

Zeitschrift: Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe = Bulletin technique / Entreprise des postes, téléphones et télégraphes suisses = Bollettino tecnico / Azienda delle poste, dei telefoni e dei telegrafi svizzeri

Herausgeber: Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe

Band: 57 (1979)

Heft: 6

Artikel: Problèmes soulevés par le phénomène de l'électricité statique

Autor: Nadler, Carl Jürg

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-875558>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 30.04.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Probleme im Zusammenhang mit dem Phänomen der elektrostatischen Ladungen

Zusammenfassung. Im ersten Teil werden die Spitzenströme und die mittleren Spannungen bei der Entladung von statischen Ladungen behandelt. Dazu werden das Gesetz von Coulomb und die Feldgleichung sowie das Potential des elektrostatischen Feldes herangezogen. Im weiteren werden einige Beispiele von Störungen durch Entladung statischer Ladung gegeben. Die Schutzmassnahmen sind im dritten Teil beschrieben, wobei sich der Autor auf die Belange der PTT-Betriebe beschränkt.

Résumé. Dans une première partie théorique, on évalue les courants de pointe et les tensions moyennes apparaissant lors de décharges électrostatiques. Il a paru utile de rappeler quelques notions fondamentales telles que la loi de Coulomb, le champ et le potentiel électrostatiques. Des exemples de perturbations dues à des décharges sont passés en revue. Les mesures de protection font l'objet du troisième chapitre. On s'est limité aux aspects intéressants spécialement l'Entreprise des PTT.

Problemi inerenti al fenomeno dell'elettricità statica

Riassunto. Nella parte teorica vengono valutate le correnti di punta e le tensioni medie che si manifestano in occasione di scariche elettrostatiche. All'autore è sembrato utile ricordare alcune nozioni fondamentali come la legge di Coulomb, il campo e il potenziale elettrostatico. Vengono illustrati esempi di perturbazioni dovute a scariche. Il terzo capitolo è dedicato alle misure di protezione. L'autore si è limitato alla descrizione degli aspetti particolarmente interessanti per l'Azienda delle PTT.

1 L'électricité statique, d'où vient-elle, comment la mesurer?

11 Introduction, loi de Coulomb

L'électrostatique est basée sur la loi de Coulomb qui décrit la force F agissant entre deux charges ponctuelles q et q^* en fonction de la distance r séparant les deux charges:

$$F = \frac{1}{4 \pi \epsilon_0} \frac{q q^*}{r^2} \quad 1.1.1$$

F est mesurée en newtons, si les charges sont exprimées en coulombs (1 C = 1 As) et la distance r en mètres. ϵ_0 est la constante diélectrique du vide et vaut

$$\epsilon_0 = 8,85 \text{ pF/m}$$

Si les charges sont de même signe, la force entre elles est répulsive. Par conséquent, des charges de même signe, injectées dans un objet, se repousseront l'une l'autre aussi loin que possible. Elles se disperseront à la surface de l'objet, et si celle-ci présente une pointe, c'est là précisément qu'ira se placer une grande partie des charges, puisque la pointe est en quelque sorte l'endroit le plus éloigné de la surface.

Si l'on amène une charge q^* , de signe contraire, près de la pointe fortement chargée, mais par l'extérieur, la force d'attraction entre cette charge et la charge q de la pointe devient très grande selon l'expression 1.1.1. La force peut devenir si grande qu'une partie de la charge contenue dans la pointe est arrachée et transportée en direction de q^* . Au passage de la charge se produit un chemin ionisé qui se manifeste par un éclair bleuâtre dans l'air. Nous venons de décrire ce que l'on nomme l'effet de pointe. Celui-ci est mis à profit par les parafoudres.

Un cas fréquent et bien connu est celui où la décharge a lieu lorsqu'une personne approche son doigt d'une poignée de porte, d'un robinet, etc., après s'être chargée en marchant sur un tapis synthétique. L'effet d'un tel «mini-éclair» peut aller du simple désagrément à la destruction de composants électroniques, ou même l'allumage d'un incendie.

12 Production de la charge électrique, séries triboélectriques

La force de Coulomb est en partie responsable de la cohésion des atomes: les électrons négatifs sont attirés par le noyau positif. Par une action extérieure mettant en jeu des forces susceptibles de compenser les forces de cohésion, il est possible d'arracher des électrons aux atomes. Si les électrons passent d'une surface à l'autre, comme le montre très schématiquement la *figure 1*, les deux corps seront chargés. Dans la première étape représentée par la figure, les corps encore séparés sont neutres: ils possèdent chacun autant de charges négatives que positives. Lors du contact intime, deuxième phase, il y a passage d'électrons d'un corps à l'autre, et cela dans les deux sens. Le bilan est, dans l'exemple choisi, au profit du corps A: après séparation des deux faces, troisième étape, il sera chargé négativement.

L'électricité était connue des Grecs de l'antiquité. Il n'est donc pas étonnant de trouver de très vieux travaux à son sujet. En 1757, *Wilcke* [1] décrivait le phénomène de l'électrification par frottement. Il notait que les substances étudiées — telles que l'ambre, le verre, la soie et la laine — pouvaient être classées en une suite reflétant

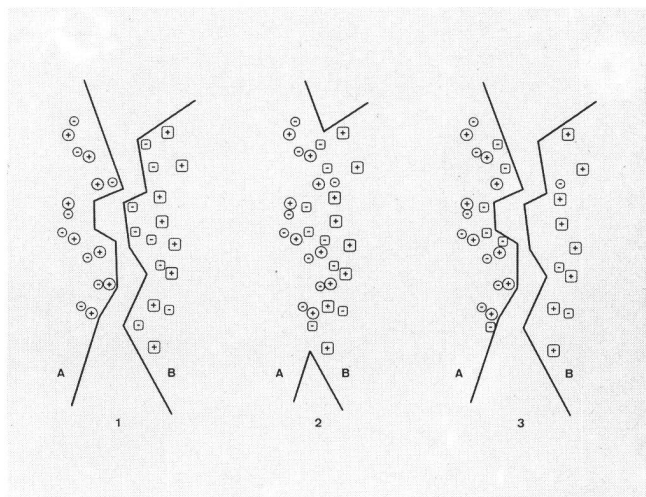


Fig. 1
Trois étapes de la production de charges par contact

l'état de charge obtenu, en passant graduellement du plus négatif au plus positif. Depuis lors, beaucoup de ces séries triboélectriques ont été obtenues. Elles sont différentes l'une de l'autre, tout en présentant des analogies. V. E. Shashoua [2] en publie quatre dont l'une mérite que l'on s'y arrête. Celle-ci a été obtenue par Grüner [3], qui a observé que la charge se produit non seulement lorsque les deux corps frottés sont de nature différente, mais également pour deux corps identiques, mais dont les surfaces frottées diffèrent. La figure 2 illustre cette expérience qui contredit le modèle selon lequel le potentiel de contact serait responsable de l'échange de charges. Le tableau 1 reproduit la série de Grüner.

Tableau I. La série triboélectrique de Grüner

Substance	Potentiel ¹	Substance	Potentiel ¹
Laine	+42	Coton	+ 5
Perlon II	+20	Laiton	0
Dacron	+14	Orlon	- 4
Papier	+12	Caoutchouc dur	-14
Verre, acier	+10	Caoutchouc	-20
Nylon	+ 7		

¹ Unités arbitraires

En modifiant le rapport des surfaces de frottement, on change l'ordre des substances de cette série. Cela expliquerait peut-être les contradictions des autres séries. Si ce rapport vaut 1, du verre frotté sur de l'acier ne se charge pas; par contre, on obtient une charge maximale en frottant de la laine sur du caoutchouc.

Il semble que la constante diélectrique des matériaux en présence joue un rôle. Plus leur différence est grande, plus la charge obtenue sera importante. Mais cette règle ne peut pas être généralisée, [4], [5] et [6]. La résistance électrique d'une substance ne permet pas non plus de caractériser sa propension à se charger, comme cela a été tenté [2]. Une étude récente [7] explique la charge électrique de polymères sur la base de la théorie des bandes du corps solide, en faisant intervenir des niveaux d'énergie de forte densité, conditionnés par des impuretés telles que des stabilisateurs et des restes de catalyseurs.

13 Mesure de la charge, champ et potentiel, condensateur et énergie emmagasinée

Si dans l'expression 1.1.1 on remplace q^* par une charge unité, F représente une force par unité de charge, appelée champ électrique E . Lorsqu'un grand nombre de charges ponctuelles q se distribuent à la surface d'un corps, le champ électrique dû à la charge totale Q sera la somme de tous les champs dus à chaque charge. Très près de la surface, le champ E sera représenté par l'intégrale de l'expression 1.1.1 où $q^* = 1 C$. On peut montrer que l'on obtient

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad 1.3.1$$

où σ est la densité de charge superficielle.

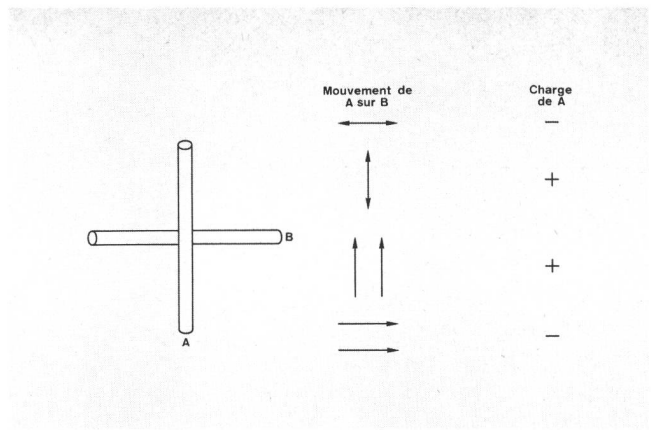


Fig. 2 Influence de la surface de frottement sur le signe de la charge

Il existe dans le commerce des appareils portatifs autonomes qui mesurent ce champ E . Connaissant la surface S du corps, il est alors facile de calculer

$$Q = \epsilon_0 S E \quad 1.3.2$$

Le travail que fournit le champ en déplaçant la charge unité témoin du point A au point B est appelé différence de potentiel entre A et B et vaut

$$U = \frac{Q}{C} \quad 1.3.3$$

Dans cette expression, C est la capacité entre A et B. La mesure de la tension U permet donc également de déterminer la charge totale.

Chacune de ces deux méthodes a son inconvénient. La mesure du champ E pêche par le fait que l'appareil de mesure provoque une distorsion du champ et, en outre, qu'il est sensible à des champs perturbateurs dus à des objets avoisinants, qui peuvent se charger par influence. L'électromètre, en revanche, présente une résistance interne finie, par laquelle la charge s'écoule. On mesure donc une fonction du temps t qu'il faut extrapoler pour $t = 0$.

Une des grandeurs essentielles caractérisant l'effet d'une décharge est l'énergie W emmagasinée dans la capacité C . Elle vaut

$$W = \frac{Q^2}{2C} \quad 1.3.4$$

En exprimant la charge totale Q à partir des expressions 1.3.2 et 1.3.3, on obtient l'énergie en fonction du champ électrique

$$W = \frac{(\epsilon_0 S)^2}{2C} E^2 \quad 1.3.5$$

et en fonction de la tension

$$W = \frac{C}{2} U^2 \quad 1.3.6$$

C'est cette énergie qui est libérée lors de la décharge électrique et qui est responsable des éventuels dégâts causés.

2 Des effets des décharges électrostatiques

21 Décharge du condensateur, décharge apériodique et oscillante, courant et tension moyenne de décharge

La *figure 3* montre le circuit équivalent de la charge et de la décharge d'une personne se déplaçant sur un sol isolant. La charge produite au niveau des chaussures et du sol, ce qui est représenté par G, est accumulée dans le condensateur C. Elle s'écoule ensuite à travers la résistance R_s qui est la somme de la résistance du sol et de celle des semelles, plus éventuellement celle de la couche de cire appliquée sur le sol. La contribution R_E du sol à la résistance R_s se détermine sur la base de la norme DIN 51953. Elle se mesure pour un sol posé, entre une électrode de 20 cm² de surface et la terre, par exemple une conduite d'eau métallique ou l'armature du béton. La décharge peut aussi avoir lieu par le circuit $R_p - L$, dans le cas où l'on touche une poignée de porte ($L = 0$) ou un appareil mis à terre ($L = 0$). Si la personne porte un bracelet de mise à terre, l'interrupteur I est toujours fermé et R_p représente alors la résistance du bracelet. On peut, en général, négliger l'une des deux résistances, R_s et R_p , par rapport à l'autre.

Les lois de Kirchhoff permettent d'écrire

$$L \ddot{Q} + R \dot{Q} + \frac{1}{C} Q = 0 \quad 2.1.1$$

En tenant compte des conditions initiales $Q(0) = Q_0$ et $\dot{Q}(0) = 0$, la résolution de cette équation différentielle conduit à des expressions différentes du courant $I(t)$ suivant que la décharge est apériodique ou oscillante. Dans le cas de la décharge apériodique, on obtient

$$I(t) = \frac{U_0}{rL} \exp\left(-\frac{R}{2L}t\right) \sinh(rt) \quad 2.1.2$$

Le courant de pointe s'obtient en résolvant $dI/dt = 0$. Le calcul fournit la valeur de t_{\max} pour laquelle le courant est maximal et que l'on introduit dans 2.1.2

$$t_{\max} = \frac{1}{r} \operatorname{arctgh} \frac{2Lr}{R} \quad 2.1.3$$

Dans ces expressions

$$r = \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}} \quad 2.1.4$$

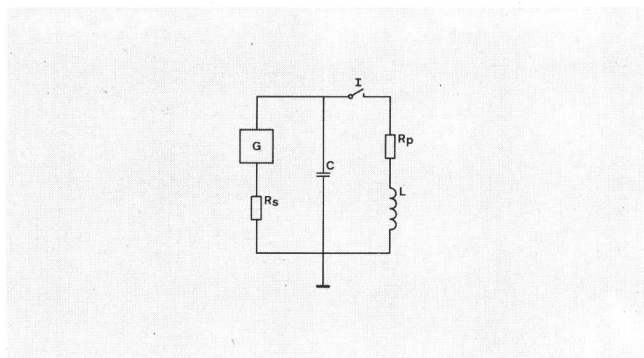


Fig. 3 Décharge du condensateur C à travers R_s ou R_p et L

et $U_0 = \frac{Q_0}{C}$ selon 1.3.3.

Si la décharge est oscillante, les fonctions hyperboliques sont remplacées par les fonctions trigonométriques correspondantes

$$I(t) = \frac{U_0}{\omega^* L} \exp\left(-\frac{R}{2L}t\right) \sin \omega^* t \quad 2.1.5$$

$$t_{\max} = \frac{1}{\omega^*} \operatorname{arctg} \frac{2L\omega^*}{R} \quad 2.1.6$$

La pseudo-fréquence ω^* s'écrit

$$\omega^* = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \quad 2.1.7$$

La tension moyenne qui apparaît aux bornes de l'inductance L est responsable de la perturbation d'une installation. Si l'on calcule sa valeur pour l'intervalle de temps 0 à Δt , on obtient

$$V_m = \frac{U_0}{\gamma \Delta t} \exp\left(-\frac{R}{2L} \Delta t\right) F(\gamma \Delta t) \quad 2.1.8$$

où

$\gamma = r$ et $F = \sinh$ pour le cas apériodique et $\gamma = \omega^*$ et $F = \sin$ pour la décharge oscillante. La *figure 4* montre l'allure de ces deux types de décharge. Pour le cas où la décharge se fait à travers les souliers ou un bracelet, on a pour le courant de décharge simplement

$$I(t) = \frac{U_0}{R_s} \exp(-t/RC) \quad 2.1.9$$

Ces résultats seront exploités au paragraphe 24, mais auparavant il nous faut des valeurs représentatives de C et de U_0 .

22 Capacité du corps humain

Il est instructif d'estimer la capacité du corps humain sur la base du modèle schématisé par la *figure 5*. La sphère représente le corps humain. Sa surface vaut, se-

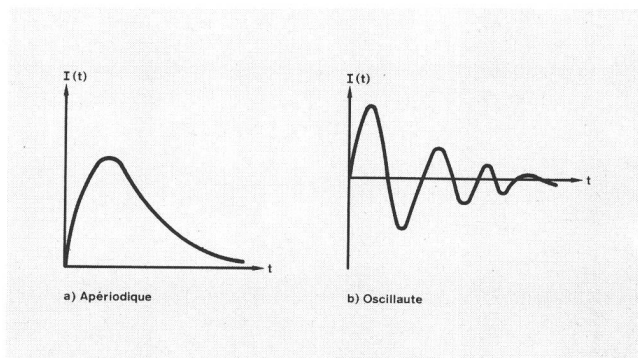


Fig. 4 Allure de la décharge

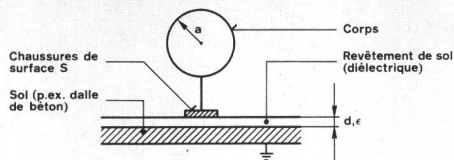


Fig. 5
Calcul de la capacité du corps humain

lon [8], $S = 2 \text{ m}^2$ pour un homme de stature normale. On en tire la valeur du rayon a de la sphère que l'on introduit dans l'expression de sa capacité C_c et l'on obtient

$$C_c = 4 \pi \epsilon_0 a = 44 \text{ pF}$$

La capacité des chaussures est celle d'un condensateur à plaques parallèles de surface $S = 0,0446 \text{ m}^2$ pour des chaussures usuelles, d'écartement qui peut être estimé à $d = 0,01 \text{ m}$. Pour la constante diélectrique, on peut prendre $\epsilon = 4$ selon [9]

$$C_s = \epsilon \epsilon_0 \frac{S}{d} = 157 \text{ pF}$$

La capacité du corps est la somme de ces deux valeurs

$$C_h = 201 \text{ pF}$$

La détermination expérimentale peut être faite sur la base du dispositif de la figure 6 et de l'expression 2.1.9. On détermine le temps caractéristique de la décharge de la combinaison C_h en parallèle avec la capacité d'entrée C_i de l'instrument de mesure à travers les deux résistances R_h des chaussures et du sol, en parallèle avec la résistance d'entrée de l'instrument de mesure. Appelons ce temps τ . On répète l'expérience après suppression de C_h et de R_h et l'on obtient τ_i . Le calcul de C_h fournit

$$C_h = \frac{\tau (R_h + R_i)}{R_h R_i} - \frac{\tau_i}{R_i} \quad 2.2.1$$

Avec les valeurs typiques obtenues au laboratoire

$$\begin{aligned} R_i &= 4,2 \cdot 10^{11} \Omega & \tau_i &= 69,2 \text{ s} \\ R_h &= 3,5 \cdot 10^{11} \Omega & \tau &= 79,9 \text{ s} \end{aligned}$$

on calcule

$$C_h = 221 \text{ pF}$$

Cette valeur est en excellent accord avec celle estimée plus haut. Oxé et al. [10] reportent des valeurs comprises entre 162 et 313 pF. Dans la suite, on travaillera avec 220 pF.

23 Valeurs expérimentales de la tension électrostatique

Les valeurs de la tension électrostatique U_0 mesurées, soit au laboratoire, soit dans les locaux de l'entreprise couvrent un spectre extrêmement vaste s'étendant de la dizaine de volts à plusieurs dizaines de kilovolts. Les enregistrements de la tension montrés à la figure 7 représentent des cas fréquents pour trois types de sols et deux sortes de chaussures. Selon notre expérience, pour les sols non spécialement traités, tels que le linoléum, le chlorure de polyvinyle et les fibres synthétiques, en combinaison avec des chaussures usuelles, le domaine de 1000...5000 V est particulièrement bien représenté. Pour le calcul des valeurs de pointe du courant et de la tension moyenne, il est donc légitime de prendre $U_0 = 2 \text{ kV}$ comme valeur représentative de la tension électrostatique observée dans les cas où l'on ne prend aucune précaution spéciale. L'on verra que des mesures de protection sont indispensables.

24 Valeurs du courant de pointe et de la tension moyenne auxquelles on peut s'attendre

Lors de la décharge d'une personne touchant un objet conducteur, la résistance R_p de la figure 3 prend une valeur correspondant à celle de la peau. Le spectre de valeurs citées dans la littérature s'étend pratiquement de 0...18 kΩ [11]. Pour la «main artificielle» du CISPR $R_p = 500 \Omega$ et $C_h = 200 \text{ pF}$, tandis que la NASA admet $R_p = 1,5 \text{ k}\Omega$ et $C_h = 200 \text{ pF}$. Nous ferons les calculs pour différentes valeurs de R_p et $C_h = 220 \text{ pF}$. La valeur de L est très sensible à la géométrie du fil de mise à terre. Si ce dernier est rectiligne, on peut admettre $0,5 \leq L \leq 3 \mu\text{H}$ [12].

Le calcul est fait en utilisant les formules établies au paragraphe 21. La figure 8 montre l'allure du courant de pointe pour trois valeurs de R_p , en fonction de L . Pour apprécier l'effet de ces courants considérables mais de courte durée, il faut considérer la tension moyenne durant l'intervalle Δt , apparaissant aux bornes de l'inductance L . Si Δt est le temps de réaction du circuit soumis à la décharge, et si l'on admet qu'une tension de l'ordre du volt suffit pour produire une commutation, on constate en examinant la figure 9 que la majorité des circuits seront perturbés. Pour le couple $L = 10 \mu\text{H}$ et $R = 10^2 \Omega$, la décharge oscille à une fréquence d'environ 3 MHz. Bien que le courant de pointe soit inférieur au μA dans ce cas, la tension moyenne se situe entre 20 et 40 V et tombe à 1 V pour Δt supérieur à 0,5 μs .

Les mécanismes conduisant à la destruction de circuits intégrés sont multiples et encore trop mal connus

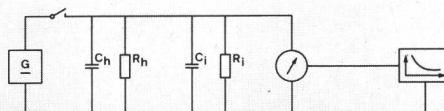


Fig. 6
Détermination expérimentale de C_h

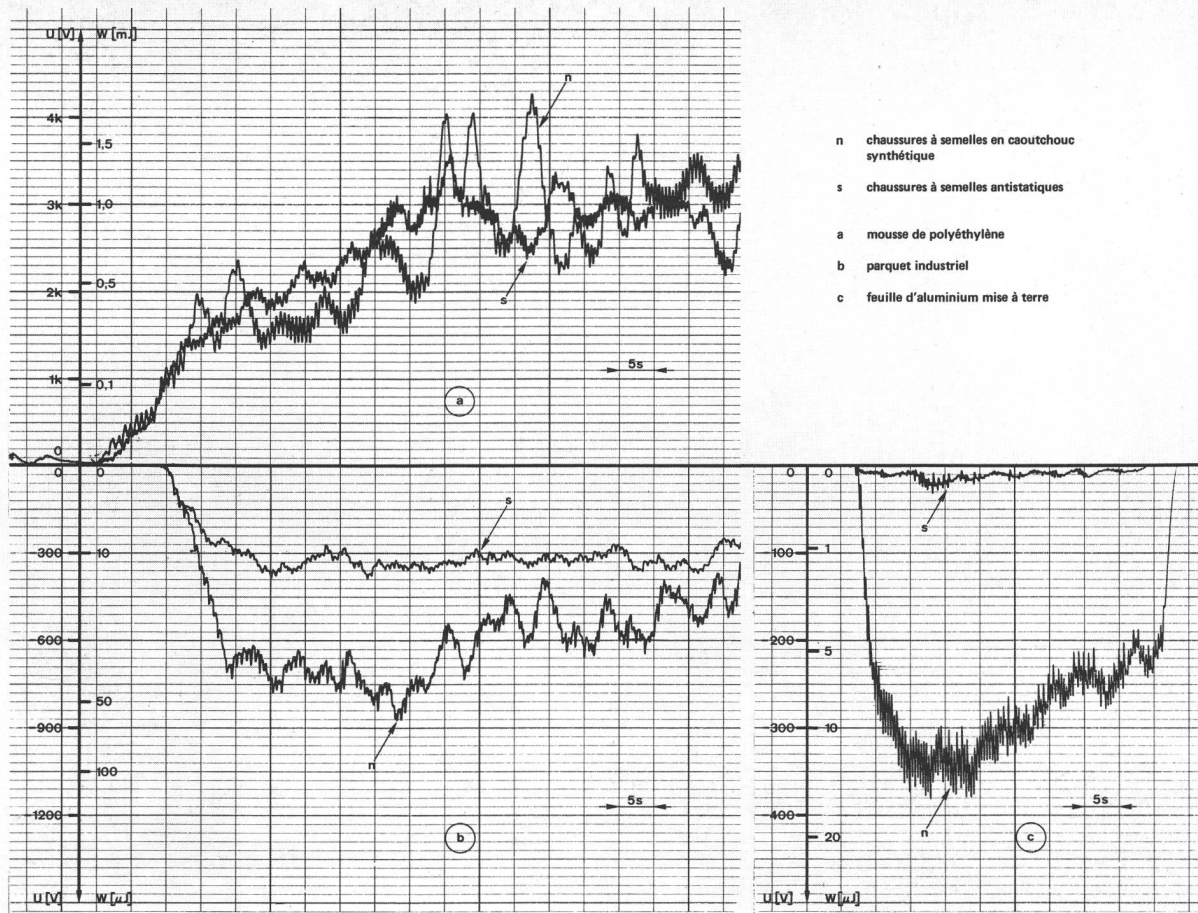


Fig. 7
Tension et énergie électrostatique lors de la marche

dans le détail pour qu'il soit possible de chiffrer les dégâts causés par les décharges électrostatiques sur la base de l'analyse faite ci-dessus.

25 Exemples d'effets gênants, de perturbations et de dégâts causés par l'électricité statique

Les exemples de perturbations de processus de travail et d'accidents dus à l'électricité statique ne manquent

pas et la littérature abonde de citations. C'est la raison pour laquelle on n'établira pas ici de liste exhaustive, mais l'on se bornera à donner quelques cas typiques intéressants plus spécialement l'Entreprise des PTT.

Les effets gênants sont bien connus de tous. Il s'agit simplement des décharges sensibles lorsqu'on touche une poignée de porte, un robinet ou la main d'une autre personne, après avoir marché sur un sol isolant. La limite de sensibilité varie fortement d'un individu à l'au-

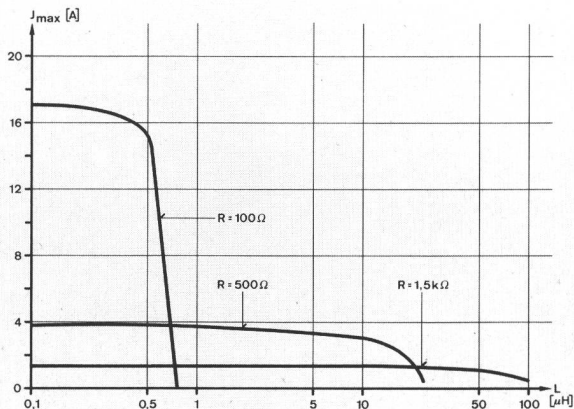


Fig. 8
Valeur de pointe du courant de décharge pour $U_0 = 2 \text{ kV}$

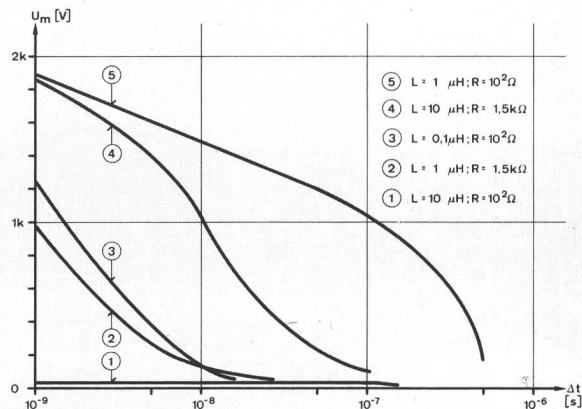


Fig. 9
Tension moyenne de décharge pour l'intervalle Δt ($U_0 = 2 \text{ kV}$)

tre. Elle dépend de plusieurs facteurs, tels que l'état de fatigue, la nervosité, etc. On peut la situer entre 1000 et 2000 V, ce qui correspond à une énergie comprise entre 0,1 et 0,4 mJ. De telles valeurs ne sont en général atteintes que sur des revêtements de sols en matière synthétique avec des chaussures normales. Si l'on porte des souliers à semelles antistatiques, ces charges ne sont possibles que sur des sols particulièrement mauvais tels que la mousse de polyéthylène (fig. 7). Ces décharges ne présentent aucun danger pour la santé même si, comme on l'a vu au paragraphe 24, les courants de pointe atteignent plusieurs dizaines d'ampères. Cela est dû à la durée extrêmement courte des impulsions.

Les cas où la charge électrostatique perturbe le déroulement d'un processus de travail se rapportent essentiellement à deux effets. Dans une machine de triage de lettres ou de chèques, les forces de Coulomb (voir 11) sont responsables de l'attraction par la machine d'une lettre ou d'un chèque chargé. De ce fait, l'objet peut rester bloqué et nécessiter l'arrêt de la machine [13]. Le deuxième effet est dû à la décharge et a été expliqué au paragraphe 24. Il s'agit de malfunctions de machines compliquées telles que des processeurs. Ces phénomènes ont été abondamment décrits dans la littérature [11], [14], [15] et [16]. Pour fixer les idées, citons un exemple concret. Le service télégraphique utilise de telles machines électroniques dans la mémoire desquelles on stocke les télégrammes avant de les expédier. Une décharge électrostatique peut effacer ou rendre inaccessible tout ou une partie du message emmagasiné. Dans les cas graves, le télégramme peut être définitivement perdu.

La sensibilité des machines se détermine en déchargeant un condensateur de 200 pF à travers une résistance de 1,5 kΩ. L'équation 1.3.6 permet de calculer l'énergie libérée. L'énergie minimale pour laquelle des perturbations sont observées dépend de l'endroit où se produit la décharge. Le *tableau II* montre pour une même machine les différences considérables que l'on observe.

Tableau II. Seuils de sensibilité d'une machine PDP 11 [μJ]

Bâti	Nu	Laqué
Processeur	45...60	> 180
Console	5...10	> 180

La valeur de 180 μJ correspond à la limite supérieure instrumentale qui n'a pas pu être dépassée pour cet essai. Les endroits nus ont pu être rendus insensibles par isolation au moyen d'une bande autocollante. Cela revient à ajouter une résistance de très grande valeur (quelques MΩ) en série avec le condensateur, ce qui entraîne une réduction considérable du courant de pointe, ainsi que le montrent les équations 2.1.2 et 2.1.5. Les malfunctions constatées ici consistent en omissions et adjonctions de caractères lors du «print out». Il faut remarquer qu'aucune erreur de calcul n'a pu être produite lors de cet essai, ce qui indique que l'unité centrale est bien protégée. La figure 7 b montre que sur le parquet industriel des valeurs dangereuses de la charge sont atteintes même avec des chaussures antistatiques.

L'exploitation de processeurs nécessite donc la pose de sols spéciaux. Les cas de dégâts graves sont heureusement rares au sein de l'Entreprise des PTT. L'industrie du pétrole et l'industrie chimique durent étudier en détail le phénomène de l'électricité statique, afin de trouver un palliatif aux explosions et incendies de réservoirs de pétrole et autres liquides inflammables. Chaque fois que de tels liquides, des gaz porteurs de particules solides (aérosols) ou de gouttelettes (brouillards), ou des poudres sont transportés sous pression dans un tuyau, ou dispersés comme dans le cas de la peinture au pistolet, il y a risque de production de charges électriques par frottement, à la manière de ce qui se passe lorsque deux couches d'air frottent l'une sur l'autre pour charger un nuage. L'énergie électrique ainsi accumulée suffit, dans la plupart des cas, pour allumer un mélange explosif. Le minimum d'énergie nécessaire pour la mise à feu d'un mélange d'essence et d'air est de 250 μJ [17]. Il peut aussi se faire qu'une personne chargée cause un incendie en manipulant une bouteille d'essence. La figure 7 a et le *tableau III* montrent que l'énergie nécessaire est facilement atteinte, même sur un sol de planelles Klinker dont les propriétés électrostatiques sont excellentes.

Tableau III. Energies W atteintes sur des planelles Klinker

Semelles	W [μJ]
Cuir	2,5
Caoutchouc 1	63
Caoutchouc 2	91
Caoutchouc 3	140
Caoutchouc 4	390

Un autre problème intéressant l'Entreprise des PTT est celui des locaux d'accumulateurs. Ces éléments, qui se trouvent en régime de charge flottante, produisent constamment du gaz tonnant. Ce dernier est le mélange idéal d'hydrogène et d'oxygène dû à l'électrolyse de l'eau. L'énergie nécessaire pour allumer ce gaz est extrêmement faible et vaut 20 μJ [18]. Les valeurs du *tableau III* montrent qu'il est dangereux de pénétrer dans un local d'accumulateurs en portant des chaussures à semelles de caoutchouc.

En ce qui concerne la destruction d'éléments semi-conducteurs par des décharges électrostatiques, la littérature ne manque pas: voir par exemple [14], [15] et [16]. L'étude des dégâts causés dans ces éléments est rendue très difficile par le fait que, dans bien des cas, la défaillance n'est pas immédiate, mais la décharge a pour effet d'écourter la durée de vie. Dans les circuits CMOS, par exemple, l'isolation des électrodes de la porte métallique est assurée par une couche d'oxyde très mince qui peut être endommagée par une différence de potentiel de 60 V déjà, ce qui correspond à une énergie de $W = 0,4 \mu\text{J}$ si $C = 220 \text{ pF}$. Certains auteurs indiquent des seuils encore plus bas. Les circuits TTL de la série 74 N, par exemple, peuvent être détruits par des décharges où $W = 0,001$ à $0,01 \mu\text{J}$ [14]. La figure 7c montre que ces valeurs extrêmement faibles sont atteintes lors de la marche sur une feuille métallique mise à terre, même avec des chaussures antistatiques. Pour l'étude des mesures de protection, on peut, dans la majorité des cas, se baser sur les valeurs de l'énergie limite du *tableau IV*.

Tableau IV. Seuils d'énergie relatifs à l'endommagement de composante [μJ]

P-MOS, N-MOS Standard TTL LPS-TTL	60
C-MOS	25
Amplificateurs opérationnels bipolaires pour signaux faibles	5

Il est possible de protéger les circuits par des diodes ou d'autres dispositifs spéciaux, qui font que les seuils s'élèvent à des valeurs supérieures. Le revers de la médaille est que le temps de réponse du circuit en souffre. Toujours est-il que, dans les ateliers de montage et de réparation, les valeurs du tableau restent applicables.

3 Protection contre les décharges électrostatiques

31 Principes généraux

Il s'agit de trouver la ou les conditions pour lesquelles la charge accumulée lors de la marche est minimale ou du moins inférieure à une valeur limite. Pour dégager les principes, il n'est pas nécessaire d'effectuer le calcul dans toute sa rigueur et l'on peut faire l'hypothèse simplificatrice que la résistance de décharge R dont il fut question au paragraphe 21 est constante. Supposons, en outre, que la fréquence f des pas est également constante

$$f = \frac{1}{\Delta t}$$

Admettons qu'à chaque pas une quantité de charge ΔQ soit produite. Juste avant le deuxième pas, au temps $t = \Delta t - \varepsilon$, la charge générée au premier, c'est-à-dire ΔQ , a diminué selon l'équation 2.1.9

$$Q(\Delta t - \varepsilon) = \Delta Q e^{-\Delta t/RC} = \Delta Q r \quad 3.1.1$$

Au moment où le deuxième pas est fait, c'est-à-dire au temps $t = \Delta t$, on ajoute ΔQ

$$Q(t) = Q(\Delta t - \varepsilon) + \Delta Q = (r+1) \Delta Q \quad 3.1.2$$

La poursuite de ce raisonnement conduit à l'expression pour la charge accumulée au n -ième pas

$$Q_n = \Delta Q \frac{1 - r^n}{1 - r} \quad 3.1.3$$

Au bout d'un nombre infini de pas, on a

$$Q_\infty = \lim_{n \rightarrow \infty} Q_n = \frac{\Delta Q}{1 - r} \quad 3.1.4$$

puisque r est inférieure à 1. Cette expression n'est valable bien entendu que si aucun effet limitatif, tel que le dépassement de la tension de claquage du tapis, n'entre

en jeu. Selon l'expression 1.3.4, l'énergie accumulée sera

$$W_\infty = \frac{\Delta Q^2}{2C} \frac{1}{(1-r)^2} = \frac{\Delta W}{(1-r)^2} \quad 3.1.5$$

Si l'on veut maintenir W_∞ en dessous d'une certaine limite, une condition sine qua non est, par conséquent, que ΔW soit également inférieur à cette valeur limite, puisque par définition $0 \leq r \leq 1$. L'expérience montre que le domaine de variation de ΔW s'étend de quelques dixièmes de μJ à quelques mJ . On peut cependant admettre, pour les combinaisons de sols et de chaussures connues, que si la résistance électrique du sol est petite, ΔW sera aussi petit. Il faut toutefois répéter ici que la corrélation entre ces deux grandeurs n'est pas satisfaisante dans le cas général (voir le paragraphe 12 et la référence [2]). En outre, ΔW dépend de l'état de surface, c'est-à-dire de la propreté des deux matières en présence. Une couche de cire dénature la surface du sol de manière qu'il faudra considérer la position de la cire dans la série triboélectrique plutôt que celle du sol. La grandeur ΔW ne peut donc pas être maintenue sous contrôle si l'on veut éviter de prescrire le port d'un type de chaussures bien déterminé en même temps que le type de sol, puisqu'elle dépend de cette combinaison, comme on l'a vu au paragraphe 12. Il en découle l'impossibilité de garantir une protection absolue contre les effets de l'électricité statique.

L'expression 3.1.5 montre en outre que W_∞ est d'autant plus petit que r est proche de 0. Mais r tend vers 0 si Δt devient grand, c'est-à-dire si la fréquence des pas devient petite, ou si le produit $R \cdot C$ devient petit. Or, le seul paramètre qu'on puisse varier dans certaines limites est la résistance de décharge R , mais à condition de pouvoir, soit imposer le type de chaussures et le type de sol puisque R est la somme de la résistance des chaussures et de celle du sol, soit prescrire une mise à la terre des personnes par l'intermédiaire d'une résistance de décharge parallèle R_p , ainsi que le montre la figure 3. On en est donc réduit à limiter la liberté de l'individu dans le but d'assurer une sécurité minimale. Mais cela n'est pas possible dans tous les cas, en particulier lorsqu'il s'agit des clients de l'entreprise.

Les considérations faites ci-dessus obligent à renoncer à une protection absolue. Il faut, par conséquent, se contenter de rendre rare l'événement désagréable. L'on est amené à adopter le point de vue selon lequel le temps t^* , qui s'écoule entre le moment du dernier pas et celui où la décharge se produit, n'est pratiquement jamais nul. Autrement dit, il faut compter avec le fait que W_∞ ne se transmet pas intégralement à l'objet sensible, mais qu'une partie de cette énergie aura le temps de s'écouler. L'énergie transmise est alors

$$W_{tr} = W_\infty e^{-t^*/RC} \quad 3.1.6$$

Le principe est maintenant de choisir R sur la base des distributions des valeurs de W_∞ et de t^* observées dans la pratique, de manière que l'énergie transmise lors de

la décharge soit plus petite que le seuil de sensibilité dans un pourcentage suffisant des cas.

Examinons, à titre d'illustration de ce qui a été dit plus haut, la figure 7. Lorsque la résistance de décharge est entièrement déterminée par le sol, le port de chaussures antistatiques n'améliore en rien la situation (fig. 7a). Dans l'exemple choisi, la résistance du sol vaut $10^{13} \Omega$, celle des chaussures normales $3,5 \cdot 10^{11} \Omega$ et celle des semelles antistatiques $10^6 \Omega$. Lorsque la résistance du sol se situe entre celles des deux types de semelles, la différence d'une semelle à l'autre est évidente (fig. 7b), la résistance du parquet est de $4 \cdot 10^8 \Omega$. Selon l'expérience acquise dans notre laboratoire, la charge est réduite en général d'un facteur compris entre 10 et 50, lorsqu'on porte les chaussures spéciales; dans des cas isolés, ce facteur atteint 150. Pour la feuille d'aluminium mise à terre, c'est-à-dire avec $R_{\text{sol}} = 0 \Omega$, l'effet des chaussures antistatiques est le plus spectaculaire (fig. 7c). Avec des chaussures normales, des énergies dangereuses pour des composants électroniques sont atteintes (tab. IV). L'énergie d'allumage du mélange tonnant est presque atteinte, de sorte que sur un sol réel posé dans les locaux d'accumulateurs pour lesquels la résistance n'est jamais nulle, les chaussures antistatiques devront être prescrites. Dans les ateliers de réparation pour l'électronique, il faudra parallèlement imposer le bracelet de mise à terre.

32 Influence de l'humidité de l'air

Lorsque l'humidité de l'air se condense et forme un film à la surface d'un isolant, l'eau ayant dissous des sels solubles contenus dans les poussières abaisse de manière très sensible la résistance superficielle. *McLeod* et al. [16] observent que la résistivité varie selon une loi approximativement logarithmique avec l'humidité relative. La résistivité diminue d'un peu plus d'une décade lorsque l'humidité augmente de 20 % pour le cas du coton. Le tableau V donne quelques valeurs des énergies accumulées W_{∞} lors de la marche sur différents sols, tirées de [16], en fonction de l'humidité relative h. r. Elles sont calculées sur la base d'une capacité de 250 pF.

Tableau V. Energies accumulées lors de la marche [μJ]

Sol	h. r.			
	30 %	40 %	50 %	60 %
Synthétique	3380	1440	400	100
Laine	1200	550	240	100
Antistatique	500	240	40	5
Synthétique traité	200	60	5	< 1

L'on notera l'influence énorme qu'a l'humidité relative sur la valeur de cette énergie, en même temps que la nécessité absolue de la maintenir sous contrôle. Si, par exemple, le sol synthétique traité était posé dans un local d'accumulateurs où la limite est 20 μJ , il faudrait maintenir l'humidité au-dessus de 50 %, ce qui pourrait présenter des problèmes. Comme dans un atelier d'électronique il est difficile de maintenir l'humidité au-dessus de 45 à 50 %, le bracelet de mise à terre sera de rigueur (voir les valeurs du tab. IV).

4 Conclusions

L'énergie électrostatique accumulée sur une personne se mouvant sur un sol non contrôlé atteint en général des valeurs supérieures aux limites de sensibilité des installations électroniques modernes et aux limites d'allumage de toute une série de gaz inflammables. Les courants de décharge peuvent s'élever à plusieurs dizaines d'ampères et les tensions moyennes à plusieurs kilovolts. La protection absolue contre les suites quelquefois graves des décharges n'est possible qu'au prix de mesures draconiennes souvent irréalisables. Cela a amené la Division des Recherches et du Développement de l'Entreprise des PTT à proposer la classification suivante de ces locaux, dans lesquels les mesures de protection sont adaptées au but poursuivi.

La première classe est constituée des locaux où il s'agit simplement d'éviter des décharges désagréables pour les clients et le personnel. Dix années d'expérience ont permis de fixer la valeur de la limite supérieure pour la résistance du sol à $10^{10} \Omega$. Avec cette valeur, il est très rare d'observer des énergies qui dépassent la limite de sensibilité. Cette catégorie englobe tous les locaux où une protection spéciale n'est pas demandée, tels que les endroits accessibles à la clientèle, les bureaux administratifs et ainsi de suite.

Dans les locaux où sont installées des machines sensibles, des processeurs, des calculatrices, etc., la limite a été fixée à $10^8 \Omega$. Dans ces conditions, la probabilité d'observer des perturbations est très faible, même avec des chaussures normales. Dans ce cas, les chaussures antistatiques sont recommandées, mais il ne sera nécessaire de les prescrire que lorsque les pannes sont trop fréquentes ou lorsqu'elles doivent être évitées à tout prix. Ce sera notamment le cas si une perturbation risque de paralyser un central téléphonique surveillé et commandé par un processeur.

Dans les locaux où sont exploités des accumulateurs, les exigences sont plus strictes, car il s'agit d'empêcher coûte que coûte une explosion éventuelle. La résistance du sol doit être inférieure à $10^7 \Omega$. L'accès à ces locaux n'est autorisé qu'au personnel compétent et les chaussures spéciales sont obligatoires.

La situation est analogue dans les ateliers d'entretien et de réparation pour l'électronique, surtout là où l'on manipule les composants ultrasensibles. La résistance limite du sol a la même valeur que pour les locaux de la deuxième classe ci-dessus. Les chaussures antistatiques sont obligatoires aux places de travail, le bracelet de mise à terre doit être utilisé. Toute une série de mesures complémentaires est prescrite: emballages protecteurs pour les composants délicats, qui servent aussi bien au stockage qu'au transport, équipement spécial des places de travail et règles de comportement adéquates. Une description détaillée de ces mesures est donnée dans [19]. Des précautions analogues doivent être respectées par le personnel procédant à l'échange de circuits délicats, dans les centraux téléphoniques, par exemple.

Les composants, les circuits et les appareils sensibles devront être marqués spécialement afin d'inciter le personnel à observer les règles. En outre, l'Entreprise des PTT demande à ses fournisseurs de protéger autant que

possible les équipements et n'autorisera finalement que ceux qui répondent à certains critères de résistance aux influences électromagnétiques.

Pour les installations déjà existantes, ne répondant pas aux exigences, il n'est pas toujours possible de modifier les locaux en posant un sol mieux adapté, sans gêner outre mesure le trafic et sans occasionner de grands frais. C'est l'examen de chaque cas particulier qui montrera l'ampleur des transformations nécessaires. Souvent, il suffira d'aménager des zones protégées aux alentours des objets sensibles.

Il va de soi que l'humidité de l'air doit être contrôlée et maintenue au-dessus de 40 %. Ce problème se pose surtout durant les mois d'hiver.

Un groupe de travail a été créé qui étudie les questions soulevées ici. Un projet de prescriptions concernant la construction et la manipulation d'électronique sensible a été soumis aux différents fournisseurs. La version définitive pourra vraisemblablement être éditée dans le courant de l'année 1979.

Bibliographie

- [1] *Wilcke J. C.* Disputatio physica experimentalis de electricitatibus contrariis. Rostock 1757.
- [2] *Shashoua V. E.* Static Electricity in Polymers. New York, Journal of Polymer Science 33 (1958) pp. 65—85.
- [3] *Grüner H.* Berlin, Faserforschung und Textiltechnik 4 (1953) S. 249.
- [4] *Coehn A. und Curo Z.* Studien zur Berührungselektrizität; die Ladung von Metallen gegen Dielektrika. Braunschweig, Zeitschrift für Physik 29 (1924) S. 186.
- [5] *Arthur D. F.* Manchester, Journal of the Textile Institute Transactions 46 (1955) 12, pp. 1721.
- [6] *Henry P. S.* Textile Institute Conference on Static Electricity in Textiles. Zürich, Sept. 13—17, 1956.
- [7] *Bauser H. et al.* Brüssel, Advances in Static Electricity 1 (1971) 1.
- [8] Wissenschaftliche Tabellen. Hrsg. J. R. Geigy AG, Basel 1969.
- [9] *Runge F.* Einführung in die Chemie und Technologie der Kunststoffe. Berlin, Akademie-Verlag, 1952.
- [10] *Oxé J. et al.* Die Prüfung und Beurteilung des elektrostatischen Verhaltens textiler Bodenbeläge. Basel, Textilveredlung 7 (1972) 7, S. 417.
- [11] *Kirk W. J. et al.* Eliminate static damage to circuits. Electronic Design 24 (1976) 7, pp. 80.
- [12] Reference data for radioengineers. New York, ITT, 6th edition.
- [13] Post Office Research Department. London, Report No 464 (1975).
- [14] *Ulrich F.* Funktionsstörungen von Geräten und Zerstörung von integrierten Schaltungen durch elektrostatisch aufgeladene Personen. Berlin, Nachrichtentechnische Zeitschrift 26 (1973) 10, S. 454.
- [15] *Costache G. et al.* Zeroing on static discharge. Ottawa, Telesis 5 (1977) 5, pp. 148.
- [16] *McLeod T. S. et al.* Protection of dataprocessing equipment against static electricity discharges. London, Electronics & Power 24 (1978) 7, pp. 521.
- [17] *Klinkenberg A. and van der Minne J. L.* (ed.) Electrostatics in the petroleum industry. Amsterdam 1958.
- [18] Gas Encyclopedia. Elsevier, Air Liquide.
- [19] *Hämmerli S.* Gefährdung von Halbleiterbauteilen durch elektromagnetische Störeinflüsse. Zürich, Siemens-Albis Berichte 30 (1978) 1, S. 3.