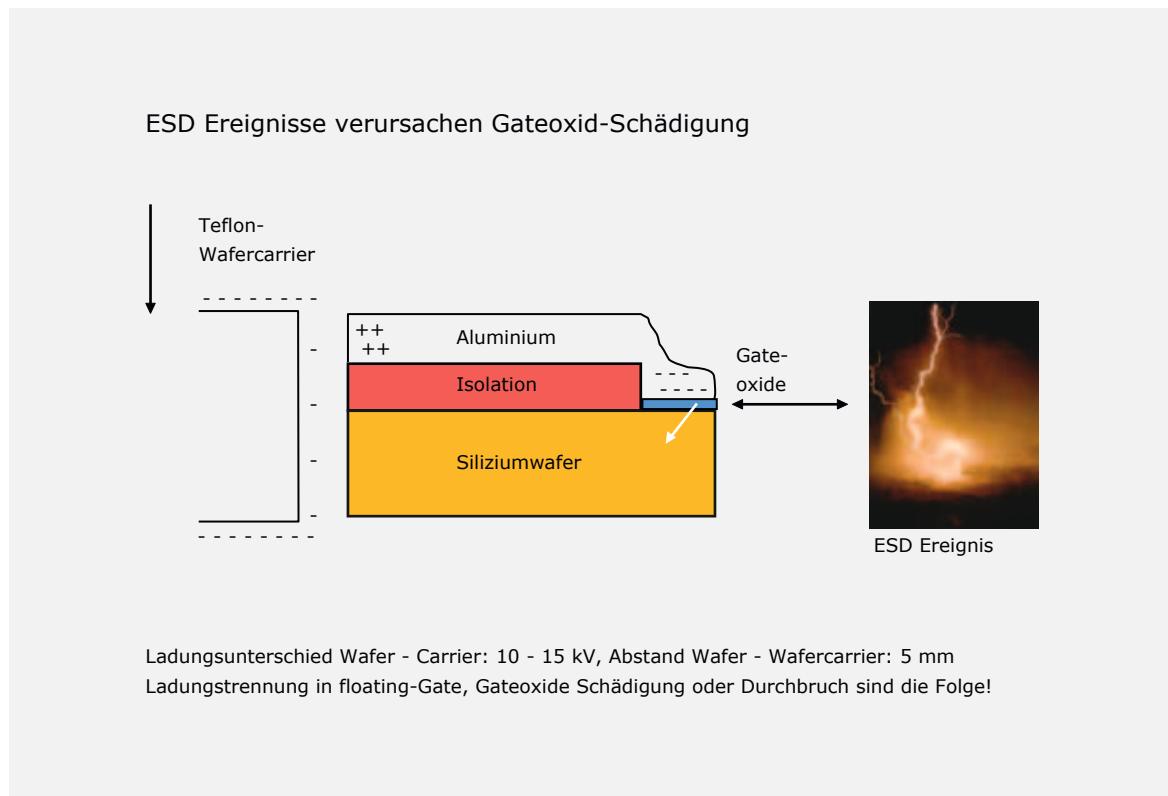


Abb. 13

Die Abb. 14 zeigt einige korrektive Maßnahmen zur Vermeidung dieses Gate-Oxide-Problems. Maßnahme drei ist vielleicht die Eleganteste. Eine Waferkassette mit 26 Slots war standardgemäß am Markt erhältlich. In Slot 26 wurde dabei ein fester Wafer installiert, der das elektrostatische Feld der Teflonhorde abschirmte.

Gravierende Probleme entstehen dann, wenn die Fertigungsanlagen infolge von ESD-Ereignissen ausfallen oder Veränderungen der Programmabläufe auftreten. Und hier zeigt sich die dritte Auswirkung elektrischer Ladungen: EMI. Die Abkürzung EMI steht für elektromagnetischer Impuls und entsteht durch schnelle Entladungen oder Ladungsänderungen. Solche

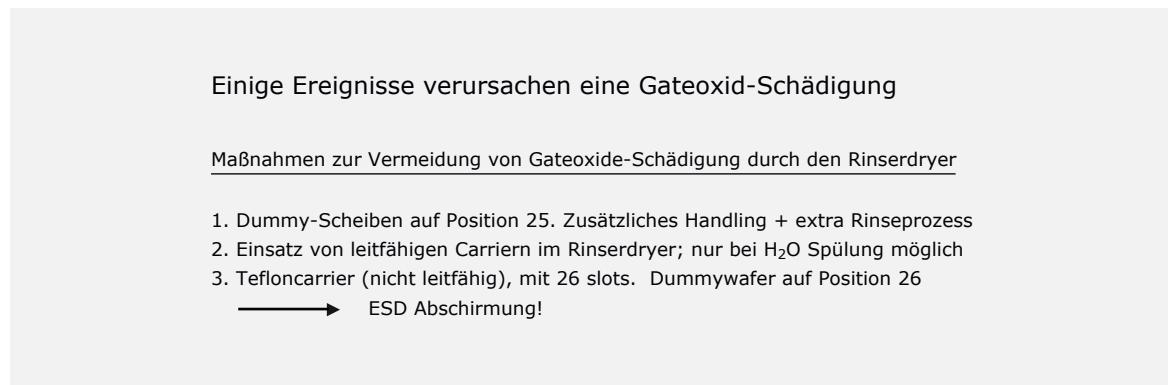


Abb. 14

Impulse können die Funktion von Mikroprozessoren beeinträchtigen und Computer zum Absturz bringen. Dieses Phänomen erklärt z. B. das Handyverbot in Flugzeugen und auch in einigen Halbleiterfabriken.

Beispiel 5: Abb. 15 zeigt ein Beispiel aus der Halbleiterproduktion, wo eine Entladung (ESD) zu einer Anlagen-Störung geführt hat. Durch eine gute Erdung des Kassetten-Indexers wurde dieses Problem beseitigt.

Fazit: Die Überwachung und Entladung aller Indexer ist in einer Wafer-Fab eine absolut notwendige Maßnahme. Elektrische Ladungen durch Erdung zu vermeiden ist natürlich einfacher und kostengünstiger als durch die Installation von Ionisatoren. Erdungsmaßnahmen sind jedoch nur bei leitenden Materialien sinnvoll. Alle Nichtleiter wie Teflon, PVC, PFA, PC, usw. ... lassen sich nur durch Ionisatoren entladen.

Ionisatoren-Wartung

Die Möglichkeit der Reduzierung der Defekt-dichte durch den Einsatz von Luftionisatoren ist umstritten. Sehr wichtig ist es jedoch darauf zu achten, dass die Funktion der Ionisatoren auch dauerhaft gewährleistet ist. Dies bedeutet die Sicherstellung einer turnusmäßigen, vorbeugenden Wartung und eine eventuelle Funktionskontrolle über das Fertigungs-Überwachungs-Zentrum. Bei der vorbeugenden Wartung werden die Entladezeiten gemessen und eventuell neu eingestellt. Auch die Reinigung der Ionisatornadeln wird hier durchgeführt.

Abb. 16 zeigt das Ionisator-Überwachungs-System. Der Ionisator + Controller ist mittels eines FMS-Interface an Fertigungs-Leitsystemen angeschlossen.

Abb. 17 zeigt eine Produktionshalle mit installierten Ionisatoren und deren Status:
Rot: Ionisator aus
Grün: Ionisator ein

Nur die turnusgemäße, vorbeugende Wartung im Zusammenhang mit einer Online-Überwachung garantieren eine optimale Funktionalität der Ionisationsgeräte.



Abb. 14 A



Abb. 14 B

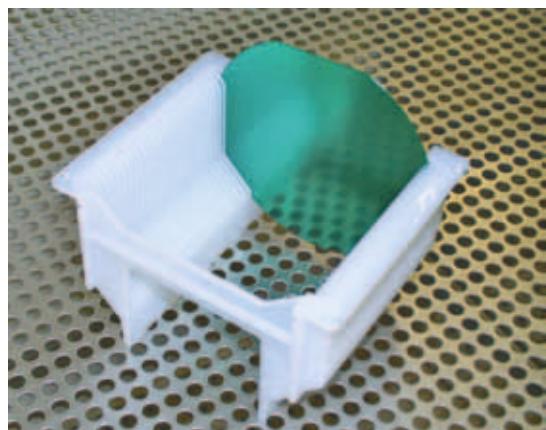


Abb. 14 C

ESD Ereignisse verursachen Equipmentausfall / Equipmentstörung

Der Wafercarrier-Indexer (Bild A) eines Partikelmessgerätes (Bild B) war nicht geerdet. Die Wafer und Carrier wurden bis zu 2kV aufgeladen beim Aufsetzen auf dem Indexer. Während dem Kontakt Wafer / Waferhandler wurde ein ESD Ereignis festgestellt (EMI). Pro Schicht war dann das Partikelmessgerät für einige Minuten down (reset). Beseitigung dieses Problems durch Erdung des Carrierindexers.

Ziel: Monitoring und Erdung aller Indexer in der Waferfab!!

Abb. 15



Abb. 15 A Wafercarrier-Indexer



Abb. 15 B Surfscan, Partikelmessgerät

Installation eines Ionisator-Fabmonitoring-Systems

Umhordeplatz in der Diffusion, Handling mit Quarzteilen (Bild A)
Reticle-Kontrolle in der Fotolithografie (Bild B)

Ionisator + Controller + FMS Interfache → Leitzentrale: Alarmmeldung

Abb. 16



Abb. 16 A Umhordeplatz in der Diffusion, Handling mit Quarzteilen



Abb. 16 B Reticle-Kontrolle in der Fotolithografie

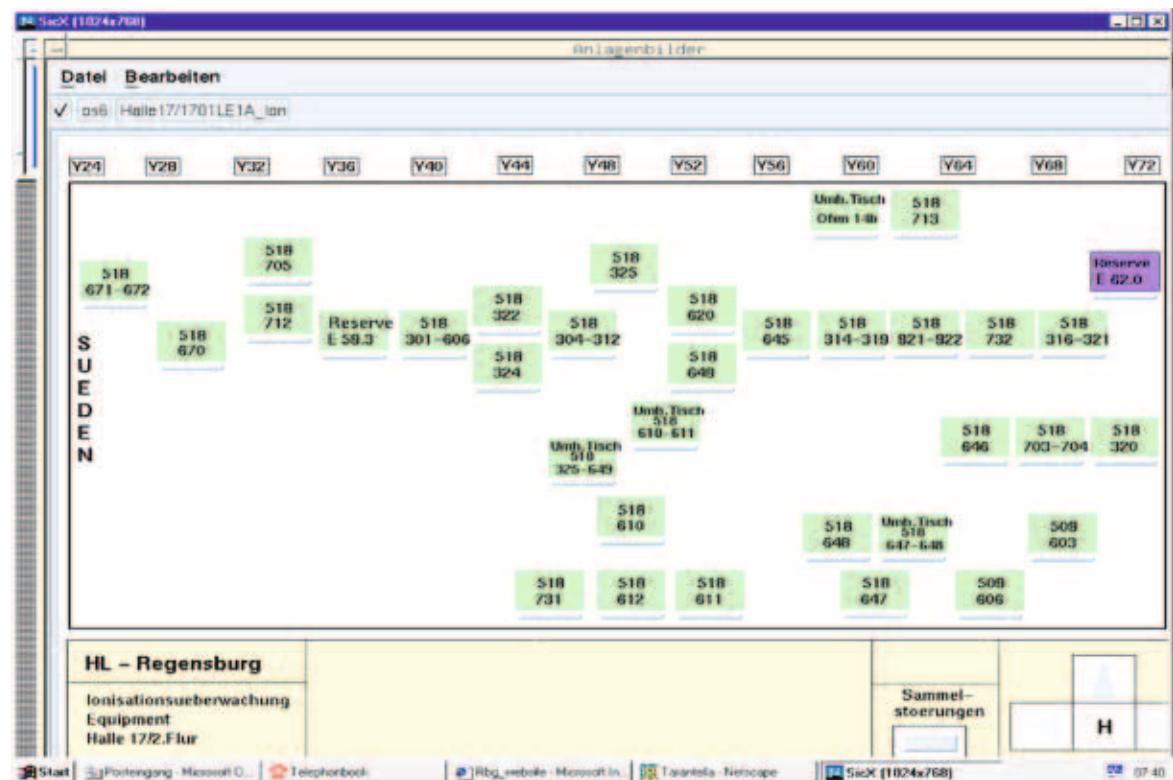


Abb. 17 Ionisator-Fabmonitoring-System

Korrektive Maßnahmen zur Verringerung elektrischer Ladungen in einer Halbleiterfertigung

Zusammenfassung

Elektrostatische Aufladungen und Entladungen während der Halbleiterfertigung führen zu:

- Partikelkontamination der Si-Scheiben und des Produktionsumfeldes
- Qualitätsverringerung von Halbleiterstrukturen
- Störung / Ausfall des Halbleiterequipments

Korrektive Maßnahmen zur Vermeidung elektrischer Ladungen sind:

- Einbau von Ionisatoren und deren Überwachung
- Erdung des Halbleiterequipments
- Einsatz von leitfähigen Materialien

Abb. 18

Zusammenfassung:

Elektrische Ladungs- und Entladungs-Phänomene während der Halbleiterfertigung führen:

- Zur Partikelkontamination der Siliziumscheiben und des Produktionsumfeldes
- Zu einem Verlust an Produktionsausbeute.
- Zu einer Qualitätsverringerung der Halbleiterstrukturen
- Zu Zuverlässigkeitsproblemen aller Art
- Zu Störungen und Ausfällen der Fertigungsanlagen

Korrektive Maßnahmen zur Vermeidung elektrischer Ladungen sind (siehe Abb. 18):

- Einbau von Ionisatoren und deren kontinuierliche oder diskontinuierliche Überwachung
- Erdung der Fertigungsanlagen
- Einsatz möglichst leitfähiger Materialien

ESD - Der unsichtbare Blitzschlag



Schäden durch elektrostatische Entladung und ihre Vermeidung

Abb. 18 A

Ladungs-parameter	Reibungsparameter für die aufgeführten Ladungsparameter triboelektrische Ladungen in Volt			
	Aluminium-Folie < 1 Ohm / Qadr.	Graphit-Handschuh < 10 ⁶ Ohm / Qadr.	Kunststoff-Film < 10 ⁹ Ohm / Qadr.	PE-Handschuh < 10 ¹¹ Ohm / Qadr.
Ouarz	1500	3000	290	3000
Glas	1100	3000	500	900
Wolle	200	3000	70	3000
Seide	400	300	70	3000
Aluminium	10	20	50	100
Stahl	10	15	20	200
Kupfer	10	15	35	150
Polyester	200	3000	70	750
Silizium	10	10	20	30
PTFE-Teflon	1700	3000	3000	3000
FPE-Teflon	3000	3000	3000	3000

Abb. 19 Ladungen durch Reibpartner mit verschiedenen Oberflächenwiderständen, (Lit. 7)

Teil II:**Triboelektrische Ladungen des Reinraum-Verbrauchs-Materials**

In einem Reinraum-Betrieb der Halbleiter-Produktion sind elektrische Oberflächen-Ladungen deswegen eine besondere Gefahr, weil die gefertigten Halbleiter-Produkte bereits bei relativ geringen Entladungs-Spannungen Schaden nehmen können. Aber auch viele Fertigungs-Vorgänge, die nicht in unmittelbarer Produktnähe ablaufen, werden durch Oberflächenladungen beeinträchtigt. Es ist also sinnvoll, nach solchen Vorgängen zu suchen, bei denen es im Rahmen der Produktion zur Flächenreibung kommt, um hier die Entstehung von Ladungen zu verhindern oder dieselben abzuleiten. Triboelektrische Ladungen entstehen insbesondere beim Umgang mit dem Verbrauchsmaterial und der Reinraum-Bekleidung und folgen stets dem in Abb. 20 abgebildeten Impuls-Schema:

1. bei den Prozeduren des wischenden Reinigens (Reinigungstücher)

2. beim Drucken von Formularen, Betriebsanweisungen etc. mit Hilfe von Laserdruckern (Reinraum-Papier)
3. im Rahmen der Bewegungsreibung beim Tragen von Arbeitskleidung aus Kunststoffgarnen (Overalls, Kittel)
4. beim Gehen über Kunststoffböden (Arbeitsschuhe)

In diesem 2. Teil des Aufsatzes soll erstens auf die unerwünschten Effekte von triboelektrischen Ladungen im Rahmen des wischenden Reinigens und zweitens der Drucksachen-Herstellung mit Laserdruckern eingegangen werden. Maßnahmen zur Abhilfe werden erläutert. Außerdem werden zwei geeignete Methoden zur Messung elektrischer Ladungen beschrieben und gegenübergestellt. Diese Methoden erleichtern es sowohl Herstellern, als auch Anwendern von Reinraum-Verbrauchsmaterial eine optimierte Auswahl geeigneter Materialien zu treffen.

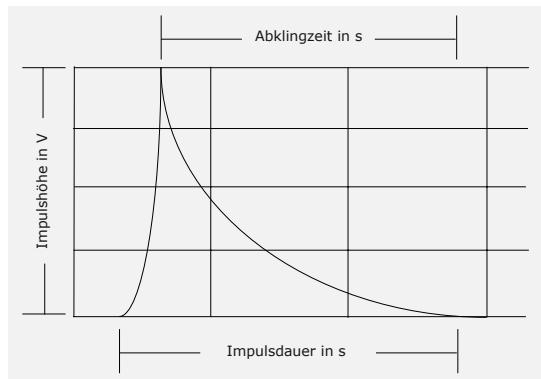


Abb. 20 Impulsschema für triboelektrische Ladungsvorgänge, Methode Fallschlitten nach Ehrler und Corona-Ladegerät nach Chubb.

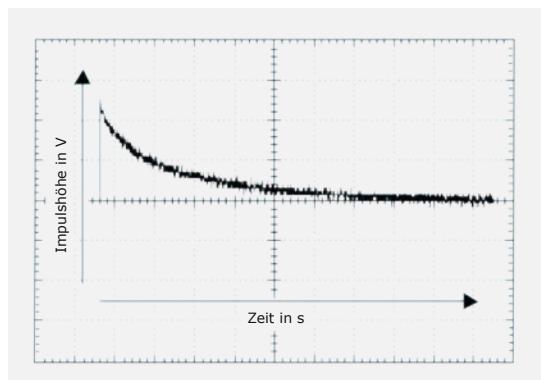


Abb. 21 Ladungsdiagramm eines Reinraum-Reinigungstuchs im Trocken-Zustand (Methode Fallschlitten nach Ehrler).

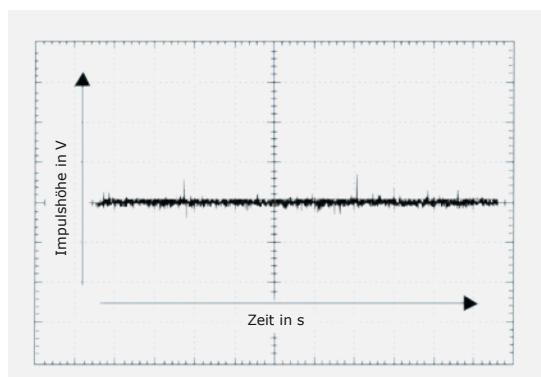


Abb. 22 Ladungsdiagramm des gleichen Reinraum-Reinigungstuchs wie bei Abb. 21 jedoch im Feucht-zustand (Methode Fallschlitten nach Ehrler).

1. Reinigungstücher

Triboelektrische Ladungen durch den Wischvorgang.

Wie wir der Abb. 19 entnehmen können, lässt sich die Höhe der zu erwartenden triboelektrischen Ladung zwischen zwei Reibepartnern nicht genau vorhersagen. Das gilt auch für wischende Reinigungsvorgänge mit einem trockenen Reinigungstuch auf trockenen Oberflächen. Man kann jedoch mit Sicherheit davon ausgehen, dass beim Wischvorgang mit einem durchgehend gefeuchteten Tuch keine Ladung auftreten wird (Abb. 21 und 22). Es lassen sich nicht alle Reinigungsvorgänge mit durchgehend feuchten Tüchern durchführen. Beim Einsatz trockener oder nur teilweise gefeuchter Tücher oder z.B. bei solchen mit einer Paraffin-Ausrüstung besteht jedoch die Gefahr der triboelektrischen Ladung. Die folgenden Beispiele zeigen Probleme auf, die immer wieder auftreten.

Beispiel 1: Wenn etwa die Aufgabe besteht, öl- und fetthaltige Verunreinigungen von Oberflächen zu entfernen, so wird in der Praxis als Reinigungshilfe zumeist ein brennbares Lösungsmittel wie Aceton, Benzin, Isopropylalkohol etc. Einsatz finden. Dieses Vorgehen ist z.B. typisch für die Reinigung von Drucksieben im Hybrid-Schaltungs-Siebdruck. Dabei besteht die folgende Gefahr: Die Benetzung eines Reinigungstuchs mit einem der o.a. brennbaren Lösungsmittel erfolgt oftmals mit Hilfe einer Spritzflasche in die Mitte des einfach oder doppelt gefalteten oder geknöllten Reinigungstuchs hinein, welches in der freien Hand gehalten wird. Zum Einsatzzeitpunkt des Reinigungstuchs ist dies also teilweise mit einem brennbaren Lösungsmittel getränkt und zum anderen Teil trocken. Wenn beim Reinigen trockene Teile des Reinigungstuchs über die zum Teil trockenen Flächen der Drucksiebe gerieben werden, so kommt es vor, dass die lösungsmittel-getränkten Flächenanteile durch elektrische Funkenentladung der trockenen Teile entzündet werden und auf diese Weise ein Brand entsteht. Für solche Einsatzfälle ist es also sinnvoll, Reinigungstücher im feuchten Anlieferungszustand oder solche mit reduzierter Aufladbarkeit (Baumwolle) oder nicht entflammbare Lösungsmittel einzusetzen.

Beispiel 2: Optische Gläser aber auch andere sehr glatte Oberflächen werden oftmals mit Reinigungstüchern gereinigt, welche aus extrem feinen Garnen bestehen (Mikrofilamentgarn). Die einzelnen Filamente haben dabei einen Durchmesser von < 2 µm. Mit solchen Tüchern lassen sich auch dünste Verunreinigungs-Schichten aus Öl und Fett bis hinunter zu einer Dicke von einigen Nanometern mühe-los und schnell entfernen. Je geringer jedoch die Oberflächenrauigkeit zweier Reibepartner ist, desto höher wird tendenziell die beim Wischvorgang entstehende triboelektrische Ladung sein. Derart geladene Oberflächen ziehen bis zu ihrer Entladung die Partikel der Umgebungsluft in besonderem Maße an und somit ist die durch den Wischvorgang erzielte Oberflächenreinheit oftmals von begrenzter Dauer. Dem kann entgegengewirkt werden, indem die Reinigungs-Tücher mit DI-Wasser angefeuchtet werden. Dabei darf das Tuch niemals nass sein. Es soll in einem Zustand sein, welcher sich als nebelfeucht bezeichnen lässt. Das ist weniger als feucht aber mehr als trocken. Dieser geringe Feuchtegrad ist in der Praxis nur durch eine Sprühbefeuhtung (nicht durch eine Spritzbefeuhtung) erreichbar.

Beispiel 3: Paraffinierte Reinigungstücher, welche oftmals auch in der Leiterplattenindustrie zur Beseitigung von Partikeln auf Oberflächen eingesetzt werden, können die Leiterplatten triboelektrisch sehr hoch aufladen - besonders, wenn die Tücher aus Polyestervliesen oder -Geweben bestehen. Es wurden an solchen Oberflächen beim Einsatz von Polyes-tertüchern Impulshöhen von knapp 900 V und Abklingzeiten bis zur Halbwertzeit von max. 200 s gemessen. Dabei besteht die Gefahr der Partikelanziehung aus der Umgebungsluft und einer nachfolgenden Kontamination. Hier ist es sinnvoll, grobmaschige, paraffinierte Baumwoll-Tücher einzusetzen.

Beispiel 4: „Antistatik-Tücher“ sind zumeist mit filmbildenden Polymerdispersionen getränkt. Beim Wischvorgang kommt es dann zu einer Übertragung der chemischen Substanz vom Tuch auf die Oberfläche. Hier schaffen die übertragenen Substanzen ein feuchtes Mikroklima, welches die Aufladbarkeit derart ausgerüsteter Oberflächen verringern soll. Leider kommt es beim Austrocknen der Substanz manchmal zur Kristallbildung und die Kristall-

partikel gehen in die Atmosphäre über. Solche Tücher sind auch wegen der mit ihnen verbundenen molekularen Kontamination (AMC) für den Reinraum-Einsatz bedenklich.

Um festzustellen ob die Bewegungs-Geschwindigkeit bei den Wischvorgängen oder die Geschwindigkeit des Papiervorschubs im Drucker einen Einfluss auf die Höhe der Oberflächenladung hat, wurde ein Reinigungstuch mit Hilfe eines pneumatisch angetriebenen Linearmotors über eine zuvor entladene Plexiglas-Fläche bewegt.

Die Ergebnisse waren wie folgt:

Geschwindigkeit (cm / s)	Oberflächenladung (V)
10	1830
25	751
50	335

Abb. 23 Oberflächenladung in Abhängigkeit von der Reibungsgeschwindigkeit

Daraus ergibt sich, dass langsames Reiben eine höhere Aufladung bewirkt als schnelles.

Zusammenfassung Reinigungstücher im trockenen Anlieferungs-Zustand

- Gestricke haben im Trockenzustand allgemein eine etwas geringere triboelektrische Ladungsneigung als Vliesstoffe (Abb. 36 - 39).

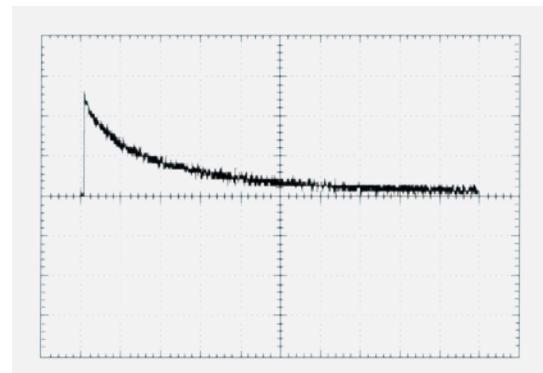


Abb. 24 PES-Gestricke ohne jede chemische Ausrüstung, (+8636V : 195s).

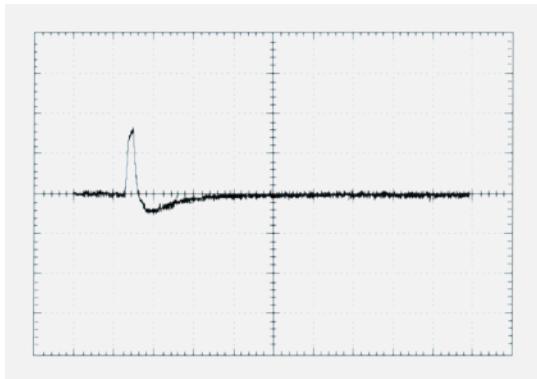


Abb. 25 PES-Gestricke, gewaschen und hydrophil ausgerüstet, (+530V : 0,19s).

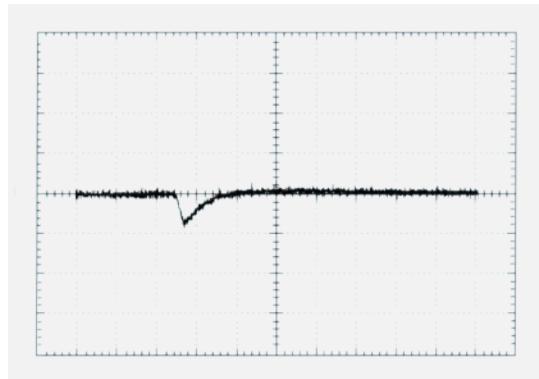


Abb. 26 PES-Gestricke, gewaschen und hydrophil ausgerüstet, anderes Tensid als Abb. 8 (-241V : 0,8s).

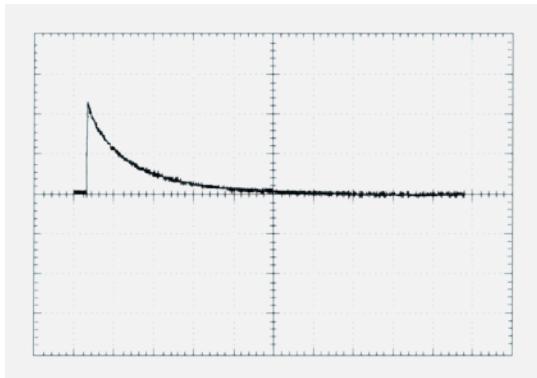


Abb. 27 Vliesstoff aus PES-Cellulose-Gemisch (+3876V : 62s).

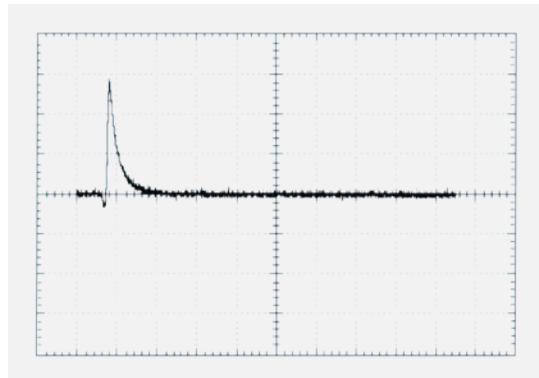


Abb. 28 Vliesstoff-Tuch wie Abb. 21 aber die Hälfte des Prüflings mit Lösungsmittel angefeuchtet (+938V : 0,75s).

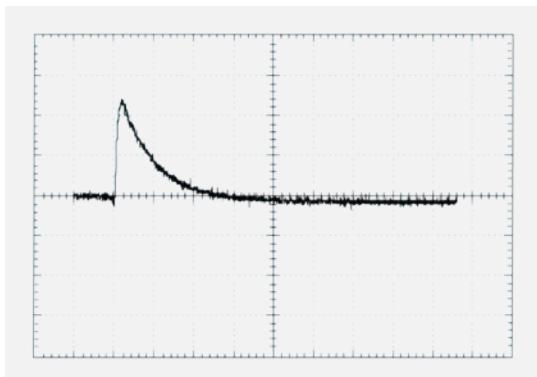


Abb. 29 Reinraum-Papier mit Polymer-Beschichtung (+796V : 1,4s)

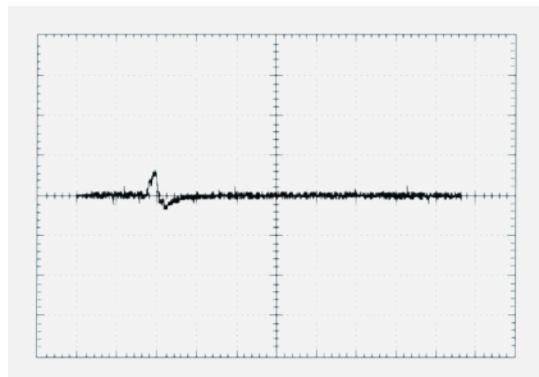


Abb. 30 Reinraum-Papier wie Abb. 29 aber nach Tauchen in 0,1% NaCl-Lösung und anschließender Trocknung.

- Die fertigungsgemäße Ausrüstung der Tücher mit einem Tensid kann deren Ladungseigenschaften stark beeinflussen. Sie kann sogar zur Umkehrung der Ladungs-Polarität führen (Abb. 26). Dabei muss stets beachtet werden, dass ein Überschuss an Tensid im Tuch auf den zu reinigenden Oberflächen unerwünschte Rückstände hinterlassen kann, welche die erwünschte Oberflächenreinheit beeinträchtigen.

- Die Ladungseigenschaften der weltweit am Markt angebotenen Reinigungstücher für Reinraum-Einsatz variieren untereinander erheblich (Abb. 36, 37, 38 und 39).

- Ein höherer Reinheitsgrad bzw. besserer Auswaschzustand führt manchmal bei Gestricken offenbar zu einer höheren Ladungsneigung des Reinigungstuchs. Dies ist jedoch abhängig vom eingesetzten Basis-Material (Polyester oder Polyamid).
- Reinigungstücher für Reinraum-Einsatz können im Trockenzustand bereits bei einer Wischweglänge von nur 100 mm Spitzenladungen von über 6000 Volt erreichen. Es ist daher sinnvoll, besonders geeignete Tücher auszuwählen, wenn ein gelegentlicher oder dauernder Einsatz derselben im trockenen Zustand vorgesehen ist oder aber durch Verdunstung während der Arbeitsphase ein Trockenzustand eintreten kann.
- Reinraum-Reinigungstücher, welche im Lösungsmittel-getränkten Zustand eingesetzt werden, sind oft nur teilweise getränkt. Die trockenen Flächenanteile der Tücher haben die Ladungseigenschaften trockener Tücher (Abb. 28). Diese Tatsache sollte in jedem Operator-Training vermittelt werden.
- So genannte Antistatik-Tücher, welche mit filmbildenden Polymerdispersionen ausgerüstet sind, sollen im Reinraumbetrieb nicht eingesetzt werden.
- Langsames Wischen ergibt höhere Ladungs-Spannungen als schnelles und nicht umgekehrt (Abb. 23).

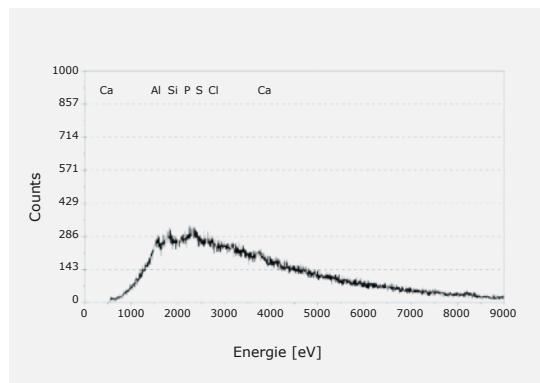


Abb. 31 ionenarmes Reinraum-Papier (EDX-Analyse)

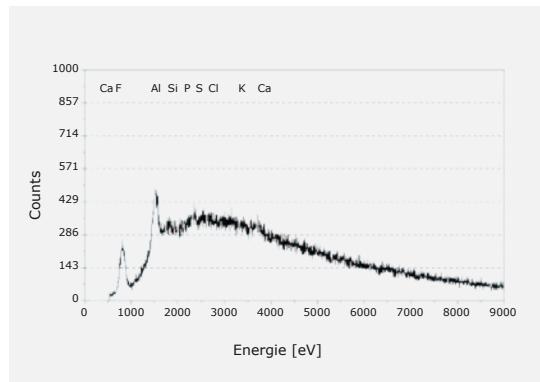


Abb. 32 Reinraum-Papier mit zwei deutlichen Peaks (Al und F) (EDX-Analyse)

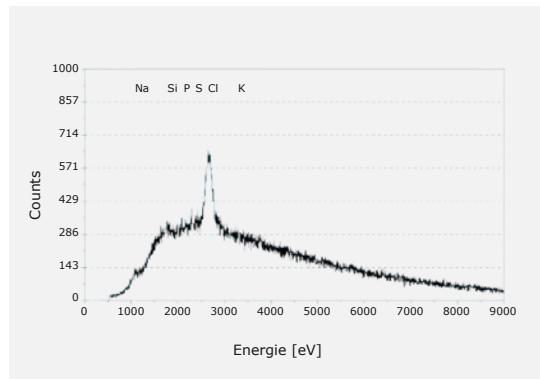


Abb. 33 Reinraum-Papier in 2%ige NaCl-Lösung getaucht und getrocknet (EDX-Analyse)

Abklingzeit-Meßplatz JCI - 155

Gerät zur Messung der elektrischen Ladungs-Kapazität nach Chubb

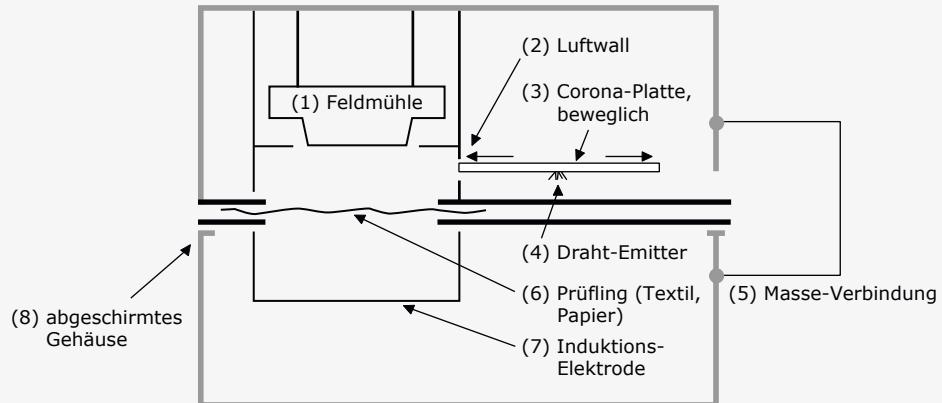


Abb. 34

Fallschlitten nach Ehrler

Gerät zur Messung der triboelektrischen Ladung von flexiblen Flächengebilden

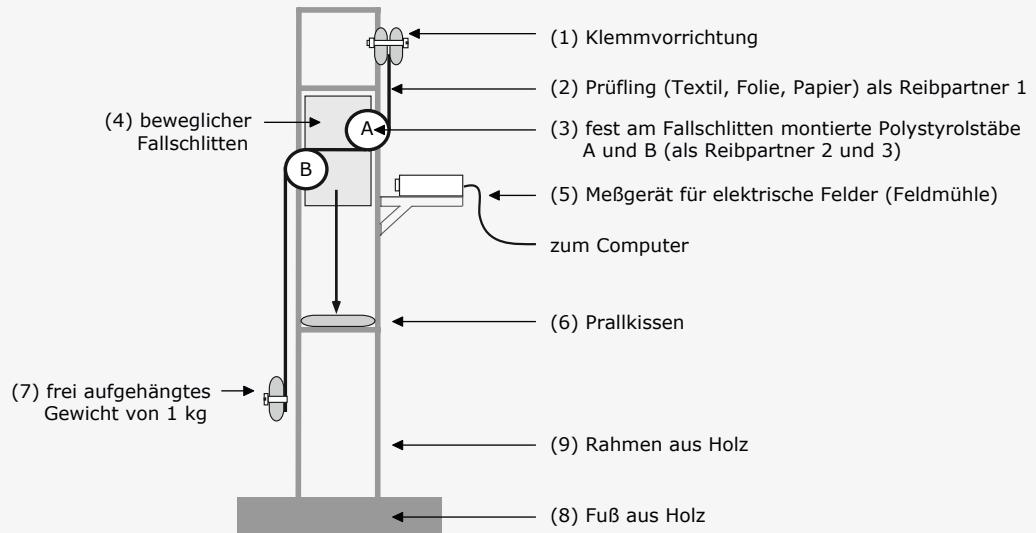


Abb. 35

- Triboelektrisch geladene Oberflächen lassen sich oftmals mit einem Isopropylalkohol-Di-Wasser-getränkten Tuch entladen.

2. Reinraum-Papier

Gelegentlich kommt es vor, dass die Betreiber von Kopiergeräten oder Druckern aufgrund elektrischer Ladungen des Papiers Probleme mit dem einwandfreien Papiertransport im Drucker haben. Das Phänomen zeigt sich insbesondere in den Wintermonaten, wenn die Räume beheizt werden und die Luftfeuchtigkeit gering ist. Doppel- oder Mehrfacheinzüge und Staus beim Druckvorgang sind die unangenehmen Folgen der Trockenheit. In reinraumgebundenen Fertigungsräumen werden die Kopierer oder Drucker auch manchmal im klimatisierten Umfeld bei nur etwa 38% rel. Feuchte eingesetzt. Dort wird in den Druckern ausschließlich Reinraum-Papier verarbeitet. Es gibt bedeutsame Unterschiede zwischen Standard-Kopierpapier und Reinraum-Papier. Diese machen Reinraum-Papiere prinzipiell anfälliger für Papierstaus in trockener Umgebung. Wenn man die technischen Zusammenhänge kennt, kann man jedoch sinnvolle Gegenmaßnahmen treffen.

Absoluten Vorrang im Anforderungsprofil von Reinraum-Papier haben für den Reinraum-Ingenieur einer Halbleiter-Fertigung die folgenden Parameter:

- geringe Partikelfreisetzung und damit automatisch
- geringe Ionenfreisetzung

Es muss in diesem Zusammenhang stets beachtet werden, dass für die Bestimmung der Gebrauchsgüte von Reinraum-Verbrauchs-material nicht dessen Inhaltsstoffe wesentlich sind, sondern das Maß seiner gebrauchsbedingten Freisetzung. [Lit 8]

Das bedeutet in der Praxis: Nicht der Ionengehalt eines Reinraum-Papiers ist kritisch für die Anwendungspraxis, sondern die Freisetzung von Ionen beim Einsatz desselben. Diese erfolgt jedoch fast ausschließlich im Rahmen der Partikelfreisetzung. Von größter Bedeutung ist es also bei Produktions-Prozessen, welche durch ionische Kontamination negativ beeinflusst werden können, schnittkanten-dekontaminiertes Reinraum-Papier einzusetzen.

Die nachstehenden Merkmale sind normalerweise untergeordnet aber nicht unwichtig:

- geringe Triboelektrizität
- hohes Maß an Tonerhaftung
- hohe Reißfestigkeit
- gute Laufeigenschaften in Druckern

Um die beiden erstgenannten Anforderungen zu erfüllen, wird die Oberfläche von Reinraum-Papieren bei einigen der Hersteller mit einem Polyelastomer beschichtet, welches die Partikel auf der Papier-Oberfläche bindet und so die Partikelfreisetzung stark reduziert. Unseres Wissens bietet lediglich ein Hersteller Papier an, dessen Schnittkanten zusätzlich dekontaminiert sind. Dort befinden sich normalerweise jedoch die größten Partikelmengen. Je mehr Polyelastomer auf die Oberfläche aufgetragen wird, desto geringer wird der Partikelabrieb durch die Flächenreibung im Einsatz sein und somit auch die Partikelfreisetzung bei der Handhabung. Andererseits kommt es durch das Polyelastomer stets zu einer gewissen Erhöhung der triboelektrischen Aufladbarkeit und dadurch auch zu elektrostatisch bedingter Gleithemmung beim Papiertransport.

Die Beschichtung von Reinraum-Papieren hat deutliche Auswirkungen auf die triboelektrische Oberflächenladung derselben beim Druckvorgang. Um den Nachweis dafür zu erbringen, wurde in einem Laser-Drucker oberhalb des Papierstapels ein Gerät zur Messung von Oberflächenladungen nach dem Prinzip der Feldmühle befestigt. Beim Druckerbetrieb ergaben sich die Diagramme der Abbildungen 43 und 44. Dabei zeigt sich, dass z.B. Reinraum-Papiere mit einer Latex-Beschichtung durch die Bewegung im Drucker erheblich höher aufgeladen werden, als solche mit einer PVA-Beschichtung.

Die Gleithemmung

Die Ursache für Probleme mit dem ungehinderten Papierlauf im Drucker oder Kopierer ist zumeist eine zu hohe Gleithemmung zwischen den im Papierstapel eng übereinander liegenden Blättern. Für eine zu hohe Gleithemmung gibt es generell mehrere mögliche Ursachen:

- zu hohe Oberflächenhaftung infolge triboelektrischer Flächenladung, insbesondere bei geringer relativer Feuchte der Umgebung.
- zu geringe Entladung der verfahrensbedingten Corona-Ladung des Papiers im Drucker während des Papiertransports.
- zu hoch eingestellter Anpressdruck des Papier-Vorschubs am Drucker oder Kopierer.
- zu hoher Reibungskoeffizient zwischen den einzelnen Blättern (Oberflächenrauigkeit).
- zu geringe Aushärtung der auf das Papier aufgebrachten Polyelastomerschicht (sehr selten).

Folgende Materialeigenschaften des Papiers als auch die Prozessparameter sind für einen einwandfreien Papierlauf im Drucker oder Kopierer bestimmend:

- Oberflächenrauigkeit
- Reibungsgeschwindigkeit
- Anpressdruck
- Adhäsion
- Materialfeuchte
- Dichte
- Temperatur
- triboelektrische Aufladbarkeit
- prozessbedingte Vorladung
- elektrische Entladung des Papiers beim Papiertransport.

Die triboelektrische Aufladbarkeit des Papiers ist also nur eine von vielen Einflussgrößen, welche den Parameter Gleithemmung bestimmen. Es reicht zur Analyse zu hoher Gleithemmungen nicht aus, das Problem z.B. durch Messung des Oberflächenwiderstands der Papiere erklären zu wollen. Viel öfter als die

triboelektrischen sind es nämlich erfahrungs-gemäß gerätespezifische Probleme, welche zu Störungen im Papierlauf führen.

Es ist jedoch wahrscheinlich, dass bei triboelektrisch geladenen Papiere zwischen Oberflächenwiderstand und Abklingzeit des Ladungsimpulses durchaus eine deutliche Beziehung besteht. Sowohl der Aufsatz von Malinvern [Lit. 7] als auch die Ergebnisse diverser Prüfungen im Clear & Clean - Forschungslabor, aber auch die Arbeit von Curt Raschke [Lit. 3], bestätigen dieses Phänomen. Dabei zeigt sich, dass z.B. die Aufladbarkeit von Papiere mit zunehmendem Bestand an Chloranteilen im Papier deutlich abnimmt (siehe Abb. 29 und 30).

Um Reinraum-Papiere auf ihre ionische Reinheit hin grob zu prüfen, eignet sich besonders die Energiedispersiv Röntgenanalyse (EDX) am Raster-Elektronen-Mikroskop. Dies wird deutlich durch die Abb. 31 bis 33. Während bei dem Papier der Abb. 31 keine Elementen-Peaks sichtbar werden, finden sich bei dem in der Abb. 32 gezeigten Papier aus einer außereuropäischen Fertigung ein deutlicher Aluminium und auch Fluor-Peak. Wird ein Papier der Qualität wie Abb. 31 einige Minuten lang in einer 1-prozentigen NaCl-Lösung gebadet, anschließend getrocknet und dann mittels EDX analysiert, so findet sich im Diagramm ein markanter Chlor-Peak (Abb. 33). Die Ladungshöhe und Abklingzeit fallen dann erheblich geringer aus als bei dem in Abb. 31 gezeigten Papier (siehe das Ladungsdiagramm der Abb. 30 relativ zum Diagramm Abb. 29.) Man muss bei Reinraumpapieren also möglicherweise die Alternative:

- höherer Ionengehalt oder
- höhere triboelektrische Ladbarkeit

akzeptieren.

In den offenen Reinräumen der Halbleiter-Produktion bevorzugen viele Reinraum-Ingenieure aus den o.g. Gründen eher solche Papiere, die weniger ionenarm, jedoch an den Schnittkanten dekontaminiert sind.

Prüfergebnisse für Reinraum-Reinigungstücher (Gestricke)

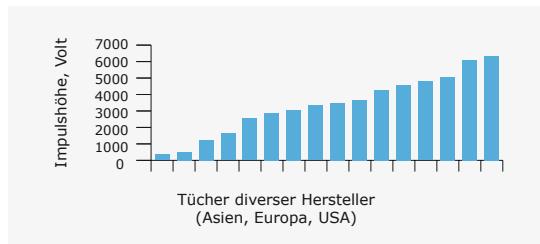


Abb. 36

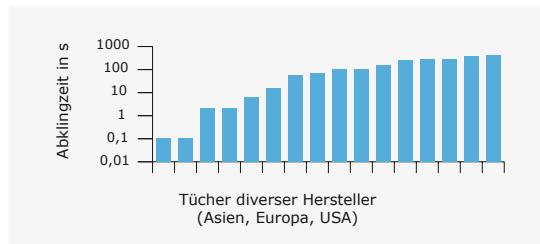


Abb. 37

Prüfergebnisse für Reinraum-Reinigungstücher (Vliesstoffe)

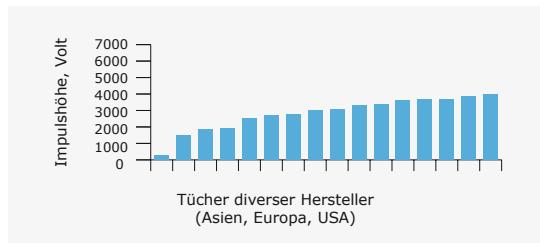


Abb. 38

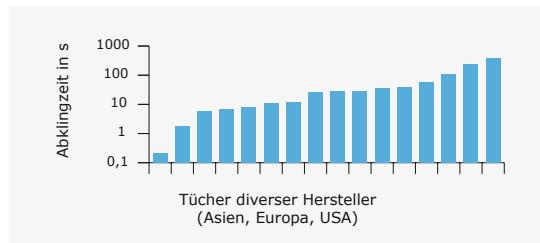


Abb. 39

Prüfergebnisse für Reinraum-Papiere

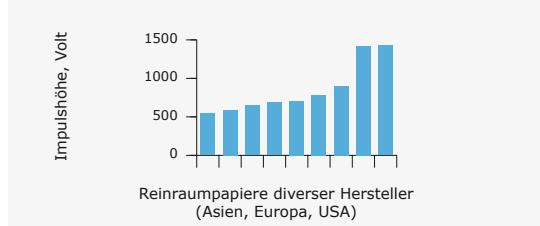


Abb. 40

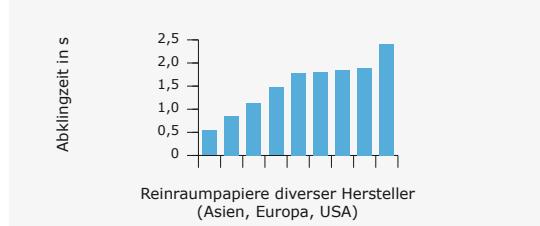


Abb. 41

Farbige Reinraum-Papiere

Reinraum-Papiere werden hauptsächlich als Laufprotokolle bei der Herstellung von Halbleitern oder Pharmazeutika eingesetzt. Eine weitere Anwendung ist die Anfertigung reinraumtauglicher Kopien von Betriebshandbüchern für im Reinraum aufgestellte Maschinen und Apparate. Manche Anwender bevorzugen die farbliche Markierung einzelner Seiten oder Kapitel innerhalb der Protokolle und setzen daher

verschiedenfarbige Papiere ein. Solche Papiere müssen bei der Papier-Herstellung in der Bütte angefärbt werden. Für das Anfärben gibt es Farben, welche Metallionen enthalten und relativ lichtecht sind und solche die weniger Ionen enthalten und weniger lichtecht sind.

Wie bereits aufgeführt, ist der Ionengehalt von Papieren für den Einsatz in der Halbleiterfertigung prinzipiell unkritisch, solange sich von dem Papier keine Partikel lösen, welche dann

die Metall-Ionen in die Fertigungs-Umgebung hinein transportieren. Allgemein betrachtet sollte der Einsatz verschiedenfarbiger Papiere jedoch schon deswegen vermieden werden, weil er zur Vermehrung von Lagerpositionen führt und eigentlich nicht nötig ist. Die Auf-findbarkeit bestimmter Seiten im Laufproto-koll funktioniert auch ohne farblich markierte Seiten.

Zusammenfassung Reinraum-Papier

- Bei gleichen klimatischen Bedingungen konnten innerhalb der verschiedenen Fabrikate erhebliche Unterschiede der Impuls-Abklingzeit festgestellt werden. Gründe dafür sind unterschiedliche Dichte, Oberflächen - Beschaffenheit, Polymerauftrag und ionische Papier-Be-standteile.
- Wird ein Standard-Reinraum-Papier kurz-zeitig in einer 0,1%-igen NaCl-Lösung gebadet und anschließend getrocknet, so sind Ladungshöhe und Abklingzeit erheb-lich geringer als bei dem ungebadeten Standard-Reinraum-Papier. (Abb. 29 und 30)
- Die Ladungseigenschaften der wich-tigsten, weltweit am Markt befindlichen Reinraum-Papiere variieren untereinander deutlich, aber in geringerem Maße als bei

Reinigungstüchern. Die Ladungshöhe, ge-messen mit Fallschlitten nach Ehrler, vari-iert zwischen dem Papier mit der größten im Verhältnis zu dem mit der geringsten Ladungsneigung im Verhältnis 1:3. Für die Impuls-Abklingzeit ist das Verhältnis etwa 1:5.

Vergleichende Prüfungen

Wir wollten die Aufladbarkeit von Reinraum-Reinigungstüchern und Papieren zunächst durch Flächenreibung einer praxisnahen Prüfung unterziehen. Der Versuch sollte in etwa die Ladungsverhältnisse beim reinigen den Wischvorgang oder beim Papiertransport simulieren. Daher war es nötig, ein Instru-mentarium zu schaffen, mit dem es möglich ist, unter stets gleichen physikalischen und Umgebungs-Bedingungen eine triboelektrische Ladung herbeizuführen und diese zu messen. In diesem Zusammenhang erschien uns der beim Institut für Textil- und Verfahrenstechnik in Denkendorf entwickelte Triboelektrik-Fallschlitten nach Ehrler (Abb. 35 und 45) das geeignete Instrument. Wir bauten das Gerät nach Angaben von Herrn Dr. Peter Ehrler und seinen Mitarbeitern, Frau Schmeer-Lioe und Herrn Mavely, denen wir wertvolle Hinwei-se verdanken. Außerdem schafften wir ein Gerät der englischen Firma JCI an (siehe Abb. 34 und 46) welches flexible Flächengebilde aufnehmen kann und diese mit einer Corona-

	System - Ehrler		System - Chubb			
	Impulshöhe in kV	Abklingzeit bis 0 kV in sec.	Impulshöhe in kV	Abklingzeit bis 0 kV in sec.	Quotient Impulshöhe Ehrler/ Chubb	Quotient Abklingzeit Ehrler/ Chubb
Mikofasergestricke	3,4	479	2,4	> 1000	1,41	0,47
Polyestergestricke	3,5	251	2,2	45	1,59	5,57
PES / Cellulose-Vliesstoff	3,7	78	1,8	3,5	2,05	22,30
Viskose Vliesstoff	3,7	1,2	1,1	0,9	3,36	1,33

Abb. 42 Impulshöhen und Abklingzeiten im Vergleich: Systeme Ehrler und Chubb

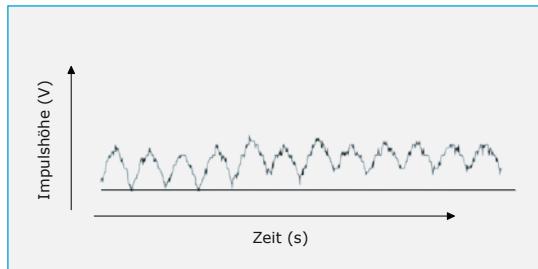


Abb. 43 Ladungs-Impulse beim Papier-Transport:
Reinraum-Papiere mit Polyvinylalkohol beschichtet

Ladung versieht. Das Abklingen dieser Ladung wird anschließend mit Hilfe einer Feldmühle gemessen und als Diagramm aufgezeichnet (Abb. 42). Dieses Gerät zeichnet sich durch seine einfache Handhabung und gute Wiederholgenauigkeit aus.

Beschreibung des Abklingzeit - Messplatz JCI-155

In einem Metallgehäuse, bestehend aus einem oberen und einem unteren Teil, befindet sich eine Ausnehmung der Abmessungen 55 x 65 mm. Der Prüfling (6) wird so zwischen den oberen und unteren Teil des Metallgehäuses eingeklemmt, dass er membranartig aber ungespannt befestigt ist. Nach Inbetriebsetzen der Anordnung bewegt sich eine horizontal gelagerte Corona-Platte, welche in der Mitte mit einem Emitter (Drahtbüschel) versehen ist, oberhalb des Prüflings und bewirkt dessen elektrische Ladung. Nach vollzogener Ladung des Prüflings schnellt die Corona-Platte inner-

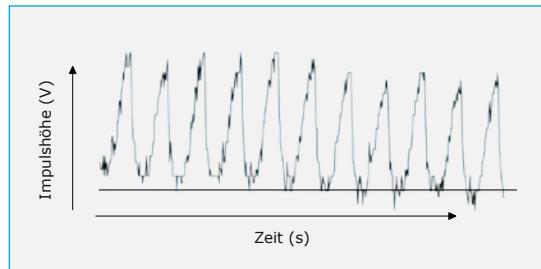


Abb. 44 Ladungs-Impulse beim Papier-Transport:
Reinraum-Papiere mit Latex beschichtet

halb von 0,02 sec in ihre Ausgangsposition zurück und die abklingende Flächenladung wird mit Hilfe der Feldmühle oberhalb des Prüflings gemessen und auf der Speicherplatte eines Computers gespeichert.

Beschreibung des Fallschlittens nach Ehrler

Der Fallschlitten nach Ehrler besteht wegen der geringen elektrischen Aufladbarkeit des Materials Holz aus einem vertikal aufgebauten Holzrahmen, in welchem sich - ebenfalls aus Holz - ein vertikal geführter Fallschlitten (4) befindet. Fest mit dem Fallschlitten verbunden sind zwei Polystyrolstäbe (3) A und B mit einem Durchmesser von 15 mm. Anstelle von Polystyrol könnte hier auch ein anderes Polymer Einsatz finden. Der Fallschlitten ist in seiner Ausgangsstellung im oberen Teil des Holzrahmens gesichert. Zum Betrieb desselben kann er elektrisch entsichert werden und fällt dann hinunter auf das Prallkissen (6).



Abb. 45 Triboelektrik-Fallschlitten nach Ehrler

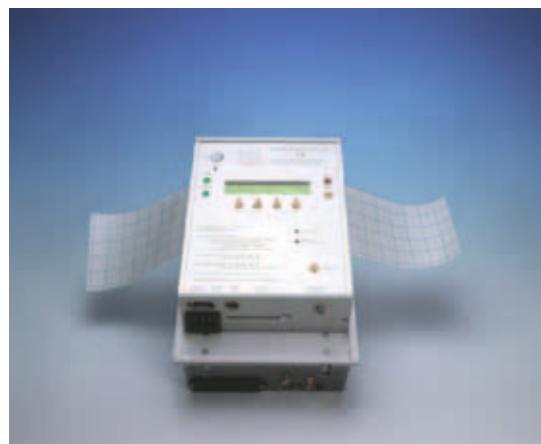


Abb. 46 Corona-Ladegerät nach Chubb

Das zu analysierende Reinigungstuch oder Papier (2) wird in einer Klemmvorrichtung (1) befestigt, welche sich am Kopfteil des Holzrahmens befindet. Anschließend wird das Papier vorsichtig um die Polystyrolstäbe gelegt, ohne dabei eine Reibung zu bewirken, welche unerwünschte elektrische Ladungen erzeugen könnte. An das freie Papierende wird ein Gewicht (7) geklemmt, welches allein mit Hilfe der Gravitationskräfte den innigen Kontakt zwischen Papier und den beiden Polystyrolstäben sicherstellt. Nachdem das Einlegen des Prüflings in den Fallschlitten abgeschlossen ist und die Feldmühle (5) sowie das nachgeschaltete Instrumentarium eingeschaltet wurden, beginnt die eigentliche Prüfung.

Durchführung der Prüfungen

Von jedem Reinigungstuch oder Papier wurden 5 Prüflinge geschnitten und für die Dauer von 12 Stunden bei einem Prüfklima von 40% relH bei + 22° C gelagert. Anschließend wurden die Prüflinge nacheinander in den Fallschlitten oder den JCI-Messplatz eingelegt, aufgelaufen und gemessen. Die Geräte befanden sich dabei in der Klimakammer. Die beim Betrieb der Geräte am Reinigungstuch oder Papier entstehenden Ladungen und nachfolgenden Abklingphasen wurden oszillographisch oder datentechnisch registriert (Abb. 36 bis 39). Die Daten wurden ausgewertet und tabellarisch erfasst. Auf diese Weise entstand eine Übersicht über die mögliche elektrostatische Aufladbarkeit sowohl der Reinraum-Reinigungstücher als auch der Reinraum-Papiere verschiedener Hersteller unter in Reinräumen üblichen Feuchtebedingungen.

Zwischen dem Fallschlitten nach Ehrler und dem Corona-Ladegerät nach Chubb bestehen einige grundsätzliche konstruktive Unterschiede, sodass sich bei den Messungen auch unterschiedliche Impulshöhen und Abklingzeiten ergeben (Abb. 42). Die Unterschiede erklären sich möglicherweise daraus, dass bei dem Fallschlitten nach Ehrler der Prüfling von beiden Seiten geladen wird und bei dem Corona-Ladegerät nach Chubb nur einseitig. Wohl unterscheiden sich die Prüfdaten für gleiche Materialien zwischen den beiden Systemen Ehrler und Chubb voneinander, aber wir müssen bei triboelektrischen Ladungs- und Entladungs-Phänomenen und Zeiten stets berücksichtigen,

dass wir niemals an physikalisch-chemisch reinen Oberflächen messen, sondern jedes Textil und Papier bereits im molekularen Sinne „vorbeschichtet“ ist. Der Vorteil des Corona-Ladegerätes nach Chubb sind seine leichte Bedienbarkeit und die unkomplizierte und schnelle elektronische Datenverarbeitung.

Anmerkungen zu den Ladungsdiagrammen

In den Abb. 36 bis 41 sind eine Reihe der interessantesten Ladungsdiagramme abgebildet, welche die in der Zusammenfassung gebrachten Schlussfolgerungen unterstützen. Das Diagramm Abb. 20 zeigt den prinzipiellen Ablauf aller folgenden Diagramme: (Abb. 24 bis 30).

Beim Hinabfallen des Fallschlittens kommt es zur spontanen Ladung des Prüflings mit nachfolgender Abklingphase. Die verschiedenen, am Markt befindlichen Reinigungstücher und Papiere für Reinraum-Einsatz unterscheiden sich voneinander durch erhebliche Unterschiede sowohl in der gemessenen Impulshöhe als auch in der Abklingzeit. Je höher diese beiden Werte sind, desto geringer ist die „triboelektrische Güte“ des betreffenden Produktes. In der Abb. 27 wird gewissermaßen ein „Standard“-Ladungsdiagramm von einem Polyester-Gestrüke abgebildet, aus dem alle Chemikalien entfernt wurden, welche normalerweise dort eingebracht sind, um das Reinigungstuch waseraufnahmefähig zu machen. Dabei zeigte sich im Fallschlittentest ein Ladungsimpuls von 8636 V bei einer Abklingzeit von 195 s.

Aus der Abb. 26 geht deutlich hervor, dass eine veränderte Ausrüstung des Reinigungstuchs der Abb. 25 mit einem anderen Tensid nicht nur eine Verringerung der Ladungs-Impulshöhe sondern sogar eine Umkehr der Ladungspolarität bewirken kann. Auf diese Weise ist es bei der Herstellung von Hightech-Tüchern möglich, die Tensid-Ausrüstung so zu wählen, dass die Höhe der Ladungsimpulse erheblich vermindert oder sogar auf null reduziert wird. Dabei gilt es zu beachten, dass Tensideinträge zumeist auch Ionen in das Reinigungstuch hineinragen, welche dort unerwünscht sind. Das gilt auch für sog. nichtionische Tenside. Der Auswahl geeigneter Tenside und Eintragsmengen kommt also eine große Bedeutung zu.

In Abb. 22 wurde bereits gezeigt, dass ein feuchtes Reinigungstuch beim Wischen keine Ladung erzeugt. Diese Tatsache führt jedoch gelegentlich zum lässigen Umgang mit solchen Reinigungstüchern, die zwar vor dem Reinigungsvorgang angefeuchtet werden, danach jedoch nicht über die ganze Fläche homogen getränkt sind. Die trocken gebliebenen Stellen haben eine verbleibende triboelektrische Wirkung. Diese Tatsache ergibt sich aus den Diagrammen der Abb. 27 und 28. Die Abb. 27 zeigt das Ladungsdiagramm eines trockenen Vliesstoff-Reinigungstuchs aus Polyester- und Zellstoff-fasern etwa zu gleichen Teilen. Bei Abb. 28 handelt es sich um das Ladungs-Diagramm des gleichen Reinigungstuchs, jedoch im teilgefeuchteten Zustand.

Teil III:

Physikalische Grundlagen der Triboelektrizität

Werden zwei elektrisch neutrale Flächen beliebiger Materialien bei normaler Umgebungstemperatur vollflächig aneinandergelegt, so erfolgt über deren Oberflächengrenzen hinweg ein Ladungsträger-Austausch bis zum Eintreten des Potentialgleichgewichts. Werden die beiden Oberflächen anschließend wieder getrennt, so verbleibt an jeder derselben ein Ladungsträger-Überschuss von gleicher Menge aber entgegengesetzter Polarität. Diese Veränderung wird gemeinhin als „elektrostatische Aufladung“ bezeichnet. Die Vorgänge betreffen prinzipiell sowohl elektrisch leitende Materialien als auch Isolatoren. Wie kommt es zu diesen Ladungs- und Entladungsvorgängen? Auf der Oberfläche eines Isolators (z.B. aus dem Material Polyester) finden sich elektrische Oberflächen-Zustände mit längeren Verweilzeiten von Elektronen. Solche Oberflächen-Zustände finden sich an Kunststoff-Oberflächen vornehmlich dort, wo Fehlstellen in der Kristallgitter-Struktur derselben existieren. Kunststoffe, die einem Prozess thermischer Verformung ausgesetzt waren, weisen sowohl kristalline als auch amorphe Zonen aus. An den Übergangsstellen vom Kristallinen zum Amorphen finden sich die Fehlstellen z.B. in Form von unvollendeten makromolekularen Ketten, welche die elektrische Oberflächen-Homogenität beeinträchtigen, also kristalline Fehlstellen bilden und daher eine erhöhte Bereitschaft zu einem Ladungstausch haben. Die Flächenladungsdichte ist dabei in 1. Näherung

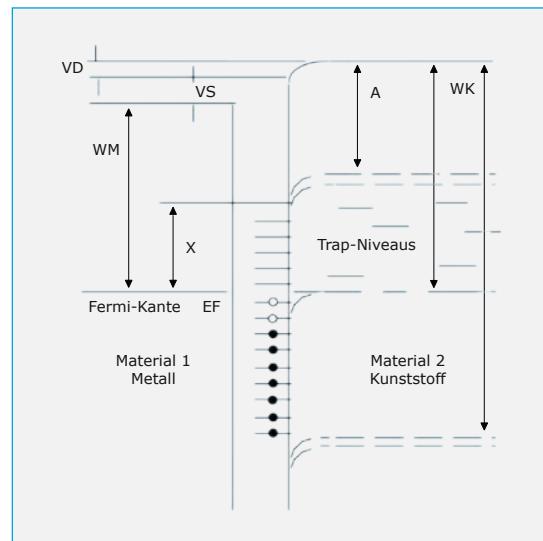


Abb. 47 Energieschema des Ladungsträger-Übergangs nach Bauser. Bedeutung der Indices: W1, W2 - Elektronenaustrittsarbeit der beiden Materialien 1 und 2, I - Ionisationsenergie, A - Elektronenaffinität von Material 2, EF - Fermi-Niveau.

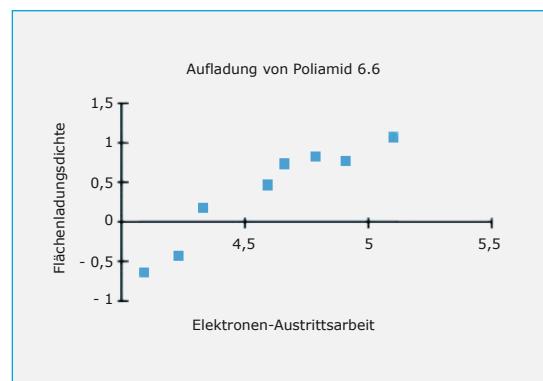


Abb. 48 R.G. Arridge hat 1967 dieses Diagramm der Flächenladungsdichte in Elementarladungen pro Flächeneinheit relativ zur Elektronenaustrittsarbeit verschiedener Metalle WM aufgezeichnet. Daraus ergibt sich, daß z.B. die Elektronenaustrittsarbeit für Poliamid 6.6 bei etwa 4,4 eV liegt.

proportional der Differenz der Elektronen-Austrittsarbeiten zweier sich berührender Festkörper-Flächen. Die Elektronen-Austrittsarbeit ist eine materialspezifische Größe. Sie entspricht der Energie, welche nötig ist, um ein Elektron z.B. mit Hilfe elektrischer Felder oder Photonen aus dem Kristall-Gitter, in welches es eingegliedert ist, heraus zu lösen. Die Höhe einer triboelektrischen Aufladung ergibt

sich jedoch nicht allein aus der Differenz der Flächenladungsdichten sondern auch aus der Dichte und Verteilung der o.a. Oberflächen-Zustände pro Flächeneinheit. Damit sind wir bei der bekannten Triboelektrischen Reihe, welche eine Klassifizierung der verschiedenen Kunststoffe nach Aufladungsneigung durch einen bestimmten Reibpartner ermöglichen soll. Diese Reihe basiert theoretisch auf der Elektronen-Austrittsarbeit der verschiedenen Kunststoffe. Dabei muss jedoch beachtet werden, daß Theorie und Praxis hier weit auseinander liegen können, weil das Maß der "elektrischen Verunreinigung" der Oberflächen die Oberflächenzustands-Dichte weitgehend modifiziert und somit in der Praxis erhebliche Abweichungen von der Triboelektrischen Reihe bis hin zu Polaritätswechseln zu erwarten sind. Bauser hat für den Elektronen-Übergang zwischen zwei Oberflächen (hier Metall-Kunststoff-Übergang) ein interessantes Energieschema aufgestellt, welches in Abb. 47 abgebildet ist. Dabei wird der Kunststoff durch drei Größen beschrieben:

1. Elektronen-Austrittsarbeit WK
2. Ionisationsenergie I und
3. Elektronenaffinität A.

Das Metall wird durch die Elektronenaustrittsarbeit WM gekennzeichnet. Die gestrichelten Doppellinen begrenzen die Energiezonen, innerhalb derer ein Leitfähigkeitsband besteht. Diese Leitfähigkeitsbänder können je nach Material sehr unterschiedlich ausgeprägt sein. Die entweder schwarz ausgefüllten oder nicht gefüllten Kreise symbolisieren die verschiedenen Oberflächen-Zustände vor der Berührung (schwarz) und nach der Berührung (weiß) mit dem anderen Material. Das Potential VS wird von den besetzten Oberflächen-Zuständen erzeugt. Der Anteil der Raumladung wird durch den Besetzungsgrad dieser Zustände charakterisiert und ist durch die Energiehöhe zwischen Fermi-Niveau und Leitungsband gegeben. Die Bänderdurchbiegung um den Betrag VD entspricht der sich unterhalb der Oberfläche bildenden Raumladung. Die Energiehöhe X kennzeichnet das Maß der Besetzung dieser Zustände. Die Ursache von Ladungsübertritten zwischen zwei Oberflächen ist darin zu sehen, daß alle Oberflächenzustände bis zur Höhe des

Fermi-Niveaus besetzt werden und es so zu einer Umverteilung der Ladungsträger kommt. In der Praxis entstehen elektrostatische Effekte zumeist durch zyklische Berührungen und Trennungen von Kunststoff-Oberflächen. Solche oszillierenden Kontakt- und Trennzzyklen erfolgen z.B. beim Gehen mit Gummisohlen auf einem Kunststoff-Fußboden. Die Schuhsohlen berühren flächig den Fußboden, und es kommt zu einer Ladungsträger-Umverteilung. Beim nachfolgenden Abheben der Schuhsohle vom Boden entsteht ein Ladungsüberschuss sowohl an der Schuhsohle als auch am Fußboden. Zunächst wird sich die so entstehende Ladung über die verbleibende Kontaktfläche zwischen Boden und Schuhsohle ausgleichen. Dies erfolgt bis zum letzten Berührungszeitpunkt derselben. Überschreitet der Übergangs-Widerstand an diesem Punkt etwa 1011 Ohm, so kann der Ladungsausgleich nicht mehr vollendet werden und es verbleibt eine Flächenladung sowohl auf der Schuhsohle als auch am Boden. Ähnlich verhält es sich bei einem wischenden Reinigungsvorgang. Dabei ergeben sich jedoch wesentlich mehr Oberflächen-Kontaktstellen zwischen den Reibpartnern als bei einer bloßen Berührung derselben im ruhenden Kontaktzustand. Daher entsteht beim Reiben gemeinhin eine erheblich größere Ladung.

Der Ladungsträger-Überschuss gerade getrennter Oberflächen wird je nach Umgebungsbedingungen mehr oder weniger schnell entladen. Maßgebend für die Entladungszeit ist der Ableitwiderstand. Dieser Begriff schließt die Gesamtheit aller elektrischer Widerstände zwischen geladener Oberfläche und Erde ein. In diesem Zusammenhang wird oftmals angenommen, dass die Umgebungsluft, je feuchter sie ist, ein endlicher elektrischer Widerstand ist und den Ableitwiderstand modifiziert. Dies trifft jedoch nur im begrenzten Maße zu. Selbst feuchte Luft hat einen elektrischen Widerstand nahe unendlich. Der Einfluss feuchter Luft auf den Oberflächenwiderstand wird einerseits durch die Ein- und Anlagerung von Wassermolekülen in die Molekülstruktur der betreffenden Material-Oberfläche und z.T. auch durch eine Wasserstoffbrücken-Bildung bewirkt. Ferner kann durch die Lösung mineralischer Salze in einer feuchten Oberflächenschicht eine ionische Leitfähigkeit eintreten, insbesondere bei Papieren aber auch bei

Reinigungstüchern mit zellulosischen Inhaltsstoffen. Die Hygroskopizität eines Materials bestimmt also in hohem Maße dessen Oberflächen-Widerstand.

Der Oberflächen-Widerstand

Auch eine andere Annahme aus der Vergangenheit hat sich als falsch erwiesen: Die Annahme einer Beziehung zwischen Oberflächen-Widerstand und Aufladbarkeit von Materialien. Malinverni hat in seinem Aufsatz "Surface Resistivity: Why?" [7] deutlich gemacht, daß es hier keine nachweisbare Beziehung gibt. Um deren Nichtvorhandensein nachzuweisen, wurde eine Reihe verschiedener Materialien (Quarz, Glas, Wolle, Seide, Aluminiumfolie, Stahl, Kupfer, Polyester, Siliziumscheibe (poliert), PTFE-Teflon, FPE-Teflon) mit Oberflächen-Widerständen von 1 Ohm/ Quadrat bis zu 1013 Ohm/Quadrat mit Hilfe eines Prüfgerätes nach Baumgärtner [12,13] geprüft. Die Abb. 19 zeigt die Spitzenladungen in Volt beim Reiben der o.a. Ladungspartner mit vier ausgewählten Reibpartnern.

Lodevicus Hermans ist beratender Diplom-Physiker und Ingenieur für Reinraum-Technik.

Win Labuda ist technischer Geschäftsführer der Clear & Clean GmbH in Lübeck.

Literatur

1. Meß- und Überwachungstechnik zur Elektrostatischen Aufladung im Rahmen der Qualitätssicherung in reinen Arbeitsbereichen. Thomas Sebald, VDI-Berichte Nr 1095 – aus 1994
2. Test method to assess the suitability of materials and surfaces to avoid problems from static electricity by measurement of capacitance loading, J.N.Chubb, JCI – 10//2001
3. Tribo-Electricity, "Background" toner deposition and the surface chemistry of some papers. Curt R. Raschke, Adressograph Corp. Warrensville Heights, Ohio, USA
4. Elektrostatische Ladungen – Ursachen und Beseitigung. Günter Lüttgens, Pierre Böschung - expert Verlag Grafenau, Württ.
5. British Journal of Applied Physics, 18-1967, R.G. Arridge

6. Dechema-Monographien Band 72, H. Bauer, Verlag Chemie Weinheim -1974
7. Surface Resistivity: why? - Grace Italiana Spa. Tagungsband 2 – ESD-Forum 1991 - Pierpaolo Malinverni, VP-Verlag Herrenberg
8. Evaluating wiping materials used in clean-rooms and other controlled environments, T. Textor, T. Bahners, E. Schollmeyer, Deutsches Textil-forschungszentrum Nord-West e.V., Krefeld, Germany - Institute of Essen-Duisburg University, 41st WFK Detergency Conference, Düsseldorf, May 2003
9. Elektrostatisches Verhalten von Reinigungsmitteln, ein häufig unterschätzter Qualitätsfaktor in der Reinraumtechnik. Thomas Sebald, VDI- Berichte Nr 919 - aus 1992
10. Untersuchung der triboelektrischen Eigenschaften von Verpackungsfolien Tagungsband 2 -ESD Forum 1991 -R. Gärtnert, H. Schmeer, VP-Verlag Herrenberg
11. Ladungsverteilung auf Isolierstoff Oberflächen bei elektrostatischer Aufladung in Luft. - Dietrich Königstein, Dissertation bei der Bundeswehr-Hochschule in Hamburg.
12. Electrostatic measurement for Processcontrol, H. Baumgärtner, EOS-ESD Symposium, EOS-6, Oct 1984
13. ESD-analysis of masking tape operations, H. Baumgärtner, EOS-ESD Symposium, EOS-7, Sept 1985
14. Das elektrostatische Verhalten als funktionale Eigenschaft und als Qualitätsmerkmal textiler Flächengebilde, Ehrler, P., Schmeer-Lioe, G., Textil-Praxis International 46 (1991)
15. Maßnahmen zur Einhaltung eines unkritischen elektrostatischen Verhaltens bei technischen und funktionalen Mehrweg-Textilien, Institut für Textil- und Verfahrenstechnik Denkendorf, Forschungsbericht, AIF-Forschungsvorhaben Nr.10580, 1998

Der 2. und 3. Teil dieses Aufsatzes sind eine Neubearbeitung der Herrn Dr. Peter Ehrler gewidmeten Arbeit „Triboelektrische Effekte beim Einsatz von Reinraum-Tüchern und Papier“ von Win Labuda, erschienen im VDI-Tagungsband der VDI-Tagung „Reinraumtechnik 1997 – Qualifizierung und Überwachung – Reinraum und Reinstmedien“ in Fulda.

Herrn Sven Siegmann vom Clear & Clean-Forschungslabor sei Dank für die Durchführung einiger der für diesen Aufsatz notwendigen physikalischen Prüfungen.