

# Das Projekt DCSich – Die Wirkungen des elektrischen Gleichstromes auf den Menschen

## Einführung

Mit der Photovoltaik und der Elektromobilität haben sich in den letzten Jahren Anwendungen des Gleichstromes etabliert, mit denen neben Fachleuten auch die Allgemeinheit in Berührung kommt. Deshalb haben sich die Verantwortlichen aus dem Bereich der Normung des Themas Gleichstrom angenommen und im Jahr 2012 das Projekt *Gleichstromsicherheit* (DCSich) initiiert. Damit wurde das Ziel verfolgt, die bekannten Wirkungen des Gleichstromes auf den Menschen zusammenzutragen und den Stand der Normung und Forschung zu bewerten. Mit dem Abschluss des Projektes konnten bis 2014 wichtige Fragen beantwortet und der Normungsbedarf eingeschätzt werden. Inzwischen werden die Arbeiten zur Untersuchung spezieller Fragestellungen mit Unterstützung der BG ETEM fortgesetzt.

## Ergebnisse der Untersuchungen

Die Wirkungen des elektrischen Stromes auf den Menschen und Nutztiere sind im Standard DIN IEC/TS 60479-1 [1] aufgeführt. Für Gleichstrom kann demnach eine **Wahrnehmbarkeitsschwelle** angegeben werden. Definitionsgemäß werden nur Beginn und Unterbrechung des Stromflusses empfunden, wenn ein Strom in Höhe der Wahrnehmbarkeitsschwelle fließt. Im Gegensatz zu Wechselstrom (50 Hz) kann für Gleichstrom jedoch keine **Schwelle für die Immobilisierung** oder **Loslassschwelle** angegeben werden. Die Schwellen für das **Herzkammerflimmern** sind mit dem Wirkungsbereich DC-4 verbunden, in dem unterschiedliche Eintrittswahrscheinlichkeiten berücksichtigt werden. **Andere Wirkungen** des Gleichstromes sind Wärmeempfindungen, reversiblen Herzrhythmusstörungen, Strommarken, Verbrennungen, Schwindelanfälle und Bewusstlosigkeit.

Eine **sensible Wahrnehmung** tritt bereits beim Berühren oder Loslassen unter Gleichspannung stehender Teile auf. Die Stromänderung im Moment des Berührens oder Loslassens wird deutlich empfunden. Aber auch während der Durchströmung kommt es zu sensiblen Wahrnehmungen. An der Berührungsstelle wird bei kleinen Strömen ein Kribbeln wahrgenommen, das sich mit steigender Stromstärke zu einem schmerzhaften Stechen steigern kann. Die Schwelle für die Wahrnehmung eines langsam ansteigenden Gleichstromes liegt nach Osypka [2] für 50 % der Probanden bei 7 mA.

Für die Elektrosicherheit besitzt die **Loslassschwelle** eine besondere Bedeutung. Bei Wechselstrom (50 Hz) kann eine Überschreitung der Loslassschwelle dazu führen, dass eine lange Durchströmungsdauer entsteht. Da die Schwelle für das Herzkammerflimmern mit zunehmender Durchströmungsdauer absinkt, besteht in der Immobilisierung eine besondere Gefahr. Für Gleichstrom kann eine Loslassschwelle bislang nicht angegeben werden. Nach Biegelmeier [3] existiert keine „eigentliche

Loslassschwelle“. Aus physiologischer Sicht kann es auch bei Gleichstrom zu einer tetanischen (andauernden) Verkrampfung der Muskulatur kommen. Dieser Effekt ist jedoch experimentell nicht nachgewiesen und wird nur bei großen Stromstärken vermutet. Killinger [4] geht davon aus, dass in dem von ihm festgelegten Spannungsbereich von 500 V bis 1200 V (d.h. Körperstrom 0,5 A bis 1,2 A) eine andauernde Muskelverkrampfung auftreten kann. Tritt bei einer Durchströmung dagegen nur eine mehr oder weniger starke Zuckung auf, so stellt sich die Frage nach der Kontraktionsdauer, bzw. der Durchströmungsdauer. Diese nimmt Biegelmeier [3] konservativ mit einer Sekunde an. Zur Überprüfung dieser Hypothese wurde am FTZ Leipzig eine eigene Versuchsanordnung aufgebaut, mit welcher der zeitliche Ablauf der Kontraktion näher untersucht werden konnte [5]. Dabei hat sich u.a. gezeigt, dass die Kontraktionsdauer tatsächlich im Bereich unterhalb einer Sekunde liegt.

Die Gefahr des **Herzkammerflimmerns** besteht auch bei Gleichstromunfällen. Für das Versuchstier Hund liegen Daten von Knickerbocker [6] für die Flimmerschwelle vor. Eine Auswertung dieser Daten mit der gleichen Vorgehensweise wie bei Wechselstrom [7] zeigt, dass die Flimmerschwelle für Gleichstrom ein oberes und ein unteres Niveau in Abhängigkeit von der Durchströmungsdauer besitzt. Dies deutet darauf hin, dass bei einem Gleichstromunfall Extrasystolen entstehen, die einen Wiedereintritt ermöglichen und damit die Bedingungen für das Herzkammerflimmern begünstigen. Der Mechanismus, den Antoni [8] als Funktionswandel des Arbeitsmyokards zur Schrittmacherfunktion beschreibt, ist dabei jedoch ein anderer im Vergleich zum Wechselstrom.

**Elektrochemische oder blutschädigende** Wirkungen werden in der Normung bislang nicht beschrieben. Die Blutzellen (Erythrozyten, Thrombozyten usw.) und die Eiweißfraktionen des Blutes sind elektrisch geladen. Im elektrischen Feld bewegen sich deshalb beispielsweise die Erythrozyten mit ihrer negativen Oberflächenladung in Richtung der Anode. Die damit verbundene Ansammlung der roten Blutkörperchen kann nach einer entsprechenden Dauer zur Bildung eines Thrombus führen. Gleichzeitig mit der Bewegung im elektrischen Feld kommt es zu einer Verschiebung der osmotischen Verhältnisse und damit zum Platzen der Erythrozyten, d.h. zur Zersetzung des Blutes. Gegenwärtig wird untersucht, inwiefern eine Wirkung von Gleichstrom auf das Blut bei kurzen Durchströmungsdauern ( $< 1$  s) auftreten kann. Es ist davon auszugehen, dass bei langen Durchströmungsdauern blutschädigende Wirkungen zu berücksichtigen sind. Schwellenwerte liegen jedoch bislang nicht vor.

## **Zusammenfassung und Ausblick**

Während die Schwelle für die Wahrnehmung einfach ermittelt und beschrieben werden kann, fehlen bislang belastbare Aussagen zur Loslassschwelle bei Gleichstrom. Weiterführende Erkenntnisse können gegenwärtig nur durch Untersuchungen an Versuchstieren gewonnen werden.

Die Bereichsgrenzen für die Flimmerschwelle leiten sich wie bei Wechselstrom aus den Ergebnissen früherer Tierversuche ab. Die Kurven und Beschreibungen des Bereiches DC-4 können auf dieser Grundlage bestätigt werden.

Ergänzungen sind bei den elektrochemischen und blutschädigenden Wirkungen angebracht, auch wenn diese möglicherweise nur bei langen Durchströmungsdauern berücksichtigt werden müssen. Für eine Ergänzung der Normen müssen jedoch zunächst geeignete Schwellenwerte ermittelt werden.

Die Ergebnisse des Projektes DCSich sind bislang u.a. bei gemeinsamen Workshops mit dem VDE, in praxisbezogene Publikationen [9,10] und in die Normungsroadmap *Gleichspannung im Niederspannungsbereich* [11] eingeflossen.

## Literatur

- [1] DIN IEC/TS 60479-1, Vornorm (2007): Wirkungen des elektrischen Stromes auf Menschen und Nutztiere - Teil 1: Allgemeine Aspekte.
- [2] Osypka, P. (1963): Meßtechnische Untersuchungen über Stromstärke, Einwirkungsdauer und Stromweg bei elektrischen Wechselstromunfällen an Mensch und Tier. Bedeutung und Auswertung für Starkstromanlagen. In: Biomedizinische Technik/Biomedical Engineering 8 (3), S. 153–179.
- [3] Biegelmeier, G. (2007): Das vertretbare Risiko beim Schutz gegen schädlichen elektrischen Schlag für Gleichstrom. In: Elektrotech. Inftech. 124 (6), S. 200–208.
- [4] 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.
- [5] Guttke, S., Rückerl, Ch. (2015): Measurement system to determine the contraction time of the forearm skeletal muscle, Sensor 2015, 17-th International Conference on Sensors and Measurement Technology, Proceedings; S. 799-803
- [6] 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.
- [7] Kupfer, J. (1981): Experimentelle Untersuchungen zur Wirkung kurzer (20 ms bis 1500 ms) 50-Hz-Wechselströme auf Großtiere (Schweine) mit dem Ziel der Ableitung von Grenzwerten für Körperströme für Mensch und Nutztier.
- [8] Antoni, H.; Hohnloser, S.; Weirich, J. (1982): Worauf beruht der Unterschied in der biologischen Wirksamkeit von Gleichstrom und Wechselstrom am Herzen? Aus dem Physiologischen Institut der Universität Freiburg i. Br. Sonderdruck. In: Arbeitsmedizin, Sozialmedizin Präventivmedizin 17, 1982 (7), S. 167–173.
- [9] Kupfer, J., Rückerl, Ch. (2014): Elektrosicherheit – wichtige Grundlagen, Teil 2: Gefährdung durch Wechselspannung (50/ 60 Hz), Elektropraktiker Berlin, H. 5-14, S. 416-419
- [10] Rückerl, Ch., Kupfer, J. (2014): Elektrosicherheit – wichtige Grundlagen, Teil 3: Gefährdung durch Gleichspannung, Elektropraktiker Berlin, H. 6-14, S. 500-503
- [11] VDE/ DKE (2016): Deutsche Normungsroadmap – Gleichstrom im Niederspannungsbereich (V 1)