

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: 8

Artikel: Probleme im Zusammenhang mit dem Phänomen der elektrostatischen Ladungen

Autor: Nadler, Carl Jürg

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-875564>

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: 11.01.2026

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

Probleme im Zusammenhang mit dem Phänomen der elektrostatischen Ladungen¹

Carl Jürg NADLER, Bern

537.2:621.316.9:621.319

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.

Problèmes soulevés par le phénomène de l'électricité statique

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 Herkunft und Messung der statischen Ladungen

11 Einleitung und Coulombsches Gesetz

Die Gesetzmässigkeiten der Elektrostatik beruhen auf dem Coulombschen Gesetz, das die Kraft auf zwei Punktladungen q und q^* in Funktion ihres Abstandes r angibt:

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

Man erhält F in Newton, wenn die Ladungen in Coulomb ($1 \text{ C} = 1 \text{ As}$) und der Abstand r in Metern eingesetzt werden. Die Dielektrizitätskonstante beträgt:

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

Die Kraft auf Ladungen gleichen Vorzeichens ist abstossend und bewirkt, dass sich Ladungen in einem Körper so weit als möglich voneinander entfernen. Auf Spitzen der Oberfläche sammeln sich also grosse Teile der Ladung an, da Spitzen in gewissem Sinn die entferntesten Punkte der Oberfläche darstellen.

Bringt man von aussen her eine Ladung q^* von entgegengesetztem Vorzeichen in die Nähe einer stark geladenen Spitze, so wird die Kraft zwischen ihr und der Ladung q der Spitze nach Gleichung 1.1.1 sehr gross. Diese Kraft kann so gross werden, dass Teile der Spitzenladung herausgerissen werden und in die Richtung von q^* fließen. Dabei wird ein ionisierter Schlauch gebildet, der in Luft als bläulicher Blitz erscheint. Auf diesem als Spitzeneffekt bezeichneten Phänomen beruhen die Blitzableiter.

Ein häufiger Fall von Spitzenentladung tritt auf, wenn jemand nach einer Türklinke oder einem Wasserhahn usw. greift, nachdem durch das Begehen eines synthetischen Bodenbelages eine Aufladung stattgefunden hat.

Die Wirkung eines solchen Miniblitzes erstreckt sich vom unangenehmen Schreck bis zur Zerstörung von elektronischen Komponenten oder gar zum Ausbruch eines Brandes.

12 Bildung der statischen Ladung, Reibungselektrizität

Die Coulombsche Kraft bewirkt zum Teil den Zusammenhalt der Atome durch die Anziehung zwischen den negativen Elektronen und dem positiven Kern. Durch äussere Einwirkungen, die diese Anziehung überwinden, ist es möglich, Elektronen von den Atomen abzu ziehen. Wechseln diese Elektronen von einer Oberfläche zur anderen, so werden beide Körper geladen. Der Vorgang ist sehr schematisch in *Figur 1* dargestellt. In der ersten Phase sind die noch getrennten Körper neutral, sie besitzen also gleich viel positive wie negative Ladungen. Durch engen Kontakt in der zweiten Phase finden Übertritte von Elektronen in beiden Richtungen statt. Die Bilanz fällt im dargestellten Beispiel zugunsten des Körpers A aus, der nach der Trennung negativ geladen ist (dritte Phase).

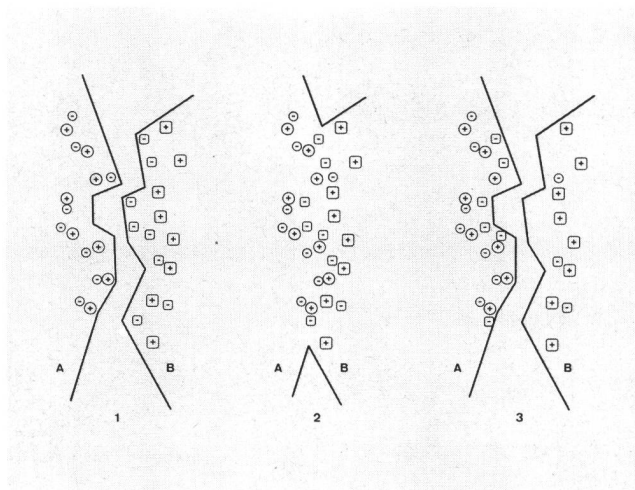


Fig. 1
Die drei Phasen der Erzeugung von Berührungsladungen

¹ Die französische Fassung dieses Artikels ist in den Techn. Mitt. PTT Nr. 6/79, S. 213...221, erschienen.

Die Elektrizität war schon den alten Griechen bekannt. Es ist deshalb nicht erstaunlich, dass Arbeiten über dieses Gebiet schon lange existieren. Im Jahre 1757 beschrieb *Wilcke* [1] das Phänomen der Reibungselektrizität und stellte fest, dass die betrachteten Stoffe — Bernstein, Glas, Seide und Wolle — nach der erzielten Ladung von stark negativ bis stark positiv eingereiht werden können. Seither sind viele «reibungselektrische» Reihen aufgestellt worden. Auch wenn sie Unterschiede im Detail aufweisen, sind sie grundsätzlich ähnlich. *V. E. Shashoua* veröffentlicht in [2] vier solche Reihen, von denen eine bemerkenswert ist. Sie stammt von *Grüner* [3], dessen Beobachtungen zeigen, dass die Ladungstrennung nicht nur zwischen verschiedenen Stoffen auftritt, sondern auch zwischen gleichen bei unterschiedlichem Inhalt der geriebenen Flächen. *Figur 2* illustriert diesen Versuch, der der Erklärung der Aufladungen durch das Kontaktpotential widerspricht. *Tabelle 1* zeigt die Reihe von *Grüner*.

Tabelle 1. Reibungselektrische Reihe von *Grüner*

Stoff	Potential*	Stoff	Potential*
Wolle	+ 42	Baumwolle	+ 5
Perlon II	+ 20	Messing	0
Dacron	+ 14	Orlon	- 4
Papier	+ 12	Hartkautschuk	- 14
Glas, Stahl	+ 10	Kautschuk	- 20
Nylon	+ 7		

* Willkürliche Einheiten

Durch Veränderung des Verhältnisses der geriebenen Flächen wechselt die Reihenfolge der Stoffe in obiger Tabelle. Beträgt das Verhältnis 1, so findet zwischen Glas und Stahl keine, zwischen Wolle und Kautschuk jedoch eine maximale Aufladung statt.

Es scheint, dass die Dielektrizitätskonstanten der geriebenen Stoffe dabei eine gewisse Rolle spielen: Je grösser deren Differenz ist, desto stärker wird die Aufladung. Diese Regel gilt jedoch nicht allgemein [4], [5], [6]. Der elektrische Widerstand eines Stoffes gestattet auch nicht seine Aufladungsneigung zu erfassen, wie dies in [2] versucht wurde. Eine kürzlich erschienene Arbeit [7] erklärt die Aufladung von Polymeren mit der Bändertheorie der Ladungsträger im Festkörper, wonach infolge von Verunreinigungen, wie Stabilisatoren und Reste von Katalysatoren, Bänder mit hoher Besetzungsdichte auftreten.

13 Messung von Ladung, Feldstärke, Potential und gespeicherter Energie

Wird in 1.1.1 q^* durch die Ladungseinheit ersetzt, so stellt F eine Kraft je Ladungseinheit dar, die man als elektrische Feldstärke E bezeichnet. Verteilen sich viele Punktladungen q auf einer Oberfläche, so ergibt sich das Feld der Gesamtladung Q als Summe der Felder aller Punktladungen. Sehr nahe der Oberfläche beträgt diese Summe, das heisst das Integral der Gleichung 1.1.1 für $q^* = 1C$

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

worin σ die Oberflächenladungsdichte darstellt.

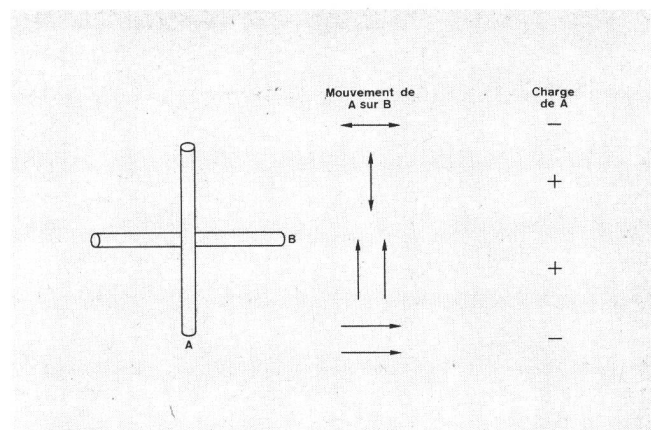


Fig. 2
Einfluss der Reibungsflächen auf das Vorzeichen der Ladung

Mouvement de A sur B — Charge de A —
Bewegung von A auf B — Ladung von A

Im Handel sind netzunabhängige, tragbare Feldstärkenmessgeräte erhältlich, mit denen die Gesamtladung

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

bei bekannter Oberfläche S leicht berechnet werden kann.

Die vom Feld beim Transport einer Ladungseinheit vom Punkt A zum Punkt B geleistete Arbeit wird Potentialdifferenz zwischen diesen Punkten genannt und beträgt

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

In diesem Ausdruck entspricht C der Kapazität zwischen A und B. Mit der Messung von U kann also ebenfalls die Gesamtladung Q bestimmt werden.

Beide Methoden weisen Unzulänglichkeiten auf. Die Messung der Feldstärke E leidet daran, dass das Messgerät Feldverzerrungen erzeugt und gegenüber Störfeldern benachbarter Objekte, die sich durch Influenz aufladen können, empfindlich ist. Andererseits fliesst durch den endlichen Innenwiderstand eines Elektrometers die Ladung ab, so dass man einen zeitlichen Verlauf misst, der auf die Zeit $t = 0$ extrapoliert werden muss.

Eine grundlegende Entladungsgrösse ist die in der Kapazität gespeicherte Energie

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

Ersetzt man hierin die Gesamtladung Q gemäss den Gleichungen 1.3.2 und 1.3.3, so erhält man die Energie als Funktion der Feldstärke

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

und als Funktion der Spannung

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

Diese bei der Entladung freigesetzte Energie ist die Ursache von allfällig entstehenden Schäden.

2 Wirkungen der Entladung statischer Elektrizität

21 Oszillierende und aperiodische Kondensatorentladung, mittlere Entladungsströme und -spannungen

Die *Figur 3* zeigt das Ersatzschema für die Ladung und Entladung einer Person, die sich auf einem isolierenden Bodenbelag bewegt. Die zwischen den Schuhen und dem Bodenbelag erzeugte Ladung wird im Kondensator C gespeichert, was durch G angedeutet ist. Der Ladungsabfluss findet normalerweise über die Summe R_s der Widerstände der Sohlen und des Bodens, einschliesslich einer allfälligen Wachsschicht, statt. Der Beitrag R_E des Bodenbelages wird nach DIN 51953 zwischen einer Elektrode mit 20 cm² Fläche und einem Erdanschluss, zum Beispiel einer metallischen Wasserleitung oder einem Betonarmierungseisen, bestimmt. Die Entladung kann aber auch über den durch R_p und L gebildeten Kreis stattfinden, beispielsweise infolge Berührung einer Türklinke ($L = 0$) oder eines geerdeten Gerätes ($L \neq 0$). Wenn ein Erdungsarmband getragen wird, ist der Schalter I immer geschlossen, und R_p ist durch den Widerstand des Armbandes gegeben. Im allgemeinen kann einer der Widerstände R_s und R_p gegenüber dem andern vernachlässigt werden.

Nach dem Kirchhoffschen Gesetz gilt die Differentialgleichung

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

Wenn man die Anfangsbedingungen $Q(0) = Q_0$ und $\dot{Q}(0) = 0$ berücksichtigt, ergibt die Lösung dieser Differentialgleichung zwei Ausdrücke des Stromes $I(t)$, je nachdem, ob die Entladung aperiodisch oder oszillierend ist. Im *aperiodischen* Fall erhält man

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

Aus $dI/dt = 0$ ergibt sich der Zeitpunkt des Spitzenstromes zu

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

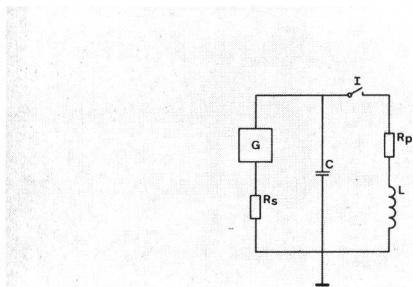


Fig. 3.
Entladung der Kapazität C über R_s oder R_p und L

mit

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

und $U_0 = Q_0/C$ gemäss 1.3.3.

Im *oszillierenden* Fall sind hierin die hyperbolischen Funktionen durch die entsprechenden Winkelfunktionen zu ersetzen

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

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

mit der Pseudofrequenz

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

Die für die Störung von Geräten massgebende mittlere Spannung über der Induktivität L beträgt für das Intervall 0 bis Δt

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

mit $\gamma = r$ und $F = \sinh$ im aperiodischen Fall sowie $\gamma = \omega^*$ und $F = \sin$ im periodischen Fall. In *Figur 4* ist der Vorgang in beiden Fällen dargestellt. Findet die Entladung über die Schuhe oder ein Erdungsband statt, so errechnet sich der Strom zu

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

Diese Ergebnisse werden im Abschnitt 24 ausgewertet; vorgängig sind aber noch die Richtwerte für C und U_0 zu bestimmen.

22 Kapazität des menschlichen Körpers

Ausgehend von dem in *Figur 5* dargestellten Modell kann die Kapazität des menschlichen Körpers geschätzt werden. Die Kugel stellt den Menschen dar, dessen

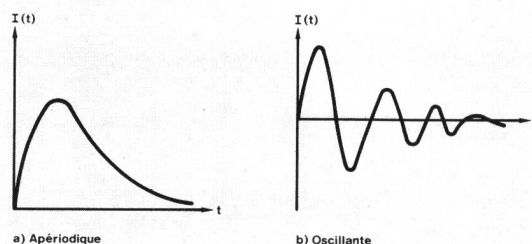


Fig. 4
Verlauf der Entladung

a) Aperiodique — Aperiodisch

b) Oscillante — Oszillierend

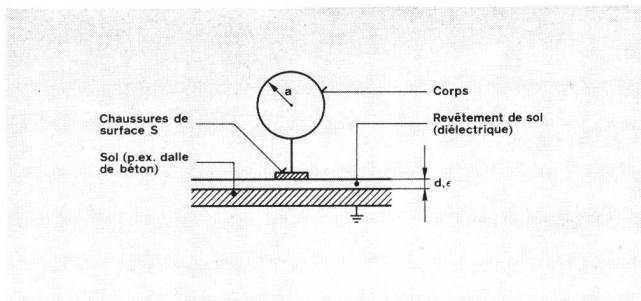


Fig. 5
Berechnung der Kapazität des menschlichen Körpers

Chaussures de surface S — Corps — Körper
Sohlenfläche S der Schuhe
Sol (par ex. dalle de béton) — Revêtement de sol (diélectrique) — Bodenbelag (dielektrisch)

Oberfläche nach [8] bei normaler Statur $S = 2 \text{ m}^2$ beträgt. Der daraus folgende Kugelradius a wird in die Formel für die Kugelkapazität eingesetzt, und man erhält

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

Die Kapazität von üblichen Schuhen entspricht einem Plattenkondensator der Fläche $S = 0,0446 \text{ m}^2$, dessen Plattenabstand etwa $0,01 \text{ m}$ beträgt. Mit einer relativen Dielektrizitätskonstanten $\epsilon = 4$ nach [9] folgt

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

Die Summe beider Werte ergibt die Kapazität des Menschen

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

Eine Versuchsanordnung gemäss *Figur 6* erlaubt mit Verwendung von Gleichung 2.1.9 die experimentelle Nachprüfung dieses Ergebnisses. Zuerst wird die Entladezeitkonstante τ der Parallelschaltung von C_h und der Eingangskapazität C_i des Messinstrumentes über die ebenfalls parallelen Widerstände R_h der Schuhe einschliesslich Bodenbelag und dem Eingangswiderstand R_i des Instrumentes gemessen. Nach Wiederholung des Versuches bei Weglassung von C_h und R_h erhält man die Zeitkonstante τ_i am Eingang des Messinstrumentes. Die Rechnung liefert

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

Mit den typischen, im Laboratorium gemessenen Werten

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

erhält man schliesslich mit

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

eine sehr gute Übereinstimmung der Kapazität mit dem weiter oben erhaltenen Schätzwert. Oxé et al. [10] geben Werte zwischen 162 und 313 pF an. Im folgenden wird mit 220 pF gerechnet.

23 Experimentelle Werte der elektrostatischen Spannung

Die elektrostatischen Spannungen U_0 , im Laboratorium sowie in verschiedenen Räumlichkeiten der PTT-Betriebe gemessen, erstrecken sich von etwa 10 V bis zu einigen 10 kV. Die Spannungsverläufe der *Figur 7* stellen häufig angetroffene Fälle für 3 Bodenbelagstypen und zwei Sorten Schuhe dar. Nach unserer Erfahrung treten auf nicht besonders behandelten Bodenbelägen aus Linoleum, PVC und synthetischen Fasern beim Tragen normaler Schuhe verhältnismässig häufig Spannungen von 1000...5000 V auf. Die Berechnung des Spitzenstromes und der mittleren Spannung wird deshalb mit 2 kV durchgeführt, einem Wert, der als repräsentativ gelten kann, wenn keine besonderen Schutzmassnahmen vorgesehen sind. Es wird sich dabei zeigen, dass ohne solche Schutzmassnahmen nicht auszukommen ist.

24 Zu erwartende Spitzenströme und mittlere Spannungen

Bei einer Entladung durch Berühren eines leitenden Objektes ist für R_p in *Figur 3* der Hautwiderstand einzusetzen, der gemäss Literatur im Bereich von praktisch 0...18 k Ω [11] liegt. Bei der «künstlichen Hand» des CISPR verwendet man die Werte $R_p = 500 \Omega$ und $C_h = 200 \text{ pF}$, während die NASA $R_p = 1,5 \text{ k}\Omega$ und $C_h = 200 \text{ pF}$ angibt. In der vorliegenden Arbeit wird mit $C_h = 220 \text{ pF}$ und verschiedenen Widerständen R_p gerechnet. Die Induktivität L ist von der Auslegung der Geräteerdung sehr abhängig; verläuft diese möglichst geradlinig, so trifft die Annahme $0,5 \leq L \leq 3 \mu\text{H}$ zu [12].

Die Berechnung mit Hilfe der Formeln des Abschnittes 21 ergibt die in *Figur 8* gezeigten Verläufe des Spitzenstromes als Funktion von L für drei Werte von R_p . Zur Beurteilung der Wirkung dieser hohen, aber kurzzeitigen Ströme muss die über der Induktivität L während der Zeit 0 bis Δt erscheinende mittlere Spannung herangezogen werden. Stellt Δt die Reaktionszeit der die Entladung aufnehmenden Schaltung dar und wird angenommen, dass eine Spannung der Grössenordnung 1 V ein Fehlverhalten dieser Schaltung bewirkt, so zeigt die *Figur 9*, dass in der Mehrheit der Fälle Störungen auftreten. Das Wertepaar $L = 10 \mu\text{H}$, $R = 10^2 \Omega$ erzeugt eine mit etwa 3 MHz schwingende Entladung; obschon in diesem Fall der Spitzenstrom kleiner als $1 \mu\text{A}$ ist, liegt

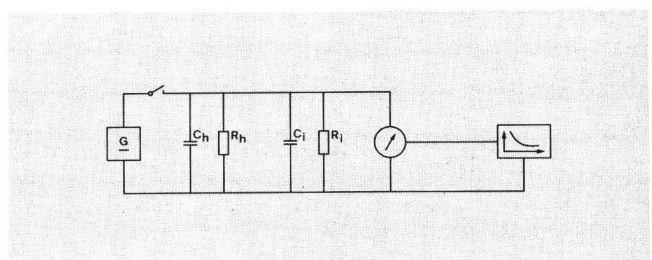


Fig. 6
Experimentelle Bestimmung von C_h

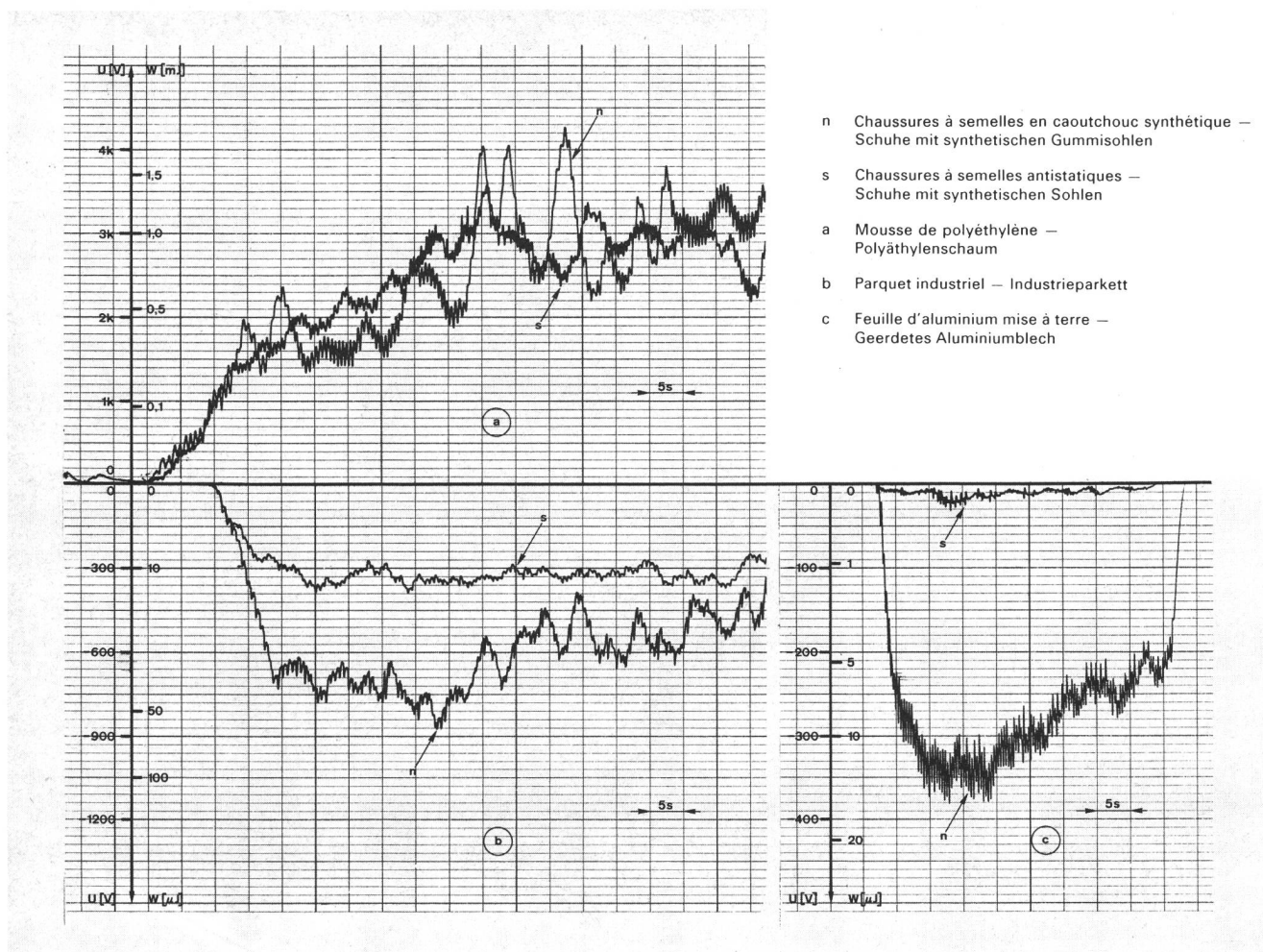


Fig. 7
Spannung und elektrostatische Energie beim Schreiten

die mittlere Spannung zwischen 20 und 40 V und fällt auf 1 V für $\Delta t > 0,5 \mu s$.

Die zur Zerstörung von integrierten Schaltungen führenden Mechanismen sind zahlreich und in den Einzelheiten noch zu wenig bekannt, um die Schäden infolge elektrostatischer Entladungen mit der vorstehenden Analyse beziffern zu können.

25 Beispiele von unangenehmen Wirkungen, von Störungen und Schäden infolge statischer Ladungen

Die Beispiele von durch statische Ladungen erzeugten Unfällen und Arbeitsstörungen sind zahlreich und nehmen in der Literatur einen grossen Raum ein. Deshalb wird hier keine erschöpfende Aufzählung gegeben; wir

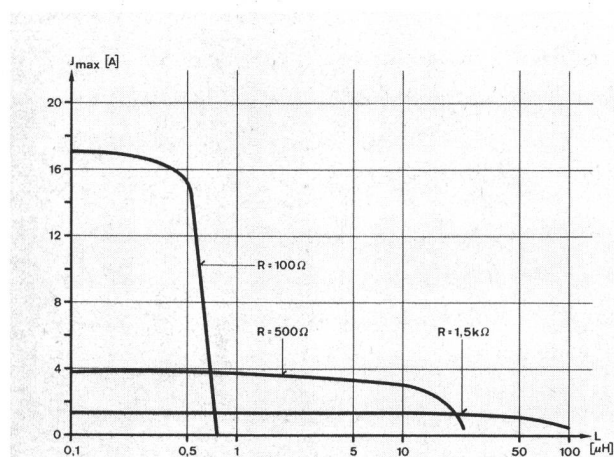


Fig. 8
Spitzenstrom der Entladung für $U_0 = 2 \text{ kV}$

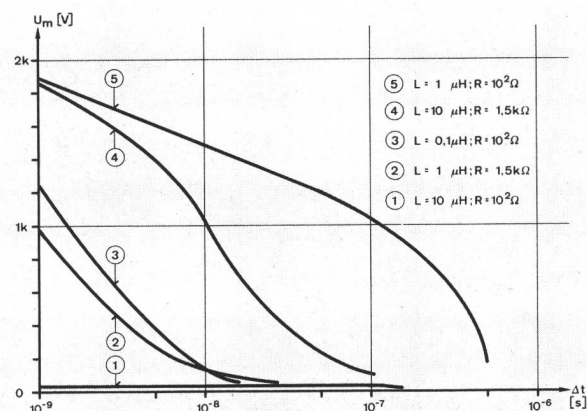


Fig. 9
Mittlere Entladespannung im Intervall Δt ($U_0 = 2 \text{ kV}$)

beschränken uns auf die Behandlung einiger typischer, die PTT-Betriebe besonders interessierende Fälle.

Die unangenehmen Effekte sind allgemein bekannt. Es sind dies die spürbaren Entladungen beim Berühren einer Türklinke, eines Wasserhahns oder beim Händeschütteln. Die Wahrnehmungsschwelle ist individuell stark verschieden und hängt von mehreren Faktoren, wie Ermüdung, Nervosität usw. ab. Sie beträgt zwischen 1000 und 2000 V und entspricht Energien zwischen 0,1 und 0,4 mJ. Diese Werte werden im allgemeinen mit gewöhnlichen Schuhen nur auf synthetischen Bodenbelägen erreicht. Schuhe mit antistatischen Sohlen ergeben solche Ladungen nur auf besonders ungeeigneten Bodenbelägen wie Polyäthylenschaum (Fig. 7). Entladungen dieser Art stellen jedoch keine gesundheitlichen Gefahren dar, auch wenn die Spitzenströme einige 10 A betragen, weil die Impulse extrem kurzzeitig sind.

Störungen des Arbeitsprozesses durch statische Ladungen beruhen hauptsächlich auf zwei Erscheinungen. In einer Brief- oder Checksortiermaschine kann die Coulombsche Anziehung (siehe 11) zwischen Maschine und statisch geladenem Papier zu dessen «Kleben» führen und das Anhalten der Maschine erzwingen [13]. Der zweite Effekt, in Abschnitt 24 behandelt, besteht in der Störung von komplizierten elektronischen Ausrüstungen, wie Rechenmaschinen usw., durch statische Entladungen. Diese Erscheinungen werden in der Literatur ausführlich behandelt [11], [14], [15] und [16]. Zum besseren Verständnis sei hier ein konkreter Fall erläutert. Die Telegraphendienste benützen Prozessoren, die die Telegramme speichern, um sie dann in rascher Folge zu senden. Eine statische Entladung kann den Zugang zur gespeicherten Information verhindern oder diese selbst ganz oder teilweise zerstören, was in schweren Fällen zum endgültigen Verlust eines Telegramms führen kann.

Die Empfindlichkeit der Geräte wird mit der Entladung eines Kondensators von 200 pF über einen Widerstand von 1,5 k Ω gemessen. Die Formel 1.3.6 gestattet, die dabei freigesetzte Energie zu berechnen. Die Störungen verursachende Mindestenergie hängt vom Ort der Entladung ab. *Tabelle II* zeigt die erheblichen Unterschiede, die man an einem einzigen Gerät feststellt.

Tabelle II. Störschwelle eines Prozessors PDP 11 [μ J]

Gehäuse	Blank	Lackiert
Prozessor	45...60	> 180
Konsole	5...10	> 180

In dieser Versuchsanordnung konnte mit den verwendeten Messgeräten keine Energie von mehr als 180 μ J gemessen werden. Die blanken Stellen wurden mit Selbstklebeband unempfindlich gemacht, womit ein sehr grosser Widerstand (einige M Ω) in Serie zum Kondensator geschaltet wurde, was gemäss den Gleichungen 2.1.2 und 2.1.5 eine beträchtliche Reduktion des Spitzenstromes ergibt. Die in diesem Versuch festgestellten Störungen bewirkten fehlende oder zusätzliche Zeichen im «print out». Da andererseits keine Rechenfehler erzeugt wurden, ist die Zentraleinheit als gut geschützt zu betrachten. Gemäss Figur 7b werden auf In-

dustrieparkettböden gefährliche Ladungen selbst mit antistatischen Schuhen erreicht, und somit müssen Räume für Prozessoren mit Spezialbodenbelägen versehen werden. In den PTT-Betrieben treten schwere Schäden glücklicherweise selten auf, aber in der chemischen und der Ölindustrie mussten eingehende Untersuchungen durchgeführt werden, um Explosionen und Brände von Behältern mit Öl oder anderen brennbaren Flüssigkeiten zu vermeiden. Die Gefahr des Entstehens einer elektrischen Ladung durch Reibung besteht immer dann, wenn solche Flüssigkeiten, Trägergase von festen Partikeln (Aerosole), Tröpfchen (Nebel), oder Pulver unter Druck in Röhren fliessen oder zerstäubt werden wie beim Gebrauch von Spritzpistolen. Der Vorgang ist derselbe wie bei der Aufladung von Wolken durch die Reibung zwischen zwei Luftschichten. Die so erzeugte elektrische Energie genügt in der Mehrzahl der Fälle zum Entzünden einer explosiven Mischung; die Zündenergie für eine Benzin/Luft-Mischung beträgt zum Beispiel nur 250 μ J [17]. Beim Hantieren mit einem Benzinkanister kann also eine elektrostatisch geladene Person einen Brand auslösen. Figur 7a und *Tabelle III* zeigen, dass die nötige Energie leicht erreicht wird, sogar auf Klinkerböden mit ihren sehr guten elektrostatischen Eigenschaften.

Tabelle III. Auf Klinkerböden erreichte Energie

Sohlen	W [μ J]
Leder	2,5
Kautschuk 1	63
Kautschuk 2	91
Kautschuk 3	140
Kautschuk 4	390

Die Akkumulatorenräume stellen ein weiteres für die PTT-Betriebe wichtiges Problem dar. Die Akkumulatoren befinden sich im Schwebeladungszustand und erzeugen ständig Knallgas, das heisst das ideale, durch Wasserelektrolyse erzeugte Gemisch von Wasserstoff und Sauerstoff. Dieses Gas zündet bereits mit der extrem kleinen Energie von 20 μ J [18]. Damit wird gemäss *Tabelle III* offenbar, dass das Betreten eines Akkumulatorenraumes gefährlich ist, wenn Schuhe mit Gummisohlen getragen werden.

Über die Zerstörung von Halbleiterbauteilen durch statische Ladungen ist viel geschrieben worden, siehe beispielsweise [14], [15] und [16]. Die Schäden in solchen Bauteilen sind schwierig zu erfassen, da häufig kein unmittelbarer Ausfall, sondern eine Verkürzung der Lebensdauer eintritt. In CMOS-Bauteilen sind zum Beispiel die metallischen Anschlüsse durch sehr dünne Oxidschichten isoliert, die schon mit 60 V Spannung beschädigt werden können. Dies entspricht einer Energie von $W = 0,4 \mu$ J bei einer Kapazität von $C = 220$ pF. Einige Autoren geben sogar noch kleinere Schwellwerte an und nach ihnen können TTL-Elemente der Serie 74 N schon mit Entladeenergien von $W = 0,001$ bis $0,01 \mu$ J zerstört werden [14]. Solche extrem kleine Werte werden sogar mit antistatischen Schuhen bereits beim Gehen auf einem geerdeten Blech erreicht (Fig. 7c). Im allgemeinen kann man jedoch die Schutzmassnahmen auf die Grenzwerte der *Tabelle IV* abstützen.

Tabelle IV. Energieschwellen für die Beschädigung von Komponenten [μJ]

P-MOS, N-MOS Standard TTL LPS-TTL	60
C-MOS	25
Bipolare Operationsverstärker für kleine Signale	5

Mit Dioden und anderen schaltungstechnischen Massnahmen können diese Grenzwerte erhöht und damit die Bauteile geschützt werden. Dies hat aber eine Verlängerung der entsprechenden Reaktionszeiten zur Folge. Für Montage- und Servicearbeiten behalten die Werte der Tabelle IV trotzdem ihre Gültigkeit.

3 Schutzmassnahmen gegen die elektrostatischen Entladungen

31 Allgemeine Betrachtungen

Es gilt grundsätzlich, die Bedingungen beim Gehen festzulegen, unter denen die erzeugte statische Ladung minimal oder zumindest kleiner als ein vorgegebener Grenzwert ist. Um das Wesentliche zu erhalten, brauchen die Berechnungen jedoch nicht streng durchgeführt zu werden; es genügt, als Vereinfachung den Entladungswiderstand R des Abschnittes 21 als konstant anzunehmen. Zudem werden die Schrittfrequenz

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

und die bei jedem Schritt erzeugte Ladung ΔQ ebenfalls als konstant betrachtet. Unmittelbar vor dem zweiten Schritt, zur Zeit $t = \Delta t - \varepsilon$, hat die beim ersten Schritt zur Zeit $t = 0$ erzeugte Ladung ΔQ gemäss Gleichung 2.1.9 auf

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

abgenommen. Im Zeitpunkt des zweiten Schrittes, zur Zeit $t = \Delta t$ wird die Ladung ΔQ hinzugefügt:

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

Die Weiterführung dieser Überlegung führt zur Ladung

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

nach dem n -ten Schritt. Nach unendlich vielen Schritten entsteht damit die Ladung

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

weil r kleiner als 1 ist. Dieser Ausdruck ist selbstverständlich nur gültig, solange keine begrenzenden Ef-

fekte, wie etwa Überschlag auf den Bodenbelag, auftreten. Nach Gleichung 1.3.4 beträgt damit die gespeicherte Energie

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

Will man W_∞ unter einem gewissen Grenzwert halten, so folgt hieraus zwingend, dass auch ΔW unter diesem Grenzwert liegen muss, da nach Definition $0 \leq r \leq 1$ ist. Erfahrungsgemäss liegt ΔW im Bereich von einigen Zehntels- μJ bis zu einigen mJ . Für bekannte Kombinationen von Böden und Schuhen ist bei kleinem elektrischem Bodenwiderstand immerhin auch ΔW klein. Allerdings ist im allgemeinen die Korrelation zwischen den beiden Grössen unbefriedigend (Abschnitt 12 und [2]). Zudem hängt ΔW vom Oberflächenzustand und der Sauberkeit der reibenden Stoffe ab. Eine Schicht Bodenwachs verändert zum Beispiel die Bodenoberfläche derart, dass die Position des Wachses in der reibungselektrischen Reihe eher massgebend wird als jene des Bodenbelages. Die Energie ΔW kann deshalb nicht unter Kontrolle gehalten werden, ohne dass Vorschriften für das Tragen spezieller Schuhe und auch für die Art der Bodenbeläge erlassen werden, da sie nach Abschnitt 21 von dieser Kombination abhängt. Daraus kann abgeleitet werden, dass ein absoluter Schutz gegen die Folgen statischer Ladungen nicht möglich ist.

Der Ausdruck 3.1.5 zeigt, dass W_∞ um so kleiner ist, je näher r bei Null liegt. Dies ist der Fall bei grossem Δt , also bei kleiner Schrittfrequenz, oder bei kleiner Zeitkonstante RC . Nun ist aber der Entladungswiderstand R der einzige in gewissen Grenzen beeinflussbare Parameter, und zwar nur, wenn entweder sowohl die Schuhe als auch der Bodenbelag vorgeschrieben werden können (da R die Summe deren Widerstände ist) oder wenn sich eine Erdung der Personen mit einem parallelen Entladungswiderstand R_p gemäss Figur 3 vornehmen lässt. Um eine minimale Sicherheit zu erreichen, bleibt also nichts anderes übrig, als die persönliche Freiheit einzuschränken. Dies ist allerdings nicht lückenlos möglich, vor allem bei betriebsfremden Personen, wie Kunden usw.

Die bisherigen Betrachtungen schliessen einen absoluten Schutz aus. Man muss sich damit begnügen, die Zahl der unerwünschten Ereignisse klein zu halten. Man nimmt deshalb an, dass die Zeit t^* zwischen dem letzten Schritt und der Entladung praktisch nie gleich Null ist. Man muss sich, anders ausgedrückt, darauf verlassen, dass die Energie W_∞ sich nicht völlig auf das empfindliche Objekt überträgt, sondern ein Teil davon Zeit hat, abzufließen. Die übertragene Energie beträgt damit

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

Das Vorgehen ist nun so, dass die Wahl von R unter Beachtung der in der Praxis festgestellten Verteilungen der Werte von t^* und W_∞ so getroffen wird, dass die bei der Entladung übertragene Energie in einem ausreichenden Prozentsatz der Fälle unter der Empfindlichkeitsgrenze liegt.

Die Figur 7 verdeutlicht diese Überlegungen. Ist der Entladungswiderstand ausschliesslich durch den Bodenbe-

lag gegeben, so verbessern antistatische Schuhe die Situation überhaupt nicht (Fig. 7a). Im gewählten Beispiel beträgt der Bodenwiderstand $10^{13} \Omega$, normale Schuhe weisen $3,5 \cdot 10^{11} \Omega$ auf und antistatische Sohlen $10^6 \Omega$. Wenn der Bodenwiderstand zwischen den Werten der beiden Sohlenarten liegt, ergeben sich offensichtliche Unterschiede von einer Sohle zur andern (Fig. 7b mit $4 \cdot 10^8 \Omega$ für den Bodenwiderstand). Die Erfahrung in unserem Labor ergibt für Spezialschuhe Reduktionen der Ladung um das 10...50fache, in Einzelfällen um das 150fache. Auf einem geerdeten Aluminiumblech, das heisst bei $R_{\text{Boden}} = 0$, erzielen antistatische Schuhe die verhältnismässig grösste Schutzwirkung (Fig. 7c). Mit normalen Schuhen ergeben sich in diesem Fall für elektronische Komponenten gefährliche Energien (Tab. IV), und die Zündenergie von Knallgas wird fast erreicht. In Akkumulatorenräumen mit nie verschwindenden Ableitwiderständen der Bodenbeläge müssen daher antistatische Schuhe vorgeschrieben werden. Parallel dazu ist das Tragen von Erdungsbändern in Reparatur- und Servicräumen für elektronische Geräte unerlässlich.

32 Einfluss der Luftfeuchtigkeit

Durch die Kondensation von Luftfeuchtigkeit bilden sich Wasserfilme, die die im Staub immer vorhandenen Salze lösen und damit die Oberflächenwiderstände von Isolatoren beträchtlich herabsetzen. Nach den Beobachtungen von *McLeod* et al. [16] verlaufen die Widerstandswerte angenähert exponentiell mit der relativen Luftfeuchtigkeit. Für Baumwolle zum Beispiel nehmen sie bei einer Zunahme der relativen Feuchtigkeit um 20 % um etwa eine Grössenordnung ab. Die *Tabelle V* gibt, gemäss [16], einige Werte der Ladungsenergie W_{∞} beim Begehen verschiedener Bodenbeläge in Funktion der relativen Feuchtigkeit r.F. Die Werte beziehen sich auf eine Kapazität von 250 pF.

Tabelle V. Ladungsenergie beim Begehen verschiedener Böden [μJ]

r.F. \ Bodenbelag	30 %	40 %	50 %	60 %
Synthetisch	3380	1440	400	100
Wolle	1200	550	240	100
Antistatisch	500	240	40	5
Synthetisch, behandelt	200	60	5	<1

Der grosse Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf die Ladungsenergie und die unumgängliche Notwendigkeit, diese unter Kontrolle zu halten, sind damit eindeutig bewiesen. Ein behandelter, synthetischer Bodenbelag in einem Akkumulatorenraum, in dem der Grenzwert 20 μJ beträgt, würde also eine relative Feuchtigkeit von mehr als 50 % erfordern, was nicht problemlos ist. Da es auch in einem Elektroniklabor schwierig ist, die relative Feuchtigkeit höher als 45...50 % zu halten, sind hier Erdungsbänder die zwingende Konsequenz (Vergleich Tab. IV).

4 Schlussfolgerungen

Die von einer Person akkumulierte elektrostatische Energie beim Gehen auf einem nicht behandelten Bo-

denbelag liegt im allgemeinen höher als die Empfindlichkeitsgrenzen moderner elektronischer Installationen und auch höher als die Zündenergien einer ganzen Reihe von brennbaren Gasen. Die Entladeströme können einige 10 A und die mittleren Spannungen mehrere Kilovolt erreichen. Ein absoluter Schutz gegen die zum Teil schlimmen Folgen der Entladungen ist nur möglich um den Preis drakonischer und oft undurchführbarer Massnahmen. Die Abteilung Forschung und Entwicklung PTT hat deshalb eine Klassifikation der gefährdeten Räumlichkeiten vorgeschlagen, in der die Schutzmassnahmen den jeweiligen Gegebenheiten angepasst sind.

Die erste Klasse umfasst Räume, in denen nur die für Kunden und Personal unangenehmen Entladungen vermieden werden sollen. Zehnjährige Erfahrung führte dazu, die obere Grenze des Bodenwiderstandes auf $10^{10} \Omega$ zu setzen, womit nur noch selten Energien über der Empfindlichkeitsgrenze beobachtet werden. In diese Kategorie gehören alle Räume mit Zugang für die Kundschaft, Büros usw., die keine besonderen Massnahmen erfordern.

In Räumen mit empfindlichen Geräten, wie Prozessoren und Rechenmaschinen, beträgt die Grenze $10^8 \Omega$, was gestattet, die Wahrscheinlichkeit von Störungen, sogar mit normalen Schuhen, sehr klein zu halten. Antistatische Schuhe sind zwar empfohlen, aber eine strikte Vorschrift ist nur nötig, wenn Pannen zu häufig auftreten oder unter allen Umständen vermieden werden müssen. Dies ist der Fall beispielsweise in prozessorgesteuerten Telefonzentralen, bei denen eine Störung den Totalausfall der Anlage bedeuten kann.

In Batterieräumen sind strengere Massnahmen erforderlich, da Explosionen um jeden Preis ausgeschlossen werden müssen. Der Bodenwiderstand darf $10^7 \Omega$ nicht überschreiten und der Zugang ist nur dem zuständigen Personal gestattet, wobei Spezialschuhe obligatorisch sind.

Reparatur- und Servicelabors für Elektronik befinden sich in ähnlicher Lage, besonders wenn hochempfindliche Bauteile gehandhabt werden. Für den Bodenwiderstand gilt dieselbe Grenze wie in Räumen mit empfindlichen Geräten, antistatische Schuhe sind am Arbeitsplatz obligatorisch und es muss ein Erdungsband getragen werden. Als ergänzende Massnahmen sind vorgeschrieben: Lagerung und Transport empfindlicher Teile in Schutzhüllen, spezielle Ausrüstung der Arbeitsplätze und besondere Verhaltensregeln. Eine ausführliche Beschreibung dieser Massnahmen findet sich in [19]. Dieselben Vorschriften gelten ebenfalls in Telefonzentralen beim Auswechseln empfindlicher Komponenten.

Das Personal wird durch eine Kennzeichnung empfindlicher Bauteile, Komponenten und Geräte angehalten, die beschriebenen Regeln zu befolgen. Ausserdem verlangen die PTT-Betriebe von ihren Lieferanten einen möglichst weitgehenden Schutz der Ausrüstungen und es werden schliesslich nur noch Firmen berücksichtigt, die gewisse Schutzkriterien gegen elektromagnetische Einflüsse beachten.

In bestehenden, den Erfordernissen nicht genügenden Anlagen ist es nicht immer möglich, ohne grosse Kosten und übermässige Behinderung der Arbeit durch das Le-

gen eines besseren Bodenbelages Änderungen vorzunehmen. Jeder Einzelfall erfordert eine besondere Beurteilung der Tragweite der nötigen Änderungen. Oft genügt es, eine Schutzzone um die gefährdeten Ausrüstungen einzurichten.

Die Luftfeuchtigkeit muss überwacht und höher als 40 % gehalten werden, was besonders im Winter nicht ganz problemlos ist.

Eine Arbeitsgruppe untersucht die hier aufgeworfenen Fragen, und ein Massnahmenvorschlag für die Herstellung sowie die Handhabung empfindlicher Elektronik wurde den Lieferfirmen vorgelegt. Die endgültige Fassung soll im Laufe des Jahres 1979 erscheinen.

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, Tesis 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.

Die nächste Nummer bringt unter anderem

Vous pourrez lire dans le prochain numéro

9/79

H. Roggli	Ökonomische Übertragung von Fernsehsignalen über FM-Richtstrahlstrecken Transmission économique de signaux de télévision sur des trajets hertziens en modulation de fréquence
E. Montandon	Surtensions dues aux décharges atmosphériques dans les équipements électriques établis dans des constructions en béton armé avec ou sans revêtement métallique conducteur
A. Wiederkehr	Anforderungen der Materialwirtschaft an Lagerbauten
A. Brunold	English part: Corrosion of lead sheathed cables in plastics multiway ducts (Part I)