

## 103 | Wirkungen des elektrischen Stromes auf Menschen und Nutztiere

Sie wissen bereits: Eine "Vornorm" ist das "Ergebnis einer Normungsarbeit, das aus DIN-internen Gründen (noch) nicht als Norm herausgegeben wird". Ist man nicht ganz sicher, will aber doch nicht länger warten, gibt man eine Vornorm heraus. Eine solche **Vornorm** ist die VDE V 0140-479-1 vom Mai 2007. Sicher ist das eine sehr wichtige Norm. Es geht dabei "um Leben oder Tod".

### 1 Einführung

Mai 2007

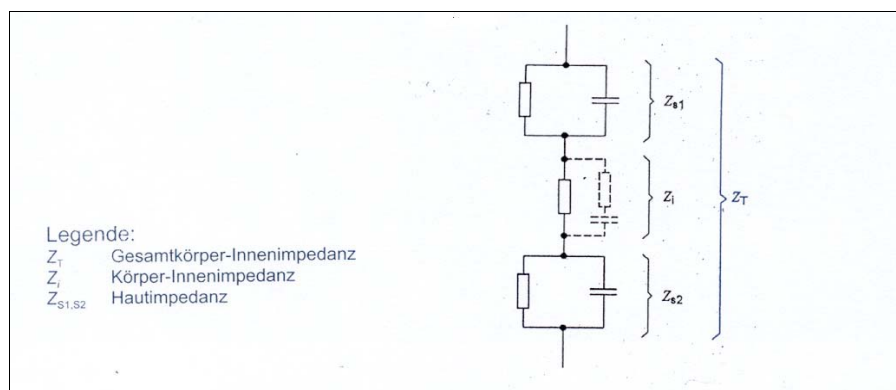
**DIN IEC/TS 60479-1 (VDE V 0140-479-1)**

**DIN und VDE**

**Wirkungen des elektrischen Stromes auf Menschen und Nutztiere - Teil 1: Allgemeine Aspekte**

*Effects of current on human beings and livestock  
Part 1: General aspects*

Diese TS (**Technische Spezifikation**) gilt für die Grenzen des Herzkammerflimmerns (siehe **Bild 1 (17/18)**), das der Hauptgrund für den Tod durch elektrischen Strom ist. Sie gibt Informationen über die Körperinnenimpedanz und Schwellenwerte für den Körperstrom für verschiedene physiologische Wirkungen. Man kann damit gewisse Schätzungen für Schwellenwerte von Berührungsspannungen für Wechselstrom und Gleichstrom bei bestimmten Stromwegen im Körper, der Feuchtigkeitszustände von Kontaktflächen sowie Kontaktflächen verschiedener Größen ableiten.



**Bild 1(1):** Die Impedanzen des menschlichen Körpers

Hinweis: Die in Klammern gesetzte Zahl nach der Bild- bzw. Tabellenummer, z.B. (1), ist der Verweis auf die Original-Bild- bzw. Tabellenummer in der Norm.

#### Für schnelle Leser:

Wichtige **Änderungen** gegenüber der vorausgegangenen Vornorm von 1966-02:

- Für eine **Durchströmungsdauer** länger als eine Herzperiode zeigt Bild (19) einen Vergleich der Schwellen von Herzkammerflimmern aus Tierversuchen - für Menschen berechnet.
- In Bild (16) werden **Oszillogramme** von  $U_T$  und  $I_T$  gezeigt und erläutert.
- Bild (19) zeigt **Flimmerdaten** von Tieren.
- Bild (20) zeigt, dass die **Grenzwertlinie** von 10 mA auf 5 mA **geändert** wurde,
- Bild (23) zeigt die **Loslassströme** für  $f = 60$  Hz
- Es wurde ein **Herzstromfaktor**  $F$  (siehe bei "Begriffe") eingeführt.

Die in Klammern stehenden Zahlen bei den Bildern und Tabellen sind Hinweise auf die Original-Nummern der Norm.

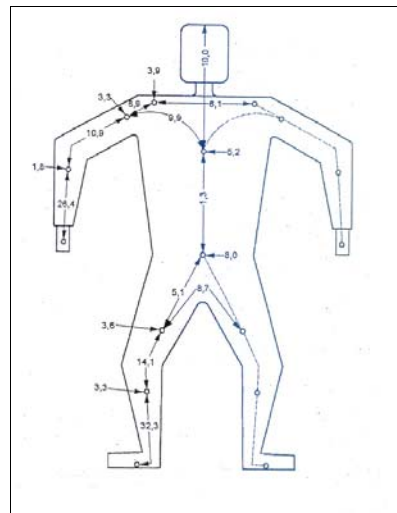
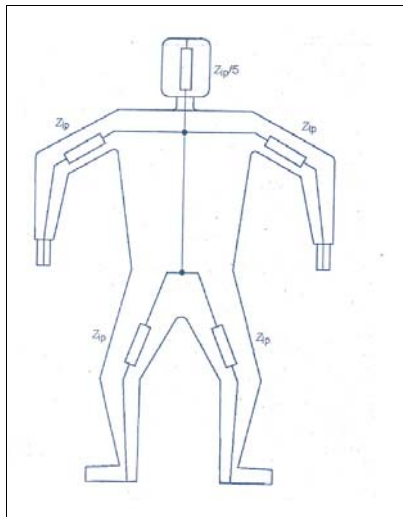
Hinweis: Bildquellen: VDE V 0140-479-1 (siehe Norm).

Für den Weg des elektrischen Stromes durch den menschlichen Körper hängt die Gefahr für Personen hauptsächlich von der Größe und Dauer des Stromflusses ab. Jedoch sind die Zeit-Stromstärke-Bereiche **6 (20) und 7 (22)** in der Praxis nicht direkt auf die Bemessung des Schutzes gegen elektrischen Schlag anwendbar. Das notwendige Kriterium ist vielmehr die **zulässige Grenze der Berührungsspannung**, also das Produkt aus dem Berührungsstrom und der Körperimpedanz als eine Funktion der Zeit.

Weil sich die Impedanz (Scheinwiderstand)  $Z$  des menschlichen Körpers mit der Berührungsspannung ändert, ist die Beziehung zwischen Strom und Spannung nicht linear. Das leuchtet ein: Die verschiedenen Teile des menschlichen Körpers wie Haut, Muskeln oder Blut bieten dem durchfließenden Strom eine unterschiedlich große Impedanz an, welche aus ohmschen und kapazitiven Komponenten besteht. Der Höhe dieser Impedanzen hängt insbesondere vom Stromweg, Berührungsspannung, Dauer des Stromdurchflusses, Frequenz, Feuchtigkeitsgrad der Haut, Größe der Berührungsfläche, dem ausgeübten Druck und der Temperatur ab.

Für Stromwege von Hand zu Hand oder von einer Hand zu einem Fuß befindet sich die Impedanz hauptsächlich in den Extremitäten, d.h. in den Armen und Beinen. Vernachlässigt man die Impedanz des Körperrumpfes, ergibt sich **Bild 2 (3) und 3 (2)**.

Anmerkung: Die Körperinnenimpedanz von einer Hand zu beiden Füßen beträgt etwa 75 %, von beiden Händen zu beiden Füßen 50 % und von beiden Händen zum Rumpf 25 % der Impedanz von Hand zu Hand oder von einer Hand zu einem Fuß.



Legende:

$Z_{ip}$  innere Teilimpedanz einer Extremität (Arm oder Bein)

**Bild 2 (3):** Vereinfachte Schaltung der Innen-Impedanzen des menschlichen Körpers  
Bild-Quellen für beide Bilder: DIN VDE V 0140-479-1

**Bild 3 (2):** Innen-Teilimpedanzen  $Z_{ip}$  des menschlichen Körpers

Hinweis: Die Daten stammen hauptsächlich aus Tierversuchen, aber auch aus klinischen Untersuchungen. Nur wenige Untersuchungen fanden an lebenden Personen statt. Jedoch: Die

Daten **stammen von der sicheren Seite**, d.h. man kann sich auf sie (wohl; Anm.d.R.) verlassen. Es gibt ferner Gesichtspunkte, die beachtet werden müssen, z.B. die Wahrscheinlichkeit von Fehlern, die aus der Berührung fehlerhafter Teile oder aus dem Verhältnis von Berührungsspannung zu Fehlerspannung stammen sowie Gedanken zur Wirtschaftlichkeit und der technischen Machbarkeit.

## 2 Bemerkungen zur Anwendung

Die Gefahr für Personen hängt bei gegebenem Strom vor allem von der Größe und Dauer des Stromweges ab. Weiter sind notwendiges Kriterium die zulässige Grenze der Berührungsspannung  $U_L$  (Produkt aus dem Berührungsstrom und der Körperimpedanz als Funktion von der Zeit). Die verschiedenen Teile des menschlichen Körpers wie Haut, Blut, Muskeln und Gelenke, bieten dem elektrischen Strom eine gewisse Impedanz, bestehend aus ohmschen und kapazitiven Komponenten. Der Wert dieser Impedanzen hängt wie oben angeführt, ab u.a. vom Stromweg, der Berührungsspannung, der Dauer des Stromflusses, der Frequenz, dem Grad der Feuchte der Haut, der Größe der Berührungsfläche, dem ausgeübten Druck und der Temperatur.

Unfälle mit **Gleichstrom** sind seltener, als eigentlich zu erwarten wäre. Tödliche Unfälle treten ganz selten auf, beispielsweise in Bergwerken. Das hat als Ursache, dass man eine Gleichstromleitung leichter loslassen kann als eine Wechselstrom-Leitung.

Unfälle mit **Wechselstrom** beziehen sich vor allem auf Anlagen, die im Frequenzbereich von 50 bis 60 Hz arbeiten. Als Hauptgrund für die tödlichen Folgen einer Berührung unter Spannung wird das **Herzkammerflimmern** angesehen.

## 3 Begriffe (Auswahl)

**Gesamtkörperimpedanz  $Z_i$**  (Widerstand bei Wechselstrom)

vektorielle Summe der Körperinnenimpedanz **und der Hautimpedanzen**.

Die Gesamtkörperimpedanz besteht aus ohmschen und kapazitiven Komponenten.

**Gesamtkörperwiderstand  $R_T$**  (Widerstand bei Gleichstrom)

Summe des Körperinnenwiderstandes und der Hautwiderstände.

**Gleichstrom-Wechselstrom-Gleichwertigkeitsfaktor  $k$**

Verhältnis des Gleichstroms zu dem entsprechenden Effektivwert des Wechselstromes, der die gleiche Wahrscheinlichkeit hat, Herzkammerflimmern auszulösen.

**Hautimpedanz**

Impedanz  $Z_s$  zwischen einer auf der Haut aufliegenden Elektrode und dem darunter liegenden leitfähigen Gewebe.

Die Hautimpedanz sinkt mit steigender Frequenz.

**Herzstromfaktor  $F$**

Verhältnis der elektrischen Feldstärke (Stromdichte) im Herzen bei einem gegebenen Stromweg zur elektrischen Feldstärke (Stromdichte) im Herzen, die beim Stromweg linke Hand zu den Füßen auftritt

**Körperinnenimpedanz**

Impedanz  $Z_i$  zwischen zwei Elektroden in Berührung mit zwei Teilen des menschlichen Körpers bei **Vernachlässigung der Hautimpedanz**.

Die Körperinnenimpedanz besteht aus kleinen Kapazitäten.

**Längsdurchströmung**

Strom, der längs durch den menschlichen Körper fließt, z.B. von einer Hand zu den Füßen.

**Loslassschwelle**

Maximalwert des Berührungstromes, bei dem eine Person, die die Elektroden hält, noch loslassen kann.

**Querdurchströmung**

Strom, der quer durch den menschlichen Körper fließt, z.B. von einer Hand zur anderen Hand.

**Reaktionsschwelle**

Minimalwert des Berührungstromes, der unbeabsichtigte Muskelkontraktionen bewirkt.

**Schwelle des Herzkammerflimmerns**

Minimalwert des Berührungstromes, der Herzkammerflimmern bewirkt.

**Strom**

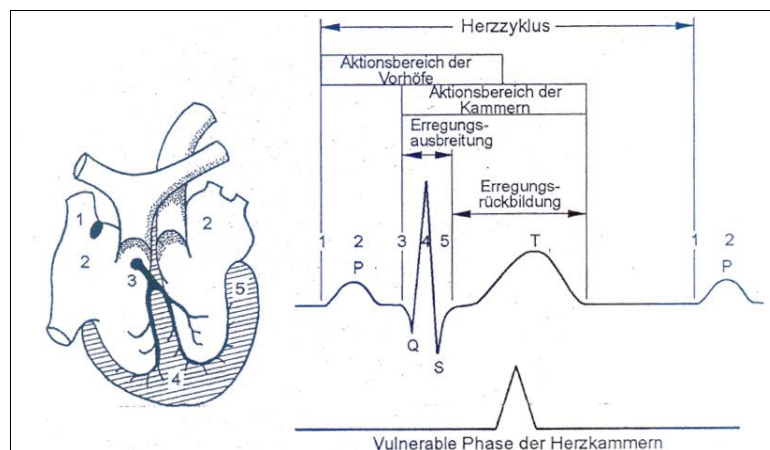
-, **abfallender**: Berührungsgleichstrom durch den menschlichen Körper, bei dem an den Füßen *negative Polarität* ist;

-, **aufsteigender**: Berührungsgleichstrom durch den menschlichen Körper, bei dem an den Füßen *positive Polarität* ist.

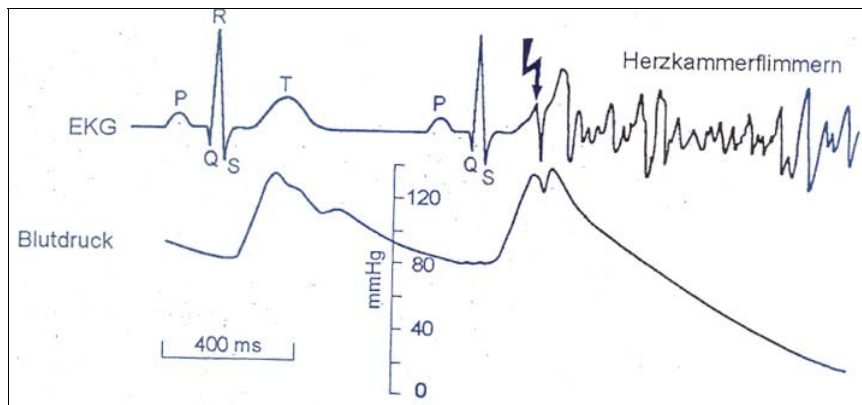
**Vulnerable Phase**(siehe Bild 4 (17))

überdeckt einen verhältnismäßig kleinen Teil des Herzzyklus, bei dem sich das Herz in einem inhomogenen Zustand der Erregbarkeit befindet, wenn es durch einen Strom genügender Größe erregt wird.

Die vulnerable Phase umfasst etwa 10 % der Zeit eines Herzzyklus und entspricht dem ersten Teil der T-Welle.; *vulnerabel* = verletzlich, verwundbar.



**Bild 4 (17):** Auftreten der vulnerablen Phase der Herzkammern während eines Herzzyklus  
Hinweis: Die Zahlen geben die aufeinander folgenden Abschnitte der Erregungsausbreitung an.



**Bild 5 (18):** Auslösen von Herzrhythmusstörungen in der vulnerablen Phase (Blutdruck und EKG)

### Wahrnehmbarkeitsschwelle

Minimalwert des Berührungsstromes, der von einer durchströmten Person noch wahrgenommen wird.

### Zustand der Haut

- , **trockener**: Zustand der Haut im Bereich der Berührungsfläche einer ruhenden Person unter normalen Bedingungen wie Feuchtigkeit;
- , **salzwassernasser**: Zustand der Haut im Bereich der Berührungsflächen nach Eintauchen in eine 3%ige NaCl-Lösung (mittlerer spezifischer Widerstand  $\rho$  (rho) = 30  $\Omega$ cm, pH = 7 bis 9) für die Dauer einer Minute;
- , **wassernasser**: Zustand der Haut im Bereich der Berührungsfläche nach dem Eintauchen in Wasser der öffentlichen Wasserversorgung (mittlerer spezifischer Widerstand (rho) = 33.500  $\Omega$ cm, pH = 7 bis 9) für die Dauer einer Minute.

## 4 Elektrische Impedanzen des menschlichen Körpers

Die Prinzipschaltung der Impedanzen des menschlichen Körpers zeigt **Bild 3 (1)**. Ihr Wert hängt von mehreren Faktoren ab, nämlich vom

- Stromweg,
- Berührungsspannung,
- Frequenz,
- Berührungsdauer,
- ausgeübtem Druck,
- Temperatur,
- Feuchtigkeitszustand der Haut und
- Größe der Berührungsfläche.

Man unterscheidet bei den Impedanzen Anfangswiderstand  $Z_0$ , Körper-Innenimpedanz  $Z_i$ , Teil-Impedanz  $Z_p$ , Haut-Impedanz  $Z_h$  und Gesamtkörper-Impedanz  $Z_T$

### 4.1 Körper-Innenimpedanz $Z_i$

Man kann davon ausgehen, dass die Körper-Innen-Impedanz überwiegend *ohmsch* ist. Ihre Werte hängen in erster Linie vom *Stromweg*, aber weniger von der Größe der Berührungsfläche ab. Bild 3 zeigt die prozentualen Anteile der Körper-Innenimpedanz des betreffenden Körperteils im Verhältnis zum Stromweg von einer Hand zu einem Fuß; (Bild-Quelle: DIN VDE V 0140-479-1)

## 4.2 Hautimpedanz $Z_S$

Die Hautimpedanz ist ein Netzwerk aus ohmschen Widerständen und Kapazitäten. Sie hängt von der Spannung, Frequenz, Durchströmungsdauer, Berührungsfläche, Kontaktdruck, Grad der Feuchte der Haut und dem Hauttyp ab. Sie sinkt mit steigender Frequenz, ebenso bei steigender Berührungsspannung.

## 4.3 Gesamtkörperimpedanz $Z_T$

Die Gesamtkörperimpedanz besteht aus ohmschen und kapazitiven Elementen, wobei die Hautimpedanz mit steigender Berührungsspannung sinkt und vernachlässigt werden kann, wenn die Haut durchschlagen wird. **Bild 3** zeigt die Stromwege von Hand zu Hand oder einer Hand zu einem Fuß, wobei die Impedanzen sich nicht im Rumpf, sondern hauptsächlich in den Extremitäten (Hand, Fuß) befinden.

Die Impedanz des Rumpfes ist im Bild 3 vernachlässigt. Die Zahlen geben den prozentualen Anteil der Körper-Innenimpedanz  $Z_i$  des betreffenden Körperteils im Verhältnis zum Stromweg von einer Hand zu einem Fuß an. Im Bild sind auch die Impedanzen der Haut an den Berührungsflächen angegeben (3,3 bzw. 3,6  $\Omega$  beim rechten Fuß der Person), die ggf. dazuaddiert werden müssen.

Die Gesamtkörperimpedanz von Bild 3 ist dann (Hand zu Fuß, Werte in  $\Omega$ ):

$$Z_T = 32,3 + 14,1 + 5,1 + 1,3 + 9,9 + 10,9 + 26,4 + (1,8 + 3,3 \Omega) = 105,1 \Omega; \text{ gerundet } 100 \Omega$$

## 4.4 Der Anfangswiderstand $R_T$

Wichtige Ergebnisse:

- Bei einem Stromweg von Hand zu Hand oder Hand zu Fuß und bei großen Berührungsflächen ist der Anfangswiderstand  $R_T$  bei Wechselstrom und Gleichstrom etwa 50  $\Omega$ . Die Werte hängen nur wenig von den Berührungsflächen und vom Zustand der Haut ab.
- Tritt die Berührungsspannung in Aktion, sind die Kapazitäten des menschlichen Körpers noch nicht geladen. Daher sind die Hautimpedanzen  $Z_{S1}$  und  $Z_{S2}$  vernachlässigbar. Das heißt, der Anfangswiderstand  $R_0$  ist gleich der Körper-Innenimpedanz. Generell gilt:  $R_0$  hängt mehr vom Stromweg als von der Größe der Berührungsfläche ab. Nur bei sehr kleiner Berührungsfläche (Größenordnung: wenige Quadratmillimeter) steigen die Werte für die Körperinnenimpedanzen  $Z_i$  und des Anfangswiderstands  $R_0$ .

Weitere Ergebnisse siehe Tabellen in VDE V 0140-479-1.

Man unterscheidet große, mittlere und kleine Berührungsflächen (Größenordnungen: 10.000 mm<sup>2</sup>, 1.000 mm<sup>2</sup>, 100 mm<sup>2</sup>).

**Tabellen** (siehe Norm) zeigen den Wissenstand bezüglich der Gesamtkörperimpedanzen für erwachsene Personen. Der Wert von  $Z_T$  bei Kindern wird etwas höher angenommen, liegt jedoch in derselben Größenordnung.

## 4.5 Sinusförmiger Wechselstrom mit einer Frequenz von 50/60 Hz

Wichtige Ergebnisse:

- Nach dem **Hautdurchbruch**, d.h. nach längerer Durchströmung und/oder bei Berührungsspannungen über etwa 100 V, ist die Gesamt-Körperimpedanz  $Z_T$  so groß wie die Körper-Innenimpedanz  $Z_i$ .
- Die **Teilimpedanz** eines **Zeigefingers** bei einer Berührungsspannung von  $U_T = 200$  V liegt bei 1.000  $\Omega$
- Die **Gesamt-Körperimpedanz**  $Z_T$  ist für große, mittlere und kleine Berührungsflächen im

trockenen, wassernassen und salzwassernassen Zustand für Berührungsspannungen  $U_T$  von 25 V bis 1.000 V AC.

Tabelle 1: Berührungsflächen als Funktion der Berührungsspannung		
Berührungsfläche	Zustand	Berührungsspannung $U_T$
groß (10.000 mm <sup>2</sup> )	trocken, wassernass und salzwassernass	25 V bis 1.000 V AC bei 50/60 Hz
mittlere (1.000 mm <sup>2</sup> )	trocken, wassernass und salzwassernass	25 V bis 200 V AC bei 50/60 Hz
klein (100 mm <sup>2</sup> )	trocken, wassernass und salzwassernass	25 bis 200 V AC bei 50/60 Hz

Weitere Ergebnisse siehe Tabellen in VDE V 0140-479-1.

#### 4.6 Sinusförmiger Wechselstrom mit Frequenzen bis 20 kHz

Wichtige Ergebnisse:

- Die Werte der Gesamtkörper-Impedanz bei 50/60 Hz **sinken** bei **höheren Frequenzen** wegen der Hautkapazität und sind bei Werten > 5 kHz gleich groß wie die Körperinnenimpedanz  $Z_i$ .

Weitere Ergebnisse siehe Tabellen in VDE V 0140-479-1.

#### Gleichstrom

Wichtige Ergebnisse:

- Der **Gesamtkörperwiderstand**  $R_T$  bei Gleichstrom ist bei Berührungsspannungen bis etwa 200 V größer als die Gesamtkörper-Impedanz  $Z_T$ ; Begründung: Sperrwirkung durch die Kapazitäten der menschlichen Haut.

Weitere Ergebnisse siehe Tabellen in VDE V 0140-479-1 und folgende Tabelle 2.

Tabelle 2: Sinusförmiger Wechselstrom im Bereich von 15 Hz bis 100 Hz und für Gleichstrom - eine Gegenüberstellung		
Wichtige Ergebnisse:		
Schwelle	Durch den menschlichen Körper fließender <b>Wechselstrom</b>	Durch den menschlichen Körper fließender (geglätteter) <b>Gleichstrom</b>
Wahrnehmbarkeitsschwelle	- Berührungsfläche der Elektroden, - Berührungsbedingungen: trocken, nass, Druck, Temperatur - individuelle physiologische Eigenschaften der Person	- Berührungsfläche, - Berührungsbedingungen trocken, nass, Druck, Temperatur - individuelle physiologische Eigenschaften der Person
Reaktionsschwelle	- Berührungsfläche der Elektroden, - Berührungsbedingungen: trocken, nass, Druck, Temperatur - individuelle physiologische Eigenschaften der Person - Reaktionsschwelle: etwa 0,5 mA	- Wie bei Wechselstrom. - Es wird nur der Beginn und die Unterbrechung des Stromflusses empfunden.  - Reaktionsschwelle: etwa 2 mA
Immobilisierungsschwelle	I = Muskelverkrampfung, Kör-	- Es gibt bei Gleichstrom <b>keine</b> Immo-

sierungsschwelle	per/Person kann sich nicht mehr bewegen, - abhängig vom Muskelvolumen	bilisierungsschwelle, - nur der Beginn/Unterbrechung des Stromflusses führen zu schmerzhaften und krampfartigen Muskelkontraktionen
Loslassschwelle	- Berührungsfläche, - Elektroden-Größe und -Form, - individuelle Eigenschaften der Person	- Es gibt bei Gleichstrom <b>keine</b> Loslassschwelle.

**Tabelle 3: Schwellen des Herzkammerflimmerns** bei Wechselstrom und Gleichstrom, eine Gegenüberstellung

Schwelle	Durch den Körper fließender <b>Wechselstrom</b>	Durch den Körper fließender (geglätteter) <b>Gleichstrom</b>
des Herzkammerflimmerns	Abhängig vom - Aufbau des Körpers, Zustand der Herzfunktion, Durchströmungsdauer. - Bei Sinusstrom 50/60 Hz Absenkung der Schwelle des Herzkammerflimmerns wenn Stromfluss länger als ein Herzzyklus (Ursachen: Extrasystolen und Inhomogenitäten). Bei hohen Durchströmungen von 10 bis 100 ms Dauer 50 mA.	- Wie bei Wechselstrom, - vor allem bei Längsdurchströmung, - wenn Stromfluss länger als ein Herzzyklus ist, ist die Schwelle des Herzkammerflimmerns für Gleichstrom doppelt so hoch wie bei Wechselstrom. - Die Grenzlinien zeigen die Wertepaare für Stromstärke und Durchströmungsdauer. - Die Flimmerschwelle eines gesunden Menschen liegt bei 200 mA.
weitere Wirkungen bei AC/DC	- Muskelkontraktionen, - Blutdruck-Anstieg, - Störung der Erregungsbildung, - Vorhofflimmern, - Herzrhythmusstörungen (nicht tödlich). - Bei größeren Stromstärken und Zeiten > 1 Sekunden Verbrennungen (innen, außen) und innere Verletzungen. - Hochspannungsunfälle führen nicht immer zu Herzkammerflimmern, - Herzkammerflimmern ist (meist) tödlich, weil es die Blutzirkulation verhindert (gestörter Sauerstofftransport). - Unmöglichkeit, Hilfe herbeizuholen (massive Atemprobleme), - Paralyse der Atemmuskulatur (tödlich) - Zellschädigung (keine thermische Wirkung, jedoch Durchlöcherung der Zellmembran (sog. <b>Elektrokorporation</b> ), irreversible Schädigung führt zu Nekrose und Amputation.	- Oberhalb etwa 100 mA wird Wärmeempfindung in den Extremitäten als schmerzhaft empfangen. - Querdurchströmung durch den menschlichen Körper bis 300 mA für mehrere Minuten können reversible Herzrhythmusstörungen, Strommarken, Verbrennungen hervorrufen oder zum Tod führen. - Oberhalb 300 mA Bewusstlosigkeit, - Ströme mit einigen Ampere bei einigen Sekunden als tiefe Verbrennungen oder Tod, - <b>Elektroporation</b> (siehe links) ebenfalls möglich.



**5 Wirkungen des Stromes auf die Haut**

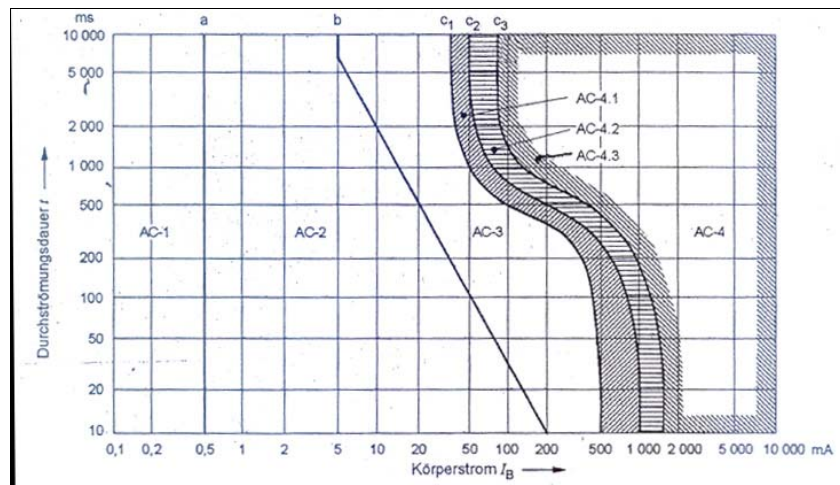
Tabelle 4: Unterschiedliche Stromdichte und ihre Folgen		
Stromdichte	Veränderungen	und Bereiche
- unter 10 mA/mm <sup>2</sup> - bei längerer Dauer	- keine - gräulich-weiß	Bereich 0
10 bis 20 mA/mm <sup>2</sup>	- Rötung	Bereich 1
20 bis 50 mA/mm <sup>2</sup>	- bräunlich - bei längerer Dauer Strommarken	Blasen, Bereich 2
> 50 mA/mm <sup>2</sup>	Verkohlung der Haut	Bereich 3

Hinweis: Bei großen Berührungsflächen kann die Stromdichte sehr klein sein und ohne Veränderung der Haut einhergehen, trotz tödlicher Stromhöhe.

**6 Zeit/Stromstärke-Bereiche:**

Tabelle 5: AC-Zeit/Stromstärke-Bereiche (siehe Bild 6 + 7 (20))		
Bereiche	Bereichsgrenzen	Physiologische Wirkungen
AC-1	bis zu 0,5 mA (bis Grenzlinie a)	Wahrnehmung möglich, aber meist keine Schreckreaktion
AC-2	über 0,5 mA (bis Grenzlinie b)	Wahrnehmung und unwillkürliche Muskelkontraktionen wahrscheinlich, aber keine schädlichen physiologischen Wirkungen
AC-3	Grenzlinie b bis Grenzlinie c <sub>1</sub>	- Starke unwillkürliche Muskelkontraktionen. - Schwierigkeiten beim Atmen. - Reversible Störungen der Herzfunktion. - Immobilisierung (Muskelverkrampfung) kann auftreten. - Stromwirkung zunehmend mit Stromstärke und Durchströmungsdauer. - Im Allgemeinen ist kein organischer Schaden zu erwarten.
AC-4	über der Grenzlinie c <sub>1</sub>  c <sub>1</sub> - c <sub>2</sub>  c <sub>2</sub> - c <sub>3</sub>  über der Grenzlinie c <sub>3</sub>	- Es können pathophysiologische Wirkungen auftreten wie Herzstillstand, Atemstillstand oder andere Zellschäden. Wahrscheinlich von Herzkammerflimmern ansteigend mit Stromstärke und Durchströmungsdauer. Wahrscheinlichkeit von Herzkammerflimmern: AC-4.1: ansteigend bis etwa 5 %  AC-4.2: ansteigend bis etwa 50 %  AC-4.3: über 50 %
Bei einer Durchströmungsdauer unter 200 ms tritt Herzkammerflimmern nur dann auf, wenn die entsprechenden Schwellenwerte in der <i>vulnerablen Phase</i> überschritten werden. Bild 6 bezieht sich auf einen Stromweg von der linken Hand zu den Füßen. Bei anderen		

Stromwegen muss der **Herzstromfaktor** berücksichtigt werden.



**Bild 6** (20): Zeit/Stromstärke-Bereiche bei Wechselstrom (15 Hz bis 100 Hz) bei einem Stromweg von der linken Hand zu den Füßen.

### 7 Herzstromfaktor $F$

Der Herzstromfaktor erlaubt die Berechnung von Strömen  $I_h$  in anderen Stromwegen als von der linken Hand zu den Füßen und zwar für Wechselstrom wie für Gleichstrom.

Der Herzstromfaktor  $F$  ist für Elektounfälle wichtig, die durch Schrittspannungen verursacht werden.

$$I_h = I_{ref} / F$$

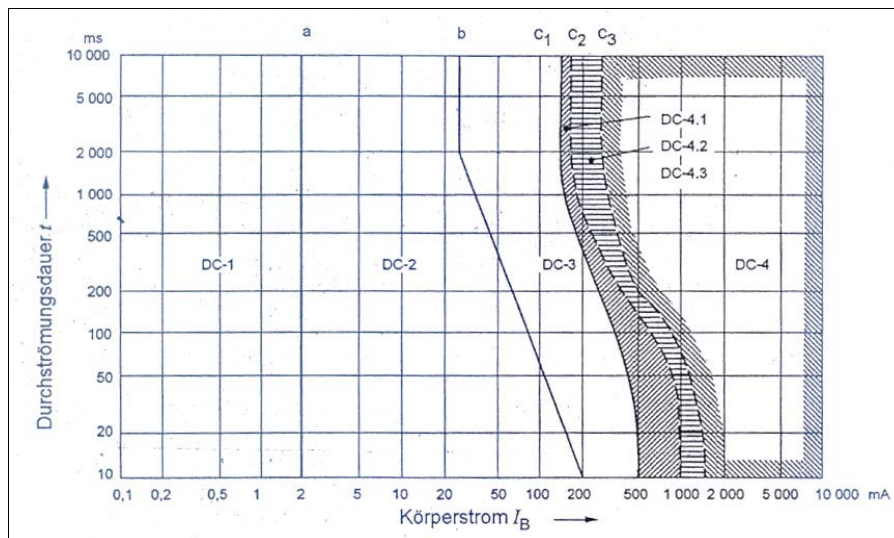
**Legende:**

- $I_{ref}$  Referenzstrom (für einen Stromweg von der linken Hand zu den Füßen)
- $I_h$  Körperstrom
- $F$  Herzstromfaktor (siehe Tabelle)

<b>Tabelle 6: Herzstromfaktoren <math>F</math> für AC-Stromwege</b>			
Stromweg	Herzstromfaktor $F$	Stromweg	Herzstromfaktor $F$
Linke Hand zum linken oder rechten Fuß oder beiden Füßen	1,0	Rücken zur linken Hand	0,7
Beide Hände zu beiden Füßen	1,0	Brust zur re. Hand	1,3
Linke Hand zur rechten Hand	0,4	Brust zur li. Hand	1,5
Rechte H. zum li. Fuß, re.	0,8	Gesäß zur li. Hand, re. Hand	0,7

Fuß oder zu beiden Füßen		oder zu beiden Händen	
Rücken zur re. Hand	0,3	linker Fuß zum re. Fuß	0,04

Beispiel: Ein Strom  $I_h$  von 225 mA von Hand zu Hand hat die gleiche Wahrscheinlichkeit, Herzkammerflimmern zu erzeugen wie ein Strom  $I_{ref}$  von 90 mA von der linken Hand zu beiden Füßen.



**Bild 7 (22):** Zeit/Stromstärke-Bereiche bei Gleichstrom bei Längsdurchströmung für Personen mit aufsteigendem Strom