

Durch den elektrischen Schlag hervorgerufene gesundheitsschädliche Auswirkungen

614.825

Am 12. Dezember 1966 hielt Ch. F. Dalziel, Professor für Elektrotechnik an der Universität von California in Berkeley, am Physiologischen Institut der Universität Zürich einen Vortrag über die von ihm durchgeführten Versuche. Seine interessanten Darlegungen sollen im folgenden kurz zusammengefasst werden.

Infolge seines hochentwickelten Nervensystems ist der Mensch gegenüber dem elektrischen Strom sehr empfindlich. Untersuchungen über das Auftreten der *ersten Empfindungen* an den Händen (Wärme bei Gleichstrom, Prickeln bei Wechselstrom) zeigten bei einer Gruppe von 115 Versuchspersonen eine Normalverteilung nach Gauss, deren Mittelwert (50%-Wert) bei 5,2 mA für Gleichstrom und bei 1,1 mA für Wechselstrom liegt. Frauen sind 1,5mal empfindlicher als Männer. Der Einfluss der Frequenz zeigte sich darin, dass zwischen 100 und 200 kHz das Gefühl des Prickelns in ein Hitzegefühl übergeht. Bei Erhöhung des 60-Hz-Stromes über 1,1 mA kommt zum Gefühl des Prickelns ein Zusammenziehen der Muskeln, das mit zunehmender Stromstärke immer stärker wird; dazu kommt ein zunehmendes Hitzegefühl. Man beginnt Schmerzen zu empfinden, und die bewusste Kontrolle über die Muskeln, die im Stromweg liegen, wird in zunehmendem Masse erschwert. Die grösste Stromstärke, bei der ein elektrischer Leiter durch Betätigung der dem Strom direkt ausgesetzten Muskeln noch losgelassen werden kann, wird als *Loslass-Strom* (*let-go current*) bezeichnet. Bei Stromstärken, die nur wenig darüber liegen, wird das Opfer am Leiter hängenbleiben (*freeze*), wobei Schmerzen und Angstgefühle auftreten. Wenn eine Person längere Zeit Stromstärken ausgesetzt ist, die auch nur wenig über dem Loslass-Strom liegen, so kann dies zu Erschöpfung, Atemnot, Kollaps und Bewusstlosigkeit mit Todesfolge führen. In Fig. 1 sind die Loslass-Stromwerte, die bei 134 Männern und 28 Frauen ermittelt wurden, als Punkte

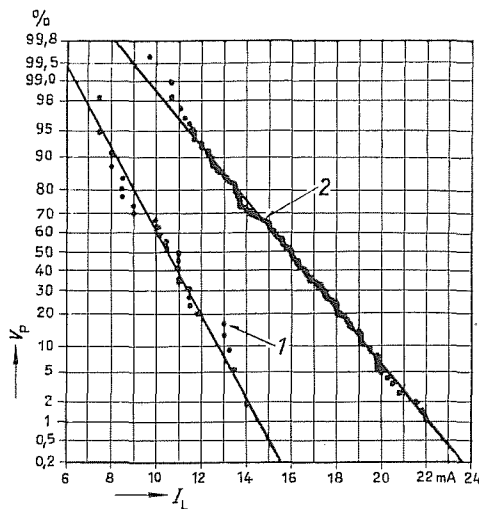


Fig. 1

Normalverteilung des Loslass-Stromes I_L bei 60 Hz für Männer und Frauen
 V_P Versuchspersonen
1 Versuchswerte für 28 Frauen; 2 Versuchswerte für 134 Männer

aufgetragen. Der Durchschnittswert (50%-Wert) des 60-Hz-Loslass-Stromes liegt für Männer bei 16 mA und für Frauen bei 10,5 mA; die Frauen waren auch hier 1,5mal empfindlicher. Als Grenzwerte der Normalverteilung wurden 99,5 und 0,5 % als

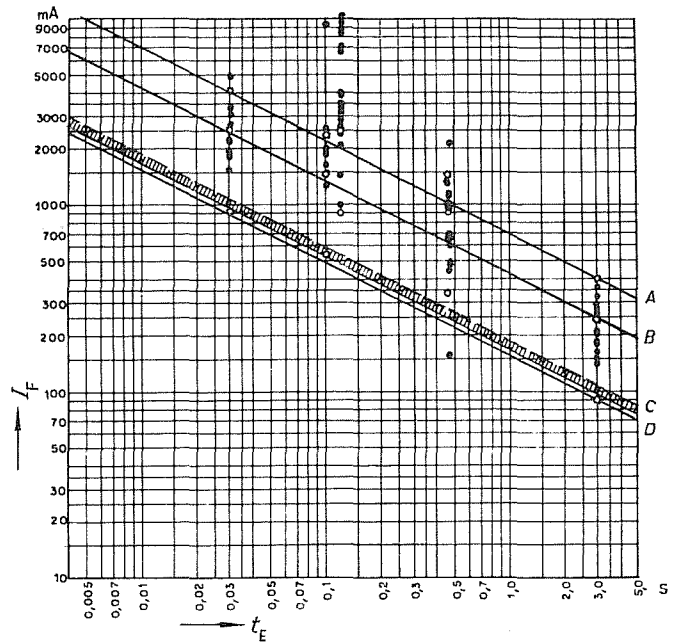


Fig. 2

Beziehung zwischen dem 60-Hz-Strom I_F , der Herzkammerflimmern hervorruft, und der Einwirkdauer t_E bei Schafen

A 99,5%-Linie für Schafe; B 50%-Linie für Schafe; C 0,5%-Linie für 70 kg schwere Tiere; D 0,5%-Linie für Schafe

praktische Grenze angenommen. Der Widerstand des menschlichen Körpers hat eine fallende Charakteristik: Der Widerstand wird geringer, wenn Stromstärke oder Spannung zunehmen oder wenn die Einwirkdauer verlängert wird. Bei starken Verbrennungen oder Berührungen mit Funkenbildung findet man häufig einen Wert von nur 500 Ω , bei nassen Kontaktstellen aber unverletzter Haut 1000 bis 1500 Ω .

Die grösste Gefahr bedeutet das *Herzkammerflimmern*, das schon bei relativ niedrigen Stromstärken auftreten kann; dagegen nimmt bei grossen Stromstärken die Wahrscheinlichkeit dafür wieder ab. An Stelle des Menschen wurden für diese Versuche Tiere, vielfach Schafe, die nach Körper- und Herzgewicht am ehesten dem Menschen entsprechen, verwendet.

Der Einfluss der Einwirkdauer des Stromes ist in Fig. 2 dargestellt; das schraffierte Gebiet entspricht dem 0,5%-Wert für alle 70 kg schweren Tiere. Man sieht, dass der Strom in der Form $I = k / \sqrt{t_E}$ von der Einwirkdauer t_E abhängt, wobei sich für einen zulässigen 0,5%-Wert ein k von 135 ergibt.

$$I (1/2 \% = 135 / \sqrt{t_E} \text{ mA} \quad (t_E \text{ in s})$$

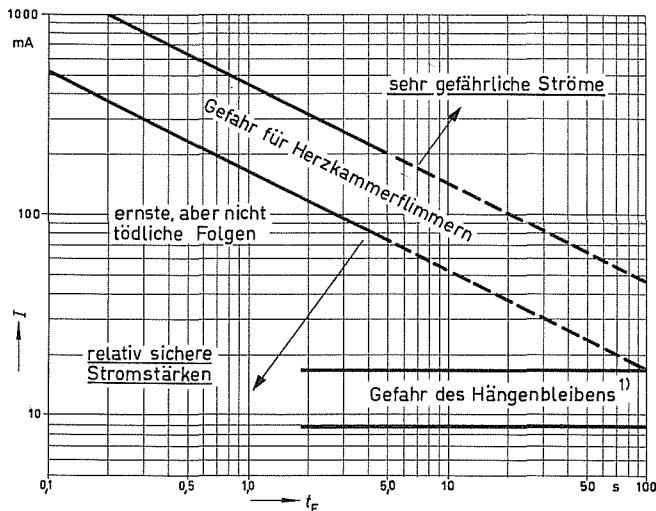


Fig. 3

Gegenüberstellung der 60-Hz-Ströme I , die bereits gefährlich sind und solchen, die noch relativ sicher sind, in Funktion der Einwirkdauer t_E

1) Wenn der Stromkreis nicht unterbrochen wird, kann jede höhere Stromstärke den Tod verursachen

Mit einem Körperwiderstand von 500Ω als sichere Grenze, entspricht das einer zulässigen Energie von 9 Ws , gültig innerhalb $0,01 \dots 5 \text{ s}$ Einwirkdauer. In Fig. 3 sind die theoretischen Werte für den Loslass-Strom und das Auftreten von Herzkammerflimmern in Funktion der Einwirkdauer dargestellt, welche für 50- und 60-Hz-Ströme auch auf den Menschen angewendet werden können.

Die 50%-Werte für Gleichstrom liegen alle etwa fünfmal höher als diejenigen für 60-Hz-Strom: Spürbar sind erst $5,2$ statt $1,1 \text{ mA}$; der Loslass-Strom beträgt 75 statt 16 mA , und damit Herzflimmern auftritt, braucht es 670 mA während 1 s gegenüber 135 mA während 1 s bei 60 Hz .

Einmalige Kondensatorentladungen bis 50 Ws beeinflussten die Herztätigkeit von Hunden in keiner Weise, so dass angenommen werden kann, dass für Menschen etwas höhere Energien noch zulässig sind. Da aber bei schwereren Tieren diese Versuche

nicht durchgeführt wurden, wird auch für den Menschen als obere Sicherheitsgrenze 50 Ws angenommen. Ab Energien von $0,25 \text{ Ws}$ ist die Impulsstromeinwirkung schon äusserst unangenehm; es empfiehlt sich daher, Weidezaun-Geräte und ähnliche Apparate auf diesen Wert zu begrenzen. Ströme, die stark genug sind, um Sicherungen auszulösen, zerstören häufig das Gewebe der Haut und können dem Nervensystem unheilbare Schäden zufügen. Diese elektrischen Verbrennungen heilen sehr langsam, aber sie entzünden sich nur selten. Thermische Verbrennungen durch Lichtbögen, heisse Gase oder geschmolzene Metalle erzeugen Blasen oder Verkohlungen. Jede ernste Verbrennung sollte sofort ärztlich behandelt werden.

Bei einem Elektrounfall muss als Erstes das Opfer schnell und sicher vom Stromkreis befreit werden, entweder durch Abschalten oder durch Wegziehen. Wenn ein Strom durch die Brust, den Kopf oder ein Nervenzentrum geflossen ist, kann eine Lähmung des Atmungssystems eintreten, das auch nach der Unterbrechung des Stromzuflusses noch lange anhalten kann. Wenn dies der Fall ist, muss sofort mit der künstlichen Beatmung begonnen werden. Wenn Herzkammerflimmern auftritt, setzt die rhythmische Pumpfähigkeit des Herzens aus, worauf gewöhnlich sehr bald der Tod eintritt. Daher muss unmittelbar nach dem Unfall mit einer Herzmassage begonnen werden. Die Wiederbelebungsversuche führt man so lange fort, bis das Opfer wieder zu sich kommt oder der herbeigerufene Arzt den Tod feststellt. Glücklicherweise erholen sich viele Menschen selbst nach schweren Elektrounfällen wieder und tragen keine dauernden Nachwirkungen davon, nachdem die Verbrennungen abgeheilt sind.

Literatur

- [1] H. Viehmann: Grenzen der Ungefährlichkeit des elektrischen Stromes. *Elektronik* 14(1965)11, S. 338...340.
- [2] C. Dalziel: Les effets nuisibles du choc électrique. Bureau central de la Commission Electrotechnique Internationale, Genève 1962.
- [3] C. Dalziel: Threshold 60-Cycle Fibrillating Currents. *Trans. AIEE Power Apparatus and Systems* 79(1960)50, S. 667...673.
- [4] P. Osypka: Messtechnische Untersuchungen über Stromstärke, Einwirkdauer und Stromweg bei elektrischen Wechselstromunfällen an Mensch und Tier. Bedeutung und Auswirkung für Starkstromanlagen. *Elektromedizin* 8(1963)3, S. 153...179 + Nr. 4, S. 193...214.

Dr. F. Schwab
Hochspannungs-Laboratorium
der ETH, 8006 Zürich