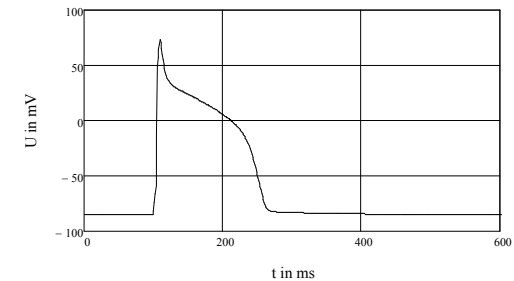
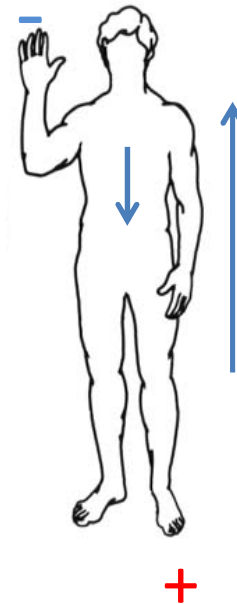
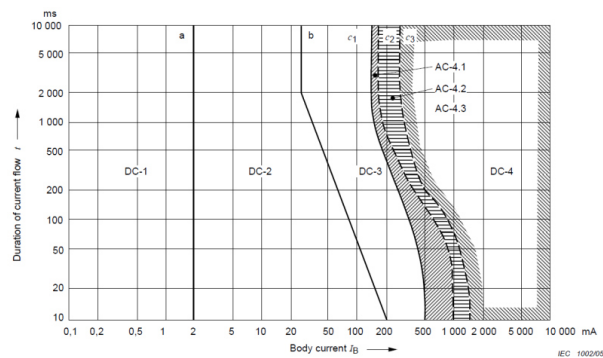


Die Wirkungen des elektrischen Gleichstromes auf Menschen und Nutztiere

Dr. Christian Rückerl



Forschungs- und Transferzentrum Leipzig e.V.

www.ftz-leipzig.de

rueckerl@ftz-leipzig.de

Aktuelles Thema Gleichstrom



10. Mai. 2016
Diesen Artikel finden Sie online unter
<http://www.welt.de/8856358>

06.08.10 | Stromschläge

Feuerwehr lässt Häuser mit Solardach abbrennen

Aus Angst vor gewaltigen Stromschlägen kann die Feuerwehr Häuser mit Solaranlagen auf dem Dach bei Bränden oft nicht löschen. *Von Richard Haimann*



Welche Wirkungen gibt es?

Welche Wirkungen werden derzeit in den Normen berücksichtigt?

Gibt es Bedarf für Ergänzungen/ Änderungen?

Aktuelles Thema Gleichstrom

Anwendung (Niederspannungsbereich)	Nennspannung in V
solarbetriebene Gartenleuchten u.ä. KFZ Bordnetz (bisher)	12
Telekommunikationseinrichtungen Bahnübergangssicherungseinrichtungen KFZ Bordnetz (neu) Dezentrale Energieversorgung (Entwicklungsländer)	48
Elektromobilität derzeit perspektivisch	200-800 1500
Rechenzentren	380/ 400
Gebäudeinfrastruktur am Beispiel DCC+G aktive Leiter (+/-) aktive Leiter gegen Bezugsleiter (Erde)	760 380
Straßenbahnen, U-Bahnen	600-800
PV-Anlagen	bis 1500
Versorgungsnetze auf Schiffen	1000

Wirkungen

Herzkammerflimmern

Herzrhythmusstörungen, Kammerflimmern
potenziell tödlich

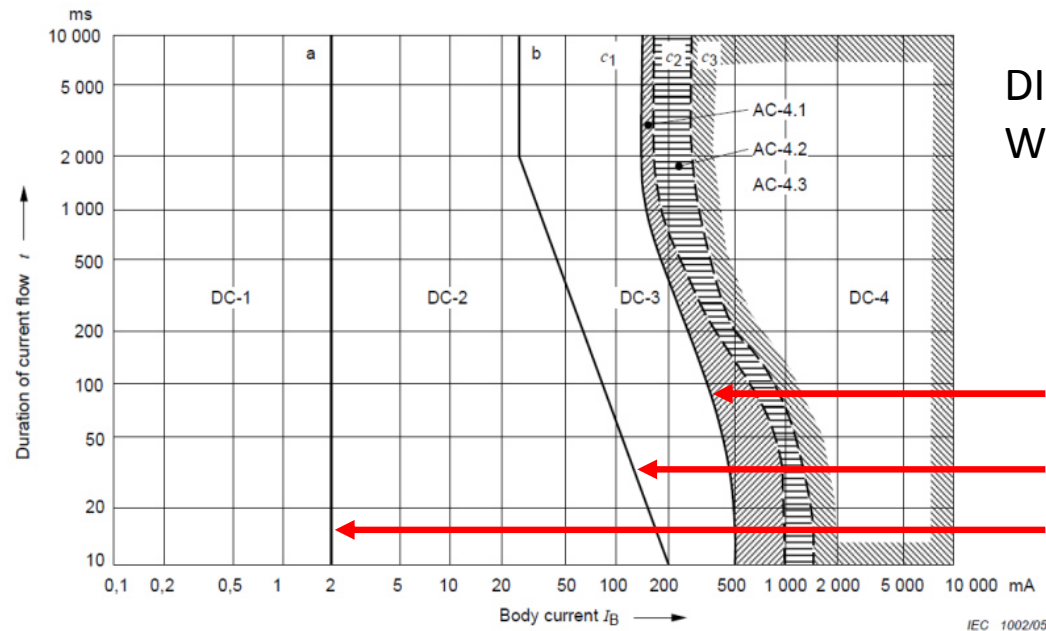
Reizwirkung

Muskelkontraktion,
Verkrampfung, Sekundärunfälle

Elektrochemische Wirkungen

Hämolyse (Blutersetzung),
Verätzungen an den Elektroden,...

Reizwirkung: Wahrnehmungsschwelle



DIN IEC/ TS 60479-1 2005

Wirkungsbereiche

Flimmerschwellen

Schwelle für ???

Wahrnehmungsschwelle

Bereiche	Bereichs- grenzen	Physiologische Wirkungen
DC-1	bis zu 2 mA Grenzlinie a	Leicht stechende Empfindung beim Ein- und Ausschalten oder bei schneller Änderung der Stromstärke.
DC-2	über 2 mA bis Grenzlinie b	Unwillkürliche Muskelkontraktionen wahrscheinlich, besonders beim Ein- und Ausschalten oder bei schneller Änderung des Stromes, aber üblicherweise keine schädlichen physiologischen Wirkungen.
DC-3	Grenzlinie b bis Grenzlinie c ₁	Starke unwillkürliche Muskelkontraktionen und reversible Störungen der Reizbildung und Reizleitung im Herzen können zunehmend mit Stromstärke und Durchströmungsdauer auftreten. Im Allgemeinen ist kein organischer Schaden zu erwarten.

Reizwirkung: Wahrnehmungsschwelle

IEC TS 60479-1 2005

„Im Gegensatz zu Wechselstrom wird nur der Beginn und die Unterbrechung des Stromflusses empfunden und keine andere Wahrnehmung bemerkt, während der Strom in der Höhe der Wahrnehmbarkeitsschwelle fließt.“

- Ursache: Erregung sensorischer Nerven in der Haut
- bei zeitlicher Änderung des Stromes und **während des Stromflusses**
- Wahrnehmung (Daziel, 50%): 5,2 mA (Männer)/ 3,5 mA (Frauen)
- „leichtes Prickeln“ (Osypka, 50%): 7 mA (90 cm² - 0,08 mA/cm²)
- Reaktionsschwelle (60479-1): 2 mA

Problem:

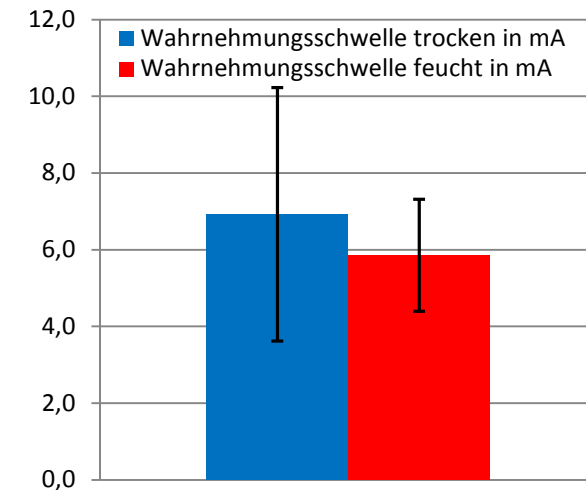
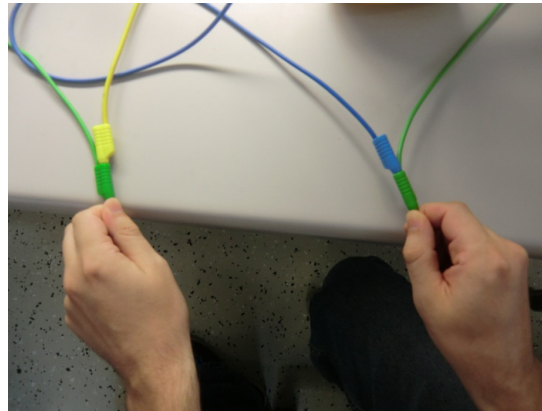
Die Welligkeit wird bislang nicht berücksichtigt!

Dalziel, Charles F. (1961): Deleterious Effects of Electroc Shock. In: *Meeting of Experts on Electrical Accidents and Related Matters*.

OSYPKA, P. (1963): Messtechnische Untersuchungen über Stromstärke, Einwirkungsdauer und Stromweg bei elektrischen Wechselstromunfällen an Mensch und Tier, Bedeutung und Auswertung für Starkstromanlagen. In: *Elektromedizin 8 (3 und 4)*.

Reizwirkung: Wahrnehmungsschwelle

Durchströmungsversuche mit großen und kleinen Elektroden



- auch während der Stromflussdauer kann Gleichstrom gespürt werden
- unterschiedliche Mechanismen der Wahrnehmung bei AC und DC
- Unterschied zw. AC u. DC in der Wahrnehmung kann **nicht** auf andere Wirkungen übertragen werden!
- tolerierte Spannung: 45 V (große Elektrodenfläche)/ 90 V (kleine Elektrodenfläche)
- zulässige Berührungsspannung: 120 V

Reizwirkung: Vergleich AC - DC

Wirkungen Wechselstrom *	Stromstärke in mA		Empfindungen Gleichstrom **
keine	bis 0,6	bis 2	keine
merklich, in steigender Intensität, Muskelkontraktion, aber willkürlich überwindbar	0,6-6	7	leichtes Kribbeln
schmerzhaft, Loslassen in steigender Häufigkeit unmöglich	6.0 - 15.0	12	Wärmegefühl und verstärktes Kribbeln in den Handflächen., leichter Druck in den Handgelenken
Loslassschwelle fast immer überschritten, geringf. Wirkungen auf Atmung und Kreislauf	15-25	21	starker Druck bis Stechen in den Handgelenken
Loslassen unmöglich steigende Wirkung auf Atmung und Kreislauf (Herzbeschleunigung, Rhythmusstörung, Blutdrucksteigerung, Atembehinderung)	25-50	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

* Brinkmann, Schaefer: Der Elektrounfall, Springer-Verlag Berlin 1982

** 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

Beispiel aus der Elektrotherapie

Dosierung (leichtes Prickeln): (0,05 – 0,2) mA/cm²
 → Kontaktfläche 100 cm² (Hände): (5 - 20) mA
 → Kontaktfläche 10 cm²: (0,5 - 2) mA

Reizwirkung: Loslassschwelle

TS 60479-1 IEC: 2005

6.2 Schwelle der Immobilisierung und Loslassschwelle

„Im Gegensatz zu Wechselstrom gibt es bei Gleichstrom **keine festlegbare Immobilisierungs- oder Loslassschwelle**. Nur der Beginn und die Unterbrechung des Stromflusses führen zu schmerzhaften krampfartigen Muskelkontraktionen.“

...aus der Literatur:

„...dass bei stärkeren Strömen die Schliessung des Stroms nicht von einer einfachen kurzen Zuckung gefolgt ist, sondern sich häufig in Form einer langgezogenen tonischen oder tetanischen Contraction darstellt...“ (1886)

DC-T2	Minuten	über etwa 300 mA	selbständiges Lösen nicht mehr möglich oder erst nach längerer Zeit	(1978)
-------	---------	------------------	---	--------

„Es gibt also bei Gleichstrom keine eigentliche Loslassschwelle.“ (1986)

„...erzeugt reiner Gleichstrom niemals eine unwillkürliche Kontraktion von Skelettmuskeln,...“ (1987)

„Der wesentliche Unterschied gegenüber Wechselstrom liegt im Fehlen einer eigentlichen Krampfschwelle. Nur bei Stromstärken von einigen hundert Milliampere bis zu Ampere wurde eine Verkrampfung, meist des ganzen Körpers, beobachtet. Ein Loslassen ist dann nicht mehr oder erst nach Sekunden oder Minuten möglich.“ (2007)

Reizwirkung: Loslassschwelle

Tabelle 1

Auswirkungen unterschiedlicher Stromstärkebereiche bei Gleich- und Wechselstrom. (Mod. nach Koeppen)

Typ	Stromstärke	Sichtbare Auswirkung	Klinische Auswirkung
I	Wechselstrom bis 25 mA	Unspezifische Muskelkontraktion der Finger	Sympathikotone Reaktion (transiente RR-Steigerung, Hyperhydrosis), physiologische Ausgleichsreaktion ohne Einfluss auf kardiale Erregungsbildung bzw. -leitung
	Gleichstrom bis 80 mA	Loslassgrenze bei ca. 25 mA, erste Atembeschwerden	
II	Wechselstrom 25–80 mA	Bis max. 50 mA ertragbare Stromstärke ohne Bewusstlosigkeit	Arrhythmien, vorübergehende Blutdrucksteigerung
	Gleichstrom 80–300 mA	Ab 50–80 mA Bewusstlosigkeit und Atemstillstand	
III	Wechselstrom 80 mA–3 A	Atem- und Kreislaufstillstand	Kammerflimmern und/oder Kammetachykardie und/oder Asystolie
	Gleichstrom 300 mA–3 A	Irreversibler Kreislaufstillstand bei Stromdurchfluss >1/3 s	
IV	Wechsel- und Gleichstrom >3 A	Verbrennung bzw. Verkochung	Wie III

Bis heute wird ein direkter Vergleich der Wirkungen von Gleich- und Wechselstrom vorgenommen

Vergleich *Effektivwert* und *Arithmetischer Mittelwert*

Gleiche Wirkungsbereiche, nur unterschiedliche Stromstärkeangaben

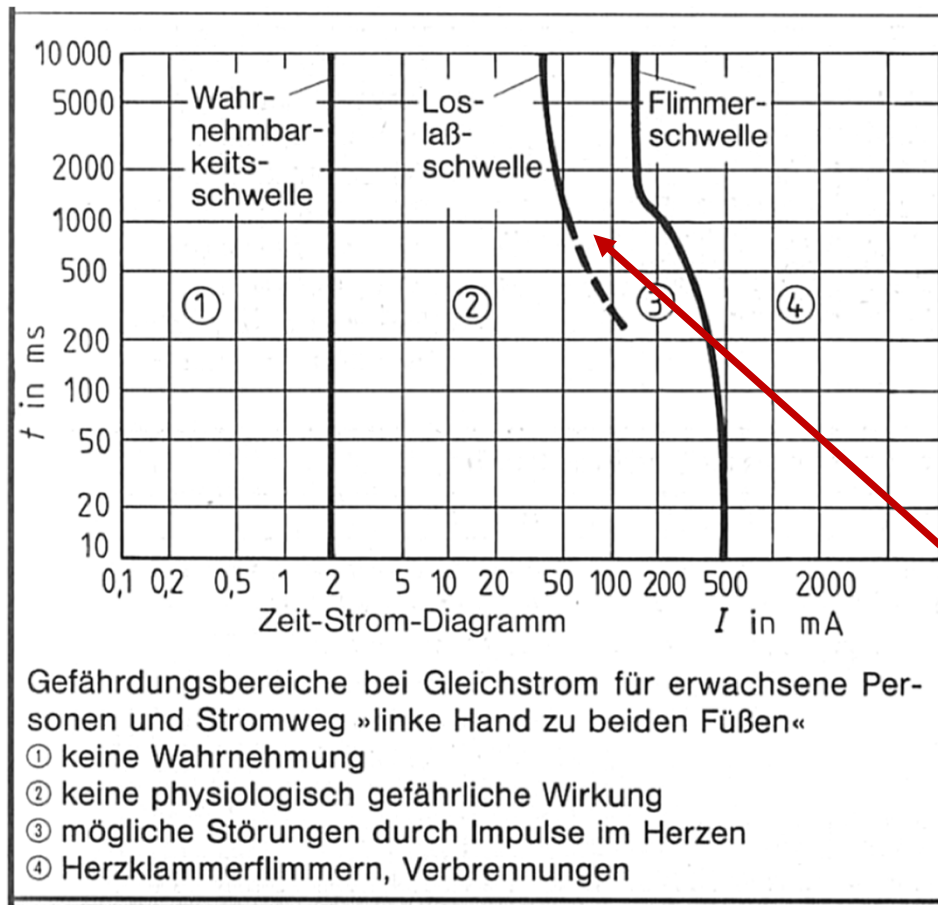
Bei DC auf keinen Fall Loslassgrenze bei 25 mA!

Atembeschwerden bei 25 mA können ausgeschlossen werden.

Was ist bei welligen Strömen?

Koppenberg, J.; Taeger, K. (2001): Stromunfälle. In: *Notfall & Rettungsmedizin* 4 (4), S. 283–298. DOI: 10.1007/s100490170061.

Reizwirkung: Loslassschwelle



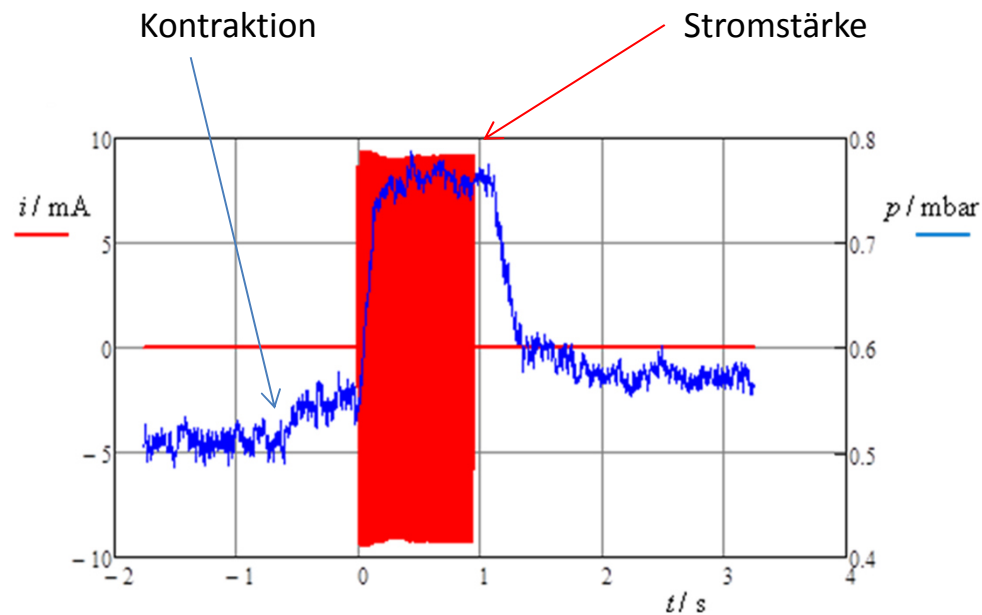
Elektrotechnik Tabellen, Westermann 1997

...aus einem aktuellen Tabellenbuch für die Berufsausbildung:

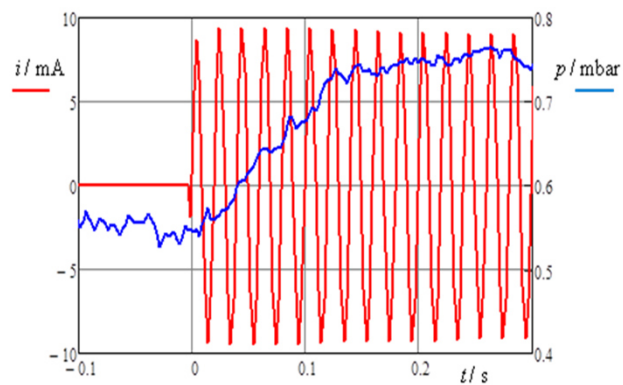
Falsche Interpretation der Kurve zwischen den Gefährdungsbereichen 2 und 3!

Keine Loslassschwelle!

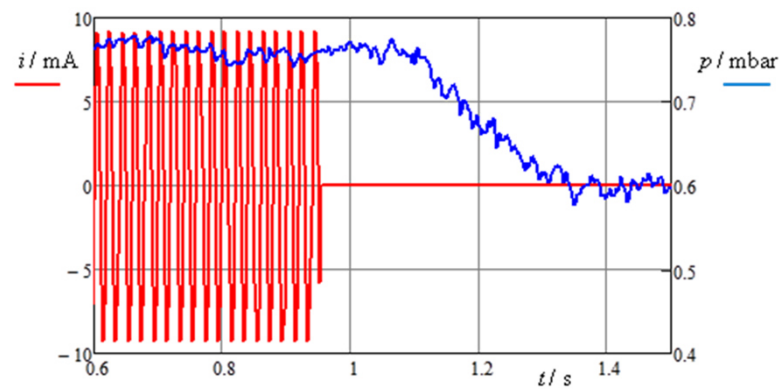
Muskelkontraktion Wechselstrom (50 Hz)



Beginn der Durchströmung

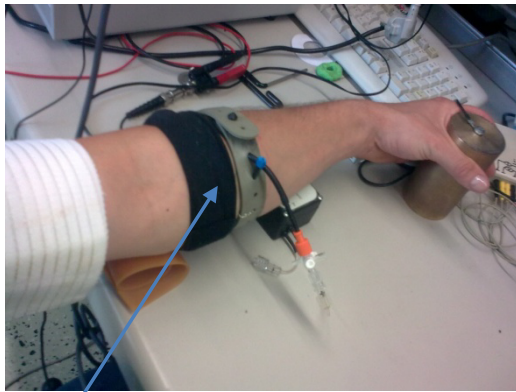


Ende der Durchströmung



Muskelkontraktion Gleichstrom

Muskelkontraktion: Verkrampfung



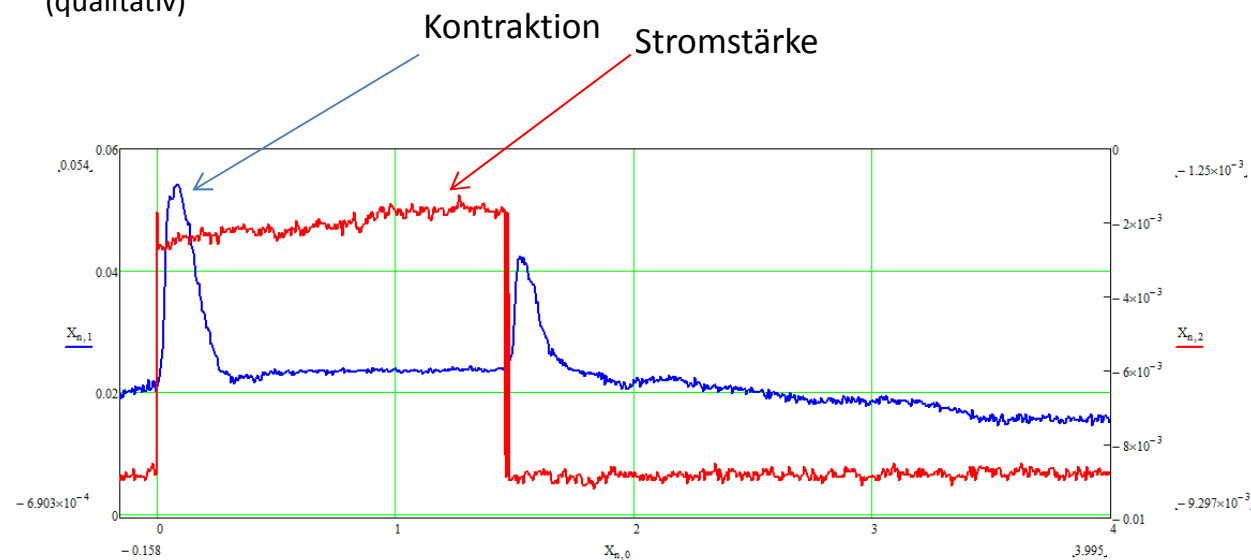
Kontraktionskraft
(qualitativ)

Bei Gleichstrom bis zu ? mA treten nur **kurze Muskelkontraktionen** (Zuckungen)

Dauer: 0,5 s bis 1 s

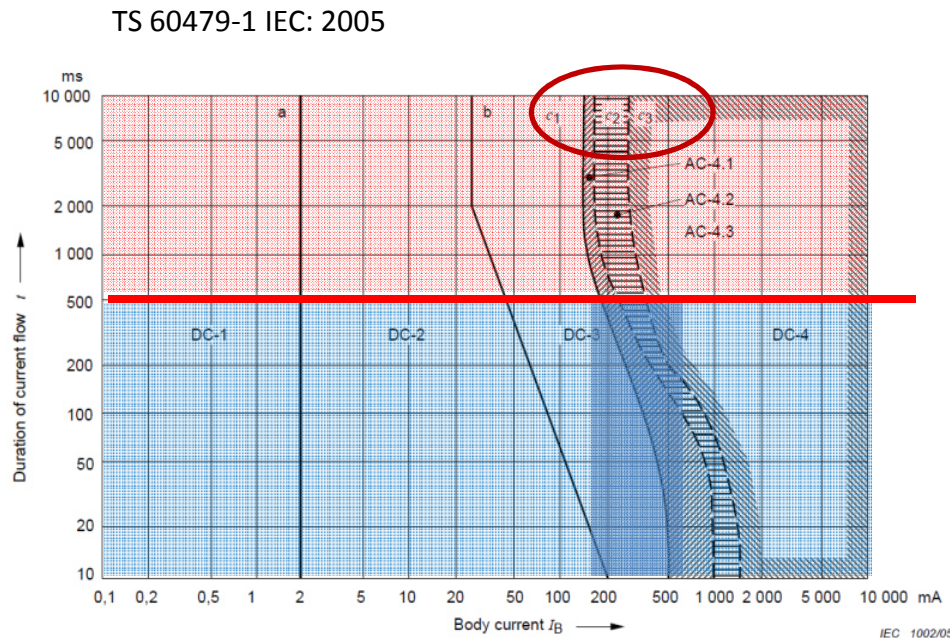
Existiert eine Loslassschwelle bei Gleichstrom?

Warum ist die Loslassschwelle nicht festlegbar?



Effekte Gleichstrom: Stromstärke-Zeit-Bereiche

...wenn es keine Loslassschwelle gibt:



Sonderfälle:

z.B. Lösen von den Kontakten
nicht möglich
(eingeklemmt, bewusstlos, ...)

Stromflussdauer
> 0,5 s

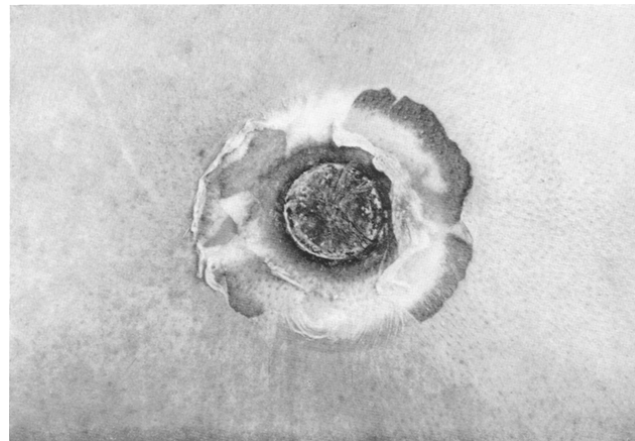
Flimmerschwelle (50 %) sinkt
auf 180 mA !

max. Stromflussdauer (ca.)	0,5 s
Wahrnehmung	2 mA
Schmerz	30 mA
Schwelle Herzkammerflimmern (5 %)	500 mA
Schwelle Herzkammerflimmern (50 %)	1000 mA

Elektrochemische Wirkungen

Reaktionen an den Elektroden (Kontaktflächen)

Art der Wirkung	Wirkung unter Anode	Wirkung unter Kathode
chemisch	Bildung von Sauerstoff und Salzsäure (HCl)	Bildung von Wasserstoff und Lauge (NaOH)
physiologisch	Koagulationsnekrosen, Gerinnung des Zelleiweißes und der Zellflüssigkeit	Kolliquationsnekrosen, Verflüssigung des Gewebes



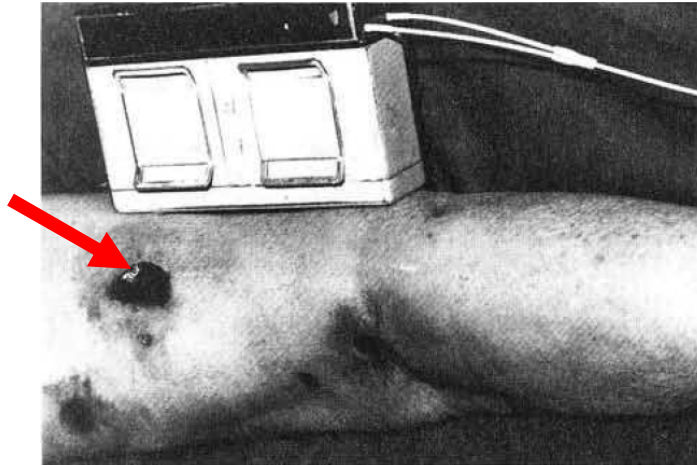
Strommarken nach stundenlanger (!) Einwirkung bei 220 V DC

Munck, Willy (1934): Selbstmord durch Gleichstrom von 220 Volt. In: *Dtsch. Z. ges. gerichtl. Med.* 23 (S2), S. 97–109.

- Verätzungen führen zu nicht-thermischen Strommarken
- Bsp. aus der Elektrotherapie, Behandlungsfehler: Nekrose bei 25 mA nach ca. 10 min!

Elektrochemische Wirkungen

Elektrounfall bei der Behandlung: tiefe Hautnekrosen (9 V/ 20 mA nach einem Tag)



Fallbeschreibung

Ursache:	defektes Medizingerät (9 V)
Wirkung:	Verletzungen der Haut (Verätzungen)
Dauer:	etwa 1 Tag
Stromstärke:	20 mA (geschätzt)

Kietzmann, H.; Henseler, T.; Schröder, J.-M.; Polster, H.; Krämer, M. (1985):
Kolliquationsnekrosen der Haut durch Herzschrittmacher. In: *Dtsch med Wochenschr* 110 (13),
S. 504–507. DOI: 10.1055/s-2008-1068854.

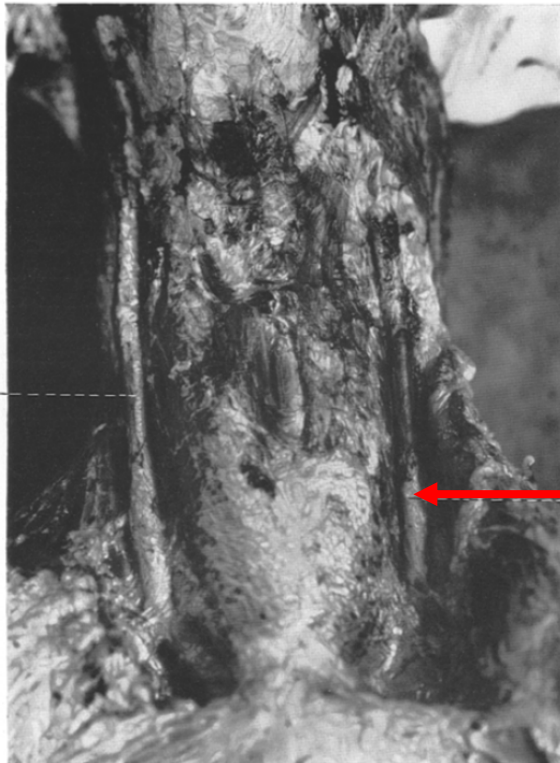
Therapeutischer Nutzen, Klinische Wirkungen

- schmerzstillende Wirkung
- lokal bessere Durchblutung
- Förderung von Zellwachstum und Regeneration

Hypothese: Wirkungsgröße ist elektrische Ladung (Stromstärke x Zeit)

Elektrochemische Wirkungen

Versuch am Hund: 2 x 15 s 220 V DC



Lange Durchströmung und hohe Stromstärke!

Ergebnis:
maximale venöse Stauung aller inneren Organe

Halsvenen prall gefüllt,
darin frische Thromben

Bei langen Durchströmungsdauern (s, min) ist die Bildung von Thromben möglich.
Außerdem: Zersetzung des Blutes (Hämolyse) und der Muskeln (Rhabdomyolyse)

Elektrochemische Wirkungen

Versuchsobjekt	Stromstärke in mA	Stromflussdauer in min	el. Ladung in As	Effekt	Quelle
in vitro					
Erythrozyten in Kochsalzlösung	8-10	6-8	2,9-4,8	Zytolyse, Hämolyse	Rienmüller, 1959
Versuchstier					
Hund: A. femoralis	10 1	15 60	9 3,6	„Induktion wandständiger Thromben“	Sedlarik u. Weidenbach, 1978
Hund: Koronararterie	0,1-0,9	18-93	0,1-5,0	Gefäßverschluss	Andres u. Salazar, 1961
Mensch					
Nadelelektrode (intravenös)	6	30	10,8	Verlängerung der Thromboplastinzeit	Rienmüller, 1959
Blutgefäß Zunge (A. lingualis)	5	5	1,5	Gefäßverschluss, schmerzhafte Ödeme auf der Zunge	Piton, 1978
Elektrotherapie (Dosisempfehlung)	10	20	12	therapeutische Anwendung	Fialka-Moser, 2005

Experimentell nachgewiesen:

- Hämolyse (in vitro)
- Beeinflussung der Blutgerinnung

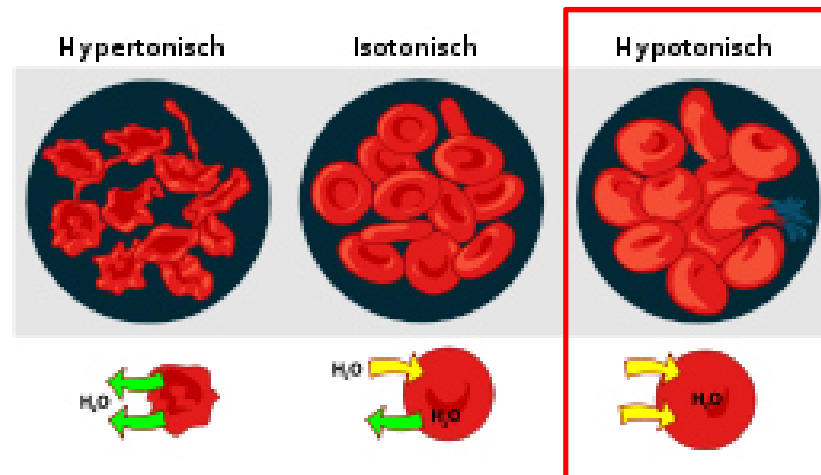
Elektrochemische Wirkungen

Effekte auf das Blut

Hämolyse (Platzen der Erythrozyten)

→ Freisetzung von Hämoglobin → Nierenschädigung

(Ähnliche Wirkungen: HUS/ EHEC)



By LadyofHats translated by
Drahkrub [Public domain], via
Wikimedia Commons

Rhabdomyolyse (Zerstörung der Muskulatur)

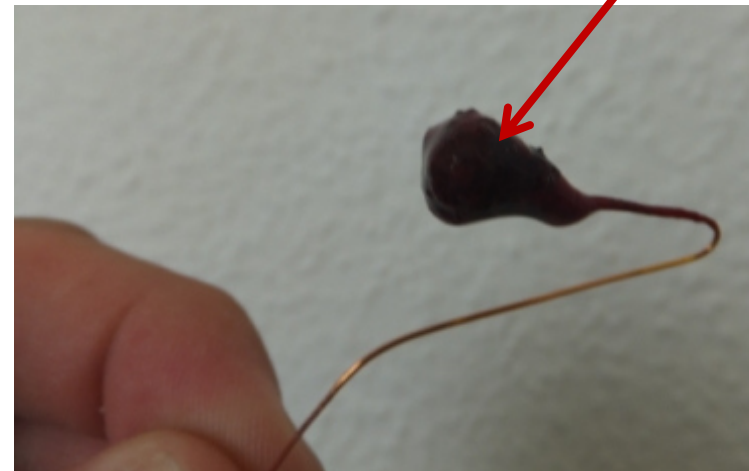
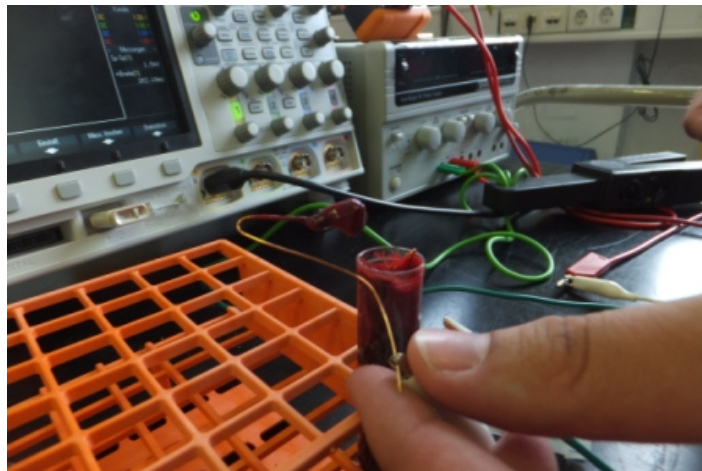
Muskelzerstörung → Freisetzung von Myoglobin → Nierenschädigung

Elektrochemische Wirkungen

Effekte auf das Blut

- Erythrozyten, Plasmaproteine und Plasmaionen sind elektrisch geladen
- Bewegung im elektrischen Feld (Erythrozyten zur Anode)
- Ansammlung von Erythrozyten kann zu Bildung eines Thrombus führen

Versuch: Durchströmung Schweineblut (Zitratblut)



Blutgerinnsel (20 mA/ 40 min)

Ergebnis: Bereits bei einer Durchströmungsdauer unter 1 s und einer Stromstärke von 25 mA wird die Blutsenkung (BKS) beeinflusst!

Effekte Gleichstrom: Zusammenfassung Wirkungen

Wirkungen	physiologische Basis bekannt	experimentell bestätigt	Schwellenwerte existieren
Wahrnehmung	✓	✓ (Mensch)	✓
Muskelkontraktion (Verkrampfung, Tetanus)	✗	✗	✗
Herzkammerflimmern	✓ (unvollständig)	✓ (Tierversuche)	✓
Elektrochemische Effekte			
Verätzungen	✓	✓	✗
Hämolyse	✓	✗	✗

- **Schwelle für den “Galvanischen Krampf” unbekannt**
- **Elektrochemische Effekte: Verätzungen, Hämolyse nur bei „langen“ Durchströmungsdauern, Schwellenwerte sind nicht bekannt.**