Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 76 (1985)

Heft: 6

Artikel: Die Wirkung elektrischen Stromes auf lebende Gewebe

Autor: Perren, S. M. / Rahn, B. A.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904581

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: 14.10.2025

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

Die Wirkung elektrischen Stromes auf lebende Gewebe

S. M. Perren und B. A. Rahn

Der elektrische Strom fordert Jahr für Jahr seinen Anteil an Unfällen, deren Folgen meist harmlos, in gewissen Fällen aber schwere lokale Veränderungen sind, die zur Funktionseinbusse einer Gliedmasse führen oder deren Verlust durch Amputation. In einer relativ geringen Zahl führt der Elektrounfall in der Schweiz zum Tode des Verunfallten. In der Forschungsstelle für Elektrounfälle in Davos sind die Gewebeveränderungen durch den Elektrounfall bei 220 V und 110 V untersucht worden. Dies als Grundlage der Tätigkeit der Ärztekommission des VSE und jener der Arbeitsgruppe 4 der IEC TC67, die sich im Rahmen der Sicherheitsnormen mit dem Verhalten des menschlichen Körpers unter Stromfluss befassen. Die technischen Unterlagen und die lokalen physiologischen Befunde werden beschrieben.

Le courant électrique est chaque année la cause d'accidents dont les conséquences sont le plus souvent sans gravité. Dans certains cas cependant, ils peuvent entraîner une diminution de la fonction d'un membre, voir la perte de celui-ci par amputation. Dans un nombre de cas relativement faible, un accident par courant électrique entraîne la mort de l'accidenté. Dans le Service de recherches sur les accidents par courant électrique, à Davos, les conséquences sur les tissus de tels accidents avec du courant 220 V et 110 V ont été étudiées. Ceci sert de base à l'activité de la commission des médecins de l'UCS et à celle du groupe de travail 4 de l'IEC TC67, qui, dans le cadre des normes de sécurité, étudient le comportement du corps humain sous l'influence de l'électricité.

Adresse der Autoren

Prof. *Stefan M. Perren* und PD Dr. *Berton A. Rahn*, Forschungsstelle für Elektrounfälle, Laboratorium für experimentelle Chirurgie, Schweizerisches Forschungsinstitut, 7270 Davos

1. Einleitung

Die Elektrizität ist ein weitverbreiteter Energieträger und ihr Einsatz geschieht praktisch ohne Belastung der Umwelt. Diesem Vorteil stehen gewisse Gefahren gegenüber, die vor allem in der Tatsache begründet sind, dass die Anwesenheit der elektrischen Energie vom menschlichen Körper meist erst dann erfasst wird, wenn eine potentiell gefährliche Berührung stattfindet. So werden in der Schweiz zum Beispiel jedes Jahr etwa 25 tödliche Elektrounfälle bekannt.

Entscheidend in bezug auf die biologische Wirkung des Stromes und damit in bezug auf den Ausgang des Elektrounfalls ist die Stromdichte im kritischen Gewebe. Diese ist abhängig von der wirkenden Spannung an der Kontaktstelle und vom Körperwiderstand $i = f(u, R)$. Die Kenntnis des Widerstandsverhaltens des Körpers steht deshalb im Vordergrund des Interesses bei der Festlegung der Sicherheitsnormen. Diese können nicht in allen Fällen eine Gefährdung ausschliessen, sollen sie aber auf ein tolerierbares Mass limitieren.

Der Körperwiderstand setzt sich zusammen aus den beiden Komponenten Übergangswiderstand der Haut und Körperinnenwiderstand. Der Hautwiderstand ist in weiten Grenzen variabel je nach Dicke der Hornhautschicht und deren Feuchtegrad. Der Körperinnenwiderstand ändert sich dagegen nur in engen Grenzen. Damit steht die Untersuchung des Hautwiderstandes im Vordergrund des Interesses. Der Untersuchung des Hautwiderstandes sind relativ enge Grenzen gesetzt: Die anatomischen Bedingungen sind ausserhalb des menschlichen Körpers schwer zu imitieren, der elektrische Widerstand oder richtiger die Impedanz des Körpers ändert sich unter Stromfluss und in Abhängigkeit von biologischen Vorgängen wie Schweissproduktion und vor allem durch den Stromfluss selbst (Wärme mit Verdampfung der Gewebeflüssigkeit bis zur Verkohlung der Gewebe) stark. So können relevante Messungen nur durch gefährlichen Stromfluss gefunden werden. Entsprechende Untersuchungen können daher nur am Tier oder am gehirntoten Menschen durchgeführt werden. Im Tierversuch ist die Übertragbarkeit der Daten auf den Menschen und damit die Vergleichbarkeit der Gewebe zu beachten. Die grundsätzlichen Elemente des Widerstandsverhaltens lassen sich am kleineren Nager prüfen; sie sind aber am Schwein nachzuprüfen, ehe sie am Organspender endgültig gemessen werden können.

Im Folgenden sollen morphologische Veränderungen nach Messungen des Hautwiderstandes an technischen Modellen, an der narkotisierten Ratte und am narkotisierten Schwein dargestellt werden. Spätere Untersuchungen am Organspender können damit nicht ersetzt, aber in ihrer Zahl auf ein Minimum beschränkt werden.

Im Sinne einer synoptischen Darstellung der Elemente, die den elektrischen Unfall beeinflussen, und zur Klärung der Begriffe sollen die folgenden Stichworte definiert werden:

- *Unfallsituation:* Elektrounfälle sind unter den verschiedensten Voraussetzungen möglich. Je nach Art des Kontakts können unterschiedliche Effekte resultieren. Die leichte Berührung ist wesentlich harmloser als das Umfassen mit und ohne Möglichkeit des Loslassens. Unterschiedlich wirkt sich auch der direkte Kontakt und das Überschlagen des Stroms wie beim Hochspannungsunfall durch Flammenbogen aus. Nach Art des «Stroms» unterscheidet man Wechsel- oder Gleichstrom, niedere oder hohe Spannung und beim Wechselstrom niedere oder hohe Frequenz. Nach der Dauer der Einwirkung wird zwischen andauerndem Stromfluss und jenem

mit schneller oder verzögerter Abschaltung unterschieden.

● *Spannungsquelle:* Der Blitz zeigt sehr hohe Spannung, hohen Strom während kürzester Zeit, wobei die Grössen weitgehend variabel sind. Die Kondensatorentladung ist charakterisiert durch die beschränkte elektrische Energie, typischerweise mittelhohe Spannung, mittleren Strom und kurzdauernde Einwirkung. Beim Hochspannungsunfall wirkt die im Zusammenhang mit dem betroffenen Gewebe «unbeschränkte» Energie einer niederohmigen Spannungsquelle und führt meist zu schweren Verbrennungen. In Übertragungsleitungen sind heute Spannungen bis 400 000 Volt möglich. Es ist aber zu beachten, dass gerade die Leitungen mit höchsten Spannungen bei entsprechender Vorsicht ein Arbeiten an unter Strom stehenden Leitungen noch ermöglichen und die Unfallgefahr keineswegs mit steigender Spannung zunimmt.

Beim industriellen Wechselstrom handelt es sich um Niederspannungen im Verteilernetz. Hohe Energien sind auch hier möglich, die niederohmige Spannungsquelle liefert eine konstante und bekannte Spannung, am häufigsten 220/380 V bei 50 Hz.

● *Allgemeines zum Widerstandsverhalten:* Das Innere des menschlichen Körpers besteht zu mehr als 9/10 aus salzhaltigem Wasser, das dem Meerwasser gleicht (etwa 1% NaCl). Damit ist der Körperinnenwiderstand relativ tief und berechenbar. Die Körperumhüllung, die Haut, variiert in ihrem Feuchtigkeitsgehalt und damit in ihrer Leitfähigkeit in weiten Grenzen. Sie weist im Gegensatz zum Körperinnern, das ein mehr oder weniger ohmsches Verhalten zeigt, je nach Versuchsanordnung ein «kapazitives» Widerstandsverhalten auf.

● *Stromweg:* Nimmt man die Gefährdung der Herzaktion als Beispiel, so wird klar, dass für die Wirkung des Stromes nur jener Anteil wichtig ist, der durch das Herz fliesst. Ein Stromweg von Fuss zu Fuss ist daher im ersten Augenblick für das Herz wenig gefährlich, ein Stromfluss von Hand zu Hand ist für das Herz wesentlich gefährlicher.

● *Stromfluss:* Aus dem obengesagten ergibt sich, dass der Stromfluss und seine Veränderung im Ablauf der Zeit sowohl vom Verhalten der Spannungsquelle als auch vor allem vom Widerstandsverhalten des menschlichen Körpers beim Elektrounfall abhängt.

● *Leitfähigkeit:* Dem Material der Elektroden, d.h. des stromführenden und kontaktierten Materials, kommt praktisch wenig Bedeutung zu. Die unterschiedliche Leitfähigkeit der Metalle spielt beim Elektrounfall keine wesentliche Rolle. Wichtiger sind Isolierschichten, sei es in Form von Kunststoffumhüllungen der Drähte oder Kleider des Verunfallten. Wesentlich ist auch die fast banale Tatsache, dass nicht der Kontakt mit einem stromführenden Leiter zum Unfall führt, sondern nur die Entstehung eines Stromflusses genügender Grösse und Dauer. Damit kommt der «Erdung» des gefährdeten Menschen eine grosse Rolle zu. Ein Arbeiter kann wie oben erwähnt an einer Leitung mit 400 000 V arbeiten, sofern er selbst isoliert aufgehängt ist. Die initiale Berührung bewirkt aufgrund der Aufladung einen ungefährlichen Stromfluss.

● *Berührungsfläche:* Unter sonst gleichen Voraussetzungen wird erwartet, dass die Grösse der Berührungsfläche eine direkte Beeinflussung des Übergangswiderstands zeigt.

● *Körperoberfläche:* Die Dicke der Hornhaut variiert von Stelle zu Stelle beim gleichen Individuum. So ist die Hornhaut an der Fusssohle um vieles dicker als jene an der Innenseite des Vorderarms. Die Dicke der Hornhaut verändert sich aber auch als Folge der unterschiedlichen Tätigkeit der Individuen. So weist die Haut eines Handwerkers eine wesentlich dickere Hornhaut auf als jene eines Büroangestellten. Der Feuchtigkeitsgehalt der Haut variiert individuell mit der Anstrengung, der Feuchtigkeit der Umgebung und eventuell durch direkte Benetzung. Zu beachten ist dabei, dass bei Befeuchtung aus dem Körperinnern eine besser leitende Flüssigkeit im Spiele ist (salzhaltiger Schweiss), als bei äusserer Benetzung («salzfreies» Wasser). Bei sonst schwach leitender, verhornter Haut stellen die Ausführungsgänge der Drüsen eine wichtige Diskontinuität der Leitfähigkeit der Haut dar. Die Drüsenausgänge leiten wesentlich besser als die umgebende Hornschicht.

● *Körperinneres:* Bei homogener Verteilung des Stroms auf den Querschnitt wäre ein Widerstand zu erwarten, der dem Querschnitt umgekehrt proportional wäre. Die Gelenke stellen Stellen geringerer, die Blutgefässe aber solche hoher Leitfähigkeit dar. Selbst bei «homogenen» Materialien und gleichmässiger Verteilung auf den Querschnitt kann sekundär eine Inhomogenität der Stromdichte auftreten durch strombedingte Veränderung der lokalen Leitfähigkeit. Ein direkter Zusammenhang zwischen Länge der durchfluteten Körperstrecke und dem Widerstand ist anzunehmen.

● *Gefährdete Organe:* Die spezielle Gefährdung der Körperorgane durch den elektrischen Strom ergibt sich daraus, dass mehrere Organe mit lebenswichtigen Funktionen auf elektrische Einwirkung empfindlich sind. Dabei können lokal Ströme im Milliamperebereich wichtige Wirkungen entfalten. Die regelmässigen Herzschläge, durch die das Blut im Kreislauf bewegt wird, werden durch den natürlichen Schrittmacher des Herzens ausgelöst. Im kritischen Sinusknoten sind dabei Spannungen in der Grösse einiger zehn Millivolt und entsprechend geringe Stromwerte aktiv. Dieses Schrittmachersystem des Herzens ist damit entsprechend anfällig auf Störungen durch extern einwirkenden Strom. Die geordnete Ausbreitung des Steuersignals und damit die geordnete Zusammenziehung des Herzmuskels sind ihrerseits Stellen erhöhter Empfindlichkeit. Wird der Herzmuskel nicht in zeitlicher Abfolge geordnet zur Kontrakation gereizt, entsteht eine Eigenaktivität. Diese kann lebensrettend sein unter der Bedingung, dass die Eigenaktivität nicht zum Flattern oder Flimmern des Herzens führt.

● *Stromanteil:* Da der natürliche Strom im Herzmuskel sehr gering ist, lässt sich die Herzaktivität schon durch kleine überlagerte Ströme stören. Kurz nach Ablauf einer Erregungs- und damit Kontrakturwelle befindet sich der Herzmuskel im Zustand der Untererregbarkeit. Damit ist in bezug auf die Gefährdung der relative Zeitpunkt des Einsetzens eines kurzdauernden Stromdurchflusses wichtig.

● *Stromart:* In bezug auf seine biologische Wirkung auf das Herz ist der Wechselstrom gefährlicher als Gleichstrom, vor allem der Wechselstrom mit der Frequenz unseres industriellen Wechselstroms.

● *Stromdauer:* Neben der unterschiedlichen Empfindlichkeit des Herzmuskels je nach Phase der Aktivität besteht eine ausgeprägte Strom-Zeitdauer-Abhängigkeit. Während Sekundenbruchteilen erträgt der menschliche Körper ohne grosse Gefährdung

Stromwerte im Amperebereich, Dauerströme von Amperebruchteilen sind jedoch gefährlich.

● *Nervensystem:* Im Vergleich zur elektrischen Aktivität des Nervensystems sind Unfälle durch elektrisch bewirkte Störung des Nervensystems eher selten. Zu erwähnen sind Atemstillstand, Störung der Koordination von Abwehr- und Fluchtbewegungen usw. Das zentrale Nervensystem und das Rückenmark sind anatomisch relativ gut geschützt. Stromdurchfluss bewirkt an den sensiblen Nerven Schmerzen und über die motorischen Nerven Muskelkrämpfe. Der Muskel kann direkt durch Stromfluss kontrahieren, er kann aber auch als Folge des Stromflusses durch motorische periphere Nerven aktiviert werden.

2. Problemstellung und Messeinrichtung

Entsprechend seiner Verbreitung und der Möglichkeit des ungewollten Kontaktes steht der industrielle Wechselstrom an der Spitze der gefährdenden Einflüsse. Es soll daher im Rahmen dieser Arbeit nur der industrielle Wechselstrom untersucht werden. Am meisten verbreitet sind 220 V und 380 V (50 Hz) (früher öfter auch 110 V) in Europa, 110 V und 220 V (60 Hz) in den USA. Im Bereiche der Industrieverteilernetze sind auch 500 V und im Bereiche der Steuernetze auch 50 V aktuell.

Im folgenden wird die für die Untersuchung durch Samuel Liechti, Ing. HTL, entwickelte Apparatur in ihren Grundzügen beschrieben, soweit sie zum Verständnis der durchgeführten Versuche wichtig ist. Die Schaltung baut sich im wesentlichen aus der Schalthardware auf, die erlaubt, die Spannung zu einem gegebenen Zeitpunkt einzuschalten und nach vorbestimmter Zeitdauer auszuschalten. Als Messkreis werden die unmittelbar an das Messobjekt angeschlossenen Teile bezeichnet, die vom Stromfluss betroffen sind. Davon unabhängig ist der Datenerfasskreis, der potentialmässig von der Schalthardware vollständig getrennt ist. Als Spannungsquelle diente der Hauptverteiler der Hausinstallation. Der Anschluss erfolgte über 6 mm^2 Kupferdraht. Da die Eigenschaften des elektrischen Netzes in die Messung eingehen, ist die Kurzschlusscharakteristik des Netzes an der kritischen Stelle untersucht worden. Der zweiphasig gemessene Strom betrug 5260 A, bei 75 mΩ und 2060 kVA. Dreiphasig betrugen die entsprechenden Werte 6080 A, 37 mΩ und 4130 kVA. Der Phasenwinkel betrug 50, die Stappung 226 V, 391 V und der Strom 199 A. (Messungen durch P. Zaruski, Zürich.)

Zur Sicherung gegen Folgen unbeabsichtigten Berührens diente, sofern der Messkreis nicht direkt ans Netz geschaltet war, Fehlerstromschutz. Der Messkreis bestand im wesentlichen aus einem Schaltelement Triac und dazugehörigen Steuer-, Mess- und Schutzelementen. Ein TIC 225 Triac diente als elektronischer Schalter. Die Steuerung gibt Impulse im Einschaltmoment und danach nach jedem Nulldurchgang, solange die Spannung andauern soll. Der Einschaltwinkel kann über den ganzen Bereich der Periode in Schritten von 1/100 Periodendauer eingestellt werden. Die Einschaltdauer kann zwischen einer Teilperiode und 999 ganzen Perioden gewählt werden. Die Ausschaltdauer kann in ganzen Perioden zwischen einer und 999 Perioden gewählt werden. Die Schaltspiele lassen sich 1 bis 99mal wiederholen. Die Elektroden sind aus Metall gefertigte Platten, die vorerst einmal die Übertragung des Stroms sicherstellen sollen. Dabei wurde darauf geachtet, dass an den Rändern der Elektroden möglichst wenig Randeffekte auftreten. Da sich die Muskulatur unter Stromdurchgang zusammenzieht, war zu erwarten, dass die Elektroden nicht ohne spezielle Halterung funktionstüchtig blieben. Es sind deshalb in Kunststoff eingebettete Metallplatten verwendet worden, die flach in den umgebenden Kunststoff eingelassen wurden. Der Kunststoffring um die Elektrode enthält eine Rinne, die sich unter Vakuum setzen lässt, um damit die Elektrode an der Haut fixiert zu halten. Die Gegenelektrode besteht aus einer Kupferplatte, die subkutan implantiert wird, damit die Hautbarriere nur einmal im Messkreis auftritt. Die Kontaktfläche ist im Vergleich zur «Versuchselektrode» gross gewählt, um die Gewebeveränderungen in der Nähe der Gegenelektrode klein zu halten.

Vorerst wurde die Stromquelle und deren Steuerung an einem Simulationsversuch am Soederbaum-Netzwerk getestet, sodann ist die ganze Versuchseinrichtung am Dialyseschlauch geprüft worden, um schlussendlich an der Ratte und am Zwergschwein Messwerte am durchbluteten lebenden Gewebe zu liefern. Alle Tiere befanden sich während der ganzen Zeit des Versuchs in tiefer Vollnarkose. Diese Narkose wurde nach Versuchsende bis zum Tod des Tieres vertieft.

Zwei unabhängige Systeme kamen zur Datenerfassung zur Anwendung: ein schneller Analog/Digital-Wandler in einem Gould-Kathodenstrahl-Oszillographen mit begrenzter Speicherkapazität, der nach Aufnahme des Einschwingvorgangs als Transientenspeicher seine Daten in einen PDP11/03 übertrug, und ein A/D-Programm auf dem PDP11/03 mit RT11. Dieses arbeitete langsamer, war aber in der Speicherkapazität wesentlich grösser. Die Daten wurden auf Floppy Disk übertragen. Die Spannungs- und Stromwerte sind jeweils zeitabhängig und in gegenseitiger Abhängigkeit dargestellt worden. Unterschiedliche Werte der Steuerungsparameter Einschaltwinkel, Einschaltdauer, Ausschaltdauer und Zahl der Schaltspiele kamen zur Anwendung.

3. Befunde

3.1 Einschwingvorgang

Hier wurden bei sorgfältiger Absicherung des Versuchs gegen Einflüsse der Stromquelle und der übrigen Versuchsanordnung entgegen den Erwartungen keine initialen Stromspitzen von Bedeutung gefunden, die die Vermutung der kapazitiven Komponente der Hautimpedanz bestätigt hätten.

3.2 Strom/Zeit-Dauerversuch

Im Dauerversuch zeigten sich Veränderungen des Stromwertes in Abhängigkeit von der Dauer der Stromeinwirkung. Die initiale Zunahme des Stroms war gefolgt von kurzzeitigen Einbrüchen und langsamem Abfall des Stromwertes, vermutlich als Folge der lokalen Austrocknung.

3.3 Messungen am Dialyseschlauch

Ein handelsüblicher Dialyseschlauch wurde mit Ringerlösung gefüllt und daran die Elektroden befestigt. Die verwendete Ringerlösung wies folgende Zusammensetzung auf (g/l): NaCl 9,0, KCl 0,42, $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ 0,24, $NaHCO_3$ 0,2, Glukose 1,0.

Nach dem Stromdurchtritt wurden Elektrode und Strommarke am Dialyseschlauch auf Farbumkehrfilm doku-

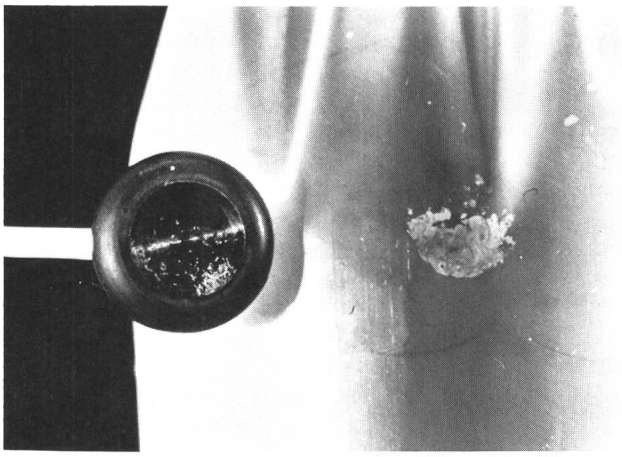

Fig. 1
Strommarke am mit Ringerlösung gefüllten Dialyseschlauch
Die Elektrodenoberfläche weist an den gleichen Stellen Verfärbungen auf, wo auch auf dem Schlauch die Oberfläche verändert wurde.

mentiert (Fig. 1). Auf dem Schlauch zeigt sich bei seitlicher Beleuchtung vor schwarzem Hintergrund eine halbmondförmige, weissliche Oberflächenveränderung. Darin lassen sich andeutungsweise feine Löcher erkennen. Die Elektrode zeigt ebenfalls in der einen Hälfte ein verändertes Aussehen: Einerseits sind weisse Auflagerungen, andererseits braunschwarze Spuren auf der Goldoberfläche zu erkennen.

Die veränderte Stelle des Schlauches wurde anschliessend ausgeschnitten, mit Leitsilber auf einen Aluminiumprobenteller aufgeklebt und mit Gold etwa 200 nm dick besputtert. Zum Vergleich wurde ein Stück frischen Dialyseschlauchs gleich präpariert. Frischer Schlauch, Strommarke und Elektrodenoberfläche wurden im Rasterelektronenmikroskop untersucht.

Auf der Schlauchoberfläche zeigen sich im Bereich der Strommarke eine Vielzahl von halbkugelförmigen Kratern und einzelne durchgehende Löcher (Fig. 2). Diese weisen einen Durchmesser bis zu 0,17 mm auf. Ihr Rand ist glatt begrenzt, während die übrige Oberfläche im Bereich der Strommarke einen blasigen Aspekt aufweist.

Die Elektrode hat im Bereich der Strommarke elektrisch leitende Verschmutzungen, bei denen es sich um verkohlten Dialyseschlauch handeln könnte.

3.4 Störung der Hautdurchblutung

Die von aussen sichtbaren Veränderungen der Haut entsprechen sehr oft nicht der Ausdehnung der Schädigung, da im sonst vorerst unauffälligen Bereich die Blutversorgung gestört sein kann. Zur Untersuchung der Schäden durch Elektrounfall sind Methoden nützlich, die die Blutversorgung darstellen lassen. In der Verbrennungschirurgie wird zur Abgrenzung durchblutungsgestörter Bezirke der Vitalfarbstoff Disulfinblau benutzt. Diese Substanz wird intravenös verabreicht und färbt alle Gewebe mit intakter Zirkulation blau an, während die nichtdurchbluteten Areale weiss bleiben.

Die Einflüsse der Elektrotraumen auf die Hautdurchblutung wurden ebenfalls mit dieser Technik untersucht. Die durchblutungsgestörten Bezirke wurden fotografisch auf Farbumkehrfilm dokumentiert. Nach Exzision der einzelnen Untersuchungsstellen wurden die Gewebeproben sowohl auf der Aussenseite wie im subkutanen Bereich in stärkerer Vergrösserung noch einmal fotografiert. Bei einem Teil der Präparate wurde entweder die ganze exzidierte Probe oder die Hälfte davon mit flüssigem Stickstoff rasch abgekühlt und anschliessend gefriergetrocknet. Nach Auswertung der Disulfinblaufärbung standen die lyophilisierten Proben zur weiteren Verarbeitung entweder für das Rasterelektronenmikroskop oder für die Histologie zur Verfügung. Je nach Grösse des Traumas zeigten sich dabei unter den Auflageflächen der Elektroden unterschiedlich grosse zirkulationsgestörte Gebiete. Das Spektrum reichte von einzelnen, nur wenige Millimeter grossen nichtangefärbten Punkten über ringförmige Zonen im Bereich des Elektrodenrandes bis zu nichtdurchbluteten Arealen von mehreren Zentimetern Durchmesser (Fig. 3). Die Störung betraf häufig die ganze Dicke der Haut bis ins subkutane Gewebe (Fig. 4) und war gelegentlich bis in die tieferen Schichten hinein nachweisbar.

Das durch Disulfinblau angezeigte Ausmass der Zirkulationsstörung entsprach ungefähr auch dem Anteil mit histologischen Veränderungen. Eine direkte Korrelation war aber mit der relativ kleinen Anzahl derart ausgewerteter Proben und wegen des Auswaschens des Disulfinblaus während der histologischen Verarbeitung nicht zu erreichen. Vermutlich dürfte es sich bei der Beeinflussung der lokalen Zirkulation um sekundäre Effekte wie zum Beispiel Gewebserhitzung han-

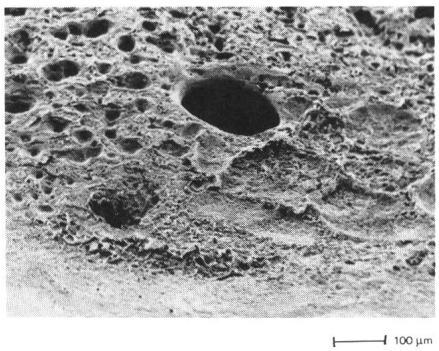

Fig. 2 Strommarken am Dialyseschlauch im Rasterelektronenmikroskop
Die Oberfläche weist blasig strukturierte Defekte, halbkugelförmige Krater und Löcher auf. Beim glattwandigen kreisrunden Defekt in der Wandung des Schlauchs dürfte es sich um den Ort eines Durchschlags handeln.

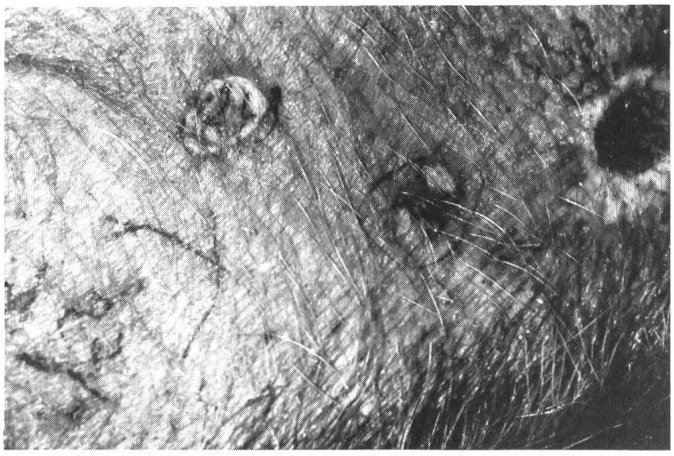

Fig. 3
Disulfinblau-Vitalfärbung
Die normal durchbluteten Areale färben sich nach intravenöser Injektion blau, in der Schwarzweissdarstellung dunkel an. Durchblutungsgestörte Bezirke bleiben dabei ausgespart. Rechts im Bild ein starkes Trauma mit zentral verbrannter Haut. Ein weiter zirkulationsgestörter Hof umgibt diese Stelle. Links lässt sich eine ringförmige Störung im Bereich des Elektrodenrandes erkennen, während in der Mitte nur kleinere Areale betroffen sind.

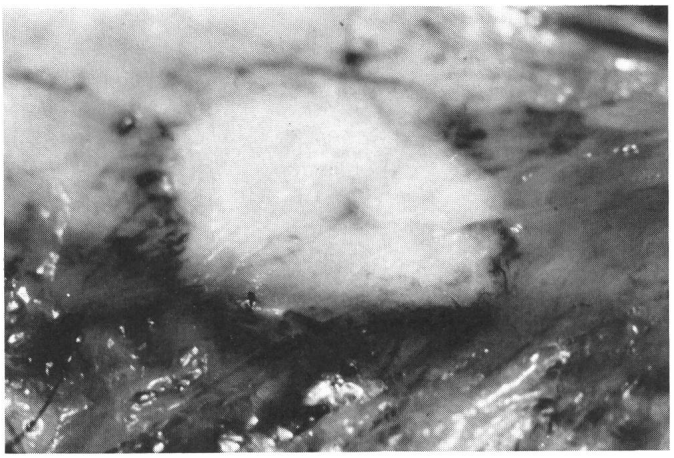

Fig. 4 Durchblutungsstörung bis ins subkutane Gebiet

Nach Exzision der Gewebeprobe zeigt sich auch auf der Innenseite der Haut ein farbfreier Bezirk. Im Randgebiet zeigt die Zirkulation eine auch histologisch nachweisbare Stauungszone, im Zentrum stellt sich eine kleine Blutung dar.

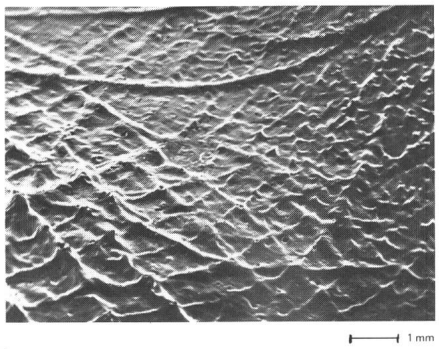

Fig. 7 Hautabdruck mit Strommarke eines Bagatellunfalls (Mensch)

In einem Bereich von etwa 1×1 mm zeigt die Hautoberfläche nur sehr diskrete Veränderungen.

deln. Es erscheint aber möglich, dass bereits mit der Disulfinblauvitalfärbung das Ausmass des oberflächlichen Schadens abgeschätzt werden kann.

3.5 Indirekte Untersuchung der Hautoberfläche mit Abdruckverfahren

Bei der Bestimmung des Stromdurchtritts durch die Haut stellt sich die Frage, ob gewisse Gewebestrukturen den Durchtritt erleichtern. Besonders werden dabei die Mündungen von Schweissdrüsen in Betracht gezogen.

Mit Hilfe eines Abdruckverfahrens wurde untersucht, ob sich an der Hautoberfläche von lebenden Individuen Hinweise auf bevorzugte Durchtrittsstellen ergeben könnten. Die Untersuchungen erfolgten an intakten menschlichen Fingerkuppen und an der Handinnenfläche eines Mitarbeiters, der aus Unvorsichtigkeit mit einem elektrischen Leiter in Berührung gekommen war (220 V). Als Abdruckmasse fand eine für zahnärztliche Zwecke entwikkelte Silikonmasse Verwendung. Der Abdruck wurde mit Gold beschichtet und im Rasterelektronenmikroskop untersucht.

Beim Fingerabdruck der intakten Haut zeigte sich ein deutliches Rillenmuster (Fig. 5). Die Schuppen der oberflächlichen Epithelzellen waren ebenfalls angedeutet sichtbar. Es fanden sich jedoch keine Strukturen, die mit Sicherheit als Drüsenausgänge hätten interpretiert werden können. Hingegen zeigte der Abdruck innerhalb der Rillen, welche Vertiefungen in der Haut entsprachen, kugelförmige Aussparungen. Diese werden als Abdrucke von Schweisströpfchen ausgelegt (Fig. 6), die in der Abdruckmasse gefangen worden sind und nach dem Aushärten der Silikonmasse vertrockneten. Damit scheint eine Lokalisation der Mündung von Schweissdrüsen indirekt möglich.

Im Stromdurchtrittsbereich fand sich eine Hautstelle mit deutlich veränderter Oberfläche (Fig. 7). Das Muster der Hautfelderung war in einem Bereich von etwa 1×1 mm deutlich verändert. In diesem Bezirk fanden sich mindestens 5–6 mutmassliche Schweisströpfchen als Hinweis auf Drüsenmündungen (Fig. 8). Die Feinstruktur der Oberflächenschicht zeigte sich aber unauffällig.

Bereits bei Bagatellstromdurchgängen wird die Hautoberfläche so in Mitleidenschaft gezogen, dass sich mehrere Drüsenausführgänge im betroffenen Areal befinden. Das ursprünglich angestrebte Ziel, das Erkunden räumlicher Beziehungen von Drüsenausführgängen und Strommarken, konnte deshalb nicht erreicht werden. Es ist wenig wahrscheinlich, dass die Abdrucktechnik in der Routineanwendung wesentliche Resultate liefern könnte.

3.6 Rasterelektronenmikroskopie von Gewebeproben

Ziel der Aufarbeitung für das Rasterelektronenmikroskop war es, Hinweise auf die Stromdurchtrittsstelle zu gewinnen und andererseits ein dreidimensionales Korrelat zu den histologi-

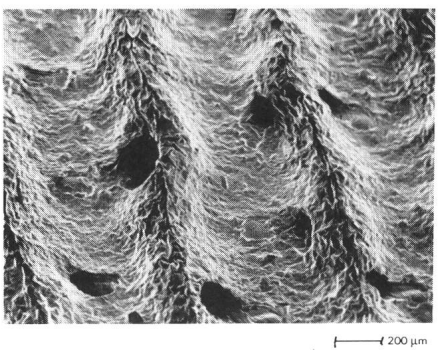

Fig. 5 Rillenmuster in einem Abdruck einer intakten menschlichen Fingerkuppe

Bei den Aussparungen in der Abdruckmasse könnte es sich um Abdrucke von Schweisströpfchen handeln, die anschliessend austrockneten.

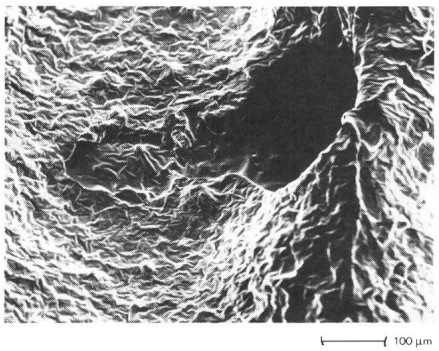

Fig. 6 Detail einer Aussparung in der Abdruckmasse

Die Blase liegt mit ihrem Hauptanteil im Abdruck einer Vertiefung und weist einen flachen Ausläufer auf den Abdruck der benachbarten Erhebung auf. Die Vertiefung im Abdruck dürfte von später eingetrocknetem Schweiss stammen, und die Spitze der vulkanartigen Erhebung kann als Abdruck des Ausführungsganges einer Schweissdrüse interpretiert werden.

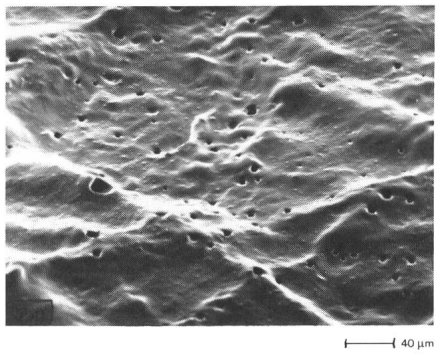

Fig. 8 Ausdehnung der Strommarke bei einem Bagatellstromdurchtritt

Selbst ein minimales Elektrotrauma verändert die Haut im Mündungsgebiet von mehreren Schweissdrüsen. Eine genaue Lokalisation der Durchtrittspforte scheint deshalb kaum möglich.

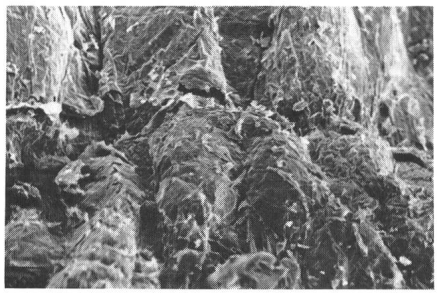

Fig. 9 Scharfer Übergang von intaktem zu verändertem Epithel am Elektrodenrand

Die Faltenstruktur wirkt weitgehend ausnivelliert, die Deckschicht ist offensichtlich abgerissen.

schen Oberflächenveränderungen zu versuchen. Aus diesem Grund waren vor allem die geringfügigen Veränderungen von Interesse, und die stark zerstörten Gewebe wurden nur kursorisch untersucht.

Die Gewebeproben wurden nach dem Exzidieren in flüssigem Stickstoff rasch gefroren und anschliessend lyophilisiert. Das Montieren der Hautpräparate geschah mit Hilfe von Leit-C auf Aluminiumpräparathalter. Für die morphologischen Untersuchungen im Rasterelektronenmikroskop wurden die Präparate mit Gold besputtert.

In der Nahaufnahme zeigten sich im Gebiet des Stromdurchtritts häufig nur diskrete Veränderungen. Auf unbehaarter Haut liess sich in einzelnen Fällen nur ein leicht dunklerer Ring im Bereich des Elektrodenrands erkennen. Auch die schwachen Vergrösserungen im Rasterelektronenmikroskop liessen die Strommarke höchstens erahnen. Bei stärkerer Vergrösserung erschien die Hautoberfläche lokal etwas rauher, die oberste Schicht war leicht gefältelt und etwas geschrumpft. Die Randzonen der Elektrode waren etwas stärker betroffen. Hier zeigte sich bereits eine Zerstörung der Oberfläche. Das Faltenmuster war verschwunden und ausnivelliert, die Deckschicht war aufgerissen (Fig. 9). Dies könnte eventuell durch Verkleben mit der Elektrode zustande gekommen sein, da auch auf den Elektroden organische Auflagerungen gefunden wurden.

In behaarten Gebieten fand man auch nach dem Rasieren noch eine dünne Haarschicht. Makroskopisch zeigten sich deutlich sichtbare Strommarken. Dort waren die Haare etwas borstiger, der Farbton leicht weisslicher als die Umgebung und das ganze Gebiet scheint über die Oberfläche herauszuragen (Fig. 10). Stellenweise fehlte die oberste Epithelbedeckung. Die schwache Vergrösserung im Rasterelektronenmikroskop ergab praktisch den gleichen Aspekt. Bei stärkerer Vergrösserung zeigten die Zonen im Zentrum der Zerstörung ein stark verändertes Gewebe. Es liessen sich nur schwer klare Strukturen erkennen und teilweise erschienen diese wie verschmiert. Aus diesem Grund konzentrierte sich das Interesse vor allem auf die Randzonen, wo das Gewebe noch erhalten war (Fig. 11). Hier liessen sich Veränderungen nachweisen, die im Zusammenhang mit dem Stromdurchtritt zu stehen schienen. Besonders beeindruckend waren in diesem Zusammenhang aufgeblasene Epithelzellen auf der Hautoberfläche sowie an den Haaren (Fig. 12). Das popcornartige Aufblähen der Epithelzellen lässt vermuten, dass es sich hierbei um einen thermischen Effekt handelt.

Bei der Beurteilung des Gewebeschadens mit Hilfe der Rasterelektronenmikroskopie traten folgende Probleme zutage: Bei schweren Gewebeschädigungen lassen sich keine Details

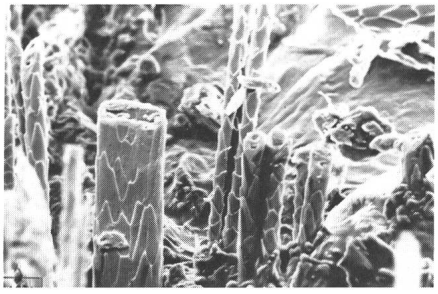

Fig. 11 Gute Strukturerhaltung am Rand einer geschädigten Zone

Die Haarstoppeln lassen deutlich die Epithelschuppen erkennen. Im Hintergrund ist die Unterlage mit einer strukturarmen Schicht, eventuell eingetrocknetem Exsudat, bedeckt.

mehr erkennen. In diesen Gebieten ist eine Zuordnung zu ursprünglichen Strukturen nicht mehr möglich. Bei nur kleinem Trauma, das heisst bei kleinen Gewebeveränderungen, wird es schwierig sich zu orientieren, da die Veränderungen bei schwacher Vergrösserung nicht oder kaum sichtbar sind. Beim Absuchen bei starker Vergrösserung ist eine vollständige Erfassung nicht garantiert.

3.7 Rasterelektronenmikroskopische Untersuchung der Elektroden

In den Routineuntersuchungen wurden als Elektroden kommerziell erhältliche Aluminium-Probenteller für die Rasterelektronenmikroskopie verwendet. Zu Vergleichszwecken wurden gleich grosse Elektroden aus anderen Materialien angefertigt: rostfreier Stahl, galvanisch vergoldet; Aluminium, mit Gold besputtert; Kupfer. Nach Verwendung an der Ratten- oder Schweinehaut wurden zufällig ausgewählte Elektroden im Rasterelektronenmikroskop untersucht.

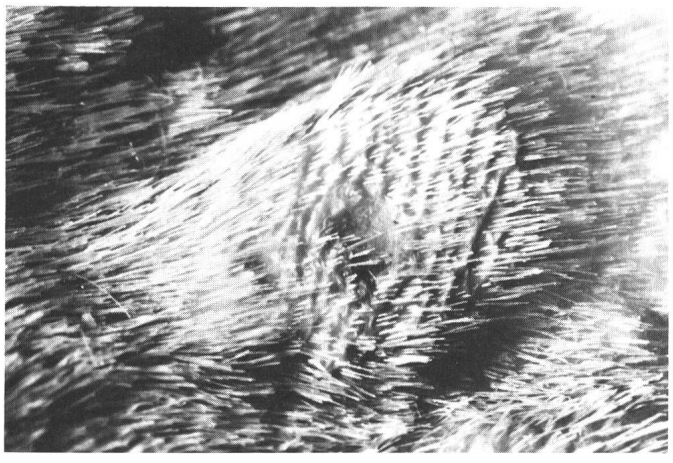

Fig. 10 Oberflächlicher Epitheldefekt im Zentrum einer Strommarke

Trotz Rasieren ist die Hautoberfläche von Haarstoppeln bedeckt. Im Bereich der Strommarke wirkt das Haarkleid borstiger.

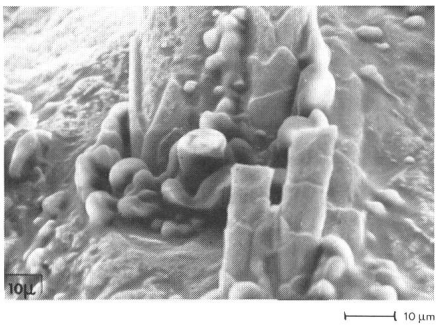

Fig. 12 Aufblähen von Epithelzellen

Sowohl auf der Hautoberfläche wie an den Haaren sind einzelne Epithelzellen popcornartig aufgebläht. Dieses Aussehen lässt an einen thermischen Effekt denken.

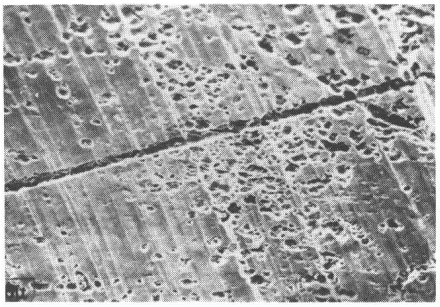

Fig. 13 Oberflächliche Erosionen einer galvanisch vergoldeten Stahlelektrode

Diese Vergrösserung lässt die durch den Drehvorgang entstandene zirkuläre Streifung noch erkennen. Die Erosionen durchbrechen die oberflächliche Goldschicht und reichen bis in die Stahlunterlage hinein.

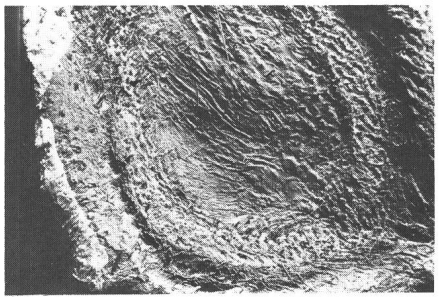

Fig. 14 Übersichtsaufnahme einer Strommarke

Im Zentrum ist die Hautoberfläche etwas geschrumpft, am Rand steht ein zirkulärer Wall vor.

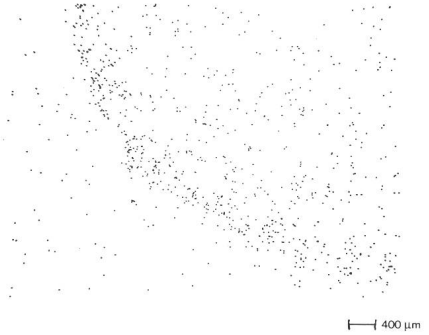

Fig. 16 Verteilungsbild für Kupfer

Es zeigt eine geringe Konzentration ausserhalb der Strommarke, eine hohe Konzentration auf der Innenseite des Walls und ebenfalls erhöhte Werte im Zentrum der Elektrode.

Die Elektrode aus galvanisch vergoldetem rostfreiem Stahl zeigte nach mehrmaliger Benutzung schon bei schwacher Vergrösserung punktförmige Veränderungen. Bei stärkerer Vergrösserung waren diese deutlich als oberflächliche Erosionen erkennbar (Fig. 13). Diese lokalisierten Defekte durchbrachen die oberflächliche Goldschicht und reichten in die Stahlunterlage hinein. Die Aluminium- und Kupferelektroden wiesen ähnliche Erosionen auf. Die Erosionen waren unregelmässig über die Oberfläche verteilt. Die goldbesputterten Aluminiumelektroden zeigten auch andeutungsweise Erosionen, zuweilen mit einer Art Blasenbildung und Abheben der Goldschicht. Die in den Elektrodenoberflächen verloren gegangenen Metallanteile wurden anschliessend in den entsprechenden Gewebeabschnitten wieder gesucht.

3.8 Metalltransfer Elektrode–Haut

Eine Serie von Präparaten wurde ausgewählt, um das auf den Elektroden verloren gegangene Metall nachzuweisen. Hautproben wurden exzidiert, nachdem sie über Elektroden aus Aluminium, Kupfer oder goldbesputtertem Aluminium belastet worden waren. Die Untersuchung auf Metalltransfer geschah auf einem Rasterelektronenmikroskop mit einem Gerät zur energiedispersiven Analyse (Institut Straumann, Waldenburg).

Die Verteilung des Aluminiums schien meist eher zufällig auszusehen. Nur selten zeichnete sich im Elektrodenbereich eine höhere Konzentration ab. Nach längerer Belastungsdauer gewann man subjektiv den Eindruck einer etwas höheren Signaldichte, was sich aber am untersuchten Material nicht quantifizieren liess. Der Abdruck der goldbesputterten Elektrode wies einzelne Stellen mit sehr hoher Goldkonzentration auf. Das Sekundärelektronenbild zeigte, dass es sich dabei um ganze Partikel handelt, die den auf den Elektroden losgelösten Goldschichten entsprechen. Das Spektrum weist die für Gold spezifischen Zacken auf.

Die Kupferelektroden produzierten auf der Hautoberfläche das intensivste Signal. Die höchste Kupferkonzentration zeigte sich in der Gegend des Elektrodenrandes. Das Elektrodenzentrum wies aber ebenfalls noch eine deutlich höhere Konzentration auf als die Umgebung (Fig. 14–16). Das Spektrum weist die für Kupfer charakteristischen Zacken auf (Fig. 17).

4. Histologische Veränderungen

4.1 Verarbeitung der Gewebeproben

Die Präparate wurden nach der Gewebeentnahme in 4%igem Formalin für 3–5 Tage fixiert. Anschliessend wurden die Gewebestücke 10 h gewässert, dann in der aufsteigenden Alkoholreihe im Verlauf von einer Woche dehydriert und über Xylol in Methylmethacrylat überführt. In weiteren Stufen erhielt die Methacrylatlösung 2 g Dibenzoylperoxyd auf 100 ml und anschliessend 4 g Dibenzoylperoxyd und 25 ml Plastoid N auf 100 ml Methylmethacrylat. Nach dem Auspolymerisieren wurden 6 µm dicke Schnitte hergestellt, die anschliessend nach verschiedenen Verfahren gefärbt wurden. Die mikroskopische Auswertung geschah im Hellfeld.

Einzelne Präparate wurden nach der rasterelektronenmikroskopischen Beurteilung ins Vakuum gebracht und dort mit Xylol durchtränkt. Anschliessend erfolgten die Kunststoffeinbettung und die weitere Verarbeitung wie oben beschrieben.

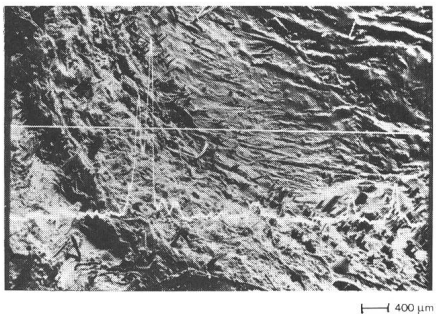

Fig. 15 Stärkere Vergrösserungen der Strommarken-Randzone

Entlang der geraden Linie wurde die Kupfermenge bestimmt (untere Kurve). Es zeigt sich ein deutliches Maximum auf der Innenseite des Walls.

4.2 Haut verschiedener Tierspezies

Grosse prinzipielle Unterschiede bestanden nicht zwischen den verschiedenen untersuchten Spezies. Ratte und die wesentlich dickere Schafshaut wiesen eine dichte Behaarung auf, die Schweinehaut war vom Aspekt her noch am ehesten mit der menschlichen Haut zu vergleichen. Bei allen dreien

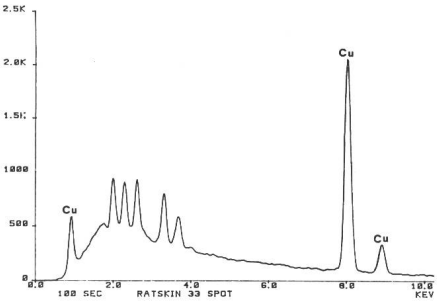

Fig. 17 Für Kupfer charakteristische Zacken des Spektrums

wurden aber die beim Menschen vorkommenden ekkrinen Schweissdrüsen nicht beobachtet. Der Strom bewirkte bei gleichem Trauma bei allen drei Spezies sehr ähnliche Gewebeveränderungen.

4.3 Vorbereitung der Haut

Es wurde geprüft, ob die Vorbereitung (Rasieren, Enthaarungscreme) einen Einfluss auf die mikroskopische Struktur der Haut ausübt. Dabei zeigte es sich, dass bei gutem Ausrasieren das Risiko einer Oberflächenverletzung besteht. Dadurch können Durchtrittspforten für den elektrischen Strom vorgegeben werden. Schonenderes Rasieren liess eine Schicht Haarstoppeln übrig, erlaubt daher auch keinen direkten Kontakt der Elektrode mit der Hautoberfläche. Durch die Enthaarungscreme wurde die oberste verhornte Plattenepithelschicht teilweise aufgelockert, teilweise fehlte diese ganz, was das Widerstandsverhalten der Haut ebenfalls beeinflussen kann. Das Waschen mit Wasser und Seife mit anschliessendem Abspülen und Trocknen schien keinen Einfluss auf das histologische Bild der Oberfläche zu haben.

4.4 Einfluss der Verarbeitungstechnik

Die verwendete Präparationstechnik ergab gut auswertbare Präparate. Die Gewebe zeigten einen kontinuierlichen Zusammenhang, grobe Verzerrungen durch Schrumpfungsartefakte waren nicht zu beobachten. Eine genaue Erhaltung der in vivo anzutreffenden Dimensionen liess sich aber nicht erreichen, da die Gewebe sich bereits bei der Exzision kontrahierten. Dies erschwerte direkte topografische Vergleiche zwischen Elektrode und Strommarke. Die Gewebestruktur konnte mit dem gewählten Verfahren sauber erhalten werden, so dass die Auswertung mühelos durchgeführt werden konnte.

Proben, die zuerst gefriergetrocknet und im Rasterelektronenmikroskop untersucht wurden, zeigten in der Tiefe des Gewebes grobe Artefakte. Das ursprünglich geplante Vorgehen, das Aufsuchen kleinster Veränderungen im Rasterelektronenmikroskop und die anschliessende mikroskopische Analyse der darunterliegenden Gewebeanteile, liess sich daher aus technischen Gründen nicht durchführen.

4.5 Resultat der verschiedenen Färbungen

Die *Azan-Färbung* lässt vor allem bei Übersichtsbetrachtung leicht die Ausdehnung der Bindegewebeveränderungen im Corium erkennen. Dank des schönen Rot-blau-Kontrastes ist diese für die Übersichtsfotografie besonders geeignet. Auch Details in der Grössenordnung der Zellkerne liessen sich mühelos auswerten.

Die *Gömöri-Färbung* eignete sich gut für das Erkennen von Verziehungen und anderen Veränderungen im Bindegewebe-Fasergeflecht.

Die *Hämatoxylin-Eosin-Färbung* und die *van Gieson-Färbung* ergaben bei der verwendeten Kunststoffeinbettung eine nur knapp genügende Intensität. Der geringe Kontrast machte diese Färbungen für die Fotografie wenig geeignet, sie wurden aber gelegentlich zu Vergleichszwecken herangezogen.

Die *Giemsa-Färbung* erwies sich trotz der monochromen Blaufärbung als geeignetste Methode für die Routineauswertung. Sowohl bei schwacher wie bei starker Vergrösserung ergab sich für Beobachtung und Fotografie ein genügender Kontrast. Alle beobachteten Veränderungen liessen sich mit dieser Technik darstellen und die Auflösung war bis in die zellulären Strukturen hinein ausgezeichnet.

Die mit *Disulfinblau* intravital angefärbten und nach der Entnahme über die Gefriertrocknung eingebetteten Präparate zeigten eine nur schlechte Erhaltung des Farbstoffs. Im Gegensatz zu Knochenpräparaten, welche eine Auflösung bis in den zellulären Bereich aufwiesen, ergab sich in den Haut-Weichteilpräparaten kein auswertbarer Kontrast zwischen von der Zirkulation erreichten und nicht erreichten Arealen. Während die makroskopische Auswertung gute Hinweise auf das Gewebetrauma geben kann, erwies sich die Disulfinblautechnik für die mikroskopische Analyse von Strommarken als nicht geeignet.

4.6 Lokalisation der Strommarken

Bei den allerleichtesten, oft nur fraglich identifizierbaren Schäden war keine genaue Zuordnung zur Elektrodenposition möglich. Sobald eindeutige Strommarken sichtbar wurden, zeigte sich eine eindeutige Häufung in der Gegend des Elektrodenrandes. Mit fortschreitendem Schweregrad wies diese Stelle auch immer die schwerste und am weitesten in die Tiefe reichende Gewebeschädigung auf. Nach starkem Trauma war die Stelle der Veränderung leicht erkennbar. Während normales Gewebe häufig leicht gewellt und die Ränder zum Teil leicht eingerollt waren, blieb das traumatisierte Gewebe oft wie eine starre Platte in seiner Form konserviert. Nur bei ganz geringfügigen Hautveränderungen schien es überhaupt möglich, Beziehungen zu mikroskopischen Strukturen zu untersuchen.

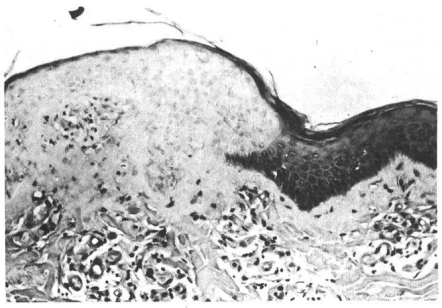

Fig. 18 Veränderte Anfärbbarkeit des Epithels als erstes fragliches Zeichen eines Stromschadens

4.7 Schweregrade der Hautschädigung

a) Fragliche Veränderungen

Nach ganz kurzer Belastungsdauer zeigten sich vereinzelt histologische Befunde, die diskret von der Norm abzuweichen schienen. So konnten Unterschiede in der Anfärbbarkeit des Epithels festgestellt werden (Fig. 18). Die Giemsa-Färbung fiel dabei manchmal etwas weniger intensiv aus, die Azan-Färbung etwas intensiver. In manchen Präparaten schien eine Beziehung zu der Elektrode gegeben, in anderen nicht. In wenigen Fällen schienen an der Oberfläche einzelne Zellkerne leicht verändert; sie wiesen angedeutet eine verzogene Form auf und zeigten eine intensivere Blaufärbung als die umgebenden Zellkerne. Ob es sich bei dieser Veränderung um eine Vorstufe zu den für Strommarken charakteristischen Verziehungen der Zellkerne handelt war nicht feststellbar. Eine Beziehung zur Hautmorphologie liess sich nicht etablieren.

Die unter a) beschriebenen Kriterien können nicht mit gutem Gewissen für die Beurteilung von Stromeffekten eingesetzt werden.

b) Punktförmige Epithelveränderungen

Als erste eindeutig identifizierbare Strommarken konnten an umschriebenen Stellen Veränderungen in der

Epithelschicht beobachtet werden. Die Zellkerne zeigten hier eine deutlich intensivere Anfärbung und ihre Form war länglich verzogen, teilweise mit dünn auslaufenden schweifartigen Anhängseln. Die Epithelschicht war an diesen Stellen deutlich dünner als in der Umgebung. Sonst liessen sich noch keine weiteren Veränderungen des Epithels und der darunterliegenden Gewebe feststellen. Wegen der geringen Zerstörung des Gewebes bieten diese leichten Veränderungen praktisch die einzige Möglichkeit, die Beziehungen zwischen Hautstrukturen und Stromdurchtrittsstelle zu erkunden. Es konnten verschiedene Lokalisationen beobachtet werden, wie vorstehende Hautfelder oder Vertiefungen von Haarbälgen. Keine Gesetzmässigkeit war ersichtlich bei der Frage, ob unter dem Epithel liegende Kapillaren für den Stromdurchtritt lokalisierend wirken oder nicht (Fig. 19).

Fig. 19
Strommarke an der vorspringenden Fläche eines Hautfeldes
Die Epithelzellkerne sind länglich verzogen und intensiver angefärbt. Eine schwach angedeutete Verziehung des subepithelialen Bindegewebes zeigt keine offensichtlichen Relationen zu den zahlreich vorhandenen Kapillaren.

c) Epithelveränderungen mit Einbezug subepithelialer Strukturen

Eine etwas grössere Gewebetraumatisierung liess sich an einer grossflächigeren Ausdehnung der unter b) beschriebenen Epithelveränderungen erkennen. Unter diesen Zonen zeigte das subepitheliale Bindegewebe der Haut erste Alterationen. Die Bindegewebefasern zeigten eine vergröberte Strukturierung in der Gömöri-Färbung und wirkten deutlich strukturärmer, hyalinisiert in den anderen Färbetechniken (Fig. 20).

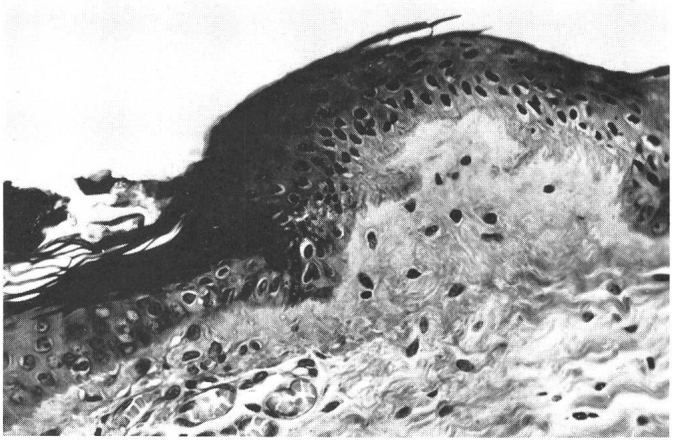

Fig. 20
Hyalinisierung des subepithelialen Bindegewebes unter einer Zone mit verzogenen Epithelzellkernen (220 V, 10 Perioden)

d) Blasenbildung und zunehmende Tiefenwirkung

Im Bereich des Elektrodenrands zeigten sich mit zunehmender Traumatisierung ein popcornartiges Aufblähen von verhornten Epithelzellen (Fig. 22), ein Eröffnen von intra- und subepithelialen Spalträumen bis zur Bildung von eigentlichen Blasen (Fig. 21). Gleichzeitig war auch ein Tieferdringen der Hyalinisation bis etwa zur halben Dicke der Bindegewebeschicht zu beobachten (Fig. 24).

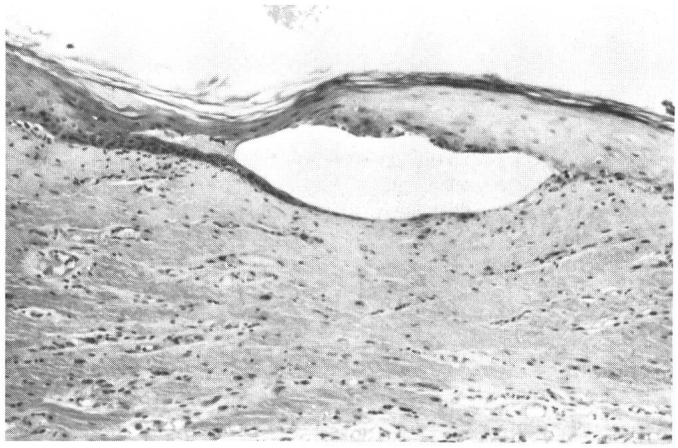

Fig. 21
Die abgehobene Epithelschicht bildet eine Blase (110 V, 40 Perioden)

e) Epithelzerstörung und grosse Tiefenwirkung

Während in den Randgebieten am Elektrodenrande die unter b), c) und d) beschriebenen Veränderungen auch bei immer mehr zunehmender Gewebeschädigung erhalten blieben, hatten sich unter der Elektrode die Blasen eröffnet, das Epithel hing teilweise in Fetzen an der Oberfläche oder fehlte ganz. Üblicherweise war das Bindege-

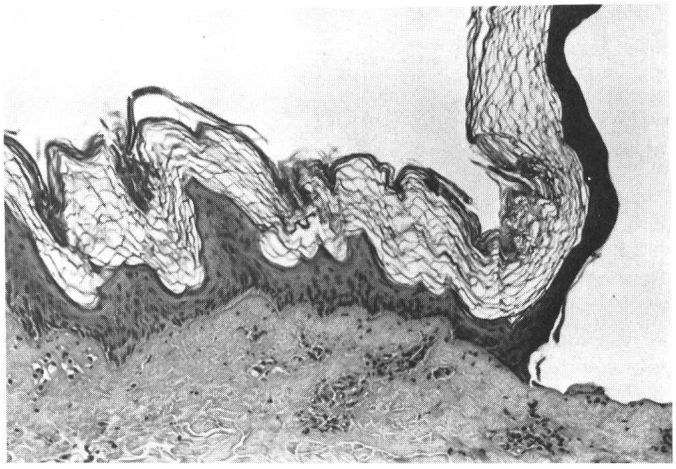

Fig. 22
Popcornartig aufgeblasene verhornte Epithelzellen in der Randzone einer Strommarke, daneben Abheben einer Blase (220 V, 400 Perioden)

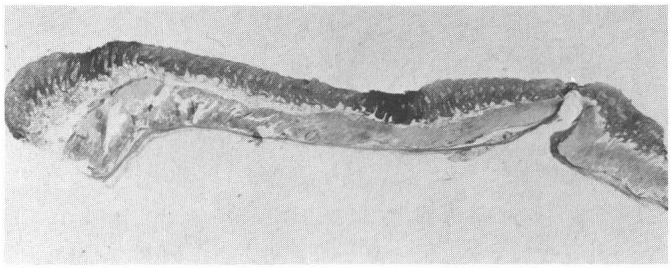

Fig. 23
Deutliche Tiefenwirkung des Elektrotraumas im Bereich des Elektrodenrands (dunklere Anfärbung)
Das Zentrum zeigt ein normales färberisches Verhalten.

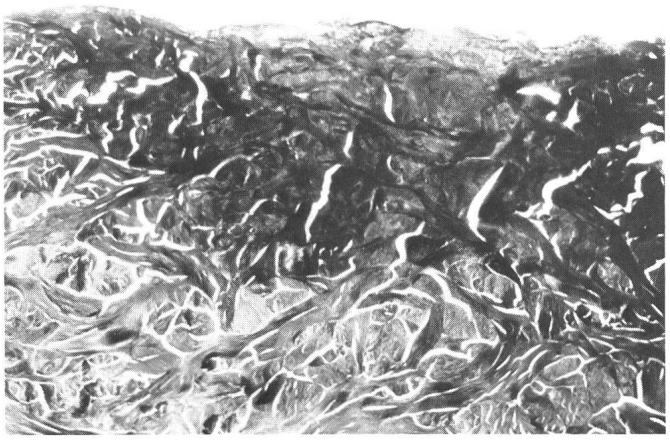

Fig. 24
Vollständige Zerstörung der Gewebestruktur direkt an der Oberfläche
In der angrenzenden Schicht sind die Bindegewebsstränge deutlich vergröbert (220 V, 400 Perioden).

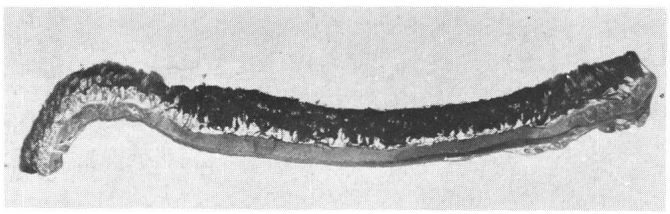

Fig. 25
Schädigung der Haut im gesamten Elektrodenbereich bis hinunter zum subkutanen Fettgewebe
Dies äussert sich im histologischen Schnitt in einer dunkleren Färbung und in einer Verwischung der Strukturen.

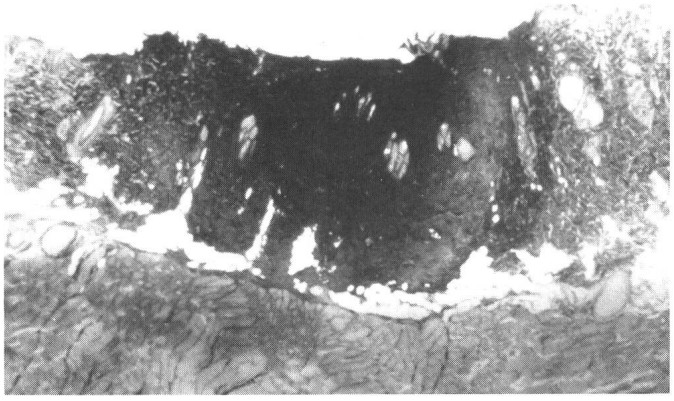

Fig. 26
Traumatisiertes Gewebe bis zur subkutanen Fettschicht

webe der ganzen Cutis von der Hyalinisation betroffen (Fig. 25).

f) Tiefreichende Gewebezerstörung

Die schwersten Veränderungen, die beobachtet wurden, zeigten eine tiefreichende Gewebezerstörung (Fig. 26), wobei die oberflächlichsten Schichten bis zur Unkenntlichkeit zerstört waren. Die Hyalinisierung reichte in diesen Fällen bis tief in das subkutane Fettgewebe hinein.

4.8 Einfluss der Stromdauer

Bereits bei einer halben bis zwei Belastungsperioden mit 220 V wurden mehrere Stellen mit verzogenen Zellkernen, vereinzelt auch eine popcornartig aufgeblähte Hornschicht und sogar ein vollständiges Durchschlagen der Epithelschicht gesehen. Nach fünf Perioden bei 220 V traten bereits Hyalinisationen der direkt subepithelial gelegenen Bindegewebestrukturen auf. Nach 20 Perioden erschien das Epithel stellenweise deutlich verdünnt und man konnte zusätzlich zu den beschriebenen Befunden das Abheben von Blasen beobachten. Die ganzen Vorgänge spielten sich nun multifokal und zum Teil bereits ziemlich grossflächig ab. Mit 80 Perioden waren die meisten Blasen geplatzt, das Epithel hing zum Teil in Fetzen oder fehlte vollständig. Unter dem gesamten Elektrodenbereich war das Bindegewebe bis deutlich in das subkutane Fettgewebe hinein hyalinisiert. Nach 400 Perioden entsprach das Bild dem unter f) «Tiefreichende Gewebezerstörung» beschriebenen Aspekt.

4.9 Einfluss der Spannung

Die beiden untersuchten Wechselspannungen 220 V und 110 V zeigten im Prinzip die gleichen Muster der Gewebeschädigung. Allerdings war zur Erzielung einer identischen Schadengrösse bei 220 V eine deutlich kürzere Einwirkungszeit nötig. Aus den durchgeführten Messreihen könnte man schliessen, dass bei 110 V eine ungefähr viermal so lange Einwirkungsdauer benötigt wird, um einen gleich grossen Schaden zu setzen wie bei 220 V. Dies trifft auf das ganze beobachtete Schadenspektrum zu, vom Auftreten der ersten eindeutigen Oberflächenveränderungen bis zur vollständigen Zerstörung der Haut.

4.10 Korrelation histologischer Befunde zu Messdaten

Die unter einer Elektrode liegende Fläche beträgt 113 mm^2. Ein 6 µm dikker Schnitt durch die breiteste Stelle repräsentiert weniger als ein Tausendstel dieser Fläche. Es gibt genügend Hinweise darauf, dass bei kleineren Traumen die Strommarken nicht gleichmässig angeordnet sind. Solange diese nicht repräsentativ über die ganze Elektrodenfläche verteilt sind, ist es wenig sinnvoll, Messdaten, die über die ganze Elektrodenfläche bestimmt wurden, auf einen bestimmten, zufällig beobachteten histologischen Aspekt zu beziehen. Bei schwerer Gewebeschädigung ist das Bild wesentlich homogener, weitgehend rotationssymmetrisch um ein Zentrum in Elektrodenmitte angeordnet, allerdings durch inhomogene Anordnung verschiedener Gewebetypen ebenfalls verfälscht. Bei schweren Gewebeveränderungen scheint es eher gerechtfertigt, die Messwerte direkt in Beziehung zum histologischen Aspekt zu bringen.

4.11 Vergleich mit thermischen Verbrennungen

Zu Vergleichszwecken wurde Haut mit einem Metallstempel mit gleicher Grösse wie die Elektroden thermisch belastet (250 Grad) und das Gewebe anschliessend mikroskopisch untersucht. Die Belastungsdauer variierte von einer ganz kurzen Berührung bis zu mehreren Sekunden.

Die Befunde nach reiner thermischer Schädigung waren den elektrischen Verbrennungen im grossen ganzen ähnlich, es liessen sich aber gewisse Unterschiede beobachten. Schon nach ganz kurzer Belastungszeit wies die Epidermis grossflächig verteilt verzogene Zellkerne auf. Daneben zeigte die Hornschicht popcornartig aufgetriebene Zellen. Intra- und subepithelial waren Blasen unterschiedlicher Grösse entstanden. Die subkutane Bindegewebeschicht war an der Oberfläche hyalinisiert. Bei längerer Einwirkungszeit waren die Epithelzellen in wellen- und mäanderartigen Mustern verzogen. Die Hyalinisation umfasste die Hälfte der kutanen Bindegewebeschicht. Bei noch längerer Einwirkungszeit zeigten sich grosse Blasen, die zum Teil eröffnet waren, wodurch die Blasenwand in Fetzen sich ablöste. Die Bindegewebeveränderung umfasste nun die ganze Cutis.

Im Gegensatz zur Strommarke sind hier schon am Anfang auch die leichteren Schäden gleichmässig über das traumatisierte Gebiet verteilt. Der Aspekt der Zellkernverziehung stellt sich etwas anders dar, ebenso die Blasenbildung. Das Aufblasen der Epithelzellen ist sehr ähnlich, so dass hier auch beim Elektrotrauma ein thermischer Effekt vermutet werden kann. Die Hyalinisierung der Bindegewebsstrukturen schien beim rein thermischen Schaden wesentlich gleichmässiger in die Tiefe vorzudringen als beim Stromfluss, wo bei kurzer Einwirkungszeit nur lokal eine bemerkenswerte Tiefenwirkung beobachtet wurde. Erst bei länger dauerndem Stromfluss, eventuell ebenfalls durch die thermische Komponente bewirkt, zeichnete sich eine gleichmässige Schadenfront ab.

5. Schlussfolgerungen

Die ersten Versuche am Soederbaum-Netzwerk und Dialyseschlauch haben bestätigt, dass der Versuchsaufbau realistisch und adäquat funktionierte. Die hier verwendete Technik der intravitalen Färbung der Blutversorgung zeigt sehr klar den Umfang der Durchblutungsstörung, eine derartige Beurteilung ist in der Klinik von grundsätzlicher Bedeutung für den sparsamen Einsatz chirurgischer Mittel. Die histologischen Veränderungen der Haut konnten schon beim Durchgang einer einzigen Halbperiode des industriellen Wechselstroms nachgewiesen werden. Die Veränderungen bei längerer Zeitdauer erklären den temporären Stromeinbruch, wie er bei der technischen Messung des Haut- und Körperwiderstands beobachtet werden kann.

Literatur

O. Aalund: Sequelae to exposure of porcine skin to heat and electricity. Acta-Med-Leg-Soc (Liege) 1980, vol. 30 (1), p. 33...41.

F.R. Dutra: Electrical burns of the skin. Medicolegal investigation. Am-J-Forensic-Med-Pathol 1981 Dec., vol. 2 (4), p. 309...312.

S.I. Esses and *W.J. Peters:* Electrical burns: pathophysiology and complications. Can-J-Surg 1981 Jan., vol. 24 (1), p. 11...14.

K. Haverkampf: Stillen von Blutungen durch Koagulation mit Laserstrahlung. Dissertation, Hannover, 1982.

P. Hofmann: Erfahrungen mit Elektrounfällen. Z-Unfallmed-Berufskr 1980, vol. 73 (1), p. 4...37. Z-Unfallmed-Berufskr 1980, vol. 73 (2), p. 50...60.

L.C. Laberge, P.A. Ballard and *R.K. Daniel:* Experimental electricalurns: low voltage. Ann-Plast-Surg 1984 Sept., vol. 13 (3), p. 185...190.

H.M. Lazarus and *W. Hutto:* Electric burns and frostbite: patterns of vascular injury. J-Trauma 1982 July, vol. 22 (7), p. 581...585.

K.G. Nielsen, O. Nielsen and *H.K. Thomsen:* Device and methods for the measurement of energy transfer in experiments involving thermal and electrical injuries of skin. Forensic-Sic-Int 1981 May-June, vol. 17 (3), p. 203...209.

M.C. Robson, R.C. Murphy and *J.P. Heggers:* A new explanation for the progressive tissue loss in electrical injuries. Plast-Reconstr-Surg 1984 March., vol. 73 (3), p. 431...437.

A. Sances Jr, J.B. Myklebust, S.J. Larson, J.C. Darin, T. Swiontek, T. Prieto, M. Chilbert and *J.F. Cusick:* Experimental electrical injury studies. J-Trauma 1981 Aug., vol. 21 (8) p. 589...597.

M.N. Tempest: A new technique in the clinical assessment of burns. Trans. Ass. industr. med. Off. 1961, vol. 11 p. 22...26.

M. Tomita, I. Ijiri, K. Shimosato, Y. Mikami, Y. Doi and *K. Uehira:* A case of accidental electrocution. Identification of metallization on the electric marks with an energy dispersive X-ray microanalyzer. Nippon-Hoigaku-Zasshi 1984 Feb., vol. 38 (1), p. 59...63.

H.K. Thomsen, L. Danielsen, O. Nielsen, O. Aalund, K.G. Nielsen, T. Karlsmark and *I.K. Genefke:* Early epidermal changes in heat- and electrically injured pig skin. I. A light microscopic study, and II. An electron microscopic study. Forensic-Sci-Int 1981 March-April., vol. 17 (2), p. 133...152.

C. Torre and *C. Cardellini:* Ultrastructural aspects of electric burn in man. Boll-Soc-Ital-Biol-Sper 1980 May 15, vol. 56 (9), p. 905...911.

G. Biegelmeier et *G. Homberger:* Effets des courants d'impulsions unipolaires sur le corps humain. Bulletin ASE/UCS 74(1983)22, p. 1298.

E. Homberger: Neue Überlegungen zur Vermeidung gefährlicher Berührungsspannungen. Bulletin SEV/VSE 74(1983)7, S. 338.

S.M. Perren und *P. Matter:* Die wissenschaftlichen Grundlagen des Elektrounfalls. Bulletin SEV/VSE 73(1982)10, S. 476.

R. Hauf: Erstversorgung und ärztliche Massnahmen am Unfallort und in der Klinik beim elektrischen Unfall. Zbl.-Arbeitsmed. 11(1978)305.

R. Hauf: Elektrischer Unfall. Innere Medizin in Praxis und Klinik, Band III. Georg-Thieme-Verlag, Stuttgart (1977, 1985).