



Die Reinraum-Verbrauchsgüter Papier, Reinigungstücher und Bekleidung bilden den größten Durchsatz an flächigen Materialien in einem Reinraum. Ein Reinraum der Halbleiter-Industrie mit offener Struktur hat einen jährlichen Bedarf an Reinraumtüchern und Papier, welcher - beide Material-Seiten gerechnet - eine Oberfläche von über 200 000 m² ergibt. Die Oberflächen dieser Materialien sind triboelektrisch mehr oder weniger aufladbar. Elektrische Ladungen sind ein Gefahrenpotential für jede Halbleiter-Fertigung. Innerhalb der im Markt angebotenen Verbrauchsmaterialien bestehen hinsichtlich deren Aufladbarkeit große Unterschiede.

Triboelektrische Effekte beim Einsatz von Reinraum-Tüchern und Papier

Win Labuda
Clear & Clean - Forschungslabor
(Herrn Dr. Peter Ehrler gewidmet)

Der folgende Aufsatz führt in die Grundlagen der Triboelektrik ein und behandelt die aufladungsorientierten Materialeigenschaften von *Reinraum-Tüchern* und *Reinraum-Papieren*. Außerdem wird eine erprobte Methode für die Messung der Triboelektrizität flächiger Produkte vorgestellt und die Meßergebnisse einer ganzen Reihe von Produkten des Weltmarkts werden hier erstmals veröffentlicht.

Physikalische Grundlagen

Lüttgens, Boschung und auch Sebold [1, 2, 4] haben in ihren Aufsätzen und Vorträgen zu den physikalischen Grundlagen der Triboelektrizität praxisnah Stellung genommen. Die Wiederholung an dieser Stelle erfolgt nur für die Bequemlichkeit des interessierten Lesers.

Nach einer wischenden Bewegung mit einem trockenen Tuch über eine Arbeitsplatte z. B. aus Polyester bemerkt der Betrachter bestenfalls einen reinigenden Effekt. In Wahrheit jedoch

ist viel mehr geschehen: Beide Oberflächen haben sich elektrisch verändert:

Werden zwei elektrisch neutrale Flächen beliebiger Materialien bei normaler Umgebungstemperatur 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 *statische 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. Polyester) finden sich Oberflächen-Zustände mit längeren Verweilzeiten von Elektronen. Solche Oberflächen-Zustände prägen sich an Festkörper-Oberflächen vornehmlich dort aus, wo sich Fehlstellen in der Kristallgitter-Struktur z. B. einer Kunststoff-Oberfläche finden. 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 stören, also kristalline Fehlstellen bilden und auf diese Weise eine erhöhte Bereitschaft zu einem Ladungsaustausch haben. Die Flächenladungsdichte ist dabei in 1. Näherung der Differenz der Elektronen-Austrittsarbeiten zweier sich berührender Festkörper-Flächen proportional. 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, zu lösen. Die Höhe einer triboelektrischen Aufladung ergibt sich jedoch nicht allein aus dem der Flächenladungsdichten sondern auch aus der Dichte und Verteilung der o. a. Oberflächenzustände pro Flächeneinheit. Damit sind wir bei der bekannten *Triboelektrischen Reihe*, welche eine Klassifizierung der verschiedenen Kunststoffe nach Aufladungsneigung durch einen bestimmten Reibpartner

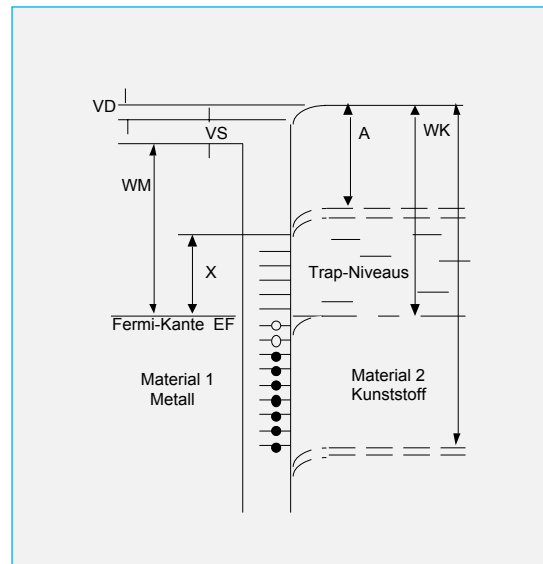


Abb. 1 Energieschema des Ladungsträger-Übergangs nach Bauser. Bedeutung der Indices: W1, W2 - Elektronenaustrittsarbeit der beiden Materialien 1 und 2; I - Ionisationsenergie; A - Elektronenaffinität von Material 2; EF - Fermi-Niveau

ermöglichen soll. Diese Reihe basiert theoretisch auf der Elektronenaustrittsarbeit 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 Oberflächenzustandsdichte 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. 1 abgebildet ist. Dabei wird der Kunststoff durch drei Größen beschrieben: Elektronen-Austrittsarbeit WK, Ionisationsenergie I und Elektronenaffinität A. Das Metall wird durch die Elektronenaustrittsarbeit WM gekennzeichnet. Die gestrichelten Doppellinien begrenzen Energiezonen, innerhalb derer ein Leitfähigkeitsband besteht. Je nach Material können diese Leitfähigkeitsbänder sehr unterschiedlich sein. Die entweder schwarz ausgefüllten oder leeren Kreise bezeichnen die verschiedenen Oberflächenzustände vor der Berührung (schwarz) und nach der Berührung (weiß). Das Potential VS wird von den besetzten Oberflächenzustän-

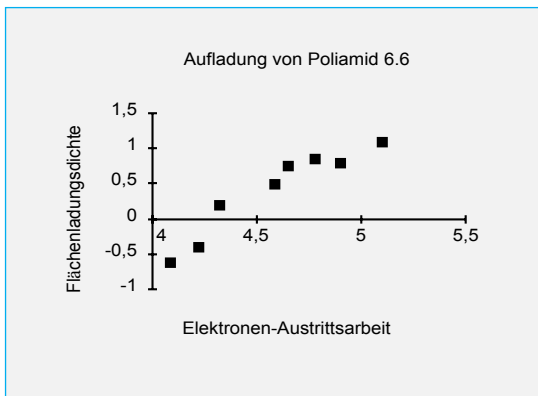


Abb. 2 R.G. Arridge hat 1967 dieses bekannte Diagramm der Flächenladungsdichte in Elementarladungen pro Flächeneinheit relativ zur Elektronenaus-trittsarbeit verschiedener Metalle WM aufgezeichnet. Daraus kann angenommen werden, daß z. B. die Elektronenaus-trittsarbeit für Poliamid 6.6 bei etwa 4,4 eV liegt.

den erzeugt. Der Anteil der Raumladung wird durch den Besetzungsgrad dieser Zustände charakterisiert und ist durch die Energie-höhe zwischen Fermi-Niveau und Leitungs-band gegeben. Die Bänderdurchbiegung um den Betrag V_D 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 Oberflächenzu-

stände bis zur Höhe des Fermi-Niveaus besetzt werden und es zu einer Umverteilung der Ladungsträger kommt.

Praktische Auswirkungen

In der Praxis entstehen elektrostatische Effekte zumeist durch zyklische Berührungen und Trennungen von Kunststoff-Oberflächen. Solche oszillierenden Kontakt- und Trennzyklen erfolgen z. B. beim Gehen mit Gummisohlen auf einem Kunststoff-Fußboden. Die Schuh-sohlen 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 Fuß-boden. Zunächst wird sich die so entstehende Ladung über die verbleibende Kontaktfläche zwischen Boden und Schuhsohle ausgleichen. Dies erfolgt bis zum letzten Berührungspunkt derselben. Überschreitet der Übergangs-Widerstand an diesem Punkt etwa 1011 Ohm, so kann der Ladungsausgleich nicht mehr voll-endet werden und es verbleibt eine Flächenla-dung auf Schuhsohle und Boden.

Ähnlich verhält es sich bei einem trockenen Wischvorgang. Dabei ergeben sich jedoch wesentlich mehr Oberflächen-Kontaktstellen zwischen den Reibpartnern als bei einer bloßen Berührung derselben im ruhenden Kontaktzu-stand. Daher entsteht beim Reiben gemeinhin eine erheblich größere Ladung.

Ladungspartner	Reibpartner für die aufgeführten Ladungspartner			
	Aufladungen durch Reibung in Volt			
	Aluminium-Folie < 1 Ohm/Qadr.	Graphit-Handschuh < 10 ⁹ Ohm/Qadr.	Non-Amin-Film < 10 ⁹ Ohm/Qadr.	PE-Handschuh < 10 ¹¹ Ohm/Qadr.
Quarz	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

Tabelle 3 Spitzenaufladungen durch Reibpartner mit verschiedenen Oberflächenwiderständen

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 nur in 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 ionische Leitfähigkeit eintreten, insbesondere bei Papieren aber auch bei Reinigungstüchern mit zellulosischen Inhaltsstoffen. Die Hygroskopizität eines Materials bestimmt also dessen Oberflächen-Widerstand in hohem Maße.

Der Oberflächen-Widerstand

Auch eine andere Annahme aus der Vergangenheit hat sich inzwischen als falsch erwiesen: Die Annahme einer Beziehung zwischen Oberflächen-Widerstand und Aufladbarkeit eines Materials.

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 Oberflächenwiderständen von 1 Ohm/Quadrat bis zu 1013 Ohm/Quadrat mit Hilfe eines Prüfgerätes nach Baumgärtner [10, 11] geprüft. Die Tabelle 3 zeigt die Spitzenaufladungen in Volt beim Reiben der o. a. Ladungspartner mit vier ausgewählten Reibpartnern.

Reinraum-Tücher

Triboelektrische Ladungen durch den Wischvorgang

Wie wir aus Tab. 3 entnehmen können, läßt sich die Höhe der zu erwartenden triboelektrischen Ladung zwischen einem Ladungs- und einem Reibpartner nicht genau vorhersagen. Das gilt auch für Wischvorgänge mit einem Reinigungstuch auf Oberflächen. Man kann jedoch mit Sicherheit davon ausgehen, daß beim Wischvorgang mit einem feuchten Tuch keine Aufladung auftreten wird (Abb 4, 5).

Weil sich jedoch nicht alle Reinigungsvorgänge feucht durchführen lassen, besteht bei solchen Reinigungsvorgängen, bei denen Reinigungstücher im Trocken- oder Halbtrockenzustand zum Einsatz kommen, eine akute Aufladungsgefahr und in Einzelfällen auch eine Personengefährdung.

Immer wenn die Aufgabe besteht, öl- und fettartige Substanzen von Oberflächen zu

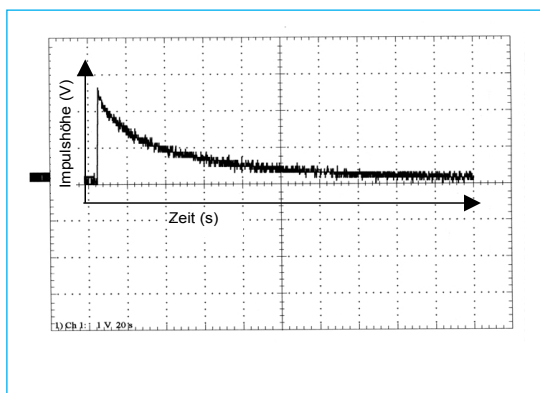


Abb. 4 Ladungsdiagramm eines Reinraumtuchs im Trockenzustand (Methode Fallschlitten nach Ehrler)

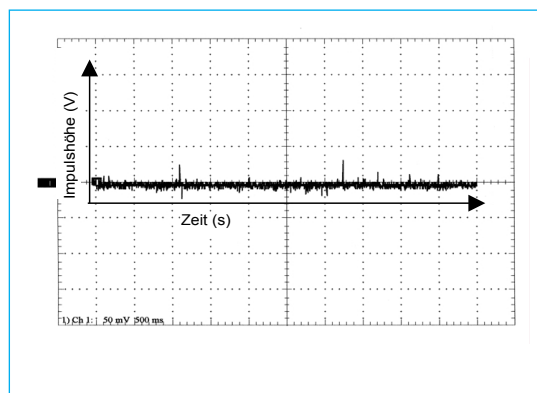


Abb. 5 Ladungsdiagramm des gleichen Reinraumtuchs im Feuchtzustand (Methode Fallschlitten nach Ehrler)

entfernen, wird in der Praxis ein brennbares Lösungsmittel wie Aceton, Benzin, Isopropylalkohol etc. Einsatz finden. Dies ist z. B. typisch für die Reinigung von Drucksieben im Schaltungs-Siebdruck. Dabei besteht die folgende Gefahr:

Die Benetzung eines Reinigungstuchs mit einem der o. a. brennbaren Lösungsmittel erfolgt zumeist mit einer Spritzflasche in die Mitte des einfach oder doppelt gefalteten Tuchs hinein, welches in der freien Hand gehalten wird. Zum Einsatz-Zeitpunkt des Reinigungstuchs ist dies also stellenweise mit einem Lösungsmittel getränkt und zum anderen Teil trocken. Das Lösungsmittel verdampft in relativ kurzer Zeit. Bei der Reinigung großer Siebe für den Sieb- oder Schaltungsdruck werden oftmals größere Lösungsmittelmengen aufgetragen und flächig verteilt.

Wenn ein Teil des Lösungsmittels getrocknet ist und trockene Teile des Tuchs über zum Teil trockene Siebflächen gerieben werden, so kommt es vor, daß die feucht gebliebenen Flächenanteile durch elektrische Funkenentladung entzündet werden und auf diese Weise gefährliche Brände entstehen. Für solche Einsatzfälle ist es sinnvoll, Reinigungstücher im feuchten Anlieferungszustand oder solche mit reduzierter Aufladbarkeit einzusetzen.

Optische Gläser werden oftmals mit Spezialtöchern gereinigt, welche aus extrem feinen Garnen bestehen, die einen Durchmesser von nicht mehr als 2 µm haben. Mit solchen Töchern lassen sich auch dünnste Verunreinigungsschichten bis hinunter zu einer Dicke von einigen nm mühelos und schnell entfernen. Je geringer jedoch die Oberflächen-Rauhigkeit zweier Reibpartner ist, desto höher wird die resultierende triboelektrische Ladung an den Oberflächen sein. Solche geladenen Oberflächen werden bis zu ihrer Entladung die Partikel der Umgebung in besonderem Maße anziehen und somit ist die gewünschte Oberflächenreinheit von geringer Dauer. Dem kann entgegengewirkt werden, indem diese Tücher in ganz geringem Maße 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.

Ein ähnliches Problem ergibt sich bei der Entfernung von Pulverresten und körnigen Stäuben von kritischen Oberflächen, die oftmals nicht im nassen Zustand entfernt werden dürfen, weil es zu einer Reaktion zwischen der Feuchtigkeit im Reinigungstuch und der zu entfernenden Substanz kommt. Hier ist es geboten, spezielle Tücher mit geringer Aufladungsneigung einzusetzen und außerdem den Wischvorgang sehr langsam durchzuführen. Je höher die Geschwindigkeit beim Wischen, desto höher sind auch die zu erwartenden triboelektrischen Ladungen.

Paraffinierte Reinigungstücher, welche besonders in der Leiterplattenindustrie zur Beseitigung von Stäuben auf Oberflächen eingesetzt werden, können Oberflächen triboelektrisch sehr hoch aufladen - besonders, wenn sie aus Polyestervliesen oder -geweben bestehen. Es wurden an solchen Töchern bei Einsatz der gleichen Meßgeräte wie später beschrieben, Impulshöhen von max 882 V und Abklingzeiten von max 187 s gemessen.

Reinraum-Papier

Gelegentlich kommt es vor, daß Betreiber von Kopiergeräten oder Druckern Probleme mit deren einwandfreiem Papiertransport haben. Das Phänomen zeigt sich insbesondere in den Wintermonaten, wenn die Räume beheizt werden und die Luftfeuchtigkeit gering ist. Doppel- oder Mehrfacheinzüge 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. In diesem Fertigungsumfeld wird stets Reinraum-Papier verwendet. Es gibt bedeutsame Unterschiede zwischen Standard-Kopierpapier und Reinraum-Papier. Diese machen Reinraum-Papiere prinzipiell anfälliger für Papierstaus in trockener Umgebung - wenn man nicht einige technische Zusammenhänge kennt und sinnvolle Gegenmaßnahmen trifft.

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

- geringe Partikelfreisetzung und
- geringe Ionenfreisetzung

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 von einigen der Hersteller mit einem Polyelastomer beschichtet, welches die Partikel auf der Papier-Oberfläche bindet und so die Partikelfreisetzung stark reduziert. Je mehr Polyelastomer auf die Oberfläche aufgetragen wird, desto geringer werden - in Grenzen - die Kennwerte Partikelerzeugung (durch die Flächenreibung im Einsatz) und Partikelfreisetzung (bei der Handhabung). Andererseits kommt es durch das Polyelastomer evtl. zu einer Erhöhung der triboelektrischen Aufladbarkeit und somit zu elektrostatisch bedingter Gleithemmung beim Papiertransport.

Die Gleithemmung

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

- zu hoch eingestellter Anpreßdruck des Papier-Vorschubs am Drucker oder Kopierer
- zu hoher Reibungskoeffizient zwischen den einzelnen Blättern
- zu hohe Oberflächenhaftung durch elektrostatische Kontaktaufladung
- zu geringe Entladung der betriebsbedingten Corona-Aufladung des Papiers nach dem Druckvorgang.

Folgende Materialeigenschaften des Papiers als auch 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 vor Verlassen des Druckers

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 durch Messung des Oberflächenwiderstands lösen zu wollen. Viel öfter als die triboelektrischen sind es nämlich erfahrungsgemäß die gerätespezifischen Parameter, welche zu Störungen im Papierlauf führen.

Es ist jedoch wahrscheinlich, daß bei triboelektrisch geladenen Papieren zwischen Oberflächenwiderstand und Abklingzeit des Ladungsimpuls eine deutliche Beziehung besteht. Sowohl der Aufsatz von Malinverni [7] als auch die Ergebnisse unserer Prüfungen, aber

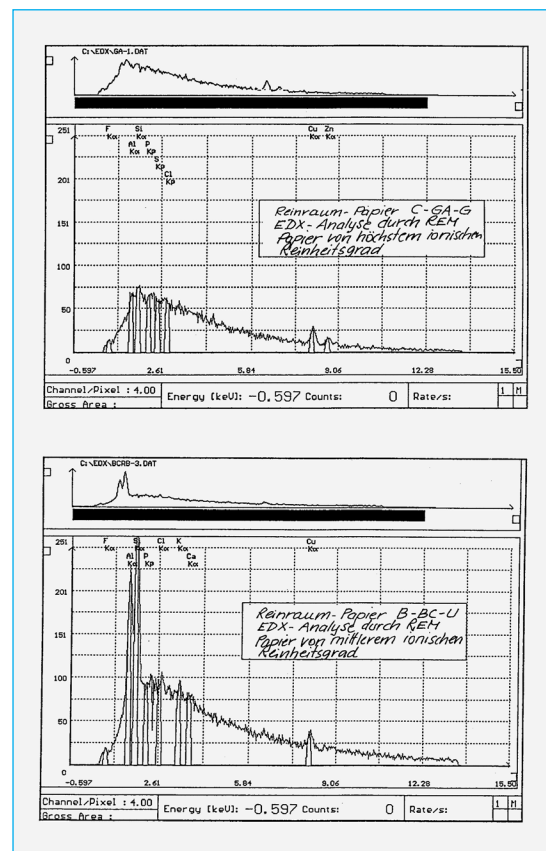


Abb. 6 Auswertungen mit der energiedispersiven Röntgenanalyse (EDX)

auch die Arbeit von Curt Raschke, bestätigen dieses Phänomen. Dabei zeigt sich, daß die Aufladbarkeit von Papieren mit dem Bestand an Chloranteilen im Papier deutlich abnimmt. Es wird zu untersuchen sein, in welcher Menge Chlorionen entweder in der Papiermasse oder evtl. in der polymeren Beschichtungsmasse der Papiere oder in beiden die Aufladbarkeit modifizieren. Solche Messungen sollten dann jedoch weitere Elemente wie z. B. Natrium einschließen und sich nicht allein auf das Element Chlor beziehen.

Die beiden Auswertungen (Abb. 6) mit der energiedispersiven Röntgenanalyse (EDX) zeigen solche unterschiedlichen Ionenkonzentrationen, wobei das Papier mit dem Code C-GA-G zwar eine Impulshöhe von nur + 685 V hat, aber eine relativ lange Abklingzeit von 1,13 s - woraus sich in 1. Näherung ein Impulsintegral nach $((IH \times ITA):2) = 387$ ergibt. (IH = Impulshöhe, ITA = Impuls-Abklingzeit)

Das Papier mit dem Code B-BC-U zeigt eine Impulshöhe von 785 V jedoch bei nur 0,54 s Abklingzeit. Daraus ergibt sich in 1. Näherung ein Impulsintegral von nur 211. Das Papier mit dem deutlich höheren Ionenbestand zeigt also nur etwa 50% des Impulsintegrals, von dem ionisch reineren Papier.

Betrachtet man den Unterschied zwischen den Ladungsdiagrammen Abb. 17 und 18, wobei die Höhe des Aufladungsimpuls durch kurzes Tauchen in eine 0,1 %ige NaCl-Lösung und anschließendem Trocknen um 77 % reduziert wurde, so verdichten sich die Hinweise darauf, daß ionisch reinere Papiere längere

Entladungszeiten haben als solche mit einem höheren Ionenbestand. Unklar ist es, welchen Einfluß neben den Chlorionen die anderen vorhandenen Spezies haben.

Man muß sich bei Reinraumpapieren also evtl. mit der möglichen Alternative:

- mehr Ionenbestand oder
- höhere Aufladbarkeit

ernsthaft auseinandersetzen.

Vergleichende Prüfungen

der Aufladbarkeit und Entladung verschiedener Fabrikate von Reinraum-Tüchern und Papieren

Wir wollten die Aufladbarkeit von Reinraum-Tüchern und Papieren durch Flächenreibung einer praxisnahen Prüfung unterziehen. Der Versuch sollte in etwa die Ladungsverhältnisse beim Wischvorgang oder beim Papiertransport simulieren. Daher war es nötig, ein Instrumentarium zu schaffen, mit dem es möglich ist, unter stets gleichen physikalischen und Umgebungs-Bedingungen eine Flächen-Reibung herbeizuführen und die so erzeugte elektrische Ladung zu messen. In diesem Zusammenhang erschien uns der beim Institut für Textil- und Verfahrenstechnik in Denkendorf entwickelte Triboelektrische Fallschlitten (Abb. 10 und 7) 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 Hinweise verdanken.

Zum Betrieb des Fallschlittens nach Ehrler bedarf es eines Instrumentariums, welches nachstehend aufgeführt ist:

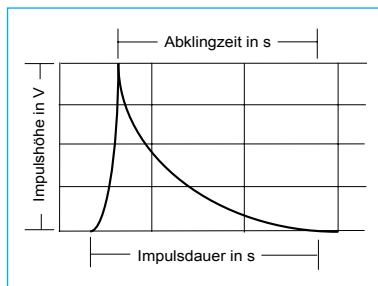


Abb. 7 Ladungsdiagramm, wie es sich beim Betrieb des Fallschlittens nach Ehrler auf dem Speicheroszilloskop abbildet

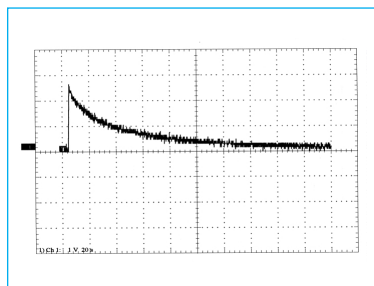


Abb. 8 Standard-Ladungsdiagramm eines gewaschenen Polyester-Gestrickes ohne Tensidauftrag (+8638 V bei 195 s Abklingzeit)

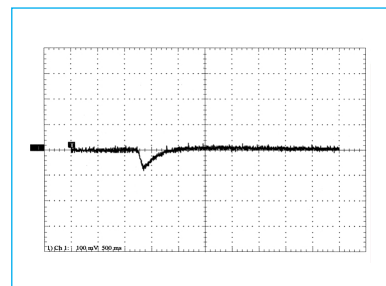


Abb. 9 Ladungsdiagramm des gleichen Gestrickes wie in Abb. 8, aber mit Tensid ausgerüstet (- 241 V : 802 ms)

Instrumentarium

- Fallschlitten nach Ehrler (Eigenbau)
- Klimakammer - Fabr. Rumed
- Feldstärke-Meßgerät JCI 140 CF nach dem Feldmühle-Prinzip
- Oszilloskop, Tektronix mit Speichervorrichtung für 2500 Bildpunkte Typ THS 710
- Texas Instruments PC-Extensa 450 T
- Hewlett-Packard-Tintenstrahl-Drucker Deskjet 320
- Tektronix-Software WSTR 31 -
- Kabel, Steckverbinder etc.

Der Fallschlitten nach Ehrler

Beschreibung

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 12 mm. 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). Das zu analysierende Reinigungstuch oder Papier (2) wird in einer geerdeten Klemmvor-

richtung (1) befestigt, welche sich am Kopfteil des Holzrahmens befindet. Anschließend wird das Papier vorsichtig um die Polystyrolstäbe herumgelegt, 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 und Papier wurden zumeist 5 Prüflinge der Abmessungen 50 x 300 mm geschnitten und für die Dauer von 12 Stunden bei einem Prüfklima von 40 % relH bei + 22° C gelagert. Anschließend wurden die Prüflinge nacheinander im Prüfklima in den Fallschlitten eingelegt, aufgeladen und gemessen. Der Fallschlitten befand sich dabei in der Klimakammer. Die beim Betrieb des Fallschlittens am Reinigungstuch oder Papier entstehenden spontanen Aufladungen und nachfolgenden Abklingphasen wurden oszillo-

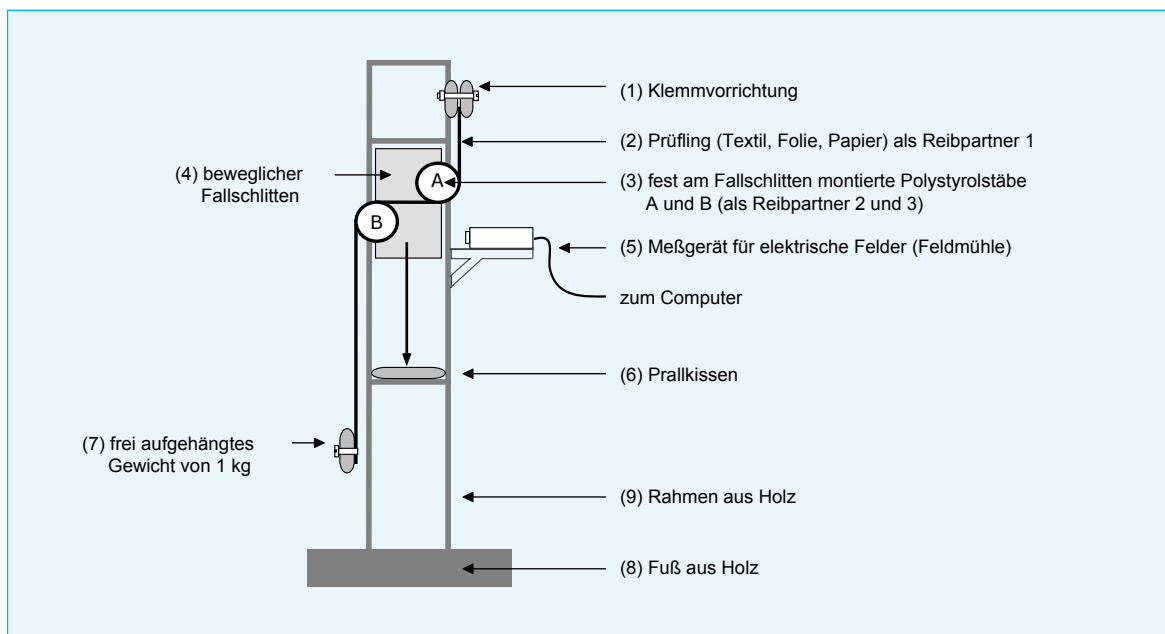


Abb. 10 Fallschlitten nach Ehrler zur Messung der Triboelektrizität von porösen Flächengebilden, Schemazeichnung

graphisch registriert (siehe die nachfolgenden Abbildungen). Die Oszillogramme wurden ausgewertet, und die so erhaltenen Daten tabellarisch erfaßt. Auf diese Weise entstand eine Übersicht über die mögliche elektrostatische Aufladbarkeit sowohl der Reinraum-Tücher als auch der Reinraum-Papiere verschiedener Hersteller unter in Reinräumen üblichen Feuchtebedingungen.

spontanen Aufladung des Prüflings mit nachfolgender Abklingphase. Die verschiedenen, am Markt befindlichen Reinraum-Tücher und Papiere unterscheiden sich voneinander durch erhebliche Unterschiede sowohl in der Impulshöhe als auch in der Abklingzeit. Je höher diese beiden Werte sind, desto geringer ist die „triboelektrische Güte“ des betreffenden Produktes.

Ladungsdiagramme

Nebenstehend sind eine Reihe unserer interessantesten Ladungsdiagramme abgebildet, welche die in der Zusammenfassung gebrachten Schlußfolgerungen unterstützen. Das Diagramm Abb. 7 zeigt den prinzipiellen Ablauf aller folgenden Diagramme:

Beim Hinabfallen des Fallschlittens kommt es zu einer

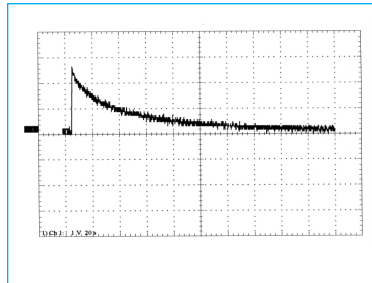


Abb. 11 Standard-Ladungsdiagramm, Gestricke aus PES, gewaschen
(+8638 V : 195 s)

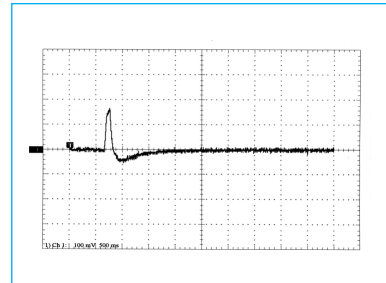


Abb. 12 Vergleich zu Abb. 11: Ladungsdiagramm, Gestricke aus PES, gewaschen und nichtionisch ausgerüstet
(+530 V : 188 ms / - 149 V : 1,6 s)
(Maßstab 10-fach vergrößert)

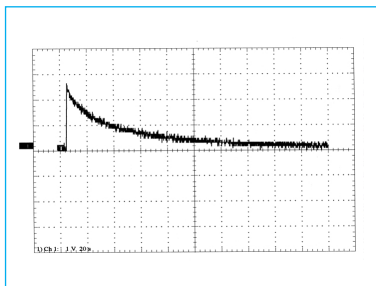


Abb. 13 Standard-Ladungsdiagramm, Gestricke aus PES, gewaschen
(+8638 V : 195 s)

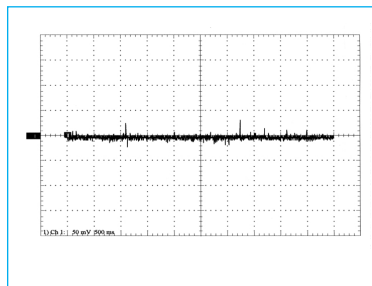


Abb. 14 Vergleich zu Abb. 13: Ladungsdiagramm, Gestricke aus PES, angefeuchtet mit DI-Wasser
(keine Ladung, 0 V : 0 s)

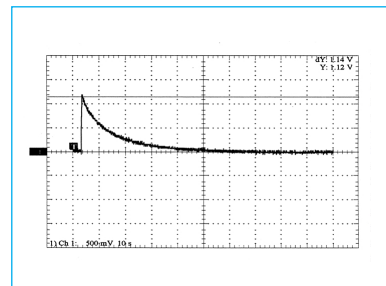


Abb. 15 Ladungsdiagramm, Vliesstoff-Tuch aus 50:50 PES-Cellulose
(+3876 V : 62,1 s)

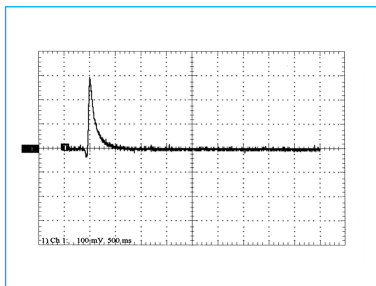


Abb. 16 Ladungsdiagramm, das gleiche Material wie Abb. 15, aber Hälfte des Prüflings naß
(+938 V : 750 ms)
(Maßstab 5-fach vergrößert)

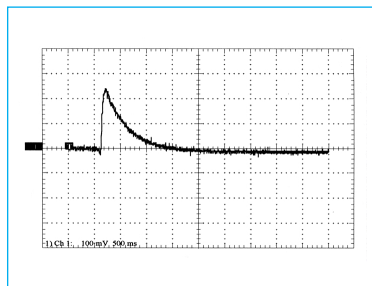


Abb. 17 Ladungsdiagramm, Standard-Reinraum-Papier mit Polymer-Beschichtung
(+796 V : 1,43 s)

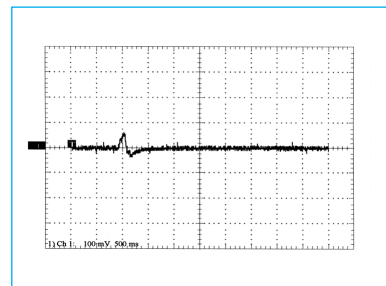


Abb. 18 Ladungsdiagramm, das gleiche Papier wie in Abb. 17, jedoch nach kurzem Tauchen in 0,1 %ige NaCl-Lösung und Trocknung
(+ 181 V : 171 ms)

In der Abb. 8 wird gewissermaßen ein „Standard“-Ladungsdiagramm von einem Polyester-Gestricke abgebildet, aus dem alle Chemikalien entfernt wurden, welche normalerweise dort eingebracht werden, um das Reinigungstuch wasseraufnahmefähig zu machen. Dabei zeigte sich im Fallschlittentest ein Ladungsimpuls von 8636 V bei einer Abklingzeit von 195 s.

Aus der Abb. 12 geht deutlich hervor, daß eine Ausrüstung des Reinigungstuchs 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 HiTech-Tüchern möglich, die Tensid-Ausrüs-

tung so zu wählen, daß die Höhe der Ladungsimpulse erheblich vermindert oder sogar auf null reduziert wird. Dabei gilt es jedoch zu beachten, daß Tensideinträge zumeist auch Ionen in das Reinigungstuch hineintragen, welche dort unerwünscht sind. Das gilt auch für sog. nichtionische Tenside. Der Auswahl geeigneter Tenside und Eintragsmengen kommt also eine große Bedeutung zu. Dies ist einer der Bereiche, wo sich die Qualitäten der bekannten Designer von HiTech-Reinigungstüchern deutlich unterscheiden.

In Abb. 5 wurde bereits gezeigt, daß ein feuchtes Reinigungstuch beim Wischen keine Aufladung erzeugt. Diese Tatsache führt jedoch gelegentlich zum lässigen Umgang mit solchen Tüchern, die zwar vor dem Reini-

Prüf-Ergebnisse für Reinraum-Reinigungstücher (Gestricke):

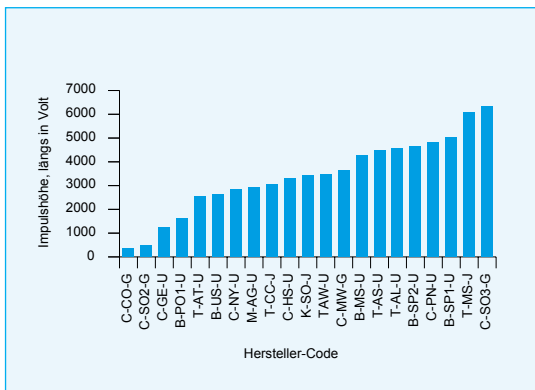


Abb. 19 Prüfergebnisse für die Impulshöhe diverser Reinraum-Gestricke-Tücher bei Reibung in Längsrichtung

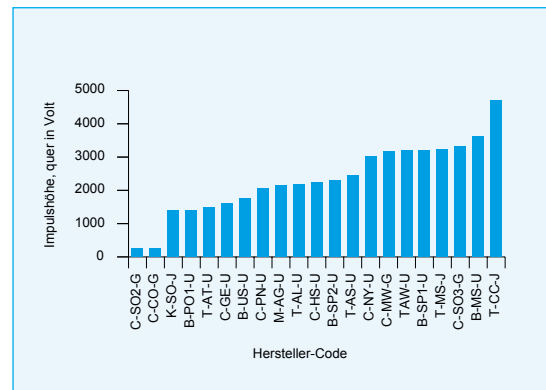


Abb. 20 Prüfergebnisse für die Impulshöhe diverser Reinraum-Gestricke-Tücher bei Reibung in Querrichtung

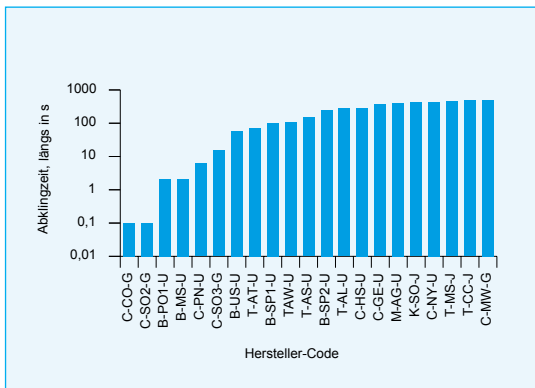


Abb. 21 Prüfergebnisse für die Abklingzeit diverser Reinraum-Gestricke-Tücher nach Reibung in Längsrichtung

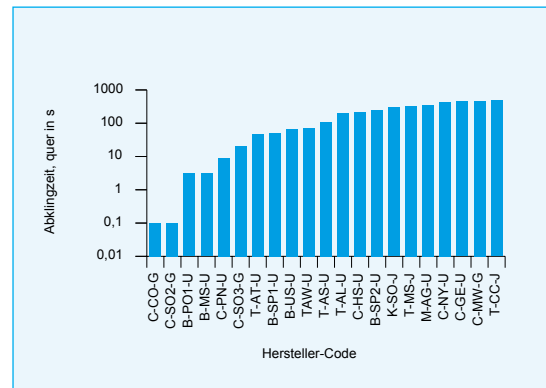


Abb. 22 Prüfergebnisse für die Abklingzeit diverser Reinraum-Gestricke-Tücher nach Reibung in Querrichtung

gungsvorgang 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. 15 und 16. Abb. 15 zeigt das Ladungsdiagramm eines trockenen Vliesstoff-Reinigungstuchs aus Polyester- und Zellstoffasern etwa zu gleichen Teilen. Bei Abb. 16 handelt es sich um das Ladungs-Diagramm des gleichen Tuchs, jedoch im teilgefeuchteten Zustand.

Prüfergebnisse

Die Ergebnisse der Prüfungen werden im folgenden Abschnitt dargestellt. Sie gliedern sich wie folgt:

Reinraum-Tücher

- 1 Gestricke alle Daten (Abb. 19 bis 22)
- 2 Vliesstoffe alle Daten (Abb. 23 bis 26)

Reinraum-Papier

- 3 Papier alle Daten (Abb. 27 und 28)

Zusammenfassung der Endergebnisse

- 4 Gestricke, Vliesstoffe, Papier (Abb. 29 bis 31)

(Es wird um Verständnis dafür gebeten, daß die Hersteller und die Typenbezeichnungen der geprüften Produkte aus wettbewerbsrechtlichen Gründen codiert wurden.)

Prüf-Ergebnisse für Reinraum-Reinigungstücher (Vliesstoffe):

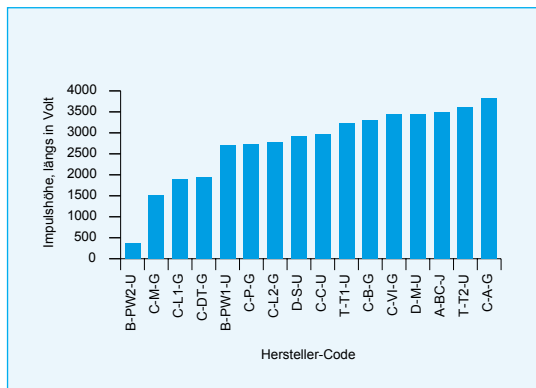


Abb. 23 Prüfergebnisse für die Impulshöhe diverser Reinraum-Vliesstoff-Tücher nach Reibung in Längsrichtung

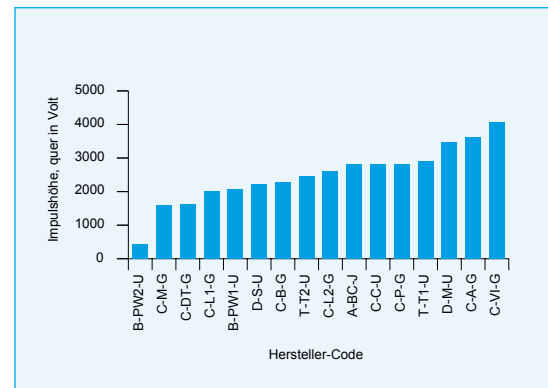


Abb. 24 Prüfergebnisse für die Impulshöhe diverser Reinraum-Vliesstoff-Tücher nach Reibung in Querrichtung

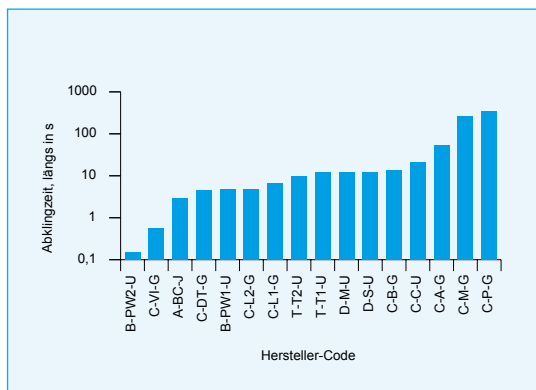


Abb. 25 Prüfergebnisse für die Abklingzeit diverser Reinraum-Vliesstoff-Tücher nach Reibung in Längsrichtung

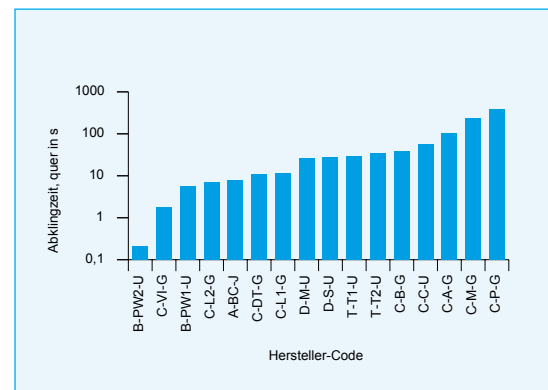


Abb. 26 Prüfergebnisse für die Abklingzeit diverser Reinraum-Vliesstoff-Tücher nach Reibung in Querrichtung

Zusammenfassung

1. Reinraum-Tücher

- 1.1. Gestricke haben allgemein eine etwas geringere Aufladungsneigung als Vliesstoffe.
- 1.2. Die Ausrüstung mit einem nichtionischen Tensid kann die Aufladungseigenschaften eines Reinraum-Tuchs stark beeinflussen. Sie kann sogar zur Umkehrung der Ladungs-Polarität führen (Abb. 9).
- 1.3. Die Aufladungseigenschaften der weltweit am Markt befindlichen Reinraum-Tücher variieren untereinander erheblich. Bei Vliesstoffen variiert die Aufladungshöhe zwischen dem Tuch mit der größten im Verhältnis zu dem mit der geringsten Aufladungsneigung etwa im Verhältnis 1:8. Für die Impuls-Abklingzeit ist das Verhältnis jedoch 1:2000. Bei Gestricken liegen die Verhältniswerte sogar bei 1:20 für die Aufladungshöhe und 1:5000 für die Abklingzeit.
- 1.4. Ein höherer Reinheitsgrad bzw. besserer Auswaschzustand führt manchmal bei Gestricken offenbar zu einer höheren Aufladungsneigung des Reinigungstuchs. Dies ist jedoch abhängig vom verwendeten Basis-Material (Polyester, Poliamid oder Polypropylen).
- 1.5. Reinraum-Reinigungstücher können bereits bei einer Wisch-Weglänge von nur 100 mm Spitzenaufladungen von über

6000 Volt erreichen. Es ist daher sinnvoll, geeignete Reinraum-Tücher auszuwählen, wenn ein gelegentlicher oder dauernder Einsatz der Tücher im trockenen Zustand vorgesehen ist oder aber durch Verdunstung während der Arbeitsphase ein Trockenzustand eintreten kann.

- 1.6. Reinraum-Tücher, welche im lösungsmittel-getränkten Zustand eingesetzt werden, sind oftmals nur teilgetränkt. Die trockenen Flächenanteile der Tücher haben die Ladungseigenschaften trockener Tücher (Abb. 16). Diese Tatsache sollte in jedem Operator-Training Berücksichtigung finden.

2. Reinraum-Papier

- 2.1. Bei gleichen klimatischen Bedingungen konnten innerhalb der verschiedenen Fabrikate erhebliche Unterschiede der Impuls-Abklingzeit festgestellt werden. Genaue Gründe dafür sind noch zu erarbeiten. Dichte, Oberflächen - Beschaffenheit, Polymerauftrag und ionische Bestandteile können modifiziert werden, um mehr Aufschluß über die Mechanik der Abklingzeiten zu bekommen.
- 2.2. Wird ein Standard-Reinraum-Papier kurzzeitig in einer 0,1 %igen NaCl-Lösung gebadet und anschließend getrocknet, so sind Aufladungshöhe und Abklingzeit erheblich geringer als bei dem ungebadeten Standard-Reinraum-Papier.

Prüf-Ergebnisse für Reinraum-Papier

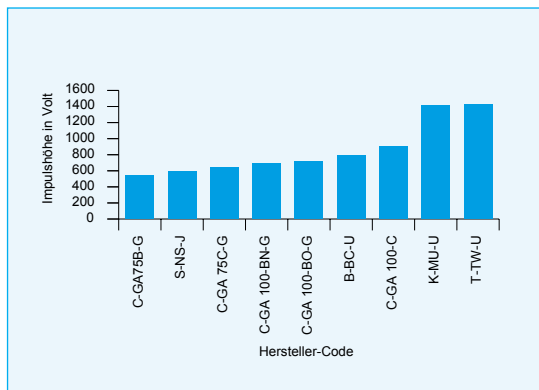


Abb. 27 Prüfergebnisse für die Impulshöhe diverser Reinraum-Papiere

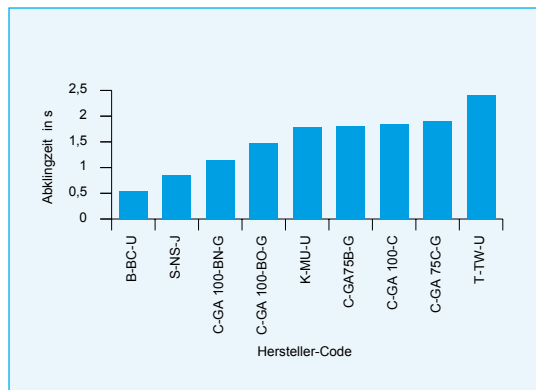


Abb. 28 Prüfergebnisse für die Abklingzeit diverser Reinraum-Papiere

Zusammenfassung der Endergebnisse

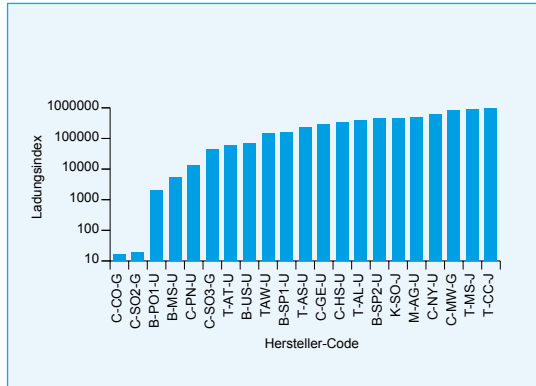


Abb. 29 Ladungsindex für verschiedene Reinraum-Gestricke-Tücher

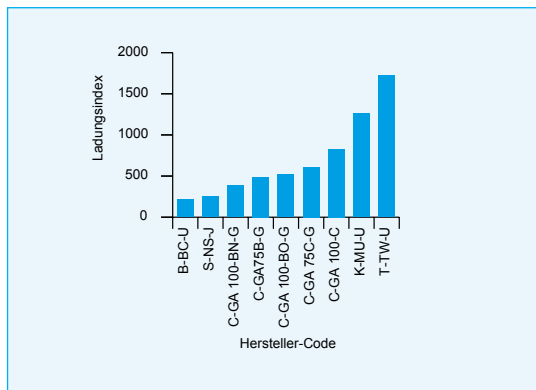


Abb. 30 Ladungsindex für verschiedene Reinraum-Papiere

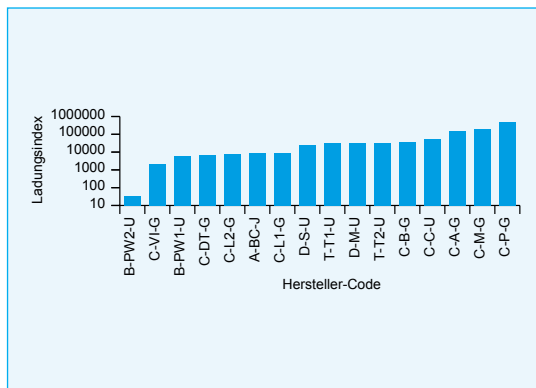


Abb. 31 Ladungsindex für verschiedene Reinraum-Vliesstoff-Tücher

2.3. Die Aufladungseigenschaften der wichtigsten weltweit am Markt befindlichen Reinraum-Papiere variieren untereinander in geringerem Maße als bei Reinraum-Tüchern. Die Aufladungshöhe variiert zwischen dem Papier mit der größten im Verhältnis zu dem mit der geringsten Aufladungsneigung im Verhältnis 1:3. Für die Impuls-Abklingzeit ist das Verhältnis etwa 1:5.

Zusammenfassung der Endergebnisse

Um die Parameter Impulshöhe und Abklingzeit für die Prüflinge zusammenfassend vergleichen zu können, wird der Ladungsindex derselben ermittelt. Dies geschieht in erster Näherung, indem man die mittlere Impulshöhe und die mittlere Abklingzeit miteinander multipliziert und das Produkt halbiert. Somit erhält man einen Index-Wert, welcher sowohl Impulshöhe als auch Abklingzeit beinhaltet und anhand dessen man die verschiedenen Prüflinge sinnvoll vergleichen kann.

Danksagung

Frau Yuko Labuda und Herrn Sven Siegmann für die umfangreiche analytische Laborarbeit im Rahmen dieses Aufsatzes ein herzliches Dankeschön. Den Herren Gärtner und Sebal Dank für geistigen Beistand. Besonders herzlichen Dank an Herrn Dr. Peter Ehrler dafür, daß er uns bereits 1985 das Prinzip des Fallschlittens nahegebracht hat, mit dessen Hilfe wir nun diese aufschlußreichen Experimente machen konnten.

Literatur

1. Meß- und Überwachungstechnik zur Elektrostatik im Rahmen der Qualitätssicherung in Reinen Arbeitsbereichen. Thomas Sebald, VDI-Berichte Nr 1095 - aus 1994
2. Elektrostatik, ein häufig unterschätzter Qualitätsfaktor in der Reinraumtechnik. Thomas Sebald, VDI-Berichte Nr 919 - aus 1992
3. Tribo-Electricity, "Background" toner deposition and the surface chemistry of some papers. Curt R. Raschke, Adressograph Corp. Warrensville Heights, Ohio, USA
4. Elektrostatische Aufladungen - Ursachen und Beseitigung. Günter Lüttgens, Pierre Boschung - expert Verlag Grafenau, Württ.
5. British Journal of Applied Physics, 18-1967, R.G. Arridge
6. Dechema-Monographien Band 72, H. Bauser, Verlag Chemie Weinheim, 1974
7. Surface Resistivity: why? - Grace Italiana Spa. Tagungsband 2 - ESD Forum 1991, Pierpaolo Malinverni, VP-Verlag Herrenberg
8. Untersuchung der triboelektrischen Eigenschaften von Verpackungsfolien Tagungsband 2 -ESD Forum 1991, R.Gärtner, H. Schmeer, VP-Verlag Herrenberg
9. Ladungsverteilung auf Isolierstoff-Oberflächen bei elektrostatischer Aufladung in Luft, Dietrich Königstein, Dissertation bei der Bundeswehr-Hochschule in Hamburg.
10. Electrostatic measurment for Process-control, H. Baumgärtner, EOS-ESD Symposium, EOS-6, Oct 1984
11. ESD-analysis of masking tape operations, H. Baumgärtner, EOS-ESD Symposium, EOS-7, Sept 1985
12. Das elektrostatische Verhalten als funktionale Eigenschaft und als Qualitätsmerkmal textiler Flächengebilde, Ehrler, P., Schmeer-Lioe, G., Textil-Praxis International 46 (1991)
13. 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