

Monografie

**Stromunfälle, Herzkammerflimmern
und Letalität**

Stromunfälle, Herzkammerflimmern und Letalität

Statistische Auswertungen von Kenndaten zu Stromunfällen
und ihrer Letalität zur Beurteilung des Grenzrisikos für
das Auftreten von Herzkammerflimmern beim Menschen

Dr.-Ing. Dieter Kieback

Redaktion:
Priv. Doz. Dr. med. Wolfgang Zschiesche

Impressum

Herausgeber:

BG Elektro Textil Feinmechanik
Gustav-Heinemann-Ufer 130
50968 Köln

Alle Rechte vorbehalten

1. Auflage 2009

Zum Autor:

Dr.-Ing. Dieter Kieback war von 1970 bis zu seiner Pensionierung im Jahre 1997 Leiter des Instituts zur Erforschung elektrischer Unfälle bei der Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik (BGFE).

Er war in dieser Zeit Mitarbeiter in verschiedenen nationalen und internationalen Gremien und langjähriges Mitglied des VDE-Ausschusses „Sicherheits- und Unfallforschung“. Von 1986 bis 1997 führte er das Sekretariat der Arbeitsgruppe (Working Group) 4 der „International Electrotechnical Commission“ (IEC) und er war für die Sektion „Elektrizität“ der IVSS tätig.

Bei diesen Aktivitäten widmete er sich der Erforschung der Wirkungen des elektrischen Stroms auf den Menschen, den Gesundheitsgefahren durch Elektrizität und dem Arbeitsschutz. Darüber hinaus führte er die Unfalldatenbank des Instituts zur Erforschung elektrischer Unfälle in der BGFE und wertete diese in umfangreichen Statistiken aus. Aus seinen Aktivitäten resultierten über 100 Publikationen und Vorträge.

Inhalt

1	Vorbemerkung und Einführung	4	Anhang	24
2	Vergleichende Betrachtung der Letalität L bei Tierversuchen und der Unfallstatistik von Stromunfällen	5	Angaben zu den ausgewerteten Arbeitsunfällen durch elektrischen Strom	24
2.1	Voraussetzung	5	Erläuterungen zur Probit-Transformation	25
2.2	Letalität bei Niederspannungsunfällen mit 50 Hz Wechselspannung: Determinierende Einflussgrößen	7		
2.2.1	Letalität und Durchströmungsdauer	7		
2.2.2	Letalität und Stromweg	8		
2.2.3	Letalität und Stromweg/ Durchströmungsdauer	9		
2.3	Letalität und Zeit/Stromstärke-Wirkungsdiagramm	11		
2.3.1	Letalität und Umgebungseinflüsse	11		
2.3.2	Körperimpedanz	12		
2.3.3	Berührungsströme und äquivalenter Herzstrom	13		
2.3.4	Ergebnisse: Wirkungsgeraden und Vergleich mit Tierversuchen	13		
2.3.5	Problematik: Übertragung von Tierversuchen auf den Menschen	16		
3	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	21		
4	Literatur	22		

1 Vorbemerkung und Einführung

Die Einschätzung der Gefährdung des Menschen durch Herzkammerflimmern, die u.a. für den Bereich des Wechselstroms im Frequenzbereich von 15 Hz bis 100 Hz in der IEC-Publikation 60479-1 dargelegt wird, ist im wesentlichen an Tierversuchen orientiert. Solche Tierversuche wurden zunächst in den 30er bis 60er Jahren des 20. Jahrhunderts in den USA und später in den anschließenden 70er und 80er Jahren vor allem in Deutschland an verschiedenen Tierarten und bei unterschiedlicher Durchströmungsdauer des Körpers der Tiere vorgenommen. In diesen Experimenten wurden Wirkungsgeraden ermittelt, mit denen bei verschiedener Stromdauer in Abhängigkeit von der Stromstärke die Häufigkeit des Eintretens von Kammerflimmern, also elektropathologisch gesehen die Häufigkeit des tödlichen Ausgangs des Versuches bestimmbar war. Experimentell am Tier gewonnene und durch Berechnungen an Computermodellen von Mensch und Tier ermittelte Übertragungsfaktoren führten dann zu ersten Angaben von Flimmerstromstärken beim Menschen.

Durch Experimente direkt am Menschen sind die Flimmerstromstärken, die zum Tode des Menschen wie beim tödlichen Stromunfall führen, nicht zu bestimmen – beim Menschen verbieten sich solche Versuche von selbst. Zur Abklärung der Frage der tatsächlichen Stromgefährdung beim Menschen wurden daher Methoden entwickelt (Messungen an menschlichen Leichen [11, 22] und am lebenden Tier [4, 13, 18, 19, 20] sowie Berechnungen von Strömen an Computermodellen von Mensch und Tier [5]), mit denen die Flimmerstromstärken ermittelt und vom Tier auf den Menschen übertragen wurden [1, 5]. Dabei zeigten sich in den 80er Jahren zunächst vordergründig erhebliche Diskrepanzen zwischen den seinerzeit durch nachträgliche Berechnungen ermittelten Unfallströmen tödlicher Stromunfälle, wie

sie bei bestimmten Unfällen *nach damaligem Kenntnisstand verlässlich* abschätzbar waren und den durch die Übertragungsfaktoren Tier/Mensch errechneten Flimmerstromstärken [1, 5]. Diese Diskrepanzen werden durch die vorliegende Abhandlung erklärend relativiert und letztlich beseitigt. Durch statistisch gesicherte Angaben zu den Körperimpedanzen des Menschen, wie sie seit 2001 [2] vorliegen, und durch die statistisch gesicherte Auswertung von Daten über die Letalität von Stromunfällen ergibt sich ein in sich geschlossenes Bild zur Gefährdungssituation beim Stromunfall durch Herzkammerflimmern beim Menschen.

Die Beurteilung des Grenzzrisikos für das Auftreten von Herzkammerflimmern durch die Auswertung von Stromunfällen ist nur möglich, wenn umfangreiche Datenbestände mit relevanten Merkmalen für nicht tödliche und tödliche Stromunfälle vorliegen [14]. Die Auswertung allein tödlicher Unfälle genügt nicht, da die Beurteilung des Grenzzrisikos statistisch gesicherte Aussagen über die Letalität L der Unfälle, d.h. über den Anteil der tödlichen Unfälle an einer betrachteten Gesamtheit von Unfällen mit gleichen Merkmalen erfordert.

Das Institut zur Erforschung elektrischer Unfälle der BG Elektro Textil Feinmechanik, Köln führt seit Jahrzehnten mit gleich bleibenden Erfassungsgrundlagen unfallstatistische Erhebungen über nicht tödliche und tödliche Unfälle durch, die Aussagen über die Letalität L für hier relevante Datenkollektive zulassen [14].

Im Folgenden werden diese Daten ausgewertet und unter Berücksichtigung von Berechnungen von Strömen an Computermodellen von Mensch und Tier mit tierexperimentellen Untersuchungsergebnissen verglichen. Ziel ist hierbei letztlich die statistisch, experimentell und durch Computerberechnungen gesicherte

Ermittlung von minimalen Stromstärken von Körperdurchströmungen, die beim Menschen Herzkammerflimmern auslösen und dadurch in der Regel (ohne „Erste Hilfe“ mit Defibrillation) tödlich sind.

Die bisher allein auf der Basis von Tierversuchen abgeleiteten, für den Menschen als vermeintlich im o. g. Sinne gefährdend angesehenen Stromstärken werden so auf eine neue statistisch durch Impedanzmessungen am Menschen und auch am Unfallgeschehen abgesicherte Basis gestellt. Diese mehrfach gut abgesicherten Erkenntnisse können und sollten in die weitere Fortschreibung der IEC-Publikation 60479-1 „*Wirkungen des elektrischen Stroms auf den Menschen und Nutztiere – Teil1: Allgemeine Aspekte*“, Abschnitt 3 „*Effects of sinusoidal alternating current in the range of 15 Hz to 100 Hz*“ [9, 12] einfließen.

2 Vergleichende Betrachtung der Letalität L bei Tierversuchen und der Unfallstatistik von Stromunfällen

Basis für die Auswertung waren die am Institut zur Erforschung elektrischer Unfälle der BGFE (ab 2008: BG ETF) in den Jahren 1969 bis 1996 gemeldeten Arbeitsunfälle durch elektrischen Strom (insgesamt 68.190 Stromunfälle, davon 1.398 mit tödlichem Verlauf; eine Auflistung von Teilkollektiven dieser Unfälle ist im Anhang enthalten). Für die Untersuchung war es notwendig, möglichst große zielgerichtete Teilkollektive von Stromunfällen zu bilden, die wohldefiniert dem Anspruch einer möglichst genauen Abschätzung der Größe des beim Unfall geflossenen Körperstromes genügten. Den größten Anteil am Unfallgeschehen durch elektrischen Strom haben mit rund 80 % 50 Hz-Wechselstrom-Niederspannungsunfälle im Spannungsbereich > 130 V – 400 V – ein Spannungsbereich, der durch die in Spannungsgruppen vorgenommene Verschlüsselung der „Unfallparameter“ gegeben ist. In diesen Spannungsbereich fallen alle Unfälle, die sich in den üblichen Niederspannungsanlagen und mit üblichen Niederspannungsbetriebsmitteln ereignet haben, mit den maximalen Berührungsspannungen je nach Kontaktierung

von 220 V (ältere Fälle) bzw. 250 V oder 380 V (ältere Fälle) bzw. 400 V. In diesem Spannungsbereich sind tödliche Unfälle bei später noch zu benennenden Bedingungen in aller Regel Folge von Herzkammerflimmern.

Im Verlaufe der Untersuchung wurden letztlich nur Unfälle berücksichtigt, für die aussagekräftige Unfallmeldungen bzw. Unfallberichte vorlagen, insbesondere Angaben zu: Art der Stromeinwirkung, Stromweg, Vorliegen von Strommarken, Dauer der Körperdurchströmung, Größe der kontaktierten Berührungsspannung (siehe auch jeweils Übersichts-Angaben hierzu im Anhang).

Die Studie wird Aussagen zu der minimal möglichen Stromstärke bei Körperdurchströmung machen, die beim Menschen zu tödlichen (letal) Folgen führt; als Todesursache handelt es sich hierbei – wie erwähnt – bei Niederspannungsunfällen der selektierten Art mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit fast ausnahmslos um Herzkammerflimmern.

Letalität bezeichnet hier das Verhältnis der Zahl der durch eine definierte Stromeinwirkung Verstorbenen zu der Zahl der bei denselben Bedingungen der Körperdurchströmung Verunfallten insgesamt.

Die Letalität L der Stromunfälle soll hier letztlich in Abhängigkeit von der Stromstärke I des im Unfallstromkreis geflossenen Stromes als $L = f(I)$ bzw. $f(\ln I)$ dargestellt werden. Es wird eine Wirkungsgerade erwartet, die den Verläufen bzw. Tendenzen entspricht, wie sie bei Versuchen an Tieren ermittelt wurden, die zur Bestimmung der Flimmerschwellen beim Tier führten.

Diese Versuche entsprechen den in der Pharmakologie und Toxikologie üblichen Aktivitätsmessungen. Für sie gilt eine Reihe von Gültigkeitskriterien, die eingehalten oder vorhanden sein müssen und die im Folgenden zur Prüfung der Richtigkeit der Untersuchungen dieser Abhandlung herangezogen wurden.

2.1 Voraussetzung

Die zuvor erwähnten Aktivitätsmessungen definieren als Wirkungsparameter den Erfolg eines Medikaments oder den „Erfolg“ einer toxischen Substanz [in %, z. B. mittlere wirksame Dosis, ED_{50} , bei der 50 % der Versuchstiere oder der Probanden eine Wirkung zeigen, oder die mittlere tödliche/letale Dosis, LD_{50} , bei der 50 % der Versuchstiere getötet werden], und sie bezeichnen die Dosis des Medikaments oder der toxischen Substanz als Dosisparameter [6, 7, 8, 24, 25].

Die Messergebnisse solcher Versuche werden grafisch grundsätzlich im Summenhäufigkeitsnetz (Wahrscheinlichkeitspapier) dargestellt, in der Regel im Netz mit logarithmisch geteilter Abszisse, da – wie bei vielen biologischen Vorgängen – die Wirkung geometrisch, also mit dem Logarithmus der Dosis linear zunimmt und so in bestimmten Bereichen Dosis-Wirkungsgeraden entstehen [6, 7, 25]. Dies trifft auch – wie die Flimmerstromstärke-Versuche an Tieren zeigen – auf die

tödliche Wirkung des elektrischen Stromes zu.

Die Stromstärke [mA], die beim Tierversuch oder beim Unfall vorlag, und implizit auch die Verknüpfung von Stromstärke und Zeitdauer der Einwirkung des Stromes [ms] werden nun bei den folgenden Betrachtungen jeweils als Dosisparameter für die Stromwirkung aufgefasst, während die Letalität L in [%] bzw. als [Probit] bei den Versuchen oder bei

den Unfällen den Wirkungsparameter darstellt. In der Regel wurde und wird die graphische Auswertung der Letalität in Abhängigkeit von der Dosis mit Hilfe des Wahrscheinlichkeitsnetzes (Wahrscheinlichkeitspapiers) durchgeführt. In den Office-Software-Programmen von Microsoft und von Borland bzw. Corel (Excel, Quattro Pro) steht das Wahrscheinlichkeitsnetz nicht zur Verfügung. Man könnte das Wahrscheinlichkeitsnetz „importieren“ und die Mess- und Erhebungswerte mit den einschlägigen Zeichenprogrammen eintragen und die erwarteten obligaten Ausgleichsgeraden (Regressionsgeraden) nach „Augenmaß“ einzeichnen. Die mathematisch-statistisch korrekte Ermittlung der Regression mit „diskreter“ Angabe der Gleichungen der Regressionsgeraden und deren Bestimmtheitsmaß ist jedoch bei dieser Art der Auswertung nicht gegeben. Eine mathematisch-statistisch gesicherte Methode der Auswertung ist mit Hilfe der Probittransformation möglich, die ein in der Biometrie gängiges Verfahren darstellt. Die Probits werden aus dem Wahrscheinlichkeitsintegral hergeleitet. Dabei wird die y-Achse des Wahrscheinlichkeitsnetzes mit der Summenhäufigkeitsverteilung durch eine linear geteilte Achse mit Probits ersetzt. (Die Veränderliche c bzw. die zur Geraden gestreckte Sigmoidkurve der Häufigkeitsverteilung $F(c)$ wird durch die Transformation $c=a+bx$ mit $(a=-b\mu$ und $b=1/\sigma)$ bzw. $c+5=Probit=a+bx=5+b(x-\mu)$ ersetzt [Grafik 1, Anhang]. Jeder prozentualen Häufigkeit (bzw. kumulierten prozentualen Häufigkeit = Summenhäufigkeit) ist dementsprechend ein Probit zugeordnet und umgekehrt. Zum Probit 5 gehört die (kumulierte) Häufigkeit 50 %, zum Probit 6 eine kumulierte Häufigkeit von rund 84,1 % und dem Probit 4 ist eine Summenhäufigkeit von rund 15,9 % zugeordnet (siehe auch Anhang). Die Probits mit den zugehörigen prozentualen Häufigkeiten sind in Zahlentafeln im allgemeinen mit vier Nachkommastellen tabelliert, z. B. in den „Wissenschaftlichen Tabellen Geigy, Statistik“ [30]. Der 5 %-Wert hat bei der „genaueren“ Angabe der Geigy-Tabelle den Probit 3,3551, der 1 %-Wert den Probit 2,6737 (eine kurze Beschreibung der Probitanalyse findet man in [29] unter dem Stichwort „Bioassay“; eine ausführliche Beschreibung ist in [7] gegeben).

Durch diese Transformation, die bei der hier vorgelegten Abhandlung konsequent

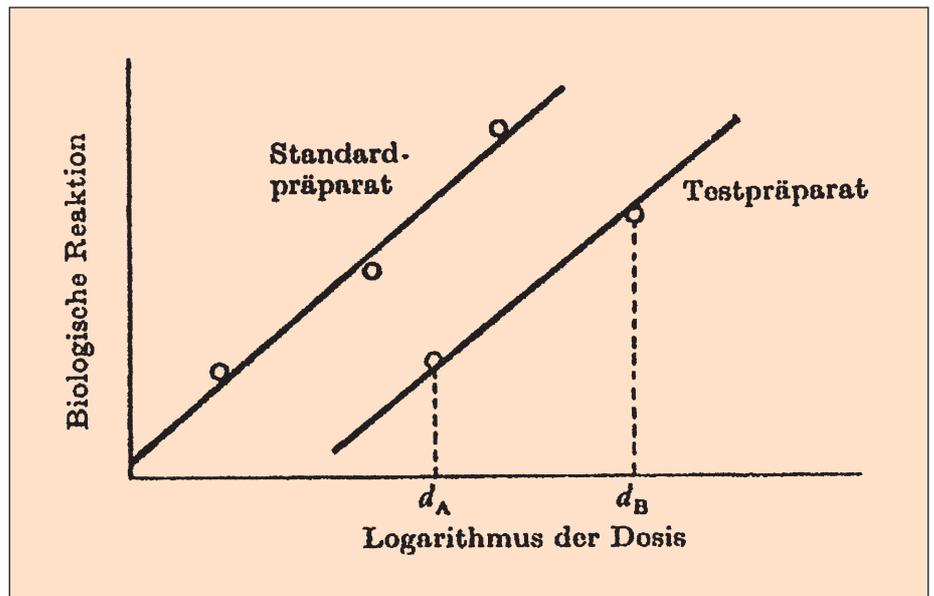


Abb. 0.1a: Wertbemessungsverfahren in der Pharmakologie durch Bestimmung von Wirkungskurven bzw. -geraden (aus [7]). Parallele Wirkungsgeraden bei logarithmischer Dosenskala; unterschiedliche Wirksamkeit von Standard- und Testpräparat (ohne störende Verunreinigungen). Durch zwei verschiedene Dosen d_A und d_B gefundene Punkte genügen („in der Regel“ in der Biometrie) für die Festlegung der Wirkung für das Testpräparat. Infolge der Parallelität der Geraden kann die Wirkungswahrscheinlichkeit verschiedener Dosen des Testpräparates aus den Daten eines Standardpräparates abgeleitet werden.

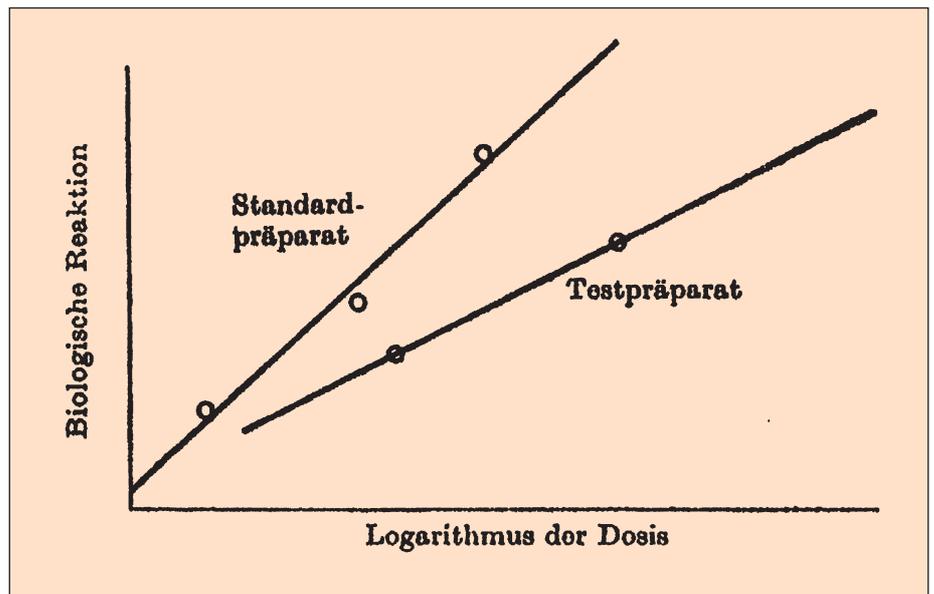


Abb. 0.1b: Wertbemessungsverfahren in der Pharmakologie durch Bestimmung von Wirkungskurven bzw. -geraden (aus [7]). Nichtparallele Wirkungsgeraden bei logarithmischer Dosenskala. Die Wertbemessung des Testpräparates mit Hilfe eines Standardpräparates ist in diesem Falle nicht möglich. Wäre also im Falle der in dieser Abhandlung beschriebenen Untersuchung der Wirkung der Noxe „Stromstärke“ oder „Stromeinwirkungsdauer“ keine Parallelität zwischen Mensch- und Tierdaten feststellbar, so wären die getroffenen Aussagen nicht möglich.

durchgeführt wurde, konnten die hier zur Rede stehenden Daten mit den oben genannten Software-Programmen mathematisch-statistisch gesichert und aussagekräftig ausgewertet werden.

Die Gültigkeitskriterien für die folgenden Betrachtungen sind: Regression der Daten, Linearität der Dosis-Wirkungsbeziehung (Stromstärke-Letalität), Paralle-

lität der Dosis-Wirkungsgeraden für die „Mensch- und Tierdaten“ und gleiche Wirkung bzw. gleicher Wirkungsmechanismus [6]. Der gleiche Wirkungsmechanismus ist durch die sicherlich fast immer erfüllte Voraussetzung „Stromtod als Folge von Herzkammerflimmern“ grundsätzlich gegeben (jedenfalls in aller Regel für den Niederspannungsunfall infolge Durchströmung mit Strommarken).

2.2 Letalität bei Niederspannungsunfällen mit 50 Hz Wechselfspannung: Determinierende Einflussgrößen

2.2.1 Letalität und Durchströmungsdauer

Die zuvor genannten Gültigkeitskriterien waren zunächst durch eine Auswertung der Tierversuche von *Kouwenhoven et al.* [20] geprüft worden, bei denen die Flimmerschwelle von Hunden experimentell ermittelt wurde, wobei auch die Letalität ausgewiesen ist. In die erstellte Grafik wurden auch Daten der Unfallstatistik, für die Angaben zur Stromdauer vorlagen, mit eingetragen. *Kouwenhoven* benennt bei seinen Messungen in Abhängigkeit von der Einwirkdauer des Stromes neben der Anzahl der bei einer bestimmten Zeitdauer durchgeführten Versuche auch diejenigen, bei denen Herzkammerflimmern entstanden ist, die also zum Tode des Tieres geführt haben (oder bei fehlender Wiederbelebung (Reanimation) zum Tode geführt hätten).

Auch die unfallstatistischen Erhebungen des Instituts zur Erforschung elektrischer

Unfälle erfassen die Einwirkungs- oder Durchströmungsdauer – hier aber vorwiegend als Schätzwerte in vorgegebenen Zeitbereichen der Unfallerhebungsformulare [17]. Umso erstaunlicher (wenn auch wegen der Großzahluntersuchungen im Grunde zu erwarten) ist das stringente Ergebnis der Auswertung.

In Abb. 1 sind die Werte der Letalität L (als tödlicher Anteil der Unfälle und bei den Tierversuchen als Anteil mit Herzkammerflimmern) als Probit bei linearer Teilung der Ordinate über der Einwirkungsdauer des Stromes [ms] bei logarithmisch geteilter Abszisse aufgetragen (den Probits sind auf der rechten Ordinate die Werte die Werte der Letalität L in % zugeordnet, so dass diese Ordinate der des Summenhäufigkeitsnetzes entspricht). Das Bild zeigt das Ergebnis einer Auswertung von Niederspannungsunfällen mit Strom-

marken, wodurch in der Regel (wenigstens) an einer der Übertrittsstellen des Stromes in den Körper der Verunglückten der Hautwiderstand entfallen ist (siehe Erläuterungen hierzu in Kap. 2.3, S. 11-15 und im Anhang Tab. 1, S. 24, wo die – für die beabsichtigte Ermittlung „minimaler“ Flimmerstromstärken erforderliche – selektive Bildung von Teilkollektiven behandelt wird).

Die Letalität L als Wirkungsparameter nimmt mit steigendem Logarithmus des Dosisparameters „Durchströmungsdauer“ zu (Kriterium der Regression). Die Abhängigkeit des Wirkungsparameters vom Dosisparameter bzw. seines Logarithmus ist linear (Kriterium der Linearität). Die Wirkungsgeraden sind für den Tierversuch und für die Auswertung der Statistik der Arbeitsunfälle durch elektrischen Strom bei den BG-Versicherten parallel (Kriterium der Parallelität). Der Strom mit seiner Zeitdauer der Einwirkung ruft die gleiche Wirkung (Kammerflimmern mit tödlichem Ausgang) hervor (Kriterium der gleichen Wirkung, des gleichen Wirkungsmechanismus), allerdings auf unterschiedlichen Wahrscheinlichkeits-Niveaus.

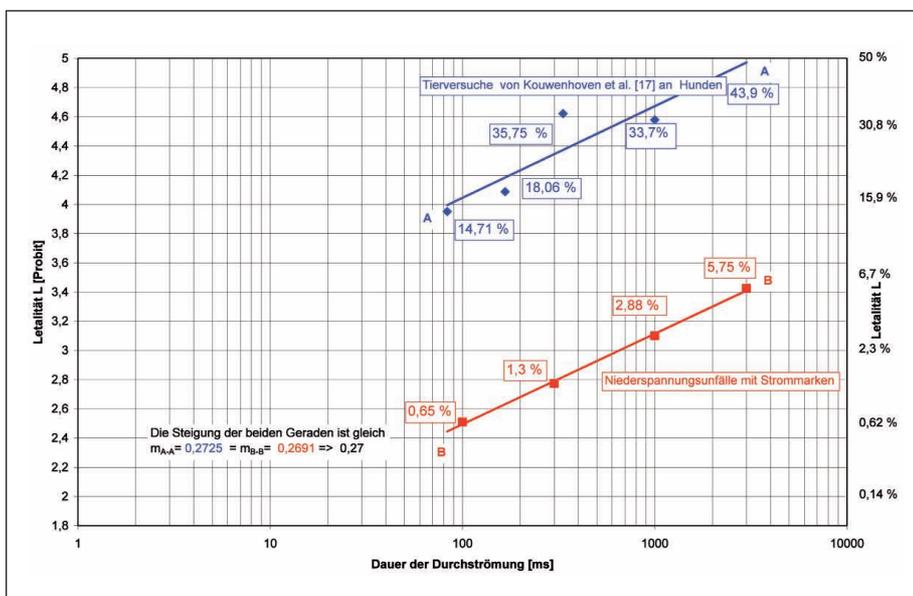


Abb. 1: Letalität L in [Probit] und [%] bei Arbeitsunfällen durch elektrischen Strom (Durchströmungsunfällen mit Strommarken des Niederspannungsbereichs) (rot, B-B; alle Arten von Stromwegen) und bei Tierversuchen an Hunden (blau, A-A; Durchströmung re. Vorderlauf – li. Hinterlauf) in Abhängigkeit von der Durchströmungsdauer A-A ... Letalität bei Tierversuchen von Kouwenhoven et al.[20]; $y = 0,2725 \ln(x) + 2,7901$; $R^2 = 0,8582$ B-B ... Letalität bei Niederspannungsunfällen mit Strommarken; $y = 0,2691 \ln(x) + 1,2552$; $R^2 = 0,9982$ Die Steigungen der beiden Geraden sind gleich: $m_{A-A} = 0,2725 = m_{B-B} = 0,2691 \Rightarrow 0,27$

Für ein Datenkollektiv von Stromunfällen infolge Durchströmung mit Strommarken wurde die gleiche Art der Auswertung für Nieder- und Hochspannungsunfälle durchgeführt (Abb. 2), [15], um die Regression und die Parallelität der Regressionsgeraden grundsätzlich im Sinne der oben genannten Gültigkeitskriterien zu dokumentieren. Bei der Durchströmung im Hochspannungsbereich (ohne Lichtbogeneinwirkung) ist eine größere „Dosis“ wirksam, es fließt ein größerer Strom, und daher liegt die Wirkungsgerade oberhalb von der Geraden für Niederspannung und verläuft parallel.

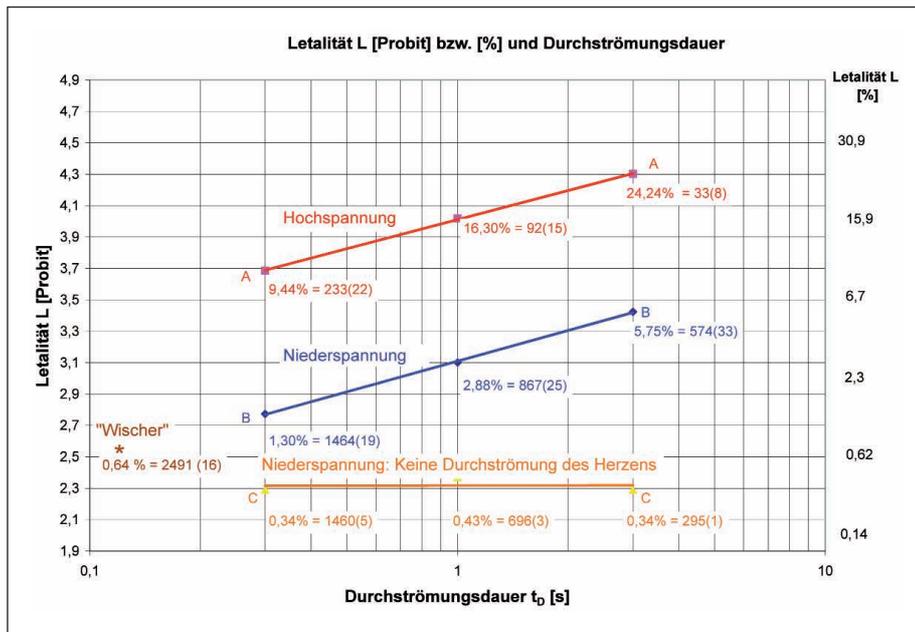


Abb. 2: Letalität L bei Arbeitsunfällen durch elektrischen Strom – Durchströmungsunfällen mit Strommarken des Nieder- und Hochspannungsbereichs in Abhängigkeit von der Durchströmungsdauer (Die in Klammern gestellten Zahlen bezeichnen die tödlichen Unfälle als „Davonzahlen“)

1 A-A ... Hochspannungsunfälle mit Strommarken; $y = 0,2674 \ln(x) + 4,0111$; $R^2 = 0,9996$

2 B-B ... Niederspannungsunfälle mit Strommarken $y = 0,2822 \ln(x) + 3,1095$; $R^2 = 0,9995$

3 C-C ... Niederspannungsunfälle, Herz nicht im Stromweg; $y = 0,0011 \ln(x) + 2,3173$; $R^2 = 0,0007$

Es zeigt sich für die Unfall-Daten eine streng lineare Abhängigkeit (hoher Regressions- und Korrelationskoeffizient; $r = 0,9997$ für Durchströmungsunfälle bei Niederspannung und $r = 0,9998$ für solche bei Hochspannung). Die Parallelität der Geraden für Nieder- und Hochspannungsdurchströmungsunfälle (unterschiedliche Stärke des enthaltenen Dosisparameters „Stromstärke“) bestätigt als erfülltes

Gültigkeitskriterium ganz eindeutig die Zulässigkeit und Richtigkeit der Auswertung, die im Verlauf der Abhandlung direkt auf die Stromstärke Anwendung finden wird.

Die durch die Erhebung erfassten Zeitbereiche sind klassifiziert und beginnen bei einer Durchströmungsdauer von 0,3 s (oder 300 ms), also bei einer Stromdauer,

bei der die derzeit gültige IEC-Kurve für die Stromstärke-Zeit-Abhängigkeit des Auftretens von Herzkammerflimmern [9, 12] bereits dem niedrigen dort ausgewiesenen Wert des Stromes von 30 mA – 40 mA zustrebt (siehe auch Abb. 8; dieser Zeitraum kann auch als „Langzeitdurchströmung“ apostrophiert werden). Die Grafik erfasst (losgelöst von der Regression) auch die Daten für Unfälle infolge sogenannter Wischer, also ganz kurzzeitiger Spannungsberührung, die in der Erhebung des Institutes als Kurzzeit-Durchströmungen unterhalb von 300 ms klassifiziert sind. In der Regel sind in diesem Zeitbereich keine (sichtbaren) Strommarken zu erwarten. Die Letalität liegt für Wischer bei 0,64 %. Für Unfälle, bei denen das Herz nicht im Weg des Stromes lag, zeigt sich – erwartungsgemäß folgerichtig und den Gültigkeitskriterien entsprechend – keine Abhängigkeit der Letalität von der Durchströmungsdauer (Regressionsgerade parallel zur Abszisse im gesamten erfassten Zeitbereich). Da der Stromtod bei Durchströmungsunfällen in der Regel ein Herztod ist – überwiegend durch Herzkammerflimmern – muss, wenn das Herz nicht betroffen ist, ein anderer Wirkungsmechanismus (z.B. Tod durch Sturz von erhöhtem Standort infolge Schreckreaktion) für die Letalität dieser Unfälle vorliegen (L ist hier mit 0,37 % vergleichsweise gering).

2.2.2 Letalität und Stromweg

Das Institut zur Erforschung elektrischer Unfälle erfasst die unterschiedliche Art der Durchströmung durch standardisierte Angaben zu den Stromwegen im Körper der Verunglückten [14, 15, 16, 17]. Für die Kennzeichnung der Abhängigkeit der Letalität vom Stromweg wurde ein insgesamt zur Verfügung stehendes Unfall-Datenkollektiv aus elektrophysiologischen Gründen selektiert auf ein Kollektiv von Niederspannungsunfällen im Spannungsbereich $> 130 \text{ V} - 400 \text{ V}$ infolge Durchströmung mit Strommarken und einer Dauer der Durchströmung $t_D > 300 \text{ ms}$ (Tabelle 1). Die Letalität L bei unterschiedlichen

Stromwegen durch den Körper (Stromwege Hand-Hand, Hand-Fuß, Hand-Füße, Hände-Fuß und Hände-Füße etc.) ist – abgesehen von sog. Übergangswiderständen des Standortes und von Bekleidungsstücken – physikalisch durch unterschiedliche Werte der Körperimpedanz und durch die unterschiedliche Stromverteilung mit unterschiedlicher Stromdichte in den Körperregionen bedingt. Bedeutsam für die Auswirkung der Durchströmung ist der Anteil des Stromes im Herzen und die Richtung der Durchströmung des Herzens. Sam [22] hat 1968 an einer menschlichen Leiche Feldstärkeverhältnisse am Herzen bei unterschiedlichen

Stromwegen ermittelt und daraus Herzstromfaktoren abgeleitet. Diese Herzstromfaktoren wurden mit geringfügigen Abweichungen durch Berechnungen am dreidimensionalen hochauflösenden Computermodell des Menschen mit guter Nachbildung der Gewebeleitfähigkeiten 1985 durch Brucher und Meyer-Waarden bestätigt. Sie sind in die IEC-Publikation 60479-1 [9, 12] aufgenommen worden. Wie Tabelle 1 zeigt, ist die Letalität bei Längsdurchströmung (Hand-Fuß, Hand-Füße, Hände-Fuß und Hände-Füße) durchwegs größer als bei der „normalen“ Querdurchströmung (Stromweg „Hand-Hand“). Die Letalität für den Stromweg

„Hände/Füße“ liegt etwa 4-fach höher als die mittlere Letalität des hier betrachteten Niederspannungsunfalles und ist 6,6-fach größer als die Letalität beim Stromweg „Hand-Hand“. Das Verhältnis der Letalitätswerte für die Stromwege „Hand-Hand“ zu „Hand-Fuß“ beträgt rund 0,5. Für verkürzte Stromwege ergibt sich – summarisch unspezifisch gesehen – eine 6-fach erhöhte Letalität gegenüber dem Mittelwert bei „Insgesamt“ (bzw. eine rund 5-fache Letalität gegenüber dem Stromweg „Hand-Fuß“). Spezifiziert man die verkürzten Stromwege auf solche bei Längs- und bei Querdurchströmung, so zeigt sich für Stromwege, wie sie z. B. bei der Durchströmung von den Händen zum Gesäß, zum Rücken oder von den Händen zur Brust vorliegen, aufgrund der geringeren Körperimpedanz und des größeren Herzstromfaktors (1,3 – 1,5) eine bis zu 8-fach erhöhte Letalität gegenüber der Längsdurchströmung von „Hand zu Fuß“ (wegen der bei Längsdurchströmung häufig sehr unterschiedlichen Übergangswiderstände {Standort, Schuhe etc.} kann die Tabelle nicht als Grundlage für Aussagen über die so genannten Herzstromfaktoren angesehen werden).

Stromweg	Niederspannung, 50 Hz (> 130 V – 400 V) Stromunfälle mit Strommarken infolge Durchströmung Dauer der Durchströmung > 300 ms				
	Anzahl der Unfälle		Relat. Verteilung [%]		Letalität
	Insgesamt	davon tödlich	Insgesamt	tödlich	L [%]
Hand-Hand	2.891	82	77,3	48,5	2,84
Hand-Fuß	349	19	9,2	11,2	5,44
Hand-Füße/Hände-Fuß	294	18	7,7	10,7	6,12
Hände-Füße	106	20	2,8	11,8	18,67
Verkürzte Stromwege					
• bei Längsdurchströmung (Hand-Rumpf {Brust/Rücken/Gesäß})	86	20	2,4	11,8	23,26
• bei Querdurchströmung (Hände-Rumpf{Brust/Rücken})	22	10	0,6	6,0	45,45
• Verkürzte Stromwege insgesamt	108	30	3,0	17,8	27,78
Insgesamt	3.748	169	100	100	4,51

Tabelle 1: Abhängigkeit der Letalität L vom Stromweg bei Arbeitsunfällen durch elektrischen Strom; Niederspannungsunfälle im Spannungsbereich > 130 V – 400 V, 50 Hz infolge Durchströmung mit Strommarken (Dauer der Durchströmung > 300 ms)

2.2.3 Letalität und Stromweg/Durchströmungsdauer

Das Datenmaterial lässt sich auch für verschiedene Stromwege im Hinblick auf die Letalität in Abhängigkeit von der Durchströmungsdauer auswerten.

Den oben genannten Kriterien entsprechend ergeben sich für verschiedene Stromwege parallele Geraden gemäß den unterschiedlich großen Strömen, die auf das Herz wirken (die Geraden der Stromwege, für die ein herzeffektiv größerer Strom – und damit auch eine größere Letalität – resultiert, liegen über denen mit geringerer Durchströmung des Herzens, Abb. 3 und 4). Bemerkenswerterweise unterscheiden sich die Steigungen bei Quer- und Längsdurchströmung mit einem Verhältnis $m_{(l\ddot{a}ngs)}/m_{(quer)} = 1,47$, was Ausdruck der größeren Flimmerbereitschaft des Herzens bei Längsdurchströmung des Herzens infolge der unterschiedlichen Stromdichteverteilung ist.

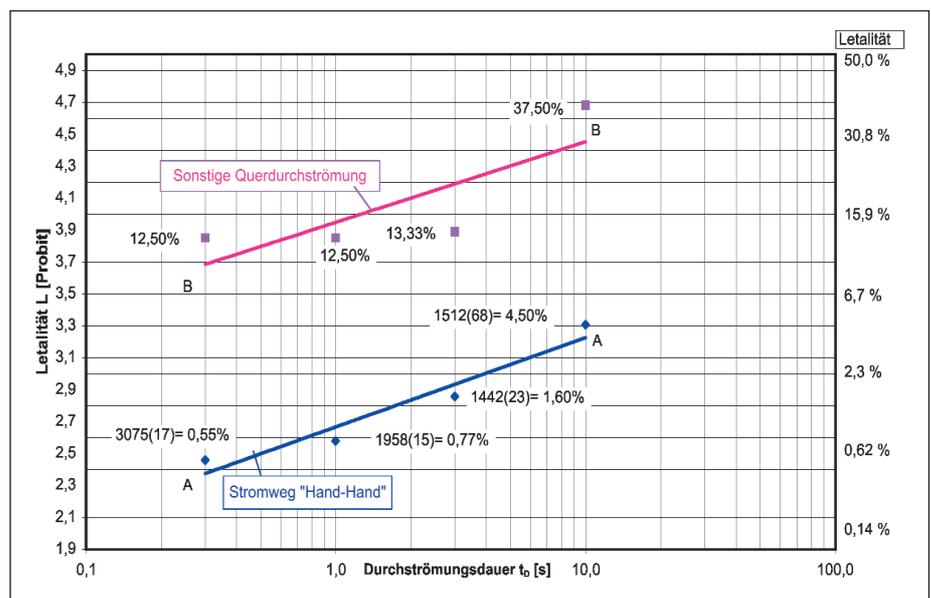


Abb. 3: Letalität L von Niederspannungsunfällen, 50 Hz bei verschiedenen Stromwegen in Abhängigkeit von der Durchströmungsdauer
 A-A Stromweg „Hand-Hand“; $y = 0,2430 \ln(x) + 2,6647$; $R^2 = 0,9365$
 B-B Stromweg „Sonstige Querdurchströmung“; $y = 0,2192 \ln(x) + 3,9471$; $R^2 = 0,6441$

An dieser Stelle sei ausdrücklich angemerkt:
 Die in der vorliegenden Abhandlung gezeigten Tabellen und Grafiken zu verschiedenen Unfallparametern wie Durchströmungsdauer, Stromweg, Umgebungsverhältnisse basieren z.T. auf unterschiedlich großen Datenkollektiven; die Kollektive unterscheiden sich jeweils nach jeweiligem Zeitpunkt und Zeitraum der durchgeführten Erhebung und dem Zeitpunkt der Auswertung und sind im Allgemeinen nicht nur durch die vorgenommene Selektion unterschiedlich groß. Das Gesamtkollektiv der zur Auswertung zur Verfügung stehenden Unfälle umfasst – wie eingangs gesagt – 68.190 Arbeitsunfälle durch elektrischen Strom, davon 1.398 tödliche Unfälle.

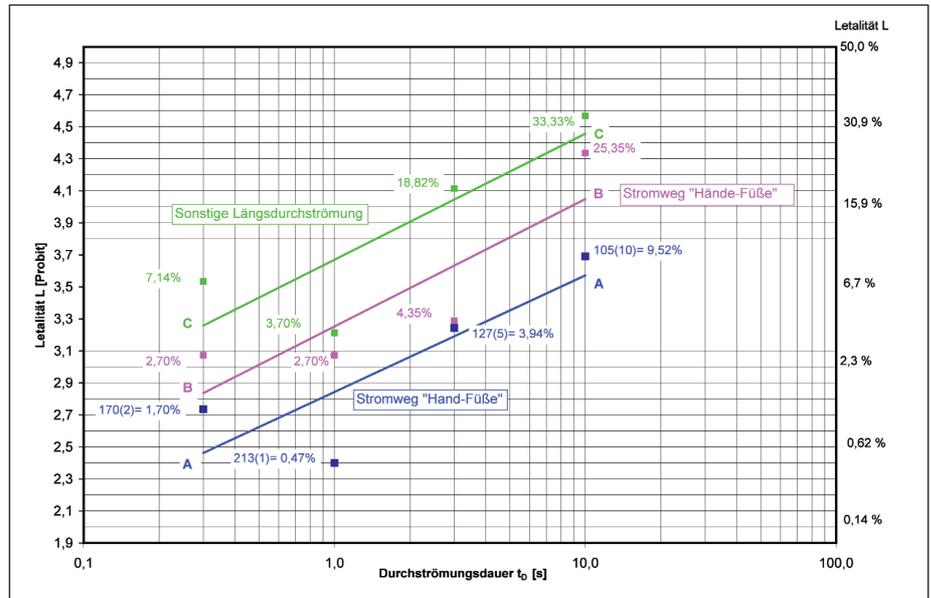


Abb. 4: Letalität L von Niederspannungsunfällen, 50 Hz bei verschiedenen Stromwegen in Abhängigkeit von der Durchströmungsdauer

A-A Stromweg „Hand-Füße“; $y = 0,3163 \ln(x) + 2,8439$; $R^2 = 0,7017$

B-B Stromweg „Hände-Füße“; $y = 0,3456 \ln(x) + 3,253$; $R^2 = 0,7359$

C-C Stromweg „Sonstige Längsdurchströmung“; $y = 0,3418 \ln(x) + 3,6699$; $R^2 = 0,7232$

2.3 Letalität und Zeit/Stromstärke-Wirkungsdiagramm

Wie bereits im Abschnitt 2.1 gezeigt, liegt es nahe, die Ergebnisse von Tierversuchen zur Ermittlung der Flimmerschwelle mit Daten von Auswertungen von Erhebungen über Stromunfälle und deren Letalität zu vergleichen. Dies ist möglich, wenn umfangreiche Datenbestände mit rele-

vanten Merkmalen für nicht tödliche und tödliche Stromunfälle vorliegen. Das Institut zur Erforschung elektrischer Unfälle hat solche wohl einzigartigen Datenbestände zur Verfügung [14, 15, 16]. Die Schwierigkeit der Auswertung der Unfalldaten im Sinne der Ermittlungen des

Grenzrisikos bestehen vor allem darin, dass die bei einem Unfall geflossenen Körperströme retrospektiv aus den relevanten Unfallparametern berechnet werden müssen, da sie verständlicherweise beim Unfallablauf nicht messbar waren.

2.3.1 Letalität und Umgebungseinflüsse

Elektronfälle finden unter den verschiedensten äußeren Bedingungen statt, welche die Stromstärke des Körperstromes und seine Wirkung beeinflussen (es sind hauptsächlich zu nennen: Größe (und Frequenz) der Netzspannung, Art des Stromweges durch den Körper, Durchströmungsdauer, Größe der Übergangswiderstände von Haut und Bekleidung, Standortwiderstand, Größe und Zustand der Berührungsflächen, Stromart).

Der Einfluss der unterschiedlichen Umgebungsverhältnisse, durch die die unterschiedlichen Übergangswiderstände im Unfallstromkreis gegeben sind, kann von entscheidender Bedeutung für die unterschiedliche Wahrscheinlichkeit eines tödlichen Ausgangs von Elektronfällen sein (Tabelle 2). So können allein die Mittelwerte des Standortwiderstandes je nach Art des Fußbodenbelages und seines Zustandes zwischen 1 kOhm und 80 kOhm variieren; gleiches gilt für die Widerstandswerte von Schuhen, bei dem die Mittelwerte von 0,1 kOhm bis 100 kOhm streuen können, je nachdem, ob die Schuhe nass, im normalen Zustand oder besonders trocken sind und welche Sohlen Verwendung finden.

Entscheidend für den Unfallausgang ist der Berührungsstrom I_T , der durch den menschlichen Körper fließt. Er kann grundsätzlich aus der Berührungsspannung U_T und der Körperimpedanz Z_T sowie den sogenannten Übergangswiderständen $Z_{Ü}$ berechnet werden:

$$I_T = U_T / (Z_T + Z_{Ü})$$

Unfallort (im weiteren Sinne)	Niederspannung, 50 Hz (> 130 V – 400 V) Stromunfälle mit Strommarken infolge Durchströmung				
	Anzahl der Unfälle		Relat. Verteilung [%]		Letalität
	Insgesamt	davon tödlich	Insgesamt	tödlich	L [%]
In Räumen (innen)	13.434	229	86,9	53,7	1,7
Im Freien (außen)	1.703	183	11,0	43,0	10,7
Unter Tage	24	3	0,2	0,7	12,5
Unter erschwerten Bedingungen	294	11	1,9	2,6	3,7
Insgesamt (1969 – 1996)	15.455	426	100	100	2,8

Tabelle 2: Abhängigkeit der Letalität L von Umgebungsverhältnissen bzw. vom Standort; Niederspannungsunfälle infolge Durchströmung mit Strommarken im Spannungsbereich > 130 V – 400 V, 50 Hz

Zur Berechnung ist also die Kenntnis der Berührungsspannung U_T und in jedem Falle der Körperimpedanz Z_T erforderlich, die für den betreffenden Strom im Körper wirksam ist. Die Berührungsspannung hängt von der Quellenspannung ab, die den Berührungsstrom durch den Körper treibt. Berührt der Mensch zwei Außenleiter, so ist dies die Leiterspannung, also wohlbekannt und im Netz 3N 400/230 V (früher 380/220 V) mit 400 V bzw. 380 V anzunehmen.

Fließt der Strom aber über die Füße des Menschen zur Erde, so wirkt die berührbare Teilspannung U_{FP} [3] und treibt

den Berührungsstrom über die Serienschaltung bestehend aus der Körperimpedanz, der Impedanz des eventuell vorhandenen Schuhwerks (und gegebenenfalls anderer Kleidungsstücke) und dem Standortwiderstand. Letztere Unfallparameter, die auch als „Übergangswiderstände“ $Z_{Ü}$ apostrophiert werden, sind von der statistischen Erhebung des Instituts nicht erfasst. Das heißt, dass für Ströme bei der sog. Längsdurchströmung über die Füße die Berührungsspannung in der Regel nicht bekannt ist¹. Wollte man Unfälle mit solchen Stromwegen für eine Risikobetrachtung auswerten, so könnte das nur im Sinne einer Abschätzung

pessimaler Verhältnisse erfolgen. Andernfalls entsteht wegen der großen Streuung eine zu breite Verteilung, die realitätsfern zu kleine vermeintlich noch gefährliche Ströme bei kleinen Perzentilen (z. B. 5 %- oder 1 %-Wahrscheinlichkeitsangabe) ausweist bei nur unwesentlicher Verschiebung des Mittelwerts (LD_{50}) nach links zu niedrigeren Werten.

Praktisch ohne Vorbehalte konnten für die statistische Auswertung der Unfalldaten im Sinne der Risikoabschätzung nur Unfälle mit einem Stromweg „Hand-Hand“ benützt werden, bei denen die Übergangswiderstände von Standort und

Kleidungsstücken entfallen. Um auch die Hautwiderstände „ausschalten“ bzw. die Körperwiderstände vergleichsweise gesichert mit ihrer Impedanz angeben zu können, wurden Niederspannungsunfälle mit Strommarken gewählt und nur solche mit längerer Durchströmungsdauer $t_D > 300$ ms, also in dem Zeitbereich, in dem die an Tierversuchen orientierte IEC-Kurve für das Auftreten von Herzkammerflimmern [9, 12] dem niedrigen Niveau, d.h. den niedrigeren Stromstärken der „Langzeitdurchströmung“ zustrebt. Bei den so selektierten Unfällen erfolgte einerseits eine Berührung zweier Außenleiter (Berührungsspannung 380 V), ander-

erseits wurden ein Außenleiter und geerdete Teile berührt (Berührungsspannung 220 V)².

Für die Berechnung der hier ermittelten und für die Beurteilung verwendeten Körperströme konnten die neueren Untersuchungsergebnisse der Impedanzmessungen von *Bachl, H.; Biegelmeier, G. und Hirtler, R.* [2] herangezogen werden. Diese im Jahre 2001 publizierten Untersuchungsergebnisse beinhalten Angaben über die Körperimpedanzen bei verschiedenen, für die Berührung wesentlichen Parametern.

2.3.2 Körperimpedanz

Die Körperimpedanz hängt maßgeblich von der Größe der Berührungsflächen und deren Zustand ab (groß, mittelgroß oder klein; trocken, wassernass oder salznass/schweißnass). In guter Näherung sind für Berührungsspannungen über 200 V bei großflächiger Berührung die Körperimpedanzen trocken, wassernass und salznass nahezu gleich und nach erfolgtem Hautdurchbruch besteht auch in Bezug auf die Größe der Berührungsflächen kaum mehr ein Unterschied.

Man könnte also für die Berührungsspannungen 220 V und 380 V (gewählt gegenüber 230 V und 400 V, weil ein Großteil der Unfälle aus den letzten dreißig Jahren stammen) für die Berechnung des Berührungsstromes in guter Abschätzung der wahren Verhältnisse den Wert der Körperimpedanz für große Berührungsflächen, trocken wählen und würde damit auch die Verhältnisse für wassernasse Hände abdecken (Tabelle 3).

Da hier aber bei der Auswertung der Unfallstatistik nur Unfälle mit Strommarken und „langer“ Durchströmungsdauer herangezogen wurden, kommen auch die asymptotischen Werte der Impedanzen

als pessimistisch niedrige „Widerstandswerte“ für die Abschätzung in Betracht, da der Hautwiderstand bei Strommarken und langer Einwirkdauer des Stromes praktisch entfällt.

Stromweg und Berührungs-Spannung U_T	Körperimpedanz Z_T (großflächige Berührung) Hände trocken oder wassernass, Z_T [Ohm]		
	5 %-Wert	50 %-Wert	95 %-Wert
Hand-Hand bei 225 V	775	1.225	1.900
Hand-Hand bei 400 V	700	950	1.275
Asymptotischer Wert	575	775	1.050

Tabelle 3: Körperimpedanz Z_T beim Menschen für den Stromweg Hand-Hand beim Niederspannungsunfall; Berührungsspannungen 225 V und 400 V, 50 Hz, „Langzeitdurchströmung“ mit Strommarken (Dauer der Durchströmung > 300 ms) [2]

¹⁾ Das Institut hat jedoch durch spezielle Unfalluntersuchungsberichte des Technischen Aufsichtsdienstes der damaligen Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik und durch eine Sondererhebung für eine kleinere Fallzahl von Unfällen auch relevante Angaben zu diesen so genannten „Übergangswiderständen“, die eine vergleichsweise gesicherte Auswertung ermöglichen.

²⁾ Die Selektion stammt aus Datenkollektiven der 1970er bis 1980er Unfalljahre, bei denen das Institut zusätzlich zur standardisierten Erfassung der Unfalldaten auch die Unfalluntersuchungsberichte der Technischen Aufsichtsbeamten und die Daten einer Sondererhebung „Technische Unfalluntersuchung“ auswerten konnte (später wurde diese Art der Erfassung fallen gelassen und hauptsächlich Wert auf die möglichst detaillierte Erfassung der Unfallursachen im Sinne der Verbesserung der Arbeitssicherheit gelegt). Seinerzeit wurden aber auch Daten aus den ständig laufenden teilstandardisierten sog. „Medizinischen Fragebogen“ mit in die hier angesprochene Unfallauswertung einbezogen.

2.3.3 Berührungsströme und äquivalenter Herzstrom

In Tabelle 4 sind neben den Berührungsströmen auch die äquivalenten Herzströme (für die Querdurchströmung mit dem Stromweg „Hand-Hand“) ausgewiesen, denn der errechnete Körperstrom I_T muss für die Beurteilung der Gefährdung durch Herzkammerflimmern für den Stromweg „Hand-Hand“ mit dem Herzstromfaktor $F = 0,4$ multipliziert werden.

Den potentiell in Frage kommenden Strömen sind die Werte der Letalität der entsprechenden Stromunfälle zuzuordnen.

- Für die Fälle des Hand-Hand-Kontaktes „Außenleiter gegen geerdetes leitfähiges Teil“, also bei 220 V, sind das 5.743 Unfälle mit 93 Toten entsprechend einer Letalität L von 1,62 %.
- Bei den Fällen mit Kontaktierung „Außenleiter gegen Außenleiter“, also 380 V, sind das 19 Unfälle mit 11 Toten entsprechend einer Letalität L von 57,9 %.

Die Zahl der Unfälle ist bei 380 V („verkettete Spannung“) wegen der geringen Vorkommenshäufigkeit dieser Art der Kontaktierung beim Unfall vergleichsweise klein. Das könnte eine gewisse statistische Unsicherheit beinhalten. Die mit diesen Daten durchgeführte Auswertung genügt jedoch den Kriterien für derartige Untersuchungen, wie dies weiter unten ersichtlich werden wird.

Stromweg: Hand-Hand Berührungs- Spannung U_T [V]	Berührungsstrom I_T (großflächige Berührung) Hände trocken oder wassernass Asympt. Wert von Z I_T [mA]			Herz-äquivalenter Strom I_H (großflächige Berührung) Hände trocken oder wassernass Asympt. Wert von Z I_H [mA]			Unfälle (in Klammern tödliche Unfälle als „Davonzahl“)	Letalität L [%]
	5 %-Wert	50 %-Wert	95 %-Wert	5 %-Wert	50 %-Wert	95 %-Wert		
	220	383	284	210	153	114		
380	661	490	362	264	196	145	19(11)	57,80

Tabelle 4: Berührungsstrom I_T und äquivalenter Herzstrom I_H für den Stromweg Hand-Hand beim Niederspannungsunfall mit den Berührungsspannungen $U_T = 220$ V und $U_T = 380$ V bei „Langzeitdurchströmung“ mit Strommarken (Dauer der Durchströmung > 300 ms). Dargestellt sind die 5 %-, die 50 %- und die 95 %-Perzentile (Wahrscheinlichkeitsangaben) des Stromes auf der Basis der Perzentile der Impedanz des menschlichen Körpers

2.3.4 Ergebnisse: Wirkungsgeraden und Vergleich mit Tierversuchen

Die Ergebnisse können – wie eingangs erläutert – im Summenhäufigkeitsnetz (Wahrscheinlichkeitspapier) aufgetragen werden bzw. wie hier konsequent durchgeführt bei linearer Teilung der Ordinate in der Probit-Transformation der Letalitätswerte mit deren Zuordnung auf entsprechender zweiter Y-Achse. Damit sind die Regressionsgeraden mathematisch definiert und „gesichert“ vergleichbar. Sie sind graphisch in Abb. 5 dargestellt.

Von den oben näher bezeichneten Körperimpedanzen verschiedener Hautzustände und verschiedener Perzentile (Wahr-

scheinlichkeitsangaben) wurden die 50 %-Werte und unter Worst-Case-Annahmen die 5 %-Werte als wahrscheinliche Impedanzwerte gewählt, so dass nur die Äquivalentströme für diese Impedanzen benutzt wurden. Da es sich um Unfälle mit Strommarken im „Langzeitbereich“ mit $t_D > 300$ ms handelt, blieben die 95 %-Werte der Impedanz von vornherein – als irrelevant für einen tödlichen Verlauf dieser selektierten Unfälle – unberücksichtigt. Es entsteht so ein Streuband für mögliche letale Körperströme (dessen Fläche in Abb. 5 grau unterlegt ist).

Zum Vergleich mit den Ergebnissen von Tierversuchen wurden die Daten der Experimente von *Buntenkötter et al.* [4, 13], die an Schweinen durchgeführt wurden, und die Daten von *Kiselev* [18] (Gerade Ki-Ki) von Versuchen an Hunden bei $t_D = 3.000$ ms (blass dargestellt) sowie Versuche von *Kouwenhoven* [20] (Gerade Kou-Kou) an Hunden bei $t_D = 5.000$ ms in die Grafik eingetragen. Das Versuchstier „Schwein“ ist von seinem Organismus her dem Menschen ähnlich und entspricht insbesondere kardiologisch dem Menschen am ehesten. Daher sind auch hinsichtlich des Übertragungsfaktors der Flimmer-

Stromweg: Hand-Hand	Berührungsstrom I_T (großflächige Berührung) Hände trocken oder wassernass	Herz-äquivalenter Strom I_H (großflächige Berührung) Hände trocken oder wassernass	Unfälle (in Klammern tödliche Unfälle als „Davonzahl“)	Letalität L [%]
Berührungs- Spannung U_T [V]	I_T [mA] bei asymptotischem 5 %-Wert $Z_T = 575 \text{ Ohm}$	I_H [mA] bei asymptotischem 5 %-Wert $Z_T = 575 \text{ Ohm}$		
220	383	153	4.191 (94)	2,24
289	503	201	76 (7)	9,20

Tabelle 5: Berührungsstrom I_T und äquivalenter Herzstrom I_H für den Stromweg Hand-Hand beim Niederspannungsunfall mit den Berührungsspannungen $U_T = 220 \text{ V}$ und $U_T = 289 \text{ V}$, 50 Hz bei „Langzeitdurchströmung“ mit Strommarken (Dauer der Durchströmung > 300 ms)

den“ U_R-U_R {nicht gezeichnet, nur als Gleichung; siehe Legende}, die auf dem asymptotischen 5 %-Wertes der Impedanz basiert, führt zu einem Übertragungsfaktor \ddot{u} (Mensch-Schwein) = F_V von rund 1,4, was nach den vorliegenden Erkenntnissen ein zu niedriger Wert für F_V ist. Der asymptotische 5 %-Wert von 575 Ohm, der aufgrund der Selektion der „Strommarkenunfälle“ des „Langzeitbereichs“, der für die Unfallsituation höchstwahrscheinlich ist, kennzeichnet gewissermaßen bereits eine „Worst-Case“-Impedanz – jedenfalls, wenn man statistisch gesicherte Daten für die Abschätzung heranziehen will – so dass ein kleinerer Wert für Z_T nicht reflektiert und in Ansatz gebracht wird (dementsprechend werden auch alle links bei kleineren Stromwerten liegenden potentiell möglichen Wirkungsgeraden für die 50 %-Werte von Z_T für die weitere Betrachtung ausgeschlossen. Die Geraden für den 5 %-Wert U_L-U_L (nicht gezeichnet, nur als Gleichung; siehe Legende) und für den asymptotischen 50 %-Wert A-A (schwarz bzw. rot gestrichelt) der Körperimpedanz beim Zustand „trocken, wassernass“ werden in Abb. 5 aber zunächst beide bewusst in der Betrachtung belassen, um die Möglichkeit

einer Variation bezüglich der Lage der „Unfallgeraden“ anzudeuten; der vordergründig noch mögliche Variationsbereich ist grau gekennzeichnet).

Um die Lage der „Unfallgeraden“ stärker zu sichern, wurden die Daten der Unfallstatistik um zwei Werte erweitert, deren Koordinaten und Parameter aus Tabelle 5 ersichtlich sind. Erstens um einen Wert der Letalität von 2,24 % für 4.191 (94) Hand-Hand-Unfälle im Spannungsbereich > 130 V – 400 V mit Strommarken im „Langzeitbereich“ > 300 ms, bei denen – da nicht mehr unterscheidbar – pauschal eine Außenleiterberührung gegen Erde, also eine Berührungsspannung von 220 V angenommen wurde.³

Zweitens konnten 76 (7) Hand-Hand-Unfälle mit Strommarken im „Langzeitbereich“, im Spannungsbereich > 400 V – 500 V mit einer Letalität von 9,20 % ermittelt werden – aber im o.g. Sinne ebenfalls nicht weiter differenzierbar –, so dass für die gleiche Berührungsart gegen Erde eine Berührungsspannung von 289 V vorlag (Es handelt sich vorwiegend um Stromunfälle in elektrischen Prüffeldern, Labors und elektrischen Werkstätten sowie um solche in Schalt- und Verteilerstationen, aber auch um einige Unfälle in Werkhallen).

Mit den beiden genannten Unfallteilkollektiven und ihren Letalitätswerten konnten also unter Verwendung ebenfalls der asymptotischen 5 %-Werte von Z_T (575 Ohm) zwei weitere Punkte der Wirkungsgeraden der Unfallströme errechnet werden, womit die Lage der Geraden durch vier Punkte gesichert ist. Die Steigung m dieser Unfallgeraden U_R-U_R beträgt 4,03 und hat sich der Steigung der Wirkungsgeraden des Tierexperiments

B-B von *Buntenkötter et al.* weiter angenähert (die Gerade für den 5 %-Wert beim Zustand „trocken, wassernass“ wurde ebenfalls mit 4 Punkten festgelegt und zur Kennzeichnung einer möglichen Streuung als U_L-U_L in Abb. 5 eingetragen).

Auch die Gerade für die Flimmerstromstärken der Versuche von *Kiselev* [18] am Hund Ki-Ki bei einer Durchströmungsdauer von $t_D = 3.000 \text{ ms}$ ist – blass dargestellt – weiterhin in der Darstellung belassen.

Die Ergebnisse von *Kouwenhoven* am Hund (von denen in Abb. 5 nur die Ergebnisse bei $t_D = 5.000 \text{ ms}$ eingetragen sind) werden in einer Zusammenstellung in Abb. 6 für „Langzeitdurchströmungen“ durch die Versuche bei den Durchströmungsdauern $t_D = 5.000 \text{ ms}$ und „das Mittel“ der Werte für $t_D = 1.000 \text{ ms}$ und 2.000 ms gegeben; sie sind mit den zugehörigen Wirkungsgeraden in Abb. 6 dargestellt, um die Verschiebung der Lage der Wirkungsgeraden bei längerer Durchströmungsdauer zu kleineren Flimmerschwellen anschaulich zu belegen.

Man erkennt in Abb. 6, dass die Wirkungsgeraden – entsprechend der Z-Schwelle⁴ – für längere Durchströmungszeiten bei kleinen Strömen liegen, d. h. auch in Abb. 5 weiter links liegen würden als die bei kürzerer Durchströmungsdauer. Eine Auswertung der „Originaldaten“ von *Jacobsen* [28] zeigt eindrucksvoll, dass auch bei den Flimmerversuchen am Versuchstier „Schwein“ im Bereich zwischen etwa 1.000 ms bis etwa 4.000 ms ein weiterer Rückgang der Schwelle zu verzeichnen ist. Aus diesen Daten lässt sich ablesen, dass die Schwelle bei 1.000 ms bei 340 mA liegt und bei 3.400 ms (Unfallsituation) auf ca. 170 mA absinkt, entsprechend einem Rückgang um 50 %.

³) Dies ist gerechtfertigt, da ein möglicherweise unberücksichtigt enthaltener ähnlich geringer Anteil von Unfällen bei verketteter Spannung wie in der früheren Untersuchung, nachweislich abschätzbar kaum zu einer wesentlichen Änderung der Letalität im Gesamtkollektiv führt – der Datenpunkt würde also kaum merklich variieren.

⁴) Die sog. Z-Schwelle für die Zeitabhängigkeit der Flimmerschwelle wurde erstmalig von Ferris et al. [10] experimentell bei Versuchen an Schafen ermittelt. Danach ergibt sich zwischen den Schwellenwerten bei „Kurzzeitdurchströmung“ unter einer Herzperiode und der bei „Langzeitdurchströmung“, die bei Zeiten > mehrere Herzperioden liegt, ein Unterschied, der in der Größenordnung von 10:1 liegt.

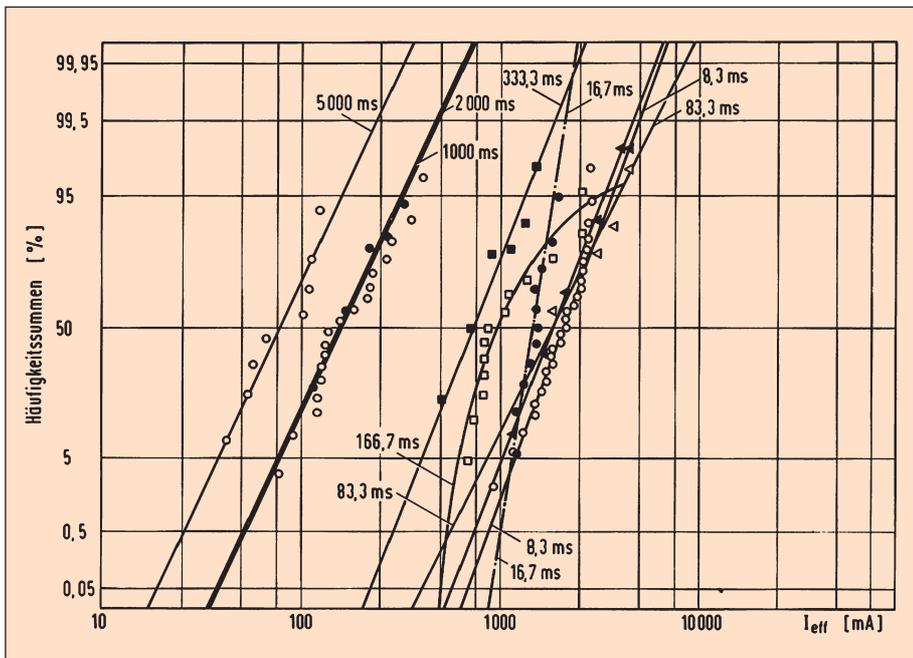


Abb. 6: Häufigkeitsverteilung der Flimmerschwellen von Hunden nach Kouwenhoven [20], zusammengestellt von Kieback [17]

2.3.5 Problematik: Übertragung von Tierversuchen auf den Menschen

Die unter 2.3.4 dargelegten Verhältnisse geben Aufschluss über den „scheinbar“ zu groß ermittelten Übertragungsfaktor vom Tier (Schwein) auf den Menschen (Die Übertragung der „Originaldaten“ der Versuche von Buntenkötter würden mit $\ddot{u} = F_V = 2,6$ zu wesentlich zu großen Flimmerstromstärken für den Menschen führen, die weit rechts von den Werten der „Unfallgeraden“ U_R-U_R lägen). Die Abweichung vom experimentell [4, 13, 21] und rechnerisch [5] ermittelten Wert von im Mittel etwa $\ddot{u} = F_V = 2,6$ ist in der unterschiedlich großen mittleren Durchströmungsdauer einerseits bei den Versuchen von Buntenkötter, andererseits bei den Durchströmungsdauern der Unfallauswertung begründet.

Für die Gerade der Versuche von Buntenkötter findet sich in der Literatur [5, 13, 27] die Angabe $t_D > 1,5$ HP (HP = Dauer der Herzperiode) bei einer mittleren HP für die verwendeten Schweine von 0,45 s [27]; dies bedeutet eine Durchströmungsdauer $t_D > 0,7$ s; weitere Hinweise bei einer Retrospektive anlässlich später

durchgeführter Versuche zur Ermittlung der Flimmerschwellen bei phasenangeschnittenen und schwingungspaketgesteuerten Strömen zeigen, dass die Stromdauer im Mittel nur wenig über 1 s (1.000 ms) betragen hat.

Für die Unfalldaten der Wirkungsgeraden der Hand-Hand-Unfälle kann die mittlere Stromdauer aus den den Letalitäten zugeordneten Zeitbereichen entnommen werden. t_D liegt für die Unfälle bei 2,8 s bis 4 s (Mittel 3,4 s), also „vollständig“ im Bereich niedriger effektiver Ströme des Z-förmigen Verlaufs der Stromstärke-Zeitabhängigkeit der Flimmerschwelle. Das bedeutet, dass die „Bezugsgerade“ B-B der Versuche von Buntenkötter, welche die Gültigkeitskriterien der Parallelität und Linearität belegt, für Rückschlüsse auf den Übertragungsfaktor \ddot{u} (Schwein-Mensch) = F_V nicht unmittelbar geeignet ist, weil sie zu weit rechts, also bei zu großen Strömen liegt (\ddot{u} (Schwein-Mensch-) = F_V wird zu klein ermittelt).

Dass diese Feststellung zutrifft, wird aus der vergleichenden Betrachtung der Wirkungsgeraden für die Versuche am Hund deutlich. Für den Vergleich der Mittelwerte (LD_{50} -Werte) der Wirkungsgeraden Kou-Kou der Versuche von Kouwenhoven beim Hund für $t_D = 5.000$ ms mit den Unfalldaten ergibt sich ein Übertragungsfaktor \ddot{u} (Hund-Mensch) = $F_V = 3,2$; dies entspricht etwa dem von Green ermittelten Wert von 3,5. (Für den Mittelwert der „Hunde-Daten“ bei $t_D = 1.000$ ms/2.000 ms würde er bei 1,6 liegen, was also nach Angaben der Literatur ebenfalls zu klein wäre – zu klein, weil die Durchströmungsdauern nicht gleich oder ähnlich sind, und die Z-„Kurve“ noch nicht gänzlich auf das niedrige Niveau der Flimmerschwelle bei „langen“ Durchströmungszeiten abgeschwungen ist). Verwendet man die durch sehr viele Versuche gesicherten Daten von Kiselev bei $t_D = 3.000$ ms, so erhält man einen Übertragungsfaktor $F_V = \ddot{u} = 3,6$. Der Mittelwert von diesem und dem oben für die Kouwenhoven'schen Daten ermittelten $F_V = \ddot{u}$ (Hund-Mensch) = 3,2 beträgt $F_V =$

Perzentile [%] (1)	Probit [-] (2)	Flimmerstrom- stärke [mA] (3)	Transferierte Flimmerstromstärke [mA]		
			50 % des Wertes der Flimmerstromstärke (4)	Übertragung mit $\ddot{u} = F_V$ = 2,54 (4) x 2,54	Übertragung mit $\ddot{u} = F_V$ = 2,8 (4) x 2,8
5	3,3551	118	59	149,9	165,2
50	5,0000	186	93	236,2	260,4
95	6,6449	292	146	370,8	408,8

Tabelle 6: Transfer der Lage der Wirkungsgeraden am Schwein in den Zeitbereich ≥ 3000 ms

\ddot{u} (Hund-Mensch) = 3,4, liegt also noch näher an dem *Green'schen* Übertragungsfaktor. Dieses Ergebnis stützt implizit auch die hier getroffene Impedanz-Wahl (asympt. 5 % trocken wassernass) für die Unfalldaten und damit die letztlich gewählte Lage der Wirkungsgeraden der Unfallströme U_R-U_R . (Die Steilheit der Wirkungsgeraden für den Menschen zeigt im übrigen, dass die besondere Auswahl der Fälle der „Hand-Hand-Durchströmung“ in der Tat eine relativ präzise und empfindliche Bestimmungsmethode für das „Strom-Risiko“ darstellt {im Sinne einer gut angelegten Dosiswirkungsbestimmung führen hier geringe Veränderungen der Stromstärke zu großen Veränderungen der Wirkung}. Das beabsichtigte Ausschalten von streuungsvergrößernden Einflussparametern findet hierin seinen Ausdruck).

Die Wirkungsgeraden der Flimmerschwellen von *Kouwenhoven* [17, 20] lassen nun weitere Rückschlüsse zu. Die Stromstärke beim LD_{50} -Wert für $t_D = 5.000$ ms liegt etwa 50 % unter der für $t_D = 2.000$ ms/1.000 ms. Die Auswertung der Originaldaten von *Jacobsen und Buntenkötter* belegt ebenfalls diesen Rückgang um 50 % (s. Kap. 2.3.4, S. 15).

Reduziert man die Werte der Wirkungsgeraden B-B nach *Buntenkötter* (die, wie erläutert, für $t_D = 1.000$ ms und wenig mehr gilt) berechtigterweise um 50 %, so kommt die Gerade in die gepunktet gezeichnete Lage B'-B' (Abb. 5). Überträgt man diese „zeitkorrigierte“ Gerade mit den von *Brucher und Meyer-Waarden* ermittelten Übertragungsfaktoren $\ddot{u} = 2,54$ und $\ddot{u} = 2,8$, so ergeben sich die beiden in Abb. 5 grün gezeichneten Geraden B_1-B_1

und B_2-B_2 . Die am asymptotischen 5 %-Wert (trocken, wassernass) orientierte „Unfall-Wirkungsgerade“ U_R-U_R fällt praktisch mit der aus den Tierversuchen resultierenden transferierten und mit $\ddot{u} = 2,8$ übertragenen Geraden B_2-B_2 zusammen (für die „Unfall-Wirkungsgerade“ U_R-U_R würde sich ein Übertragungsfaktor von \ddot{u} (Schwein-Mensch) = $F_V = 2,83$ ergeben). Dies bedeutet, dass die „Unfall-Wirkungsgerade“ U_R-U_R praktisch „exakt“ den Verhältnissen entspricht, die von *Brucher und Meyer-Waarden* über die Identität der Stromdichten im Herzmuskel ermittelt wurde, was elektrophysiologisch auch am ehesten plausibel ist.

Damit steht also die *gewählte* Unfall-Wirkungsgerade U_R-U_R (asymptotischer Wert von Z {trocken, wassernass}) sehr gut im Einklang mit den Ergebnissen der Tierversuche und bestätigt die naheliegende und plausible Wahl des asymptotischen Z-Wertes (der an der Geraden U_L-U_L für den 5 %-Wert von Z_T {trocken, wassernass} errechnete Übertragungsfaktor läge bei 2,32 und wäre damit um einiges zu klein). Gleiches folgt für den Übertragungsfaktor beim Vergleich Mensch-Hund: Bei der „asymptotisch orientierten“ Geraden U_R-U_R folgt für $F_V = \ddot{u}$ (Hund-Mensch) = 3,61 – bei der weiter links liegenden Geraden ist $F_V = \ddot{u}$ (Hund-Mensch) = 3,07 also ebenfalls ein „zu kleiner“ Wert.

Da eine Umrechnung auf herzäquivalenten Strom (entsprechend den Herzstromfaktoren) erfolgt ist, gilt die Wirkungsgerade U_R-U_R im Sinne der Stromgefährdung durch Herzkammerflimmern beim Menschen im Grunde für den Stromweg Hand-Hand, ist aber eben durch die Um-

rechnung einer Längsdurchströmung herzüquivalent. Die ermittelten Ströme können damit bereits als Minimalwerte angesehen werden, denn bei Längsdurchströmung und bei praktisch allen anderen Stromwegen treten wegen des größeren Herzstromfaktors – abgesehen von den „Übergangswiderständen“ – größere Ströme auf, die flimmer-effektiv sind, und sie müssten nach den vorliegenden Unfalldaten größeren Letalitätswerten zugeordnet werden. Die ermittelte Wirkungsgerade U_R-U_R kann im Sinne pessimaler Verhältnisse gewertet werden, und die ablesbaren Daten können unmittelbar für die kritische Beurteilung der c_1 -Kurve im IEC-Report 60479 [12] herangezogen werden.

Eine weitere Möglichkeit des Eintrags von Unfalldaten bietet sich für Stromwege der sog. Querdurchströmung mit Strommarken an, wenn ein „Hand-Hand“-„Kopf“, „Hand-Hand“-„Rücken“ („Hand-Hand“-„Brust“)-Stromverlauf vorliegt, bei dem ebenfalls keine Übergangswiderstände von Kleidung vorlagen und/oder von Fußböden zu berücksichtigen gewesen sind.

Die Ergebnisse der Auswertung der Unfalldaten in Abhängigkeit von der Durchströmungsdauer zeigen, dass bei Stromwegen mit prinzipiell größeren Körperströmen eine Parallelverschiebung (in diesem Falle zu höheren Werten der Letalität) stattfindet (Abb. 3 und 4). Für bestimmte Fälle der Querdurchströmung (Hand-Hand – Rücken/Gesäß/Brust) und deren Letalität kann man daher auch die zugehörigen herzäquivalenten Ströme abschätzen und mit einigem Vertrauen nach der in der Biometrie begründeten und verwendeten so genannten *Einpunkt-*

methode die Lage der zugehörigen Wirkungsgeraden durch Parallelzug einer Geraden zur Wirkungsgeraden für den Stromweg „Hand-Hand“ durch die Koordinatenpaare festlegen (Abb. 5). Für den Stromweg „Hand-Hand“-„Kopf“ ergibt sich ein herzäquivalenter Strom von 254 mA bei einer Letalität von 11,8 % {Fallzahl F: 17(2)}, beim Stromweg „Hand-Hand“-„Rücken,“ {F: 10(2)} beträgt $I_H = 459$ mA bei einer Letalität von 20,0 %.

Die noch theoretisch begründbare Verlängerung der aus der Unfallauswertung ermittelten Wirkungsgeraden U_R-U_R (blau dargestellt) für den Hand-Hand-Stromweg bis zur 0,1 %-Linie würde bei Verwendung der 5 %-Werte der Körperimpedanzen Z_T (asymptotisch, trocken, wassernass), (also entsprechend $\ddot{u} = F_V = 2,83$) als untere Stromstärke für den tödlichen Verlauf eines Stromunfalls den Wert von etwa 120 mA ergeben. Bei der mit $\ddot{u} = F_V = 2,54$ von den Tierversuchen übertragenen (grünen) Geraden B_1-B_1 läge der Wert etwa bei 100 mA (Der Wert von 86,5 mA, der für die Gerade U_L-U_L mit dem „normalen“ 5 %-Wert von Z (trocken, wassernass) resultieren würde, scheidet nach den hier getroffenen Feststellungen aus, da diese Gerade nicht den möglichen Übertragungsfaktoren entspricht).

Es ließe sich also aus dem Diagramm eine theoretische Eintrittswahrscheinlichkeit eines tödlichen Unfalles mit den genannten Stromstärken von nur 1 Promille ablesen. Die entsprechenden Werte lägen dann etwa zwischen 90 mA und 120 mA.

Es könnte aber durchaus sein, dass diese Stromstärken überhaupt nicht mehr zum Flimmern führen. Denn die Stromwirkung auf das Herz hat erwiesenermaßen Schwellencharakter. Ähnlich muss auch in der Pharmakologie erst eine gewisse Dosis oder Konzentration überschritten werden, wenn ein Effekt deutlich werden soll (siehe auch Grundtyp einer Konzentrations-Wirkungs-Kurve in Abb. 7 [8]). Punkt B der Grafik in Abb. 7 zeigt also die Schwellendosis oder Grenzkonzentration. Im Übrigen gibt es auch eine maximale Wirkung, über die nicht hinausgegangen werden kann. Dies ist bei C erreicht. Rechts von C läuft die „Kurve“ horizontal, und zwar wirklich horizontal, nicht asymptotisch [8]. Das elektrophysiologische Analogon dürfte die nach P.S. Chen et al. tatsächlich existierende obere Flim-

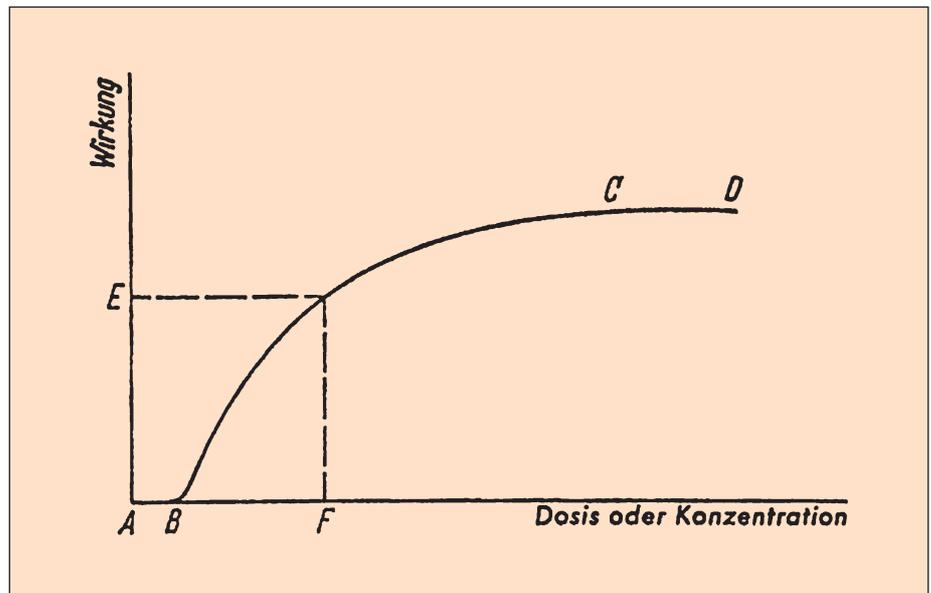


Abb. 7: Grundtyp einer Konzentrations-Wirkungskurve (aus [8])

mergrenze darstellen [26]. Der Schwellenwert des Stromes (Grenzdosis) könnte aber auch bei größerer Stromstärke liegen. Die Lage des Schwellenwertes, unterhalb dessen „garantiert“ kein Effekt (Flimmern) auftritt, ist nicht bekannt; sie ist auch am Tier nicht experimentell ermittelt.

Da man über den Zahlenwert einer „sicheren“ Schwelle nichts aussagen kann, wurde ein an dem hier dargelegten Sachverhalt orientierter Vorschlag zur Revision der IEC-Publikation (der ein Restrisiko von 1 % beinhaltet) bereits in *Schutz in elektrischen Anlagen, Bd. 1: Gefahren durch den elektrischen Strom* der VDE Schriftenreihe *Normen verständlich, Nr. 80* aufgenommen [23].

Würde man sich auf ein Restrisiko mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit von 1 % einigen wollen, so könnte der Stromwert etwa zwischen 120 mA (für die eher unwahrscheinliche Gerade U_L-U_L mit $\ddot{u} = F_V = 2,54$) und 146 mA (für die hier stark gesicherte Gerade U_R-U_R entsprechend $\ddot{u} = F_V = 2,83$) liegen (bei Orientierung am asymptotischen 5 %-Wert von Z_T {trocken, wassernass}). (Der für die Revision der IEC-Publikation 60479, Teil 1 vorgeschlagene Geradenzug, der hier in Abb. 8 gezeigt ist, beinhaltet demnach eine zusätzliche Sicherheit der getroffenen Aussage).

Bei Verwendung der nach der vorliegenden Auswertung der Unfälle also am ehesten wahrscheinlichen – weil plausibel

statistisch gesicherten – niedrigeren asymptotischen 5 %-Werte von Z_T (trocken, wassernass) könnte – wie gesagt – sogar mit gutem Vertrauen und einiger zusätzlicher Sicherheit für den Grenzwert des Stromes im Langzeitbereich der Durchströmung ab 500 ms (Geradenzug c) ein Stromwert von 100 mA bei einem Restrisiko von nur 0,1 % in Vorschlag gebracht werden (davon wird hier im Folgenden aber abgesehen werden, da das Restrisiko nach Vorschlag von Biegelmeier et al. bei 1 % angesiedelt werden sollte).

Die zeitliche Zuordnung der Stromstärkewerte der Auswertung der Unfalldaten innerhalb der Stromstärke-Zeit-Bereiche des *IEC-Reports 60479* [12] bzw. innerhalb der abgewandelten Version von *Figure 14* [23] kann über die Abhängigkeit der Letalität der Stromunfälle bestimmter Stromwege von der Durchströmungsdauer (Abb. 3, 4 und 5) ermittelt bzw. abgeschätzt werden.

Für die hier relevante Querdurchströmung „Hand-Hand“ als unterer „Grenzwert“ aller möglichen Wirkungsgeraden ergibt die Auswertung der Unfalldaten die Grafik der Abbildung 8, die als Basis die Stromstärke-Zeitbereiche der *Figure 14* des *IEC-Reports* beinhaltet [12] und in die auch der Vorschlag für die revidierte Fassung [23] eingetragen ist.

Der zur Bestimmungsgeraden U_R-U_R der Unfallauswertung in den Abbildungen 5 und 9 gehörige Wert der Letalität $L = 1,6$ %

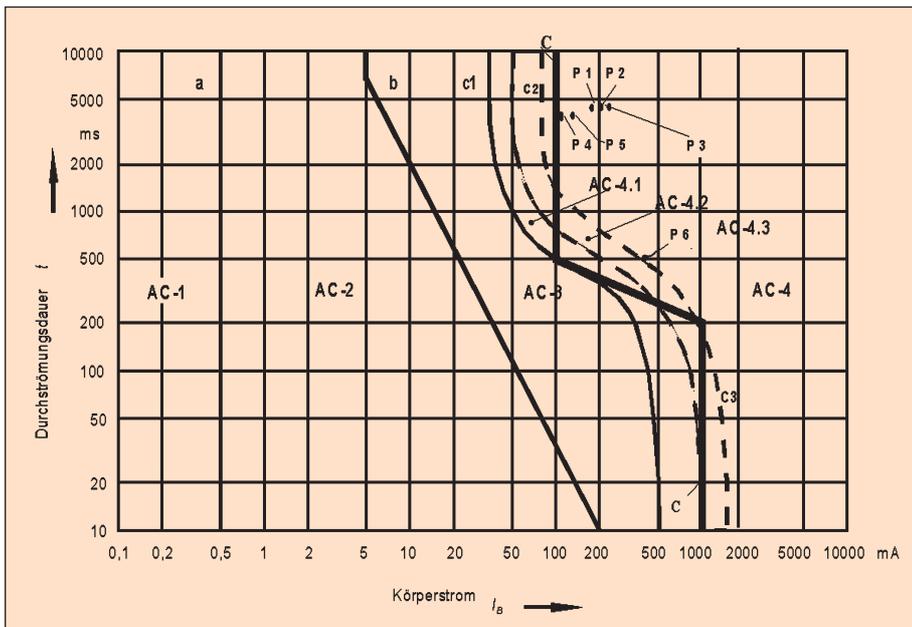


Abb. 8: Stromstärke/Zeit-Wirkungsdiagramm bzgl. Herzkammerflimmern für Wechselstrom 15 – 100 Hz
Modifiziert nach: DIN IEC/TS 60479-1 (VDE V 0140-479-1):2007 [vgl. 9, 12]*

- P1: 196 mA; ca. 4.000 ms; 380 V; 50%-Wert von $Z_{\text{asymptotisch}}$ (tr. wn)
P2: 264 mA; ca. 4.000 ms; 380 V; 5%-Wert von $Z_{\text{asymptotisch}}$ (tr. wn)
P3: 254 mA; ca. 3.800 ms; Hand-Hand/Kopf
P4: 114 mA; ca. 2.800 ms; 220 V; 50%-Wert von $Z_{\text{asymptotisch}}$ (tr. wn)
P5: 153 mA; ca. 2.800 ms; 200 V; 5%-Wert von $Z_{\text{asymptotisch}}$ (tr. wn)
P6: 459 mA; ca. 500 ms; Hand-Hand/Rücken

führt beispielsweise zu einer mittleren Durchströmungsdauer von 2,8 s. Bei diesem Wert der Einwirkdauer sind die zugehörigen Stromwerte (errechnet mit dem 5 %-Wert von Z_T {trocken, wassernass}, und mit dem asymptotischen 5 %-Wert von Z_T {trocken, wassernass}) in das Bild der Publikation IEC 60479-1 [12] einzutragen (das – wie erwähnt – auch den Vorschlag für die Revision der Grafik nach Biegelmeier et al. [23] enthält: doppelt abgewinkelter dick dargestellter Linienzug C-C).

Verfährt man in dieser Weise für alle von der Auswertung erfassten Stromwerte, so erhält man die Punkte mit den gezeigten Koordinaten und Kenndaten. Die Daten der tödlichen Stromunfälle liegen mit ihren Stromstärke-Zeitkoordinaten alle im Bereich AC-4.3, also rechts der Kurve c_3

*) Auszüge aus DIN IEC/TS 60479-1 (VDE V 0140-479-1), Ausgabe 2007, sind wiedergegeben mit Genehmigung 132.008 des DIN Deutsches Institut für Normung e.V. und des VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. Maßgebend für das Anwenden der Normen sind deren Fassungen mit dem neuesten Ausgabedatum, die bei der VDE VERLAG GMBH, Bismarckstr. 33, 10625 Berlin, www.vde-verlag.de und der Beuth Verlag GmbH, Burggrafenstr. 6, 10787 Berlin erhältlich sind.

und auch rechts vom Geradenzug der revidierten Fassung der Grafik nach [23]. Es ist ersichtlich, dass die c_1 -Kurve nach IEC bzw. nach DIN V VDE 140-479 als Gefährdungsgrenzkurve eine sehr große Sicherheit beinhaltet. Die Grenzkurve könnte und sollte daher durchaus – einerseits aus den theoretischen und experimentell begründeten Überlegungen heraus und andererseits auch durch die Auswertung eingetretener Unfälle gestützt – zu größeren Stromstärke-Werten hin verschoben werden. Der Vorschlag von Biegelmeier et al. greift diesen Tatbestand auf – im Sinne einer plausiblen und elektrophysiologisch vertretbaren Vereinfachung – mit dem gezeigten Geradenzug C-C für ein gegebenes Risiko. Abschließend sind die hier ermittelten Relationen zu den Angaben in der derzeit gültigen Version der IEC-Publikation 60479-1 [9, 12] nochmals im Häufigkeitsnetz der Wirkungsgeraden (Flimmerstromstärken) gezeigt – dadurch, dass die IEC-Werte der dort gezeigten „Kurven“ c_2 und c_3 für bestimmte Zeitdauern der Durchströmung entnommen und in das Häufigkeitsnetz eingetragen sind (Abb. 9).

Es ergeben sich Geraden, die sich als Parallelen zu den Wirkungsgeraden zeigen (was zu erwarten war, da die „Kurven“ der IEC-Publikation aus den Daten von Tierversuchen erstellt wurden). Bemerkenswert ist, dass die „IEC-Werte“ weit links von den „wahren“ realen Wirkungsgeraden für den Menschen („Unfallgeraden“) liegen und daher auch eher unrealistisch niedrige „Risiko-Grenzwerte“ einer Körperdurchströmung liefern würden. In Abb. 9 wird auch die ansonsten hier in der Abhandlung unberücksichtigt gebliebene Kurzzeitdurchströmung veranschaulicht. Einerseits wurden die IEC-Daten für eine Durchströmungsdauer von $t_D = 200$ ms aus Figure 14 des IEC-Reports 60479-1 übertragen, andererseits wurden die Versuchsergebnisse von Buntenkötter et al. [4, 5, 27] für Kurzzeitdurchströmungen mit dem (möglicherweise etwas zu großen) Übertragungsfaktor $F_V = 2,8$ eingetragen. Aber auch bei kleinerem F_V würden sich eklatante Unterschiede zeigen; die IEC-Werte liegen weit links und würden unrealistische „Risiko-Grenzwerte“ ergeben.

2 Vergleichende Betrachtung der Letalität L bei Tierversuchen und der Unfallstatistik von Stromunfällen

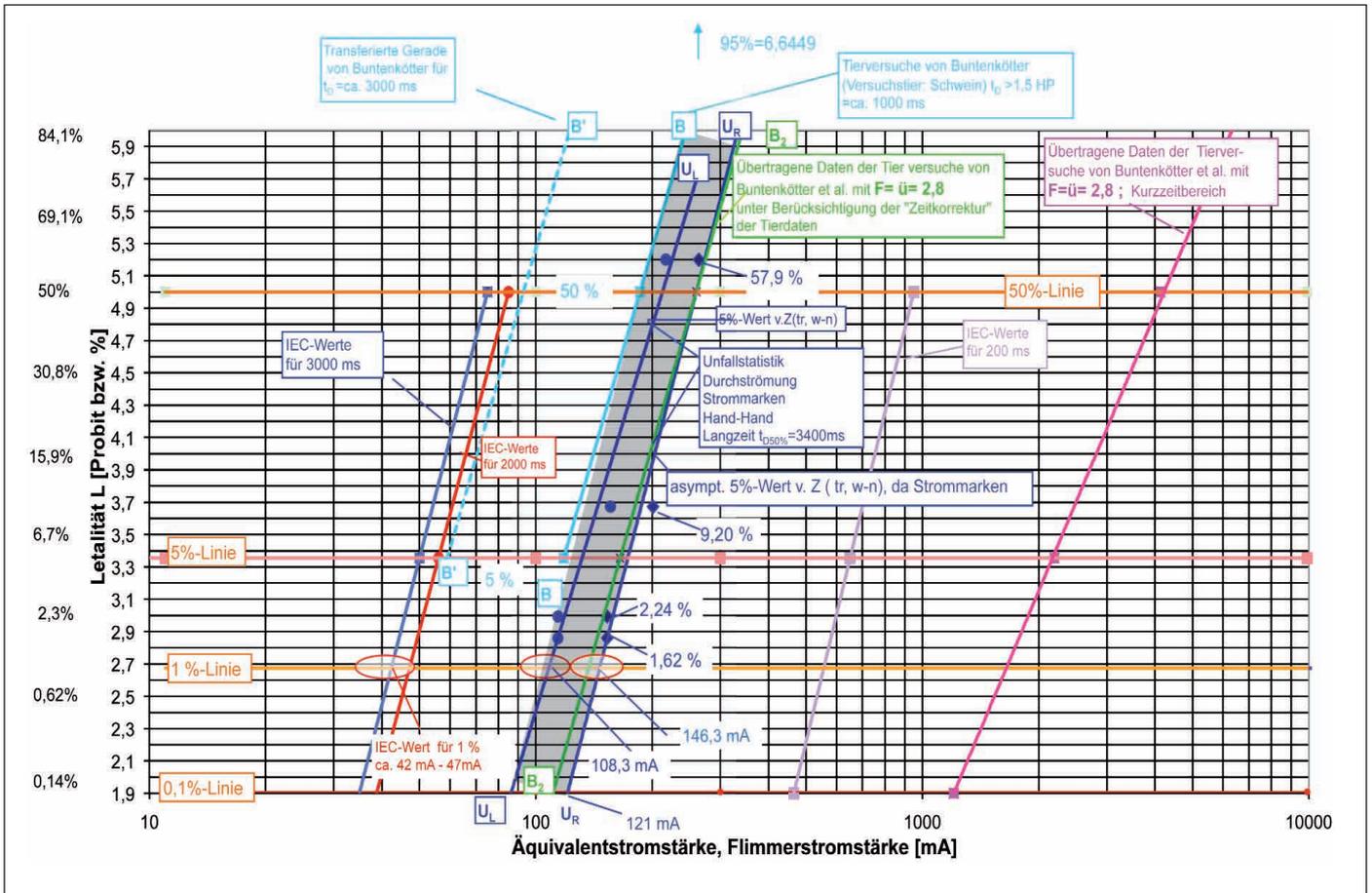


Abb. 9: Häufigkeit von Flimmerstromstärken bzw. Äquivalentstromstärken: Ergebnisse von Tierversuchen und der Unfallstatistik unter Berücksichtigung von Computerberechnungen am Modell von Mensch und Tier; Vergleich mit IEC-Werten nach Publikation 60479-1*

- Regressionsgerade B-B (Buntenkötter: Schwein; $t_D > 1,5$ HP) $y = 3,6306 \ln(x) - 13,969$
- Regressionsgerade B'-B' *Zeitdauerkorrektur* (Buntenkötter: Schwein; $t_D > 1,5$ HP) $y = 3,6308 \ln(x) - 11,452$
- Regressionsgerade B₂-B₂ Rücktransfer mit $\bar{u} = F_V = 2,8$ (Buntenkötter: Schwein; $t_D > 1,5$ HP) $y = 3,6306 \ln(x) - 15,191$
- Regressionsgerade U_R-U_R (Unfall: Hand-Hand; $t_{D\text{mittel}} = 3.400$ ms) $y = 4,0347 \ln(x) - 17,441$ (asympt. 5%-Wert f. $Z\{tr; w\}$); $R^2 = 0,965$
- Regressionsgerade U_L-U_L (Unfall: Hand-Hand; $t_{D\text{mittel}} = 3.400$ ms) $y = 3,4351 \ln(x) - 13,41$ (5%-Wert f. $Z\{tr; w\}$); $R^2 = 0,9696$

* In Abbildung 9 ist der zuvor in Abbildung 5 textlich an den Geraden U_R-U_R und U_L-U_L definierte mögliche Variationsbereich (Software-technisch bedingt) durch ein grau dargestelltes Parallelogramm wiedergegeben, das an der Geraden U_R-U_R orientiert ist. Dadurch sichert der Bereich in Einklang mit U_L-U_L mögliche Äquivalentstromstärken bis zu einer Letalität/Eintrittswahrscheinlichkeit einer tödlich wirkenden Stromstärke von etwa 2,2 % ab. Dies ist der für die hier vorgenommene Sicherheitsbetrachtung relevante Bereich. Zu höheren Letalitätsbereichen hin nähert sich die linke Seite des Parallelogramms der Geraden B-B der Tierversuche von *Buntenkötter* [4] an, die aus den zuvor genannten Gründen für die Beurteilung der Elektrosicherheit beim Menschen ausscheidet.

3 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Abhandlung vergleicht Flimmerstromstärken, die in Tierversuchen ermittelt wurden, und die daraus resultierende Letalität mit der Letalität von Stromunfällen, die aufgrund umfassender Erhebungen aus großen Datenkollektiven des Instituts zur Erforschung elektrischer Unfälle der BG Elektro Textil Feinmechanik (früher: Feinmechanik und Elektrotechnik) problemorientiert ausgewählt wurden. Neuere Untersuchungsergebnisse über die Impedanzen des menschlichen Körpers sind maßgeblich für die Berechnung der Unfallströme. Für die Beurteilung der Übertragbarkeit der Ergebnisse von Tierversuchen wird insbesondere auf die Berechnungen von Strömen an Computermodellen von Mensch und Tier von *Brucher und Meyer-Waarden* zurückgegriffen.

Früher zunächst vordergründig festgestellte erhebliche Diskrepanzen zwischen den seinerzeitig möglichen nachträglichen Berechnungen von Unfallströmen tödlicher Unfälle und den durch die Übertragungsfaktoren Tier/Mensch errechneten Flimmerstromstärken werden erklärt und letztlich beseitigt. Die Überlegungen werden in den Bezug zum derzeit vermittelten Wissensstand der derzeit gültigen IEC-Publikation 60479-1, (2006) [9, 12] gebracht. Es wird ersichtlich, dass die IEC-Publikation von höheren Wahrscheinlichkeiten der Auslösung von Herzkammerflimmern ausgeht als dies nach den hier angestellten Überlegungen und weiteren Auffassungen [23] der Fall sein dürfte.

Da die Schwelle eines sicheren „no observed effect levels“ (NOEL) nach Körperdurchströmungen des Menschen allerdings nicht mit Sicherheit bekannt ist, wurden in der Literatur Überlegungen angestellt, „akzeptable“ Risiken abzuleiten. Vorschläge, die sich auch aus den hier vorgelegten Untersuchungen erhärten

lassen, führen zu einer im Vergleich zur IEC-Publikation 60479-1 geänderten Körperstrom-Risiko-Kurve bzgl. der Auslösung von Herzkammerflimmern beim Menschen in Abhängigkeit von Dauer und Höhe der Körperdurchströmung bei einer Wechselfrequenz von 50 Hz. Hierbei wird, analog zu der IEC-Publikation, als untere „Schwelle“ ein 1 %-iges Risiko eingetragen; auf Grund der weiteren Daten in der Literatur und der hier vorgestellten Auswertungen von Unfallmeldungen ergibt sich hierfür eine Verschiebung der Risiko-Linien „nach rechts“, also hin zu höheren bzw. längeren Körperdurchströmungen (vgl. auch [23]).

Es sind deshalb in der Fachwelt Überlegungen angestellt worden, auch in den internationalen Veröffentlichungen des IEC diese Kurven zu übernehmen.

Demgegenüber stehen Überlegungen, dass die Angabe von unteren ableitbaren Risiko-Kurven, wie z. B. dem 1 %- oder auch dem 1 Promille-Risiko, von den Anwendern quasi als „sicherer Grenzwert“ einer Körperdurchströmung, bei dessen Unterschreitung keinerlei Gesundheitsschaden zu befürchten wäre („Null-Risiko“), fehlinterpretiert werden könnte; dies könnte zu gefährlichen Fehleinschätzungen der Gefahren des elektrischen Stroms führen.

Aus diesem Grund hat das IEC die Körperstrom-Risiko-Kurven für Kammerflimmern bisher nicht revidiert.

Dies spiegelt auch die Diskussion in der Gesellschaft und insbesondere in der Arbeitswelt wider, die sich mit der Frage eines noch „akzeptablen“ oder „tolerablen“ Risikos einer tödlichen Erkrankung oder eines tödlichen Unfalls infolge der Arbeitstätigkeit beschäftigt. Besonders virulent ist diese Diskussion derzeit auch bzgl. der Grenzwertfestsetzung für krebs-erzeugende Arbeitsstoffe.

Insofern kommt die Beibehaltung der Kurven in der IEC-Publikation, die das tatsächlich bestehende Risiko für Herzkammerflimmern in Abhängigkeit von Höhe und Dauer einer Körperdurchströmung höchst wahrscheinlich überschätzen, dem heutigen Sicherheitsbedürfnis entgegen.

Ungeachtet dessen sollten die in dieser Arbeit dargestellten Daten und Schlussfolgerungen Anlass für eine weitergehende Diskussion in der kontinuierlichen Fortführung der Normungsarbeit des IEC sein.

4 Literatur

- [1] Antoni, H.; Biegelmeier, G.; Kieback, D.: Konventionelle Grenzwerte mit vertretbarem Risiko für das Auftreten von Herzkammerflimmern bei elektrischen Durchströmungen mit Wechselstrom 50/60 Hz bzw. Gleichstrom. Schriftenreihe der Stiftung Elektroschutz (Electrical Safety Foundation, ESF), Wien; ESF-Bericht Nr. 3, Wien, 2001
- [2] Bachl, H.; Biegelmeier, G.; Hirtler, R.: Körperimpedanzen des Menschen bei trockenen, wassernassen und salznassen Berührungsflächen verschiedener Größe. Schriftenreihe der Stiftung Elektroschutz (Electrical Safety Foundation, ESF), Wien; ESF-Bericht Nr. 2, Wien, 2001
- [3] Biegelmeier, G.: Schutz gegen elektrischen Schlag – Beurteilung der Grenzrisiken, Wertigkeitsvergleiche. Schriftenreihe der Stiftung Elektroschutz (Electrical Safety Foundation, ESF), Wien; ESF-Bericht Nr. 4, Wien, 2001
- [4] Buntenkötter, S.; Jacobsen, J.; Reinhard, H.J.: Experimentelle Untersuchungen an Schweinen zur Frage der Mortalität durch sinusförmige, phasenangeschnittene sowie gleichgerichtete elektrische Ströme. Biomedizinische Technik 20 (1975) 99
- [5] Brucher, R.; Meyer-Waarden, K.: Berechnung der Stromdichteverteilung am Modell des Menschen bei unterschiedlich vorgegebenen Stromwegen im Körper; Medizinisch-technischer Bericht; Institut zur Erforschung elektrischer Unfälle. Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik, Köln, 1985
- [6] Borth, R.; Diczfalusy, E.; Heinrichs, H.D.: Grundlagen der statistischen Auswertung biologischer Bestimmungen. Arch. Gynäkol. 188 (1957) 498-538
- [7] Cavalli-Sforza: Biometrie – Grundzüge biologisch-medizinischer Statistik, Kap. 10 Probitanalyse, 165. Gustav Fischer, Stuttgart, 1974
- [8] De Jonge, H.: Einführung in die Pharmakologie. Urban & Schwarzenberg, München/Berlin, 1965
- [9] DIN IEC/TS 60479-1 (VDE V 0140-479-1): Wirkungen des elektrischen Stromes auf Menschen und Nutztiere. VDE-Verlag, Berlin, 2007
- [10] Ferris, L.P.; King, B.G.; Spence, P.W.; Williams, H.B.: Effect of electric shock on the heart. Electr. Eng. 55 (1936) 498 (zit. in [23])
- [11] Freiberger, H.: Der elektrische Widerstand des menschlichen Körpers gegen technischen Gleich- und Wechselstrom. Springer, Berlin/Heidelberg/New York, 1934
- [12] International Electrotechnical Commission (IEC): Effects of current on human beings and livestock – Part 1: General aspects; IEC/TS 60479-1, 4th ed., IEC, Genf, 2005
- [13] Jacobsen, J.; Buntenkötter, S.; Reinhard, H.J.; Wissdorf, H.: Beitrag zur Übertragbarkeit der Gefährdung durch elektrische Ströme vom Modelltier Schwein auf den Menschen. Dt. Tierärztl. Wchschr. 81 (1974) 214-220
- [14] Kieback, D.: Methoden der Erfassung und Auswertung von Arbeitsunfällen in der Bundesrepublik Deutschland. Bull. ASE/UCS 74 (1983) 658-661
- [15] Kieback, D.: Ergebnisse von Forschungsarbeiten und statistischen Untersuchungen des Instituts zur Erforschung elektrischer Unfälle. e & i 106 (1989) 14-20
- [16] Kieback, D.; Seibel, D.: Gefährdung und Schutzmaßnahmen beim Umgang mit Elektrizität. In: Krause; Zander (Hrsg.): Arbeitssicherheit – Handbuch für Unternehmensleitung, Betriebsrat und Führungskräfte, Gruppe 6, 1173-1226. R. Haufe, Freiburg, 2001
- [17] Kieback, D.: Statistik des Stromunfalls; Statistik grundlegender Unfallmerkmale. In: Brinkmann, K.; Schaefer, H. (Hrsg.): Der Elektrounfall, 54-65; 154-155; 195. Springer, Berlin/Heidelberg/New York, 1982
- [18] Kiselev, A.P.: Threshold values of safe current at mains frequency; Probl. of Elec. Equipment, Elec. Supply and Elec. Measurements (in Russisch). SBMIIT 171 (1963) 47 (zit. in [23])
- [19] Knickerbocker, G.G.: Fibrillating parameters of direct and alternating (20 Hz) currents separately and in combination; Conference Paper C 72-247-0. Inst. of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Washington DC, 1972
- [20] Kouwenhoven, W.B.; Knickerbocker, G.G.; Chesnut, R.W. et al.: A-C shocks on varying parameters affecting the heart. Trans. of the Amer. Inst. Electr. Eng., Part I, 78 (1959) 163
- [21] Reinhold, K.; Buntenkötter, S.: Die Gefährdung des Organismus durch schwingungspaketartig gesteuerte Ströme; Medizinisch-technischer Bericht; Institut zur Erforschung elektrischer Unfälle. Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik, Köln, 1976
- [22] Sam, U.: Neue Erkenntnisse über die elektrische Gefährdung des Menschen bei Teildurchströmungen des Körpers; VDRI Jahrbuch. Nordwestl. Eisen- und Stahl-Berufsgenossenschaft, Hannover, 1968

- [23] Biegelmeier, G.; Kieback, D.; Kiefer, G.; Krefter, K.-H.: VDE-Schriftenreihe ‚Normen verständlich‘ Nr. 80: Schutz in elektrischen Anlagen, Bd. 1: Gefahren durch den elektrischen Strom, 2. Aufl. VDE-Verlag, Berlin/Offenbach, 2003
- [24] Schneider, B.: Probitmodell und Logitmodell in ihrer Bedeutung für die experimentelle Prüfung von Arzneimitteln. *Antibiotica et Chemotherapia* 12 (1964) 271-286
- [25] Ther, L.: Grundlagen der experimentellen Arzneimittelforschung. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, Stuttgart, 1965
- [26] Chen, P.S.; Shibata, N.; Dixon, E.G. et al.: Comparison of the fibrillation threshold and the upper limit of ventricular vulnerability. *Circulation* 73 (1986) 1022-1028
- [27] Jacobsen, J.; Buntenkötter, S.: Der tödliche Unfall – Experimentelle Daten der Tötungsbedingungen durch elektrischen Strom. In: Brinkmann, K.; Schaefer, H. (Hrsg.): *Der Elektrounfall*, 140-150. Springer, Berlin/Heidelberg/New York, 1982
- [28] Jacobsen, J.: Die Gefährdung durch phasenangeschnittene und gleichgerichtete elektrische Ströme; Dissertation. Technische Universität Hannover, Fakultät Maschinenwesen, 1973
- [29] Sachs, L.: *Angewandte Statistik; statistische Auswertungsmethoden*, 177-181. Springer, Berlin/Heidelberg/New York, 1978
- [30] *Wissenschaftliche Tabellen Geigy*; Teilband „Statistik“, 8. Aufl., 68-69 u. 200-202. CIBA-GEIGY AG, Basel, 1980

Anhang

Angaben zu den ausgewerteten Arbeitsunfällen durch elektrischen Strom

Unfalljahre 1969 bis 1996				
Stromunfälle insgesamt Basis 68.190	davon tödlich insgesamt Basis 1.398	Letalität [%] Basis 2,05	Anteil [%] an insgesamt Basis 100	Anteil [%] an tödlich insges. Basis 100
Wechselspannung ~ 62.888	davon tödlich 1.360	Letalität [%] 2,16	92,20	97,3
Niederspannung ≤ 24 V – 1000 V 59.370	davon tödlich 696	Letalität [%] 1,17	87,06	49,8
Niederspannung > 130 V – 400 V 55.399	davon tödlich 671	Letalität [%] 1,21	81,24	48,0
Durchströmungs- Dauer > 0,3 s – >3 s 22.222	davon tödlich 626	Letalität [%] 2,82	32,59	44,8
Stromweg Hand-Hand 22.988	davon tödlich 372	Letalität [%] 1,62	33,71	26,6
Strommarken (klein, groß, komb.) 18.121	davon tödlich 768	Letalität [%] 4,24	26,57	54,9
Für die Abhandlung u. a. ausgewähltes („selektiertes“) Teilkollektiv				
Nspg., ~, Hand-Hand > 130 V – 400 V 19.599	davon tödlich 254	Letalität [%] 1,3	Anteil [%] an insgesamt 28,74	Anteil [%] an tödlich insges. 18,2
<i>davon mit Strommarken</i> 8.856	davon tödlich 155	Letalität [%] 1,75	12,99	11,1
<i>davon „Langzeit-Durchström.“ > 0,3 s</i> 4.191	davon tödlich 94	Letalität [%] 2,24	6,15	6,7

In Tabelle 1 sind die Daten zum Gesamtkollektiv der von 1969 bis 1996 an die BG gemeldeten Stromunfälle sowie des für die detaillierte Auswertung herangezogenen Teilkollektivs dargestellt.

Tabelle 1:
Angaben zum „Basis-Kollektiv“ der zugrunde liegenden Daten über Arbeitsunfälle durch elektrischen Strom

Erläuterungen zur Probit-Transformation

Jeder prozentualen Häufigkeit (bzw. kumulierten prozentualen Häufigkeit = Summenhäufigkeit) kann ein Probit zugeordnet werden und umgekehrt. Die Probits werden aus dem Wahrscheinlichkeitsintegral hergeleitet. Zum Probit 5 gehört die (kumulierte) Häufigkeit von exakt 50 %, zum Probit 6 eine kumulierte Häufigkeit von rund 84,1 % (markiert die Häufigkeit bei $\mu+\sigma$) und dem Probit 4 ist eine Summenhäufigkeit von rund 15,9 % zugeordnet (markiert die Häufigkeit bei $\mu-\sigma$; zwischen $\mu-\sigma$ und $\mu+\sigma$ liegen 68 % aller Mess-/Erhebungswerte).

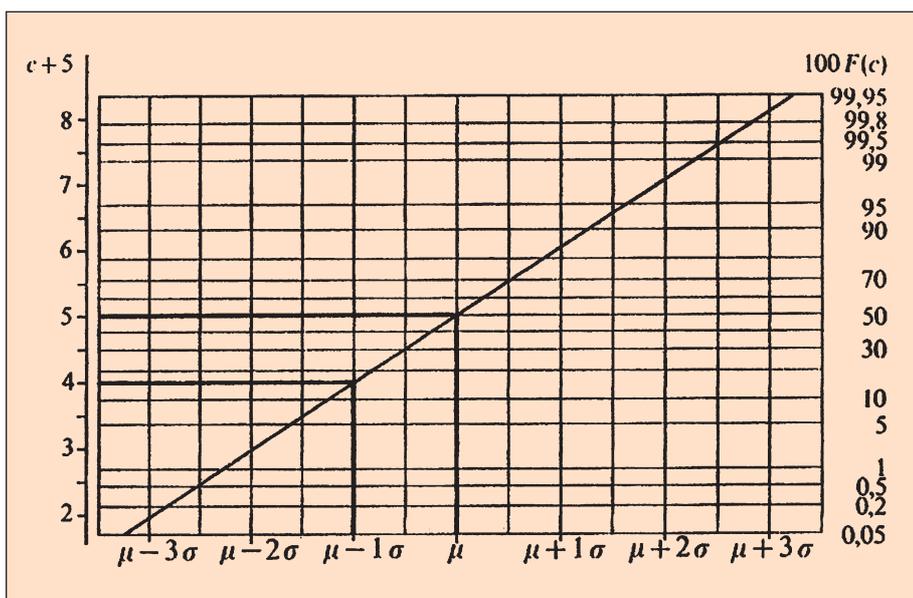
Die Probits mit den zugehörigen prozentualen Häufigkeiten sind in Zahlentafeln im allgemeinen mit vier Nachkommastellen tabelliert z. B. in den „*Wissenschaftlichen Tabellen Geigy, Teilband Statistik*“ [30]. Der 5 %-Wert hat bei der „genaueren“ Angabe der Geigy-Tabelle den Probit 3,3551, der 1 %-Wert den Probit 2,6737 (eine kurze Beschreibung der Probitanalyse findet man in *L. Sachs, „Angewandte Statistik, Statistische Auswertungsmethoden“* [29] unter dem Stichwort „Bioassay/ Wertbemessung biologisch wirksamer Substanzen auf Grund alternativer Dosis-Wirkungs-Kurven“. Eine ausführliche Be-

schreibung ist in *Cavalli-Sforza „Biometrie, Grundzüge biologisch-medizinischer Statistik“* [7] gegeben).

In Tabelle 2 sind für ausgewählte gerundete Probits in „*Halbstufen-Schritten*“ die Werte der prozentualen Summenhäufigkeit dargestellt, um zu veranschaulichen, wie bei linearem Anstieg der Probits die prozentuale Summenhäufigkeit ansteigt gemäß der Streckung der sigmoiden Kurve der kumulierten Häufigkeit, die im Summenhäufigkeits-Papier als Ordinate Verwendung findet (Grafik 1).

L [Probit]	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0
L [%]	0,14	0,62	2,3	6,7	15,9	30,9	50,0	69,1	84,1	93,3	97,7

Tabelle 2: Zuordnung der Letalität [Probit] (gerundet auf eine Nachkommastelle) zu den Werten der Letalität [%]



Grafik 1: Probitskala (=c+5) und Skala der Wahrscheinlichkeitspapiere (aus [30])

**Berufsgenossenschaft
Elektro Textil Feinmechanik**

Gustav-Heinemann-Ufer 130
50968 Köln
Telefon 0221 3778-0
Telefax 0221 3778-1199
www.bgetf.de

Bestell-Nr. M 007