

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: 60 (1982)

Heft: 5

Artikel: Caractéristiques électriques imposées aux sols antistatiques = Elektronische Anforderungen an antistatische Böden

Autor: Nadler, Carl-Jürg

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-876158>

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>

Zusammenfassung. Ein einfaches mathematisches Modell, das die elektrostatische Aufladung eines sich bewegendes Menschen beschreibt, erlaubt es, die optimalen Werte des Ableitwiderstandes in Abhängigkeit des gewünschten Schutzgrades zu ermitteln. Dieser Ableitwiderstand setzt sich aus dem Widerstand des Bodens und der Schuhe zusammen. Das Modell wird beschrieben und zur Erläuterung der Prinzipien, auf denen die Schutzmassnahmen aufgebaut sind, verwendet. Schliesslich wird ein gemäss diesen Grundlagen aufgebautes Bodentestgerät beschrieben.

Résumé. Sur la base d'un modèle mathématique très simple décrivant la charge électrostatique qui s'accumule sur une personne en train de marcher, il est possible de déterminer des valeurs optimales pour la résistance que doit présenter la combinaison chaussures-sol posé, en fonction du degré de protection voulu. Ce modèle est décrit et utilisé pour montrer sur quels principes est fondée la protection contre les décharges électrostatiques. Enfin, on décrit un appareil permettant de tester, selon ces principes, les sols posés.

Esigenze elettriche poste a pavimenti antistatici

Riassunto. Un semplice modello matematico che descrive la carica elettrostatica di una persona che si muove permette di trovare i valori ottimali della resistenza di scarica in dipendenza del grado di protezione desiderato. Detta resistenza di scarica si compone della resistenza del pavimento e di quella delle scarpe. Il modello viene descritto e utilizzato per spiegare i principi su cui si basano le misure di protezione. Infine si descrive un apparecchio di prova del pavimento costruito secondo questi principi.

1 Introduction

Le but de cet article est de montrer que les valeurs limites de la résistance d'écoulement de la charge électrostatique accumulée sur une personne en mouvement, de $10^8 \Omega$ pour les locaux où sont mises en service des installations électroniques sensibles et de $10^7 \Omega$ pour les locaux d'accumulateurs, se justifient sur la base d'un modèle mathématique décrivant la charge accumulée en fonction du nombre de pas. On verra en particulier que les valeurs adoptées correspondent à un optimum: une augmentation de la résistance aurait pour conséquence une détérioration rapide de la sécurité, tandis qu'une diminution n'apporterait pas de gain sensible en ce qui concerne la charge accumulée. Cela entraîne toute une série de règles de comportement de la part du personnel et impose, en outre, à l'équipement des conditions de résistance envers les décharges, si l'on veut garantir une certaine fiabilité. Ces règles et conditions ne seront pas discutées dans le cadre de cet article. Les effets souvent désastreux des décharges électrostatiques ont déjà été décrits maintes fois, en particulier dans ces mêmes colonnes [1].

Enfin, on décrira un appareil très simple permettant de tester les sols et l'on s'attachera à donner la marche à suivre si le sol ne remplit pas les conditions exigées comme c'est bien trop souvent le cas.

2 Le modèle

Lorsqu'une personne se déplace sur un sol synthétique, elle produit à chaque pas une charge électrique qui s'ajoute à la charge déjà accumulée lors des pas précédents. Il en résulte des tensions généralement de l'ordre du kilovolt, quelquefois même de plusieurs dizaines de kilovolts. Afin de trouver le meilleur moyen, qui soit dans des limites raisonnables, de prévenir la charge électrostatique ainsi que ses effets néfastes, il est nécessaire d'examiner le mécanisme de l'accumulation de la charge indésirable. La discussion d'un modèle mathématique décrivant ce processus d'accumulation permet-

1 Einleitung

Das Ziel dieses Artikels ist, zu zeigen, dass die Grenzwerte des Ableitwiderstandes von $10^8 \Omega$ für Räume, in denen empfindliche elektronische Anlagen betrieben werden, und von $10^7 \Omega$ für Akkumulatorenräume anhand eines mathematischen Modells, das die Aufladung eines gehenden Menschen in Abhängigkeit der Anzahl Schritte beschreibt, gerechtfertigt sind. Insbesondere wird gezeigt, dass die festgelegten Werte ein Optimum darstellen: Eine Erhöhung des Widerstandes hätte eine rasche Verschlechterung der Sicherheit zur Folge; tiefere Werte haben hingegen keinen bedeutenden Einfluss auf die sich aufbauende elektrostatische Ladung. Dies zieht eine Reihe Verhaltensregeln für das Personal und Anforderungen an die Festigkeit gegen Entladungen der Anlagen mit sich, um eine gewisse Zuverlässigkeit sicherzustellen, auf die hier nicht eingegangen werden kann. Die häufig katastrophalen Folgen von elektrostatischen Entladungen wurden schon öfters beschrieben, zum Beispiel unter anderem auch in [1].

Schliesslich wird ein einfaches Gerät vorgestellt, mit dem Bodenbeläge getestet werden können. Es wird besonders beschrieben, was zu tun ist, wenn der Belag die gestellten Anforderungen nicht erfüllt, wie es leider zu oft der Fall ist.

2 Das Modell

Beim Gehen auf einem synthetischen Bodenbelag wird bei jedem Schritt eine Ladung abgetrennt und der früher erzeugten Ladung hinzugefügt. Dabei können elektrische Spannungen allgemein in der Grössenordnung von Kilovolt, manchmal sogar von 10 und mehr Kilovolt entstehen. Um innerhalb vernünftiger Grenzen das beste Mittel ausfindig zu machen, mit dem die elektrostatischen Aufladungen sowie ihre unheilvollen Folgen bekämpft werden können, ist es nötig, die Art, wie sich die unerwünschte Ladung aufbaut, zu betrachten. Die Diskussion des mathematischen Modells, das dieses Aufladen beschreibt, wird zeigen, auf welche Parameter

tra de voir quels sont les paramètres importants sur lesquels il faut agir pour atteindre le but visé.

Le modèle présenté et discuté ci-après n'est pas une nouveauté. Il a déjà fait l'objet d'un rapport PTT en 1974 [2]. En 1975, il a été publié par *Oxé* et *Boschung* [3]. Dans le but de simplifier la compréhension de ce qui va suivre, nous répétons rapidement le raisonnement qui conduit à l'expression mathématique de la charge accumulée.

Nous faisons les hypothèses suivantes, qu'il s'agira de vérifier expérimentalement

1. A chaque pas une quantité de charge constante ΔQ est produite.
2. La fréquence ν des pas, ou le nombre de pas par seconde est constant.
3. La résistance R d'écoulement de la charge, constituée de la résistance des chaussures en série avec la résistance du sol, est constante.

Dans ces conditions, la charge Q déjà accumulée décroît d'un facteur constant entre deux pas successifs

$$r = e^{-\Delta t/RC} \quad (2.1)$$

où

$\Delta t = 1/\nu$ est le temps qui s'écoule entre deux pas et C est la capacité électrique de l'être humain.

Juste après le premier pas, la charge accumulée vaut

$$Q = Q_1 = \Delta Q$$

et juste avant le deuxième

$$Q = \Delta Q \cdot r$$

Au deuxième pas, il s'y ajoute ΔQ , ainsi

$$Q_2 = \Delta Q \cdot r + \Delta Q = \Delta Q (1 + r)$$

En poursuivant ce raisonnement, on obtient

$$Q_n = \Delta Q \frac{1-r^n}{1-r} \quad (2.2)$$

où n est le numéro du pas. Après un nombre infini de pas, la charge limite vaut

$$Q_\infty = \Delta Q \frac{1}{1-r} \quad (2.3)$$

Les valeurs des paramètres intervenant dans le calcul de la charge accumulée peuvent être déterminées expérimentalement. Il est donc possible de calculer la charge totale pour chaque pas. Pour des instants «juste après les pas», donc $n\Delta t + \varepsilon$, la charge est donnée par 2.2. Pour des instants «juste avant les pas», donc $n\Delta t - \varepsilon$, on a

$$Q_{n-\varepsilon} = Q_{n-1} \cdot r \quad (2.4)$$

En prenant les valeurs typiques

$$\begin{aligned} \Delta Q &= 1 \mu\text{C} \\ C &= 220 \text{ pF} \\ R &= 10^{10} \Omega \\ \Delta t &= 0,5 \text{ s} \end{aligned}$$

qui donnent

$$r = 0,80$$

Einfluss genommen werden muss, um das gesteckte Ziel zu erreichen.

Das hier dargelegte Modell ist nicht etwa neu. Es wurde schon 1974 in einem Versuchsbericht der PTT-Betriebe vorgestellt [2]. 1975 wurde es von *Oxé* und *Boschung* publiziert [3]. Zum besseren Verständnis der folgenden Diskussion sollen die Überlegungen, die zum mathematischen Ausdruck der aufgebauten Ladung führen, kurz wiederholt werden.

Folgende experimentell zu überprüfende Annahmen werden gemacht:

1. Die bei jedem Schritt abgetrennte Ladungsmenge ΔQ bleibt konstant.
2. Die Schrittfrequenz ν , das heisst die Anzahl Schritte je Sekunde, bleibt konstant.
3. Der Entladungswiderstand R , der aus dem Widerstand der Schuhe und jenem des Bodenbelags zusammengesetzt ist, bleibt konstant.

Somit nimmt die Ladung zwischen zwei aufeinanderfolgenden Schritten, das heisst in der Zeit $\Delta t = 1/\nu$, um den Faktor

$$r = e^{-\Delta t/RC} \quad (2.1)$$

ab, wobei C die Körperkapazität des Menschen darstellt. Unmittelbar nach dem ersten Schritt beträgt die Ladung

$$Q = Q_1 = \Delta Q$$

und gerade vor dem zweiten Schritt

$$Q = \Delta Q \cdot r$$

Beim zweiten Schritt wird ΔQ hinzugefügt

$$Q_2 = \Delta Q \cdot r + \Delta Q = \Delta Q (1 + r)$$

Die Weiterführung dieser Überlegung ergibt für die Ladung

$$Q_n = \Delta Q \frac{1-r^n}{1-r} \quad (2.2)$$

wobei n die Schrittzahl ist. Nach unendlich vielen Schritten entsteht die Grenzladung

$$Q_\infty = \Delta Q \frac{1}{1-r} \quad (2.3)$$

Die für die gespeicherte Ladung massgebenden Parameter können experimentell bestimmt werden. Somit kann man die Ladung für irgendeine Schrittzahl n errechnen. Für Momente «unmittelbar nach dem Schritt», das heisst $n\Delta t + \varepsilon$, ergibt sich die Ladung aus 2.2. Für Momente «unmittelbar vor dem Schritt», also für $n\Delta t - \varepsilon$, ist

$$Q_{n-\varepsilon} = Q_{n-1} \cdot r \quad (2.4)$$

Mit den typischen Werten

$$\begin{aligned} \Delta Q &= 1 \mu\text{C} \\ C &= 220 \text{ pF} \\ R &= 10^{10} \Omega \\ \Delta t &= 0,5 \text{ s} \end{aligned}$$

die

$$r = 0,80$$

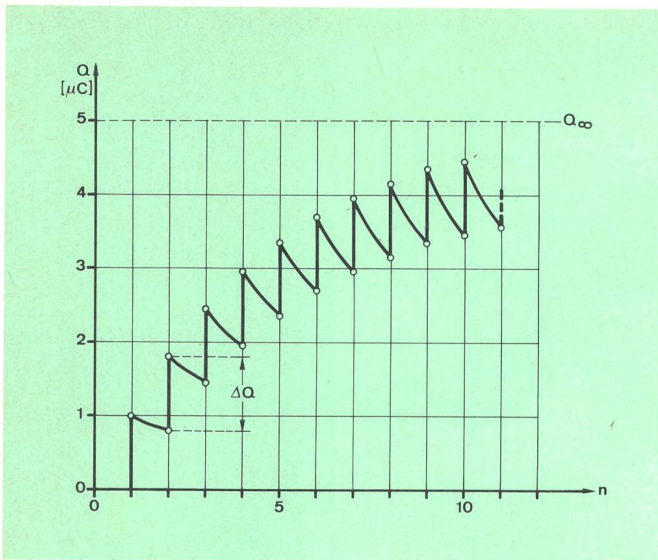


Fig. 1
Charge accumulée théorique — Theoretisch aufgebaute Ladung

on obtient la courbe régulière de la *figure 1*. La comparaison avec le cas pratique représenté à la *figure 2* montre que le modèle est capable de décrire l'allure générale du phénomène.

Nous allons analyser ce cas pratique plus en détail. Vérifions d'abord la première hypothèse faite ($\Delta Q = \text{constant}$). La *figure 3* montre les valeurs de ΔQ pour les 20 premiers pas. Le coefficient de corrélation linéaire de la fonction $\Delta Q = \alpha n + \beta$ vaut $\rho = -0,05$. Il n'y a donc pas de corrélation linéaire entre ΔQ et n . En outre, l'analyse de la distribution des ΔQ montre qu'elle peut être considérée comme normale avec

$$\begin{aligned} \overline{\Delta Q} &= 0,77 \pm 0,21 \mu\text{C} \\ \text{Aplatissement:} & -0,4 \\ \text{Asymétrie:} & 0,2 \end{aligned}$$

Ce résultat nous apprend que ΔQ n'est pas constant et nous indique qu'en principe l'on devrait tenir compte de l'irrégularité de la manière de poser les pieds: un pas glissé produit un autre ΔQ qu'un pas normal. Mais puisque la distribution des ΔQ est connue, on peut prendre $\overline{\Delta Q}$ comme valeur représentative. Pour être mathématiquement correct, l'on modifiera l'hypothèse 1) comme il suit:

«L'ensemble des ΔQ est représenté par un $\overline{\Delta Q} = \text{constant}$ affecté d'une certaine déviation standard.» Cela permet de conserver les formules 2.2 et 2.3.

En ce qui concerne l'hypothèse 2), l'examen de la *figure 2* permet de se faire une idée de la régularité des pas et montre que cette hypothèse est acceptable. On obtient pour ce cas

$$\Delta t = 0,70 \text{ s}$$

La vérification de l'hypothèse 3) est plus délicate. C'est la qualité de l'ajustement de la courbe expérimentale par le modèle qui dira si elle est admissible. Pour ce faire, l'on représente la courbe de la *figure 2* par des valeurs successives fournies par l'expression 2.2 dans laquelle on introduit les valeurs expérimentales de ΔQ et

erhalten, erhält man die regelmäßige Kurve der *Figur 1*. Aus dem Vergleich mit dem von der *Figur 2* gezeigten praktischen Fall ist ersichtlich, dass das Modell den allgemeinen Verlauf einer Aufladung darzustellen vermag.

Es sollen nun die Einzelheiten dieses praktischen Falles näher analysiert werden. Zuerst soll die Annahme $\Delta Q = \text{konstant}$ überprüft werden. *Figur 3* zeigt die Werte von ΔQ für die 20 ersten Schritte. Der lineare Korrelationskoeffizient der Funktion $\Delta Q = \alpha n + \beta$ beträgt $\rho = -0,05$. Es besteht somit keine lineare Korrelation zwischen ΔQ und n . Analysiert man aber die Verteilung von ΔQ , so zeigt es sich, dass diese als normal betrachtet werden kann

$$\begin{aligned} \overline{\Delta Q} &= 0,77 \pm 0,21 \mu\text{C} \\ \text{Exzess:} & -0,4 \\ \text{Schiefe:} & 0,2 \end{aligned}$$

Aus diesem Ergebnis ist ersichtlich, dass ΔQ nicht konstant ist und dass man prinzipiell die Unregelmäßigkeiten beim Gehen in Betracht ziehen sollte: Schlüpf-schritte erzeugen andere Ladungen als normale. Da aber die Verteilung von ΔQ bekannt ist, darf ΔQ als Wert für die mittlere, je Schritt abgetrennte Ladung eingesetzt werden. Um mathematisch einwandfrei vorzugehen, ändere man die Hypothese 1 wie folgt ab:

«Die Menge von ΔQ ist durch einen Wert $\overline{\Delta Q} = \text{konstant}$ zusammen mit einer gewissen Standardabweichung dargestellt.» Dadurch können die Formeln 2.2 und 2.3 unabgeändert gebraucht werden.

Die *Figur 2* gibt einen Eindruck der Regelmässigkeit der Schrittfrequenz und zeigt, dass die zweite Annahme zutrifft. Für diesen Fall gilt

$$\Delta t = 0,70 \text{ s}$$

Schwieriger ist aber die Überprüfung der dritten Annahme. Ihre Richtigkeit lässt sich aus der Güte der Anpassung der theoretischen an die experimentellen

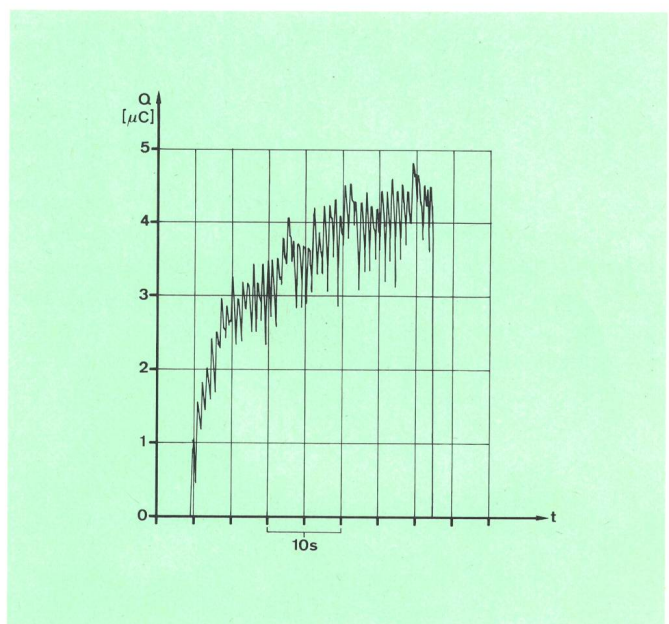


Fig. 2
Charge accumulée (cas pratique) — Aufgebaute Ladung (praktischer Fall)

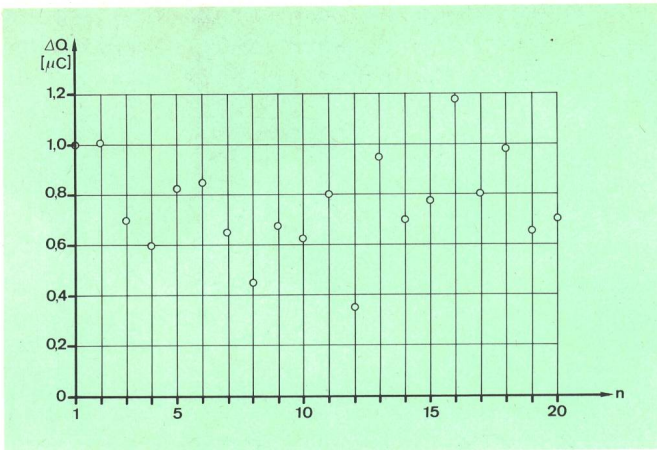


Fig. 3
Distribution de ΔQ sur n – Verteilung von ΔQ auf n

de r . Pour cette dernière, il est nécessaire de connaître, outre Δt , les valeurs de R et de C qui s'obtiennent comme suit. La résistance peut se mesurer directement pour une personne au repos. La valeur obtenue pour le cas de la figure 2 est $R = 7,5 \cdot 10^{11} \Omega$.

Pour simplifier, l'ajustement est limité aux valeurs de pointe de la charge qui correspondent aux instants où la personne vient de soulever le pied. C'est pourquoi il faut doubler la valeur de R au repos. Le calcul sera fait avec

$$R = 1,5 \cdot 10^{12} \Omega$$

La détermination de la capacité C se fait selon la méthode décrite dans [1] en utilisant l'expression

$$C = \frac{\tau(R + R_1)}{R \cdot R_1} - \frac{\tau_1}{R_1} \quad (2.5)$$

τ est le temps caractéristique de la décharge de la combinaison C en parallèle avec la capacité d'entrée de l'instrument de mesure à travers les deux résistances R des chaussures et du sol, en parallèle avec la résistance d'entrée de l'instrument R_1 . τ_1 est le temps caractéristique de l'instrumentation seule. Pour la personne au repos correspondant au cas analysé, les valeurs sont

$$\begin{aligned} R &= 7,5 \cdot 10^{11} \Omega & R_1 &= 4,2 \cdot 10^{11} \Omega \\ \tau &= 70,5 \text{ s} & \tau_1 &= 3,2 \text{ s} \end{aligned}$$

d'où la valeur $C = 254 \text{ pF}$. Afin d'obtenir la valeur recherchée pour l'instant où un seul pied est posé, il faut soustraire la capacité d'une chaussure qui est la moitié de la valeur ci-dessus après soustraction de la capacité du corps, valant 44 pF selon [1]. On obtient

$$C = 254 - \frac{254 - 44}{2} = 149 \text{ pF}$$

Pour des raisons de simplicité, l'ajustement sera limité aux 15 premiers pas. Les croix de la figure 4 représentent les valeurs expérimentales. En partant des valeurs

$$\Delta Q = 0,77 \mu\text{C}$$

$$r = \exp\left(\frac{-0,7}{1,5 \cdot 10^{12} \cdot 149 \cdot 10^{-12}}\right) = 0,9969$$

Werte ableiten. Die Kurve der Figur 2 wird durch Werte, die mit der Gleichung 2.2 errechnet sind, dargestellt. Dazu werden experimentelle Werte für ΔQ und r benötigt. Zur Bestimmung von r müssen ausser Δt noch R und C geschätzt werden, was wie folgt getan werden kann: Der Ableitwiderstand kann für eine ruhig stehende Person direkt gemessen werden. Der für den hier betrachteten Fall (Fig. 2) gültige Wert ist $R = 7,5 \cdot 10^{11} \Omega$.

Der Einfachheit halber soll die Anpassung auf die Momente unmittelbar nach den Schritten beschränkt bleiben, das heisst, man muss obigen Wert verdoppeln, da nur ein Fuss den Boden berührt. Somit wird

$$R = 1,5 \cdot 10^{12} \Omega$$

eingesetzt.

Die Körperkapazität C wird gemäss der in [1] beschriebenen Methode geschätzt. Dazu braucht man die Gleichung

$$C = \frac{\tau(R + R_1)}{R \cdot R_1} - \frac{\tau_1}{R_1} \quad (2.5)$$

τ ist die Zeitkonstante bei der Entladung der parallel zueinander geschalteten Körper- und Messinstrumentkapazität über den Entladewiderstand, der aus den ebenfalls parallel geschalteten Widerständen des Bodens und der Schuhe R sowie des Messinstrumentes R_1 besteht. τ_1 ist die Zeitkonstante der Messanlage allein. Im behandelten Fall gelten für die ruhende Person

$$\begin{aligned} R &= 7,5 \cdot 10^{11} \Omega & R_1 &= 4,2 \cdot 10^{11} \Omega \\ \tau &= 70,5 \text{ s} & \tau_1 &= 3,2 \text{ s} \end{aligned}$$

daher der Wert $C = 254 \text{ pF}$. Man braucht aber den Wert zu den Zeitpunkten, wo nur ein Schuh den Boden berührt. Man muss also die Kapazität eines Schuhs, die der Hälfte des obigen Wertes nach Abzug der Körperkapazität von 44 pF gemäss [1] entspricht, abziehen.

$$C = 254 - \frac{254 - 44}{2} = 149 \text{ pF}$$

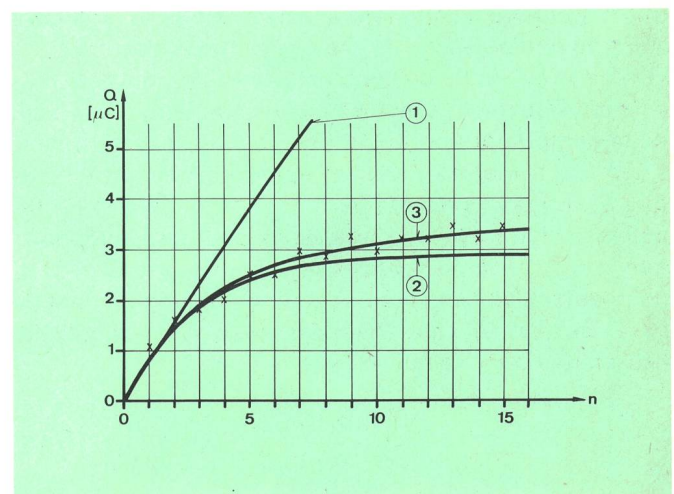


Fig. 4
Courbes ajustées – Angepasste Kurven
1 Avant l'optimisation – Vor der Optimierung
2 Modèle simple optimisé – Einfaches optimisiertes Modell
3 Modèle étendu optimisé – Erweitertes optimisiertes Modell

on obtient la courbe N° 1 avec

$$\chi_v^2 = 20$$

Cette dernière grandeur est une mesure statistique de la qualité de l'ajustement. Elle ne devrait pas être beaucoup plus grande que 1 pour que l'ajustement soit satisfaisant. Il est donc clair qu'avec les valeurs des paramètres adoptées, l'ajustement n'est pas acceptable. Il est possible d'en améliorer la qualité en variant ΔQ et r jusqu'à ce que χ_v^2 soit minimal. Cette recherche du minimum fournit les valeurs

$$\begin{aligned}\Delta Q_m &= 0,84 \mu\text{C} \\ r_m &= 0,71 \\ \chi_{vm}^2 &= 0,085\end{aligned}$$

Le gain en ce qui concerne la qualité de l'ajustement est considérable. Cependant, l'examen de la figure 4 (courbe 2) montre que le modèle sous-estime la charge pour des nombres de pas supérieurs à 7. Il serait donc dangereux de l'utiliser pour des extrapolations, en particulier la valeur fournie de $Q_\infty = 2,90 \mu\text{C}$ est certainement fautive.

La valeur de R obtenue au moyen de 2.1 est

$$R = 1,4 \cdot 10^{10} \Omega$$

Elle est donc environ 100 fois plus faible que la valeur mesurée. ΔQ ne s'est éloigné que de 9 % de la valeur estimée, ce qui est acceptable.

Ce résultat montre que la résistance effective est, pour de faibles valeurs de n , environ 100 fois plus petite que la résistance mesurée, et qu'elle doit augmenter pour des n plus grands. Il est donc nécessaire d'examiner ce paramètre plus en détail. Sa valeur se détermine en appliquant une tension continue de l'ordre de 100 V. On constate généralement que R part d'une valeur initiale R_i pour atteindre plus ou moins rapidement sa valeur stationnaire R_f . C'est cette dernière que l'on adopte habituellement comme représentative de la résistance d'écoulement de la charge. Ce comportement de R indique que le milieu (chaussures et sol) est polarisable et que le défaut d'ajustement constaté est logique. Il convient donc d'améliorer le modèle en permettant à R de varier entre R_i et R_f . Le but n'est pas ici de trouver le modèle physiquement exact, ce qui peut se faire sur la base de la compréhension du ou des phénomènes de polarisation participant à l'établissement du courant électrique. L'expression pour la résistance R contiendrait entre autres la charge déjà accumulée et la température, puisque la relaxation des dipôles est un phénomène thermiquement activé, et le modèle s'enrichirait rapidement en paramètres à ajuster. Pour des raisons de simplicité, l'essai sera donc fait avec l'expression

$$R = \frac{\alpha R_i + n R_f}{\alpha + n} \quad (2.6)$$

α mesure le nombre de pas n pour lequel R vaut

$$R = \frac{R_i + R_f}{2}$$

Zur Vereinfachung begrenzen wir die Rechnung auf die 15 ersten Schritte. Die Kreuze in *Figur 4* entsprechen den gemessenen Werten. Geht man von

$$\Delta Q = 0,77 \mu\text{C}$$

$$r = \exp\left(\frac{-0,7}{1,5 \cdot 10^{12} \cdot 149 \cdot 10^{-12}}\right) = 0,9969$$

aus, so ergibt sich die Kurve Nr. 1 mit

$$\chi_v^2 = 20$$

Dies ist ein statistisches Mass für die Güte der Anpassung des Modells. Es sollte nicht viel grösser als 1 sein, damit das Modell als zufriedenstellend betrachtet werden kann. Somit ist klar, dass die angenommenen Werte der Parameter die experimentelle Kurve schlecht darstellen. Die Güte kann durch Minimalisieren von χ_v^2 verbessert werden, indem man die Werte von ΔQ und r verändert. Es ergeben sich die neuen Werte

$$\begin{aligned}\Delta Q_m &= 0,84 \mu\text{C} \\ r_m &= 0,71 \\ \chi_{vm}^2 &= 0,085\end{aligned}$$

Die Güte wurde beträchtlich verbessert. Es zeigt sich aber aus der Kurve Nr. 2 in *Figur 4*, dass das Modell die Aufladung für Schrittzahlen über 7 unterschätzt. Man darf es also zur Berechnung von extrapolierten Werten nicht verwenden. Insbesondere ist der Wert für die Grenzladung $Q_\infty = 2,90 \mu\text{C}$ sicher falsch.

Mit 2.1 ergibt sich

$$R = 1,4 \cdot 10^{10} \Omega$$

Der angepasste Widerstandswert ist somit rund 100mal kleiner als der gemessene. ΔQ hat sich nur um 9 % verändert, was annehmbar ist.

Dieses Ergebnis zeigt, dass für kleine Schrittzahlen der Widerstand R etwa 100mal kleiner ist als der gemessene Wert und mit zunehmender Schrittzahl grösser werden muss. Dies zwingt dazu, diesen Parameter näher zu betrachten. Zu seiner Bestimmung verwendet man Messspannungen in der Grössenordnung von 100 V Gleichspannung. Man stellt allgemein fest, dass er sich von einem Anfangswert R_i nach einem stationären Endwert R_f bewegt. Letzterer wird als massgebend betrachtet. Dieses Verhalten des Ableitwiderstandes zeigt aber, dass die Schuhsohle und der Bodenbelag polarisierbare Medien sein können. Somit erklärt sich der Anpassungsfehler. Das Modell muss also durch Einsetzen eines zwischen R_i und R_f veränderbaren Widerstandes verbessert werden. Unser Ziel ist nicht, das physikalisch richtige Modell ausfindig zu machen, was aufgrund des Verständnisses der Polarisationsvorgänge, die zum elektrischen Strom beitragen, getan werden kann. Da die Dipolrelaxation ein thermisch aktiviertes Phänomen ist, müsste man ausser der schon gespeicherten Ladung noch die Temperatur heranziehen, so dass die Anzahl anzupassender Parameter rasch ansteigen würde. Der Einfachheit halber wird der Versuch mit dem Ausdruck

$$R = \frac{\alpha R_i + n R_f}{\alpha + n} \quad (2.6)$$

Puisque le modèle simple permet d'ajuster assez bien les points jusqu'à $n = 5$, on peut admettre que la valeur de $R = 1,4 \cdot 10^{10} \Omega$ représente R_i . L'évaluation expérimentale de R_i pose des problèmes lorsqu'on ne dispose que des ohmmètres usuels. Elle conduit à des valeurs situées entre $3 \cdot 10^9 \Omega$ et $1 \cdot 10^{10} \Omega$ pour le cas traité.

Une recherche du minimum de χ^2_v fournit

$$\begin{aligned}\Delta Q_m &= 0,85 \mu\text{C} \\ \alpha_m &= 9,09 \cdot 10^3 \\ \chi^2_v &= 0,021\end{aligned}$$

avec

$$\begin{aligned}R_i &= 1,4 \cdot 10^{10} \Omega \\ R_f &= 1,5 \cdot 10^{12} \Omega \\ \Delta t &= 0,70 \text{ s} \\ C &= 149 \text{ pF}\end{aligned}$$

La courbe 3 de la figure 4 montre l'ajustement obtenu: l'amélioration par rapport au modèle avec $R = \text{constant}$ est sensible. Pour s'assurer de la possibilité d'extrapoler à des valeurs de n plus grandes, l'expérience de la figure 2 a été répétée avec une marche légèrement plus rapide et surtout plus longue, de 150 pas au lieu de 30 seulement. Le seul paramètre modifié est donc

$$\Delta t = 0,64 \text{ s}$$

La figure 5 montre que le modèle dont les paramètres ΔQ et α ont été ajustés sur la base des 15 premiers pas de la marche représentée par la figure 2 est encore valable pour des valeurs de n aussi grandes que 140 au moins. La charge accumulée q vaut environ

$$Q_{140 \text{ exp.}} \approx 7,5 \mu\text{C}$$

Le modèle prédit

$$Q_{140 \text{ calc.}} = 7,7 \mu\text{C}$$

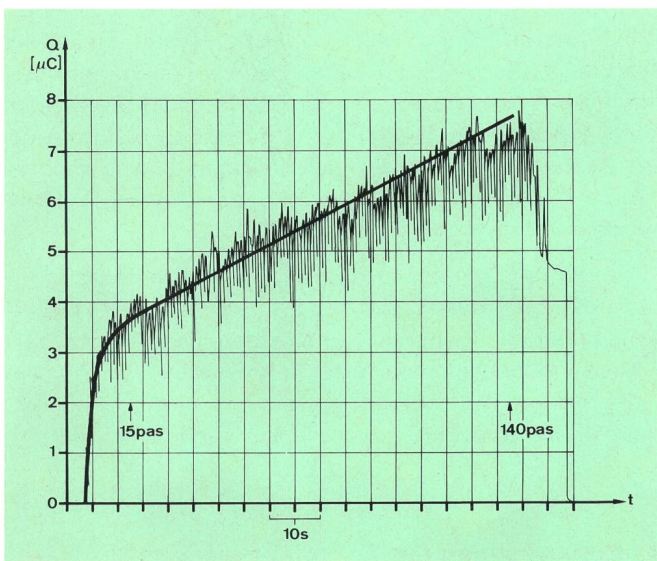


Fig. 5
Extrapolation de la courbe ajustée — Extrapolation der angepassten Kurve
Pas — Schritte

gemacht, wobei für $\alpha = n$

$$R = \frac{R_i + R_f}{2}$$

ist.

Da das einfache Modell bis zu $n = 5$ tauglich ist, muss man annehmen, dass der Wert $R = 1,4 \cdot 10^{10} \Omega$ eine gute Abschätzung für R_i ist. Mit den üblichen Ohmmetern ist die experimentelle Bestimmung problematisch. Man erhält Werte zwischen $3 \cdot 10^9 \Omega$ und $1 \cdot 10^{10} \Omega$ im behandelten Fall.

Die Minimalisierung von χ^2_v ergibt

$$\begin{aligned}\Delta Q_m &= 0,85 \mu\text{C} \\ \alpha_m &= 9,09 \cdot 10^3 \\ \chi^2_v &= 0,021\end{aligned}$$

mit

$$\begin{aligned}R_i &= 1,4 \cdot 10^{10} \Omega \\ R_f &= 1,5 \cdot 10^{12} \Omega \\ \Delta t &= 0,70 \text{ s} \\ C &= 149 \text{ pF}\end{aligned}$$

Die Kurve Nr. 3 in Figur 3 zeigt eine merkliche Verbesserung, verglichen mit dem Modell, in dem $R = \text{konstant}$ ist. Um sicherzustellen, dass jetzt das Extrapolieren möglich ist, wurde der Gehversuch gemäss Figur 2 mit einem etwas schnelleren und hauptsächlich längeren Gehen von 150 Schritten anstelle von nur 30 wiederholt. Der einzige veränderte Parameter ist also

$$\Delta t = 0,64 \text{ s}$$

Aus Figur 5 ist ersichtlich, dass das Modell, dessen Parameter ΔQ und α anhand der ersten 15 Schritte des Gehversuches gemäss Figur 2 bestimmt wurden, für Schrittzahlen bis mindestens 140 noch brauchbar ist. Die gespeicherte Ladung beträgt für $n = 140$

$$Q_{140 \text{ exp.}} \approx 7,5 \mu\text{C}$$

Das Modell ergibt

$$Q_{140 \text{ ber.}} = 7,7 \mu\text{C}$$

Mit dem Modell, in dem $R = \text{konstant}$ ist, hätte man

$$Q_{140 \text{ ber.}} = 2,9 \mu\text{C}$$

erhalten.

Der Wert des Ableitwiderstandes beträgt bei 140 Schritten

$$R_{140} = 3,6 \cdot 10^{10} \Omega$$

Der Anstieg von R mit der Schrittzahl n ist äusserst langsam. Der Mittelwert zwischen R_i und R_f wird erst nach 9000 Schritten erreicht.

Abschliessend sei gesagt, dass die Erweiterung des Modells 2.2 mit dem Ausdruck 2.6 zur Darstellung der gespeicherten Ladung tauglich ist. Bei $R_i = R_f$ ist das erweiterte Modell dem einfachen gleich. Es sei noch er-

Le modèle avec $R = \text{constant}$ aurait fourni

$$Q_{140 \text{ calc.}} = 2,9 \mu\text{C}$$

Au 140° pas, la résistance vaut

$$R_{140} = 3,6 \cdot 10^{10} \Omega$$

La variation de R avec n est donc très lente: ce n'est en principe qu'au bout de 9000 pas que R atteint la moyenne entre R_i et R_f .

En conclusion de ce paragraphe, on peut dire que l'extension du modèle 2.2 par l'expression 2.6 est admissible pour la représentation de la charge accumulée. En particulier pour $R_i = R_f$, le modèle étendu est identique au modèle simple. L'on remarquera, en outre, qu'il n'est pas nécessaire de connaître le détail du ou des phénomènes de polarisation.

3 Limitation de la charge accumulée

Le modèle qui vient d'être discuté sera maintenant utilisé à la recherche d'un moyen de maintenir la charge accumulée dans des limites raisonnablement basses, si possible inoffensives. Il n'est malheureusement pas possible de limiter ΔQ à des valeurs qui soient toujours sans effet néfaste, car cette grandeur dépend de facteurs aléatoires tels que le rapport des surfaces frottées, etc. (voir par exemple [1]). Le seul paramètre sur lequel on puisse exercer un contrôle efficace est la résistance d'écoulement des charges R , par l'intermédiaire de R_i et surtout de R_f . La figure 5 montre qu'un temps très long peut s'écouler avant que la charge limite Q_∞ soit atteinte.

Pour un nombre de pas important, $n > 5$, donc pour des locaux de grandes dimensions comme des salles et des couloirs, une réduction sensible de la charge accumulée est obtenue en diminuant r de 1 à 0,5, ainsi que le montre la figure 6. Vouloir maintenir $r < 0,5$ apparaît comme peu profitable. Pour des locaux où l'on ne se dé-

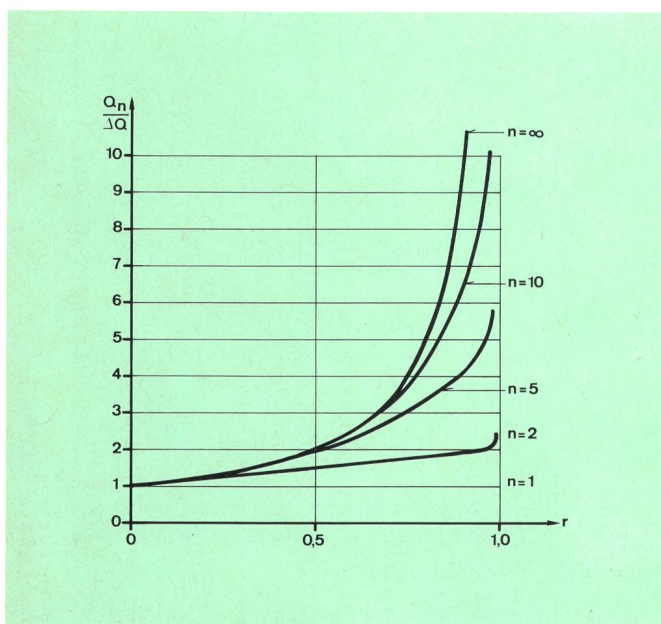


Fig. 6
Variation de la charge avec r — Abhängigkeit der Ladung von r
 n Nombre de pas — Anzahl Schritte

wähnt, dass es nicht nötig ist, das Polarisationsphänomen im Detail zu kennen.

3 Begrenzung der gespeicherten Ladung

Das oben behandelte Modell soll jetzt zur Herleitung eines Mittels, das erlaubt, die Aufladung innerhalb vernünftiger, wenn möglich unschädlicher Grenzen zu halten, verwendet werden. Leider kann ΔQ nicht auf Werte, die immer unterhalb der Störgrenze liegen, beschränkt werden, da diese Grösse von unkontrollierbaren Faktoren abhängt, wie dem Verhältnis der aufeinanderreibenden Flächen usw. [1]. Der einzige wirksam beeinflussbare Parameter ist der Ableitwiderstand R , der von R_i und R_f bestimmt ist. Figur 5 zeigt, dass viel Zeit verstreichen kann, bevor die Grenzladung Q_∞ erreicht wird.

Bei grossen Schrittzahlen, $n > 5$, das heisst in grösseren Räumen wie Sälen oder Gängen, hat eine Reduktion des Parameters r von 1 auf 0,5 einen beträchtlichen Einfluss auf die gespeicherte Ladung, wie es aus Figur 6 ersichtlich ist. Eine weitere Herabsetzung unterhalb 0,5 bringt keinen wesentlichen Gewinn. Für Räume, in denen man sich nur wenig bewegt, zum Beispiel bei sitzender Arbeit, ist die Ladung von einer Veränderung von r praktisch unabhängig. Hinsichtlich der Begrenzung der gespeicherten Ladung ist es somit vernünftig, $r = 0,5$ als obere Grenze zu fordern.

Man kann diese Grösse konstant halten und den Wert des Widerstandes R für verschiedene Körperkapazitäten C als Funktion der Schrittfrequenz ausrechnen

$$R = 1,443 \frac{\Delta t}{C} \quad (3.1)$$

In Figur 7 ist das Ergebnis dieser Rechnung grafisch dargestellt. Man sieht daraus, dass R auf $5 \cdot 10^8 \Omega$ bis $2 \cdot 10^9 \Omega$ begrenzt werden muss, wenn bei grösseren Schrittfrequenzen mit $\Delta t \approx 0,1$ s und häufig auftretenden Werten von C , zwischen 100 und 500 pF, ein Schutz gewährleistet sein soll. Bei so tiefen Werten spielt aber die Polarisation nur noch eine unbedeutende Rolle, typisch ist $R_f = 2 \dots 3 R_i$, so dass man $R_i \approx R_f$ setzen kann.

Untersucht man, ob bei solchen R -Werten die Aufladung innerhalb unschädlicher Grenzen bleibt, stellt man fest, dass dies nicht der Fall ist: Es können immer noch kurze Spitzen von mehreren Kilovolt beobachtet werden. Solche Aufladungen sind verhältnismässig selten, dürfen aber nicht unbeachtet bleiben, denn es sind elektronische Bauteile bekannt, die ab Spannungen von 100 V gestört werden (zum Beispiel [4]).

Es zeigt sich somit, dass einerseits eine Begrenzung der Aufladung das Problem nicht ganz löst, dass andererseits aber ein weiteres Herabsetzen des Ableitwiderstandes keine nennenswerte Verbesserung bringt. Die Lage scheint aussichtslos zu sein, wenn man bedenkt, dass die Begrenzung von ΔQ kaum verwirklicht werden kann.

4 Beherrschung des Entladevorganges

Wie gesehen, ist trotz einer fast maximalen Begrenzung der gespeicherten Ladung mit häufigen Überschreitungen der Störgrenze zu rechnen. Dies zwingt

place que très peu ou pas du tout, par exemple dans des ateliers où l'on travaille assis, la charge accumulée est pratiquement insensible à une variation de r . Du point de vue de la limitation de la charge accumulée, il est donc raisonnable d'imposer $r = 0,5$ comme limite supérieure.

En maintenant cette valeur constante, il est possible de calculer R pour différentes valeurs de la capacité C , en fonction de la vitesse de marche

$$R = 1,443 \frac{\Delta t}{C} \quad (3.1)$$

La figure 7 présente le résultat de ce calcul et montre que, si l'on veut assurer la protection pour des marches assez rapides avec $\Delta t \approx 0,1$ s et des valeurs fréquentes de C , c'est-à-dire comprises entre 100 et 500 pF, il est nécessaire de limiter R au domaine $5 \cdot 10^8 \dots 2 \cdot 10^9 \Omega$.

Cependant, pour des résistances aussi basses, l'expérience montre que R_i et R_f sont très proches l'un de l'autre, les valeurs typiques sont $R_f = 2 \dots 3 R_i$, de sorte que l'on peut poser $R_i \approx R_f$.

En se demandant si, avec de telles valeurs de la résistance, la charge accumulée reste dans des limites inoffensives, l'on constate qu'il n'en est rien: les charges maximales atteintes correspondent à des tensions de plusieurs kilovolts. Ces cas sont relativement rares, mais il n'est pas permis de les ignorer et l'on connaît des composants électroniques qui réagissent déjà à partir de 100 V (voir par exemple [4]).

Il découle de ce qui précède que, d'une part, une limitation de la charge accumulée ne résoud pas le problème entièrement et, d'autre part, qu'une réduction plus poussée de la résistance n'apporte plus de gain sensible. Il semble donc que la situation soit sans issue, puisque le maintien contrôlé de ΔQ dans des limites acceptables n'est pas réalisable.

4 Contrôle de la décharge

On vient de voir que, malgré une limitation presque maximale de la charge accumulée, il faut s'attendre que la limite dangereuse soit fréquemment dépassée. On est ainsi obligé de renoncer à une protection absolue et à opérer un contrôle de la décharge, puisque celui de la charge ne suffit pas. Le seul moyen est d'imposer un moment d'attente entre le dernier pas ou mouvement et l'instant où un objet sensible est touché, dans le but de permettre la diminution de la charge accumulée à des valeurs inoffensives. La loi physique de ce phénomène est décrite par 2.1, où le temps entre les pas successifs, Δt , doit être remplacé par le temps δt qui correspond à l'attente imposée. Puisque la charge est liée à la tension U par $Q = CU$, on a

$$U(\delta t) = U_0 \cdot e^{-\delta t/RC} \quad (4.1)$$

Le calcul du temps δt nécessaire pour que la tension puisse décroître de 10 kV et 1 kV à 100 V en fonction de la résistance R est représenté à la figure 8. Il est raisonnable d'attendre de la part d'une personne instruite, travaillant normalement, qu'elle marque une pose de l'ordre du dixième de seconde avant de toucher un objet susceptible d'être endommagé. Cela impose une limite

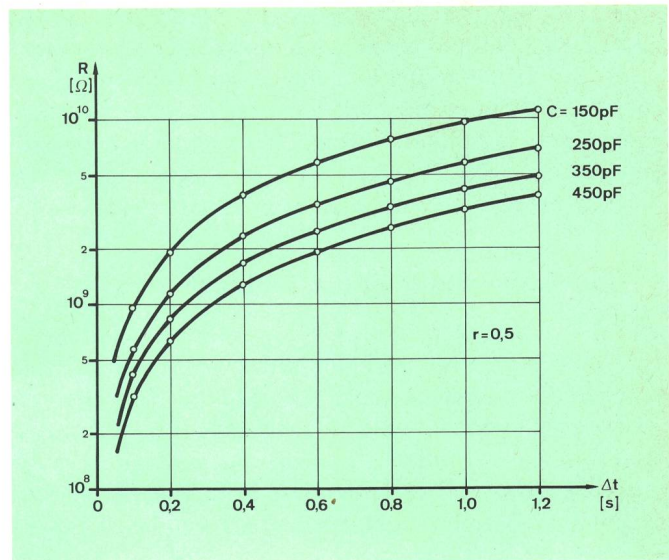


Fig. 7
Variation de la résistance R avec la fréquence des pas pour $r = 0,5$ —
Abhängigkeit des Ableitwiderstandes R von der Schrittfréquence für
 $r = 0,5$

auf einen absoluten Schutz zu verzichten und, ausser der Aufladung, die Entladung unter Kontrolle zu bringen. Die einzige Lösung dafür ist, eine Wartezeit zwischen der letzten Bewegung und dem Berühren eines empfindlichen Objektes zu beachten, damit die Ladung auf einen unschädlichen Wert absinken kann. Der Entladevorgang entspricht der Gleichung 2.1, wobei Δt durch die Wartezeit δt ersetzt werden muss. Da die Ladung der Spannung U proportional ist, $Q = CU$, hat man

$$U(\delta t) = U_0 \cdot e^{-\delta t/RC} \quad (4.1)$$

Die Zeit δt , die benötigt wird, damit die Ladung von 10 kV beziehungsweise 1 kV auf 100 V absinken kann, ist in Figur 8 als Funktion von R dargestellt. Von einer instruierten, normal arbeitenden Person kann das Einhalten einer Pause von 0,1 s verlangt werden. Dies führt zu einem oberen Grenzwert von $R = 10^8 \Omega$. Wenn eine grössere Gefahr als lediglich das Stören von elektronischen Funktionen herrscht, wie das Zünden einer Explosion in Akkumulatorenräumen, ist es erforderlich, diese Grenze um einen Faktor 10 herabzusetzen, damit eine

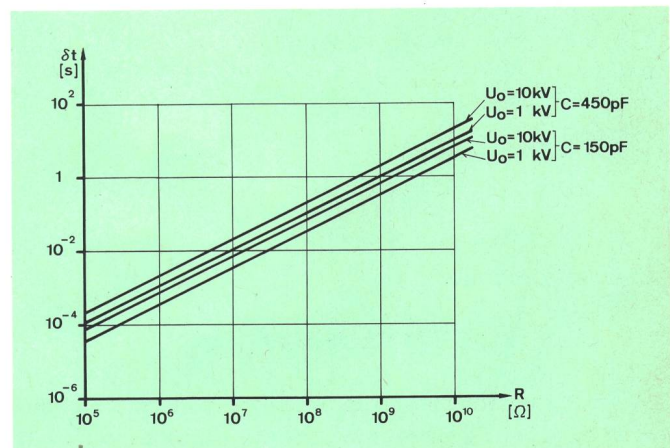


Fig. 8
 $\delta t = f(R; C, U_0)$ pour $U(\delta t) = 100 \text{ V}$ — $\delta t = f(R; C, U_0)$ bei $U(\delta t) = 100 \text{ V}$

supérieure de la résistance R de l'ordre de $10^8 \Omega$. Lorsqu'il y a un danger plus sérieux que l'endommagement ou le dérangement de circuits électroniques, comme, par exemple, l'explosion d'accumulateurs, il conviendra de réduire encore la résistance d'un facteur 10, soit à $10^7 \Omega$, pour des δt de l'ordre de 10^{-2} s. Ainsi, la probabilité d'un accident est encore réduite.

5 Conséquences et valeur limite adoptée

Comme nous venons de le voir, une protection absolue contre les décharges électrostatiques ne serait réalisable que s'il était possible d'annuler la résistance de décharge. Cependant, une valeur de $10^5 \Omega$ à $10^6 \Omega$ constitue une limite inférieure qu'il ne faut pas dépasser en raison des risques d'électrocution. En ce cas, Q_∞ est très proche de ΔQ , qui peut être de l'ordre de $1 \mu\text{C}$, si l'on se souvient de l'exemple pratique analysé (fig. 3). Or, cette charge correspond à une tension

$$U = \frac{Q}{C} \approx 5000 \text{ V}$$

ou à une énergie

$$W = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} \approx 2,5 \text{ mJ}$$

en prenant $C = 200 \text{ pF}$, valeur souvent rencontrée dans la pratique.

Le temps nécessaire pour ramener cette charge à des valeurs inoffensives est de l'ordre de 10^{-3} s à 10^{-1} s, lorsque R varie entre $10^5 \Omega$ et $10^8 \Omega$ (fig. 8). Il est donc possible de transmettre une décharge destructrice à un objet sensible, si on le frôle ou si on le touche tout en marchant.

Les conséquences de ce fait sont les suivantes: premièrement, l'instruction du personnel est une nécessité absolue et, deuxièmement, il faut prévoir une protection à l'intérieur des appareils et des installations, comme par exemple des chemins de décharge contrôlés, à la manière des parafoudres. De plus, il conviendra d'interdire l'accès de certains locaux, ou de ne le permettre que sous surveillance, à des personnes étrangères au service. En outre, afin de ne pas augmenter le coût des installations, il faut que l'on puisse admettre des valeurs de R variables dans des limites raisonnables.

Tous les arguments ci-dessus font converger le choix vers deux types de locaux, définis par les limites admissibles des valeurs de R :

a) sécurité normale

$$10^5 \Omega \leq R \leq 10^8 \Omega$$

b) sécurité accrue

$$10^5 \Omega \leq R \leq 10^7 \Omega$$

Il convient d'insister ici sur un fait important. Ces deux types de locaux n'offrent la sécurité escomptée qu'à la condition expresse que les chaussures n'augmentent pas la résistance R de manière excessive. On sera par conséquent souvent amené à imposer le port de chaus-

sure de $0,01$ s schon genügt. Dies erlaubt, die Wahrscheinlichkeit von Unfällen noch zu reduzieren.

5 Folgerungen und Festlegung der Grenzen

Ein absoluter Schutz gegen elektrostatische Entladungen kann, wie erläutert, nicht verwirklicht werden, da wegen der Gefahr von Elektrounfällen dem Ableitwiderstand eine untere Grenze von $10^5 \Omega$ bis $10^6 \Omega$ gesetzt werden muss. Bei solchen Werten für R liegt die Grenzladung Q_∞ sehr nahe bei ΔQ . Letztere kann aber in der Größenordnung von $1 \mu\text{C}$ liegen, wie es der analysierte Fall zeigt (Fig. 3). Dieser Ladung entspricht eine Spannung

$$U = \frac{Q}{C} \approx 5000 \text{ V}$$

oder eine Energie

$$W = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} \approx 2,5 \text{ mJ}$$

wenn man mit dem häufig beobachteten Wert von $C = 200 \text{ pF}$ rechnet.

Diese Ladung klingt innerhalb etwa 10^{-3} ... 10^{-1} s auf einen unschädlichen Wert ab, wenn sich R im Bereich von 10^5 ... $10^8 \Omega$ bewegt (Fig. 8). Somit besteht die Möglichkeit, einem empfindlichen Objekt einen zerstörerischen Schlag zu versetzen, wenn man es beim Gehen berührt.

Die Konsequenzen daraus sind erstens, dass die Instruktion des Personals eine absolute Notwendigkeit ist, und zweitens, dass die Geräte und Anlagen geschützt werden müssen, beispielsweise durch kontrollierte Entladungspfade ähnlich den Blitzableitern. Dazu ist es angebracht, den Zutritt zu gewissen Räumlichkeiten Unbefugten zu untersagen oder nur unter Aufsicht zu erlauben. Schliesslich sollte R innerhalb vernünftiger Grenzen variieren können, um die Kosten nicht unnötig in die Höhe zu treiben.

Alle obigen Argumente steuern folgenden, durch die zulässigen Werte des Ableitwiderstandes definierten Raumtypen zu:

a) normaler Schutz

$$10^5 \Omega \leq R \leq 10^8 \Omega$$

b) erhöhter Schutz

$$10^5 \Omega \leq R \leq 10^7 \Omega$$

Eine wichtige Tatsache muss aber ganz besonders betont werden, nämlich dass der erhoffte Schutz nur dann sichergestellt ist, wenn das Schuhwerk den Ableitwiderstand R nicht unzulässig erhöht. Somit wird man öfters gezwungen sein, antistatische Schuhe oder sogar das Erdungsarmband vorzuschreiben.

6 Elektrostatisches Bodentestgerät

Die Abteilung Forschung und Entwicklung der Generaldirektion der PTT-Betriebe (V) hat ein einfaches Gerät

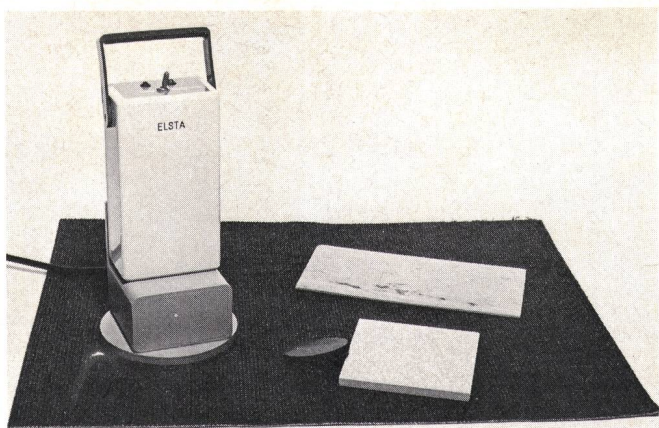


Fig. 9
Appareil à tester les sols — Bodentestgerät

sures antistatiques ou même du bracelet de mise à terre.

6 Appareil à tester les propriétés électrostatiques des sols

La Division des recherches et du développement de la Direction générale de l'Entreprise des PTT a mis au point un appareil très simple permettant de tester les propriétés électrostatiques des sols, selon la norme DIN 51 953. Son utilisation ne pose aucun problème: après branchement au réseau électrique et deux contrôles, il est prêt à être utilisé. La *figure 9* montre une vue de cet appareil. Deux lampes, l'une verte, l'autre rouge, indiquent si le

hergestellt, mit dem die elektrostatischen Eigenschaften von Böden gemäß der Norm DIN 51953 getestet werden können (*Fig. 9*). Seine Anwendung ist problemlos: Nach dem Anschliessen an das elektrische Netz und der Durchführung von zwei Kontrollen ist es betriebsbereit. Eine grüne und eine rote Lampe zeigen an, ob der getestete Boden den Anforderungen hinsichtlich Ableitwiderstand genügt oder nicht:

$R_A \leq 10^8 \Omega$ auf Stellung «Elektronik» für Räume, in denen empfindliche Geräte und Anlagen betrieben werden

$R_A \leq 10^7 \Omega$ auf Stellung «Akku» für Akkumulatorenräume.

Die Funktionsweise ist aus *Figur 10* ersichtlich. Der zu bestimmende Widerstand R_X des zu testenden Bodens stellt einen Zweig einer Messbrücke dar. Der 10-k Ω -Trimmer dient zur Einstellung des Ruhepotentials beider Eingänge des als Komparator geschalteten Operationsverstärkers (erfolgt im Laboratorium). Um thermische Drifts zu vermeiden, wurde die Speisespannung klein gewählt. Die Messspannung beträgt 200 V und ist beim Berühren der Messelektrode gefahrlos, da je nach Stellung ein Widerstand von 1 M Ω oder 10 M Ω in Serie geschaltet wird. *Figur 11* zeigt den einfachen inneren Aufbau.

Die Eichung wird so vorgenommen, dass die Schaltung schon einige Prozent oberhalb des Sollwertes auf «Grün» kippt, um jeglichen Zweifel auszuschalten, wenn sich der Belag als ungenügend erweisen sollte.

Temperaturschwankungen im Bereich von 10...30° C bewirken einen Messfehler kleiner als $\pm 2\%$. Ebenso

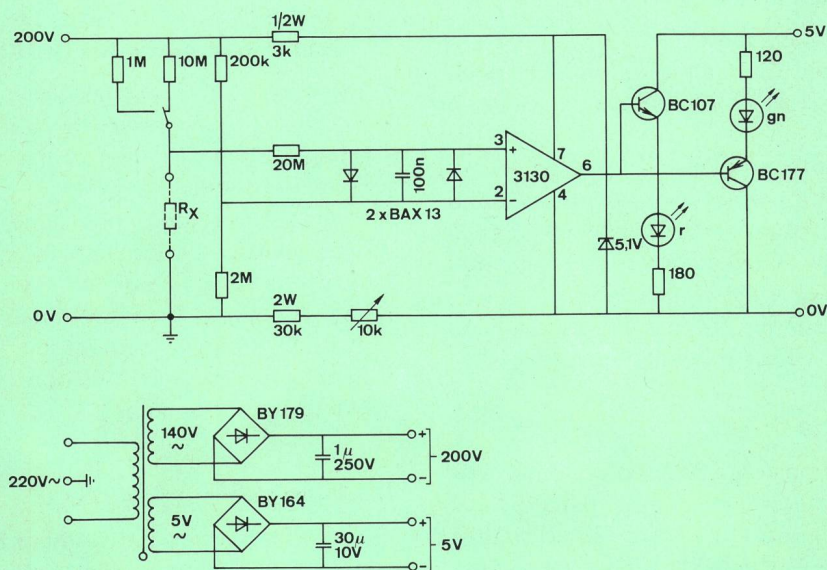


Fig. 10
Schéma de l'appareil à tester les sols — Schaltung des Bodentestgerätes

est préférable de préparer l'échantillon comme s'il était réellement installé, par exemple, en le collant sur une feuille d'aluminium en utilisant la même colle que pour la pose.

721 Test d'un échantillon

1. Préparer une feuille de mousse conductrice ayant une résistance de l'ordre de $10^4 \Omega$. Cette feuille doit être plus grande que l'échantillon.
2. Relier cette feuille à la prise de terre de l'appareil en insérant une résistance de $3,3 M\Omega$ si l'échantillon est prévu pour un local d'accumulateurs ou de $33 M\Omega$ pour les autres sols.
3. Poser l'échantillon sur la feuille et faire le test. Si le résultat est négatif, renoncer à utiliser le sol en question.
4. Si le résultat est positif, avertir la maison qui pose le sol que la résistance de la colle ou du ciment utilisé pour la pose ne doit pas dépasser $33 M\Omega$ ou $3,3 M\Omega$ respectivement.

722 Essai de sols posés, règles générales

- Un essai consiste à faire le test en 20 endroits différents au moins, répartis de manière régulière dans tout le local.
- Le test est positif si la lampe verte s'allume en chaque endroit.
- Si l'on trouve au plus 25 % d'endroits négatifs, répéter l'essai après augmentation de la surface de l'électrode au moyen d'un papier buvard humide, mais pas mouillé, de $6,3 \text{ cm} \times 6,3 \text{ cm}$ ou de $7,1 \text{ cm}$ de rayon. S'il s'agit d'une moquette, on se servira d'une pièce métallique de mêmes dimensions. Le résultat est toujours considéré comme positif, s'il n'y a plus d'endroit négatif.
- Si, malgré la présence d'un sol antistatique selon les normes actuelles, des perturbations électrostatiques sont observées, on fera tout d'abord un essai avec des chaussures antistatiques. Si l'on n'obtient pas le succès escompté, il faut en conclure que l'installation ne remplit pas les conditions requises.

73 Sol nouvellement posé (essai de réception)

731 Local d'accumulateurs

En cas de résultat négatif de l'essai, le sol doit être refusé. S'il n'est pas possible de le remplacer, il faut prévoir des zones de sécurité selon 75 autour des bacs d'accumulateurs.

732 Local abritant des machines et des équipements sensibles

Ces locaux sont définis dans les «Prescriptions relatives à la manipulation et à la construction des unités et composants susceptibles d'être mis en danger par des décharges électrostatiques», point 431.

En cas de résultat négatif de l'essai, il faut en principe refuser le sol.

sind. Das gleiche gilt für Zement, Beton, Spachtelmasse usw. Daher ist es vorzuziehen, ein Muster so vorzubereiten, als wäre es wirklich verlegt worden. Man kann es beispielsweise auf eine Aluminiumfolie kleben, unter Verwendung des gleichen Klebers wie für die Verlegung.

721 Test am Muster

1. Eine Schaumstoffmatte, die grösser sein sollte als das zu prüfende Muster und die einen Widerstand von etwa $10^4 \Omega$ aufweist, vorbereiten.
2. Diese Unterlage mit der Erdungsbuchse verbinden. Bei Mustern, die für Akkumulatorenräume vorgesehen sind, muss ein Widerstand von $3,3 M\Omega$, für die übrigen Böden von $33 M\Omega$ in Serie geschaltet werden.
3. Das Muster wird auf die Unterlage gelegt und getestet. Bei negativem Ergebnis (rote Lampe) ist das Muster untauglich.
4. Bei positivem Ergebnis (grüne Lampe) sollte die Bodenlegerfirma schriftlich orientiert werden, dass Leim, Haftmörtel usw. einen Ableitwiderstand kleiner als $3,3 M\Omega$ oder $33 M\Omega$ aufweisen müssen.

722 Test am verlegten Boden, allgemeine Regeln

1. Der Test muss an mindestens 20 regelmässig im zu prüfenden Raum verteilten Stellen durchgeführt werden.
2. Das Ergebnis ist positiv, wenn überall die grüne Lampe aufleuchtet.
3. Werden höchstens 25 % schlechte Stellen gefunden, wird der Versuch mit erhöhter Elektrodenfläche wiederholt. Für Hartbeläge verwende man hierzu ein feuchtes, aber nicht nasses Fliesspapier von $6,3 \text{ cm} \times 6,3 \text{ cm}$ oder $7,1 \text{ cm}$ Durchmesser. Handelt es sich um einen Teppich, so verwende man eine Metallplatte gleicher Abmessungen. Das Ergebnis wird noch als positiv betrachtet, wenn keine schlechte Stelle mehr gefunden wird.
4. Werden trotz antistatischen Böden elektrostatische Störungen beobachtet, so soll ein Versuch mit antistatischen Schuhen gemacht werden. Bleibt der erhoffte Erfolg aus, so muss daraus gefolgert werden, dass die Anlagen den entsprechenden Forderungen hinsichtlich Störfestigkeit nicht genügen.

73 Neuverlegter Boden (Abnahmeprüfung)

731 Akkumulatorenräume

Bei negativem Ergebnis muss der Boden zurückgewiesen werden. Wenn er nicht ersetzt werden kann, müssen Schutzzonen gemäss Ziffer 75 um die Akkumulatoren herum verlegt werden.

732 Räume mit empfindlichen Maschinen und Ausrüstungen

Diese Räume sind in den «Handhabungs- und Raumvorschriften für Elektronik, die durch elektrostatische Ladungen gefährdet ist», Punkt 431, definiert. Bei negativem Ergebnis muss der Boden grundsätzlich zurückgewiesen werden.

74 Sol ancien

741 Local d'accumulateurs

En cas de résultat négatif de l'essai, il y a lieu de procéder ainsi

- Si le sol doit être remplacé dans l'année, redoubler les mesures de prudence en attendant le nouveau sol.
- S'il n'est pas prévu de remplacer le sol, il faut installer des zones de sécurité selon 75 autour des bacs d'accumulateurs.

742 Local abritant des équipements sensibles

- En cas de résultat négatif de l'essai, c'est la gravité des perturbations qui dictera les mesures à prendre.
- Si des pannes nécessitant une intervention sont observées, il conviendra d'examiner l'installation perturbée aussi bien que le sol, car il se peut que celle-ci soit trop sensible et le remplacement du sol ne résoudrait pas le problème.
- Il faut à tout prix éviter de faire appel à un traitement du sol au moyen d'un produit antistatique. Ces produits, surtout sous forme de sprays, ne présentent pas d'avantage durable et les risques qu'ils dégradent l'installation électronique sont trop importants.

Les seules solutions appropriées sont soit le remplacement du sol, soit le recours à des zones de sécurité selon 75.

75 Zones de sécurité

Il est possible de protéger l'installation ou la batterie mises en danger en posant autour de l'objet considéré un revêtement supplémentaire antistatique. La zone de sécurité ainsi créée doit être assez large pour qu'il soit impossible de toucher l'objet sans que l'on ait les deux pieds posés sur le revêtement de protection supplémentaire. Il est essentiel que la mise à terre de ce revêtement supplémentaire soit absolument sûre.

8 Conclusions

Il a été démontré que les valeurs limites de la résistance d'écoulement ont une signification raisonnable et se justifient sans difficulté. Elles sont en vigueur depuis plusieurs années déjà dans notre entreprise. L'on constate malheureusement qu'elles ne sont pas toujours respectées, même dans les bâtiments neufs, souvent parce qu'on utilise des produits non contrôlés. Une source d'erreurs fréquente est par exemple l'emploi de colles isolantes pour la pose de sols antistatiques, ce qui montre à quel point le problème est encore méconnu de nos jours. En outre, dans certains milieux il n'est pas suffisamment pris au sérieux parce que les grands ordinateurs sont encore relativement robustes à l'égard des décharges électrostatiques et l'on a trop tendance à oublier les installations périphériques qui peuvent être très sensibles. D'autre part, on entend fréquemment l'argument qu'il suffit d'augmenter l'humidité de l'air pour supprimer les charges statiques. Il est bien clair que celle-ci joue un rôle important, cependant une réduction de la résistance d'un facteur 10, rarement suffisante, nécessite une augmentation de 30 % de l'humidité.

74 Früher verlegter Boden

741 Akkumulatorenräume

Bei negativem Ergebnis

- Wird der Boden in absehbarer Zeit ersetzt, genügt es, die Vorsichtsmassnahmen bis zu diesem Zeitpunkt zu verschärfen.
- Ist es hingegen nicht vorgesehen, den Boden zu ersetzen, müssen Schutzzonen gemäss Ziffer 75 verlegt werden.

742 Räume mit empfindlichen Maschinen und Ausrüstungen

- Bei negativem Ergebnis bestimmt das Ausmass der beobachteten Störungen das weitere Vorgehen.
- Wenn Störungen auftreten, die einen Eingriff als nötig erscheinen lassen, muss ausser dem Boden auch die gestörte Anlage geprüft werden, denn diese könnte sich als so empfindlich erweisen, dass das Ersetzen des Bodens zum Beheben der Störungen nicht genügen würde.
- Behandlungen mit sogenannten antistatischen Mitteln sollten keinesfalls vorgenommen werden. Diese Produkte, hauptsächlich als Sprays angeboten, bieten keinen dauerhaften Schutz und sind für die elektronischen Anlagen nicht gefahrlos.

Die einzige Lösung besteht im Ersetzen des Bodens oder im Aufbringen von Schutzzonen gemäss Ziffer 75.

75 Schutzzonen

Es ist möglich, die gefährdete Anlage oder Batterie zu schützen, indem ein antistatischer Zusatzbelag um das Objekt herum verlegt wird. Diese Schutzzone muss so breit bemessen sein, dass man gezwungen ist, mit beiden Füßen darauf zu stehen, bevor das Objekt berührt werden kann. Es ist absolut unerlässlich, diesen Belag kontrolliert zu erden.

8 Schlussfolgerungen

Es wurde gezeigt, dass die Grenzwerte des Ableitwiderstandes eine vernünftige Bedeutung haben, die sich leicht rechtfertigen lässt. Bei den PTT-Betrieben sind diese Werte schon seit einigen Jahren in Kraft. Leider aber stellt man immer wieder fest, dass ihnen auch in neuen Bauten nicht immer die nötige Aufmerksamkeit geschenkt wird und nicht geprüfte Produkte verwendet werden. Eine häufige Fehlerquelle ist das Verlegen eines antistatischen Belages mit einem isolierenden Kleber, was auf mangelnde Kenntnis des Problems schliessen lässt. Dazu wird es in gewissen Kreisen nicht ernst genug genommen, da Grosscomputer noch verhältnismässig störfest sind und man geneigt ist, die Peripheriegeräte, die sehr empfindlich sein können, zu vergessen. Andererseits hört man oft, es genüge, die Luftfeuchtigkeit zu erhöhen, um elektrostatische Störungen aus der Welt zu schaffen. Es ist klar, dass die Luftfeuchtigkeit eine wichtige Rolle spielt. Eine Verbesserung des Ableitwiderstandes um einen Faktor 10 genügt jedoch selten, erfordert aber eine Erhöhung der Luftfeuchtigkeit um 30 %, was das Leistungsvermögen der meisten Klima-

dité relative, ce qui, dans la plupart des cas, dépasse les possibilités des installations de climatisation et peut conduire à un «climat de buanderie».

En raison de la mise en service, de plus en plus massive de circuits sensibles tels que les CMOS, les défaillances de machines dues à des décharges statiques ont augmenté de manière sensible au cours des deux dernières années. Cela met en évidence la nécessité de poser des sols adaptés à l'utilisation prévue des locaux considérés.

Bibliographie

- [1] *Nadler C. J.* Problèmes soulevés par le phénomène de l'électricité statique. Berne, Bull. techn. PTT 57 (1979) 6, p. 213.
- [2] *Nadler C. J.* Charge électrostatique en relation avec la sécurité de l'être humain. Berne, Direction générale des PTT,

lagen übersteigt oder ein «Waschküchenklima» zur Folge haben kann.

Wegen der vermehrten Anwendung empfindlicher Schaltungen wie CMOS haben in den letzten zwei Jahren die elektrostatischen Störungen beträchtlich zugenommen. Dies macht das Verlegen geeigneter Böden immer notwendiger.

Division des recherches et du développement, rapport interne VM11, 027A (29.3.1974).

- [3] *Oxé J.* und *Boschung P.* Prüfung und Beurteilung des elektrostatischen Verhaltens textiler Bodenbeläge im simulierten Begehtest. Heidelberg, Melliand Textilberichte 56 (1975), S. 301.
- [4] *Lüttgens G.* und *Boschung P.* Elektrostatische Aufladungen. Grafenau/Würth., 1980.

**Die nächste Nummer bringt unter anderem
Vous pourrez lire dans le prochain numéro**

6/82

- | | |
|--------------|---|
| B. Zürcher | Darstellung von Zeichen und Bildern bei Videotex
Représentation de caractères et d'images dans le Vidéotex |
| U. Bretscher | Der gasbetriebene Omnibus RH 580-25
Le bus à moteur à gaz RH 580-25 |
| A. Grunder | Paketsortieranlage und Sackhängebahn in der Halle «Post» des Verkehrshauses
in Luzern |