

ESD – Electro Static Discharge

***eine Gefahr für elektronische Bauteile,
Geräte und Systeme***





Dipl. Ing. Mario Blunk

Buchfinkenweg 3
99097 Erfurt / Deutschland

Telefon +49 176 2904 5855

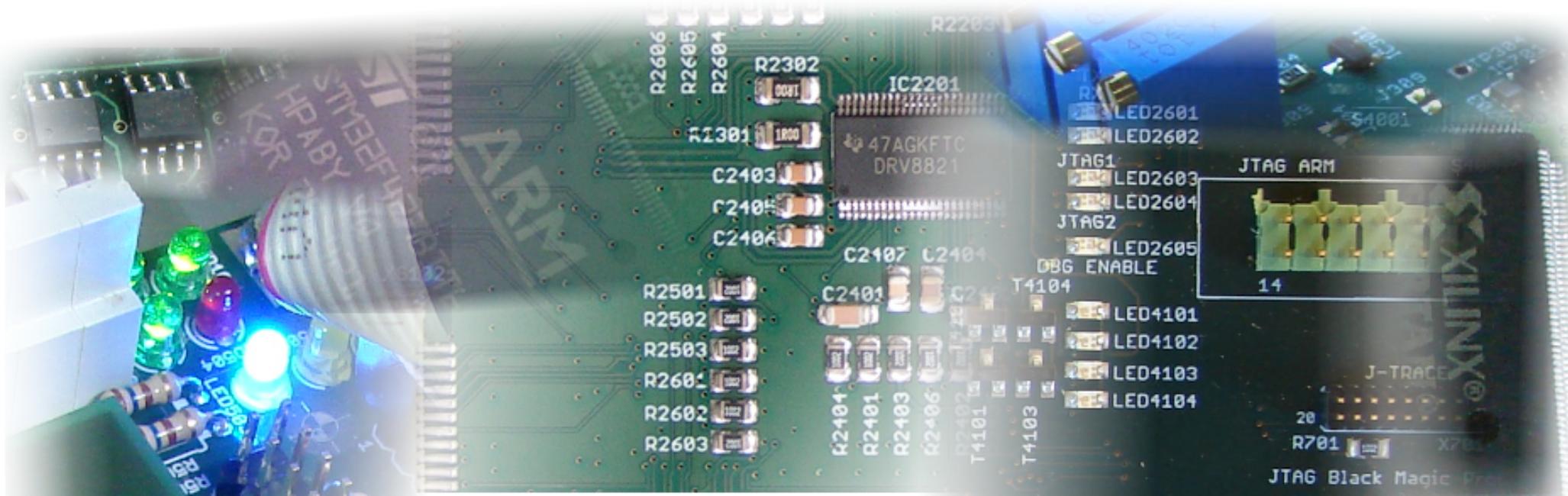
Email info@blunk-electronic.de

Internet www.blunk-electronic.de



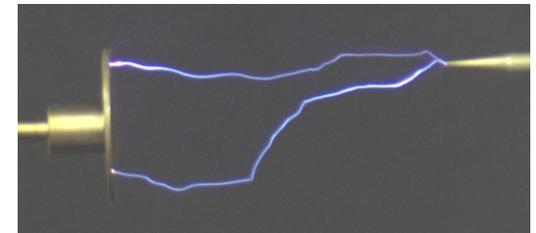
Design Reviews Gutachten Beratung

HW/SW-Entwicklung Boundary Scan / IEEE 1149.x



ESD Überblick

- Grundlagen
- Fehlerursachen und Auswirkungen
- Kosten
- Größenordnungen
- Modellierung
- ESD-kritische Bauelemente (ESDS)
- Schutzmaßnahmen
- Standards und Normen
- Meßtechnik
- ESD Management



Problematik seit
1400 bekannt:
- Schießpulver
- Papiermühlen

Warum ESD Schutz ?

1. Wir wollen Qualität liefern ! → Qualitätssicherung
2. Optimierung Entwicklung und Fertigung
3. Sparen von Material, Energie, Zeit, Geld, ...
4. Zertifizierungen (ISO 9000 ...)
5. rechtliche Aspekte (Versicherungen, Haftung, ...)
6. der gute Ruf !



Grundlagen #1

Elektrische Ladung

engl. Electric Charge

Anhäufung von Ladungsträgern an oder in einem Objekt

Ladungsträger sind:

- **Elektronen**
- Ionen (positiv oder negativ)
- Protonen (nicht relevant)
- ...

Grundlagen #2

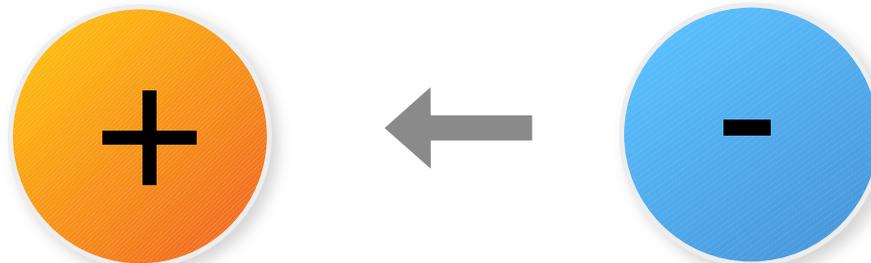
ESD

engl. Electro Static Discharge

Elektrostatische Entladung

Ladungsausgleich zwischen elektrisch **gegensätzlich** geladenen Objekten

- Richtung des Stromflusses
- Höhe der Spannung
- Höhe des Stromes
- zeitlicher Verlauf (schnell → Überschlag/Blitz oder langsam → hochohm. Widerstand)
- Weg der Entladung



Grundlagen #3

Wie entsteht elektrische Ladung ?

- Reibung von Objekten aneinander (triboelektrischer Effekt)
- Trennen von aneinander haftenden Isolatoren
- durch elektrische Felder (Influenz) →
Ladungsverschiebung in einem Objekt

Luftfeuchtigkeit



Entstehen von Ladung



kritisch in Reinräumen / Cleanrooms

Grundlagen #4

Materialien (nach MIL-HDBK-263)

	Widerstand Oberfläche [Ω/\square]	Widerstand Volumen [$\Omega\text{-cm}$]
leitend (conductive)	$< 10^5$	$< 10^4$
ableitend (dissipative)	$10^5 \dots 10^{12}$	$10^4 \dots 10^{11}$
isolierend (isolating)	$> 10^{12}$	$> 10^{11}$

Grundlagen #5

isolierende Materialien

- Polyethylen (PE)
- Polyvinylchlorid (PVC)
- Schaumstoffe
- Polyurethan
- synthetische Textilien
- Fiberglas
- Glas
- Gummi

Grundlagen #6

ableitende (dissipative) Materialien

- Kunststoffe versetzt mit Ruß, Graphit, ...
- meist geschützte Namen
- Kunstharze (<http://www.dynapox.de>)
- ...

Grundlagen #7

leitende Materialien

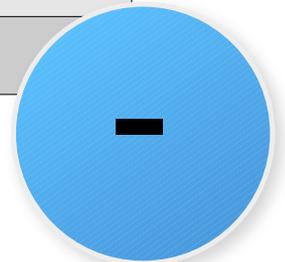
- Kupfer
- Aluminium
- Stahl
- Silber
- Gold
- Wasser
- ...

Grundlagen #8

triboelektrische Reihe



1. Luft	13. Aluminium	25. Gold, Platin
2. menschliche Haut	14. Papier	26. Polystyrol-Schaum
3. Asbest	15. Baumwolle	27. Acryl Rayon
4. Hasenfell	16. Holz	28. Orlon
5. Glas	17. Stahl	29. Polyester
6. menschliches Haar	18. Bernstein	30. Zelluloid
7. Glimmer	19. Siegellack	31. Polyurethan-Schaum
8. Nylon	20. Hartgummi	32. Polyethylen
9. Wolle	21. Mylar	33. Polypropylen
10. Fell	22. Epoxidglas	34. PVC
11. Blei	23. Nickel, Kupfer	35. Silizium
12. Seide	24. Messing, Silber	36. Teflon



Auch elektrische Leiter können geladen werden !

Grundlagen #9

Ladungsausgleich → ESD

Wenn ausreichende elektrische Feldstärke erreicht wird.

$$E = U / d \text{ [kV/m]}$$

Dielektrikum wird durchschlagen.

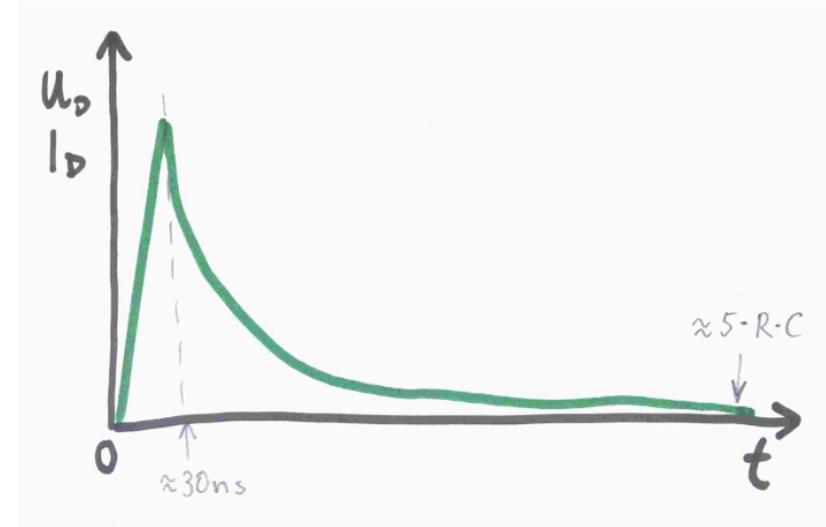
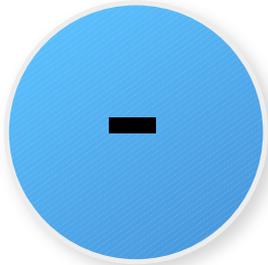
- Funke
- Blitz
- Koronaentladung (leuchtende Entladung aufgrund Ionisation der Luft um einen Leiter)
- Bürstenentladung

Der dabei fließende Strom ist das Problem !

aufgrund $P = U \times I \text{ [W]}$ und $P = I^2 \times R$

Grundlagen #10

Entladekurve



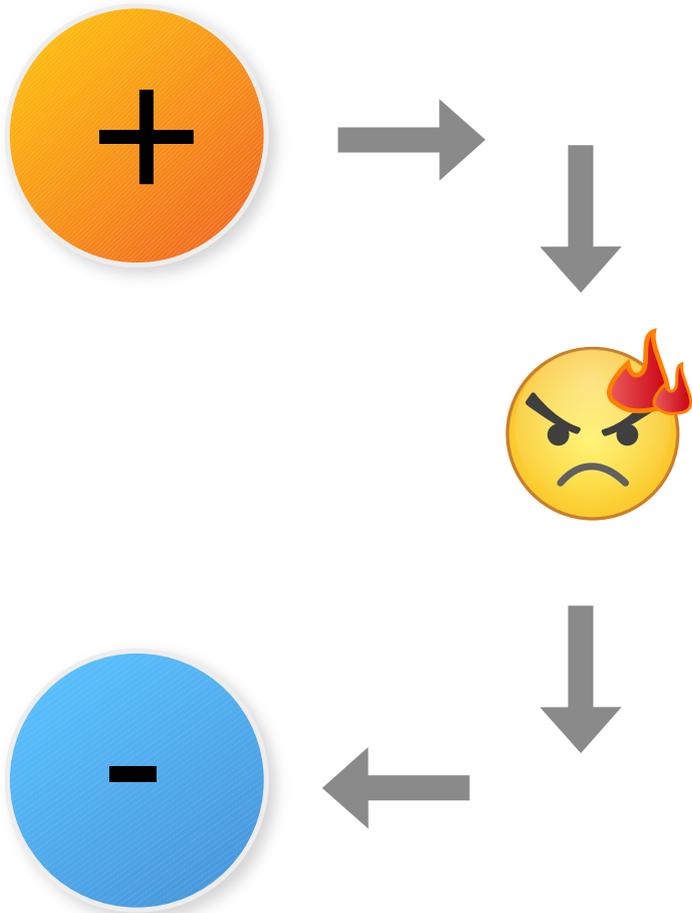
sofortige Zerstörung oder Schädigung von:

- Isolierschichten (Gate-Oxide)
- Metallisierungen
- Sperrschichten (Junction)

technische Stromrichtung

Grundlagen #11

Entladekurve



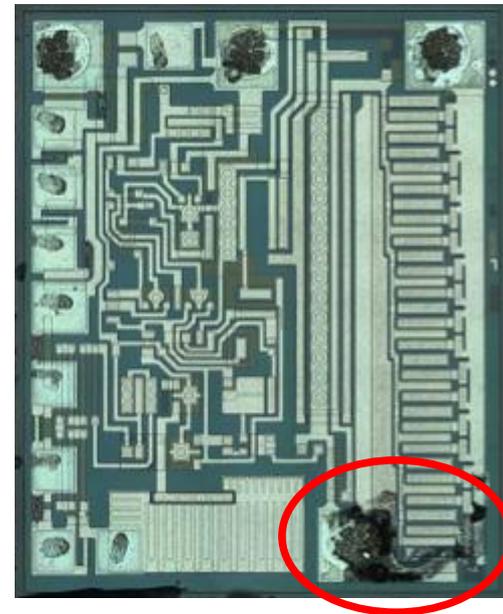
„mehrere Ampere x tausende Volt = tausende Watt“

Grundlagen #12

Entladekurve

Große Energiemenge wird mit hoher Spannung und hohem Strom über kurze **Zeit** frei !

Die Aussage „*hohe Spannung aber kleiner Strom*“ ist oberflächlich und falsch !



<https://i.stack.imgur.com/zxPRu.jpg>

Ursachen für ESD

- sich bewegende Personen
- sich bewegende Maschinen oder Teile davon
- rutschende Bauteile (Bauteilzuführungen, Verpackungen, ...)
- schlechte oder fehlende Erdung
- ungeschirmte Leitungen/Kabel (wg. Influenz)
- niedrige Luftfeuchtigkeit

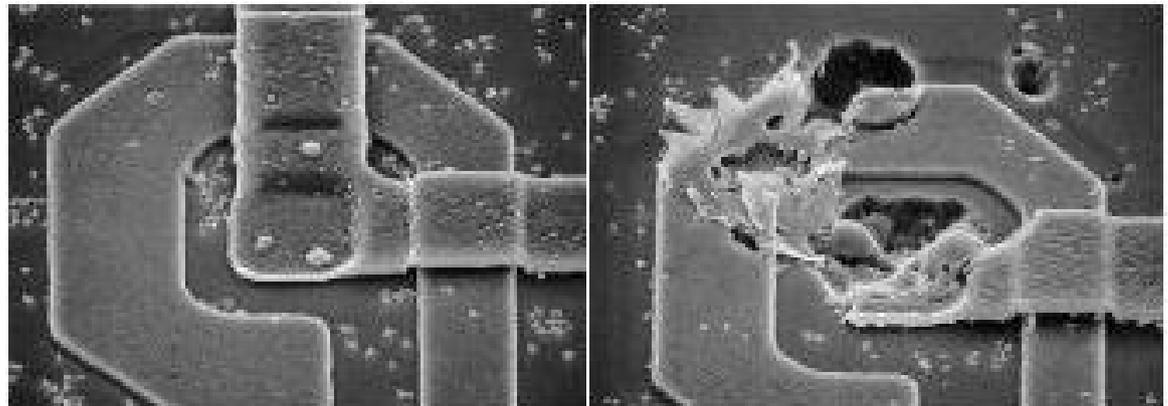
Auswirkungen #1

sofortige Zerstörung

engl. immediate

katastrophal (engl. catastrophic)

- ✖ permanenter Verlust einer Funktion
- ✖ wenig kostenintensiv
- ✖ Reparatur sofort möglich



Auswirkungen #2

latente/ruhende Schädigung

- ✦ Änderung eines Parameters (engl. parametric change)
- ✦ engl. walking wounded
- ✦ Auswirkungen treten verspätet (engl. delayed) auf
- ✦ zeitweise oder dauerhafte Ausfälle zu späterem Zeitpunkt
- ✦ nicht sofort feststellbar (keine praktische Methode bekannt)
- ✦ kostenintensiv

Beispiele:

- erhöhter Sperrstrom
- verringerte max. Sperrspannung.

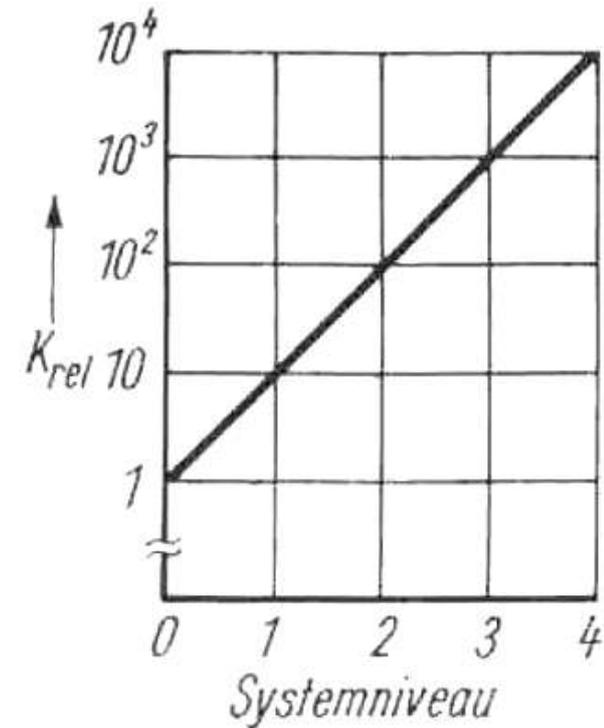
→ aber: Bauteilwerte noch innerhalb der Spezifikation !

Kosten für Reparaturen & Nacharbeit

Relative Kosten steigen mit Systemniveau !

- s = 0 Bauteil
- s = 1 Submodul
- s = 2 Modul
- s = 3 Gerät
- s = 4 Anlage

$$K_{rel} = 10^s$$



Quelle: Kärger, Reinhard: „Prüftechnik für elektronische Erzeugnisse“

Auswirkungen #3

vorübergehende Fehler in digitaler Signalverarbeitung

engl. upsets / transient errors

- hervorgerufen durch durch Funkenüberschläge in der Umgebung
- direkter Einschlag des Funkens: größter Schaden
- hochohmiges Design: kapazitive Kopplung
- niederohmiges Design: induktive Kopplung
- elektromagnetische Kopplung (Strahlung)
- Folge: Rechenfehler, Programmabstürze, Datenverlust ...
- Schaden ist nicht permanent und nicht direkt materiell

Größenordnungen #1

eine ESD von 2000 V → vom Menschen warnehmbar

menschl. Körper kann bis zu 25kV ESD erzeugen

Zerstörung von Bauteilen bereits bei ca. 5V !

	rel. Luftfeuchte (RH) 10..25%	rel. Luftfeuchte (RH) 65..90%
Laufen auf einem Teppich	35 kV	1,5kV
Laufen auf Vinyl	12kV	250V
Arbeit an Werkbank	6kV	100V
Aufheben einer Plastiktüte von einer Werkbank	20kV	1200V
Stuhl mit Polyurethan-Schaum gepolstert	18kV	1500V

Größenordnungen #2



ESD-kritische Bauteile nach MIL-STD-1686 (HBM)

Class 1: empfindlich gegenüber ESD Spannungen von 0 bis 1.999V

Class 2: empfindlich gegenüber ESD Spannungen von 2kV bis 3.999kV

Class 3: empfindlich gegenüber ESD Spannungen von 4kV bis 15,999kV

über 16kV → nicht kritisch

Trend zu kleinerer, schnellerer Elektronik

Anfälligkeit gegenüber ESD steigt !!!

Größenordnungen #3



ESDS Klassifizierung – HBM (nach ESD STM5.1-1998)

Klasse	Spannung Bereich [V]
0	< 250
1A	$250 < U < 500$
1B	$500 < U < 1000$
1C	$1000 < U < 2000$
2	$2000 < U < 4000$
3A	$4000 < U < 8000$
3B	$8000 \leq U$

Größenordnungen #4



ESDS Klassifizierung – MM (nach ESD STM5.2-1999)

Klasse	Spannung Bereich [V]
M1	< 100
M2	$100 < U < 200$
M3	$200 < U < 400$
M4	$400 \leq U$

ESDS Klassifizierung – CDM (nach ESD STM5.3.1-1999)

Klasse	Spannung Bereich [V]
C1	< 125
C2	$125 < U < 250$
C3	$250 < U < 500$
C4	$500 < U < 1000$
C5	$1000 < U < 1500$
C6	$1500 < U < 2000$
C7	$2000 \leq U$

Größenordnungen #5



Datenblätter von Bauteilen

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS⁽¹⁾

		VALUE	UNIT
Voltage	Supply	+7	V
	Signal input terminals ⁽²⁾	-0.3 to (V+) + 0.3	V
Current	Signal input terminals ⁽²⁾	±10	mA
	Output short-circuit ⁽³⁾	Continuous	mA
Temperature	Operating, T _A	-40 to +150	°C
	Storage, T _{stg}	-65 to +150	°C
	Junction, T _J	+150	°C
Electrostatic discharge (ESD) ratings	Human body model (HBM)	4000	V
	Charged device model (CDM)	1000	V
	Machine model (MM)	400	V

Quelle: Texas Instruments: Datasheet OPA333

Größenordnungen #6



Datenblätter von Bauteilen

Maximum Ratings (@ $T_A = +25^\circ\text{C}$, unless otherwise specified.)

Characteristic			Symbol	Value	Units
Drain-Source Voltage			V_{DSS}	20	V
Gate-Source Voltage			V_{GSS}	± 12	V
Continuous Drain Current (Note 5)	Steady State	$T_A = 25^\circ\text{C}$	I_D	3.47	A
		$T_A = 85^\circ\text{C}$		3.43	
Pulsed Drain Current (Note 6)			I_{DM}	20	A

SOT23



Quelle: DIODES incorporated: datasheet MOSFET DMG3420U

ESD kritische Bauteile



- Halbleiter (Transistoren, Dioden, LED, diskret und integrierte IC)
- MOS-Strukturen (NMOS, PMOS, CMOS)
- Widerstände (Dick- und Dünnschicht)
- piezoelektrische Quarze/Kristalle
- bestückte Leiterplatten, Baugruppen, Systeme, Ausrüstungen die obige Bauteile enthalten

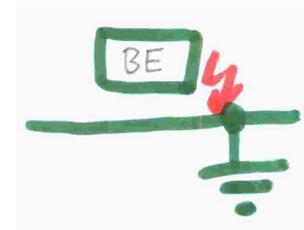
zu Fehlermoden und Indikatoren siehe MIL-HDBK-263B / Kap 50 / Seite 31

Wege der Entladung

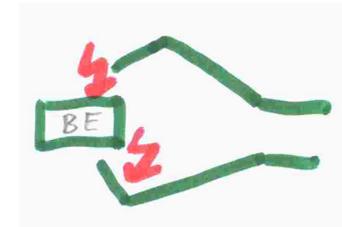
- geladene Person berührt Bauteil (HBM)



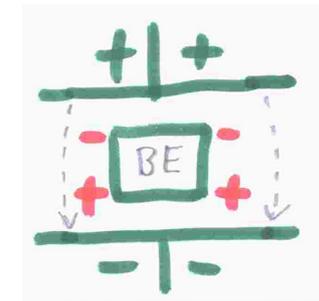
- geladenes Bauteil berührt eine geerdete Oberfläche (CDM)



- Maschine berührt geladenes Bauteil (MM)



- elektrisches statisches Feld induziert Spannung über einem Dielektrikum (FCDM)

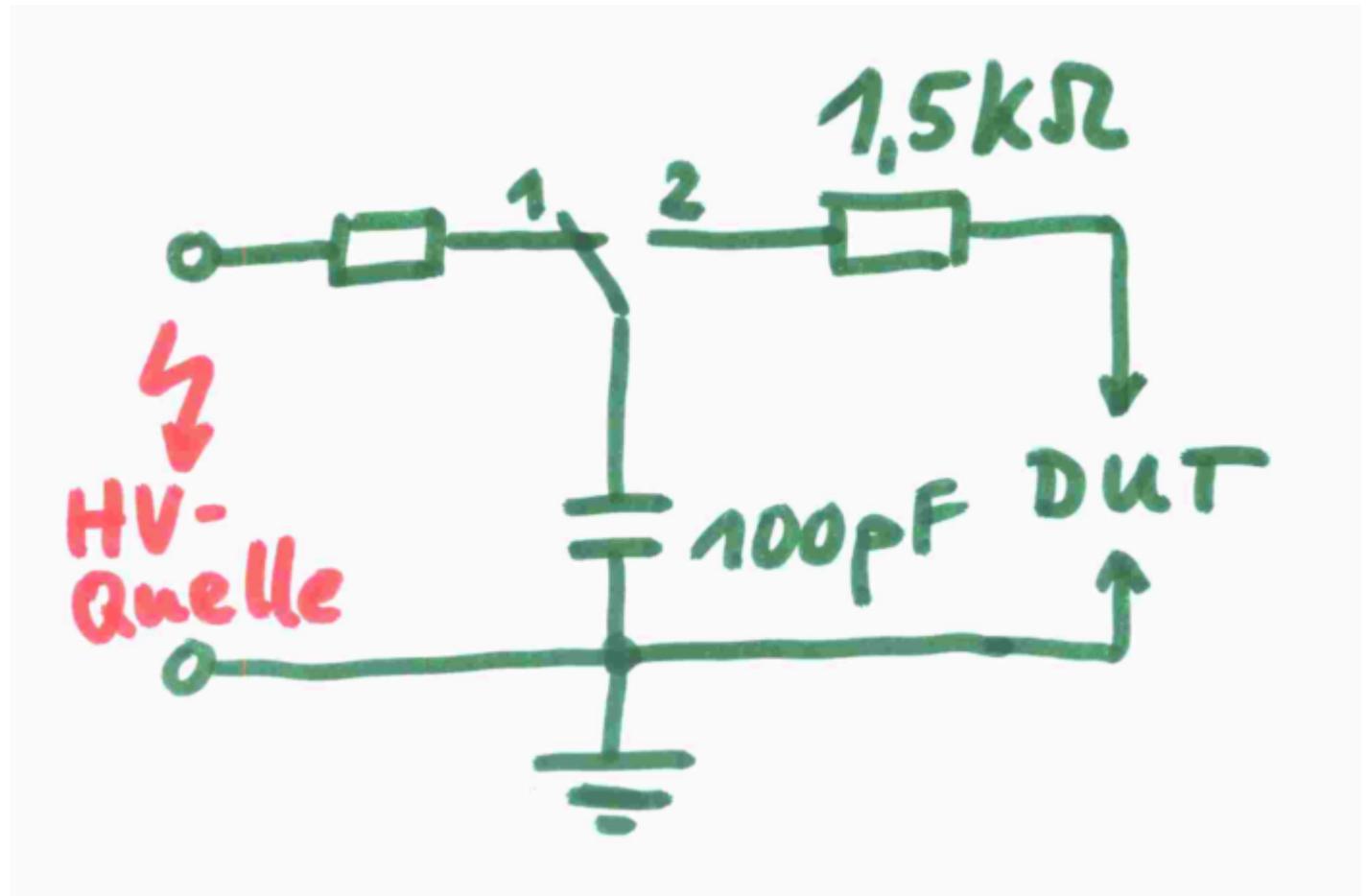


HBM – Human Body Model

HBM – Human Body Model (*MIL-STD-883 Method 3015*)

Simuliert die Entladung eines menschlichen Körpers in ein elektronisches Bauteil.

z.B. Laufen über Holz, Plastik, ... und anschließendes Berühren eines Bauteils



Ladung: $Q = C \times V$ [As]

Energie in einem
Kondensator:

$$E = \frac{1}{2} C \times V^2$$

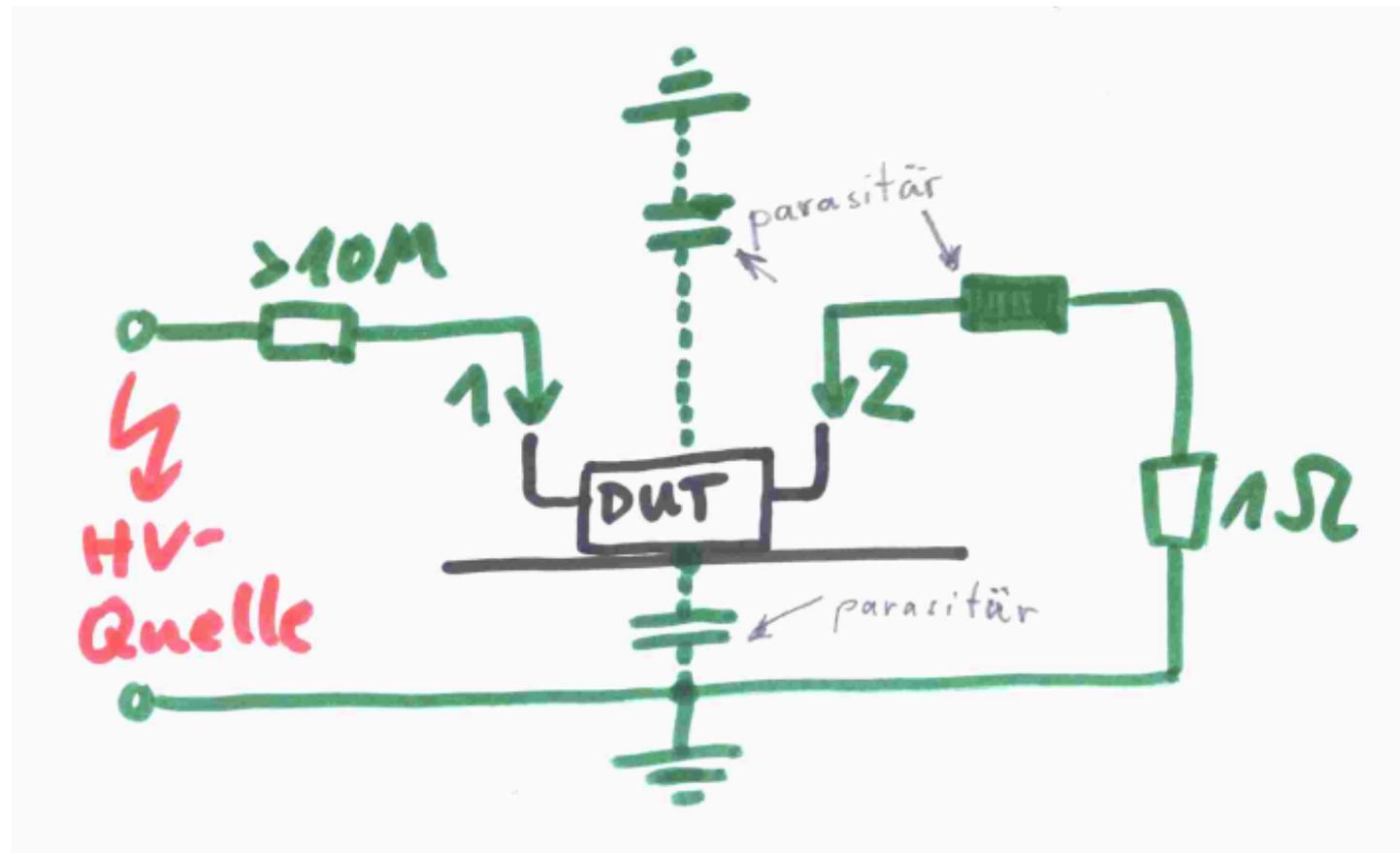
CDM – Charged Device Model

Simuliert die Ladung/Entladung eines elektronischen Bauteiles über einen seiner Anschlüsse (Pin/Pad) aus/in ein anderes Objekt.

- Rutschen entlang Bauteilzuführungen
- Rutschen/Vibrieren in Verpackungen (Transport)
- anschl. Kontakt mit Metalloberflächen

- Ladung sammelt sich an Pins/Pads oder Verpackung

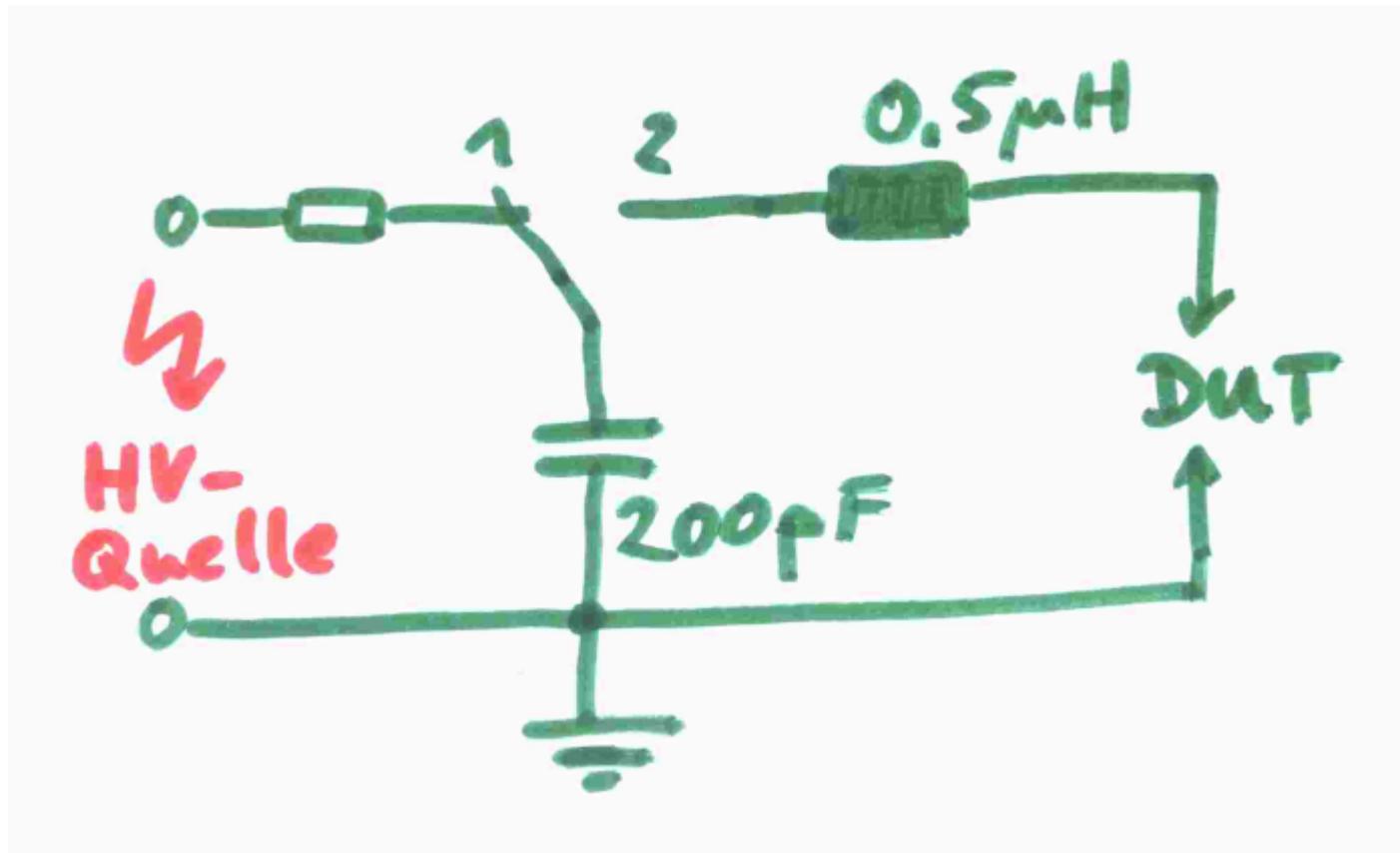
- Strom ist nur begrenzt durch parasitäre Kapazitäten/ Induktivitäten



MM – Machine Model

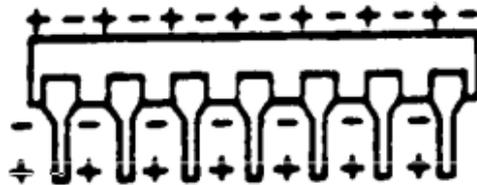
Simuliert die Entladung eines elektronischen Bauteiles über einen seiner Anschlüsse (Pin/Pad) in Teile einer Maschine.

- Rutschen entlang Bauteilzuführungen (Feeder)
- anschl. Kontakt mit Greifarm, Ansaugdüse, ...

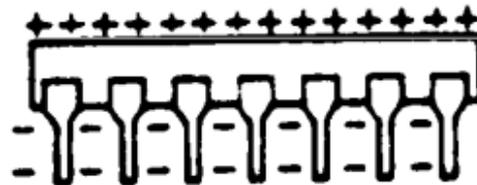


FCDM – Field induced Charged Device Model

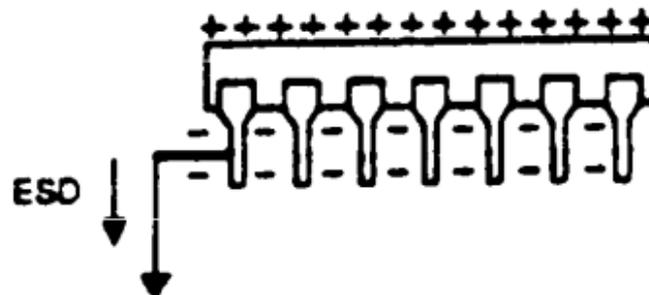
Simuliert ein elektrisch „schwimmendes“ Bauteil, welches in einem elektrischen Feld ausgesetzt wird und anschließend mit einem Objekt in Kontakt gebracht wird.



Uncharged DIP



DIP with immobile charge on body induces charge separation on lead frame.



ESD results when grounding lead frame. Device lead frame is now charged.

ESD Schutzmaßnahmen #1

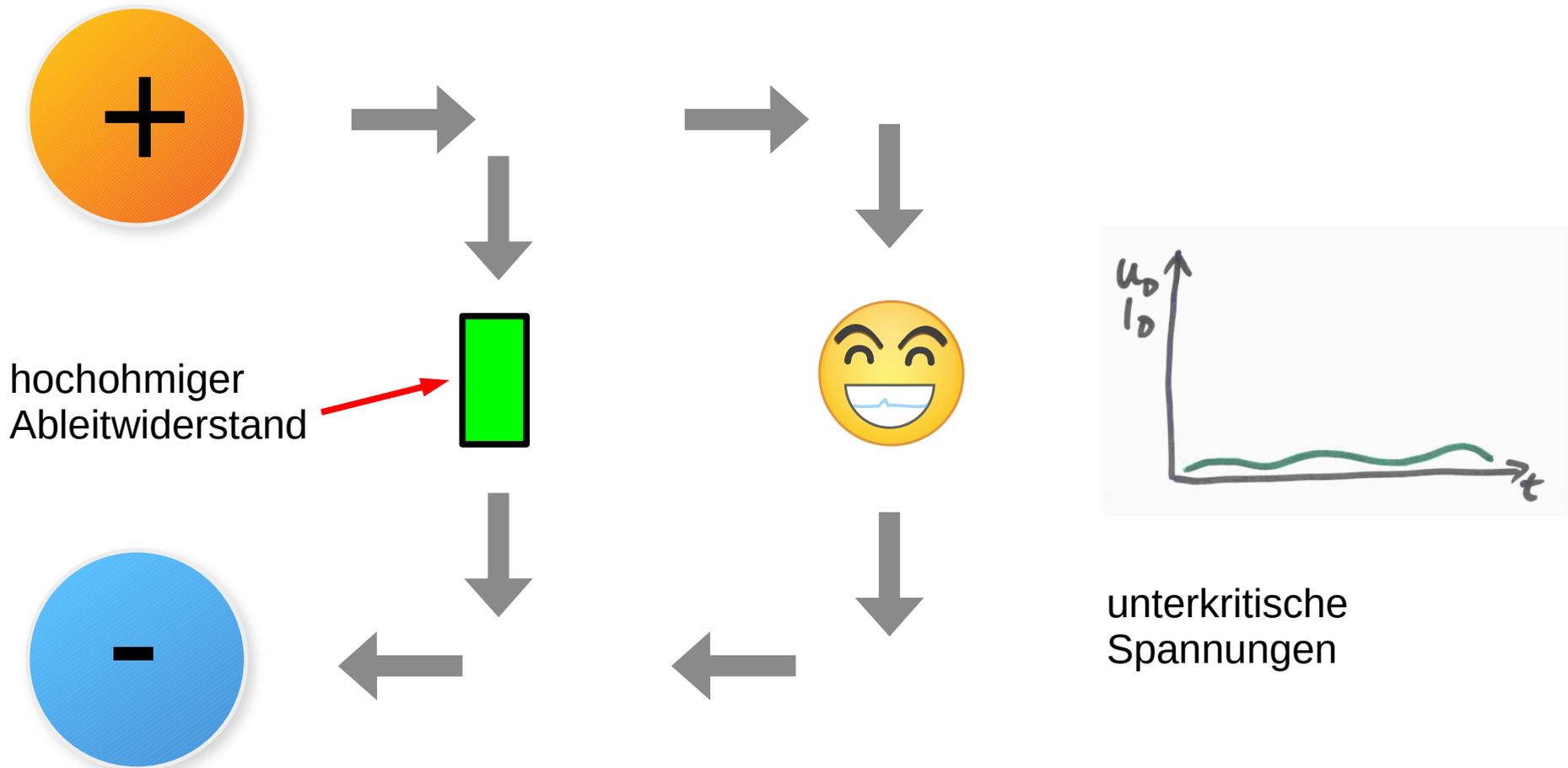
- ✓ ESD-immune Entwicklung
- ✓ Vermeidung von Aufladungen
- ✓ Vermeidung schneller Entladungen (hochohmige Ableitung)
- ✓ ionisierte Luft

- ✓ minimum Luftfeuchtigkeit (Film auf Oberflächen leitet Ladungen ab)
- ✓ isolierende Gegenstände entfernen
- ✓ geschützte Arbeitsbereiche oder Zonen (EPA)

- ✓ Management
- ✓ Training
- ✓ Audits

ESD Schutzmaßnahmen #2

Vermeidung von Aufladungen und schnellen Entladungen



ESD Schutzmaßnahmen #3



Vermeidung von Aufladungen und schnellen Entladungen



https://en.wikipedia.org/wiki/Antistatic_device

<https://www.elcomltd.com>

ESD Schutzmaßnahmen #4



Vermeidung von Aufladungen und schnellen Entladungen



<http://www.reeco.info>
0



<http://www.reeco.info>
0

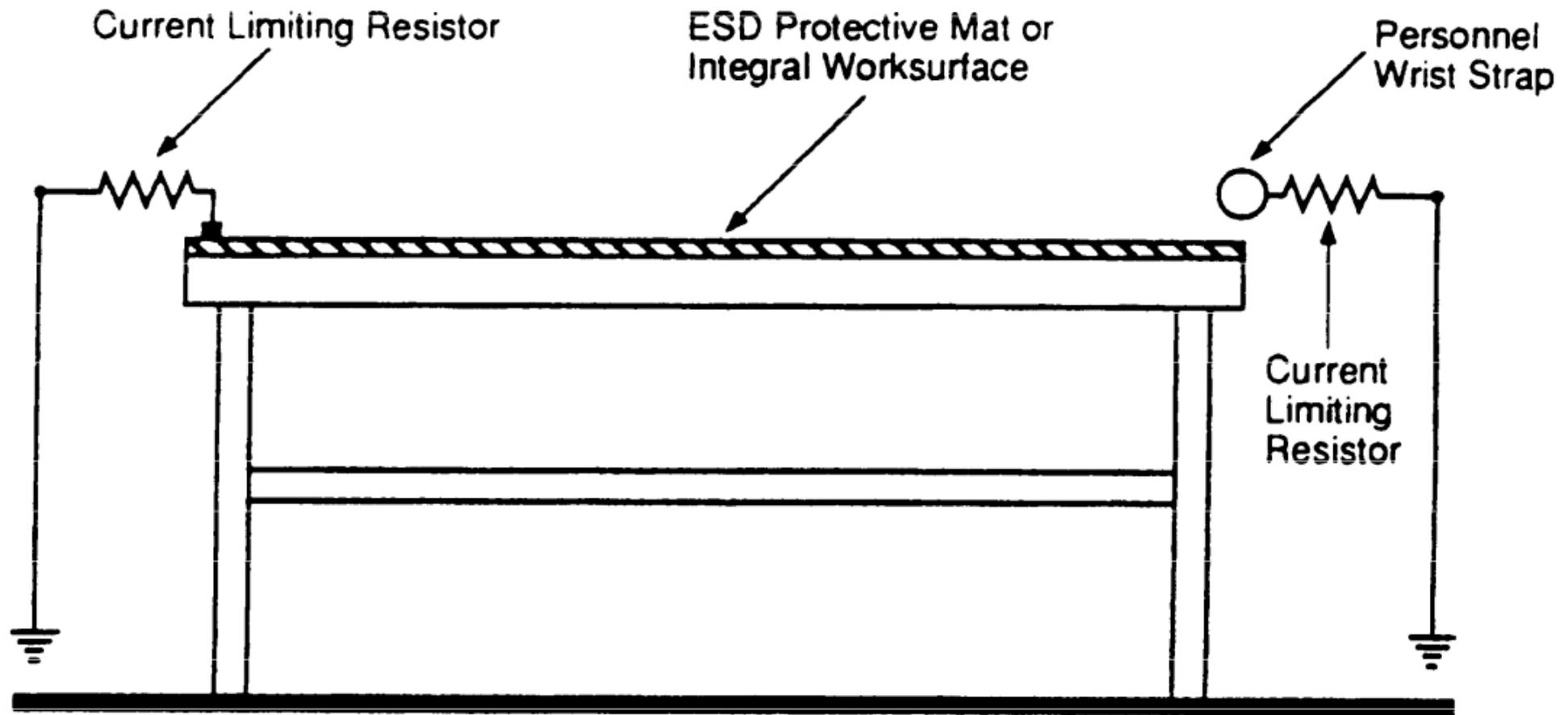


<https://www.antistat.co.uk>

ESD Schutzmaßnahmen #5



Vermeidung von Aufladungen und
schneller Entladungen



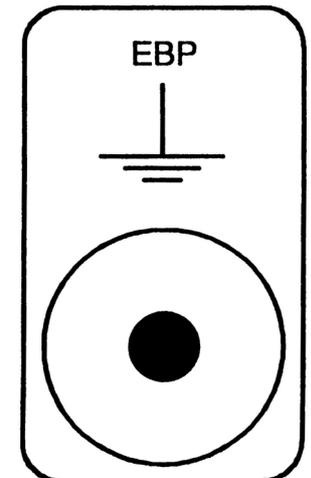
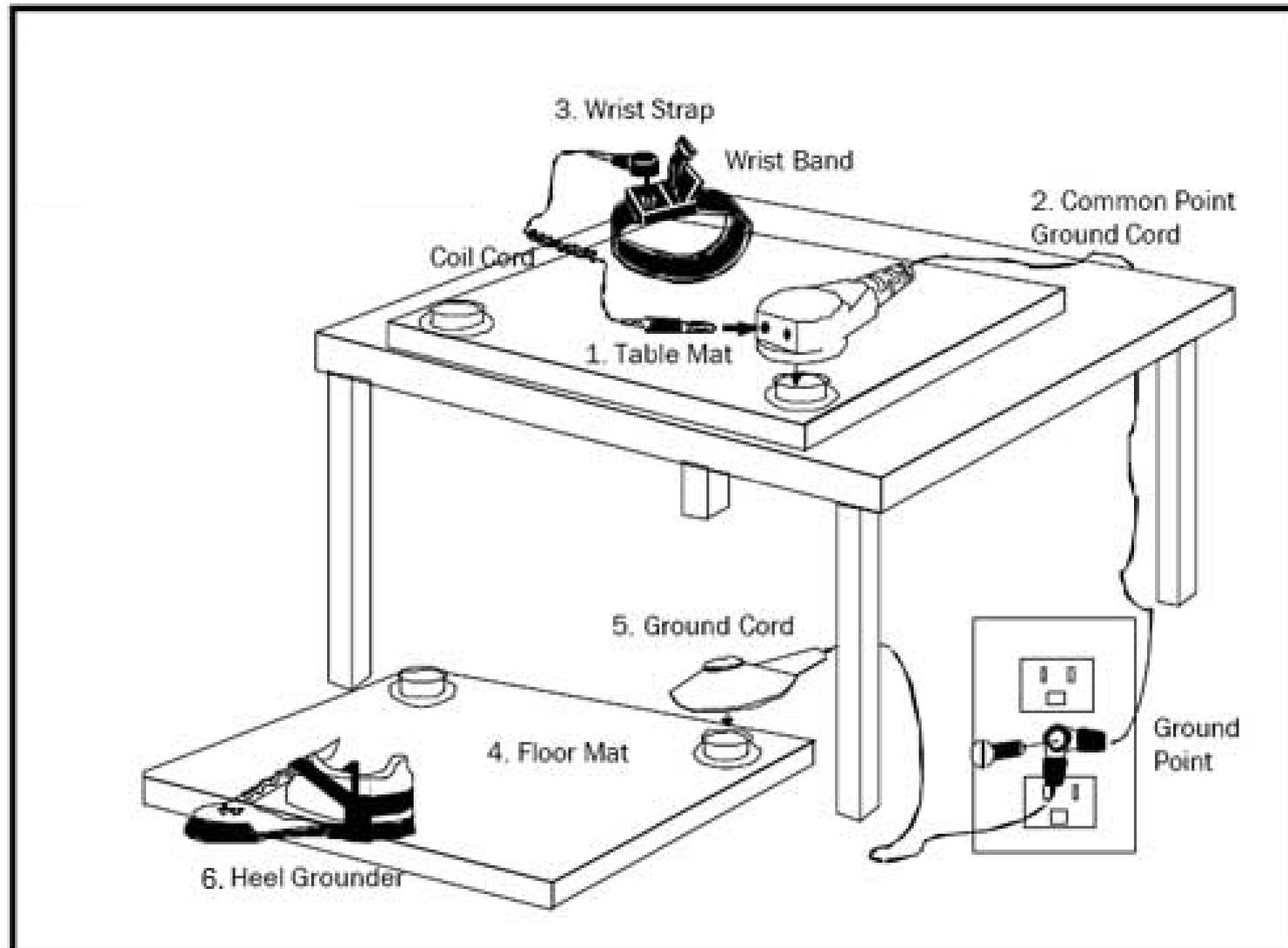
Note: ESD protective mat current limiting resistor optional

Quelle: MIL-HDBK-263B

ESD Schutzmaßnahmen #6



Vermeidung von Aufladungen und schnellen Entladungen



ESD Schutzmaßnahmen #7



Vermeidung von Aufladungen und
schnellen Entladungen



<http://www.reeco.info>



https://en.wikipedia.org/wiki/Antistatic_device

ESD Schutzmaßnahmen #8



Vermeidung von Aufladungen und
schneller Entladungen



<https://www.conrad.de>



<http://www.advancecaster.com>

ESD Schutzmaßnahmen #9

**Vermeidung von Aufladungen und
schnellen Entladungen**



<http://www.protectiveindustrialpolymers.com/esd-control-flooring/esd-flooring-work-need/>

ESD Schutzmaßnahmen #10



Vermeidung von Aufladungen und
schnellen Entladungen



<https://www.reichelt.de>

ESD Schutzmaßnahmen #11



**Vermeidung von Aufladungen und
schnellen Entladungen**



<https://www.tme.eu>

ESD Schutzmaßnahmen #12



**Vermeidung von Aufladungen und
schnellen Entladungen**



<https://www.auer-packaging.com>

ESD Schutzmaßnahmen #13



**Vermeidung von Aufladungen und
schnellen Entladungen**



<https://www.auer-packaging.com>

ESD Schutzmaßnahmen #14

Erhaltung einer minimalen Luftfeuchtigkeit



<https://www.condair.com>

ESD Schutzmaßnahmen #15

Ionisierung der Luft



<https://www.belenos.at>

ESD Schutzmaßnahmen #16



Entfernen von isolierenden Gegenständen

- Schachteln
- Tüten (Formulare, Anweisungen, ...)
- Klebebänder
- Flaschen
- ...

ESD Schutzmaßnahmen #17



Zonen / Arbeitsbereiche



https://printtec.nl/contents/en-uk/d539_ESD_Signaling.htm

Ein ESD geschützter Bereich besteht aus Werkzeugen, Materialien und Ausrüstung zur Minimierung elektrostatischer Aufladungen.

- dauerhaft
- zeitweilig / temporär

ESD Schutzmaßnahmen #18



Zonen / Arbeitsbereiche

Anforderungen an Sicherheit und Erdung

- Spannungen durch elektrostatische Aufladung begrenzen auf Schwelle der Wahrnehmbarkeit (2kV)
- Schutzerdung nach DIN VDE 0100
- FI-Schutzschalter

Werkzeuge, Materialien, Ausrüstung

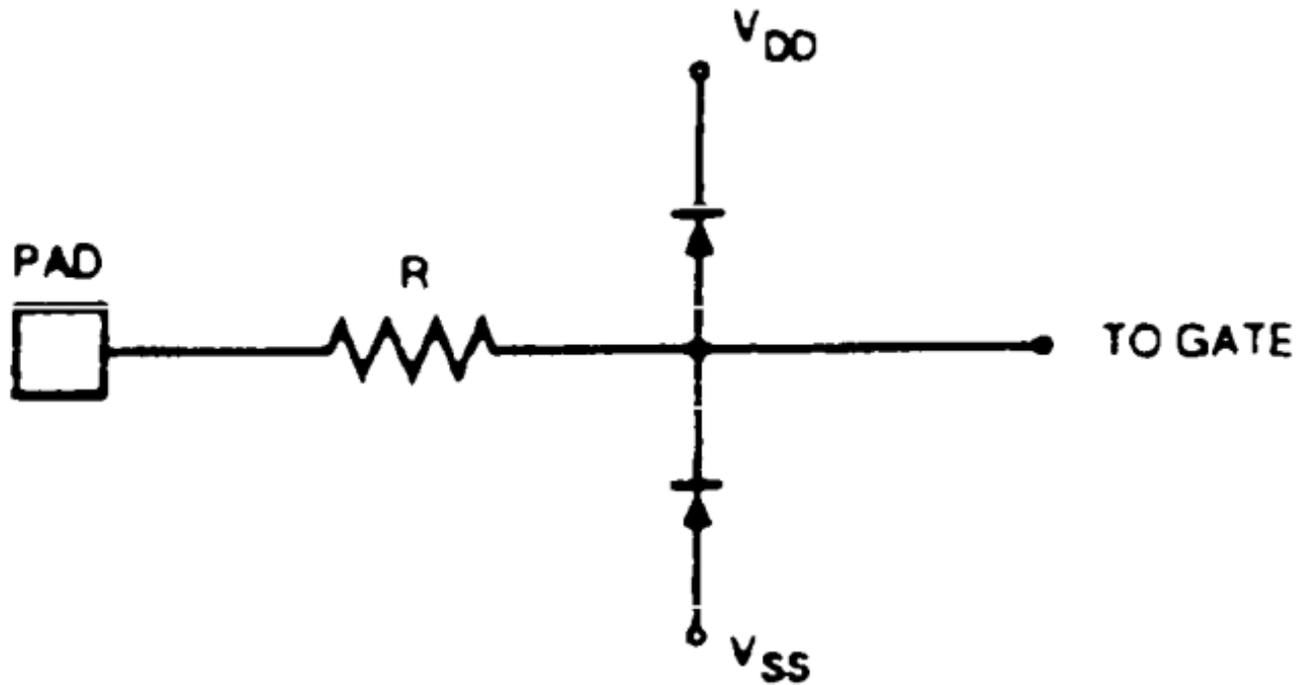
- ESD-Arbeitsplätze
- Ionisierung
- Fußböden
- Überwachung / Monitoring von Erdungsbändern, elektrische Felder

Arbeitsabläufe

- Zutritt nur nach Einweisung / Training
- Zertifizierung & Überwachung

ESD Schutzmaßnahmen #19

In der Entwicklung



Quelle: MIL-HDBK-263B

Standards & Normen



1. ANSI/ESD TR20.20-2016 – Handbook for the Development of an Electrostatic Discharge Control Program for the Protection of Electronic Parts, Assemblies, and Equipment Inhalt:
<https://www.esda.org/assets/Standards-ToC/ESD%20TR20.20-2016.pdf>
2. DIN EN 61340-5-1 VDE 0300-5-1:2017-07 – Elektrostatik Teil 5-1: Schutz von elektronischen Bauelementen gegen elektrostatische Phänomene – Allgemeine Anforderungen
3. <https://www.esda.org/>
4. MIL-STD-1686
5. MIL-HDBK-263B (Bauteile, Geräte, Ausrüstung)
6. MIL-STD-883K Method 3015 (Tests von Bauteilen → für BE-Hersteller)
7. IEC/EN 61000-4-2 (Tests von Bauteilen → für BE-Hersteller)
8. ANSI C63.16-1993 (Geräte, Ausrüstung)
9. ASTM F 1166 (Geräte und Systeme)
10. EIA RS-471 (Symbols & Labels)
11. IEEE STD C62.38-1994 (Geräte und Systeme)
12. IEC 801-2
13. JEDEC 22-A114-B

Meßtechnik #1

Tester für Armbänder und Schuhe
(Wrist Strap / Footwear Tester)

<http://documents.desco.com/pdf/tb-2040.pdf>



<https://shop.warmbier.com>

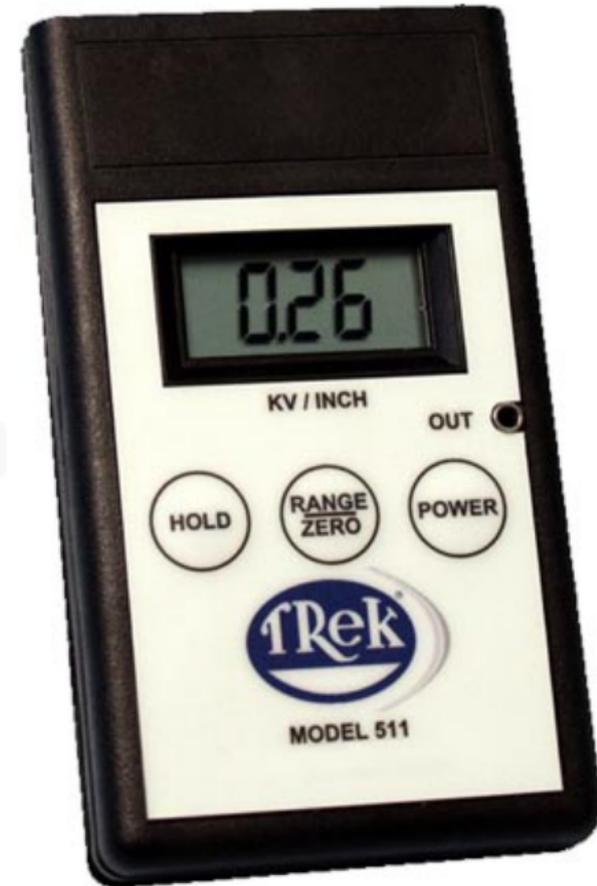
Meßtechnik #2

Elektrofeldmeter

zur Messung statischer elektrischer Felder



<https://www.belenos.at>



<http://www.acalbfi.com>

Meßtechnik #3

Charged Plate Monitor (CPM)

zur Messung der Wirksamkeit von Ionisatoren



<http://www.acalbfi.com>

Meßtechnik #4

Hoch-Ohmmeter + Elektroden (10^5 .. 10^{11} Ohm)

zur Messung des Widerstandes von
Oberflächen (Matten, Fußböden, Bekleidung, ...)



Meßtechnik #5

Schutzmaßnahmen-Prüfgerät

zur Messung der Impedanz
von PE-Verbindungen



weitere:

- Entlade-Simulator
- ESD-Event-Detector

<https://www.elektro4000.de>

Management #1

Grundlegende Prinzipien



1. ESD sicheres Design → Entwicklung
2. Festlegung des Höhe der max. Gefährdung (BE-
Hersteller konsultieren)
3. Festlegung der elektrostatisch geschützten Bereiche
(EPA)
4. Eliminierung und Reduzierung von Ladungen
5. Ableiten / Neutralisieren von Ladungen
6. Produkte schützen

Management #2

Elemente eines ESD Schutzprogrammes

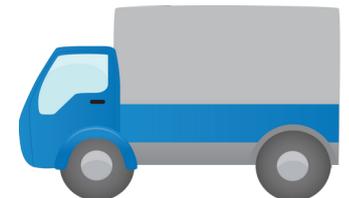
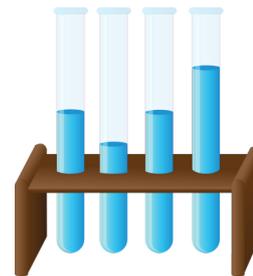
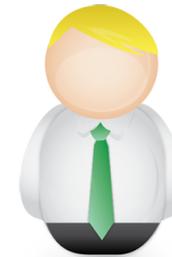


1. ESD Koordinator / Team
2. Beurteilung der Firma, Fabrik, Prozesse und Verluste
3. Aufstellung und Dokumentieren des ESD-Schutzprogrammes
4. Unterstützung von Geschäftsführung / Management
5. Aufstellung eines Trainingsplanes
6. Aufstellung eines Planes zur Verifizierung der Konformität

Management #3

Betroffene Bereiche

- Wareneingang
- Wareneingangskontrolle
- Lager
- Montage / Bestückung
- Prüffeld / Reparatur
- Forschung & Entwicklung (R&D)
- Verpackung
- Service / Reparatur
- Büros und Labore
- Reinräume



Management #4

Prozesse, Materialien und Handlungen

- ☑ Personal
- ☑ bewegbare Ausrüstung (Rollen, Wagen, Gabelstapler, ...)
- ☑ Armbänder
- ☑ Fußböden (Matten, Beschichtungen, ...)
- ☑ Schuhe (Erdungsbänder)
- ☑ Bekleidung
- ☑ Arbeitsplätze
- ☑ Oberflächen von Werkbänken, Labortischen, ...
- ☑ Verpackungen
- ☑ Verpackungsvorgänge
- ☑ Ionisation
- ☑ Erdung (Schutzerdung, ESD-Erdung)
- ☑ Ausrüstung für Produktion (Anlagen, Maschinen, ...)
- ☑ Werkzeuge (LötKolben, Halterungen, ...)
- ☑ Beschriftungen (Aufkleber, Bedruckungen, ...)

- ☑ Beschaffung von Spezifikationen, Standards, Normen, ...
- ☑ Prozeduren und Spezifikationen für ESD-Management
- ☑ ESD-Meßtechnik
- ☑ Training für Personal
- ☑ Spezifikationen und Zeichnungen für Entwicklung



Siehe auch MIL-HDBK-263B,
Seite 27

Management #5

Checkliste Teil 1/2

	Audit Frage	J	N	Bemerkungen
1.	Auf ESD geschützten Fußböden: Werden ableitende Schuhe oder Erdungsbänder getragen ?			
2.	Auf ESD geschützten Fußböden: Überprüft Personal korrekte Erdung vor Zutritt zur EPA ?			
3.	An ESD geschützten Arbeitsplätzen: Trägt Personal ESD gerechte Armbänder ?			
4.	Werden Armbänder & Verbindungsleitungen geprüft ? (Intervalle / permanent)			
5.	Korrektur Sitz von Armbändern und Erdungsbändern (an Schuhen)			
6.	Korrekte Funktion von Armbändern und Erdungsbändern (an Schuhen)			

Management #6

Checkliste Teil 2/2

	Audit Frage	J	N	Bemerkungen
7.	Werden Einmal-ESD-Schuhe nur einmal verwendet ?			
8.	Werden Meßwerte von Armbändern und Erdungsbändern aufgezeichnet ?			
9.	Wenn ESD geschützte Bekleidung gefordert, wird diese korrekt getragen ?			
10.	Werden unwichtige persönliche Gegenstände aus EPA entfernt oder nicht in die EPA hinein gelassen ?			
11.	Wird Personal in der EPA zertifiziert oder begleitet ?			
12.	Wird Personal mit Zutritt zur EPA geschult ?			
13.	Werden ESD-Bestimmungen auch auf Besucher angewandt ?			

Links



PCB Herstellung:

www.jlp.de



Entwicklung und Bestückung von Kleinserien:

www.blunk-electronic.de





Danke für Ihre Aufmerksamkeit !

