

Elektrosicherheit – wichtige Grundlagen

Teil 3: Gefährdung durch Gleichspannung

Ch. Rückerl, Leipzig; J. Kupfer, Berlin

Die Wirkung unterschiedlicher Stromformen und die damit im Zusammenhang zu betrachtenden Durchströmungszeiten sind, wie bereits in den beiden vorangegangenen Beiträgen erläutert, vor allem auf grundlegende physiologische Prozesse zurückzuführen. Um Grenzwerte zum Schutz vor lebensgefährdenden Durchströmungen durch Gleichspannung begründen zu können, bilden diese Kenntnisse wesentliche Voraussetzungen. Die Zunahme von Gleichspannungsanwendungen verlangt für den Praktiker eine erneute Darlegung der Zusammenhänge und, in Fortsetzung, weitere Diskussion.

1 Gleichstrom – Eine besondere Gefahr?

In den letzten Jahren zeichnet sich parallel zu vorhandenen Wechselspannungsnetzen die Zunahme von Gleichspannungsanwendungen mit höheren Betriebsspannungen ab. Photovoltaikanlagen, Batteriespeicher sowie die gebäudeinterne Versorgung sind nur drei Beispiele. Zugleich erweitern sich die Spannungsebenen, etwa wie sie zukünftig in der Elektromobilität Anwendung finden sollen. So existieren bereits jetzt zahlreiche elektrische Anlagen mit einer Nennspannung oberhalb von 120 V. Im Bereich der versorgenden Infrastruktur wird beispielsweise bereits die Anwendung von Gleichspannungen bis 760 V zwischen den aktiven Leitern erwogen [1]. Damit verbunden ist die Frage nach den Wirkungen hoher Gleichströme auf den Menschen und den möglichen Schutzkonzepten für die speziellen Anwendungen.

Der elektrische Gleichstrom gilt im Allgemeinen als eher ungefährlich. Ein Grund dafür liegt in der Tatsache, dass aufgrund der seltenen Anwendung bislang wenige schwerwiegende Unfälle bekannt wurden. Niedrige Betriebsspannungen, die im Vergleich zur Wechselspannung wesentlich seltenere Anwendung aber auch die Tatsache, dass bei Gleichstrom eine Loslassschwelle nicht existiert, sind dafür wesentliche Gründe. In der Regel wird bereits aufgrund der mit einer Durchströmung ausgelösten Schreckreaktion die Berührung spannungsführender Teile und damit der Stromfluss unterbrochen. Durchströmungsdauern oberhalb von 500 ms sind somit eher unwahrscheinlich. Einklemmte oder bewegungsunfähige Personen können die Aus-

nahme bilden. Die Gefahr des Herzkammerflimmerns, die grundsätzlich auch bei einer flimmerüberschwelligen Durchströmung mit reinem Gleichstrom besteht, wird bei Betriebsspannungen unter 220 V als äußerst gering eingeschätzt [2]. Dazu differenziert beurteilt werden muss hingegen die Wirkung stark oberwelligen Gleichstroms, wie er in früheren Zeiten vor allem durch Ein- und Zweiweggleichrichtung aus 50-Hz-Wechselstrom erzeugt wurde. Darüber hinaus können zeitliche Stromänderungen z. B. auch durch Lastschwankungen hervorgerufen werden (Bild 1).

Aus diesem Grund sind statistische Angaben zu Elektrounfällen an Gleichspannungsanlagen, bei denen hinsichtlich der Welligkeit nicht unterschieden wird, mit Vorsicht zu interpretieren. Bisher erfasste Arbeitsunfälle zeigen dennoch deutlich, dass die Letalität bei Unfällen mit Gleichstrom geringer ist als bei Wechselstrom (Tafel 1).

DIN IEC 60479-1 [4] fasst die vor allem im Analogieschluss aus Angaben zur Gefährdung durch Wechselspannung abgeleiteten Schluss-

folgerungen [14,17] für die praktische Sicherheitstechnik zusammen. Darin werden drei Schwellenwirkungen unterschieden:

- Wahrnehmbarkeits- und Reaktionsschwelle,
- Immobilisierungs- und Loslassschwelle,
- Schwelle des Herzkammerflimmerns.

Weitere Wirkungen des elektrischen Gleichstromes werden in dieser Norm mit: Wärmeempfindung, Herzrhythmusstörungen, Strommarken, Verbrennungen, Schwindelanfälle, Bewusstlosigkeit, Elektroporation und traumatischen Verletzungen angegeben. Wissenschaftlich untermauert sind diese Angaben nur selten. Welche Gefährdungen von höheren Spannungen (> 300 V) ausgehen, wurde noch dazu nur unzureichend untersucht. Offene Fragen diesbezüglich sind:

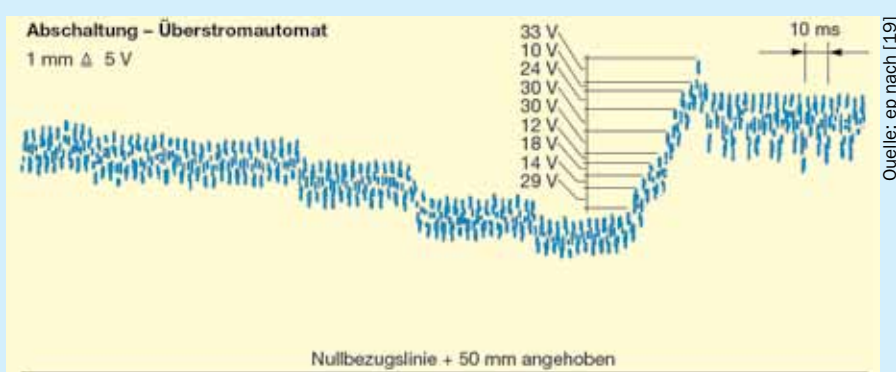
- Welche „Schäden an Herz und Kreislauf“ [14, Tab. X, DC-L2] konnten kausal dem Tierexperiment oder einem Unfallereignis zugeordnet werden?
- Lässt sich die „konventionelle“ Festlegung, „dass bei Gleichstrom die längste Durchströmungsdauer eine Sekunde beträgt“, beweisen [17, S. 201–202], zumal zuvor richtig formuliert wurde: „Der wesentliche Unterschied gegenüber Wechselstrom liegt im Fehlen einer eigentlichen Krampfschwelle“? Deshalb sollen durch das FTZ Leipzig e.V. im Rahmen eines vom BMWi geförderten Forschungsprojektes einige grundlegende Fragen zur Wirkung des elektrischen Gleichstroms auf den Menschen durch tiefer gehende Recherchen beantwortet werden.

2 Gleichströme – Wirkungen auf Menschen

Ein zusammenfassender Überblick liegt zwar zeitlich schon etwas zurück (1978, [14]), begründet aber die wichtigsten Unterschiede

Tafel 1 Arbeitsunfälle, unterteilt nach Stromart [3]

Stromart	Anzahl der Unfälle in %		Anteil der Unfälle in %		Letalität in %
	insgesamt	tödlich	insgesamt	tödlich	
Wechselstrom	17693	206	94,2	96,7	1,2
Gleichstrom	1086	7	5,8	3,3	0,6
Insgesamt	18779	213	100,0	100,0	1,1



1 Oszillogramm (welliger Gleichstrom) beim Anfahrvorgang und plötzlichem Lastabwurf in einem 550-V-Fahrleitungsgrubennetz

Autoren

Dr.-Ing. Christian Rückerl, Gruppenleiter EMV, Forschungs- und Transferzentrum Leipzig e.V. an der HTWK Leipzig.

Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Kupfer, Fachingenieur der Medizin, i. A. VDE/ABB Leiter AK Blitzunfälle; Wissenschaftliches Beratungsbüro Elektropathologie Berlin.

zwischen der Wirkung von Wechsel- und Gleichströmen auf den Menschen. Nicht alle Schlussfolgerungen werden von den Autoren geteilt. Im vorangegangenen Beitrag zu Elektrounfällen an 50-Hz-Wechselspannungsanlagen wurde in Übereinstimmung mit anderen Autoren z. B. das Kriterium „Herzperiodendauer“ als Wendepunkt für den Verlauf der Herzkammerflimmerschwelle abgelehnt. Da sich Tierversuche seit geraumer Zeit ohnehin verbieten, lassen sich neuere Erkenntnisse nur aus Unfällen, Modellbetrachtungen und Versuchen z. B. an Gewebeproben gewinnen. Unter Gleichstrom wird im Weiteren hier ein konstanter Strom verstanden, dessen Welligkeit vernachlässigt werden kann ($w < 10\%$). Der Ein- und Ausschaltzeitpunkt und damit der Zeitpunkt von Berührung und Loslassen spannungsführender Teile sind jedoch gesondert zu berücksichtigen.

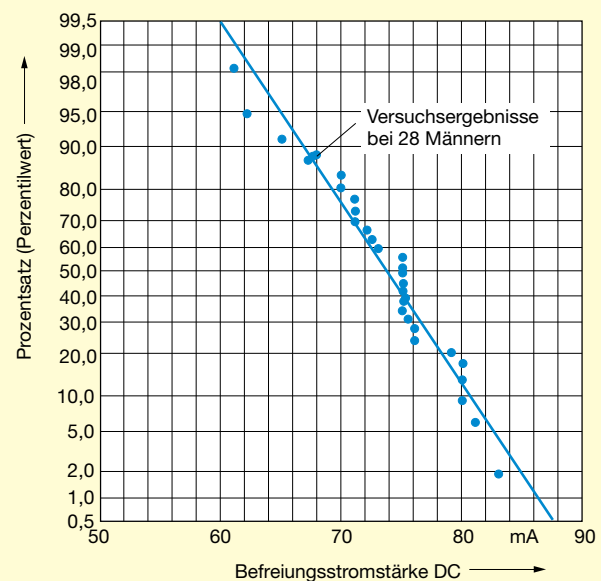
Eine **sensible Wahrnehmung** tritt nach [4] bei Strömen ab 2 mA auf. Der Begriff leitet sich aus der Empfindung ab, die vor allem durch die Stromänderung im Moment des Berührens und Loslassens deutlich wahrgenommen wird. Auch während der Durchströmung kann es zu sensiblen Wahrnehmungen kommen.

Zum Vergleich: In der Medizin wird die schmerzlindernde und durchblutungsfördernde Wirkung des Gleichstromes therapeutisch genutzt [7]. Die Dosis (Stromdichte) wird so festgelegt, dass ein leichtes, schmerzloses Kribbeln empfunden wird. Die Stromdichte als Dosis liegt üblicherweise im Bereich 0,05–0,2 mA/cm² [8]. Für die Handinnenflächen mit etwa 100 cm² bedeutet dies eine Stromstärke von 5...20 mA. Diese Stromstärke würde bei einer kleineren Berührungsfläche, z. B. 10 cm², bereits als schmerzhaftes Stechen wahrgenommen werden.

Der Grund für sensible Wahrnehmungen liegt in der Reizung sensibler Nerven in der Haut.

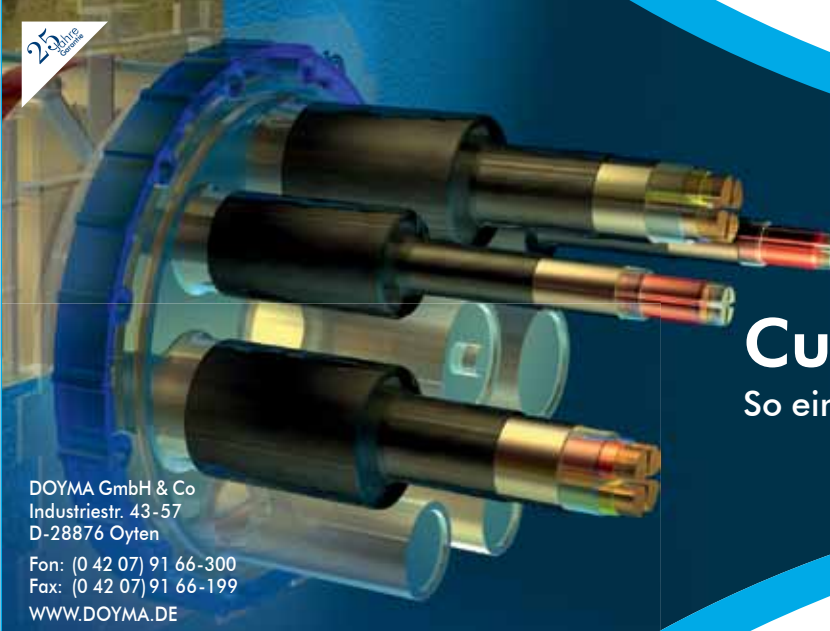
Tafel 2 Empfindungen nach Osypka [6] bei einer Durchströmung Hand-Hand, ca. 90 cm²

Stromstärke in mA	Empfindungen Gleichstrom
bis 2	keine
7	leichtes Kribbeln
12	Wärmegefühl und verstärktes Kribbeln in den Handflächen, leichter Druck in den Handgelenken
21	starker Druck bis Stechen in den Handgelenken
27	Kribbeln im Unterarm, Druckschmerz in den Handgelenken, stechender Schmerz in Handgelenken, Wärmegefühl
32	verstärkter Druckschmerz in Handgelenken, Kribbeln bis in die Ellenbogen reichend
35	heftige Druckschmerzen in Handgelenken, stechende Schmerzen in den Händen
43	sehr starker Druckschmerz in Handgelenken, heftig ziehende und stechende Schmerzen in den Händen, höchstens 10 s auszuhalten



Quelle: ep nach [9]

2 Befreiungsstromstärke für Gleichstrom bei Männern aus [9]



DOYMA GmbH & Co
Industriestr. 43-57
D-28876 Oyten
Fon: (0 42 07) 91 66-300
Fax: (0 42 07) 91 66-199
WWW.DOYMA.DE

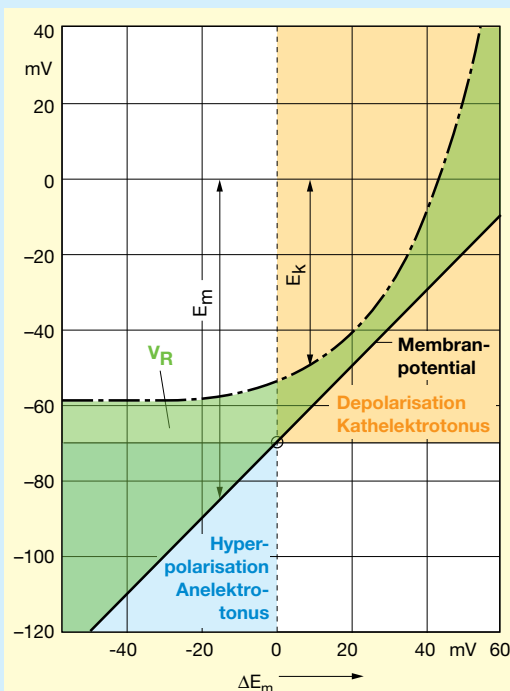
Curaline® BKD 150

So einfach kann Kabelabdichtung sein!

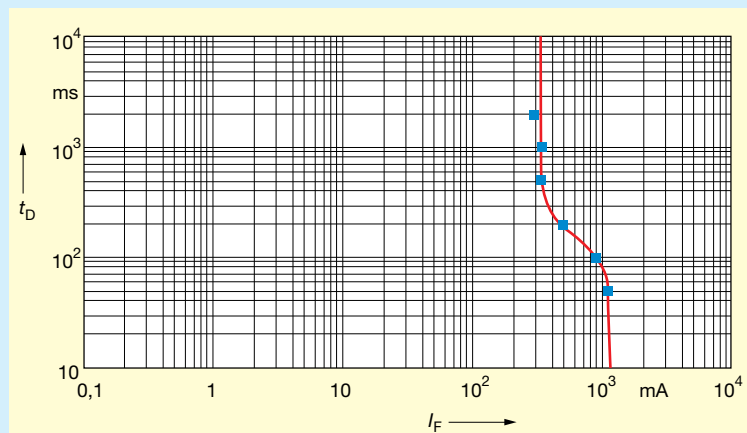
DICHTUNGS|SYSTEME

WEIL SICHER EINFACH SICHER IST.





Quelle: ep nach [5]



Quelle: ep, Chr. Rückerl/J. Kupfer

④ Flimmerschwelle (rot) für eine Flimmerwahrscheinlichkeit von 50 %, nach [13] mit den Daten (blau) von [11]

③ Erregbarkeitsänderungen einer Nervenfasern bei Änderung des Membranpotentials (ΔE_m)

E_m : Membranpotential, E_k : kritisches Potential, V_R : für das Erreichen des kritischen Potentials notwendige Reizspannung

Diese können jedoch auch bei einer konstanten Stromstärke mit einer rhythmischen Erregung antworten [5]. An der Kontaktstelle wird dann ein Kribbeln wahrgenommen, das sich mit steigender Stromstärke zu dem oben beschriebenen schmerzhaften Stechen verändert (Tafel ②). Zu berücksichtigen ist ferner, dass die Stromdichte an der Berührungsfläche (Elektrode) ausschlaggebend ist. Für Vergleiche sollten Stromstärken deshalb immer mit dem Bezug auf eine konkrete Kontaktfläche (z. B. Handinnenfläche) angegeben werden. Neben der Wahrnehmung durch die Stimulation sensibler Nerven kommt es auch zur Reizung motorischer Nerven. Über diese werden Muskeln erregt, sodass es zur **Muskelkontraktion** kommt. Insbesondere der Beginn und das Ende der Durchströmung (der Berührung) führen zu einer Reizung der motorischen Nerven, die auf den Muskel übertragen wird. Eine rhythmische Erregung, wie sie bei den sensiblen Nerven zu beobachten ist, tritt bei motorischen Nerven selten auf. Somit kommt es nur bei der oben genannten zeitlichen Änderung der Stromstärke zu einer kurzen Muskelkontraktion. Diese Zuckung führt dazu, dass sich der Betroffene von der Berührungsstelle löst oder sogar weggeschleudert wird. Damit sind häufig Verletzungen des Bewegungsapparates verbunden. Daraus lässt sich keine Loslassschwelle wie beim Wechselstrom ableiten. Bei seinen Versuchen an Menschen hat Dalziel [9] jedoch eine Befreiungsstromstärke definiert, bei der sich die Probanden wegen der schmerzhaften Muskelkontraktionen weigerten, die Elektroden loszulassen (Bild ②).

Killingner [10] nimmt für Gleichstrom eine Einteilung in Stromstärkebereiche vor. In dem

von ihm festgelegten Stromstärkebereich C (0,5 A–1,2 A), d. h. im Spannungsbereich von etwa 500 V bis 1200 V gibt es als Wirkung die andauernde (tetanische) Verkrampfung der Muskulatur an. Auch bei diesen Betrachtungen wurde die Welligkeit des Gleichstroms nicht berücksichtigt. An der Zelle bewirkt der Gleichstrom eine Verschiebung des Membranpotentials, womit auch eine Verschiebung der Reizschwelle verbunden ist (Bild ③).

Bei einer Hyperpolarisation (Anelektrotonus) steigt die Reizschwelle an, die Erregbarkeit der Nervenzelle nimmt ab. Die Depolarisation (Kathelektrotonus) bewirkt zunächst eine Senkung der Reizschwelle (V_R). Allerdings kann bei einer Verschiebung des Membranpotentials vom Ruhewert (ca. –70 mV) auf einen Wert von etwa –20 mV keine Erregung mehr stattfinden. Motorische Nerven sind deshalb bei einer entsprechend starken Hyper- oder Depolarisation nicht mehr aktivierbar. Eine Verkrampfung wäre dann nur durch eine direkte Muskeleirregung zu erklären. Ein derartiger Mechanismus, der durch Gleichstrom hervorgerufen werden kann, wird in [5] beschrieben und als Depolarisationskontraktion bezeichnet. Ein Schwellenwert dafür kann bislang nicht angegeben werden.

Auch bei Gleichstrom besteht die Gefahr des **Herzkammerflimmerns**. Flimmerschwellen wurden durch Tierversuche ermittelt [11, 12]. Wendet man die für Wechselstrom an Schweinen ermittelte Funktion aus [13] auf Ergebnisse des Versuchstiers Hund an, kann eine Flimmerschwelle definiert werden (Bild ④). Diese kann nicht ohne Weiteres auf den Menschen übertragen werden.

Die Flimmerschwelle für Gleichstrom besitzt wie die von Wechselstrom ein oberes und ein

unteres Niveau. Dies deutet darauf hin, dass auch bei Gleichströmen Extrasystolen entstehen, die einen Wiedereintritt und damit das Herzkammerflimmern begünstigen. Die Ursache für die Auslösung von Extrasystolen müsste dabei jedoch noch eine andere Komponente enthalten, als das beim Wechselstrom der Fall ist, bei dem jede Halbwelle als Einzelreiz anzusehen ist.

Neben dem Reiz beim Ein- und Ausschalten bewirkt der Gleichstrom während der Durchströmung einen Automatismus der Herzmuskelzellen [14]. Das bedeutet, dass die an sich passiven Muskelzellen der Herzkammer (Kammermyokard) aktiv werden und sich kontrahieren. Damit würde sich auch beim Gleichstrom mit zunehmender Durchströmungsdauer die Anzahl der Extrasystolen (auf maximal ca. 5) erhöhen. Die Flimmerschwelle sinkt dann – analog zum Wechselstrom – mit der Durchströmungsdauer auf ein unteres Niveau ab: Die Wahrscheinlichkeit für die Auslösung von Herzkammerflimmern steigt mit der Durchströmungszeit! Bei kurzen Durchströmungen (<100 ms) könnten damit die Flimmerschwellen für Gleich- und Wechselstrom ein gleiches Niveau haben. Bei Durchströmungszeiten zwischen ca. 100 bis 500 ms läge die Flimmerschwelle bei Gleichstrom dagegen höher als beim Wechselstrom. In der Norm [4] wurde daher auf der Grundlage der Versuche an Hunden ein Gleichstrom-Wechselstrom-Gleichwertigkeitsfaktor von 3,75 angegeben. Auch diese Übertragung auf den Menschen bedarf des Beweises.

Elektrochemische Wirkungen, z. B. die im Sprachgebrauch des Öffentlichen angenommene „Elektrolyse“, sind mit Blick auf den Unfall auszuscheiden. Aus medizinischen Anwendungen ist bekannt, dass es unter

Elektroden bei längeren Durchströmungen (Minuten) zu „Verätzungen“ der Haut kommen kann. Die Erklärung dafür sind chemische Reaktionen, die an der Kathode zur Bildung einer Lauge und unter der Anode zur Bildung einer Säure führen. Als Schwellenwert für diese Wirkung müsste eine Strom-Zeit-Fläche definiert werden. Wegen der angenommenen kurzen Berührungsdauer bis zu 500 ms sind diese Wirkungen nicht zu befürchten. Schwellenwerte für diese Art elektrochemischer Wirkungen sind bislang nicht bekannt.

3 Andere Stromformen

Neben dem Wechselstrom (50 Hz) und dem Gleichstrom geringer Welligkeit kommen auch andere Stromformen zur Anwendung. Tierexperimentelle Untersuchungen liegen vor allem von Knickerbocker sowie Jacobsen und deren Mitarbeitern vor [11, 18]. Zu beachten sind daraus abgeleitete Interpretationen anderer Autoren [14, 17].

Zur Beschreibung der Wirkung von gepulsten Magnetfeldern, welche durch Induktion zu gepulsten Körperströmen führen, wurden bereits geeignete Modelle abgeleitet [15]. Es kann davon ausgegangen werden, dass bei sehr kurzen Impulsdauern (<1 ms) die Reizmodelle wie in [16] zu berücksichtigen sind. Reizwirksam ist hier die Stromdichte-Zeit-Fläche, da sich Membranzeitkonstanten auf die Nervenreaktion auswirken. Bei längeren Durchströmungen sind die Spitzenwerte der Stromdichte im Gewebe entscheidend. Der Blitzstrom wird als Spezialfall in einem weiteren Beitrag behandelt.

4 Zusammenfassung

Gleichstrom wird zukünftig mehr Anwendungen finden. Deshalb muss das Wissen über dessen Wirkungen in Ausbildung und Praxis aufgefrischt und ergänzt werden. Dazu gehören die vertiefte Auswertung des internationalen Schrifttums und eine möglichst genaue Erfassung und Bewertung zukünftiger Elektrounfälle an Gleichspannungsanlagen. Unangenehme Wahrnehmungen, wie Stechen oder Druckgefühl, können bei Gleichstrom ebenso auftreten wie schmerzhafte Muskelkontraktionen. Grundsätzlich kann auch Herzkammerflimmern entstehen, wobei sich jedoch der Mechanismus zur Bildung von Extrasystolen von dem bei Wechselstrom unterscheidet.

Auch die hier nicht näher betrachtete Gefährdung durch den Lichtbogen muss beim praktischen Unfallgeschehen berücksichtigt werden. Für den zukünftigen umfassenden sicheren Umgang mit Gleichstromanlagen sollten Richtlinien und Normen überprüft und bei Bedarf ergänzt werden.

Literatur

- [1] Ott, L.; Böke, U.; Weiss, R.: Energieeffiziente Gleichstromnetze für kommerziell genutzte Gebäude. Online verfügbar unter www.dcc-g.eu am 09.04.2014.
- [2] Brinkmann, K.; Schaefer, H. (1982): Der Elektrounfall. Berlin: Springer, S. 190.
- [3] Altmann, S. (2002): Elektrounfälle in Deutschland. Unfälle durch Elektrizität am Arbeitsplatz und im privaten Bereich. Bremerhaven: Wirtschaftsverl. NW, Verl. für Neue Wiss. (Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: Forschung, 941).
- [4] Vornorm 60479-1, Mai 2007: Wirkungen des elektrischen Stromes auf Menschen und Nutztiere – Teil 1: Allgemeine Aspekte.
- [5] Keidel, W. D.; Bartels, H. (1975): Kurzgefasstes Lehrbuch der Physiologie. Mit 446 Prüfungsfragen und Antworten u. e. Schlüssel z. Gegenstandskatalog. 4. Aufl. Stuttgart: Thieme, S. 14–23.
- [6] Osypka, P.: Messtechnische Untersuchungen über Stromstärke, Einwirkungsdauer und Stromweg bei elektrischen Wechselstromunfällen an Mensch und Tier, Bedeutung und Auswertung für Starkstromanlagen; Elektromedizin Bd. 8 (1963) H. 3, 4.
- [7] Cordes, J. C. (2002): Physiotherapie. Grundlagen und Techniken der Hydro-/Elektrotherapie und Massage. 1. Aufl., Nachdr. München [u. a.]: Urban & Fischer.
- [8] Edel, H. (1991): Fibel der Elektrodiagnostik und Elektrotherapie. Mit 22 Tabellen. 6., bearb. Aufl. Berlin: Verl. Gesundheit.
- [9] Dalziel, C. F. (1962): Deleterious effects of electric shock; Meeting of experts on electrical accident and related matters Record of Proceedings. Genf: ILO, S. 46-63.
- [10] Killinger, J. (1959): Vergleichende Untersuchungen von elektrischen Unfällen durch Gleichstrom bei Spannungen bis 1200 Volt in technischer Sicht. In: Biomedizinische Technik/Biomedical Engineering 4 (5), S. 137–161.
- [11] Knickerbocker, G. (1973): Fibrillating Parameters of Direct and Alternating (20 Hz) Currents Separately and in Combination – An Experimental Study. In: IEEE Trans. Commun. 21 (9), S. 1015–1027.
- [12] Ferris, L. P.; King, B. G.; Spence, P. W.; Williams, H. B. (1936): Effect of electric shock on the heart. In: Electr. Eng. 55 (5), S. 498–515.
- [13] Kupfer, J.; Funke, K.; Erkers, R. (1987): Elektrischer Strom als Unfallursache. Verhütung, Wirkungen, Sofortmaßnahmen, Behandlung, Begutachtung. 1. Aufl. Berlin: Tribüne.
- [14] Antoni, H.; Biegelmeier, G. (1978): Über die Wirkungen von Gleichstrom auf den Menschen. In: E und M 96 (2), S. 71–81.
- [15] Rückerl, C. (2012): Methoden zur Bewertung der Exposition durch gepulste Magnetfelder im Niederfrequenzbereich. Aachen: Shaker (Berichte aus der Elektrotechnik).
- [16] Reilly, J. Patrick; Diamant, A. M. (2011): Electro-stimulation. Theory, applications, and computational model. Boston: Artech House (Artech House biomedical signals and systems series).
- [17] Biegelmeier, G. (2007): Das vertretbare Risiko beim Schutz gegen schädlichen elektrischen Schlag für Gleichstrom. Elektrotechnik & Informationstechnik 124/6: 2000-2008.
- [18] Jacobsen, J.: Die Gefährdung durch phasenangeschnittene und gleichgerichtete elektrische Ströme. Hannover, Technische Universität, Diss. A, 1973.
- [19] Kupfer, J.; Ledey, W.; Nicodým, A.; Schirmag, D.; Sedlatzek, M.: Bewertung von Spannungsschwankungen bei Unfällen in Gleichspannungsnetzen. Der Elektropraktiker, Berlin 34 (1980) 5, S. 167–170. ■



NEU



17. Auflage 2014
ca. 450 Seiten
ca. 38,- €
Erscheint im
Juni 2014

Mit Technikwissen sichergehen: Ist das normgerecht?

Hier finden Sie Antworten auf Fragen zu Normen und Vorschriften und können sich optimal auf die Gesellen- und Meisterprüfung vorbereiten.

Preisänderungen und Irrtümer vorbehalten.

Bestellen Sie jetzt:
(030) 34 80 01-222 oder
www.vde-verlag.de/140429

