

|                     |                                                                                                                                                                                                                           |
|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Zeitschrift:</b> | Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses |
| <b>Herausgeber:</b> | Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen                                                                                                                              |
| <b>Band:</b>        | 73 (1982)                                                                                                                                                                                                                 |
| <b>Heft:</b>        | 18                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>Artikel:</b>     | Über die Wirkungen von unipolaren Impulsströmen auf den menschlichen Körper                                                                                                                                               |
| <b>Autor:</b>       | Biegelmeier, G. / Homberger, E.                                                                                                                                                                                           |
| <b>DOI:</b>         | <a href="https://doi.org/10.5169/seals-905012">https://doi.org/10.5169/seals-905012</a>                                                                                                                                   |

### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 26.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Über die Wirkungen von unipolaren Impulsströmen auf den menschlichen Körper

Von G. Biegelmeier und E. Homberger

Eine Arbeitsgruppe der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC), die WG 4 des CE 64 «Elektrische Installationen in Häusern», dem die beiden Autoren des folgenden Artikels angehören, befasst sich seit einiger Zeit mit der Überarbeitung der IEC-Publikation Nr. 479 «Wirkungen des Stromes auf den menschlichen Körper». Diese Publikation bildet die Grundlage für alle Sicherheitsnormen der IEC, weshalb sie den neuesten physio-pathologischen Erkenntnissen Rechnung tragen soll. Die bisherige Fassung berücksichtigt jedoch nur die kontinuierlich fließenden Ströme. Mit Rücksicht auf die zunehmende Verbreitung der Impulstechnik ist es nun an der Zeit, auch die Wirkungen der unipolaren Impulsströme zu berücksichtigen.

In der Schweiz beschäftigt sich nebst dem Fachkollegium 64 des CES auch die Ärztekommision zum Studium der Starkstromunfälle des VSE mit diesem Thema. Ihre Entscheidungen werden massgebend dazu beitragen, die im schweizerischen Elektrizitätsgesetz aufgeführten Begriffe «Schwachstrom» und «Starkstrom» genauer zu definieren. Der folgende Beitrag soll im internationalen wie im nationalen Bereich eine Entscheidungsbasis liefern.

Un groupe de travail de la Commission Electrotechnique Internationale (CEI), à savoir le groupe de travail 4 du CE 64 «Installations électriques des bâtiments» et dont les deux auteurs de l'article suivant sont membres, se consacre depuis quelque temps à la révision de la publication CEI no 479 «Effets du courant passant par le corps humain». Cette publication sert de référence pour toutes les normes de sécurité de la CEI, d'où la nécessité de devoir tenir compte des dernières découvertes physio-pathologiques. L'ancienne version traite seulement des courants traversant le corps en continu; compte tenu de l'ampleur que prend la technique d'impulsions, il est temps de considérer également les effets des courants d'impulsions unipolaires. En Suisse, outre le groupe spécialisé 64 du CES, la Commission des médecins pour l'étude des accidents dus au courant fort de l'UCS s'est également consacré à ce sujet. Ses décisions contribueront de manière déterminante à définir plus exactement les notions mentionnées dans la loi suisse sur l'électricité, à savoir «courant faible» et «courant fort». L'article suivant devrait fournir une base de décision tant au niveau international que national.

## 1. Stand des Wissens

Die Wirkungen von unipolaren impulsförmigen Strömen, meist in Form von Kondensatorentladungen, haben schon seit langem in der Elektropathologie Beachtung gefunden, wobei die Möglichkeit von Unfällen durch derartige Stromformen infolge der immer mehr zur Anwendung kommenden Geräte mit elektronischen Bauteilen ständig steigt. Auch für die Technik des elektrischen Weidezaunes ist es notwendig, die Gefahrengrenzen von Stromimpulsen genau zu kennen.

Zum erstenmal hat wohl O. Stauss [1] quantitative Messungen durchgeführt, als man wissen wollte, welche Kapazitäten in elektrischen Verbrauchsgeräten angewendet werden müssen, um einerseits eine möglichst gute Funkentstörung zu erreichen, andererseits aber in jedem Fall Gefährdungen und womöglich auch Schreckwirkungen zu vermeiden. Stauss untersuchte am lebenden Menschen sowohl die Wahrnehmbarkeitsschwelle als auch die Schmerzwelle von Kondensatorentladungen bei kurzzeitiger Berührung und beim grossflächigen Umfassen von Elektroden.

Als man später begann, die Technik des elektrischen Defibrillierens im Operationssaal einzusetzen und den Gegen-schock als Erste Hilfe beim Herz-Kammerflimmern vorschlug, erkannte man bald, dass die Kondensatorentladung, als Gegenschock angewendet, ein brauchbares Mittel darstellt, um Kammerflimmern zu beseitigen. Um Gefährdungen, die durch Anwendung dieser Methode entstehen, abschätzen zu können, wurden 1956 von Kouwenhoven [2] und 1963 von Peleska [3, 4] umfangreiche Versuche durchgeführt.

Bei den Versuchen von Kouwenhoven (Körpergewicht der Hunde 8 bis 20 kg) wurde sowohl am freigelegten Herzen gemessen als auch Ganztierversuche durchgeführt. Beim Anlegen von kreisförmigen Elektroden (1 Zoll Durchmesser) an gegenüberliegenden Herzflächen war zum Ent-

flimmern des Herzens eine Ladeenergie von mindestens 5 Ws bei einer Ladespannung von wenigstens 500 V erforderlich.

Bei einer Ladeenergie von mehr als 5 Ws kam es auch nicht zum Flimmern, wenn die Entladung auf ein normal arbeitendes Herz erfolgte, während kleinere Ladeenergien Flimmern auslösten.

Beim Ganztierversuch wurden die Elektroden (jede mit einer Fläche von etwa 150 cm<sup>2</sup>) an der rechten und der linken Thoraxseite angelegt. Entladungen unter 50 Ws verursachten keine Herzunregelmäßigkeiten. Entladungen zwischen 80 und 150 Ws führten zum Kammerflimmern. Bei dieser Anordnung erfolgte das Defibrillieren mit Ladeenergien über 500 Ws und Spannungen von einigen tausend Volt. In der Arbeit von Kouwenhoven werden keine Anhaltspunkte über die Form des Impulsstromes gegeben. Es ist auch zu beachten, dass sich bei dieser Versuchsreihe infolge der grossen Elektroden beim Ganztierversuch das Herz während der Entladung in einem annähernd homogenen elektrischen Feld befunden hat.

Peleska hat nur Ganztierversuche durchgeführt, und zwar ebenfalls mit Hunden (Körpergewicht 20 bis 25 kg). Zuerst wurden reine Kondensatorentladungen appliziert, wobei Elektroden mit 15 bis 17 cm<sup>2</sup> Fläche an gegenüberliegenden Seiten des Thorax befestigt wurden. Unter diesen Versuchsbedingungen betrug der Körperwiderstand zwischen den Elektroden etwa 40 Ω. Es wurden Kapazitäten von 0,5 bis 100 μF bei Spannungen zwischen 0,5 und 6 kV verwendet. Damit ergeben sich bei den reinen Kondensatorentladungen Zeitkonstanten von 20 μs bis 4 ms. In einer zweiten Versuchsreihe wurde mit der Kapazität noch eine Induktivität (0,27 Henry, 27 Ω) in Serie geschaltet. Damit ergab sich eine stark gedämpfte Schwingung mit zwei Halbwellen, wobei die zweite Halbwelle nur mehr etwa 30% der Amplitude der ersten hatte.

Während die Entladungen bei den Versuchen von Kouwenhoven zufällig über die Herzphase verteilt waren, hat Peleska die Entladungen gesteuert in drei Herzphasen, und zwar in der absoluten Refraktärphase, in der relativen Refraktärphase und in der Diastole, erfolgen lassen. Er hat bei den Versuchen mit hohen Ladeenergien begonnen, die dann stufenförmig auf kleinere Energiewerte abgesenkt wurden. Damit wurde bei diesen Versuchen weniger die Flimmerschwelle bestimmt als die verschiedenen Formen der Arrhythmien beobachtet, die bei hohen Energien infolge Schädigungen des Myokards auftreten.

Peleska erwähnt, dass zwei Formen des Flimmerns beobachtet wurden. Eine Form tritt sofort nach dem Impuls auf, und zwar bei relativ kleinen Impulsenergien, die andere Form bei hohen Energien, oft erst nach Minuten, nachdem sich vorher schwere Rhythmusstörungen gezeigt haben.

Die erste Form wurde vor allem in der vulnerablen Phase beobachtet und dürfte mit der beim Elektrounfall bei Niederspannung beobachteten Form identisch sein. Sie tritt schon bei Ladespannungen von 0,5 oder 1 kV und Kapazitäten von 12 bis 100  $\mu\text{F}$  auf, das entspricht Ladeenergien zwischen etwa 1,5 und 50 Ws. Sowohl Kouwenhoven als auch Peleska ordnen die beobachteten Wirkungen eher der Ladeenergie als der Elektrizitätsmenge zu, obwohl es auch hinsichtlich der Ladespannung Grenzen zu geben scheint.

Dalziel hat versucht, auf Grund der technischen Daten von Elektrounfällen, die durch Impulsströme entstanden sind, Gefahrengrenzen abzuschätzen, doch tritt dabei immer wieder die Schwierigkeit auf, dass der Körperwiderstand im Unfallstromkreis eine Unbekannte darstellt [5].

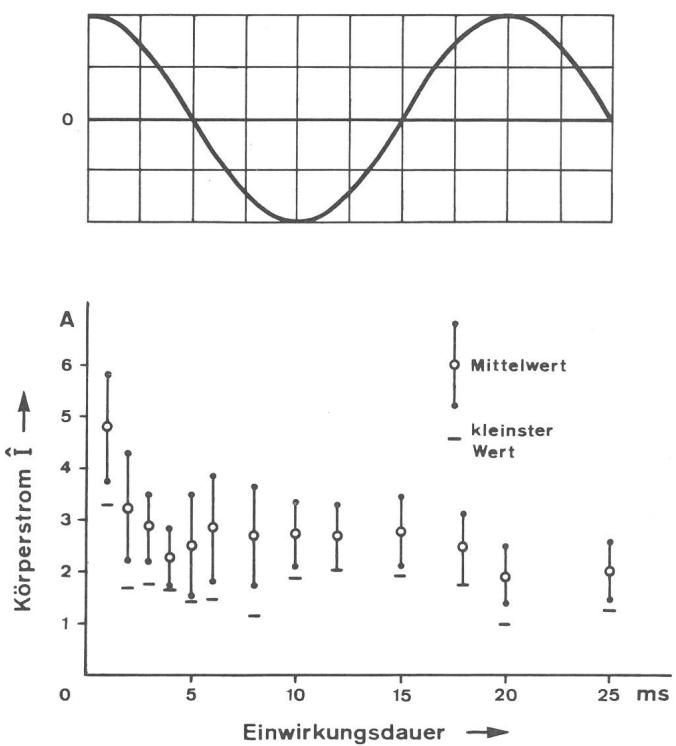


Fig. 1 Flimmerstromstärken  $I$  (Scheitelwerte) für Wechselstromimpulse von 1 ms bis 25 ms nach Green [9].

- Mittelwerte (50%-Werte) und Standardabweichungen
- niedrigster gemessener Flimmerwert
- Beginn der Durchströmungsdauer im Stromscheitelwert.

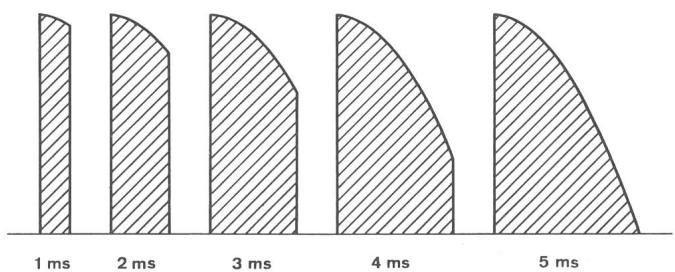


Fig. 2 Impulsformen der Greenschen Versuche für die Impulsdauern 1 ms, 2 ms, 3 ms, 4 ms und 5 ms.

Die Versuche von Peleska mit Kapazitäten und Induktivitäten haben, wie erwähnt, zu Impulsformen geführt, die einem sinusförmigen Halbwellenimpuls ähneln, so dass in eine Untersuchung über die Gefahren von Impulsströmen wohl auch sinusförmige und rechteckförmige Impulse kurzer Dauer eingeschlossen werden müssen.

Aus den Hundeversuchen von Kouwenhoven mit Wechselstrom von 60 Hz ist bekannt, dass für einen sinusförmigen Halbwellenimpuls die Flimmerschwelle für 50% Flimmerwahrscheinlichkeit bei etwa 1,8 A effektiv liegt [6]. Dies würde bei gleichem Energieinhalt bei 50 Hz einer Stromstärke von 1,6 A entsprechen. Dieser Wert wurde auch von Jacobsen für das Jungschwein angegeben [7]. Aber auch für Rechteckimpulse liegen Messungen der Flimmerschwelle von Knickerbocker vor [8], allerdings nur mit einer kürzesten Impulsdauer von 50 ms. Knickerbocker findet, dass bei diesen kurzen Einwirkungsdauern die Flimmerschwelle für Gleichstrom etwa gleich hoch ist wie die Flimmerschwelle für Wechselstrom, wenn in Effektivwerten gemessen wird. Dies ist ein Hinweis darauf, dass bei kurzen Impulsdauern die Energie des Impulses für das Auslösen des Flimmerns eine wichtige Größe ist.

Neueste Untersuchungen von Green [9] bestätigen diese Annahme ebenso wie die Messungen, die von Antoni am isolierten Meerschweinchengerzen durchgeführt wurden [10]. Green hat mit Hunden bei Längsdurchströmungen Flimmerversuche durchgeführt. Es wurden kurze Wechselstromimpulse mit Einwirkungsdauern von 1 ms bis 25 ms in der vulnerablen Herzphase verwendet, wobei der Strom im Strommaximum eingeschaltet wurde. Figur 1 zeigt die Ergebnisse der Messungen von Green, wobei über den Messwerten zeitlich zugeordnet die Sinuswelle des Reizstromes ersichtlich ist.

Die auf diese Weise entstandenen Impulsformen für die Durchströmungsdauern 1 ms, 2 ms, 3 ms, 4 ms und 5 ms sind in Figur 2 dargestellt.

Für diese Impulsformen können aus den Scheitelwerten  $I_p$  die entsprechenden arithmetischen und quadratischen Mittelwerte, also der Mittelwert  $I_{av}$  und der Effektivwert  $I_{rms}$  mit den Integralen

$$I_{av} \cdot t_i = \int_{T/4}^{T/4+t_i} I_p \cdot \sin \omega t \cdot dt \quad I_{rms}^2 \cdot t_i = \int_{T/4}^{T/4+t_i} I_p^2 \cdot \sin^2 \omega t \cdot dt$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega}$$

Berechnungsfaktoren für den arithmetischen Mittelwert  $I_{av}$  und den Effektivwert  $I_{rms}$  aus dem Scheitelwert  $I_p$  für ange- schnittene sinusförmige Stromimpulse nach Figur 2.

Tabelle I

| Impulsdauer<br>ms | Arithmetischer Mittelwert<br>$I_{av}$ | Effektivwert<br>$I_{rms}$ |
|-------------------|---------------------------------------|---------------------------|
| 1                 | $0,955 \times I_p$                    | $0,975 \times I_p$        |
| 2                 | $0,923 \times I_p$                    | $0,9245 \times I_p$       |
| 3                 | $0,845 \times I_p$                    | $0,85 \times I_p$         |
| 4                 | $0,756 \times I_p$                    | $0,77 \times I_p$         |
| 5                 | $0,636 \times I_p$                    | $0,7 \times I_p$          |

abgeleitet werden. Es ergeben sich die Beziehungen der Tabelle I.

Green hat dann noch zwei weitere Versuchsreihen durchgeführt, allerdings mit einer sehr beschränkten Anzahl von Messungen, so dass es kaum möglich ist, eine statistische Auswertung vorzunehmen. Die Ergebnisse dieser Messreihen sind in Figur 3 und 4 dargestellt.

Bei einer Reihe wurde der Beginn des Stromflusses 2 ms vor den Scheitelwert gelegt, und in einer weiteren Reihe wurde die Durchströmung im Nulldurchgang des Stromes begonnen, so dass bei 10 ms ein voller Halbwellenimpuls auftrat. Erwartungsgemäß wurden dabei etwas niedrigere Werte gemessen als beim Beginn der Durchströmung im Strommaximum. Diese Erscheinung ist wohl dadurch begründet, dass bei bipolaren Impulsen die Wirkung des ersten Impulses durch die entgegengesetzte Stromrichtung der zweiten Impulshälfte teilweise kompensiert wird.

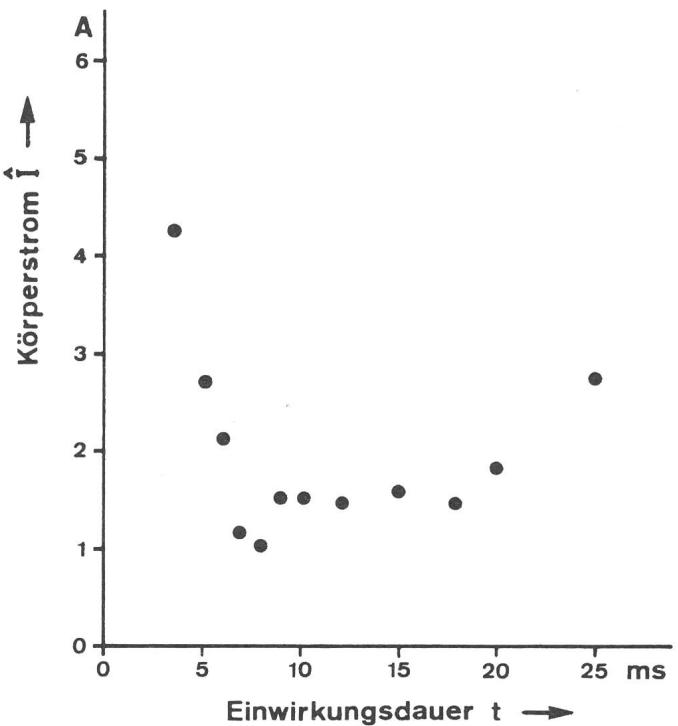


Fig. 4 Flimmerstromstärken  $I$  (Scheitelwerte) für Wechselstromimpulse von 1 ms bis 25 ms nach Green [9].  
Beginn der Durchströmungsdauer im Stromnulldurchgang.

In Tabelle II ist die Berechnung der Strommenge der Impulse für Impulsdauern von 1 ms bis 5 ms durchgeführt, und in Tabelle III ist die gleiche Rechnung für die Stromquadrate, also die Amperequadratsekundenzahlen, angegeben.

Berechnung der Strommenge der Impulse für die Versuche von Green und Impulsdauern von 1 ms ... 5 ms, Impulsbeginn im Stromscheitelwert

Tabelle II

| Impulsdauer<br>ms | Min. Flimmerstromstärke<br>Scheitelwert<br>$I_{fl}(P)$<br>A | Min. Flimmerstromstärke<br>arithm. Mittelwert<br>$I_{fl(av)}$<br>A | Impulsstrom-<br>menge<br>$F_q$<br>mA |
|-------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| 1                 | 4,8                                                         | 4,58                                                               | 4,58                                 |
| 2                 | 3,3                                                         | 3,04                                                               | 6,08                                 |
| 3                 | 2,9                                                         | 2,46                                                               | 7,4                                  |
| 4                 | 2,3                                                         | 1,74                                                               | 6,9                                  |
| 5                 | 2,5                                                         | 1,6                                                                | 7,9                                  |

Berechnung des Amperequadratsekundenwertes für die Versuche von Green und Impulsdauern von 1 ms ... 5 ms, Impulsbeginn im Stromscheitelwert

Tabelle III

| Impulsdauer<br>ms | Min. Flimmerstromstärke<br>Scheitelwert<br>$I_{fl}(P)$<br>A | Min. Flimmerstromstärke<br>Effektivwert<br>$I_{fl(rms)}$<br>A | Amperequadrat-<br>sekunden<br>$F_e$<br>mA(A <sup>2</sup> s) |
|-------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 1                 | 4,8                                                         | 4,68                                                          | 21,9                                                        |
| 2                 | 3,3                                                         | 3,0                                                           | 18,0                                                        |
| 3                 | 2,9                                                         | 2,465                                                         | 18,2                                                        |
| 4                 | 2,3                                                         | 1,77                                                          | 12,5                                                        |
| 5                 | 2,5                                                         | 1,75                                                          | 15,3                                                        |

Fig. 3 Flimmerstromstärken  $I$  (Scheitelwerte) für Wechselstromimpulse von 1 ms bis 25 ms nach Green [9].  
Beginn der Durchströmungsdauer 2 ms vor dem Stromscheitelwert.

Die physikalische Grösse  $I^2 \cdot t$ , also die Amperequadratsekundenwerte, erlangen nicht nur in der Elektropathologie als spezielle Flimmerenergie, sondern auch im Leitungsschutz eine immer grössere Bedeutung in der Elektrotechnik. Es sollte daher, ähnlich wie bei der Strommenge die Einheit Amperesekunden als Coulomb abgekürzt wurde, auch für Amperequadratsekunden eine kürzere Einheitenbezeichnung eingeführt werden.

In der Tabelle IV sind für Impulsdauern bis 25 ms die Messwerte von Green für die Messreihe, die im Scheitelwert beginnt, zusammen mit den daraus berechneten Impulstrommengen und Spez. Flimmerenergien angegeben.

Für Durchströmungsdauern über 5 ms bleibt die Flimmerschwelle etwa konstant, ja nach den Versuchen mit dem Durchströmungsbeginn im Stromnulldurchgang und 2 ms vor dem Scheitelwert scheint sogar eine ansteigende Tendenz erkennbar zu sein.

Es soll noch einmal darauf hingewiesen werden, dass bei den zur Verfügung stehenden Messpunkten statistische Auswertungen nur mit grösster Zurückhaltung durchgeführt werden können und auch Messwerte selbst nur grobe Anhaltspunkte liefern. Als erste Annahme und Hypothese für die weiteren Überlegungen könnte die spez. Flimmerenergie als Kriterium für das Auslösen von Flimmern bei Impulsen verschiedener Form dienen.

Messwerte der Versuchsreihe von Green für Impulsdauern von 1 ms ... 25 ms mit den daraus abgeleiteten Impulstrommengen  $F_q$  und spez. Flimmerenergien (Amperequadratsekundenwerte)  $F_e$ , Impulsbeginn im Stromscheitelwert

Tabelle IV

| Impulsdauer<br>ms | Anzahl der<br>Messungen | Min. Flimmerstromstärke<br>$I_{fl}$ (A) |              | Impulstrommenge<br>$F_q$<br>mA s | Spez.<br>Flimmer-<br>energie $F_e$<br>mA² s |
|-------------------|-------------------------|-----------------------------------------|--------------|----------------------------------|---------------------------------------------|
|                   |                         | Scheitelwert                            | Effektivwert |                                  |                                             |
| 1                 | 10                      | 4,8                                     | 4,68         | 4,58                             | 21,9                                        |
| 2                 | 12                      | 3,3                                     | 3,0          | 6,08                             | 18,0                                        |
| 3                 | 8                       | 2,9                                     | 2,46         | 7,4                              | 18,2                                        |
| 4                 | 16                      | 2,3                                     | 1,77         | 6,9                              | 12,5                                        |
| 5                 | 8                       | 2,5                                     | 1,75         | 7,9                              | 15,3                                        |
| 6                 | 5                       | 2,8                                     | -            | 10,7                             | 24,0                                        |
| 8                 | 5                       | 2,7                                     | -            | 13,7                             | 28,8                                        |
| 10                | 7                       | 2,8                                     | 1,98         | 17,8                             | 39,2                                        |
| 12                | 3                       | 2,7                                     | -            | 20,6                             | 43,2                                        |
| 15                | 6                       | 2,8                                     | 1,98         | 26,7                             | 58,8                                        |
| 18                | 3                       | 2,5                                     | -            | 28,6                             | 56,0                                        |
| 20                | 7                       | 2,0                                     | 1,41         | 25,4                             | 40,0                                        |
| 25                | 5                       | 2,0                                     | 1,41         | 31,8                             | 50,0                                        |

Die erwähnten Messungen von Antoni am isolierten Meerschweinchenherzen [10], bei denen mit Rechteckimpulsen gereizt wurde, sind in Figur 5 dargestellt, und zwar für Impulsdauern von 0,5 bis 40 ms. Berechnet man aus den Messwerten der Figur 5 für die Flimmerschwellen die Grössen  $I \cdot t$  und  $I^2 \cdot t$ , so findet man, dass die Flimmerschwelle mehr dem Gesetz  $I^2 \cdot t = \text{const.}$  als  $I \cdot t = \text{const.}$  folgt.

Sicher sind sowohl die Impulstrommengen als auch die spez. Flimmerenergie Grössen, die für die Beurteilung der Flimmergefahr und der Wahrscheinlichkeit des Auslösens von Herzkammerflimmern wesentlich sind.

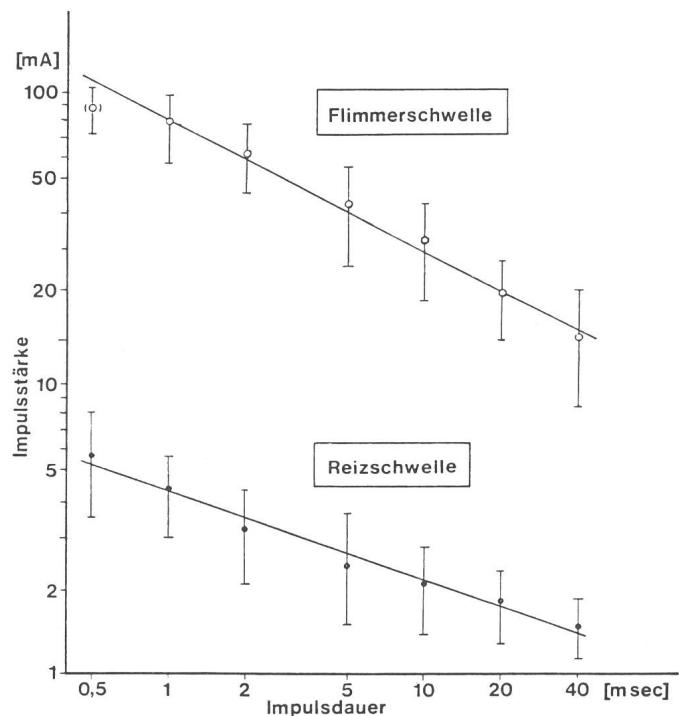


Fig. 5 Reizschwelle und Flimmerschwelle des isolierten Meerschweinchenherzens bei Reizung mit Rechteckimpulsen. Die Impulsdauer und -stärke sind im logarithmischen Maßstab dargestellt. Punkte bzw. Kreise bedeuten jeweils Mittelwerte aus 16 (bzw. 14) Einzelmessungen an ebensovielen Herzen.

## 2. Theoretische Überlegungen betreffend die Flimmerschwelle für Impulse mit einer Impulsdauer unter 5 ms

Für Einwirkungsdauern über 10 ms ist die Flimmerschwelle für Gleich- und Wechselstromreize (50/60 Hz) einigermassen bekannt [6, 7, 8, 13]. Auf Grund von Tierversuchen hat die in der IEC-TC 64 dafür zuständige Arbeitsgruppe für Stromflussdauern über 10 ms und Wechselstromreize 50/60 Hz eine Sicherheitskurve festgelegt, die die Grenzen angibt, innerhalb deren das Auftreten von Flimmern bei Längsdurchströmungen auch beim Menschen unwahrscheinlich ist. Statistische Auswertungen ermöglichen aber auch eine etwas genauere Abschätzung der Flimmerwahrscheinlichkeiten für 5%, 50% und 95%. Es ergeben sich dabei die in Tabelle V dargestellten Gefährdungszonen, die nach den Ergebnissen von Green bis zu einer Einwirkungsdauer von 4 ms extrapoliert werden können.

Um auch für den Zeitbereich unter 4 ms bis zu 0,1 ms, der für die Wirkungen von Impulstromen interessant ist, Angaben machen zu können, wird vorgeschlagen, in pragmatischer Art die von Green gemessenen Flimmerschwellen für 4 ms und 1 ms heranzuziehen. Da die  $I^2 \cdot t$ -Werte in diesem Bereich ansteigen, also mit den in den Kurven eingetragenen Effektivwerten weder die Gleichungen  $I^2 \cdot t = \text{const.}$  noch  $I \cdot t = \text{const.}$  erfüllt sind, wird vorgeschlagen, für 50% Flimmerwahrscheinlichkeit die gemessenen Effektivwerte nach Tabelle III, abgerundet für 4 ms = 1,6 A und für 1 ms = 4,5 A, für die Festlegung der Flimmerschwelle als Gerade zwischen 4 ms und 0,1 ms zu benutzen.

Gefährdungsbereiche für Herzkammerflimmern bei Wechselstromreizen 50/60 Hz

Tabelle V

| Einwirkungsdauer                                        | ms | 4    | 20   | 100  | 1000 | 10000 |
|---------------------------------------------------------|----|------|------|------|------|-------|
| Sicherheitskurve IEC<br>$I_{S-\text{rms}}$              | mA | 500  | 500  | 400  | 50   | 40    |
| 5% Flimmerwahrscheinlichkeit<br>$I_{5\%- \text{rms}}$   | mA | 1000 | 1000 | 800  | 70   | 50    |
| 50% Flimmerwahrscheinlichkeit<br>$I_{50\%- \text{rms}}$ | mA | 1600 | 1600 | 1400 | 150  | 80    |
| 95% Flimmerwahrscheinlichkeit<br>$I_{95\%- \text{rms}}$ | mA | 3300 | 3300 | 2800 | 380  | 150   |

Der 50%-Wert von 1,6 A entspricht dann dem Ergebnis von Kouwenhoven [13] für eine Durchströmungsdauer von 10 ms, umgerechnet auf 50 Hz, und liegt etwa zwischen den Werten von Green für die Durchströmungsversuche im Stromnulldurchgang und im Scheitelwert für eine Durchströmungszeit von 10 ms.

Der Verlauf der Kurven für andere Flimmerwahrscheinlichkeiten kann dann durch Parallelverschiebungen ermittelt werden. Damit erhält man die Flimmerschwellen nach Figur 6 für einen Zeitbereich zwischen 0,1 ms und 10 s.

Um Impulse verschiedener Form miteinander vergleichen zu können, also Rechteckimpuls, sinusförmigen Halbwellenimpuls und Kondensatorentladung, wird, wie schon erwähnt, postuliert, dass für den Vergleich die Energie des Impulses massgebend ist.

Diese Annahme, dass Impulse verschiedener Form die gleiche physiologische Wirkung in bezug auf das Herz-

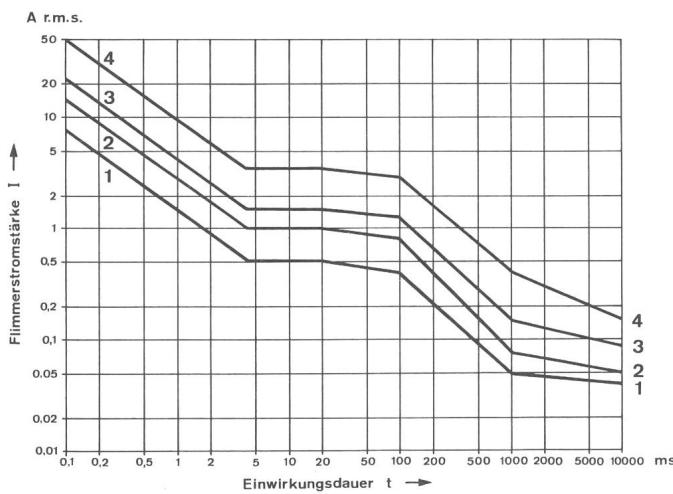


Fig. 6 Normungsvorschlag für den Menschen einschl. Kinder: Flimmerschwellen für 5%, 50% und 95% Wahrscheinlichkeit für Herzkammerflimmern und IEC-Sicherheitsschwelle  $S$  für Einwirkungsdauern von 0,1 s bis 10 s.

- 1 Sicherheitsschwelle nach IEC
- 2 Flimmerschwelle für 5%
- 3 Flimmerschwelle für 50%
- 4 Flimmerschwelle für 95% Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Herzkammerflimmern

kammerflimmern im Zeitbereich unter 4 ms haben, wenn ihr Energieinhalt gleich ist, liegt nahe, ist aber experimentell nicht gesichert.

Es wird also im folgenden angenommen, dass unter gegebenen Bedingungen (Stromweg, Herzphase, Impulsdauer) der  $I^2 \cdot t$ -Wert eines gerichteten Impulses für Impulsdauern von 0,1 bis 4 ms einen für das Auslösen von Herzkammerflimmern charakteristischen Wert darstellt, das heißt, dass ihm eine bestimmte Flimmerwahrscheinlichkeit zugeordnet werden kann. Diese Größe wurde ja «spezifische Flimmerenergie  $F_e$ » genannt. Sie wird in  $A^2 s$  oder  $Ws/\Omega$  gemessen.

Multipliziert man die spezifische Flimmerenergie  $F_e$  mit dem Körperwiderstand im Stromweg, dann erhält man die während des Impulses im Körper verbrauchte Energie in Ws. Im Falle einer Kondensatorentladung soll dabei die Impulsdauer als jene Zeit festgelegt werden, innerhalb derer die Impulstromstärke auf 5% ihres Anfangswertes abgesunken ist. Die darüber hinaus noch vorhandene Restenergie des Impulses kann vernachlässigt werden.

Für den im folgenden durchgeführten Vergleich der spezifischen Flimmerenergien von Rechteckimpulsen, sinusförmigen Halbwellenimpulsen und Kondensatorentladungen werden folgende Symbole verwendet:

- |               |                                                                   |
|---------------|-------------------------------------------------------------------|
| $I_{DC}$      | Stromstärke (identisch mit Effektivwert) des Rechteckimpulses     |
| $I_{AC(rms)}$ | Effektivwert der Stromstärke des sinusförmigen Halbwellenimpulses |
| $I_{AC(P)}$   | Scheitelwert der Stromstärke des sinusförmigen Halbwellenimpulses |
| $I_{C(rms)}$  | Effektivwert der Stromstärke der Kondensatorentladung             |
| $I_{C(P)}$    | Spitzenwert der Stromstärke der Kondensatorentladung              |

Die Zusammenhänge sind in Figur 7 dargestellt.

Wenn die Ladespannung des Kondensators zu Beginn der Entladung  $U_C$  ist, dann wird der Spitzenwert der Stromstärke der Kondensatorentladung durch den Anfangs-

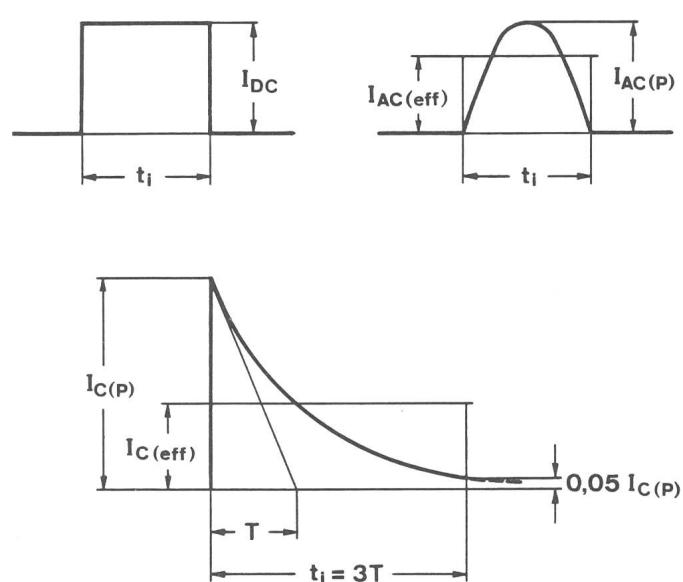


Fig. 7 Bezeichnung der charakteristischen Stromwerte für Rechteckimpulse, sinusförmige Halbwellenimpulse und Kondensatorentladungen.

widerstand  $R_B$  des menschlichen Körpers begrenzt [12]. Während der Entladung ändert sich dieser Widerstand infolge des Aufladens der Körperkapazitäten, je nach der Impulsdauer unter Umständen bis auf den Wert des Körperwiderstandes im stationären Zustand  $R_T$ .

Die spezifischen Flimmerenergien können damit wie folgt berechnet werden:

a) Rechteckimpuls:  $F_e = I_{DC}^2 \cdot t_i$

b) sinusförmiger Halbwellenimpuls:

$$F_e = \frac{I_{AC(P)}^2}{2} \cdot t_i = I_{AC(rms)}^2 \cdot t_i$$

c) Kondensatorentladung mit Zeitkonstante  $T$ :

$$F_e = I_{C(P)}^2 \int_0^\infty e^{-\frac{2t}{T}} dt = I_{C(P)}^2 \cdot \frac{T}{2}$$

definitionsgemäss ist  $F_e$  aber auch gleich  $I_{C(rms)}^2 \cdot t_i$

wobei mit  $t_i$  die Impulsdauer definiert wird, nach der die Impulstromstärke nur mehr 0,05  $I_{C(P)}$  beträgt. Dies ist für  $t_i = 3T$  der Fall.

Damit ergibt sich

$$I_{C(P)}^2 \cdot \frac{T}{2} = I_{C(rms)}^2 \cdot t_i = I_{C(rms)}^2 \cdot 3T$$

so dass gilt  $I_{C(rms)} = \frac{I_{C(P)}}{\sqrt{6}}$

Figur 8 zeigt den Vergleich eines Rechteckimpulses, eines sinusförmigen Halbwellenimpulses und einer Kondensatorentladung mit gleicher Impulsdauer  $t_i$  und gleichen effektiven Impulstromstärken. Damit sind die Amperequadratsekundenwerte der drei Impulse, das heisst ihre spezifische Flimmerenergie  $F_e$ , gleich gross, und entsprechend der früher getroffenen Annahme sind gleiche Gefährdungen in bezug auf das Herzkammerflimmern zu erwarten.

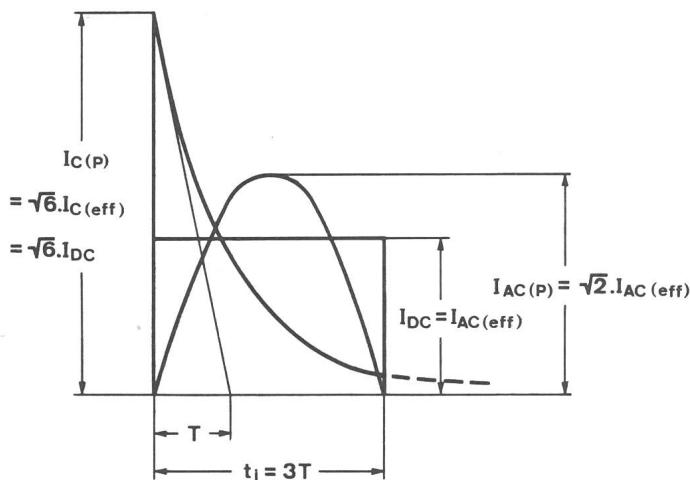


Fig. 8 Vergleich eines Rechteckimpulses, eines sinusförmigen Halbwellenimpulses und einer Kondensatorentladung mit gleicher Impulsdauer  $t_i$  und gleicher spezifischer Flimmerenergie  $F_e$

Es ist anzunehmen, dass bei steigenden Impulstromstärken, beginnend bei ungefährlichen Werten, Kammerflimmern zuerst nur in der vulnerablen Phase der Herzperiode ausgelöst wird. Bei hohen Impulsenergien scheint nach den Versuchen von Peleska [3, 4] Flimmern auch aufzutreten, wenn der Impuls ausserhalb der vulnerablen Periode einsetzt. Wahrscheinlich spielen dabei, wie bereits erwähnt, auch Schädigungen des Myokards und Störungen der Reizleitung eine Rolle.

### 3. Die Wahrnehmbarkeitsschwelle

Wie bereits erwähnt, wurden die ersten Messungen über die Wahrnehmbarkeitsschwelle bei Kondensatorentladungen von O. Stauss durchgeführt [1]. Dabei wurden Spannungen und Ladungsmengen gemessen, bei denen als Empfindung ein leichtes Stechen in den Fingergelenken verspürt wurde. Figur 9 zeigt die gefundenen Schwellen für «Tippen» auf Elektrodenflächen (Kurve 1), grossflächiges Ummassen von Zylinderelektroden mit beiden Händen in trockenem Zustand (Kurve 2) und Eintauchen der Hände in eine Sodalösung (Kurve 3). Dabei ist die Ladungsmenge als Funktion der Ladespannung aufgetragen. Man erkennt, dass es sowohl einen Kleinstwert der Ladungsmenge als auch einen Kleinstwert der Ladespannung und damit des Spitzstromes der Entladung gibt, unter denen keine Wahrnehmung auftritt.

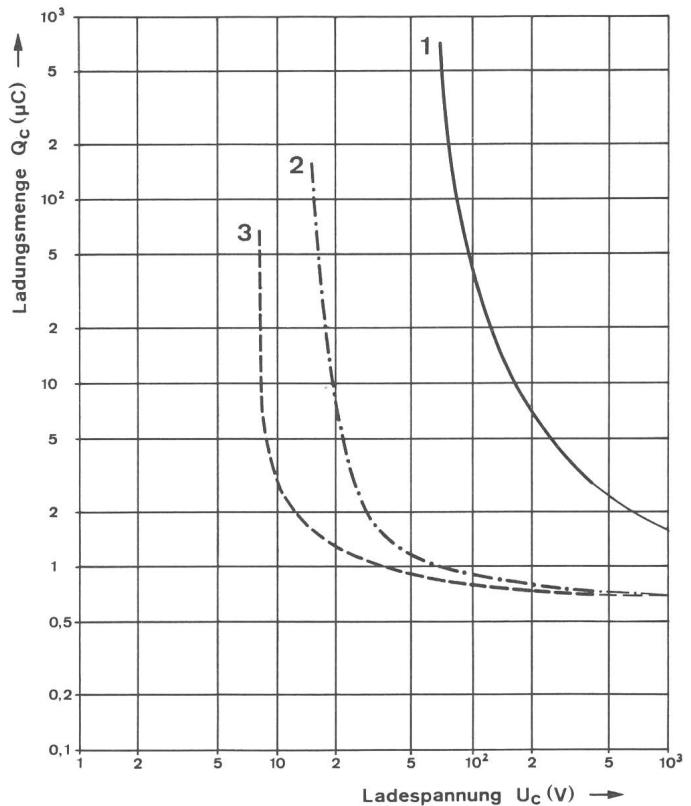


Fig. 9 Wahrnehmbarkeitsschwelle bei Kondensatorentladungen nach O. Stauss

Kurve 1 «Tippen»

Kurve 2 «Grossflächiges Ummassen von Zylinderelektroden mit beiden Händen in trockenem Zustand»

Kurve 3 «Eintauchen der Hände in Sodalösung»

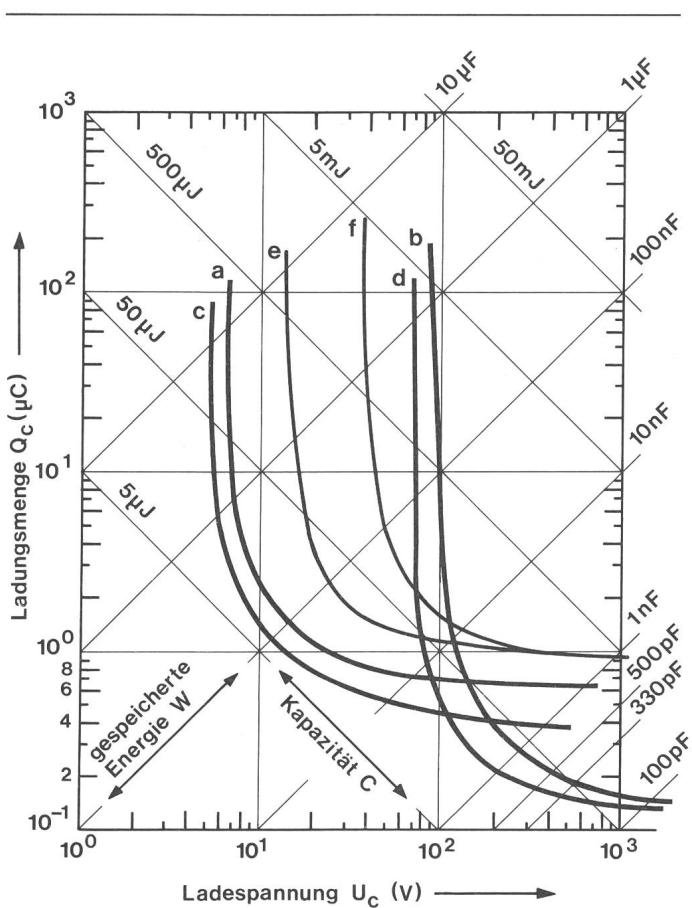


Fig. 10 Wahrnehmbarkeitsschwelle bei Kondensatorentladungen über den menschlichen Körper

#### Schweizerische Messungen

a Wahrnehmbarkeitsgrenze  
Messung mittels Standard-Elektroden 80 mm Ø,  
 $l = 150$  mm an Erwachsenen

b Wahrnehmbarkeitsgrenze  
Messung mittels Stiftelektroden 5 mm Ø an Erwachsenen  
c wie a, jedoch Messung an Kindern zwischen 4 und 14 Jahren  
d wie b, jedoch Messung an Kindern zwischen 4 und 14 Jahren

#### Österreichische Messungen

e Wahrnehmbarkeitsgrenze  
Messung mittels Standard-Elektroden 80 mm Ø,  
 $l = 100$  mm an Erwachsenen

f Wahrnehmbarkeitsgrenze  
Messung mittels Drahtelektroden 4 mm Ø  
(mit den Händen umfasst)

Um auch hier nähere Angaben machen zu können, wurden zunächst in Österreich einige Messungen an erwachsenen Personen durchgeführt, deren Ergebnisse in Figur 10 dargestellt sind (Kurven e und f).

Zur Ergänzung der in Österreich ermittelten Resultate wurden am Sitz des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins an weiteren 65 Personen, darunter 13 Kinder im Alter von 4 bis 14 Jahren, Messungen der Wahrnehmbarkeitsschwelle vorgenommen. Es gelangten Kondensatoren mit Kapazitäten zwischen 100 pF und 10 µF, die aus einer Gleichstromquelle voll aufgeladen worden waren, über den Körper der Probanden zur Entladung. In einer ersten Versuchsreihe war mit jeder Hand ein verchromtes Kupferrohr von 80 mm Durchmesser und 150 mm Länge zu umfassen. In der zweiten Versuchsreihe dienten zwei Metallstifte von 5

mm Durchmesser, die mit einem Gewicht von 2 N auf der Innenseite jedes Zeigefingers auflagen, als Elektroden. Dieser zweite Versuch war als Nachbildung einer Berührung von Steckerstiften gedacht. Im übrigen wurden die Versuchseinrichtung und der Versuchsablauf gleich gestaltet wie bei den österreichischen Versuchen. Damit waren vergleichbare Messwerte zu erwarten.

Wie der Figur 10 entnommen werden kann, entspricht der Verlauf der Kurven grundsätzlich den Feststellungen von Stauss. Im Vergleich zu den österreichischen Resultaten scheinen die schweizerischen Probanden etwas empfindlicher reagiert zu haben. Es hat sich indessen gezeigt, dass bei der Ermittlung von Empfindungsschwellen subjektive Beeinflussungen eine Rolle spielen. Die Motivierung der Versuche, die Umgebung des Versuchsortes und die Auswahl der Probanden mag in Österreich und in der Schweiz etwas unterschiedlich gewesen sein. Übrigens sind die Messwertunterschiede nicht von wesentlicher Bedeutung. Auffällige Unterschiede ergaben sich hingegen zwischen den Resultaten bei Verwendung von Zylinder- und von Stiftelektroden. Offenbar beeinflussten die wesentlich unterschiedlichen Stromdichten an den Übergangsstellen von den Elektroden auf den Körper das Empfinden.

#### 4. Die Schmerzschwelle

Nach O. Stauss [1] kann man als Schmerzschwelle eine Kondensatorentladung definieren, die auf eine Versuchsperson so schmerhaft wirkt, dass ein nochmaliges Anfassen der Elektroden abgelehnt wird. Obwohl diese Festle-

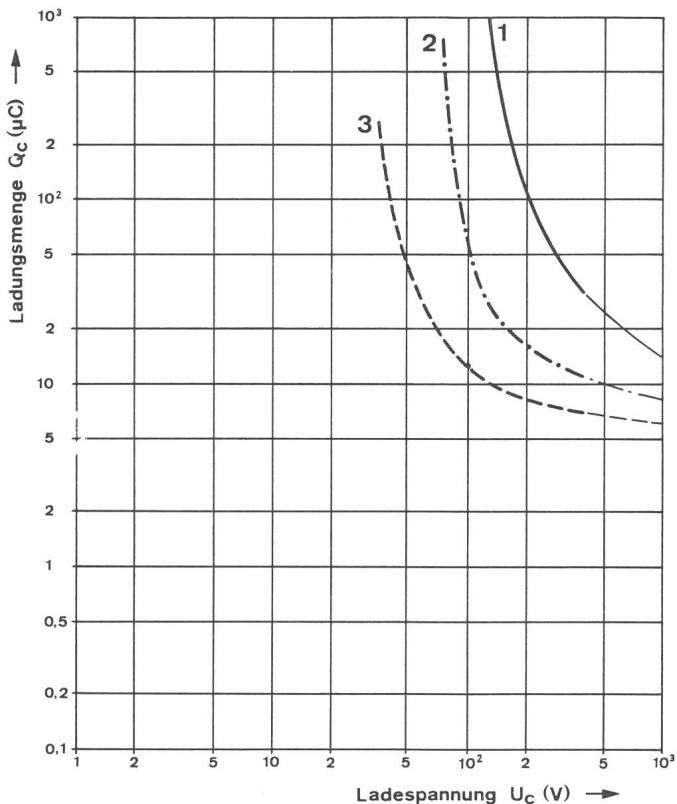


Fig. 11 Schmerzschwelle bei Kondensatorentladungen nach O. Stauss

Kurve 1 «Tippen»

Kurve 2 «Großflächiges Umfassen von Zylinderelektroden mit beiden Händen im trockenen Zustand»

Kurve 3 «Eintauchen der Hände in Sodalösung»

gung dem subjektiven Empfinden einen weiten Spielraum lässt, erhält man doch recht brauchbare Werte bei den Messungen. Figur 11 zeigt ähnlich wie Figur 9 die gefundenen Schmerzschwellen für die drei Berührungsformen «Tippen», «Elektroden mit trockenen Händen umfasst» und «Hände in Sodalösung getaucht». Diese Versuche wurden allerdings nur von einer Person ausgeführt. Auch für die Schmerzschwelle findet man einen Kleinstwert der Ladungsmenge und der Ladespannung.

## 5. Die Flimmerschwelle

Die im Abschnitt 2 getroffenen Festlegungen für die Flimmerschwellen für 5%, 50% und 95% Flimmerwahrscheinlichkeit und die Sicherheitsschwelle im Zeitbereich von 10 ms bis 0,1 ms sind in Figur 12 noch einmal graphisch dargestellt. In diese Figur ist auch noch die Grenzkurve  $F_q = 2,5 \text{ mA}$  eingezeichnet, die als Gefahrengrenze für Weidezaungeräte vorgeschrieben ist, wobei Rechteckimpulse angenommen wurden. Es ist auch interessant, die neuen Ergebnisse mit der Dalzielschen Kennlinie der spez. Flimmerenergie für 0,5% Flimmerwahrscheinlichkeit  $F_e = 0,027 \text{ A}^2\text{s}$ , die seinerzeit unter Annahme einer Gaußschen Normalverteilung für den Zeitbereich von 10 ms bis 5 s abgeleitet wurde, zu vergleichen [11]. Wie man erkennt, gibt das Strommengenkriterium einen zu steilen Verlauf und kann nur für Zeiten über 1 ms als Sicherheitskriterium angegeben werden.

Das Dalzielsche Energiekriterium, das ja für eine Flimmerwahrscheinlichkeit von 0,5% abgeleitet wurde, sollte ebenfalls nicht mehr verwendet werden, weil es keinen Zusammenhang mit definierten Flimmerwahrscheinlichkeiten in den verschiedenen Zeitbereichen liefert. Trotzdem ge-

bürt Dalziel das Verdienst, als erster auf die Bedeutung der  $I^2 \cdot t$ -Werte im Zusammenhang mit dem Auslösen von Herz-Kammerflimmern hingewiesen zu haben.

Um diesen Abschnitt abzuschliessen, soll abgeschätzt werden, wie die von Peleska und Kouwenhoven genannten Ergebnisse [2, 3, 4] mit den vorhergehenden Annahmen vereinbar sind.

Bei den Versuchen von Peleska werden dafür die kleinsten Ladeenergien herangezogen, die, wie erwähnt, sofort nach dem Impuls Flimmern ausgelöst haben. Ein charakteristischer Wert dafür ist, bei Querdurchströmung des Thorax mit Elektrodenflächen von  $15 \text{ cm}^2$  (Körperwiderstand zwischen den Elektroden  $40 \Omega$ ) und Applizierung des Impulses in der vulnerablen Phase, eine Entladungsenergie von  $4 \text{Ws}$  ( $C = 32 \mu\text{F}$ , Ladespannung  $U_C = 500 \text{V}$ ). Damit ergibt sich die Zeitkonstante mit  $T = R \cdot C = 1,28 \text{ ms}$  und die Impulsdauer  $t_i = 3 T = 4 \text{ ms}$ . Der Spitzenstrom liegt bei  $12,5 \text{ A}$  mit einem Effektivwert von  $5 \text{ A}$ . Damit ergibt sich  $F_e$  mit  $100 \text{ mA}^2\text{s}$ , ein Wert, der sicher für das Auslösen von Flimmern realistisch ist. Kouwenhoven [2] arbeitete dagegen mit Elektroden von  $150 \text{ cm}^2$  Fläche an beiden Seiten des Thorax, so dass bei seinen Versuchen der Körperwiderstand kaum mehr als  $5 \Omega$  betragen haben wird. Die Versuche wurden ohne Synchronisation mit der Herzphase durchgeführt. Wegen der grossen Elektrodenflächen war sicher eine sehr kurze Impulsdauer gegeben (bei  $C = 50 \mu\text{F}$ , Zeitkonstante  $T = 0,25 \text{ ms}$ , Impulsdauer  $t_i = 3 T = 0,75 \text{ ms}$ ).

Kouwenhoven gibt Flimmerenergien zwischen 80 und 150 Ws an. Bei einem Kondensator von  $50 \mu\text{F}$  ergibt sich für  $W = 80 \text{ Ws}$  bei einer Ladespannung von  $2 \text{kV}$  und bei  $5 \Omega$  Körperwiderstand ein Spitzenstrom von  $400 \text{ A}$ . Die von Kouwenhoven verwendeten Impulse ähneln daher sehr Entladungen, wie sie bei Gewittern und direktem Blitzschlag in den Menschen auftreten [14]. Die spezifische Flimmerenergie  $F_e$  liegt bei  $20 \text{ A}^2\text{s}$  und damit um Zehnerpotenzen höher als die in Figur 10 angegebenen Werte für die 50%-Flimmergrenze. Die Ursache dürfte in den grossen Elektrodenflächen liegen, vielleicht erfolgten die Entladungen auch nicht gerade in der vulnerablen Periode, oder es hat sich um die Form des Flimmerns gehandelt, die auch Peleska bei hohen Entladungsenergien beobachtet hat.

## 6. Anwendungsbeispiele

Die in den vorangegangenen Abschnitten gewonnenen Erkenntnisse ermöglichen es, die physiologischen Wirkungen von Impulsen verschiedener Intensität zu beurteilen. Es folgen zwei Anwendungsbeispiele, die zeigen sollen, wie bei der Beurteilung pathologischer Wirkungen von Stromimpulsen vorgegangen werden kann. Dabei soll noch einmal darauf hingewiesen werden, dass die experimentellen Grundlagen für diese Beurteilungen noch sehr bescheiden sind und sicher bei Vorliegen von mehr Datenmaterial aus Versuchen Verbesserungen notwendig sein werden. Aber beim gegenwärtigen Stand unseres Wissens erscheinen die in dieser Arbeit angegebenen Schwellenwerte für die Beurteilung der Wirkungen von unipolaren Impulsen vertretbar zu sein. Zuerst seien die physiologischen Wirkungen der Entladung eines Kondensators  $C = 1 \mu\text{F}$  bei Ladespannungen von 10, 100, 1000 und 10 000 V betrachtet. Die Berüh-

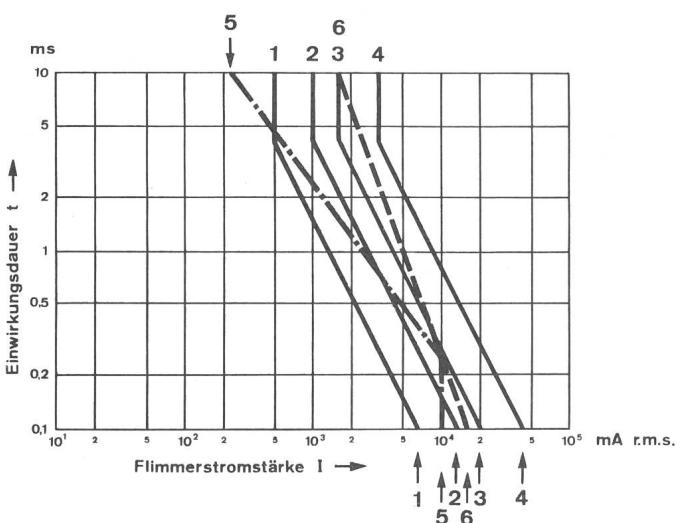


Fig. 12 Flimmerschwellen für 5%, 50% und 95% Wahrscheinlichkeit für Herz-Kammerflimmern und IEC-Sicherheitsschwelle  $S$  für Einwirkungsdauern von 0,1 ms bis 10 ms.

- 1 Sicherheitsschwelle nach IEC
- 2 Flimmerschwelle für 5%
- 3 Flimmerschwelle für 50%
- 4 Flimmerschwelle für 95% Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Herz-Kammerflimmern
- 5 Grenzlinie für Weidezaungeräte nach IEC,  $F_q = 2,5 \text{ mA}$
- 6 Dalzielsches Energiekriterium  
 $F_e = 0,027 \text{ A}^2\text{s}$

*Physiologische Wirkungen von Kondensatorenentladungen*  
 $C = 1 \mu F$  bei verschiedenen Ladespannungen und  
einer Impulsdauer  $t_i = 3 ms$

Tabelle VI

| Ladespannung<br>$U_C$<br>V                                                         | 10                    | 100                 | 1000            | 10 000                  |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|---------------------|-----------------|-------------------------|
| Entlade-Spitzenstrom<br>$I_{C(P)}$<br>A                                            | 0,01                  | 0,01                | 1               | 10                      |
| Entladestrom Effektivwert A<br>$I_{C(rms)} = \frac{I_{C(P)}}{\sqrt{6}}$            | 0,004                 | 0,04                | 0,4             | 4                       |
| Elektrizitätsmenge<br>$F_q$<br>mAs                                                 | 0,01                  | 0,1                 | 1               | 10                      |
| Entladeenergie<br>$W_C$<br>Ws                                                      | $0,05 \cdot 10^{-3}$  | $5 \cdot 10^{-3}$   | 0,5             | 50                      |
| spez. Flimmerenergie<br>$F_e^1)$<br>m(A <sup>2</sup> s)<br>( $R_B = 1000 \Omega$ ) | $0,048 \cdot 10^{-3}$ | $4,8 \cdot 10^{-3}$ | 0,48            | 48                      |
| Physiologische Wirkungen                                                           | keine Wahrnehmung     | schmerhaft          | sehr schmerhaft | Flimmern wahrscheinlich |

<sup>1)</sup> Die spez. Flimmerenergie  $F_e$  berechnet sich aus  $F_e = I_{C(rms)}^2 \times t_i$  und liegt entsprechend den getroffenen Annahmen nur geringfügig unter dem Wert der sich aus der Entladeenergie gebrochen durch den Anfangswiderstand ergibt.

*Physiologische Wirkungen von Kondensatorenentladungen*  
 $C = 20 \mu F$  bei verschiedenen Ladespannungen und  
einer Impulsdauer  $t_i = 30 ms$

Tabelle VII

| Ladespannung<br>$U_C$<br>V                                              | 10                | 100             | 1000                                  | 10 000                                                       |
|-------------------------------------------------------------------------|-------------------|-----------------|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Entlade-Spitzenstrom<br>$I_{C(P)}$<br>A                                 | 0,02              | 0,2             | 2                                     | 20                                                           |
| Entladestrom Effektivwert A<br>$I_{C(rms)} = \frac{I_{C(P)}}{\sqrt{6}}$ | 0,008             | 0,08            | 0,8                                   | 8                                                            |
| Elektrizitätsmenge<br>$F_q^1)$<br>mAs                                   | 0,2               | 2,0             | 20                                    | 200                                                          |
| Entladeenergie<br>$W_C$<br>Ws                                           | $10^{-3}$         | 0,1             | 10                                    | 1000                                                         |
| spez. Flimmerenergie<br>$F_e^1)$<br>m(A <sup>2</sup> s)                 | —                 | —               | —                                     | —                                                            |
| Physiologische Wirkungen                                                | keine Wahrnehmung | sehr schmerhaft | gefährlich, Flimmern unwahrscheinlich | gefährlich, Flimmern wahrscheinlich oder schwere Arrhythmien |

<sup>1)</sup> Da die Impulsdauer länger ist als 10 ms, muss die Flimmergefahr nach Tabelle V beurteilt werden.

zung erfolgte Hand/Fuss. Der Körperanfangswiderstand  $R_i$  sei mit  $1000 \Omega$  angenommen. Damit ergibt sich die Zeitkonstante der Entladung  $T = 1 ms$  und die Impulsdauer  $t_i = 3 T = 3 ms$ .

In Figur 12 findet man für  $t_i = 3 ms$  aus der Kurve 3 für 50% Flimmerwahrscheinlichkeit die Stromstärke von 2 A, aus der Kurve 1 ergibt sich ein Strom von 0,6 A als Sicherheitsgrenze.

Unter Beachtung des Vorhergesagten ergeben sich somit in Abhängigkeit von den Ladespannungen die in Tabelle VI angegebenen physiologischen Wirkungen.

Als zweites Beispiel sei eine Berührung Hand/Rumpf mit einem Körperanfangswiderstand  $R_B = 500 \Omega$  angenommen. Der Kondensator habe eine Kapazität von  $20 \mu F$ , ebenfalls bei Ladespannungen von 10, 100, 1000 und 10 000 V, Zeitkonstante 10 ms, Impulsdauer  $t_i = 30 ms$ , daher beträgt nach Tabelle V die kritische Stromstärke für 50% Flimmerwahrscheinlichkeit 1,6 A, die Sicherheitsschwelle 0,5 A. Damit ergeben sich die in Tabelle VII angegebenen physiologischen Wirkungen.

kammerflimmerns physikalische Größen zu finden, denen die Auslösung der entsprechenden physiologischen Wirkungen von unipolaren Impulsen mit Impulsdauern im Millisekundenbereich zugeordnet werden kann.

Für die Wahrnehmbarkeitsschwelle und die Schmerzschwelle scheint die Elektrizitätsmenge massgebend zu sein. Aber auch beim Herzkammerflimmern dürfte die Elektrizitätsmenge ein brauchbares Mittel sein, um die Flimmergefahr abzuschätzen, wenn die Impulsdauern unter etwa 4 ms liegen. Für eine bestimmte Flimmerwahrscheinlichkeit ergeben sich dann etwa konstante Werte.

Betrachtet man im Millisekundenbereich die spezifische Flimmerenergie, so findet man, dass unter etwa 4 ms Impulsdauer die Amperequadratsekunden-Werte ansteigen, und zwar bei 1,0 ms Impulsdauer auf etwa den doppelten Wert, doch erscheint dieses Ergebnis statistisch nicht gesichert.

Um Impulse verschiedener Form miteinander in bezug auf das Kammerflimmern vergleichen zu können, wurde die spezifische Flimmerenergie herangezogen, doch bedarf diese Hypothese noch der experimentellen Bestätigung.

Durch die neuen Erkenntnisse ist es möglich, die für technischen Wechselstrom von Einwirkungsduern ab 10 ms bekannten Flimmerschwellen auch für kürzere Zeiten zu ergänzen, wobei in die Kurven die Effektivwerte der Impulssstromstärken eingetragen werden. Für eine Flimmerwahrscheinlichkeit von 50% und Zeiten von 4 ms oder kür-

## 7. Zusammenfassung

Ausgehend von den wenigen Messresultaten mit Impulströmen wurde versucht, für die Festlegung der Schwellenwerte der Wahrnehmung, des Schmerzes und des Herz-

zer ist die spezifische Flimmerstrommenge  $F_q$  etwa konstant und liegt bei 5 mC (mAs), die spezifische Flimmerenergie  $F_e$  beträgt bei 4 ms etwa 10 m ( $A^2s$ ), bei 1 ms etwa 20 m ( $A^2s$ ) und kann bei 0,1 ms durch Extrapolation mit etwa 40 m( $A^2s$ ) angegeben werden.

Die Schmerzschwelle liegt bei Kondensatorenentladungen bei 0,01...0,1 mC für Ladespannungen von 1000 V bis 100 V, die Wahrnehmbarkeitsschwelle ebenso bei 0,5...1,0  $\mu$ C für Ladespannungen von 1000 V bis 10 V.

Will man Sicherheitsgrenzen gegen Kammerflimmern festlegen, so könnte man die Werte für 5% Flimmerwahrscheinlichkeit wählen. Die bisher für elektrische Weidezaungeräte festgelegte Grenze von 2,5 mC ist nur haltbar, wenn zusätzlich festgelegt wird, dass der Scheitelwert des Stromimpulses 10 A nicht überschreiten darf, und zwar unabhängig vom Belastungswiderstand des Zaunes. Diese Festlegung ist bereits in den Bestimmungen für Weidezaungeräte enthalten.

Nicht geeignet ist die Vorschreibung einer maximalen Entladeenergie in Joule, weil die für das Flimmern bestimmende spezifische Flimmerenergie  $F_e$  je nach dem Körperwiderstand verschiedene Energiemengen im Körper freisetzt. So wird z.B. bei  $F_e = 10 \text{ m } (A^2s)$  und  $500 \Omega$  Körperwiderstand die Energie auf 5 Joule begrenzt, bei  $1000 \Omega$  auf 10 Joule, obwohl die gleiche Gefährdung vorliegt.

Es wird daher vorgeschlagen, in Zukunft als zweites Sicherheitskriterium die spez. Flimmerenergie zu verwenden.

Zieht man wieder die 5% Flimmerwerte heran, so ist das Ansteigen der zulässigen Werte für  $F_e$  bei kürzer werdenden Impulsdauern zu beachten. Vernünftige Werte wären 5 m( $A^2s$ ) bei einer Impulsdauer von 5 ms, 10 m( $A^2s$ ) bei 1 ms und 20 m( $A^2s$ ) bei 0,1 ms. Das sind rund die halben Werte, die mit 50% Wahrscheinlichkeit zum Flimmern führen.

## Literatur:

- [1] *Sauss, O.:* Die Wirkungen von Kondensatorenentladungen auf den menschlichen Körper. Elektrizitätswirtschaft (1934), H. 23, S. 508.
- [2] *Kouwenhoven, W.B.:* Effects of capacitor discharges on the heart. Trans. Amer. Inst. Electr. Eng., No. 56-6 (1956).
- [3] *Peleska, B.:* Cardiac arrhythmias following condenser discharges and dependence upon strength of current and phase of cardiac cycle. Circulation research, Vol. XIII, July 1963, p. 21...31.
- [4] *Peleska, B.:* Cardiac arrhythmias following condenser discharges led through an inductance. Circulation research Vo. XVI, January 1965, p. 11...18.
- [5] *Dalziel, Ch.F.:* A study of the hazards of impulse currents. AIEE-Transactions, Part III, Power Apparatus and Systems, Vol. 72, 1953, p. 1032...43.
- [6] *Biegelmeier, G.:* Über die statistische Auswertung von elektrophysiologischen Experimenten. E und M, 96. Jg. (1979), H.2, S. 61...71.
- [7] *Jacobsen, J., S. Buntenkötter und H.J. Reinhard:* Experimentelle Untersuchungen an Schweinen zur Frage der Mortalität durch sinusförmige, phasenangeschnittene sowie gleichgerichtete elektrische Ströme. Biomedizinische Technik, Band 30 (1975), H.3, S. 99...107.
- [8] *Knickerbocker, G.G.:* Fibrillating parameters of direct and alternating (20 Hz) currents separately and in combination. Conference paper IEEE, No. C 72-247-0 (1972).
- [9] *Green, H.L., J. Ross und P. Kurn:* Danger levels of short electrical shocks from 50 Hz supply. International conference Divetech, 1981, London.
- [10] *Younossi, K., H.J. Rüdiger, Kp. Haap und H. Antoni:* Untersuchungen über die Flimmerschwelle des isolierten Meerschweinchengerzens für Gleichstrom und sinusförmigen Wechselstrom. Basic. Res. Cardiol., Vol. 68 (1973), S. 551.
- [11] *Dalziel, C.F.:* Threshold 60-cycle fibrillating currents. AIEE-conference paper 60-40, 1960.
- [12] *Biegelmeier, G.:* Über die Körperimpedanzen lebender Menschen bei Wechselstrom 50 Hz. ETZ-Archiv (1979), H. 5, S. 145...150.
- [13] *Kouwenhoven, W.B., G.G. Knickerbocker, R.W. Chesnut, W.R. Milnor und D.J. Sass:* A-C shocks on varying parameters affecting the heart. Trans. Amer. Inst. Electr. Eng., Part I, Bd. 78 (1959), S. 163...169.
- [14] *Berger, K., G. Biegelmeier und H. Karabath:* Über die Wahrscheinlichkeit und den Mechanismus des Todes bei Blitzeinwirkungen. Bull. SEV, 69. Jg. (1978), H. 8, S. 361.

## Adresse der Autoren:

Prof. Dr. phil. G. Biegelmeier, Ing., Heiligenstädterstrasse 187, A-1190 Wien XIX, und E. Homberger, Oberingenieur, Eidg. Starkstrominspektorat, Postfach, 8034 Zürich.