

Zeitschrift: Mittex : die Fachzeitschrift für textile Garn- und Flächenherstellung im deutschsprachigen Europa

Herausgeber: Schweizerische Vereinigung von Textilfachleuten

Band: 81 (1974)

Heft: [3]

Rubrik: Forschung und Entwicklung

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: 08.01.2026

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

Forschung und Entwicklung

Ueber Möglichkeiten der Verminderung elektrostatischer Aufladungen bei textilen Fussbodenbelägen*

Einleitung

Ueber die Verursachung elektrostatischer Aufladungen durch textile Fussbodenbeläge ist in letzter Zeit häufiger berichtet worden. Dass eine Person nach Begehung über einen den ganzen Raum bedeckenden Teppichboden bei Berührung eines Leiters oder eines Gegenstandes hoher Kapazität einen spürbaren Schlag erhalten kann, hängt zwar von einer Vielzahl von Parametern ab — auf diese wird später eingegangen —, wird aber von *einem* Faktor massgebend bestimmt, nämlich von der Höhe der relativen Luftfeuchtigkeit. Oberhalb von ca. 45 % rel. LF werden bei praktisch keinem textilen Fussbodenbelag irgendeiner Faserart und irgendwelcher Konstruktion spürbare elektrische Schlagerscheinungen bei Personen eintreten, obwohl natürlich grundsätzlich Ladungstrennungen und damit Personenaufladungen erfolgen. Diese sind jedoch so niedrig, dass bei Erdung kein spürbarer Schlag registriert wird.

Erst unterhalb der genannten Grenze beginnen die Möglichkeiten der Entstehung höherer Ladungen mit entsprechend spürbaren elektrischen Schlägen. Es ist deshalb von uns immer wieder betont worden (1, 2), dass es das Phänomen der elektrostatischen Aufladung (mit spürbaren Entladungen) nicht geben würde, wenn es gelänge, in den Räumen gleich welchen Lebensbereiches eine rel. Luftfeuchtigkeit von mindestens 45—50 % über das ganze Jahr hindurch, z. B. durch entsprechend zentralgesteuerte Befeuchtungsanlagen, aufrecht zu erhalten.

Da dies bisher nur äusserst selten der Fall ist, bemüht man sich, auch bei niedriger Luftfeuchte die beim Begehen auftretende Ladung so schnell abzuleiten, dass die betreffende Person bei Berührung mit Erde keinen Schlag erhält.

Zu diesem Thema werden nachfolgend einige Ausführungen gemacht. Wenn man jedoch über die Verminderung von elektrostatischen Aufladungen sprechen will, muss vorerst kurz der Komplex der Entstehung elektrostatischer Aufladungen beim Begehen einer Person über einen textilen Fussbodenbelag behandelt werden, und es muss darüber gesprochen werden, wie man die Verminderung von Ladungen durch labormässige Prüfungen erfassen kann und welche Aussagemöglichkeiten hierbei gegeben sind.

Theorie und Ladungstrennung

Ausgangssituation sind zwei Oberflächen aus verschiedenen Materialien, z. B. Teppich — Schuhsohle, die elektrisch neutral sind. Das bedeutet, dass beide keine Ladung tragen (Abbildung 1, A).

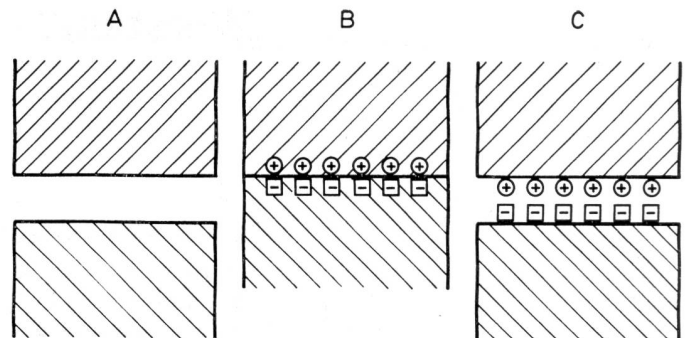


Abbildung 1 Ladungstrennung beim Berühren von 2 Oberflächen

Bei Berührung bildet sich an der Berührfläche eine elektrische Doppelschicht aus; es entstehen elektrische Dipole, d. h. es entstehen in beiden Stoffen gleichviel Ladungsträger unterschiedlicher Polarität (Abbildung 1, B). Die Gründe, weshalb zwei vorher neutrale Körper plötzlich bei Berührung Dipole ausbilden, sind zurzeit noch nicht vollständig erforscht, sind aber im molekularen bzw. atomaren Bereich, wahrscheinlich in elektrischen Unsymmetrien der Atome bzw. Moleküle, zu suchen. Ein weiterer Parameter, der mitspielt, ist die Differenz der beiden relativen Dielektrizitätskonstanten.

Werden nun die Oberflächen getrennt (Abbildung 1, C), so bleiben die Ladungen der Dipole ortsfest, d. h. die Dipole werden zerrissen; auf beiden Oberflächen befinden sich nun gleichviele Ladungsträger unterschiedlicher Polarität.

Für die Höhe der Ladung Q ist eine Vielzahl von Parametern bestimmend. Einer davon ist die Stellung der beiden Materialien in der elektrischen Spannungsreihe. Diese quantitative Spannungsreihe erhielt man durch entsprechende Untersuchungen unter Gleichhaltung aller anderen Parameter.

Mit Messing = 0 und Glas = +10 wurden hierbei willkürlich zwei Bezugspunkte ausgewählt, die Ladungen gemessen und verglichen und in einer Tabelle so angeordnet, dass ausser der Höhe der Ladung auch deren Polarität Berücksichtigung fand.

Für die Ladung Q_1 eines Materials 1 und Q_2 eines Materials 2 mit den Spanningskonstanten C_1 und C_2 ergibt sich somit zunächst

$$Q_1 \sim C_1 - C_2 \quad \text{bzw.} \quad Q_2 \sim C_2 - C_1 \quad (1)$$

Wie man der Tabelle 1 entnehmen kann, überstreichen alle Materialien, die einen Feuchtigkeitshaushalt besitzen bzw. die infolge irgendwelcher Verarbeitung mit anderen Stoffen belegt oder verunreinigt werden können oder unterschiedlich herstellbar sind (z. B. Textilfasern), einen gewissen Bereich, in dem ihre Spanningskonstante liegen kann.

Aus Untersuchungen verschiedener Autoren ist bekannt, dass bei der Höhe der Aufladung als weiterer Parameter

* Referat anlässlich der Jahrestagung des Forschungskuratoriums Gesamttextil und der Herbsttagung der VDI-Fachgruppe Textiltechnik (ADT) in Nürnberg am 9. November 1973.

Tabelle 1 Quantitative Spannungsreihe bei 33 % rel. Luftfeuchte, 21° C

	Konstante C
Positives Ende	
Wolle	+15 — +42
Polyamid	+15 — +40
Naturseide	+12 — +14
Papier	+11 — +14
Stahl	+10,5
Glas	+10
Aluminium	+ 6
Baumwolle	+ 5,5 — +6
Leder	+ 3,5 — +8
Messing	0
Polypropylen	— 5 — —13
Hartgummi	—13 — —15
Gummi	—15 — —20
Negatives Ende	

die Art der Berührung eine Rolle spielt. Hierbei stellt sich z. B. die Frage, ob es sich um eine schlupffreie Berührung handelt oder ob eine Reibung vorliegt.

Weitere Parameter sind der Tabelle 2 zu entnehmen. Ohne dass diese direkt nach absoluter Einflussgrösse geordnet sind, spielt die bereits angesprochene rel. Luftfeuchte eine massgebende Rolle. Alle diese Parameter können als Faktor K zusammengefasst werden.

Tabelle 2 Die Ladungshöhe beeinflussende Parameter (Faktor «K»)

1. Klima (rel. Luftfeuchte, Temperatur)
2. Berührte Fläche
3. Intensität der Berührung
 - 3.1 Bei Reibung: Flächendruck, Reibkoeffizient, Reibgeschwindigkeit
 - 3.2 Ohne Reibung: Flächendruck, Verweildauer, Schrittfrequenz.

Insgesamt ergibt sich für eine bei einem Reibvorgang entstehende Ladung folgende Gleichung:

$$Q = K (C_1 - C_2) \quad (2)$$

Für ein Material 1 (z. B. Polyamid: $C_1 = \text{max. } +40$) und ein Material 2 (z. B. Gummi: $C_2 = \text{max. } -20$) ergibt sich somit in Erweiterung der Gleichung (1)

$$Q_1 = K (40 - (-20)) = K \times +60$$

$$Q_2 = K (-20 - 40) = K \times -60$$

Ebenso kann man für alle Kombinationen verfahren; wichtig ist hierbei nur, dass das Vorzeichen mit beachtet wird. Es lassen sich somit zumindest gewisse Voraussagen treffen, ob z. B. bei einem Teppich mit höheren oder niederen Aufladungen bei Begehung zu rechnen ist. Tritt z. B. eine Berührung und Trennung von Polyamid und Leder ein, so liegt die Aufladung der Ledersohle etwa bei K 32.

Jeder der in dem Faktor K enthaltenen Parameter kann jedoch die Ladungshöhe massgebend beeinflussen, unabhängig davon, an welcher Stelle die beiden Materialien in der elektrischen Spannungsreihe stehen. Als Beispiel sei hier der Einfluss der Schrittfrequenz bei einer normalen Begehung angeführt. In Abbildung 2 zeigen der linke Kurvenverlauf die an derselben Person gemessenen Spannungen (kV) bei einer Frequenz von zwei Schritten/sec., der rechte Kurvenverlauf die Spannung bei einem Schritt/sec. Die Unterschiede sind eindeutig. Es handelt sich um eine getuftete PA-Schlingenware. Die Auswertung der linken Kurve ergibt als Maximalwert bei Aufsetzen des Fusses eine Spannung von rd. 5,4 kV, in der rechten Kurve nur eine solche von rd. 2,5 kV. Nach unseren Erfahrungen erhält man im ersten Fall einen deutlichen Schlag bei Erdung, im anderen Fall einen schwachen Schlag.

Bisher wurde lediglich die Frage gestellt, wie die Ladung überhaupt entsteht. Eine weitere Frage ist, wie die Ladung auf den Menschen kommt. Hierbei können zwei grundsätzlich verschiedene Mechanismen auftreten, und zwar

1. Mechanismus der Leitung, wenn nämlich das Sohlenmaterial leitend ist und sich infolgedessen die Ladung von der Schuhsohle aus gleichmässig auf den Menschen verteilen kann. Dies kann z. B. für Leder gelten;
2. Durch Influenz, wenn das Schuhmaterial einen sehr grossen Durchgangswiderstand besitzt, d. h. wenn es sich praktisch um einen Isolator handelt.

Das Prinzip der Influenz ist folgendes: Die auf der Sohle befindliche Ladung versucht auf den Menschen eine gleich grosse entgegengesetzte Ladung zu influenzieren. Dies ist aber nicht möglich, da der Mensch elektrisch neutral ist und somit überall auf seiner Oberfläche gleich viele positive und negative Ladungen trägt. Ferner ist der Mensch ein relativ guter Leiter, so dass sich eine entstehende Ladung sofort über seine gesamte Oberfläche verteilen würde. Deshalb kann eine Ladung durch Influenz erst entstehen, wenn eine gleich grosse entgegengesetzte Ladung abgeführt werden kann. Dies ist der Fall, wenn der Mensch sich irgendwie erdet, d. h. eine Türklinke oder ein anderes geerdetes Teil anfasst. Durch den «Ladungsabfluss» empfindet der Mensch einen Schlag. Entladen sich nun die Schuhsohlen, z. B. dadurch, dass man anschliessend auf einem Steinfussboden steht, befinden sich unkompenzierte Ladungen auf dem Menschen. Fasst er nunmehr ein geerdetes Teil an, fliesst die Ladung zurück, und er empfindet einen zweiten Schlag.

Betrachtet wurden bisher die Ladungsentstehung und die Einflüsse der Ladung auf den Menschen. Zur Vermeidung von Personenbelästigung muss dafür gesorgt werden, dass die Ladung in irgendeiner Form von den Schuhsohlen verschwindet oder gebunden wird. Ersteres ist nur möglich, wenn der Teppich irgendwie in der Lage ist, die Ladung möglichst sofort abzuleiten. Das ist z. B. der Fall, wenn der Teppich einen geringen Durchgangswiderstand oder Oberflächenwiderstand hat.

Oberhalb von 45–50 % rel. Luftfeuchte sorgt der Feuchtigkeitshaushalt des Polmaterials für diese niedrigen Widerstände, so dass bei diesen klimatischen Verhältnissen die

wenigsten Teppiche zu Personenbelästigungen führen. Unterhalb dieser rel. Luftfeuchte muss man z. B. durch Einlagerung von leitenden Materialien in das Polmaterial bzw. in das Trägermaterial oder Rücken für niedrige Widerstände sorgen.

Der andere Mechanismus besteht darin, dass man die Kapazität Schuhsohlenoberfläche — Erde so vergrößert, dass hierdurch der grösste Teil der Ladungen der Sohle gebunden ist und keine entgegengesetzte Ladung auf den Menschen influenzieren kann. Dieser Mechanismus gilt z. B. für eine leitfähige Rückenbeschichtung bzw. einen leitfähigen Vorstrich bei Tuftingteppichen (vgl. Abschnitt «Leitfähige Rückenaustrüstung»). Hierbei wird einmal eine geringe Ladung auf den Menschen influenziert, zum anderen wird die Kapazität des Menschen gegen Erde heraufgesetzt. Die bei einer Entladung freiwerdende Energie wird kleiner, wodurch eine spürbare Entladung entweder überhaupt nicht oder in schwächerem Grade eintritt.

Messverfahren

Widerstandsmessungen

Für die Vorhersage im Labor über die Aufladungsneigung von textilen Fussböden bietet sich aufgrund der obigen Ausführung zunächst die Widerstandsmessung an. Hierbei

kann man vorerst von der Grundvoraussetzung ausgehen, dass, je niedriger der Widerstand ist, desto besser die Ableitfähigkeit sein wird. Das Messverfahren ist durch DIN 54 345 gegeben. Die Untersuchungen erfolgen üblicherweise bei 30 % rel. Luftfeuchte und $20^{\circ} \pm 2^{\circ} \text{C}$.

Die Frage, wo die Grenze des Widerstandes liegt, oberhalb derer mit einer spürbaren Entladung zu rechnen ist, kann nur empirisch durch Praxisversuche ermittelt werden. Aufgrund der von verschiedenen Seiten vorgenommenen Untersuchungen kann festgehalten werden, dass bei einer rel. Luftfeuchte von ca. 30 % etwa unterhalb eines Ableitwiderstandes von 10^{11} Ohm nicht mehr mit belästigenden Personenentladungen zu rechnen ist. Diese Grenze kann jedoch bei geringer Aufladungsneigung zweier Materialien, bedingt durch ihre Stellung in der Spannungsreihe, durchaus höher liegen, ohne dass Belästigungen auftreten.

Insofern besteht über dem gesamten Bereich des Ableitwiderstandes keine direkte Korrelation zwischen Widerstand und Ladungshöhe (1). Zu gleichen Ergebnissen kommen Meckel und Mitarbeiter (3).

Die Ende Oktober d. J. in Berlin tagenden europäischen Institute, die sich u. a. auch mit der Prüfung der elektrostatischen Aufladungsneigung von textilen Bodenbelägen befassen, haben daher in Form einer Erklärung zum Ausdruck gebracht, dass die Widerstandsmessungen zur Beurteilung der elektrostatischen Aufladung nur dann heran-

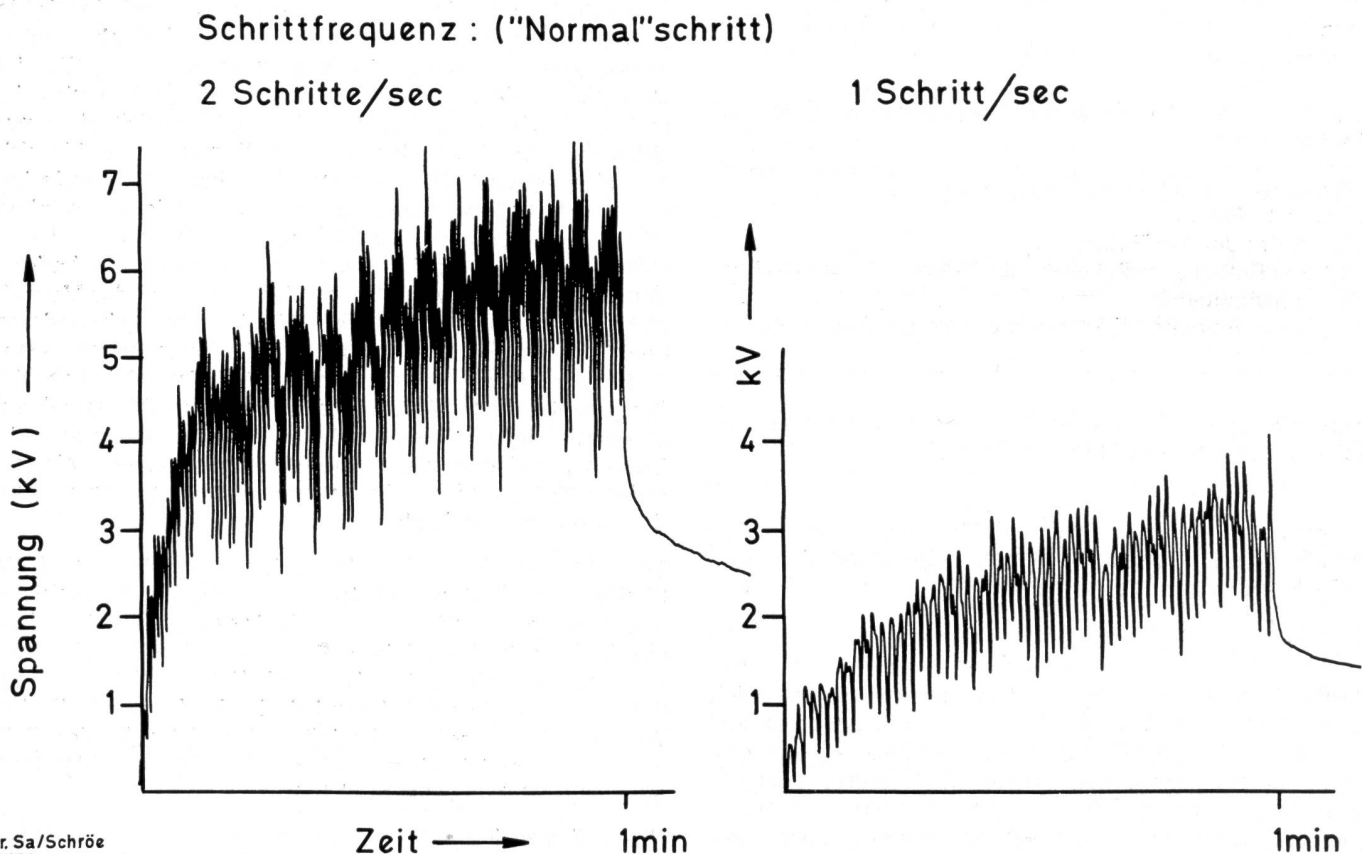


Abbildung 2 Spannung in Abhängigkeit der Schrittfrequenz

zuziehen sind, «wenn bei 30 % rel. Luftfeuchte der Durchgangswiderstand $10^{11} \text{ Ohm} \times \text{cm}^2$ bzw. der Oberflächenwiderstand 10^{11} Ohm unterschreiten. Ueberschreiten die Widerstandsmessungen diese Werte, wird empfohlen, darauf hinzuweisen, dass aufgrund dieser Werte keine Aussage über das elektrostatische Verhalten möglich ist. Keinesfalls sind diese Werte als eine Grenze anzusehen, oberhalb derer mit einer elektrostatischen Aufladung zu rechnen ist. Unterhalb von 10^{11} Ohm ist eine Differenzierung im allgemeinen nicht sinnvoll.»

Trotzdem sollten textile Bodenbeläge auch dann eine relativ gute Leitfähigkeit besitzen, wenn eine Personenbelastung durch geringe Aufladbarkeit des Teppichs ausgeschlossen werden kann, damit u. U. «Fremdladungen» abgeführt werden können, wie sie z. B. durch Rutschen auf kunststoffbezogenen Sesseln oder «Elektrisierung» durch irgendwelche Geräte entstehen können.

Begehversuche

Die einfachste Art, eine Aussage über die Aufladungsneigung textiler Bodenbeläge im Labor zu treffen, erscheint vorläufig noch immer ein «reduzierter Begehversuch» zu sein. Die Messung der Aufladungshöhe erfolgt hierbei entweder direkt über ein Staticvoltmeter (Verfahren ATCC) (4, 5, 6, 7) oder über Feldstärkemessung (Verfahren BAM) (8).

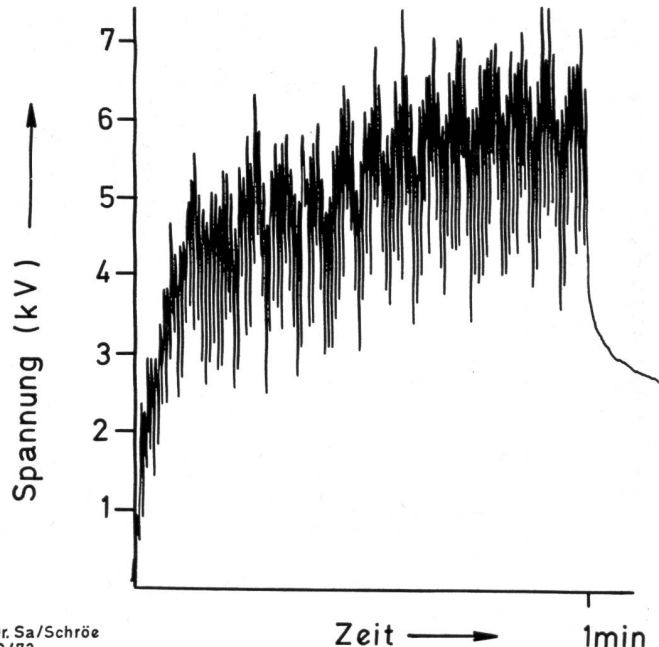
Der Vorteil dieses Verfahrens bildet ohne Zweifel im ersten Augenblick die Praxisnähe. Jedoch ist es schwierig, die vielfältigen Einflussgrößen so zu normieren, dass insbesondere zwischen den Labors reproduzierbare und vergleichbare Werte erhalten werden. Wie stark sich z. B. der Einfluss der Schrittfrequenz auswirkt, war bereits oben gezeigt worden. Zurzeit bemüht man sich national (Normausschuss C 9 c 23) wie international (ISO TC 38/SC 12/WG 2) durch Einengung der verschiedenen Einflussfaktoren eine Annäherung im Begetest und seiner Auswertung zu finden.

Hierbei bestehen zurzeit auch unterschiedliche Aussagen hinsichtlich der Schlaggrenze. Sie schwankt zwischen 1,5 und 3 kV. Nach unserer Ansicht beruht dies darauf, dass eine beim Begehen an der Person aufgenommene Spannungskurve eine obere und untere Einhüllende in Form einer Sättigungskurve hat (Abbildung 3). Die Differenz der Einhüllenden ergibt sich durch die Kapazitätsänderung des Menschen infolge des Hochhebens der Füße.

Einige Laboratorien werten die obere Einhüllende aus und legen ihre Schlaggrenze bei 3 kV fest, andere werten die Mitte aus, hier liegt die Schlaggrenze bei ca. 2,5 kV. Das TFI verwendet bei Begehversuchen die untere Einhüllende, hier liegt die Schlaggrenze bei ca. 1,5 kV. Durch die unterschiedliche Auswertung kommt man somit zu stark differierenden Zahlenergebnissen.

Da jede Testperson eine eigene Gangart hat und diese nicht exakt vorzuschreiben ist, erscheint es sinnvoll, bei Normalbegehung die untere Einhüllende auszuwerten.

Um die Unsicherheit der Schrittart der einzelnen Testpersonen in gewissem Umfang auszuschalten, kann der so-



Dr. Sa/Schröe
10/73

Abbildung 3

genannte Schlurfschritt angewandt werden. Hierbei werden die Kapazitätsänderungen der betreffenden Person reduziert. Es ist infolge eines anderen Ladungserzeugungsmechanismus zu erwarten, dass bei Schlurfschritt andere Spannungen entstehen können als bei Normalschritten.

Nach diesem Verfahren arbeitet die BAM (3), wobei die Körperspannung indirekt mit der Feldmühle (Feldstärke in kV/m) gemessen wird; als Schlaggrenze gelten hier 100 kV/m.

Apparative Messungen

Auf der letztgenannten Grundlage, nämlich des schlurfenden Schrittes, beruht das im TFI entwickelte apparative Testverfahren (9). Von der Apparatechnik her ist hierbei auf das Gerät von Heyl und Lüttgens (10) zurückgegriffen worden.*

Der über die Probe streichende isolierte Reibarm, belegt mit einem handelsüblichen, jeweils immer gleichen Schuhsohlengummi, influenziert die entstehende Ladung auf einen Kondensator, der der Kapazität des Menschen annähernd entspricht (ca. 180 bis 200 pF). Die Probe liegt üblicherweise auf einer Estrichplatte auf. Die gespeicherte Ladung wird nach einer Sekunde Standzeit auf der Teppichprobe (nach vorherigem zweimaligen Ueberstreichen der Probe) über einen Oszillographen oder Schreiber abgerufen (11). Die Ladung wird in Coulomb (Amp. \times sec.) angegeben. Die empirisch ermittelte Schlagempfindungsgrenze liegt im Bereich von $1 \times 10^{-7} \text{ A} \times \text{s}$.

* Dieses Verfahren wird Anfang 1974 durch eine Methode ersetzt, die eine Begehung simuliert.

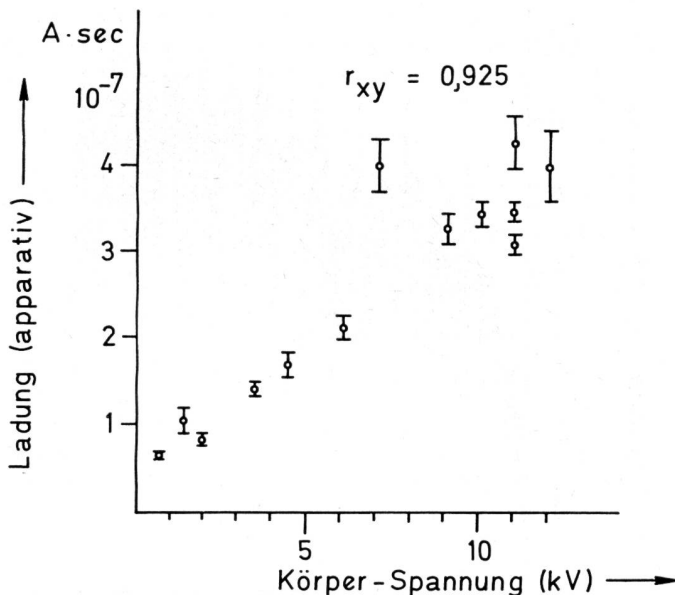


Abbildung 4 Apparat-Messung – Begetest (Schlurfschritt)

Die Korrelation zwischen Praxisbegehung im Schlurfschritt und apparativer Prüfung ist gut ($r_{xy} = 0,9254$ — vgl. Abbildung 4). Zwischen den apparativen Messwerten und der Körperspannung bei «Normalgang» sind die Zusammenhänge zum Teil weniger eng. Dies beruht einfach auf den unterschiedlichen Trennungs- und Reibungsvorgängen bei beiden Verfahren.

Ebenso wie der Begetest mit Schlurfschritten (BAM-Verfahren) (3) wird auch das TFI-Apparat-Verfahren (9) wegen den in beiden Fällen entstehenden rel. hohen Aufladungen bezüglich Praxisnähe für zu hart gehalten. Beide Verfahren ergeben daher gute Übereinstimmungen. Das Reiben bzw. Schlurfen über die Teppichprobe stellt aber den ungünstigsten Fall in der Praxis tatsächlich dar. Das Risiko ist damit annähernd voll abgedeckt. Institutionen, die sich mit Prüfungen befassen und aufgefordert sind, Aussagen zu machen und Beurteilungen abzugeben, müssen mit den angewendeten Prüfverfahren das Risiko in der Praxis weitgehend herabsetzen. Unter Berücksichtigung dieser Tatsache müssen auch alle nachfolgenden Betrachtungen über die mögliche Verminderung der elektrostatischen Aufladung bei textilen Fussbodenbelägen gesehen werden.

Wie schwierig es weiterhin ist, allein die Schlagempfindungsgrenze festzulegen, geht aus Untersuchungen von Wilson (12) mit 12 Testpersonen hervor. Die Ergebnisse sind auszugsweise in Tabelle 3 wiedergegeben.

Bei einer Spannung von 1,9 und 2,3 kV empfinden 10 Personen den Schlag noch als schwach, zwei bereits als stärker bzw. unangenehm. Bei 2,6 bis 3,1 kV registrieren immer noch zwei Personen das Schlagempfinden als schwach, fünf als stärker, vier als unangenehm und eine Person sogar als sehr unangenehm. Das von Person zu Person sehr unterschiedliche Spürbarkeitsempfinden spielt somit eine nicht zu unterschätzende Rolle, besonders

Tabelle 3 Schlagempfinden verschiedener Testpersonen

kV	kein	schwach	stärker	unangenehm	sehr unangenehm
0,38—0,45	12	—	—	—	—
1,9 —2,3	—	10	1	1	—
2,6 —3,1	—	2	5	4	1

dann, wenn es sich um Grenzfälle handelt. Solche Grenzfälle pflegen beim sog. normalen Begehen aufzutreten, sie sind jedoch auszuschliessen, wenn die Prüfung ein Beschurfen des textilen Bodenbelages simuliert. Es ist praktisch auszuschliessen, dass bei der apparativen Methode bei Unterschreiten der Spürbarkeitsgrenze (1×10^{-7} A \times s) in der Praxis bei Normalbegehung eine spürbare Entladung eintritt, während — umgekehrt — bei der simulierten Normalbegehung im Labor bei Unterschreitung der dortigen Grenze durchaus in der Praxis infolge einer anderen Gangart ein spürbarer Entladungsvorgang erfolgt, der zu Reklamationen führen kann.

Auswahl der Werkstoffe zur Verminderung der elektrostatischen Aufladung von textilen Fussbodenbelägen

Nach den theoretischen Erörterungen über die Ladungsentstehung und über die dazu führenden Einflussfaktoren erhebt sich somit zunächst die Frage, ob man durch eine Auswahl von Werkstoffen im Teppichbodenbereich bei Reibung und Ladungstrennung, also bei Begehen, überhaupt störende Aufladungen vermeiden kann.

Diese Möglichkeit ist wegen der Vielzahl des Sohlenmaterials und der Faserarten praktisch nicht gegeben. Es war anfangs gezeigt worden (vgl. Tabelle 1), dass bereits Gummi und Leder in der elektrischen Spannungsreihe an verschiedenen «Stellen» stehen. Hier kommt noch hinzu, dass bekanntermassen jeweils die Leder- und Gummiarten in sich sehr verschieden aufgebaut sind, unabhängig davon, dass u. a. die Reibungskoeffizienten jeweils sehr unterschiedlich sein können.

Beweis für die Entstehung völlig unterschiedlicher Ladungs- bzw. Spannungshöhen bringt die Gegenüberstellung der Ladungen (apparat. in A \times s) an Teppichböden jeweils gleicher Faserart und Konstruktion bei Reibung mit vier verschiedenen Lederarten und drei verschiedenen Gummiarten (Tabelle 4). Hierbei sind die Dicken der Reibbeläge jeweils gleich. Weiterhin sind bei den hier durchgeführten Versuchen alle Parameter gleich gehalten, und zwar Auflagedruck, Schlupf, Geschwindigkeit. Lediglich ein Parameter, nämlich der Reibkoeffizient, konnte nicht gleich gehalten werden, da er eine Materialkonstante ist.

Bei allen hier untersuchten Faserarten in der Polschicht (100 PA, 100 PES, 100 PP, 50/50 PA/PES, 50/50 PA/PP) — aber auch bei allen anderen Faserarten —, erhält man für jede Gummi- und Lederart unterschiedlich hohe Aufladungen, wobei innerhalb der gleichen Faserreihe je nach Sohlenart positive oder negative Ladungen auftreten oder

Tabelle 4 Ladung Q ($A \times s \times 10^{-7}$) bei verschiedenem Sohlenmaterial

Sohle	Teppichflorzusammensetzung					PA
	PA	PE	PE/PA	PA+PP	PP	
Gummi 1	3,00	0,45	1,74	1,50	—0,24	3,00
Gummi 2	1,80	0,81	1,35	0,90	—0,18	1,80
Gummi 3	2,10	0,66	1,65	0,45	+0,18	2,10
Leder 1	1,65	—0,75	1,20	0,30	—0,16	1,65
Leder 2	—1,65	—1,80	—1,80	—0,42	—0,09	—1,65
Leder 3	4,20	0,60	+1,80	+1,20	—0,36	4,20
Leder 4	2,75	—1,85	+0,75	0,60	—0,33	2,75

die Schlagempfindungsgrenze einmal unterschritten, das andere Mal überschritten wird. Greifen wir zusätzlich den Fall 50/50 PA/PP heraus — eine Mischung, von der man sich einige Hoffnungen verspricht —, so wird man bei einer Gummiart (3) und drei Lederarten (1, 2 und 4) dem Teppich eine geringe Ladungshöhe bescheinigen, einer Gummiart (Nr. 2) die Neigung zur höheren Aufladungsneigung zuordnen, und bei je einer Gummiart (Nr. 1) und Lederart (Nr. 3) wird bei dem gleichen Teppich mit einer Aufladung, die bei Erdung zu einem Schlag führt, zu rechnen sein.

Hieraus lässt sich nur der Schluss ziehen, dass man eine Abstimmung der beiden Reibpartner — textiler Fussbodenbelag auf der einen Seite, Sohlenmaterial auf der anderen Seite — zur Erzielung einer niedrigen Ladung nicht grundsätzlich erreichen kann. Ebenso wenig wie es möglich sein wird, Teppiche nur aus einer, wenig Ladung erzeugenden, Faser herzustellen, ebenso wenig ist es möglich, Schuhe nur mit einem bestimmten Sohlenmaterial herzustellen.

Es bleibt somit nur der Weg, die Ladungen — wie hoch sie auch immer seien — durch einen niedrigen Ableitwiderstand schnell abzuführen oder — wie oben schon angedeutet — die Kapazität Schuhsohlenoberfläche—Erde so zu vergrößern, dass hierdurch der grösste Teil der Ladungen der Sohle gebunden ist und keine entgegengesetzte Ladung auf den Menschen influenzieren kann.

Möglichkeiten der Ableitung von Ladungen

Faserarten

Bekanntlich haben die verschiedenen Faserarten einen unterschiedlich hohen elektrischen Widerstand, z. B. Polyamid zwischen 10^{13} und 10^{14} Ohm, Wolle ca. 10^{11} Ohm, Viskose ca. 10^{10} Ohm (13), Polypropylen im Anlieferungszustand bei 10^{11} Ohm, jeweils bei rd. 30 % rel. Luftfeuchte. Bereits dieser Tatbestand erklärt die verschiedenartige Ableitung von entstandenen Ladungen bei den einzelnen Faserarten, und es ist nichts Neues, wenn man feststellt, dass ein Teppichboden aus Wolle — unter der Voraussetzung der Gleichheit aller sonstiger Parameter — sich hinsichtlich der elektrostatischen Aufladungsneigung günstiger verhalten kann als ein solcher aus Polyamid. Aber bereits bei der Wolle spielen andere Faktoren, wie z. B.

ihr Fettgehalt bzw. die möglicherweise verwendeten Avivagen mit hinein. Es gibt durchaus Fälle, bei denen trotz gleicher Teppichbodenkonstruktion bei niedriger rel. Luftfeuchte die Schlaggrenze auch bei Wolle deutlich überschritten wird.

Die Verwendungsmöglichkeit von Faserarten, wie z. B. Viskose und Polypropylen, hängt mit deren physikalisch-technischen Eigenschaften zusammen, die einen Einsatz dieser Faserarten als Polmaterial im Teppichboden zumindest nicht in umfassendem Sinne zuzulassen scheinen.

Bei den obigen Untersuchungen mit den verschiedenen Leder- und Gummisorten blieb die Ladungshöhe bei Polypropylen — wenn auch je nach Gummi- oder Lederart schwankend — unterhalb der Spürbarkeitsgrenze. Hier ist eine der Hauptursachen in der Leitfähigkeit von spezifischen Avivagen zu suchen, wie sie bei Polypropylenfasern im Teppichbereich verwendet werden. Nach einer Entavivierung des Teppichmusters mit Tensiden lag die Ladung bei allen Gummi- und Lederarten deutlich höher als im Anlieferungszustand. In drei Fällen wurde die Spürbarkeitsgrenze erreicht, zum Teil überschritten (Abbildung 5).

Fasermischungen

Es liegt nahe, für einen ausgesprochen auf starke Beanspruchung ausgerichteten Teppichpol, weniger strapazierfähige, aber besser leitende Fasern, z. B. Viskosefasern und Polypropylen, mit strapazierfähigeren, jedoch eine stärkere Ladung hervorrufenden bzw. weniger gut ableitenden Fasern zu mischen. Bereits in Tabelle 4 über die Einwirkung verschiedener Gummi- und Lederarten konnte gezeigt werden, dass die Zumischung von Polyesterfasern und Polypropylenfasern zu Polyamidfasern die Ladung erniedrigt.

Eine Zumischung von Viskosefasern zu Polyamid hat eindeutig ein Absinken der Ladung zur Folge (1). Tatsache ist, dass bereits Zumischungen von etwa 10 % Viskosefasern (und darunter) in Verbindung mit einer leitfähigen Rückenbeschichtung ein Unterschreiten der Schlaggrenze bedingen können. Dass diese Zumischung von Viskosefasern trotz des guten Effektes relativ selten angewandt wird, liegt unter anderem daran, dass — auch gemäss dem Textilkennzeichnungsgesetz — die Rohstoffgehaltsangabe der Polschicht nicht mehr mit 100 % einer bestimmten Faserart (z. B. 100 % PA) deklariert werden kann, sondern z. B. 90 % PA/10 % CV (oder 90 % PA/10 % sonstige Fasern). Derartigen Deklarationen stehen Handel und Käufer skeptisch gegenüber, auch wenn ihnen damit eine relativ hohe Sicherheit gegen elektrostatische Aufladungen geboten wird.

Günstiger in dieser Hinsicht steht es mit der Beimischung von Polypropylenfasern zu z. B. Polyamid. Hier liegen in beiden Fällen synthetische Fasern vor, so dass man — zumindest ausserhalb der offiziellen Textilkennzeichnung — von einer Polschicht aus 100 % Synthesefasern sprechen kann. Die Chicagoer Messe Juni 1972 hat Tuftingteppiche mit derartigen Mischungen vorgestellt und eine gewisse «elektrostatische Neutralität» in Aussicht gestellt.

Unabhängig davon, inwieweit — wie oben erwähnt — spezielle Avivagen bei den PP-Fasern die Ableitung fördern, zeigen Untersuchungen eine klare Abnahme der Ladung.

Durch die Zumischung von PP sinkt somit bei gleich konstruierter Teppichart die Ladung um die Hälfte (und mehr) gegenüber 100 % PA, unterschreitet aber nicht immer die Schlaggrenze, und zwar auch hier wieder in Abhängigkeit von der Art des verwendeten Sohlenmaterials (vgl. Tab. 4).

Während man bei den soeben geschilderten Faserarten einen grösseren Prozentsatz benötigt, um eine niedrige Aufladung zu erlangen, genügen bei Zumischung von Stahlfasern oder bei Mitverarbeitung zugeführter endloser Stahlfäden Anteile von weniger als 1 %. Ueblicherweise liegen die Zumischungen bei Stahlfasern in der Grössenordnung von 0,3 %. Die nachstehenden Säulendiagramme (Abbildung 6) geben die Wirkungsweise wieder (apparative Messungen). Hierbei handelt es sich bei Ware B um eine getuftete PA-Schnittware mit Jute-Zweitücken, wobei jeder dritte Faden eine Zumischung von Stahlfasern aufweist; bei der Ware V ebenfalls um eine PA-Schnittware und bei Ware R um eine Schlingenware, die letzteren beiden nur mit Glattstrich versehen. Gemessen wurde jeweils auf Estrichunterlage.

Die Zumischung bewirkt ein Absinken der Ladung auf weit unter $10^{-7} \text{ A} \times \text{s}$. Bei Parallelversuchen fiel bei der Ware B die Ladung beim Schlurfschritt von $-6,25 \text{ kV}$ auf $-0,55 \text{ kV}$, bei «Normal»schritt von $-2,5 \text{ kV}$ auf $-0,23 \text{ kV}$, bei Ware V von $-3,2 \text{ kV}$ auf $-1,28$ bzw. $-1,9 \text{ kV}$ auf $+0,7 \text{ kV}$, bei Ware R von $2,6 \text{ kV}$ auf $0,92$ bzw. $-0,4$ auf $+0,7 \text{ kV}$. — Die leitfähige Wirkung der Stahlfasern ist allerdings nur dann in für den Normaleinsatz risikolosem Masse gegeben, wenn auf Estrich verlegt wird; andernfalls ist eine leitfähige Rückenbeschichtung erforderlich. Weiterhin gilt, dass eine Stahlfaserbeimischung nur dann zu einem eindeutigen, messbaren Absinken der Ladung führt, wenn die Fasern der Polschicht keine über das übliche Mass hinausgehenden Avivagen aufweisen.

Ausser Stahlfasern bzw. Stahlfäden sind noch andere metallisch-leitfähige Fasern auf dem Markt, bei denen das Metall teils auf eine Synthesefaser aufgedampft, teils mit Polymeren kaschiert ist. Nach unseren bisherigen Erfahrungen ist die Wirkung der Mitverarbeitung solcher Fasern ähnlich gut wie bei Stahlfasern.

Modifizierte Synthesefasern

Die Hersteller von Synthesefasern — und hier wieder besonders die von Polyamidfasern wegen ihres grossen Einsatzes als Teppichpolmaterial — bemühen sich seit längerer Zeit, diesen Fasern eine höhere Leitfähigkeit zu erteilen. Dies geschieht — wenn man sich die Patentliteratur anschaut — durch Vermischen des Grundpolymers mit einem die Leitfähigkeit fördernden Polymer. (Inwieweit man hier von Modifizierung sprechen kann, sei den terminologischen Auslegungen vorbehalten.) Auf alle Fälle sind zwei Zumischungsarten möglich; die eine Art weist eine grössere Hydrophilie aus als das Grundpolymer und bedingt dadurch eine bessere Leitfähigkeit, bei der anderen Zumischungskomponente handelt es sich um elektrisch leitfähige Komponenten.

Bei der hier geforderten «Modifizierung» besteht die Schwierigkeit darin, dass man einmal alle sonstigen für den Pol des Teppichs wichtigen Eigenschaften physikalischer und chemischer Art erhalten will (und muss), zum anderen eben darin, dass man das «elektrische Verhalten» zu verbessern sucht.

Soweit zu übersehen, werden bei den auf dem Markt befindlichen antistatischen Polyamidfasern z. B. Polyalkylenäther (oder deren Derivate) in das Polyamid eingelagert. Durch das Verstrecken des Polymers erhalten die eingelagerten Teilchen eine Art Fibrillenform, parallel zur Faserachse. Die «Fibrillen» sind im mikroskopischen Bild bei stärkerer Vergrösserung (Abbildung 7), streifenförmig verstreut, erkennbar.

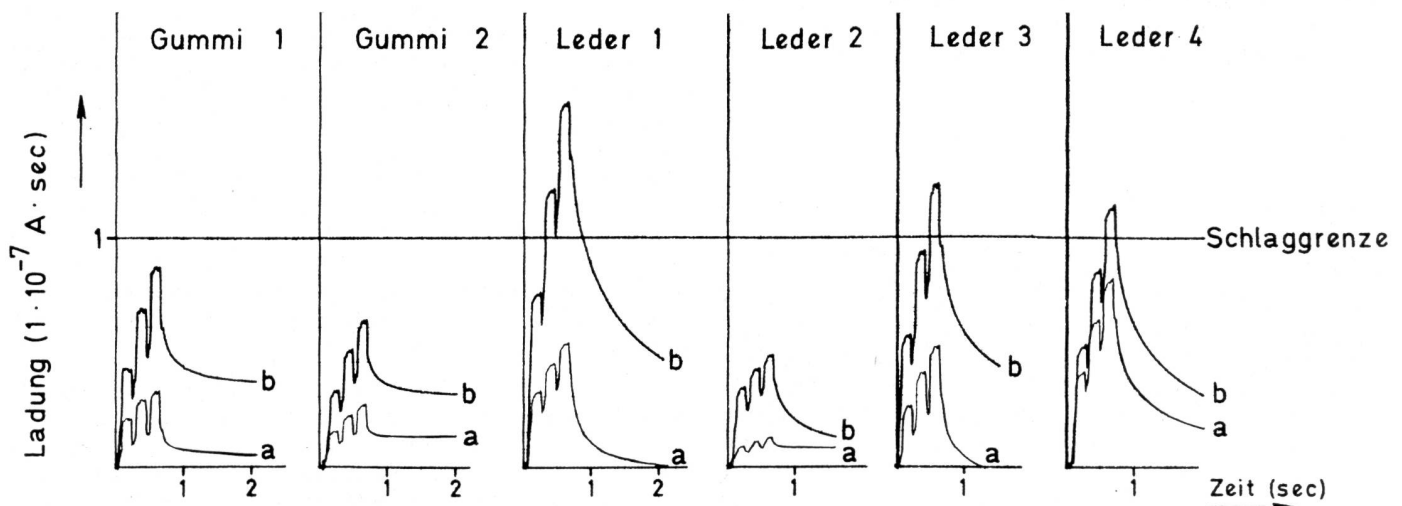


Abbildung 5 Einfluss von Avivageeffekten auf die Aufladbarkeit von Polypropylenen

a = avivierte Ware (Anlieferungszustand)
b = mit Tensiden entavivierte Ware

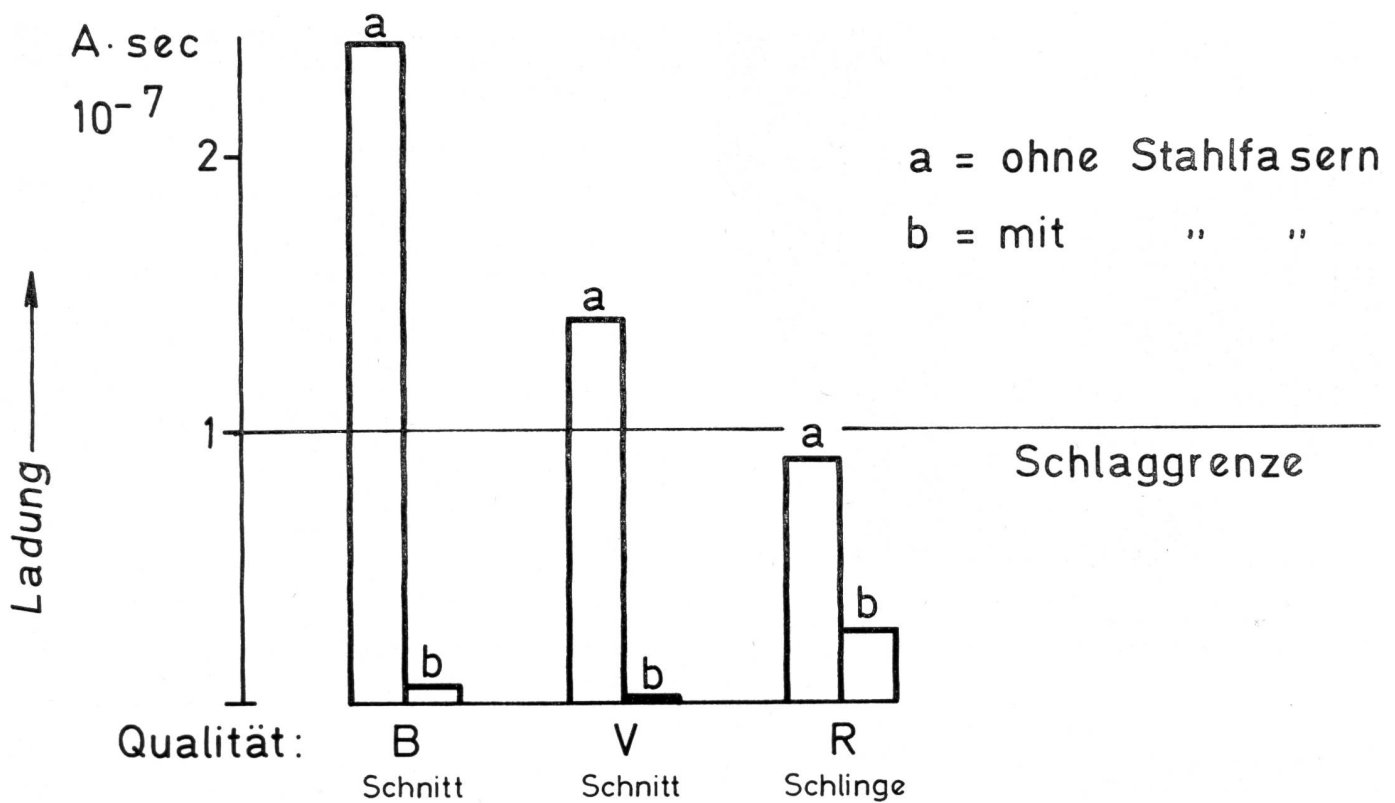


Abbildung 6 Einfluss von Stahlfasern bei Teppichböden jeweils gleicher Konstruktion

Bei nach dem Durchstrahlungsverfahren mit dem Elektronenmikroskop aufgenommenen Ultradünnschnitten (Dicke etwa $0,15 \mu$) erhält man Querschnittbilder mit unregelmäßig verteilten Löchern von ca. 1μ und darunter (Abbildung 8). Diese Löcher kennzeichnen die Stellen der antistatischen bzw. leitfähigen Einlagerungen; sie sind entweder bei der Herstellung der Schnitte herausgefallen oder durch die Einwirkung der Elektronenstrahlen zersetzt und verdampft.

Den Beweis für die erhöhte Leitfähigkeit von antistatischem Polyamid bringen Widerstandsmessungen an entsprechenden Teppichen (Abbildung 9).

Bei 80 % rel. Luftfeuchte, 21°C weist das »normale« Polyamid mit etwa $4 \cdot 10^9 \text{ Ohm} \times \text{cm}^2$ bereits einen höheren Durchgangswiderstand auf als das »antistatische« Polyamid (ca. $2 \cdot 10^9 \text{ Ohm} \times \text{cm}^2$). Bei Auslage in einem Klima von 30 % rel. Luftfeuchte und 21°C steigt der Durchgangswiderstand bei beiden Faserarten erwartungsgemäß deutlich an, zeichnet sich jedoch durch einen erhöhten Unterschied zwischen beiden Faserarten aus. Der Durchgangswiderstand hat bei dem »normalen« PA nach etwa drei Stunden sein Maximum mit etwa $4\text{--}5 \times 10^{13} \text{ Ohm} \times \text{cm}^2$, das »antistatische« Polyamid jedoch — allerdings schon nach ca. 2 Stunden Lagerung — nur mit ca. $1,5 \times 10^{11} \text{ Ohm} \times \text{cm}^2$ erreicht. Dies bedeutet einen Unterschied von rd. zwei Zehnerpotenzen.

Bedingt durch die bessere Leitfähigkeit kann man eine deutliche Verbesserung bezüglich der Aufladung verzeich-

nen. Wie zu erkennen (Abbildung 10), ist durch die Anwendung von »antistatischem« Polyamid im Teppichpol eine Verminderung der Körperspannung von 6,75 kV auf 2,5 kV festzustellen, obwohl beide Teppiche eine sonst gleiche Konstruktion besitzen (Schnittpol, Grundgewebe PP-Bändchen, Latex-Vorstrich, Jute-Zweit Rücken). Aller-

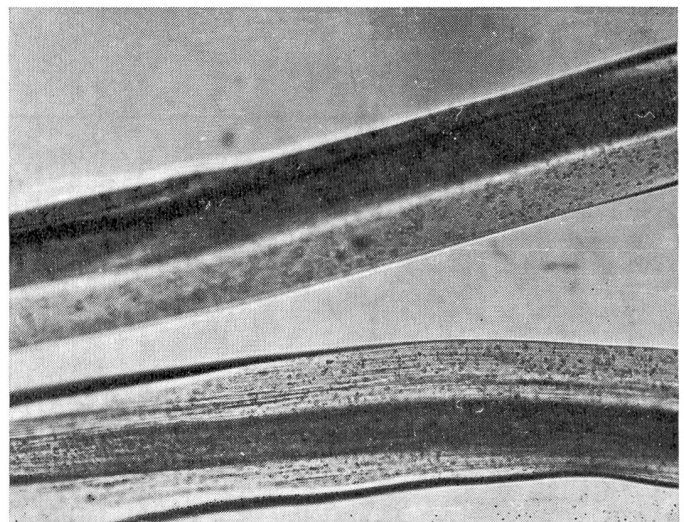


Abbildung 7 »Normal«-PA-Faser (oben); »antistatische« PA-Faser (unten)

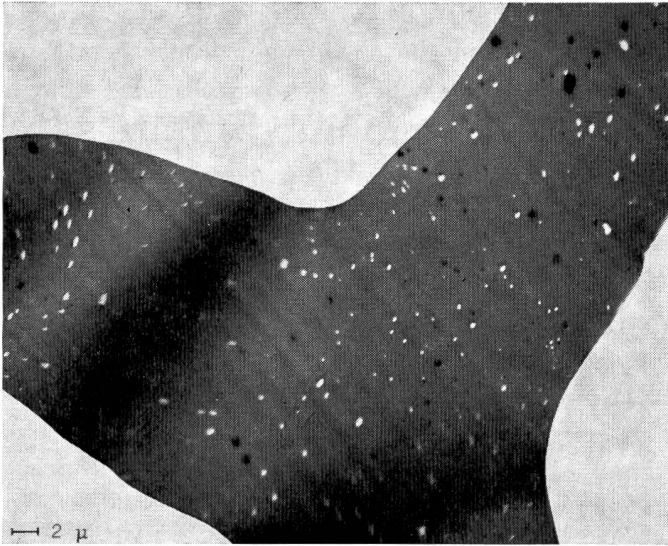


Abbildung 8 Elektronenmikroskopische Aufnahme (Durchstrahlungsverfahren) eines Querschnitts (Ultradünnschnitt ca. $0,15 \mu\text{m}$) einer «antistatischen» (modifizierten) Polyamidfaser (2600:1).

dings reicht bei dieser Art von Teppichkonstruktion die Verwendung von «antistatischem» Polyamid noch nicht aus, Personenbelästigungen auszuschliessen, da die leitfähige Rückenbeschichtung fehlt.

Bei anderen Konstruktionen, z. B. mit leitfähigem Vorstrich (siehe Abschnitt «Leitfähige Rückenaustrüstung»), kann bei

Einsatz von «antistatischen» Polyamiden die Ladungserscheinung so weit abgeschwächt werden, dass mit Personenbelästigungen nicht mehr zu rechnen ist.

Antistatische Ausrüstungen

Von mehreren Herstellern werden zurzeit chemische Mittel angeboten, die, auf das Flormaterial aufgebracht, eine Verbesserung des elektrostatischen Verhaltens bringen. Meist handelt es sich um Mittel mit hygroskopischem Effekt, der die Leitfähigkeit des Polmaterials erhöht und den Reibkoeffizienten herabsetzt. Durch die erste Eigenschaft erreicht man ein schnelles Abfließen der Ladung, durch die zweite eine Herabsetzung der entstehenden Ladungen. Die Wirkung dieser Mittel ist im allgemeinen recht gut; sie können allerdings den Nachteil haben, dass sie sich möglicherweise im Praxisgebrauch abtragen, so dass die antistatische Wirkung im Laufe der Zeit mehr oder weniger stark nachlassen kann.

Abbildung 11 zeigt die apparativ gemessene Aufladung von vier Qualitäten mit der gleichen chemischen Antistatcausrüstung, einmal begangen, das andere Mal unbegangen. Bei den vier Qualitäten handelt es sich in allen Fällen um getuftete Schlingenware auf PP-Bändchengewebe mit Planschaum, jedoch unterschiedlichem Polgewicht und unterschiedlicher Poldicke des Polyamidpols. Als Kontrollversuch wurde jeweils ein unbehandeltes Stück der gleichen Qualität mit ausgewertet. Die beiden linken Qualitäten sind wenig begangen, die beiden rechten stark begangen. Der Abtrageeffekt dieser Ausrüstung ist erkennbar.

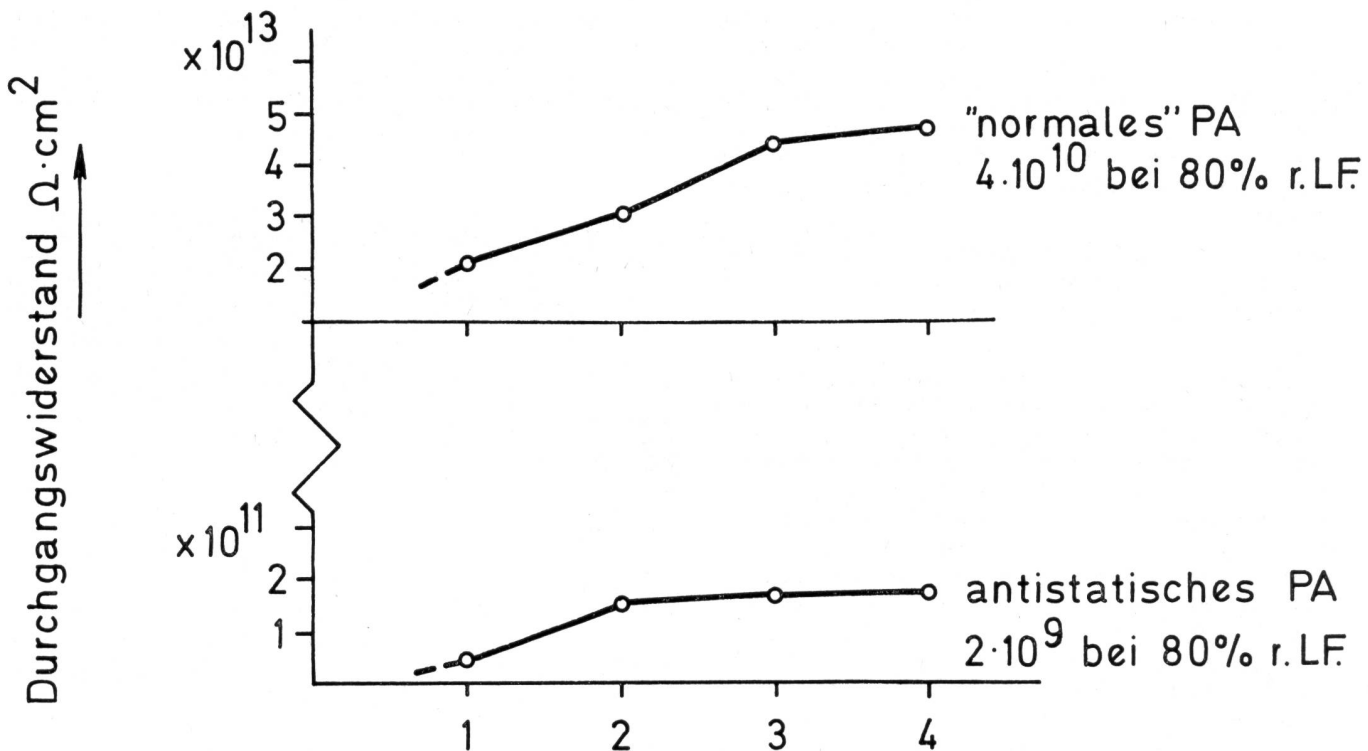


Abbildung 9 Durchgangswiderstand von Polyamid-Teppichböden $h \rightarrow$ Auslagezeit bei 30% r.LF.

a = «normales» PA
b = «antistatisches» PA

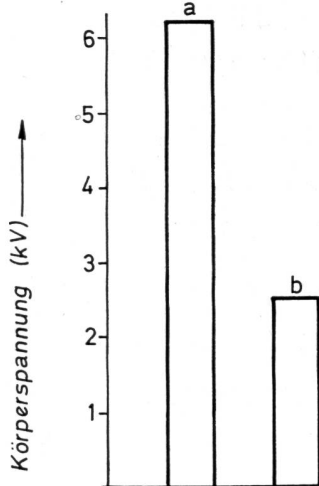


Abbildung 10 Einfluss von antistatischen Polyamiden gleicher Konstruktion auf die Aufladung («Normal»schritt)

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass derartige Abtrageeffekte auch auf nachträglich im Haushalt aufgebraachte Antistatica gelten können.

Leitfähige Rückenaustrüstung

Das Einbringen einer leitfähigen Schicht in die Trägerkonstruktion von Teppichen vergrößert die elektrisch wirksame Fläche dieser Schicht sehr stark und damit ihre Kapazität gegen Erde.

Die Vergrößerung der Kapazität setzt aber das elektrische Potential der entsprechenden Schicht für eine bestimmte Ladung so stark herab, dass statt einiger kV nur noch wenige Volt zwischen dieser Schicht und Erde liegen. Die Schicht ist also, gemessen am Kontaktpotential des Menschen gegen Erde, praktisch geerdet. Der so ausgerüstete Teppichboden kann somit hinsichtlich seiner elektrostatischen Merkmale weitgehend unabhängig von der Verlegung gemacht werden. Analog kann die elektrostatische Wirkung von stark isolierenden Planschäumen oder ähnlichen Rückenbeschichtungen von Teppichböden durch die Verwendung leitfähiger Vorstriche gedämpft werden.

Bei zusätzlicher Verwendung leitfähiger Fasern im Pol (z. B. «antistatisches» Polyamid — vgl. Abschnitt «Modifizierte Synthefasern»), kann sich die Aufladung der über den Teppichboden gehenden Person durch die grössere Mobilität der Teppichaufladung bei jedem Schritt mit dieser neutralisieren, wodurch eine gute antistatische Wirkung der Teppichware bei auch sonst elektrostatisch ungünstigen Umständen erreicht werden kann.

Bei den in Abbildung 12 untersuchten Teppichbodenqualitäten handelt es sich um zwei auf PP-Bändchengewebe getuftete Schnittpolwaren mit Glattstrich. Die Qualität 1 besitzt «normales» Polyamid im Pol, während Qualität 2 aus «antistatischem» Polyamid getuftet wurde. Zusätzlich sind die mit einem Stern (*) gekennzeichneten Proben vor dem Glattstrich mit einer flüssigen leitfähigen Rückenaustrüstung versehen, während die mit R gekennzeichnete Ware mit einem Latex bestrichen ist, dem ca. 20 % Russ beigemischt waren.

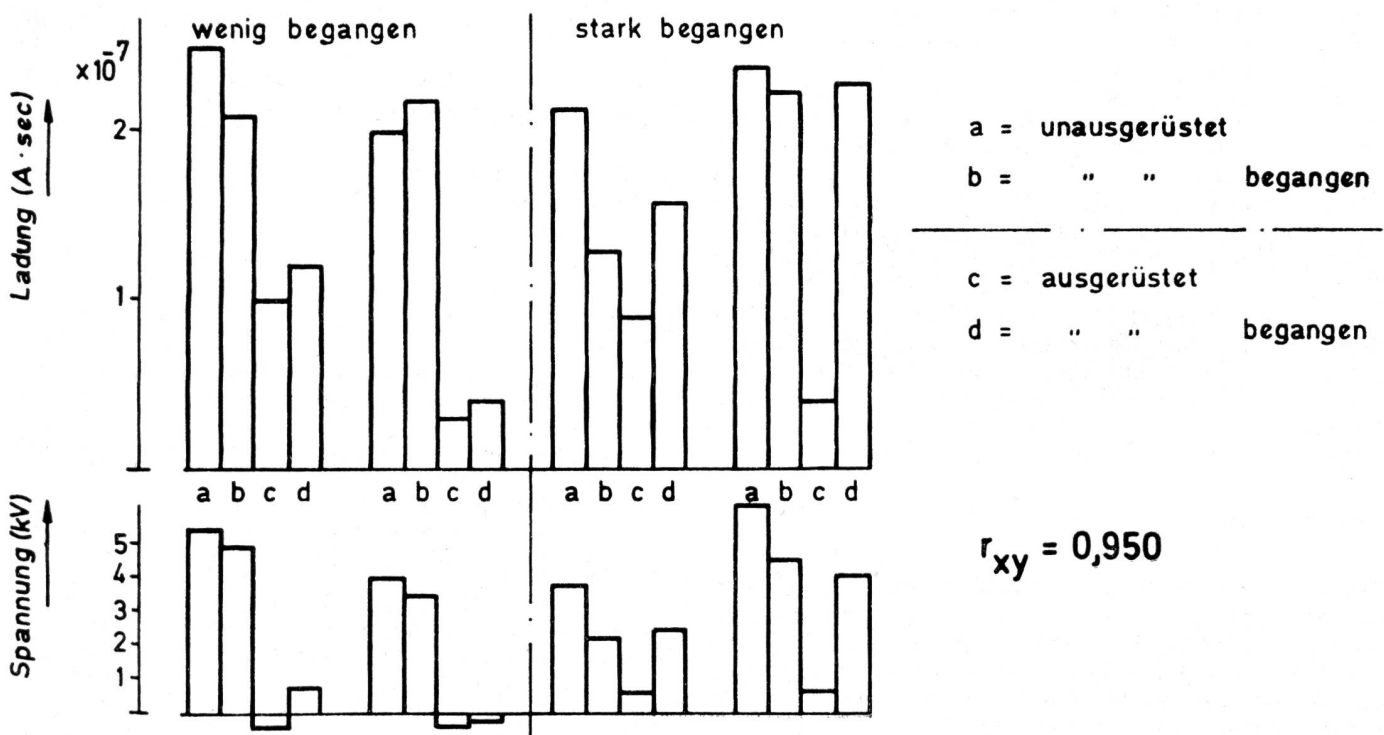


Abbildung 11 Antistatische Ausrüstung im Gebrauch

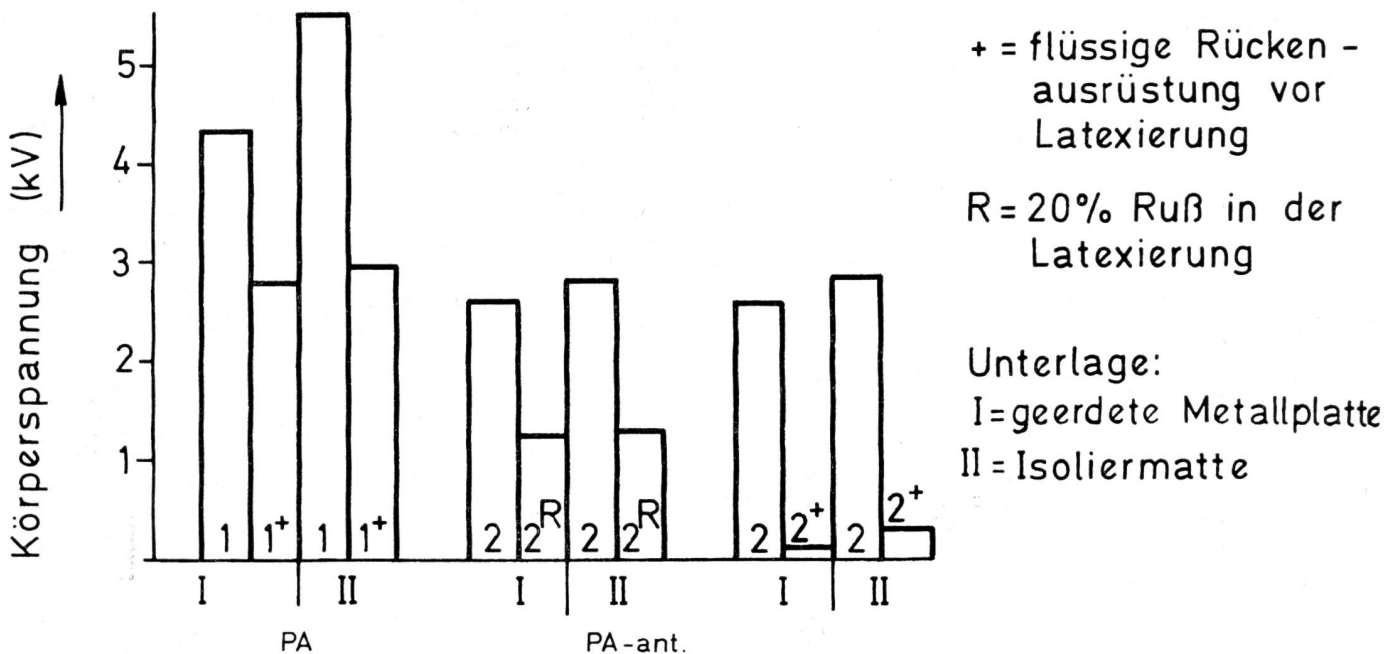


Abbildung 12 Einfluss leitfähiger Vorstiche auf die Personalaufladung

Zunächst kann man dem Diagramm entnehmen, dass die Körperspannung bei den mit leitfähigem Rücken versehenen Waren durch die grosse Kapazität dieser Schicht von der Art der Verlegung unabhängig wird. Bei isoliertem Untergrund (z. B. entsprechend einem isolierenden Planschaum) bleibt die Körperspannung in diesen Fällen etwa gleichgross wie bei leitender, geerdeter Unterlage (entsprechend einem Estrich), während sie bei Waren ohne Rückenaustrüstung, hervorgerufen durch die Gummiisolierung, noch ansteigen kann.

Weiterhin ist zu beobachten, dass bei den ausgerüsteten Waren die Personenaufladung auch auf Metallunterlage geringer als bei unausgerüsteter Ware ist. Dies ist nicht auf Kapazitätsänderung des Teppichgrundes gegen Erde zurückzuführen — der Teppichgrund liegt ja direkt auf der Metallplatte —, vielmehr handelt es sich um eine Verringerung des Durchgangswiderstandes des Flormaterials durch eine Benetzung mit Antistatikum bei Probe 1* und 2* und/oder es liegt eine Verbesserung der antistatischen Wirkung der Fasern durch die leitfähige Rückenbeschichtung vor.

Schlussfolgerung

Alle vorstehend angesprochenen Massnahmen gegen Personenbelästigung durch elektrostatische Ladungserscheinungen auf textilen Fussbodenbelägen sind im allgemeinen durchaus wirksam. Jedoch ist zu berücksichtigen, dass die eine oder andere Massnahme oft nicht ausreicht, Personenbelästigungen auszuschliessen, wenn sie allein angewandt wird. Es empfiehlt sich daher, geeignete Massnahmen zu kombinieren.

Danksagung

Die Arbeit wird durch die Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen (AIF) über das Forschungskuratorium Gesamttextil in dankenswerter Weise gefördert. Dem ehemaligen Mitarbeiter des TFI, Herrn Textil-Ing. Broumand, danken wir für die Arbeitsplanung und den Beginn der Versuche. Für die Bereitstellung von Versuchsmaterial sagen wir Dank verschiedenen Teppichfirmen sowie den Werken Bayer und Hoechst.

Dr.-Ing. G. Satlow und Dipl.-Ing. S. Schröer
Deutsches Teppich-Forschungsinstitut Aachen-Haaren
D-51 Aachen

Literatur

- 1 Satlow, G.: Textil-Praxis 27/1972, S. 342–344, 402–406.
- 2 Satlow, G.: chemiefasern-textilind. 23/75 / 1973, S. 193–194, 196–197.
- 3 Beyer, H., Meckel, L., Zimmer, W.: Melliand Textilberichte 53/1972, S. 1347–1352.
- 4 AATCC-Testmethode 134/1969.
- 5 CRI-Methode: Rep. August 1968 — Vergleiche auch Martin, D. M., Redford, R. D., Lee, K. R.: Modern Textiles 52/1971, April, S. 76–79.
- 6 Kratzsch, E.: chemiefasern-textilind. 22/74 / 1972, S. 781–785.
- 7 Oxé, J., Keller, R.: Textilveredlung 7/1972, S. 417–432.
- 8 Beyer, H., Meckel, L.: Textilindustrie 72/1970, S. 610–617.
- 9 Abke, F., Satlow, G.: Textilindustrie 72/1970, S. 618–621.
- 10 Heyl, G., Lüttgens, G.: Kunststoffe 56/1966, S. 51 ff.
- 11 Nähere Einzelheiten zur Apparatur siehe Fussnoten 1 und 9.
- 12 Wilson, D.: Textile Inst. Ind. 10/1972, S. 235–239.
- 13 Hearl, I. W. S., J. Textile Inst. 44/1953, S. T 117–T 143.