

Beurteilung von Stühlen zur Erdung der Mitarbeiter bei sitzender Tätigkeit

Jürgen Speicher (1)
Reinhold Gärtner (2), Magdalena Hilkersberger (2)
Wolfgang Stadler (3)

(1) Wolfgang Warmbier GmbH & Co. KG, Untere Gießwiesen 21, D-78247 Hilzingen
(2) Infineon Technologies AG, Am Campeon 1-15, D-85579 Neubiberg
(3) Intel Deutschland GmbH, Am Campeon 10-12, D-85579 Neubiberg

Zusammenfassung – Bei sitzenden Tätigkeiten müssen Mitarbeiter, die ESD-empfindliche Bauteile handhaben, gemäß internationalen Normen mit Hilfe eines Handgelenkerdungsbandes geerdet sein. Der vorliegende Beitrag beschreibt Messmethoden zur Beurteilung, ob die Erdung der Mitarbeiter auch über das System ESD-Stuhl/ESD-Fußboden funktioniert, und untersucht den Einfluss verschiedener Parameter wie Boden- und Schuhmaterial, relative Luftfeuchte und vor allem das Material der Stuhlrollen auf die Körperspannung der Mitarbeiter.

Abstract – According to international standards, personnel working on ESD sensitive devices in seated position have to be grounded using a wrist strap. The paper describes a test method to evaluate whether the grounding of the operator works via the system ESD chair/ESD flooring system. It also evaluates the influence of several parameters, for example, material of flooring and footwear, relative humidity, and especially the material of the castors on the body voltage of the operator.

1 Einleitung

Internationale Standards für die Entwicklung von ESD-Kontrollprogrammen wie ANSI/ESD S20.20 [1] oder IEC 61340-5-1 [2] fordern, dass Mitarbeiter bei sitzenden Tätigkeiten über ein Handgelenkerdungsband geerdet werden. Dies gilt auch dann, wenn das System Schuhwerk/Fußboden die primäre Erdungsmethode für das Personal darstellt. Der Hauptgrund für diese Anforderung ist, dass nicht garantiert werden kann, dass die sitzende Person die ganze Zeit Kontakt mit den ESD-Schuhen zum ableitfähigen Fußboden hat. Dies würde zu einer unzureichenden Erdung führen und das Personal könnte sich elektrostatisch aufladen. Die Verwendung von Handgelenkerdungsbandern ist jedoch häufig unpraktisch und wird deshalb vom Personal nicht konsequent angewendet.

IEC 61340-5-1 und ANSI/ESD S20.20 ermöglichen jedoch anwenderspezifische Änderungen der Normenanforderungen (sog. „Tailoring“), wenn diese durch entsprechende technisch einwandfreie Daten und Auswertungen unterstützt werden. Für das Problem der Erdung von Personal über ein Stuhl-/Fußbodensystem müssen Messmethoden entwickelt werden, die zeigen, dass Personen ausreichend geerdet sind. Die beiden oben erwähnten Normen stellen nur Anforderungen an den Ableitwiderstand von „Sitzgelegenheiten“ [3]. Für die

Erdung des Personals über ein Schuhwerk/Fußbodensystem ist die Charakterisierung des Widerstandes aber nicht ausreichend. Die generierte Körperspannung ist der entscheidende Parameter, daher muss auch die Generierung der Körperspannung während des Betriebs und der Bewegung bewertet werden. Internationale Normen schreiben Messungen der generierten Körperspannung für die Qualifizierung eines Schuhwerk/Fußboden-Systems bei stehenden Tätigkeiten vor [1,2]. Dies ist notwendig, da keine eindeutige Korrelation zwischen dem Erdungswiderstand R_g einer Person über ein Schuhwerk/Fußboden-System und der während der Bewegung entstehenden Körperspannung besteht. Die hier vorgestellte Untersuchung verwendet vor allem den sogenannten „Chair-Walking-Test“ und die zugehörige Worst-Case-Variante, den sogenannten „Push-Tests“ (beide beschrieben in [4]), um die elektrostatische Aufladung einer auf einem Drehstuhl sitzenden Person zu messen, die beim Bewegen und Herumfahren mit dem Stuhl erzeugt werden kann.

2 Messung der Körperspannung

Die Messung der generierten Körperspannung einer auf dem Stuhl sitzenden Person sollte unterschiedliche Szenarien, typische oder auch kaum vorkommende Worst-Case-Abläufe simulieren (siehe auch [5]). Das wahrscheinlichste

Szenario kann durch eine Person modelliert werden, die sich mit einem Drehstuhl bewegt und dabei einem ähnlichen Laufmuster folgt, wie es für den Begetest gemäß IEC 61340-4-5 oder ANSI/ESD STM97.2 verwendet wird.

Zusätzlich wurden zwei Worst-Case-Szenarien betrachtet, die durchaus vorkommen können:

- Beide Füße stehen auf dem Fußkreuz des Drehstuhls und der Körper wird dabei nach links und rechts gedreht.
- Rollen des Drehstuhls von links nach rechts und umgekehrt (wobei mindestens immer ein Fuß den Boden berührt).

Ein weiteres, eher unwahrscheinliches Worst-Case-Szenario, bei dem sich die Person mit beiden Beinen vom Boden abstößt und dann während der Bewegung des Stuhles beide Beine in der Luft hat, wurde ebenfalls bewertet. Dieses extreme Worst-Case-Szenario wird in der Realität nicht eintreten, da es nicht sehr wahrscheinlich ist, dass sich die Person während des Gleitens auflädt und gleichzeitig ein Gerät oder eine Platine berührt, ohne zuvor einen Tisch oder andere geerdete Gegenstände zu berühren.

Die vier Szenarien der sitzenden Person werden wie folgt zusammengefasst:

- Typischer Anwendungsfall:** Die Person bewegt den Stuhl im normalen Sitzbetrieb mit beiden Beinen auf dem Boden nach einem definierten Muster („Chair-Walking-Test“, siehe Abbildung 1, links)
- Worst-Case-Szenario 1:** Die Person stellt beide Füße auf das Fußkreuz und dreht den Drehstuhl mit dem Körper nach links und rechts.
- Worst-Case-Szenario 2:** Die Person rollt den Drehstuhl von links nach rechts und umgekehrt (mit mindestens einem Fuß in Bodenkontakt).
- Extremes Worst-Case-Szenario:** Die Person stößt den Drehstuhl mit beiden Füßen ab und nimmt dann beide Füße nach oben („Push-Test“, siehe Abbildung 1, rechts).

Die Tests wurden auf verschiedenen Fußbodenarten (z. B. PVC-Fußbodenbelag oder Doppelboden) und mit unterschiedlichen Stuhltypen von verschiedenen Herstellern durchgeführt. Die Stühle waren ursprünglich alle mit fünf dissipativen (=ableitfähigen) Kunststoffrollen ausgestattet.

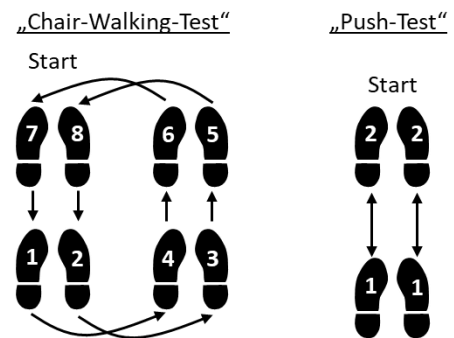


Abbildung 1: Bewegungsmuster, die hauptsächlich in den hier gezeigten Untersuchungen verwendet werden. Links: „Chair-Walking-Test“ (typischer Anwendungsfall). Rechts: „Push-Test“ (extremer Worst-Case-Fall).

Ein Problem ist, dass Stuhlrollen aus dissipativem Kunststoff mit der Zeit verschmutzen und zerkratzen, was zu einem höheren Systemwiderstand und zu einer höheren Körperspannung führt, wenn die Person mit dem Stuhl herumrollt. Kleine Kratzer oder kleine Löcher in den Kunststoffstuhlrollen, die sich mit Schmutz und Staub füllen, verschlimmern das Problem. Daher wurden im Laufe der Untersuchung zwei der dissipativen Kunststoffstuhlrollen durch Metallstuhlrollen ersetzt. Die Gründe für den Austausch von nur zwei Stuhlrollen waren einerseits die Kosten und andererseits ein Sicherheitsproblem. Zumindest in Deutschland müssen Stühle mit Rollen automatisch anhalten, wenn eine Person vom Stuhl aufsteht. Dies soll verhindern, dass der Stuhl unbemerkt wegrollt und die Person beim erneuten Hinsetzen auf den Boden fällt. Die für die Bewertung dieser Experimente verwendeten Metallrollen hatten keine automatische Stoppfunktion, aber die drei verbleibenden dissipativen Kunststoffstuhlrollen vermochten den Stuhl gut genug abzubremesen.

Um den Einfluss des Gewichts der Mitarbeiter (und den daraus resultierenden Anpressdruck auf den Boden) zu bestimmen, wurden die Versuche von Personen mit unterschiedlichem Gewicht durchgeführt.

Die meisten Messungen wurden durchgeführt, während die Personen ESD-Schuhe trugen. Dies ist der Normalfall, wenn Personal innerhalb einer ESD-Schutzzone (EPA) arbeitet. Um festzustellen, ob die Erdung über den Stuhl auch ohne ESD-Schuhe funktionieren würde, wurden Messungen der Körperspannung (und des Systemwiderstands) an Personen mit isolierenden Schuhen durchgeführt.

Tabelle 1: Maximale Körperspannung von Mitarbeitern mit isolierenden Schuhen beim Durchführen der Bewegungsabläufe a) bis d) mit unterschiedlichen Stühlen auf einem ESD-Boden.

Stuhlart	$R_{\text{gop}} [\Omega]$	Max. Körperspannung bei Bewegungsablauf [V]			
		a	b	c	d
Bürostuhl mit 5 isolierenden Rollen	$> 10^{12}$	1100	1000	1100	1100
Bürostuhl mit 3 isolierenden Rollen und 2 Metallrollen	$> 10^{12}$	300	300	300	300
ESD-Drehstuhl A mit 5 dissipativen Rollen	$> 2 \times 10^8$	100	35	80	100
ESD-Drehstuhl A mit 3 dissipativen Rollen und 2 Metallrollen	1×10^8	50	20	35	50
ESD-Drehstuhl B mit 5 dissipativen Rollen	3×10^{10}	320	100	200	380
ESD-Drehstuhl B mit 3 dissipativen Rollen und 2 Metallrollen	3×10^6	80	25	40	100

3 Ergebnisse

3.1 Allgemeine Überlegungen

Als Ausgangspunkt für die Bewertung wurden einige allgemeine Fragestellungen untersucht. Es wird immer wieder festgestellt, dass bei der regelmäßigen Überprüfung (Compliance Verification) von ESD-Drehstühlen, die auch nur wenige Monate in Gebrauch waren, erhöhte Erdableitwiderstände gemessen werden. Experimente sollten daher klären, ob die Lenkrollen aus dissipativem Kunststoff, die normalerweise mit neuen ESD-Stühlen geliefert werden, ausreichend sind, um eine Person mit ESD-Schuhen über einen ESD-Drehstuhl und ESD-Fußboden zu erden. Vor dem Messen der Körperspannungen wurden der Ableitwiderstand des Fußbodens R_g und der Systemwiderstand der auf dem Stuhl sitzenden Person R_{gop} mit ESD-Schuhen gemessen. Dieselben ESD-Drehstühle und Personen wurden dann verwendet, um die Körperspannung unter Verwendung der im Kapitel 2 genannten Verfahren zu messen.

Als Worst-Case-Drehstuhl wurde ein normaler Bürodrehstuhl ohne ESD-Eigenschaften verwendet. Alle Drehstühle wurden zuerst „wie vorgefunden“ gemessen, d. h. mit den original angebrachten Stuhlrollen. Nach diesen ersten Messungen wurden die Rollen aus dissipativem Kunststoff gegen leitfähige Rollen aus Metall ausgetauscht und danach die Messungen wiederholt. Neben dem typischen Anwendungsfall in einem ESD-geschützten Bereich (EPA), in dem das Personal ESD-Schuhe trägt, wurde auch eine Person mit isolierenden Straßenschuhen gemessen. Als ein Beispiel für die vielfältigen Untersuchungen fasst Tabelle 1 ein Worst-Case-Ergebnis zusammen, bei dem die Person normale, isolierende Straßenschuhe und

keine ESD-Bekleidung trug und so mit verschiedenen Drehstühlen auf einem ableitfähigen Fußboden herumrollte. In diesem Fall konnte die Personenaufladung nur über den Drehstuhl und nicht über die Schuhe der Person abgeleitet werden.

Bei Verwendung des normalen Bürodrehstuhls ohne ESD-Eigenschaften lädt sich die Person auf mehr als 1000 V auf. Dies zeigt, dass die Messtechnik zur Beurteilung der Personenerdung ausreichend ist. Allein durch die Verwendung von Stuhlrollen aus Metall anstelle von Stuhlrollen aus nicht-ableitfähigem Kunststoff wird die maximal erzeugte Körperspannung bereits auf ca. 300 V gesenkt. Der Grund dafür ist, dass die gleiche Ladungsmenge, die zwischen den Stuhlrollen und dem Boden erzeugt wird, nun auf eine größere Kapazität (Stuhlrolle aus Metall plus sternförmiges Fußkreuz aus Metall) übertragen und dort auch gespeichert wird und sich somit die Spannung erheblich verringert.

Während der ESD-Drehstuhl A (mit blauem Stoffbezug) nur eine geringe Reduzierung der Körperspannung zeigt, wenn zwei Stuhlrollen aus dissipativem Kunststoff durch Stuhlrollen aus Metall ersetzt werden, zeigt der viel ältere ESD-Drehstuhl B (mit rotem Stoffbezug) eine dramatische Verbesserung von einem ursprünglichen "Nichtakzeptieren" des Stuhls zu einem sehr guten Stuhl (siehe auch Abbildung 1). Wie der Tabelle 1 zu entnehmen ist, hat der Ableitwiderstand R_g durch den Rollentausch bereits um vier Größenordnungen abgenommen (während die Person dabei isolierende Straßenschuhe trägt!), was zu einer signifikanten Verringerung der maximal erzeugten Körperspannung führt.

Tabelle 1 zeigt auch, dass die Szenarien b) – die Person stellt beide Füße auf das Fußkreuz und dreht den Drehstuhl mit dem Körper nach links und

rechts – und c) – die Person rollt den Drehstuhl von links nach rechts und umgekehrt (mit mindestens einem Fuß in Bodenkontakt) – weniger Körperspannungen erzeugen als die Szenarien a) – „Chair-Walking-Test“ – und d) – „Push-Test“. Daher lag der Schwerpunkt bei den weiteren Untersuchungen nur noch auf dem „Chair-Walking-Test“ und dem „Push-Test“.

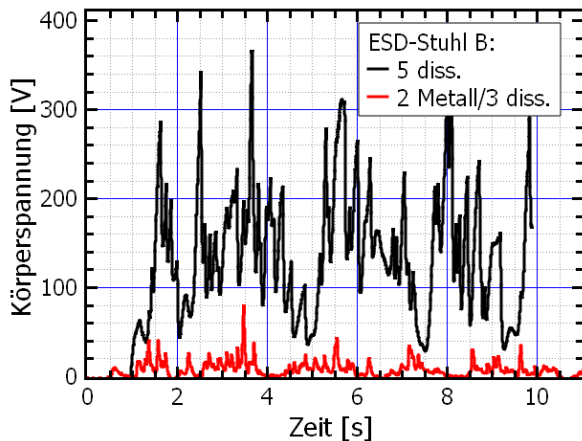


Abbildung 2: Körperspannung eines Mitarbeiters auf dem ESD-Stuhl B mit fünf dissipative Kunststoffrollen (schwarz) und drei dissipativen Kunststoffrollen und zwei Metallrollen (rot).

3.2 Einfluss der Stuhlrollen-Materialien

Abbildung 3 zeigt das Ergebnis einer Untersuchung, bei der ein schon länger im Einsatz befindlicher ESD-Drehstuhl C den maximal erlaubten Ableitwiderstand zu einer Metallplatte von $R_{gp} < 1 \times 10^9 \Omega$ überschreitet. Er verfehlt auch den Grenzwert des Erdableitwiderstands von $R_g < 1 \times 10^9 \Omega$ gemäß IEC 61340-5-1. Die Ursachenforschung ergab, dass die dissipativen Kunststoffrollen des Stuhls erheblich abgenutzt waren. Die Reinigung war auch nicht mehr effektiv.

Bei diesem Stuhl führten zwei Personen mit ESD-Schuhen, jedoch ohne ESD-Bekleidung, einen „Push-Test“ und einen „Chair-Walking-Test“ durch. Das Gewicht der beiden Personen war unterschiedlich, was zu einem höheren Systemwiderstand der leichteren Person (unteres Diagramm in Abbildung 3) oder einem geringeren Systemwiderstand der schwereren Person, (oberes Diagramm in Abbildung 3) führte.

Für die ursprüngliche Rollenkonfiguration mit fünf abgenutzten, dissipativen Kunststoffrollen besteht die schwerere Person (100 kg) bereits den „Chair-Walking-Test“ mit einem Grenzwert für die erzeugte Körperspannung von 100 V gemäß IEC 61340-5-1. Beide Personen bestehen jedoch nicht den „Push-Test“ und die leichtere Person (70 kg)

besteht den „Chair-Walking-Test“ knapp nicht. In Übereinstimmung mit dem höheren Ableitwiderstand gegen Erde oder dem Systemwiderstand der Person zum ESD-Drehstuhl der leichteren Person überschreitet die erzeugte Körperspannung auch die Grenze der IEC 61340-5-1.

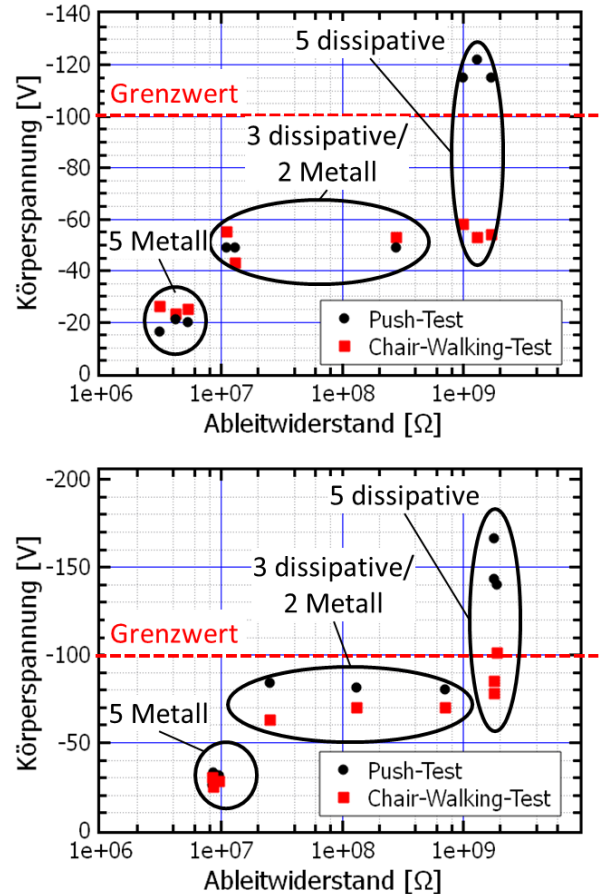


Abbildung 3: Körperspannung, erzeugt während eines „Push-Tests“ und eines „Chair-Walking-Tests“ durch zwei Mitarbeiter (oben: schwerere Person; unten: leichtere Person) mit unterschiedlichen Rollenkonfigurationen.

Das Ersetzen von zwei dissipativen Stuhlrollen aus Kunststoff durch Stuhlrollen aus Metall verändert das Bild vollständig. Beide Personen bestehen mit diesem modifizierten Stuhl sowohl den „Chair-Walking-Test“ als auch den „Push-Test“.

Wie in Abbildung 3 zu sehen ist, variiert der Erdableitwiderstand der Person über den ESD-Drehstuhl von $1 \times 10^7 \Omega$ bis $7 \times 10^8 \Omega$ und liegt damit gemäß IEC 61340-5-1 unter dem Grenzwert von $1 \times 10^9 \Omega$, während sich der Ableitwiderstand des Stuhls zum Boden im Vergleich zur ursprünglichen Konfiguration mit fünf dissipativen Kunststoffstuhlrollen kaum verbessert und immer noch den Grenzwert von $1 \times 10^9 \Omega$ überschreitet.

Tabelle 2: Maximale Körperspannung eines „schweren“ und eines „leichten“ Mitarbeiters mit ESD-Schuhen auf unterschiedlichen Stühlen beim Durchführen des „Chair-Walking-Tests“ auf einem ESD-gerechten Doppelboden.

Stuhlart	R_g Boden [Ω]	R_g Stuhl [Ω]	R_{gop} [Ω]		Max. Körperspannung beim „Chair-Walking-Test“ [V]	
			„schwer“	„leicht“	„schwer“	„leicht“
ESD-Drehstuhl D - 5 dissipative Kunststoffrollen	8×10^6	9.0×10^8	1.4×10^8	3.0×10^8	154	198
ESD-Drehstuhl D - 3 dissipative Kunststoffrollen, 2 Metallrollen		1.5×10^7	1.1×10^7	1.2×10^7	35	50
ESD-Drehstuhl E - 5 dissipative Kunststoffrollen		1.1×10^9	3.0×10^8	5.4×10^8	164	192
ESD-Drehstuhl E - 3 dissipative Kunststoffrollen, 2 Metallrollen		1.7×10^7	6.9×10^6	8.2×10^6	30	29

Das Ersetzen aller dissipativen Kunststoffstuhlrollen durch Stuhlrollen aus Metall führt zu perfekten Kontakten zwischen dem Bodenbelag und den fünf Stuhlrollen. Für beide Personen liegt der Ableitwiderstand gegen Erde und der Systemwiderstand der Person zum ESD-Drehstuhl nun unter $1 \times 10^7 \Omega$ und die maximal erzeugte Körperspannung während des „Push-Tests“ und des „Chair-Walking-Tests“ liegt unter 40 V.

In einem weiteren Experiment führten eine leichtere und eine schwerere Person weitere Messungen der Körperspannung durch, diesmal auf einem Doppelboden. Da das Experiment in einer Produktionslinie durchgeführt wurde, mussten beide Personen ESD-Schuhe und ESD-Bekleidung tragen. ESD-Drehstuhl D war ganz neu, ESD-Drehstuhl E war bereits seit fünf Jahren in Gebrauch. Die Körperspannungen wurden mit einem Walking-Test-Kit gemessen. Die Ableitwiderstände R_g des Fußbodens und der ESD-Drehstühle wurden mit einer 2,5-kg-Elektrode nach IEC 61340-2-3 und einer Prüfspannung von 100 V gemessen. Bei der Messung der Ableitwiderstände R_g hatten die beiden Personen ihre ESD-Schuhe auf das leitfähige Aludruckguss-Fußkreuz gestellt. Tabelle 2 zeigt die Messergebnisse: Beide Drehstühle mit den fünf dissipativen Kunststoffstuhlrollen zeigen generell höhere Ableitwiderstände R_g als dieselben ESD-Drehstühle mit zwei metallischen und drei dissipativen Kunststoffstuhlrollen. Gleiches gilt für den Ableitwiderstand R_g der beiden Personen, denn der Austausch von zwei der fünf dissipativen Kunststoffstuhlrollen durch Metallrollen reduzierte den Ableitwiderstand jeweils um mindestens eine Größenordnung. Dies führte auch zu einer Reduzierung der maximalen Körperspannung während des „Chair-Walking-Tests“ von >100 V auf einen niedrigen, unkritischen Wert von <50 V.

Nachdem der Einfluss einiger grundlegender Parameter bewertet worden war, wurde eine weitere Versuchsreihe in einem anderen Labor mit vier verschiedenen ESD-Drehstühlen auf zwei verschiedenen Bodenbelägen (PVC und Synthesekautschuk) bei Umgebungsbedingung (T: 23 °C, RH: 38 %) und in einer begehbaren Klimakammer durchgeführt (T: 24 °C, RH: 20 %).

Die in Abbildung 4 gezeigten Drehstühle wurden getestet:

A) ESD-Drehstuhl, hellblau, Stoffbezug von Sitz und Rückenlehne; fünf dissipative Kunststoffstuhlrollen, $R_g = 9 \times 10^8 \Omega$. Für einige Versuche wurden zwei der dissipativen Kunststoffstuhlrollen gegen zwei leitfähige Metallrollen ausgetauscht, danach war $R_g = 2,4 \times 10^8 \Omega$

B) ESD-Drehstuhl, schwarz, Sitz und Rückenlehne aus PU; fünf dissipative Kunststoffstuhlrollen, $R_g = 7,5 \times 10^8 \Omega$

C) ESD-Drehstuhl, dunkelblau, Stoffbezug von Sitz und Rückenlehne; drei dissipative Kunststoffstuhlrollen und zwei leitfähige Metallrollen, $R_g = 5,6 \times 10^8 \Omega$

D) ESD-Reinraum-Drehstuhl, schwarz, Vinylbezug von Sitz und Rückenlehne; fünf dissipative Kunststoffstuhlrollen, $R_g = 5,0 \times 10^8 \Omega$



Abbildung 4: ESD-Drehstühle für den „Chair-Walking-Test“ (A bis D von links nach rechts).

In den folgenden Kapiteln wird der Einfluss einiger untersuchter Parameter beschrieben.

3.3 Einfluss von ESD-Schuhen

In der Regel tragen Personen, die in einer ESD-Schutzzone mit einem ableitfähigen Fußboden arbeiten, ESD-Schuhe. Was passiert jedoch, wenn diese Personen ESD-Schuhe mit einem hohen Ableitwiderstand R_g oder Dauer- und Einwegfersenbänder tragen, die in sitzender Position nicht immer einen ordnungsgemäßen Kontakt zum ableitfähigen Fußboden bieten? Um dies zu bewerten, wurde ein Experiment durchgeführt, bei dem die Körperspannung von zwei Personen mit ESD-Schuhen und mit isolierenden Straßenschuhen verglichen wurde.

Abbildung 5 zeigt die Körperspannung, die erzeugt wurde, als zwei verschiedene Personen (rot = 70 kg, schwarz = 100 kg) den „Chair-Walking-Test“ mit ESD-Drehstuhl A auf einem PVC-Fußboden durchführten. Die Kombination von ESD-Drehstuhl A und PVC-Fußboden wies den höchsten Systemwiderstand aller untersuchten Kombinationen auf. Als Worst-Case-Szenario trugen die Personen isolierende Straßenschuhe. Dies simuliert das Szenario, dass eine Person auf einem ESD-Drehstuhl sitzt und nur Dauer- oder Einwegfersenbänder trägt, die möglicherweise nicht immer einen guten Kontakt zum ESD-Fußboden haben. Das obere Diagramm in Abbildung 5 zeigt, dass sich die Person in diesem Fall problemlos auf Werte über 100 V aufladen kann. Sobald diese Person ESD-Schuhe trägt, wird die Körperspannung auf weniger als 100 V reduziert (mittleres Diagramm). Durch den Austausch von zwei dissipativen Kunststoffstuhlrollen gegen Metallrollen wird die Körperspannung auf weniger als 50 V reduziert (unteres Diagramm).

Die Versuche zeigen deutlich, dass die Erdung der Personen über einen ESD-Drehstuhl und ESD-Fußboden nur mit ESD-Schuhen wirklich zuverlässig funktioniert. Bei einer Kombination von ESD-Drehstuhl/ESD-Fußboden mit einem niedrigeren Ableitwiderstand R_g von etwa 100 M Ω ist die Verwendung von ESD-Schuhen weniger wichtig. Mit dieser ESD-Drehstuhl/ESD-Fußboden-Kombination liegen alle beim „Chair-Walking-Tests“ gemessenen Körperspannungen der drei verschiedenen Personen mit fünf unterschiedlichen Schuhen (auch mit isolierenden Straßenschuhen) unter 60 V und mit ESD-Schuhen sogar kaum über 10 V.

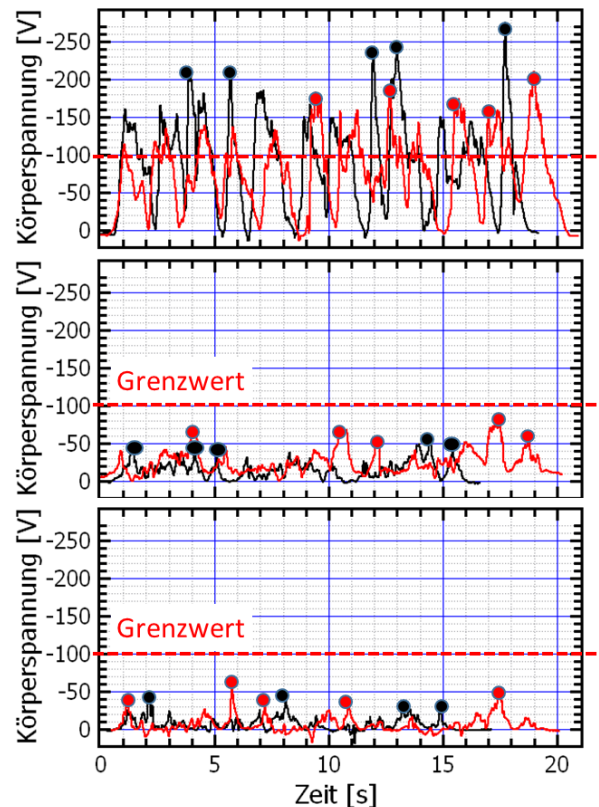


Abbildung 5: Körperspannung, die beim „Chair-Walking-Test“ von zwei Personen mit einer Kombination aus ESD-Drehstuhl und ESD-Fußboden mit einem hohem Ableitwiderstand R_g von etwa 900 M Ω erzeugt wird.

Oben: ESD-Drehstuhl mit fünf dissipativen Kunststoffstuhlrollen und Person mit isolierenden Straßenschuhen
Mitte: ESD-Drehstuhl mit fünf dissipativen Kunststoffstuhlrollen und Person mit ESD-Schuhen

Unten: ESD-Drehstuhl mit drei dissipativen Kunststoffstuhlrollen sowie zwei leitfähige Metallrollen und Person mit ESD-Schuhen.

3.4 Einfluss von Bekleidung

Das Material der Bekleidung der Person wird als ein weiterer wichtiger Parameter angesehen, der die Erzeugung der Körperspannung beeinflussen kann. In [5] sind Messungen von Körperspannungen zusammengefasst, die zeigen, dass das Tragen von isolierenden Polyester-Bekleidungen die Ladungserzeugung im Vergleich zu Baumwollbekleidung nicht beeinflusst. Bei der in [5] durchgeführten Untersuchung trugen die Mitarbeiter jedoch einen ESD-Arbeitsmantel über ihrer isolierenden Privatkleidung.

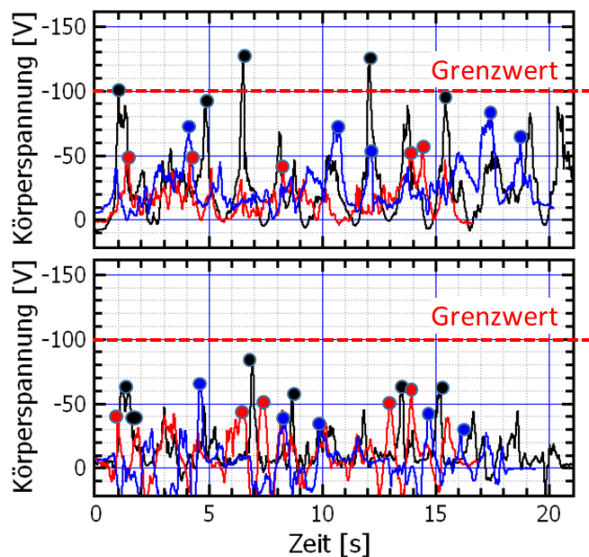


Abbildung 6: Einfluss von isolierender Bekleidung (oben) und ableitfähiger Bekleidung (unten).

Da es möglicherweise zu einem Kontakt zwischen der Haut des Mitarbeiters und dem ESD-Arbeitsmantel gekommen sein könnte und dadurch die isolierende Unterbekleidung „überbrückt“ worden ist, wurden neue Experimente durchgeführt. Hierbei wurde die Person durch eine dicke Luftpolsterfolie vom ESD-Drehstuhl elektrisch isoliert. Der Ableitwiderstand R_g der auf dem Stuhl sitzenden Person mit beiden Füßen in der Luft betrug jeweils $>1\text{ T}\Omega$. Wenn die Person beide ESD-Schuhe auf das leitfähige Fußkreuz abstellte, reduzierte sich der Ableitwiderstand R_g auf $13\text{ M}\Omega$. Die in einem „Chair-Walking-Test“ erzeugte Körperspannung betrug für die Person mit guten ESD-Schuhen um 50 V (siehe Abbildung 6). Die Person mit strukturierter ESD-Schuhsohle zeigte dagegen eine etwas höhere Aufladung mit und ohne Isolierschicht auf dem Stuhlsitz. Somit beeinflusste die private, isolierende Unterbekleidung die Erzeugung der Körperspannung während des „Chair-Walking-Tests“ nicht wesentlich.

3.5 Aufladen auf einem Fußboden aus Synthetikgummi

Die gleichen ESD-Drehstühle wie oben wurden auch für weitere Experimente auf einem Fußboden aus Synthetikgummi verwendet. Der mit einer $2,5\text{-kg}$ -Elektrode gemessene Ableitwiderstand R_g von $2,5 \times 10^7\ \Omega$ ist etwas niedriger als der des PVC-Fußbodens ($R_g = 9,0 \times 10^7\ \Omega$). Ein weiterer Aspekt ist, dass dieser Fußboden aus Synthetikgummi etwas weicher ist als der PVC-Fußboden und somit einen besseren Kontakt zu den Stuhlrollen garantiert. Generell gibt es eine allgemeine Empfehlung der Stuhlhersteller, dass bei einem „harten“ Fußboden „weiche“ Stuhlrollen und bei

einem „weichen“ Fußboden „harte“ Stuhlrollen verwendet werden sollten. Da die Stuhlrollen (dissipativer Kunststoff und Metall) der verwendeten Stühle alle hart waren, könnte es zu einem schlechteren Kontakt zwischen PVC-Fußboden und Stuhlrollen gekommen sein. Dies wiederum hätte auch zu einer höheren Körperspannung führen können.

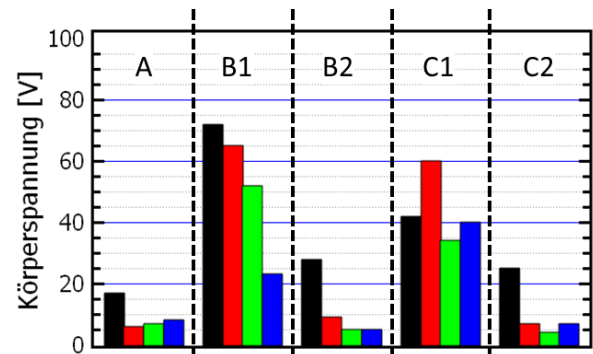


Abbildung 7: Während eines „Chair-Walking-Test“ erzeugte Körperspannung: Drei Personen (A, B, C) tragen verschiedene ESD-Schuhe (A, B2, C2) oder isolierende Straßenschuhe (B1, C1) auf vier verschiedenen ESD-Drehstühlen (farblich codiert) auf einem Synthetikgummi-Fußboden.

Abbildung 7 zeigt das Ergebnis einer Serie von Experimenten, bei denen die während eines „Chair-Walking-Tests“ erzeugte Körperspannung auf einem Synthetikgummi-Fußboden gemessen wurde. Drei verschiedene Personen (A, B, C), die verschiedene ESD-Schuhe (A = ESD-Schuhe mit strukturierter Sohle, B2 = ESD-Stiefel, C2 = ESD-Sandalen) oder isolierende Straßenschuhe (B1, C1) trugen, führten die Tests mit den vier verschiedenen ESD-Drehstühlen wie oben beschrieben (Drehstuhl A = schwarz; Drehstuhl B = rot; Drehstuhl C = grün; Drehstuhl D = blau) durch. Wie deutlich zu sehen ist, zeigen alle Kombinationen eine Körperspannung von weniger als 100 V auf dem „weichen“ Synthetikgummi-Fußboden.

3.6 Einfluss der Sohlenstruktur

Bei einigen Messungen war die Körperspannung einer Person mit ESD-Schuhen mit einer grob strukturierten Sohle (siehe Abbildung 8) höher als bei Schuhen mit einer homogenen Struktur.



Abbildung 8: ESD-Schuhe mit grob strukturierter Laufsohle.

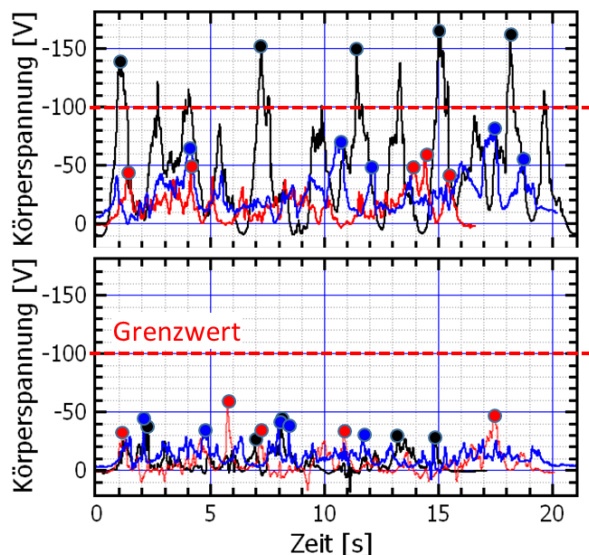


Abbildung 9: Körperspannung bei Personen mit ESD-Schuhen mit grob strukturierter Laufsohle (schwarz), ESD-Schuhen (blau) und ESD-Sandalen (rot). Das obere Diagramm zeigt die erzeugte Körperspannung mit einem ESD-Drehstuhl mit fünf dissipativen Kunststoffstuhlrollen. Das untere Diagramm zeigt das Ergebnis, wenn zwei der dissipativen Kunststoffstuhlrollen durch zwei Metallrollen ausgetauscht wurden.

Bei einer solch strukturierten Sohle ist die Kontaktfläche zwischen der ableitfähigen Laufsohle und dem ableitfähigen Fußboden natürlich kleiner und somit der Ableitwiderstand gegen Erde höher. Dies führt auch zu einer höheren Körperspannung. Dies konnte allerdings durch einen „normalen“ Begehtest nicht bestätigt werden. Während des „Chair-Walking-Tests“ auf derselben Fußboden/Drehstuhlkombination dagegen läßt sich die sitzende Person mit den grob strukturierten Laufsohlen beim Herumrollen höher auf (schwarze Linie im oberen Diagramm in Abbildung 9) als die beiden Personen mit ESD-Schuhen oder ESD-Sandalen (rote und blaue Linie im oberen Diagramm in Abbildung 9). Durch den Austausch von zwei dissipativen Kunststoffstuhlrollen durch Metallrollen und dem dadurch geringeren Ableitwiderstand des Drehstuhls wurde die erzeugte Körperspannung mit allen drei Schuhtypen auf weniger als 100 V verringert.

3.7 Einfluss der relativen Luftfeuchte

Gemäß IEC 61340-5-1 sollte die „Produktqualifikation“ der ESD-Schutzkomponenten auch bei einer Temperatur (T) von 23 ± 2 °C und einer relativen Luftfeuchte (RH) von 12 ± 3 % (Konditionierung >48 Std.) durchgeführt werden. Ansonsten sind auch in anderen internationalen Normen bei der „Verifizierung der Einhaltung“ keine speziellen Umgebungsbedingungen spezifiziert. Es ist jedoch weitgehend bekannt, dass die relative

Luftfeuchte einen Einfluss auf die Messergebnisse bei den Widerstandsmessungen und Körperspannungen hat. Um den Einfluss der relativen Luftfeuchtigkeit zu ermitteln, wurde die Körperspannung (siehe Abbildung 10) von den drei Personen mit einem „Chair-Walking-Test“ in einem klimatisierten Labor (T: 24 °C, RH: 38 %) und in einer begehbaren Klimakammer (T: 23 °C, RH: 12 %, Konditionierung: 72 Std.) gemessen (nach dem Eintreten der 3 Personen stieg die Luftfeuchte in der Kammer auf RH ~ 20 %). Die für das Experiment verwendeten Schuhe wurden nicht konditioniert.

Die drei Personen trugen verschiedene Schuhe (A = ESD-Schuhe mit grob strukturierter Sohle, B1, C1 = isolierende Schuhe), saßen auf dem ESD-Drehstuhl A mit hellblauem Stoffbezug mit fünf dissipativen Kunststoffstuhlrollen (schwarz) oder drei dissipativen Kunststoffstuhlrollen und zwei leitfähigen Metallrollen (rot) auf einem PVC-Fußbodenbelag.

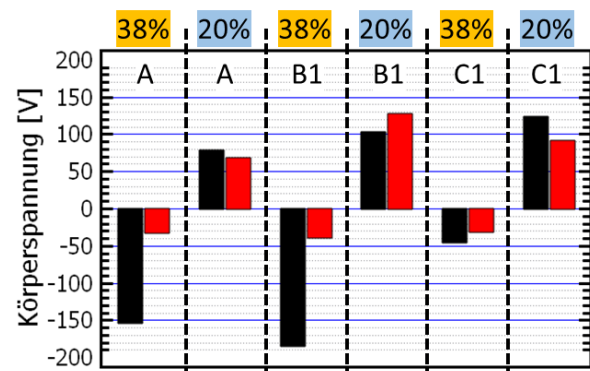


Abbildung 10: Einfluss der relativen Luftfeuchtigkeit (20 % und 38 %) bei Messung der Körperspannung während eines „Chair-Walking-Tests“ (A = ESD-Schuhe mit strukturierter Sohle; B1 und C1 = isolierende Straßenschuhe).

Es hat den Anschein, dass die Ladungserzeugung bei niedriger relativer Luftfeuchtigkeit etwas höher ist. Eine Ausnahme ist Person A, aber deren Schuhe hatten eine strukturierte Laufsohle und die Wiederholbarkeit der Experimente war nicht sehr hoch; daher könnte das Ergebnis davon beeinflusst sein. Ein bemerkenswerter Effekt ist, dass die Polarität der erzeugten Körperspannung bei niedriger relativer Luftfeuchte umgekehrt wird. Bei genauerer Betrachtung der verwendeten Objekte fiel auf, dass der Boden in der Klimakammer zwar aus dem gleichen Material hergestellt war, dass das Muster innerhalb der Klimakammer im Gegensatz zum Muster außerhalb der Klimakammer aber kein Floor-Finishing gesehen hatte. Dieses Floor-Finishing dient dazu, den Boden noch etwas glatter und mechanisch widerstandsfähiger zu machen.

Gleichzeitig verändert es aber auch die Eigenschaften der Oberfläche, was zu einem anderen Aufladungsverhalten führen könnte. Um diesen Effekt genauer zu untersuchen, wurde ein Teil des Experimentes wiederholt. Zwei Proben des gleichen PVC-Bodens wurde innerhalb und außerhalb der Klimakammer ohne Floor-Finishing verwendet. Der „Chair-Walking-Test“ und der „Push-Test“ wurden dann mit Stuhl B und den ESD-Schuhen mit grob strukturierter Sohle (Schuh A) und ESD-Pantoletten (Schuh D) durchgeführt. Abbildung 11 zeigt das Ergebnis beim „Chair-Walking-Test“ („Push-Test“ ist vergleichbar).

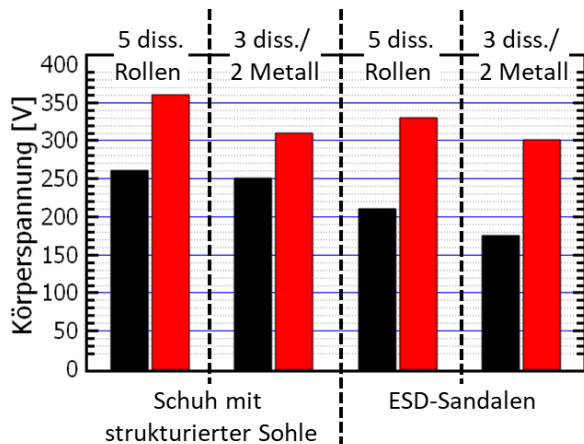


Abbildung 11: Einfluss der relativen Luftfeuchtigkeit (20 % in rot und 51 % in schwarz) bei der Messung der Körperspannung während eines „Chair-Walking-Tests“.

Es ist eindeutig zu erkennen, dass die Polarität bei allen Messungen gleich ist und dass die Amplitude höher ist als bei früheren Messungen. Dies bedeutet, dass das Floor-Finishing einen signifikanten Einfluss auf die Aufladung der Person hat. Es ist auch ersichtlich, dass die Verwendung von zwei Metallrollen die Erzeugung der Körperspannung bei beiden RH-Niveaus verringerte.

3.8 Körperspannung vs. Systemableitwiderstand

Es wird angenommen, dass die erzeugte Körperspannung eindeutig vom Systemableitwiderstand der Person abhängt, wenn diese auf dem Drehstuhl sitzt und mit beiden Füßen den Boden berührt. Experimente haben gezeigt, dass eine solche Korrelation besteht, wenn Personen mit einem Handgelenkerdungsband geerdet werden [7]. Leider ist der Ableitwiderstand während des Begehtests aufgrund der Bewegung und den unterschiedlichen Kontaktflächen zwischen den Schuhen und dem Fußboden nicht konstant, daher ist diese Korrelation in diesem Fall nicht mehr unbedingt gültig. Für den „Chair-Walking-Test“ ist die

Situation noch komplexer, da jetzt neben dem Ableitwiderstand der Person über die Schuhe parallel dazu der Ableitwiderstand der Person über den Stuhl existiert und sich beide Kontaktwiderstände mit der Bewegung ändern.

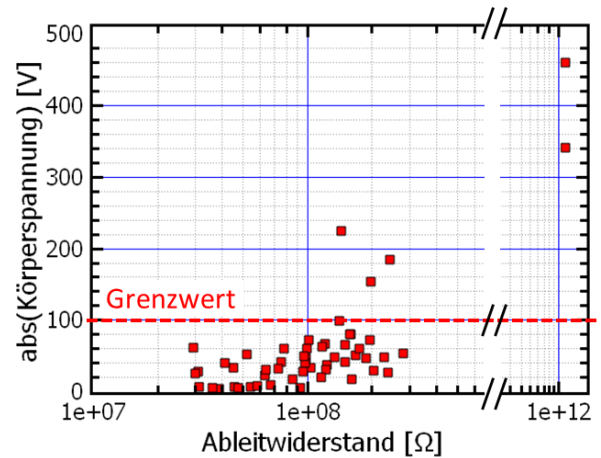


Abbildung 12: Zusammenhang zwischen dem Systemableitwiderstand einer sitzenden Person mit beiden Schuhen auf dem Drehkreuz des Stuhls und der erzeugten Körperspannung (Mittelwert aus den fünf höchsten Peaks). Alle Untersuchungen dieser Veröffentlichung wurden hier zusammengefasst.

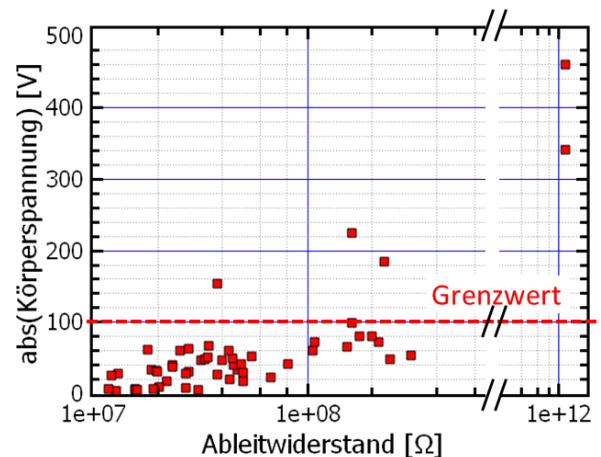


Abbildung 13: Zusammenhang zwischen dem Systemableitwiderstand einer sitzenden Person mit beiden Schuhen auf dem ESD-Boden und der erzeugten Körperspannung (Mittelwert aus den fünf höchsten Peaks). Alle Untersuchungen dieser Veröffentlichung wurden hier zusammengefasst.

Die Messergebnisse in Abbildung 12 und Abbildung 13 zeigen, dass nur für Systemableitwiderstände, die unter $1 \times 10^8 \Omega$ liegen, eine Körperspannung unter 100 V erwartet werden kann. Dabei spielt auch die Art und Weise, wie der Systemableitwiderstand gemessen wird, eine Rolle. Werden die Füße während der Messung auf das Drehkreuz des Stuhls gestellt, dann ist der gemessene Ableitwiderstand in der Regel höher als wenn bei der Messung beide Füße auf dem ESD-

Boden stehen. Die Messung mit den Füßen auf dem Drehkreuz ist eher eine Worst-Case-Messung und korreliert etwas besser mit den Körperspannungen, die mit dem „Chair-Walking-Test“ und dem „Push-Test“ gemessen wurden. Bei Ableitwiderständen von mehr als $1 \times 10^8 \Omega$ können die generierten Körperspannungen sowohl unter, als auch über 100 V liegen. Deshalb ist hier ein „Chair-Walking-Test“ besonders wichtig, um zu prüfen, ob die Erdung der Person über den ESD-Drehstuhl und ableitfähigen Fußboden den Anforderungen entspricht.

4 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Bei sitzenden Tätigkeiten kann eine Person, die über das System ESD-Drehstuhl/ESD-Fußboden geerdet ist, die Anforderungen der internationalen Standards unter bestimmten Randbedingungen erfüllen. Das bedeutet, dass die maximal erzeugte Körperspannung abhängig vom Ableitwiderstand des ESD-Drehstuhls oder vom Systemableitwiderstand „Person/ESD-Drehstuhl/Fußboden“ auf deutlich unter 100 V gehalten werden kann. Die Ergebnisse dieser Studie mit Messungen unter verschiedenen Szenarien, die den tatsächlichen Anwendungsfall simulieren, sowie ein Worst-Case-Test bestätigten diese Aussage.

Die Ergebnisse zeigen aber auch, dass es keine eindeutige Korrelation zwischen dem Ableitwiderständen R_g der Stühle oder den Systemableitwiderständen der Person R_{gop} auf der einen Seite und der erzeugten Körperspannung auf der anderen Seite gibt. Für eine Erdung über ein Handgelenkerdungsband wird diese Korrelation als gegeben angenommen. In erster Näherung kann man jedoch feststellen, dass die Körperspannung unter 100 V bleibt, wenn der Systemableitwiderstand aus Person/ESD-Drehstuhl/ESD-Fußboden kleiner als $1 \times 10^8 \Omega$ ist.

Wenn es keine verlässliche Kontrolle der relativen Luftfeuchte im Arbeitsbereich gibt, muss die Systemqualifikation Person/ESD-Drehstuhl/ESD-Fußboden gemäß internationalen Normen bei einer niedrigen Luftfeuchte von $RH\ 12 \pm 3\ %$ und einer Temperatur von $23 \pm 2\ ^\circ C$ durchgeführt werden. Wenn die relative Luftfeuchte in dem Arbeitsbereich kontrolliert wird, kann ein Abnahmetest des Systems Person/ESD-Drehstuhl/Fußboden unter dieser Luftfeuchte durchgeführt werden. Für Qualifikation oder Abnahmetest sind sowohl eine Widerstands- als auch eine Körperspannungsprüfung erforderlich (ähnlich wie bei IEC 61340-4-5 oder ANSI/ESD STM97.1 und 97.2).

Zur Überprüfung der Konformität (Compliance Verification) kann eine einfache Widerstandsmessung nur dann ausreichend sein, wenn bei der Produktqualifikation ein eindeutiger Zusammenhang zwischen (System-)Ableitwiderstand und gemessener Körperspannung bei einem „Chair-Walking-Test“ und ein eindeutiger Grenzwert für den (System-)Ableitwiderstand gefunden werden kann. Die Messung der generierten Körperspannung mit einem „Chair-Walking-Test“ ist auch im Rahmen der regelmäßigen Überprüfung der Konformität mit reduzierter Probenmenge empfehlenswert, zum Beispiel könnte für jeden Typ eines ESD-Stuhls in einer EPA ein „Chair-Walking-Test“ durchgeführt werden.

Die Untersuchung ergab auch, dass ein möglicher Verschleiß oder eine Verunreinigung der dissipativen Kunststoffstuhlrollen zu Körperspannungen von $>100\ V$ führen kann. Dieses Verhalten kann durch die Verwendung von mindestens zwei Metallrollen weitgehend vermieden werden. Drehstühle mit Metallrollen werden bereits seit längerer Zeit in einigen Fertigungen unter Kontrolle der relativen Luftfeuchte ohne weitere Probleme verwendet ([5], [6]). Aufgrund verschmutzter und abgenutzter dissipativer Kunststoffstuhlrollen können die geforderten Systemableitwiderstände oder Körperspannungen ohne den Einsatz von zwei Metallrollen nicht erfüllt werden.

Literatur

- [1] ANSI/ESD S20.20-2014: “Protection of Electrical and Electronic Parts, Assemblies and Equipment”, 2014.
- [2] IEC 61340-5-1, Edition 2.0, 2016-05: “Electrostatics – Part 5-1: Protection of electronic devices from electrostatic phenomena – General requirements” 2016.
- [3] ANSI/ESD STM97.2: “For the Protection of Electrostatic Discharge Susceptible Items – Footwear/Flooring System – Voltage Measurement in Combination with a Person”, 2016.
- [4] R. Gaertner et al.: “Are ESD Chairs Good Enough to be used as Primary Means of Personnel Grounding?” Proc. EOS/ESD Symposium 2019, Riverside, CA.
- [5] KP Yan; “Experiences with an Alternative Method for Grounding Personnel during Sitting Operation”, Proc. EOS/ESD Symposium 2008, Tucson, AZ.
- [6] R. Gaertner: “Grounding Personnel via the Floor/Footwear System”, Proc. EOS/ESD Symposium 1997, Santa Clara, CA.
- [7] ESD TR20.20-2016, “Handbook for the Development of an Electrostatic Discharge Control Program for the Protection of Electronic Parts, Assemblies, and Equipment”, EOS/ESD Association, 2016.