

Aus dem Universitätsklinikum Münster
Institut für Rechtsmedizin
- Univ.-Prof. Dr. med. Heidi Pfeiffer -

**Hautveränderungen nach elektrischem und thermischem
Kontakt bis zu einer Sekunde**

**Vergleichende morphologisch-analytische und histologische Untersuchungen
von experimentell auf Schweine- und Leichenhaut erzeugten
Strom- und Hitzemarken**

INAUGURAL-DISSERTATION

zur
Erlangung des doctor medicinae
der
Medizinischen Fakultät
der
Westfälischen Wilhelms-Universität Münster

vorgelegt von
Sandra Christiane Thüte aus Warendorf
2009

Gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der
Westfälischen Wilhelms-Universität Münster

Dekan: Univ.-Prof. Dr. Wilhelm Schmitz

1. Berichterstatter: PD Dr. P.F. Schmidt
 2. Berichterstatter: em. Univ.-Prof. Dr. Dr. h.c. B. Brinkmann
- Tag der mündlichen Prüfung: 27.11.2009

Aus dem Universitätsklinikum Münster
Institut für Rechtsmedizin
-Univ.- Professor Dr. med. Heidi Pfeiffer-
Referent: Priv.-Doz. Dr. P. F. Schmidt
Koreferent: em. Univ.-Professor Dr. med. Dr. h. c. B. Brinkmann

ZUSAMMENFASSUNG

Hautveränderungen nach elektrischem und thermischem Kontakt bis zu einer Sekunde

Vergleichende morphologisch-analytische und histologische Untersuchungen
von experimentell auf Schweine- und Leichenhaut erzeugten

Strom- und Hitzemarken

Sandra Christiane Thüte

Mit Hilfe der Lichtmikroskopie, der Rasterelektronenmikroskopie, insbesondere der Niedervakuumrasterelektronenmikroskopie, und mikroanalytischer Verfahren (EDX und Mikroröntgenfluoreszenzanalyse) werden zur Differenzierung gegenüber klassischen Strommarken Einflussfaktoren für die Ausprägung der Morphologie, der Histologie und des Metallisationsmusters von Kurzzeitkontaktstrommarken (bis 1 Sekunde) eruiert. Die Stromflussdauer hat für die Ausprägung der Morphologie, der Histologie und der diffusen Metallisation in der Tiefe des Hautgewebes dabei einen entscheidenden, für die Ablagerung von metallischen Partikeln und Kugeln auf der Probenoberfläche jedoch nur einen untergeordneten Einfluss. Eine Differenzierung zwischen Strom- und Hitzemarken ist nicht anhand morphologischer oder histologischer Kriterien, dafür jedoch anhand des unterschiedlichen Metallisationsmusters auf der Oberfläche und in der Tiefe der Haut eindeutig möglich. Auch kann eine sichere Abgrenzung zu Elektroschockresiduen erfolgen. Anhand von eingeschmolzenen Stofffasern in der Strommarke kann auf das zum Tatzeitpunkt getragene Kleidungsstück und anhand von auf den Stofffasern abgelagerten Metallkugeln und -partikeln auf die verwendete Elektrode geschlossen werden. Letzteres ist ebenso anhand der Zusammensetzung von Metallablagerungen auf der Oberfläche und in der Tiefe der Strommarke möglich. Zur eindeutigen Zuordnung bei mehreren in Frage kommenden Elektroden eignet sich auch bei Kurzzeitkontaktstrommarken die DNA-Analyse von Geweberückständen auf der Elektrode. Die morphologische Abbildung und Beurteilung der Metallverteilung in Strom- und Hitzemarken erfolgt schnell, einfach und artefaktfrei mittels Niedervakuum-REM mit Kühltablett und EDX, wobei die Methode der Wahl zur Analyse der Tiefenverteilung von Metall die Untersuchung von Kryoschnitten im Niedervakuum-Rasterelektronenmikroskop ist.

Tag der mündlichen Prüfung: 27.11.2009

Meinen Eltern gewidmet.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	Seite
1.1 Todesfälle durch elektrischen Strom	01
1.2 Das Problem der gerichtsmedizinischen Stromtoddiagnose	05
1.3 Die klassische Strommarke	05
1.3.1 Morphologie, Histologie, Metallisation	06
1.3.2 Untersuchungsmethoden	07
1.4 Die Hitzemarke	08
1.5 Kasuistik	09
1.6 Ziel der Arbeit	12
2 Material und Methoden	
2.1 Experimenteller Aufbau und Versuchsdurchführung	14
2.1.1 Versuchsaufbau zur Erzeugung von Strommarken	14
2.1.2 Untersuchungsmaterial	15
2.1.3 Versuchsdurchführung zur Erzeugung von Strommarken	16
2.1.4 Versuchsdurchführung zur Erzeugung von Hitzemarken	19
2.2 Physikalisch-technische Analysemethoden	19
2.2.1 Rasterelektronenmikroskopie	19
2.2.1.1 Aufbau und Funktion des REM	20
2.2.1.1.1 Strahlerzeugungssystem („electron gun“)	21
2.2.1.1.2 Effektiver Strahldurchmesser d	21
2.2.1.1.3 Detektoren	22
2.2.1.1.4 Vakuumsystem	23
2.2.1.1.5 Signalverarbeitung im REM	24

2.2.1.2 Präparationsmethoden in der Rasterelektronenmikroskopie	24
2.2.1.2.1 Anforderungen an das Hochvakuumpräparat	25
2.2.1.2.2 Beschichtung elektrisch nicht leitender Präparate	25
2.2.1.2.3 Kritisch-Punkt-Trocknung	26
2.2.1.3 Prinzip der Niedervakuum-Rasterelektronenmikroskopie	27
2.2.2 Mikroanalytische Verfahren	28
2.2.2.1 Energiedispersive Röntgenspektrometrie (EDX)	28
2.2.2.1.1 Funktionsprinzip	28
2.2.2.1.2 Nachweis von Metallen in der Tiefe des Hautgewebes mittels EDX	29
2.2.2.2 Mikroröntgenfluoreszenzanalyse	30
2.2.3 Sonstige physikalische Analysemethoden	30
2.2.3.1 Stereomikroskop	30
2.3 Histologische Analysemethoden	30
2.3.1 Lichtmikroskopie	31
2.3.2 Histologische Präparation	31
2.3.2.1 Herstellung eines Präparates für das Lichtmikroskop	31
2.3.2.2 Färbemethoden	31
2.3.2.2.1 Hämatoxilin-Eosin-(HE-)Färbung	32
2.3.2.2.2 Kupferfärbung (DMABR-Methode)	32
2.4 DNA-Analyse von Geweberückständen auf der Elektrode	32
3 Ergebnisse	
3.1 Die Strommarke nach Stromfluss bis zu einer Sekunde	33
3.1.1 Morphologie	33

3.1.1.1 Einflussfaktoren	33
3.1.1.2 Randblasenbildung	37
3.1.1.3 Bläschenbildung	39
3.1.1.4 Interposition von Textilien	40
3.1.1.5 Haare	41
3.1.1.6 Strommarke als Abbild der stromführenden Elektrode	41
3.1.2 Histologie	42
3.1.2.1 Strommarkenform in der Tiefe der Haut	42
3.1.2.2 Bläschenbildung	43
3.1.2.3 Zell- und Kernelongationen	44
3.1.3 Metallisation	44
3.1.3.1 Metallablagerungen auf der Hautoberfläche	44
3.1.3.1.1 Metallische Kugeln	45
3.1.3.1.2 Metallische Partikel	53
3.1.3.1.3 Diffus auf und im Gewebe abgelagertes Metall	64
3.1.3.2 Metallablagerungen in der Tiefe der Haut	68
3.1.3.3 Metallisation von Strommarken auf im Wasser gelagerter Haut	75
3.1.3.3.1 Metallablagerungen auf nicht thermisch geschädigter Haut	80
3.1.3.3.2 Kristallablagerungen	82
3.1.4 FI-Schalter	85
3.2 Die Hitzemarke	88
3.2.1 Morphologie der Hitzemarke	88
3.2.1.1 Einflussfaktoren und Randblasenbildung	88
3.2.1.2 Bläschenbildung	89
3.2.1.3 Interposition von Textilien	89
3.2.1.4 Haare	90
3.2.2 Histologie der Hitzemarke	91
3.2.2.1 Hitzemarkenform in der Tiefe der Haut	91
3.2.2.2 Bläschenbildung	92
3.2.2.3 Zell- und Kernelongationen	93

3.2.3 Metallisation der Hitzemarke	93
3.2.3.1 Metallablagerungen auf der Hautoberfläche	93
3.2.3.2 Metallablagerungen in der Tiefe der Haut	96
3.3 Methodik	97
3.3.1 Einfluss der Präparation auf die Abbildung der Morphologie von Strom- und Hitzemarken	97
3.3.2 Darstellung der Metallverteilung in Strom- und Hitzemarken	101
3.4 DNA-Analyse von Geweberückständen auf der Elektrode	104
4 Diskussion	
4.1 Die Strommarke nach Stromflussdauer bis zu einer Sekunde	106
4.1.1 Morphologie	106
4.1.1.1 Einflussfaktoren	107
4.1.1.2 Randblasenbildung	109
4.1.1.3 Bläschenbildung	110
4.1.1.4 Interposition von Textilien	111
4.1.1.5 Haare	112
4.1.1.6 Bedeutung für die rechtsmedizinische Praxis	112
4.1.2 Histologie	114
4.1.3 Metallisation	115
4.1.3.1 Oberflächenverteilung von Metall	115
4.1.3.2 Interposition von Textilien	123
4.1.3.3 Tiefenverteilung von Metall	125
4.1.3.4 Bedeutung für die rechtsmedizinische Praxis	131
4.1.4 Versuchsdurchführung mit im Wasser gelagerter Haut	134
4.1.4.1 Metallablagerungen auf nicht thermisch geschädigter Haut	135
4.1.4.2 Kristallablagerungen	137

4.1.5 FI-Schalter	138
4.2 Differentialdiagnostische Überlegungen zur Abgrenzung von Strom- und Hitzemarken	141
4.3 Methodik	147
4.3.1 Darstellung der Morphologie von Strom- und Hitzemarken	148
4.3.2 Darstellung der Metallverteilung in Strom- und Hitzemarken	149
4.4 DNA-Analyse von Geweberückständen auf der Elektrode	152
4.5 Kasuistik	153
5 Literaturverzeichnis	155
6 Lebenslauf	170
7 Danksagung	171

1 Einleitung

1.1 Todesfälle durch elektrischen Strom

Die absolute Anzahl tödlicher Stromtodesfälle in der Todesursachenstatistik des Statistischen Bundesamtes liegt bei 134 Fällen im Jahr 2007, wobei die Häufigkeit bei Männern mit 94 Fällen höher ist als bei Frauen mit 40 Fällen (Abbildung 1.1) [99].

Männer / Frauen (Gesamt)	2000	2005	2006	2007
Gestorbene insgesamt	121 / 72 (193)	94 / 47 (141)	89 / 47 (136)	94 / 40 (134)
unter 1 Jahr	0 / 0 (0)	0 / 0 (0)	0 / 0 (0)	0 / 0 (0)
1-5 Jahre	1 / 0 (1)	2 / 0 (2)	1 / 0 (1)	1 / 0 (1)
5-10 Jahre	1 / 0 (1)	0 / 0 (0)	1 / 0 (1)	0 / 0 (0)
10-15 Jahre	0 / 1 (1)	1 / 0 (1)	1 / 1 (2)	0 / 0 (0)
15-20 Jahre	3 / 1 (4)	11 / 1 (12)	2 / 1 (3)	5 / 1 (6)
20-25 Jahre	11 / 1 (12)	6 / 0 (6)	4 / 1 (5)	10 / 0 (10)
25-30 Jahre	9 / 1 (10)	6 / 1 (7)	6 / 0 (6)	7 / 1 (8)
30-35 Jahre	13 / 3 (16)	4 / 0 (4)	5 / 2 (7)	5 / 0 (5)
35-40 Jahre	12 / 7 (19)	6 / 1 (7)	6 / 1 (7)	7 / 3 (10)
40-45 Jahre	15 / 4 (19)	9 / 2 (11)	3 / 3 (6)	6 / 3 (9)
45-50 Jahre	8 / 4 (12)	12 / 1 (13)	9 / 1 (10)	11 / 2 (13)
50-55 Jahre	13 / 4 (17)	7 / 5 (12)	11 / 4 (15)	9 / 7 (16)
55-60 Jahre	10 / 4 (14)	8 / 5 (13)	6 / 3 (9)	7 / 1 (8)
60-65 Jahre	8 / 5 (13)	3 / 2 (5)	10 / 4 (14)	5 / 0 (5)
65-70 Jahre	3 / 6 (9)	1 / 9 (10)	10 / 6 (16)	6 / 10 (16)
70-75 Jahre	3 / 9 (12)	5 / 8 (13)	4 / 3 (7)	7 / 3 (10)
75-80 Jahre	3 / 9 (12)	5 / 7 (12)	4 / 3 (7)	6 / 3 (9)
80-85 Jahre	3 / 6 (9)	3 / 4 (7)	3 / 10 (13)	1 / 4 (5)
85-90 Jahre	5 / 6 (11)	4 / 1 (5)	2 / 2 (4)	0 / 2 (2)
> 90 Jahre	0 / 1 (1)	1 / 0 (1)	1 / 2 (3)	1 / 0 (1)

Abbildung 1.1

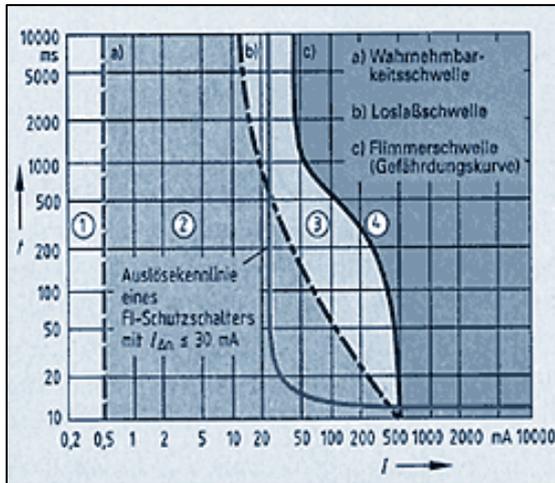
Anzahl der durch Strom Gestorbenen des Jahres 2000, sowie der Jahre 2005 – 2007

Die aufgeführten Werte schließen ebenfalls alle tödlichen Arbeitsunfälle durch elektrischen Strom und tödlichen Stromunfälle im Bereich „Haushalt und Freizeit“ ein, wobei eben diese beiden Sektoren den Großteil in der Gesamtheit aller tödlichen Stromkontakte darstellen. Damit ist der Unfall die wichtigste Ursache für den insgesamt seltenen Tod durch Elektrizität [1, 26, 32, 61, 62, 63]. Von den 37 Stromtodesfällen im Sektionsgut des Rechtsmedizinischen Institutes der WWU Münster von 1972 - 1997 finden sich in 2/3 der Untersuchungen Unfälle als Todesursache. Nur bei zehn Sektionen handelt es sich um Suizide, bei zwei Untersuchungen um Mord [49]. Vergleichbare Verhältnisse finden sich auch im Freiburger [61] und Dresdner [32] Sektionsgut.

Unfälle mit elektrischem Strom sind in vielen Statistiken häufig unterrepräsentiert, da hier nur die Fälle auftauchen, welche zum Tode geführt haben [1]. Dennoch lässt sich festhalten, dass die Anzahl der elektrischen Unfälle und tödlichen Stromtodesfälle nicht im gleichen Maße wie die Elektrifizierung von Wirtschaft und Privathaushalten zugenommen hat [1, 32], was durch die immer höheren Sicherheitsstandards, durch stärkeren Arbeitsschutz, Unfallforschung und die Kontrolle durch Berufsgenossenschaften und Gewerbeaufsicht zu begründen ist [26]. Der Forschungsbericht Fb 941 „Elektrounfälle in Deutschland - Unfälle durch Elektrizität am Arbeitsplatz und im privaten Bereich“ der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin zeigt sogar eine langjährige rückläufige Tendenz der tödlichen Stromunfälle in Deutschland im privaten Bereich, nicht jedoch im gewerblichen Sektor mit konstanter Zahl tödlicher und nicht tödlicher Elektrounfälle seit 1993 [2].

Da der elektrische Strom als Gefahrenquelle häufig unterschätzt wird, kommt es vorwiegend durch mangelnde Aufmerksamkeit, Ignoranz oder Unwissenheit ob der potentiellen Gefahr trotz erhöhter Sicherheitsstandards immer wieder zu elektrischen Unfällen [1]. Auch Defekte technischer Geräte, zum Beispiel Isolationsfehler oder eine fehlerhafte Installation mit Versagen oder Umgehung der Schutzeinrichtungen, können Ursachen für solche Unglücke sein [26]. Der FI-Schutzschalter sollte im Idealfall sämtliche Stromkreise im ganzen Haus absichern. Er dient dazu, fehlerhaften Stromfluss zu erkennen und daraufhin den Stromkreis zu unterbrechen. Hierdurch wird ein unerwünschter Stromabfluss zur Erde über den Schutzleiter oder eine menschliche Person bei versehentlichem Kontakt mit der „Phase“ vermieden.

Die übliche Nennauslösegrenze des FI-Schalters liegt meist bei 30 mA. Ist die Differenz der Ströme der zuleitenden „Phase“ und des ableitenden Nullleiters also höher als diese Auslösegrenze, so wird der FI-Schalter innerhalb von etwa 0,4 Sekunden den



Strom allpolig unterbrechen. Da die tatsächlichen Abschaltzeiten allerdings erheblich kürzer als 0,4 Sekunden sind (ca. 20 – 50 ms), bietet der FI-Schalter einen wirksamen Schutz gegen die gefährlichen Körperströme über 30 mA (Abbildung 1.2).

Abbildung 1.2
Auslösekennlinie eines FI-Schutzschalters

Dabei kann eine Beziehung zwischen quantitativ ermittelten Stromstärkewerten bei Gleich- und Wechselstrom mit entsprechenden physiologischen Reaktionen des Menschen hergestellt werden (Abbildung 1.3) [80].

In der Literatur werden häufig auch Fälle von Mord bzw. Mordversuch und Suizid durch elektrischen Strom beschrieben [1, 3, 24, 27, 28, 32, 36, 37, 38, 40, 60, 61, 62, 63, 65, 67, 73, 77, 81, 83, 86, 94, 109, 114, 117].

Der *Suizid* durch elektrischen Strom außerhalb der Badewanne ist eine ungewöhnliche Methode [28, 37, 40, 61, 62, 63, 117] und wird meist von Männern als Todesart gewählt [1, 32, 61, 63], wobei mittlere [61] und ältere [63] Jahrgänge überwiegen. Oft ist eine gewisse Sachkunde im Umgang mit Elektrizität vorhanden [37, 61]. In der rechtsmedizinischen Praxis ist der Suizid häufig leicht von einem Unfall oder Mord abzugrenzen durch den Nachweis der gründlichen und zielgerichteten Vorbereitungen (die Verlegung von Drähten, das Schreiben eines Abschiedsbriefes etc.) oder durch fremdanamnestic Angaben (die Ankündigung des Selbstmordes, bekannter Alkoholabusus, Depressionen etc.) [3, 32, 37, 61, 83].

Autoerotische Stromtodesfälle sind eine Rarität und werden vereinzelt in der Literatur beschrieben [59, 90]. Die Tatortsituation lässt meist eindeutige Rückschlüsse auf die Todesursache zu.

Stromstärke bei		Physiologische Reaktion des Menschen
Gleichstrom	Wechselstrom (50 Hz)	
I. bis 80 mA	Bis 25 mA	bis 5 mA: nur geringe Einwirkung 5 – 15 mA: Krampfgefühl, Loslassen noch möglich 15 – 25 mA: Selbständiges Loslassen des Kontaktes nicht mehr möglich
II. 80 – 300 mA	25 – 80 mA	25 – 50 mA: Noch ertragbare Stromstärke, blutdrucksteigernd, Herzunregelmäßigkeit, Herzstillstände mit Wiedereinsetzen der Herztaätigkeit
III. 300 mA – 3 A	80 mA – 3 A	Herzkammerflimmern, Tod, bei kürzerer Einwirkung als 0,3 ms meist noch kein Herzkammerflimmern 50 – 80 mA: Bewusstlosigkeit
IV. mehr als 3 A	mehr als 3 A	wie Bereich III. aber meist Lungenblähung und Bewusstlosigkeit, jedoch mit steigender Stromstärke stärkere Verbrennungen

Abbildung 1.3

Physiologische Reaktionen des Menschen bei verschiedenen Stromstärken von Gleich- und Wechselstrom

Mord oder Mordversuch mit Hilfe elektrischen Stroms kommt sehr selten vor [1, 32, 73, 77, 86]. Dieser Umstand wird von Schneider [86] so begründet, dass der Täter zunächst eine gewisse Sachkenntnis elektrotechnischer und physiologischer Grundlagen benötigt, andernfalls könnte entweder die tödliche Wirkung ausbleiben oder der Täter selbst verletzt werden. Weiterhin ist die Tötung durch elektrischen Strom bei erwachsenen Personen schwierig durchzuführen und hinterlässt häufig Spuren auf der Haut. Das Problem bei der Aufklärung von Mordfällen durch elektrischen Strom besteht in der schwierigen Diagnose des Stromtodes und der Verschleierung der Tat durch den Täter [32, 38, 63, 77, 109].

1.2 Das Problem der gerichtsmedizinischen Stromtoddiagnose

Die Diagnose des Stromtodes ist nicht einfach und häufig nur per exclusionem [3, 111] zu stellen. Das Problem besteht in der häufig nur geringen oder sogar fehlenden Ausbildung richtungweisender, morphologischer Merkmale des Stromeinflusses, welche daher durch den Leichenschau haltenden Arzt übersehen oder nicht als solche erkannt werden [32]. Bei suizidalen oder autoerotischen Todesfällen gibt die Auffindsituation meist genügend Hinweise auf die Todesursache. Problematischer dagegen ist die Aufklärung von Unfällen oder Homiziden durch elektrischen Strom, insbesondere dann, wenn am Fundort der Leiche keine primär tödliche Stromquelle zu eruieren ist [39, 71, 111].

Der Tod durch elektrischen Strom tritt meist durch einen akuten Herzstillstand nach Ausbildung von Herzkammerflimmern ein, wobei die Gefährlichkeit von Elektrizität für den Menschen von verschiedenen Faktoren abhängig ist. Hierzu gehören Stromform, -stärke und -weg, der Körper- und der Übergangswiderstand auf die Haut, die Einwirkdauer des Stromes und die jeweilige Herzphase (Abbildung 1.3) [1, 26, 118]. Aufgrund dieser Todesursache finden sich bei der Obduktion von Stromtoten häufig nur uncharakteristische Veränderungen der inneren Organe [1, 16, 24, 37, 61, 62, 87], wobei in neuerer Zeit Marc B et al feststellen, dass die im rechten Vorhof von Stromtoten gemessenen Blutwerte wie die Kreatinphosphokinase und die Laktatdehydrogenase erhöht sind [63] und Karger B et al auf den diagnostischen Wert von Petechien bei der Stromtoddiagnose hinweisen [49]. Wang Y et al [112, 113] führen eine Zellperforation von Erythrozyten, sowie von Aorten- und Pulmonalarterienendothel als sicheres Zeichen des Stromtodes an.

1.3 Die klassische Strommarke

Die Strommarke ist ein sicheres Zeichen des Stromdurchganges [95]. Sie stellt somit die wertvollste diagnostische Information bei der Stromtoddiagnose dar [1], beweist allerdings alleine aufgrund ihrer geringen Spezifität nicht den Stromtod. Fehlt eine Strommarke, so kann der Tod durch elektrischen Strom trotzdem nicht ausgeschlossen werden [1, 63], da deren Ausprägung von verschiedenen Faktoren wie Stromart, -frequenz und -intensität, der Voltzahl, also einem Schwellenwert an Stromdichte, dem Hautwiderstand (feuchte versus trockene Haut) und der jeweiligen Kontaktdauer abhängig ist [1, 10, 63, 86]. Die Häufigkeit des Auftretens von Strommarken wird in der

Literatur mit verschiedenen Werten angegeben und liegt im Mittel bei 30-60 % [49, 58, 86]. Das Aussehen der elektrischen Hautschädigungen kann stark variieren [23, 76], sodass die Identifizierung einer Strommarke manchmal schwierig ist.

1.3.1 Morphologie, Histologie, Metallisation

Morphologie (Kapitel 3.1.1 und 4.1.1):

Strommarken finden sich an den Ein- und Austrittsstellen des Stroms nach elektrischer Durchströmung. Morphologisch imponieren sie bei voller Ausprägung als begrenzte, rundlich bis elliptische, verhärtete Einsenkung der Haut mit einem erhabenen, blass bis porzellanartigen Randwall. Im Zentrum der Läsion entwickelt sich je nach Stromdichte und Einwirkdauer oft eine schwarze Verkohlung. Eine hyperämische Randzone mit kleinen Bläschen kann manchmal ebenfalls vorkommen [1, 32].

Oftmals haben Strommarken auch die Form der jeweiligen stromführenden Elektrode [1, 44, 45, 87].

Histologie (Kapitel 3.1.2 und 4.1.2):

Histologisch zeigt die Strommarke nach Böhm E im Gegensatz zur Hitzemarke in der Tiefe der Haut eine „Brotform“ [7, 9]. Weiterhin stellen sich die histologischen Veränderungen bei Stromkontakt segmental, bei Hitzeschäden kontinuierlich dar [29].

Bei voll ausgebildeter Strommarke, wie schon Schöffner M [84] feststellt, finden sich typische, jedoch keinesfalls für Stromeinfluss spezifische Veränderungen im Gewebe. Hierzu gehören zum Beispiel die Vakuolenbildung in der Hornschicht, Kernausziehungen im Stratum spinosum und basale oder die streckenweise Abhebung der Epidermis von der Cutis. Da der Strom bei Eintritt in den Körper immer den Weg des geringsten Widerstandes wählt, sollen sich histologische Veränderungen vor allem an Schweiß- und Talgdrüsen, sowie an Haarbälgen zeigen [32].

Metallisation (Kapitel 3.1.3 und 4.1.3):

Entscheidende Beobachtungen bezüglich der Metallisation auf der Oberfläche von Strommarken macht vor allem Böhm E, der diese in den 60er Jahren zwar noch als „schießscheibenförmig“ bezeichnet [6, 9], sie einige Jahre später jedoch vor allem un-

ter Zuhilfenahme eines Rasterelektronenmikroskops genau beschreibt und in ihrem Entstehungsmechanismus zu verstehen versucht [13, 15, 17, 18, 20].

Die diffuse Metallisation vor allem in der Tiefe des Gewebes regt schon seit langer Zeit zur Diskussion an und wird von verschiedenen Autoren entweder als temperaturabhängiger Diffusionseffekt [5, 41, 76, 95], stromabhängige Elektrolyse [41, 56] oder in den 70er Jahren von Böhm E [13, 15, 17, 20] als korrosiv elektrolytischer Prozess in Phase B gedeutet. In diesem Zusammenhang ebenfalls erörtert wird die Frage, ob genannte Form der Metallisation aufgrund eines niedrigeren Widerstandes vor allem entlang von Haarschäften oder Schweißdrüsen erfolgt [9, 91].

1.3.2 Untersuchungsmethoden

Zur Untersuchung von Strommarken stehen verschiedenste histologisch-histochemische und physikalisch-technische Methoden zur Verfügung.

Eine altbewährte und gebräuchliche Methode ist die Anfertigung und Anfärbung von histologischen Schnitten und anschließende Beurteilung im Lichtmikroskop, wobei neben klassischen Färbemethoden zur Darstellung histologischer Struktur auch verschiedene histochemische Verfahren zur Bewertung der Metallisation auf der Probenoberfläche und in der Tiefe der Haut zur Anwendung kommen [5, 6, 7, 8, 41, 56, 62, 74, 75, 76, 77, 84]. Mittels der verschiedenen histologisch-histochemischen Methoden können also sowohl Morphologie als auch Histologie und Metallisation von Strom- und Hitzemarken untersucht werden.

Auch integrale physikalisch-technische Methoden wie zum Beispiel die Atomabsorptionsspektrophotometrie/-spektroskopie [4, 42, 56], die Atomemissionsspektroskopie [56], die ICP-AES-Spektrometrie [62], die spektrographische Analyse [86, 95] und die Elektrographie [64] scheinen eine sinnvolle Ergänzung zur Metallanalyse in Strom- und Hitzemarken zu sein.

Wie Böhm E [12] feststellt, hat die Rasterelektronenmikroskopie in Verbindung mit einem Röntgenanalysezusatz einige Vorteile verglichen mit den konventionellen histologisch - histochemischen und auflichtmikroskopischen Verfahren. Hier wären zum Beispiel die dreidimensionale Darstellung, die höhere Schärfentiefe und das bessere Ortsauflösungsvermögen des REM gegenüber dem Lichtmikroskop oder die zerstörungsfreie Elementanalyse mit einer höheren Nachweisempfindlichkeit im Vergleich

zu den histochemischen Verfahren zu nennen, weshalb das Rasterelektronenmikroskop zusätzlich zu den konventionellen Verfahren eine geeignete Methode für die Untersuchung von Strom- [98] und Hitzemarken darstellt. Die Oberflächenabbildung ist mit dem REM ebenso möglich wie die Durchstrahlung von Dünnschnitten zur Beurteilung der Ultrastruktur [97, 102, 105, 107]. Der Einsatz des REM und der Röntgenmikroanalyse bei der Untersuchung von Strommarken in der rechtsmedizinischen Praxis wird beispielsweise von Schneider V [87] et al [89] und Carlsson L et al [27] anhand einiger kriminaltechnischer Untersuchungen beschrieben.

1.4 Die Hitzemarke

„(...); wo es sich um reine Elektrizitätswirkung handelt, da gibt es typische Strommarken; wo aber die Bildung von Joulescher Wärme zu mächtig ist, oder wo es gar zu Funken oder gar Lichtbogenbildung kommt, da gibt es schon Mischformen, Kombination von Strommarke und Verbrennung, oder gar reine Brandwunden. Diese Grenze nun, wo Elektrizität sich in Wärme zu wandeln beginnt, ist nicht bestimmbar und deshalb eben gibt es „strittige“ Bilder.“ (Jellinek S, Der elektrische Unfall 1925)

Die Frage, ob eine Hautläsion thermischen oder elektrischen Ursprungs ist, wird seit vielen Jahren von verschiedenen Autoren diskutiert. Der Hintergrund hierfür ist die Fragestellung, ob und inwieweit Morphologie, Histologie und Metallisation einer Strommarke durch den thermischen Effekt des Stroms verursacht sind.

So vertritt zum Beispiel Pioch W [76] den Standpunkt, dass aufgrund der nahezu gleichartigen Morphologie und Metallisation von Strom- und Hitzemarken keine sichere histologisch-histochemische Unterscheidung möglich ist. Sellier K [95] dagegen kommt zu dem Ergebnis, dass die Metallintensität auf der Haut nach Stromfluss ein reiner Temperatureffekt ist, wobei er die strominduzierte Iontophorese als Erklärung der Metallablagerung anzweifelt. Ganz im Gegensatz dazu folgert Bosch K [23] nach Durchführung verschiedener Experimente, dass eine Metallablagerung immer den stattgefundenen Stromfluss anzeigt und bei rein thermischen Verbrennungen fehlt. Böhm E [6, 9] schließlich zeigt, dass eine sowohl für thermische als auch für elektri-

sche Läsionen der Haut jeweils spezifische Art der Metallisation nachzuweisen ist. Auch findet er deutliche Unterschiede in der Gesamtform und in der Abgrenzung gegenüber der Umgebung bei Strom- und Hitzemarken [7, 9].

Zur Lösung des Problems versuchte vor allem in den 80er Jahren eine interdisziplinäre Forschergruppe in Kopenhagen durch kontrollierte morphologische Studien auf experimenteller Basis diagnostische Methoden herauszuarbeiten, um elektrische Schädigungen der Haut von anderen oberflächlichen Veränderungen, im Speziellen Hitzeschäden, unterscheiden zu können [31, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 101, 102, 103, 104, 105]. So wurde die Haut von anästhesierten Schweinen variierten Mengen elektrischer und thermischer Energie, aber auch sauren und basischen Lösungen ausgesetzt [68]. Die entstandenen Hautläsionen wurden exzidiert und jeweils nach bestimmten Zeitintervallen im Lichtmikroskop, im REM oder TEM untersucht. Die Untersuchungen zeigten, dass aufgrund spezifischer histologischer und ultrastruktureller Veränderungen, welche Danielsen L et al zusammenfassen [29, 30], eine Differentialdiagnose zwischen elektrischen und thermischen Hautläsionen durchaus möglich ist.

In neuerer Zeit kommen Takamiya M et al [100] in experimentellen Versuchen zu dem Ergebnis, dass die Kernausziehungen in der Epidermis bei thermischen und elektrischen Läsionen durch die thermische Ausdehnung der Dermis hervorgerufen werden.

1.5 Kasuistik

Im Folgenden soll ein rechtsmedizinischer Fall geschildert werden, bei dem Tathergang und Todesursache aufgrund verschiedener untypischer Indizien und Befunde weitgehend unklar blieben:

Am 30.09.01 wurde die 37-jährige Frau B. im Arbeitszimmer ihrer Wohnung im ersten Obergeschoss tot aufgefunden. Die Verstorbene lag in unbekleidetem Zustand ausgestreckt auf dem Fußboden vor dem Schreibtisch im Arbeitszimmer. Sie hatte offensichtlich kurz vor ihrem Tod ein Bad im Badezimmer der Wohnung genommen.

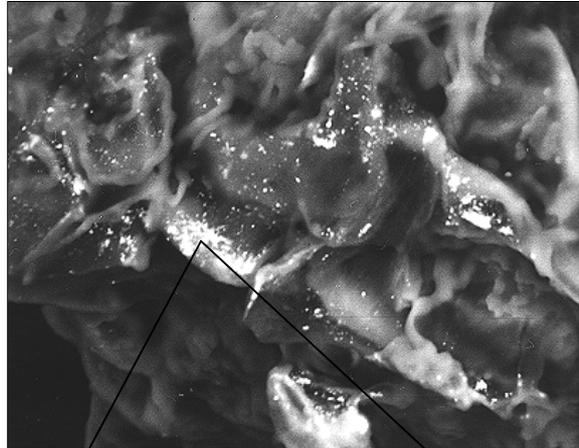
Eine Untersuchung des Leichenfundortes durch das Landeskriminalamt NRW ergab, dass sich zum Zeitpunkt der Untersuchung weder an der Elektroinstallation noch an den elektrischen Geräten oder den frei berührbaren Metallteilen im Arbeits- und im Badezimmer des ersten Obergeschosses konkrete Anhaltspunkte dafür fanden, dass in diesem Bereich die Voraussetzungen für einen tödlichen elektrischen Schlag gegeben waren. Lediglich an einer Steckdose in der Diele war offensichtlich kein Schutzleiter angeschlossen, was sich beim Gebrauch eines defekten Elektrogerätes nachteilig hätte auswirken können.

Bei der Obduktion der Leiche konnte keine bestimmte Todesursache festgestellt werden. Auffällig waren massive an Griffspuren erinnernde Hämatome an den Oberarmen und Unterblutungen am Rücken, vor allem an den Schulterblättern. Am Hinterhaupt fanden sich deutliche Kratzer weißlicher Färbung. An der Außenseite des linken Oberschenkels war die Oberhaut in einem kleinen Areal abgehoben und es zeigten sich hier vier quadratisch angeordnete, stecknadelspitzgroße, unterschiedlich intensiv braune Pünktchen. Das umgebende bloßliegende Gewebe erschien porzellanartig weißlich. Der lichte Abstand zwischen den Punkten betrug 1,5 - 2 mm. Dieser Hautbereich einer fraglichen Strommarke wurde exzidiert und zerteilt, wobei die eine Hälfte histologisch aufgearbeitet und die andere Hälfte mittels Rasterelektronenmikroskop und Röntgenmikrobereichsanalyse untersucht wurde.

Die Histologie zeigte typische, jedoch nur schwach ausgeprägte Befunde, die sich mit den Charakteristika einer Strommarke in Einklang bringen ließen.

Die Analyse mittels REM und EDX ergab, dass verschiedene Bereiche der abgeschobenen Oberhaut Einsprenkelungen von Goldpartikeln mit einem Durchmesser von $< 1 \mu\text{m}$ bis zu einigen μm aufwiesen, welche als Erosionsprodukte infolge Stromüberschlags gedeutet wurden. Die Partikel waren zum Teil in die Oberhaut eingelagert, wobei die Dichte der eingelagerten Partikel im Vergleich zur klassischen Metallisation einer Strommarke relativ gering ausgeprägt war (Abbildung 1.4). Die abgeschobene Oberhaut wurde gedeutet als abgelöste Haut einer infolge Stromeinwirkung entstandenen Blase. Die makroskopisch sichtbaren, braunen Pünktchen konnten rasterelektronenmikroskopisch nicht dargestellt werden.

Aufgrund von Tatortsituation und Obduktionsbefunden fiel es schwer einen Tathergang zu rekonstruieren oder eine eindeutige Todesursache festzustellen. So wurde vermutet, dass der Tod von Frau B. in der Badewanne eingetreten war, wobei die Hämatome an Rücken und Oberarmen für ein Herausheben der Toten aus der Badewanne und nachträgliches Ablegen im Arbeitszimmer sprechen konnten. Die Genese der untersuchten, für eine Strommarke untypischen Hautalteration am linken Oberschenkel und das Fehlen von weiteren todesursächlichen Veränderungen innerer Organe wurden ebenfalls kontrovers diskutiert. Eine der gehandelten Theorien war die Anwendung eines Elektroschockgerätes als Tatwerkzeug, nach deren Auslösung der Tod des Opfers durch Herzversagen eingetreten sein soll. Weiterhin wurde der Verdacht geäußert, dass bei Frau B. möglicherweise durch Kontakt mit einem stromführenden Leiter ein strominduziertes Herzkammerflimmern ausgelöst worden sein könnte. Die untypische Morphologie, Histologie und Metallisation der potentiellen Strommarke am Oberschenkel wurde dabei durch ein nur kurzzeitiges Streifen der Haut mit einem stromführenden Teil gegebenenfalls unter Wasser erklärt.



Elektroschocker?

Kurzzeitstromkontakt?

Abbildung 1.4

Abgeschobene Oberhaut der potentiellen Strommarke mit Ablagerung von Goldpartikeln und diffus in die Haut eingelagertem Metall (helle Bereiche).

S-180, RE-Mode

1.6 Ziel der Arbeit

Die oben beschriebene Kasuistik liefert die Motivation für diese Arbeit. Eine der diskutierten möglichen Entstehungsweisen der potentiellen Strommarke am Oberschenkel der Toten ist aufgrund der nur gering ausgeprägten Morphologie, Histologie und Metallisation der nur kurzzeitige Kontakt der Haut mit einer stromführenden Elektrode. In der Literatur findet man jedoch nur vereinzelte Untersuchungen über Veränderungen der Haut nach lediglich kurzzeitigem Stromkontakt [6, 7, 9, 64, 74, 75, 76, 84, 95], wobei diese häufig wenig systematisch sind und die beschriebene Problematik oft nur am Rande abgehandelt wird. Lediglich Böhm E beschäftigte sich in den 70er Jahren rasterelektronenmikroskopisch mit der Thematik von Frühveränderungen der Haut bezüglich Morphologie und Metallisation bei Stromkontakt [13, 15, 16, 17].

In der vorliegenden Arbeit nun wird, auf der Basis der Ergebnisse von Böhm E [17], die spezielle Fragestellung der Morphologie, Histologie und Metallisation bei Kurzzeitstromkontakten aufgegriffen. Dabei werden in verschiedenen Experimenten Strommarken mit bis zu maximal einer Sekunde Stromflussdauer mittels verschiedener Elektroden (Reinmetalle, Legierungen oder beschichtete Elektroden verschiedenster Form und Größe) auf Haut oder auf mit Kohleband beschichteten REM-Haltern (kurz: „Leit-Tab“) produziert. Die Leit-Tabs werden dabei zur Untersuchung von vor allem Metallablagerungen auf der Probenoberfläche zwecks Konstanthaltung der Versuchsbedingungen verwendet. Besondere Bedeutung kommt weiterhin der Erzeugung von Strommarken zu, welche mittels eines Kurzschlusses mit Abschalten des Stromkreises durch den FI-Schalter (Kapitel 3.1.4 und 4.1.5) entstanden sind. Diese Arbeit möchte weiterhin eine Übersicht über die bei verschiedenen Einflussfaktoren (Hautart, Durchfeuchtungsgrad der Haut, interponierte Textilien, Gestalt und metallische Zusammensetzung der verwendeten Elektroden, Stromstärke) entstehenden charakteristischen Veränderungen der Morphologie (Kapitel 3.1.1 und 4.1.1) und Metallisation (Kapitel 3.1.3 und 4.1.3) von Strommarken bei elektrischen Kontakten bis zu einer Sekunde geben, wobei ebenfalls immer eine Differenzierung zu Hitzemarken (Kapitel 3.2 und 4.2) erfolgt. In beiden Fällen soll die Histologie (Kapitel 3.1.2, 3.2.2, 4.1.2 und 4.2) aufgrund der schon umfangreichen Abhandlung in der Literatur nur bei bestimmten Fragestellungen erörtert werden.

Die Darstellung von Morphologie und Metallisation auf der Oberfläche der in dieser Arbeit erzeugten Strom- und Hitzemarken erfolgt vor allem mittels eines Rasterelektronenmikroskops. Die Untersuchung im Hochvakuum-REM ist dabei mit einigen für diese Untersuchung erforderlichen Probenpräparationen (Lufttrocknung versus Kritisches-Punkt-Trocknung, Kohlebeschichtung versus Goldbesputterung) verbunden und soll mit Abbildungsmöglichkeiten im Niedervakuum-REM verglichen werden.

Dabei kann heute aufgrund verbesserter Präparationsmethoden und rasterelektronenmikroskopischer Abbildungs- und Analysetechniken gegenüber den 70er Jahren [11, 12, 13, 14, 15, 18, 25], welche Böhm E damals zu häufig nur deskriptiven und spekulativen Annahmen zwangen, eine detaillierte morphologische Abbildung, sowie eine exakte Elementanalyse und -verteilung erfolgen (Element-Mapping).

Zur Beurteilung der Metallverteilung in der Tiefe des Gewebes werden von einigen der in den einzelnen Versuchen erzeugten Strom- und Hitzemarken mit verschiedenen Verfahren (Paraffin- bzw. Eponeinbettung versus Einfrieren in flüssigem Stickstoff) Gewebeschnitte angefertigt, welche mittels EDX untersucht werden.

Mittels EDX und Mikroröntgenfluoreszenzanalyse ist die Detektion von Metallen und Erstellung von Elementverteilungsbildern möglich, was exemplarisch auch in dieser Arbeit gezeigt wird. Die Verteilungsbilder können zur Beurteilung der Metallisation von Strom- und Hitzemarken auf der Oberfläche und in der Tiefe der Haut eingesetzt werden und stellen somit eine Alternative dar zu klassischen lichtmikroskopischen, aber auch zu neueren mikroanalytischen Verfahren wie AAS, AES oder ICP-AAS (Kapitel 3.3 und 4.3).

Abschließend soll in dieser Arbeit der Frage nachgegangen werden, ob es bei Strommarkenerzeugung mit Stromflussdauer bis zu einer Sekunde möglich ist, repräsentative DNA-Analysen von an der Elektrode haftenden Geweberückständen anzufertigen, welche dann evt. Rückschlüsse auf den Tathergang erlauben (Kapitel 3.4 und 4.4).

2 Material und Methoden

2.1 Experimenteller Aufbau und Versuchsdurchführung

2.1.1 Versuchsaufbau zur Erzeugung von Strommarken

Die Strommarken dieser Studie wurden mittels zwei verschiedener elektrischer Schaltungen erzeugt: Schaltung 1 (Abbildung 2.1) und Schaltung 2 (Abbildung 2.2).

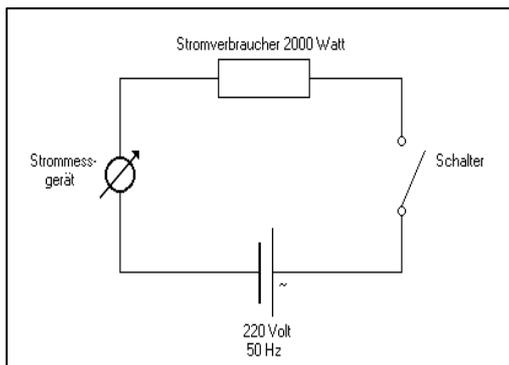


Abbildung 2.1
Stromkreis zur Erzeugung von Strommarken

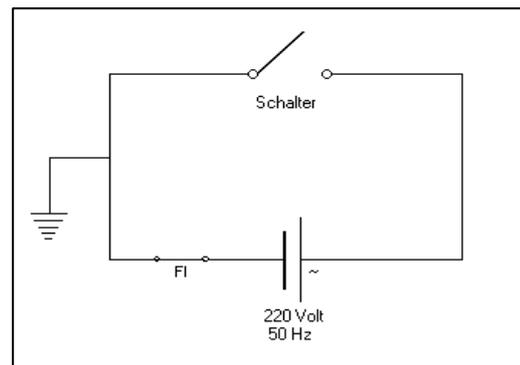


Abbildung 2.2
Stromkreis zur Erzeugung von Strommarken

1. Stromquelle:

- **Haushaltssteckdose** von 220 Volt Wechselstrom und 50 Hz

2. Schaltung 1 (Abbildung 2.1):

- **Dimmer** mit möglicher stufenweiser Erhöhung des Stromes
- **Stromverbraucher** (Leistung von 2000 W, Widerstand 26 Ω)
- **Strommessgerät** (Firma Phywe)
- **Speicheroszillograph**

3. Schaltung 2 (Abbildung 2.2):

- **Kurzschluss mit Erdung**
- **FI-Schalter** unterbricht den Stromkreis bei Erreichen von 400 mA (haushaltsaltes Stromnetz)
- kein Stromverbraucher

4. „Schalter“ (Schaltung 1 und 2):

- **Metallplatte aus Zink**, durch einen Bananenstecker mit aufgesetzter Krokodilklemme mit dem Stromverbraucher (Schaltung 1) oder mit dem Schutzkontakt der Steckdose (Schaltung 2) verbunden
- **variierbare Elektrode**, durch einen Bananenstecker mit aufgesetzter Krokodilklemme mit dem Dimmer (Schaltung 1) oder mit der Phase der Steckdose (Schaltung 2) verbunden
- **Untersuchungsmaterial** (Kapitel 2.1.2), Lagerung auf der Zinkplatte
- **Stromkreisschluss** durch manuelles Aufsetzen der Elektrode auf das jeweilig verwendete Untersuchungsmaterial (Kapitel 2.1.2)

2.1.2 Untersuchungsmaterial

Vorversuche:

Zur Orientierung und Eingrenzung der beschriebenen Thematik wurden zunächst zur Definition der bestehenden Randbedingungen mit Leit-Tabs aus Kohlenstoff beklebte REM-Halter aus Aluminium (Abbildung 2.3) benutzt (Widerstand: $\sim 1G\Omega$). Diese ließen sich auf einem REM-Halter-Block befestigen und wurden mit ihm auf die Zinkplatte gestellt. Im Folgenden sollen sie kurz als „Leit-Tab“ bezeichnet werden.



Abbildung 2.3
Leit-Tab auf REM-Halter

Versuche mit Haut:

1. Schweinehaut:

Es wurde Haut von *Jungschweinen* verwendet, welche kurz zuvor vom Schlachter getötet worden sind. Diese frische Schweinehaut wurde im Kühlschrank bei $+4^{\circ}\text{C}$ gelagert, bevor sie mit einem Edelstahlskalpell in $1\text{-}4\text{ cm}^2$ große Stücke geschnitten wurde, mit denen dann die Versuche durchgeführt wurden (Widerstand: 800Ω).

2. Leichenhaut:

Um die Versuchsergebnisse auf den Menschen übertragen zu können, wurde im Folgenden Leichenhaut anatomischer Leichen für die Experimente verwendet.

Zunächst ist mit *stark verhornter Fußsohlenhaut* gearbeitet worden. Diese wurde gegebenenfalls eine Nacht vor Versuchsdurchführung in Wasser gelagert, um eine komplette Durchfeuchtung zu erreichen.

Für eine nächste Versuchsreihe wurde Leichenhaut verwendet, welche von den Händen anatomischer Leichen stammte. Hierbei ließen sich die Hauttypen der *stark behaarten Haut vom Unterarm, Handgelenk und Handrücken* und die *nicht behaarte, eher verhornte Haut der Handinnenfläche und der Finger* unterscheiden. Auch diese Haut wurde gegebenenfalls eine Nacht vor Versuchsdurchführung in Wasser gelagert (Widerstand: $\sim 0\Omega$).

Schließlich wurde für einige Versuche auch nicht durchfeuchtete *menschliche Bauchhaut* verwendet (Widerstand: $\sim 4M\Omega$).

2.1.3 Versuchsdurchführung zur Erzeugung von Strommarken

Anpressdruck:

Zur Erzeugung von Strommarken wurde eine Elektrode manuell mit ihrem Eigengewicht auf das jeweilige Untersuchungsmaterial, Leit-Tab oder Haut, aufgesetzt.

Stromflusszeiten:

Die Stromflusszeiten betragen dabei zwischen 0,1 und 1 Sekunde.

Elektroden:

Die Versuche wurden mit verschiedenen Elektroden durchgeführt, welche mittels EDX vorher auf ihre metallische Zusammensetzung untersucht worden sind.

Im Folgenden sollen die verwendeten Elektroden kurz beschrieben werden:

- Zwei Messingstäbe (Durchmesser: 0,5 cm und 0,2 cm), wobei ersterer an einer Seite angespitzt ist. Es wurde in beiden Elektroden eine Spur Blei nachgewiesen.

- Ein Stahlstab (Durchmesser: 0,1 cm).
- Ein 4 cm langer vergoldeter und vernickelter Messingbananenstecker mit einem Durchmesser von 0,7 cm.
- Die Spitze eines Bananensteckers, welche durch EDX als vernickeltes Messing mit einer Spur von Blei identifiziert wurde (Durchmesser: 0,4 cm), Zinn und Eisen wurden im Bügel nachgewiesen.
- Verschiedene Schrauben [Schraube 0: verzinkte Edelstahlschraube mit einer Spur von Nickel und Cobalt (Durchmesser: 0,7 cm), Schraube 1: verzinkte Edelstahlschraube mit Spuren von Vanadium und Cobalt (Durchmesser: 0,7 cm), Schraube 2: vermessingte Eisenrundkopfschraube mit Spuren von Cadmium, Chrom und Mangan (Durchmesser: 0,8 cm), Schraube 3: vermessingte Eisenschraube (Durchmesser: 0,8 cm), Schraube 4: vernickelte Eisenschraube mit Spuren von Cd].
- Aus einem Kabel herausisolierter Kupfer-Draht (Durchmesser: 0,1 cm).
- Zwei 0,7 x 9 cm große dünne Bleche, wobei das eine abgerundete Ecken hatte (Nachweis von Silber und Kupfer) und das andere nicht (vernickelte Eisenelektrode mit Spuren von Aluminium, Mangan und Chrom).
- Verschiedene 11 cm lange Stäbe aus Reinmetallen wie Aluminium, Kupfer (Durchmesser: je 0,4 cm) und Kohle (Durchmesser: 0,6 cm), deren eine Seite jeweils angespitzt ist.
- 4fach-Stecker mit lichtem Abstand von 2-5 mm zwischen den einzelnen verzinnnten Nickelelektroden (Durchmesser: 0,4 mm). Blei konnte ebenfalls in der Legierung nachgewiesen werden.
- Elektrolytisch polierte Elektrode aus Vanadium, Zirkonium und Niob.

Vorversuche:

In einer ersten Versuchsreihe wurden orientierend mit mehreren der oben aufgezählten Elektroden Kurzkontaktstrommarken auf *Leit-Tabs* produziert. Dazu wurden mittels Schaltung 1 (Abbildung 2.1) Strommarken erzeugt auf:

- trockenen, befeuchteten und in Leitungswasser gelagerten Leit-Tabs.
- mit verschiedenen trockenen und feuchten Kleidungsstücken bedeckten Leit-Tabs (Interponate waren ein dünner Baumwoll-, ein Jeans- und ein Viskosestoff).

- mit 2 - 4 Leit - Tabs beklebten REM - Haltern zur Erhöhung des Widerstandes und zur Verhinderung des elektrischen Durchschlags.

Weiterhin wurden Strommarken mittels Kurzschluss und Ableitung des Stroms zur Erde mittels Schaltung 2 (Abbildung 2.2) auf Leit-Tabs erzeugt.

Versuche mit Haut:

In einer zweiten Versuchsreihe fand die oben beschriebene *Schweinehaut* Verwendung, wobei Strommarken erzeugt wurden:

- auf trockener und befeuchteter Haut.
- auf im Wasser gelagerter Haut.
- auf mit verschiedenen trockenen und feuchten Kleidungsstücken bedeckter Haut.
- mittels Schaltung 1 und Schaltung 2.

Die genannten Versuchsvariationen wurden ebenfalls mit allen Arten der *Leichenhaut* durchgeführt.

Strommarkenerzeugung auf im Wasser gelagerter Haut (Schaltung 1 und 2):

Zur Strommarkenerzeugung wurde die (geerdete) Zinkplatte mit dem ihr aufgelagerten Untersuchungsmaterial in einigen Versuchen in eine mit Leitungswasser gefüllte Plastikwanne verbracht. Der Stromkreisschluss erfolgte bei Eintauchen der jeweiligen Elektrode ins Wasser.

Versuchsvariationen zur Untersuchung von Kristallwachstum:

Nebenbefundlich wurde die Bildung von Kristallen auf in Wasser gelagerter Haut durch Stromeinfluss untersucht. Dafür wurde mittels Schaltung 1 die Elektrode für fünf Sekunden bis maximal zehn Minuten ins Wasser getaucht. Der Abstand zur Haut betrug 1-10 cm, wobei in einigen Experimenten eine Strommarkenerzeugung auf der Haut erfolgte, in anderen Versuchen dagegen nicht. Die Haut, welche immer einen

Kontakt zur unterliegenden Zinkplatte hatte, war entweder vollständig oder nur zur Hälfte von Wasser umschlossen.

2.1.4 Versuchsdurchführung zur Erzeugung von Hitzemarken

Die Hautoberfläche wurde mit den auf 480 °C erhitzten Elektroden (1000 Watt Heizofen mit Heizleistungsregler HL 300) in verschiedenen Versuchen für Zeiträume von 0,1-1 Sekunden, bei bestimmten Fragestellungen auch bis zu 15 Sekunden, mit deren Eigengewicht kontaktiert.

2.2 Physikalisch-technische Analysemethoden

Zum besseren Verständnis der verwendeten Abbildungs- und Analysemethoden soll an dieser Stelle eine kurze Beschreibung und Erläuterung aller für diese Arbeit benutzten physikalisch-technischen Gerätschaften und deren Verwendung bei den verschiedenen Fragestellungen der einzelnen Versuchsreihen gegeben werden.

Auf das Rasterelektronenmikroskop als zentrales Analyseinstrument dieser Studie wird genauer eingegangen, wobei auch die Aspekte der Präparation und des erweiterten Verfahrens der Niedervakuum-Rasterelektronenmikroskopie beleuchtet werden. Weiterhin wird ein kurzer Überblick über die benutzten mikroanalytischen Verfahren wie EDX und Mikroröntgenfluoreszenzanalyse geschaffen.

2.2.1 Rasterelektronenmikroskopie

Die in den Versuchen produzierten Strom- und Hitzemarken wurden nach entsprechender Präparation (Kapitel 2.2.1.2) einerseits in einem Rasterelektronenmikroskop Typ Stereoscan 180 der Firma Cambridge (siehe Abbildung 2.4¹) mit einem Backscattered-Electron-Detektor (BSE-Detektor) der Firma Centaurus und mittels des Bildbearbeitungsprogramms „analySIS“ und andererseits in einem Niedervakuum-Rasterelektronenmikroskop Typ S-3600N SEM der Firma Hitachi Technologies mit Kühltisch (Abbildung 2.8) untersucht.

¹ Scanning Microscopy Vol.13, No.1, 1999 (Pages 1-6)

Rasterelektronenmikroskopisch beurteilt wurden die Morphologie der Strom- und Hit-
zemarkenoberfläche und deren Form in der Tiefe des Gewebes. Weiterhin konnte die
Form und Ausprägung von Metallisationsprodukten an der Oberfläche und in der
Tiefe der Haut untersucht werden.

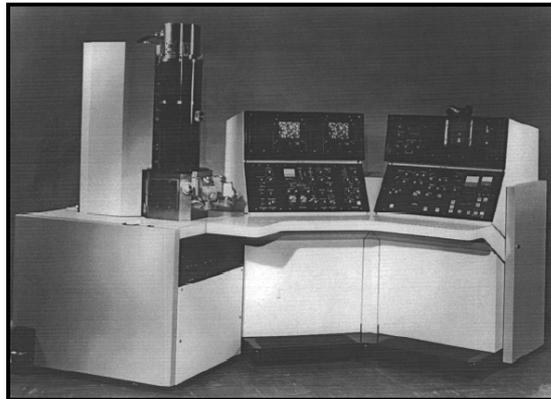
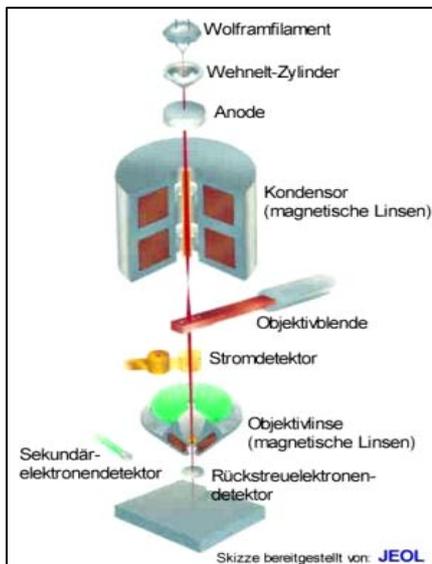


Abbildung 2.4 Stereoscan 180, 1978

2.2.1.1 Aufbau und Funktion des REM

Das Prinzip der Bildentstehung im Rasterelektronenmikroskop besteht darin, dass mit
einem Elektronenstrahl, der mit Hilfe von elektrischen Ablenkspulen horizontal und



vertikal über die Probe gelenkt wird, ein rech-
eckiger Bereich der Oberfläche zeilenweise abge-
rastert wird. Die Wechselwirkungsprozesse des
Strahls mit dem Probenmaterial führen zur Ent-
stehung bestimmter Signale, die von entsprechen-
den Detektoren erfasst und in elektrische Impulse
umgewandelt werden. Diese schließlich können
durch entsprechende Modulation als Monitorbild

Abbildung 2.5
Schematischer Aufbau eines REM

dargestellt wer-
den. Im Fol-
genden nun sol-

len die einzelnen Stufen der Bildentstehung in einem Rasterelektronenmikroskop
anhand des Aufbaus (Abbildung 2.5) kurz erläutert werden.

2.2.1.1.1 Strahlerzeugungssystem („electron gun“)

Das Strahlerzeugungssystem besteht aus Kathode, Wehneltzylinder und Anode. Zwischen Kathode und Anode wird eine elektrische Hochspannung („Beschleunigungsspannung“) angelegt, wodurch die aufgrund des anliegenden Heizstromes („filament current“) von etwa 2,7 A aus der aufgeheizten Kathode emittierten Elektronen aus der Raumladung vor der Kathode abgesaugt und in Richtung der Anode beschleunigt werden. Der Wehneltzylinder, an dem eine geringfügig höhere negative Spannung anliegt als zwischen Kathode und Anode („Biasspannung“), hat dabei die Aufgabe, die abgesogenen Elektronen zu einem Strahl zu formieren und sie in Anodennähe zum kleinsten Durchmesser, dem „Crossover (d_0)“, zu bündeln.

2.2.1.1.2 Effektiver Strahldurchmesser d

Zur weiteren Verkleinerung des Strahldurchmessers im „Crossover“ dient ein elektromagnetisches Linsensystem, das aus zwei Kondensorlinsen und einer Objektivlinse besteht, wobei letztere die zusätzliche Aufgabe hat, den Elektronenstrahl auf der Probe zu fokussieren. Mit diesem so geformten Endelektronenstrahl (effektiver Strahldurchmesser d) wird nun die Probe zeilenweise abgerastert.

Eine besondere Aufgabe hat die so genannte Aperturblende. Der Durchmesser der Aperturblendenöffnung D ist für den Aperturwinkel 2α des Elektronenstrahls auf der Probenoberfläche verantwortlich. Dieser beeinflusst wiederum die Strahlstromstärke im Fokus auf der Probenoberfläche zusammen mit der Emissionsstromdichte (Anzahl der pro Flächeneinheit aus der Kathode austretenden Elektronen), der Erregung der Kondensorlinsen und der Beschleunigungsspannung. Die Strahlstromstärke kann mit Hilfe eines Faraday-Behlers und eines Picoamperemeters gemessen werden.

Der effektive Strahldurchmesser d schließlich ist abhängig vom Strahldurchmesser im „Crossover“ und von der Beeinflussung durch die einzelnen Linsensysteme. Rechnerisch ergibt sich d also aus dem Produkt von d_0 und allen Verkleinerungen des gesamten Linsensystems. Allerdings ist in der Praxis noch zu berücksichtigen, dass der theoretisch errechnete effektive Strahldurchmesser d durch die sogenannten Linsenfehler mit sphärischer Abberation, chromatischem Fehler, axialem Astigmatismus und Beugungsfehler wieder vergrößert wird. Ein Teil dieser Linsenfehler lässt sich durch Justierung des elektronenoptischen Strahlenganges wie zum Beispiel durch

elektrische Elektronenstrahljustierung oder durch mechanische Objektivaperturbledenzentrierung weitgehend minimieren.

2.2.1.1.3 Detektoren

Die mit dem Strahl auf die Probenoberfläche auftreffenden Primärelektronen wechselwirken mit der Probenmaterie. Es entstehen Rückstreuelektronen, Sekundärelektronen, Licht und Röntgenstrahlen (siehe Abbildung 2.6²). Jedes dieser jeweiligen Signale benötigt einen spezifischen Detektor, der bezüglich Abnahmewinkel, Raumwinkel und Effektivität für das jeweilige Signal optimiert sein muss. Ein Teil der Elektronen wird auch von der Probe selbst absorbiert und zur Erde abgeleitet. Diese Probenstromstärke („specimen current“) kann gemessen werden und ist das Ergebnis von Strahlstromstärke abzüglich der Stromstärken von Rückstreuelektronen und Sekundärelektronen.

Sekundärelektronen (SE) sind Elektronen, die im Laufe des Anregungsprozesses durch die Primärelektronen von einem schwach gebundenen Zustand gelöst werden und eine zumeist geringe Bewegungsenergie unter 50 eV besitzen. Sie können die Probe nur verlassen, wenn sie nahe der Probenoberfläche erzeugt werden, da langsame Elektronen im Material stark absorbiert werden. SE-Detektoren saugen diese schwachenergetischen SE durch eine zwischen Netz des Kollektors und Probe angelegte Spannung von 50-400 V an, beschleunigen sie durch eine 10 kV-Spannung zwischen Kollektornetz und Szintillatortoberfläche auf etwa 10 keV und lassen sie auf einen Szintillator prallen. Die entstehenden Lichtblitze werden mittels eines Lichtleiters zu einem Photomultiplier geleitet, wo durch die Photonen Elektronen aus der Photokathode herausgelöst werden, welche sich in Abhängigkeit von der Multiplierspannung vervielfachen. Ein Photon kann bis zu 10^5 - 10^6 Sekundärelektronen auslösen.

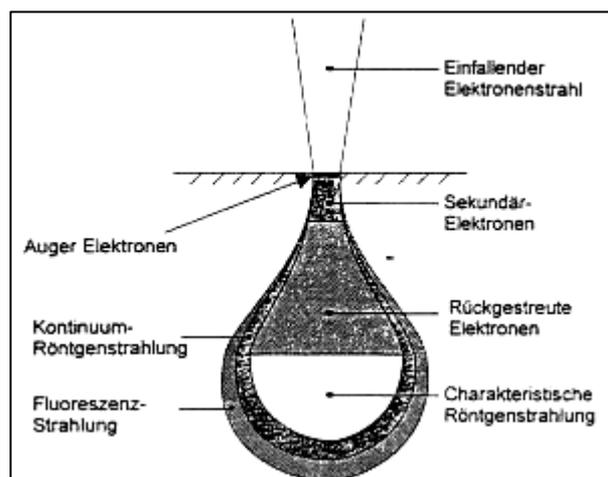


Abbildung 2.6

Wechselwirkung der Primärelektronen in Materie

² <http://www.iw.uni-hannover.de/wk/wk-a/rem.html> [01.06.04]

Rückstreuielektronen (RE) sind Elektronen aus tieferen Schichten der Probe, die aufgrund ihrer hohen Energie nicht von der Saugspannung des SE-Detektors beeinflusst werden.

Der RE-Detektor befindet sich oberhalb des Präparates, dicht unterhalb des Polschuhs. Die hochenergetischen Rückstreuielektronen gelangen geradlinig von der Probe zum Szintillator des RE-Detektors, wo sie Lichtblitze erzeugen, welche über einen Lichtleiter zum Photomultiplier geleitet werden. Im Multiplier wird das Signal, wie oben beschrieben, verstärkt und zur Helligkeitsmodulation einer Bildschirmröhre genutzt. Ziel eines RE-Detektors ist die Abbildung des Materialkontrastes. Auf andere Prinzipien der RE-Detektion (YAG-Rückstreudetektoren, Halbleiterdetektoren, Microchannel Plate Detektoren) soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden.

Neben RE und SE entstehen in den Proben auch Röntgenstrahlen, deren Detektion in Kapitel 2.2.2.1 näher beschrieben wird, und Licht. Der Kathodolumineszenz-Detektor für die Messung dieses Lichts ist häufig ein elliptischer Spiegel oberhalb der Probe, in dessen einen Brennpunkt das Präparat und im anderen der Lichtleiter montiert ist, welcher wiederum die Photonen zu einem Photomultiplier weiterleitet.

2.2.1.1.4 Vakuumsystem

In Kathodenraum, Säule und Probenkammer sollte ein Vakuum von mindestens 10^{-4} mbar herrschen. Der Grund dafür ist eine Vermeidung von Zusammenstößen der Primärelektronen mit Luftmolekülen, wodurch es zur Aufweitung des Elektronenstrahls und somit zur reduzierten Strahlkohärenz kommen würden (Kapitel 2.2.1.3). Aufgrund des Vakuums dürfen die zu untersuchenden Proben keine Isolatoren, Flüssigkeiten oder Gase sein. Feste Proben dürfen ebenfalls nicht gasend oder feucht sein, sodass biologisches Material wie zum Beispiel die in den Versuchen benutzte Schweine- und Menschenhaut für die Untersuchung im Hochvakuumrasterelektronenmikroskop einer speziellen Präparation bedarf (Kapitel 2.2.1.2).

Das für die Untersuchung benötigte Arbeitsvakuum von 10^{-5} - 10^{-6} mbar wird durch eine Kombination verschiedener Pumpen hergestellt, meist einer Rotationspumpe, die ein Vorvakuum von 10^{-1} mbar erzeugt, und einer Diffusions- oder Turbomolekularpumpe für das Endvakuum. Die Rotationspumpe transportiert dann die entstehenden Gase aus der Hochvakuumpumpe ab. Bei Feldemissionskathoden werden zusätzlich Ionen-Getter-Pumpen verwendet, um ein noch besseres Vakuum zu erreichen. Auf die

Funktionsprinzipien der einzelnen Pumpen wird an dieser Stelle nicht eingegangen. Hier sei auf entsprechende Fachliteratur verwiesen.

2.2.1.1.5 Signalverarbeitung im REM

Die in den verschiedenen Detektoren registrierten und im Photomultiplier verstärkten Impulse jedes einzelnen Objektpunktes werden in ein elektrisches Signal umgewandelt und in einem Vor- und Videoverstärker nochmals verstärkt. Das entstehende, verstärkte Videosignal beeinflusst nun den simultan zum Elektronenstrahl abgelenkten Schreibstrahl einer Bildschirnröhre auf einem Monitor bzw. wird das Bild in einem Bildspeicher festgehalten, sodass eine „Punkt zu Punkt“- Korrelation zwischen der Höhe der Sekundärsignale eines Objektpunktes und der Helligkeit des entsprechenden Bildschirmpunktes besteht. Durch eine Veränderung der Photomultiplierspannung wird der Kontrast beeinflusst. Die Bildhelligkeit kann durch Addition oder Subtraktion des Gleichspannungsanteils des elektrischen Signals, die Vergrößerung durch Veränderung des abgerasterten Objektabschnitts variiert werden.

2.2.1.2 Präparationsmethoden in der Rasterelektronenmikroskopie

Die mit einem Leit-Tab aus Kohlenstoff beklebten REM-Halter konnten aufgrund ihrer leitenden und nicht gasenden Eigenschaften ohne weitere Vorbehandlung in das Hochvakuum des Stereoscan 180 eingebaut werden. Lediglich die mit verschiedenen Stoffen bedeckten REM-Halter mit Leit-Tab wurden nach Versuchsdurchführung zusätzlich mit Kohle beschichtet, um eine Aufladung der elektrisch nicht leitenden Textilien zu verhindern.

Im Folgenden wird die Präparation der mit Strom und Hitze kontaktierten Schweine- und Menschenhaut für die anschließende Untersuchung im Hochvakuum des Stereoscan 180 näher erläutert.

Die Hautproben, die im Niedervakuum-Modus des Hitachi S-3600N SEM untersucht wurden, bedurften dagegen keiner weiteren Präparation. Sie wurden mittels des vorhandenen Kryotisches sofort nach Versuchsdurchführung auf -20° C gefroren und in diesem Zustand untersucht.

2.2.1.2.1 Anforderungen an das Hochvakuumpräparat

Ein im Hochvakuum zu untersuchendes Präparat muss elektrisch leitend sein, da es sonst zu Aufladungen kommen würde. Weiterhin darf es aufgrund des benötigten Hochvakuums von 10^{-6} mbar nicht gasen. Dies sind zwei Voraussetzungen, die die in den Versuchen benutzte Schweine- und Menschenhaut zunächst nicht erfüllte. Um die Haut dennoch im Hochvakuum untersuchen zu können, mussten einige Schritte unternommen werden, um erstens die Feuchtigkeit in der Probe zu minimieren und sie zweitens leitfähig zu machen. So wurden die Hautstücke zunächst nach Versuchsdurchführung für einige Tage an Raumluft angetrocknet, bevor sie auf eine auf den REM-Halter aufgetragene Schicht von „Leit-C“, einem graphithaltigen Kleber, aufgebracht wurden. Dabei musste darauf geachtet werden, dass die Hautstücke durch das „Leit-C“ überall mit dem REM-Halter verbunden waren, um eine adäquate elektrisch leitende Verbindung zur Masse des Mikroskops zu gewährleisten. Danach wurden die Proben wiederum für einige Tage an Raumluft getrocknet. Je nach Feuchtigkeitsgrad nach dieser Trocknungsphase wurden sie noch zusätzlich für einige Minuten in einem Vakuum gelagert, um die in Haut und „Leit-C“ enthaltenen Gase und Flüssigkeiten weiter zu reduzieren.

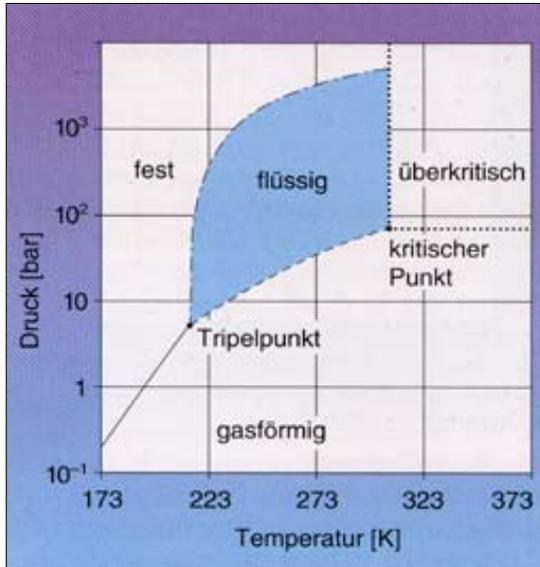
2.2.1.2.2 Beschichtung elektrisch nicht leitender Präparate

Ist ein im Hochvakuum zu untersuchendes Präparat nicht elektrisch leitend, so kommt es zu elektrischen Aufladungen. Eine Möglichkeit zur Erzeugung einer leitfähigen Schicht auf der Objektoberfläche ist das Aufbringen eines dünnen Metallbelags durch Sputter-Coating oder einer Kohlenstoffschicht durch Bedampfung. Bei diesen Methoden werden in einem Vakuum von 10^{-1} mbar Metall- bzw. Kohleatome gleichmäßig auf der Probenoberfläche verteilt. Die im Vakuum noch vorhandenen Gasmoleküle sorgen dabei durch Zusammenstöße mit den Atomen des Beschichtungsmaterials für eine gleichmäßige Verteilung auf der Probe.

Bei den verschiedenen Versuchen wurde auf die Probe je nach Fragestellung mit dem „Cressington carbon coater 108 carbon/A“ Kohle gedampft oder mit dem „Cressington carbon coater 108 auto“ 4-6 nm Gold gesputtert. Auf die genaue Funktion der verschiedenen Besputterungsanlagen soll hier nicht weiter eingegangen werden.

2.2.1.2.3 Kritisch-Punkt-Trocknung

Die „Kritisch-Punkt-Trocknung“ dient zur artefaktfreien Überführung feuchter Proben in den trockenen Zustand. Durch Umgehung des „kritischen Punktes“ (Abbildung



2.7³) mittels Temperatur- und Druckvariation wird keine Phasengrenze durchschritten, weshalb keine die Probe verändernden Oberflächenspannungskräfte auftreten. Einige auf Haut produzierte Strom- und Hitzemarken wurden, alternativ zur Lufttrocknung, mittels dieses Verfahrens präpariert und anschließend im Stereoscan 180 untersucht.

Abbildung 2.7 Phasendiagramm CO₂

Hierfür wurden die Hautstücke sofort nach Versuchsdurchführung zur Fixierung in 2,5%iges Glutaraldehyd überführt. Das Fixationsmittel wurde am nächsten Tag durch dreimalige, jeweils 15 minütige Lagerungen im Sörensen-Puffer bei Raumtemperatur wieder ausgewaschen. Anschließend erfolgte die Entwässerung an Raumtemperatur mittels aufsteigender Alkoholreihe (30%, 50%, 70%, 80%, 90%, 96%, 100%), wobei die Haut in jeder Alkoholkonzentration für eine Stunde belassen wurde. Die schließlich in 100%igem Isopropanol befindliche Leichenhaut wurde nun in den „CPD 010“ der Firma BALZERS UNION überführt, wobei die Probenkammer zunächst mit 100 %igem Isopropanol befüllt war. Bei einer eingestellten Temperatur von etwa 4° C und einem Druck von etwa 50 bar wurde halbstündlich die Hälfte des Isopropanols aus der Probenkammer abgelassen und durch CO₂ ersetzt. Nach sieben solcher Waschgänge war schließlich das in der Probe enthaltene, 100%ige Isopropanol nahezu vollständig durch flüssiges CO₂ ersetzt. Jetzt wurde die Temperatur in der Probenkammer auf etwa 40°C erhöht, wobei auch der Druck auf etwa 80-90 bar anstieg (Abbildung 2.7). Nach Erreichen der gewünschten Temperatur wurde der Druck in der Probenkammer langsam abgesenkt, indem das aufgrund der erhöhten Temperatur wieder gasförmig gewordene CO₂ langsam abgelassen wurde. Bei Druckausgleich konnte die Kammer geöffnet und die Probe entnommen werden.

³ www.drak.de/CO2/CO2_physik.html-5k [01.06.04]

Für die Untersuchung im Stereoscan 180 mussten die mittels des beschriebenen Verfahrens getrockneten Hautstücke zusätzlich noch leitfähig gemacht werden. Hierfür wurden sie mittels Leit-Tab und Kohleband auf einen REM-Halter aufgeklebt und anschließend mit Kohle bedampft bzw. mit Gold besputtert.

2.2.1.3 Prinzip der Niedervakuum-Rasterelektronenmikroskopie

Für die Untersuchung von nicht leitenden und gasenden Proben kann alternativ zum Hochvakuum-REM auch ein Niedervakuum-Rasterelektronenmikroskop verwendet werden. Für diese Untersuchungen wurde ein Niedervakuum-REM verwendet, das ein Vakuum von 13,3 bis 270 Pascal zulässt. Bei Letzterem ist eine spezielle Probenpräparation vor der Untersuchung, wie Bedampfung, Besputterung oder Trocknung nicht nötig.

Das Prinzip der Abbildung nicht leitender Proben und der dennoch fehlenden Aufladungserscheinungen im Niedervakuum-REM beruht darauf, dass die Elektronen des Primärelektronenstrahls mit den Gasmolekülen in der Probenkammer wechselwirken. Die dadurch entstehenden positiv geladenen Gasionen dienen zur Kompensation der sich auf der Probenoberfläche bildenden, negativen Ladungen und verhindern so die Aufladung der Probe.

Die in den Versuchen mit Strom und Hitze kontaktierte und im Hitachi S-3600N SEM untersuchte Schweine- und Menschenhaut als nicht-leitende und gasende Probe konnte deshalb auch sofort nach Versuchsdurchführung im Originalzustand in das Mikroskop eingebaut werden und musste nicht, wie oben beschrieben, getrocknet und beschichtet werden. Sie wurde lediglich auf dem Kühltisch des Gerätes auf -20°C eingefroren, um eine Austrocknung mit einhergehender Artefaktbildung bzw. das Gasen der Proben zu verhindern (Abbildung 2.8).

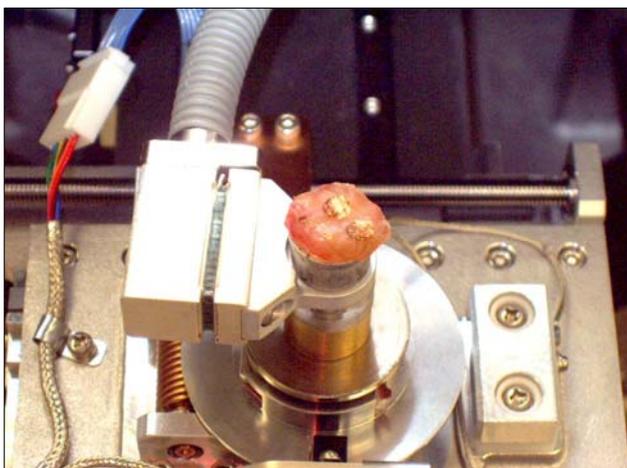


Abbildung 2.8

Kühltisch des S-3600N SEM mit
Hautprobe
(4 Strommarken)

2.2.2 Mikroanalytische Verfahren

Die verschiedenen mikroanalytischen Verfahren dienen zum präzisen Nachweis von Elementen einer Probe und besitzen ein hohes laterales Auflösungsvermögen. Im Folgenden nun sollen einige zur Untersuchung der verschiedenen Strom- und Hitzemarken verwendeten Verfahren wie EDX und Mikroröntgenfluoreszenz vorgestellt und deren Verwendung zur Auswertung der einzelnen Versuche kurz erläutert werden.

2.2.2.1 Energiedispersive Röntgenspektrometrie (EDX)

Die „Energy dispersive Analysis of X-rays“ (EDX) ist ein Verfahren, dass durch die Analyse der charakteristischen Röntgenstrahlung eines durch den Primärelektronenstrahl angeregten Probenbereichs auf dessen Elementzusammensetzung im Mikrometerbereich rückschließen kann. Das EDX-System war in Verbindung mit den verschiedenen REM eines der zentralen Analyseverfahren dieser Studie, mit dem vornehmlich die Form und Ausprägung der Metallisation auf der Hautoberfläche und in der Tiefe von Strom- und Hitzemarken, aber auch die Elementzusammensetzung der einzelnen Elektroden untersucht wurde.

Zur Beurteilung der Metallisation auf der Probenoberfläche und in der Tiefe des Gewebes wurden bei einigen ausgewählten Proben im Hitachi S-3600N SEM Elementverteilungsbilder erstellt.

Verwendete EDX-Systeme waren im Stereoscan 180 der RÖNTEC „X-flash“-Detektor mit Software „Winshell“ und im Hitachi S-3600 N SEM das EDAX 32 Genesis.

2.2.2.1.1 Funktionsprinzip

Bei Beschuss der Probe mit den Primärelektronen des Analysestrahls entstehen durch Wechselwirkung mit der Probenmaterie verschiedene Signale (siehe Abbildung 2.6). Unter anderem wird auch Röntgenstrahlung freigesetzt, bei der die für die jeweiligen emittierenden Atome charakteristische Röntgenstrahlung von der Bremsstrahlung unterschieden werden kann. Die jeweils ausgesandte Strahlungsenergie repräsentiert spezifisch eine bestimmte Atomart. Die Intensität dieser Strahlungsenergie gibt einen Hinweis auf die Konzentration der jeweiligen Atomart im analysierten Bereich. Das EDX-System bietet also die Möglichkeit, qualitativ die Art der Elemente und deren

orts aufgelöste Verteilung in der Probe und quantitativ deren Konzentration zu bestimmen. Zur Erstellung von quantitativen Elementverteilungsbildern im REM mit der Möglichkeit einer simultanen Detektion mehrerer Elemente wird die variierende Intensität der elementspezifischen Röntgenstrahlung mit der Konzentration des Elementes in der Probe korreliert und in ein Helligkeitssignal übersetzt.

Im Niedervakuummodus ist eine EDX-Analyse ebenfalls möglich, allerdings kommt es aufgrund des in der Probenkammer vorhandenen Gases zu einer Aufweitung des Strahls und zur Streuung der Primärelektronen („skirt effect“) proportional zum Arbeitsabstand und zum Kammerdruck. Die laterale Auflösung der EDX-Analyse verschlechtert sich, da vermehrt Elemente in Nachbarbereichen der Analysezone detektiert werden.

Die in dieser Arbeit verwendeten Graphiken der energiedispersiven Röntgenspektrometrie stellen auf der X-Achse die „Energie/ keV“ und auf der Y-Achse die gezählten „counts (x10³)“ dar und sind, bis auf die bezeichneten Ausnahmen, bei einer Beschleunigungsspannung von 15 kV gemessen worden.

2.2.2.1.2 Nachweis von Metallen in der Tiefe des Hautgewebes mittels EDX

Zur spezifischen Beurteilung der Verteilung und Zusammensetzung von Metallen in der Tiefe der Haut mittels EDX war eine spezielle Probenpräparation nötig.

1. Herstellung von Paraffinschnitten:

So wurde die Haut sofort nach Versuchsdurchführung zur Fixierung in 4%iges Formaldehyd gegeben. Die Fixierungsdauer betrug 3 - 5 Tage. Hierauf erfolgte die Einbettung des Gewebes in Paraffin. Das Gewebe wurde zunächst über eine aufsteigende Alkoholreihe (70%, 80%, 96%, 100%) entwässert und über Xylol in Paraffin gebracht, anschließend zu einem schneidbaren Block ausgegossen. Nach Aushärtung wurden aus den Paraffinblöcken mittels eines Rotationsmikrotoms 20 µm dicke Schnitte hergestellt. Diese so gefertigten Proben wurden auf Leit-Tabs überführt und mit Kohle beschichtet bzw. mit Gold besputtert. Anschließend erfolgte die Untersuchung im REM, die Analyse durch EDX und die Erstellung von Verteilungsbildern.

2. Herstellung von Kryoschnitten:

Alternativ wurde die Haut nach Versuchsdurchführung sofort in flüssigem Stickstoff eingefroren, wobei anschließend mit dem „Leica CM3050S“ 30 µm dicke Kryoschnitte angefertigt wurden, welche nach Trocknung auf Leit-Tabs aufgebracht und mit Kohle beschichtet oder mit Gold besputtert wurden. Auch in diesen Proben konnte mittels REM und EDX die Verteilung von Metallen im Gewebe beurteilt werden.

2.2.2.2 Mikroröntgenfluoreszenzanalyse

Mit dem EAGLE III Micro-XRF Benchtop Analyzer der Firma EDAX ist eine nicht-destruierende, qualitative und quantitative Elementanalyse von Proben möglich.

Das Funktionsprinzip des Gerätes ist die Röntgenfluoreszenzanalyse. Mit einem fokussierten Röntgenstrahl (Durchmesser ~ 30µm) wird die Probenmaterie angeregt, welche dann Röntgenfluoreszenzstrahlung aussendet. Die Intensität der jeweiligen Strahlung korreliert mit der Quantität des Elementes in der Probe. Die Elementanalyse im EAGLE III kann im Vakuum oder in Luft stattfinden. Eine spezielle Probenpräparation, wie zum Beispiel eine Kohlebeschichtung, ist nicht nötig.

2.2.3 Sonstige physikalische Analysemethoden

2.2.3.1 Stereomikroskop

Sofort nach Versuchsdurchführung wurde die Hautoberfläche der einzelnen Proben mit den jeweils produzierten Strom- und Hitzemarken darauf mittels eines Systems, bestehend aus einem Stereomikroskop vom Typ Leica MZ 75, dem Versorgungsgerät für die Kaltlichtlampe Leica KL 1500 LCD und einer Kamera vom Typ LEICA ICA, mit verarbeitender Software Leica IM 50 im Nativzustand fotografiert (Hell- und/oder Dunkelfeld).

2.3 Histologische Analysemethoden

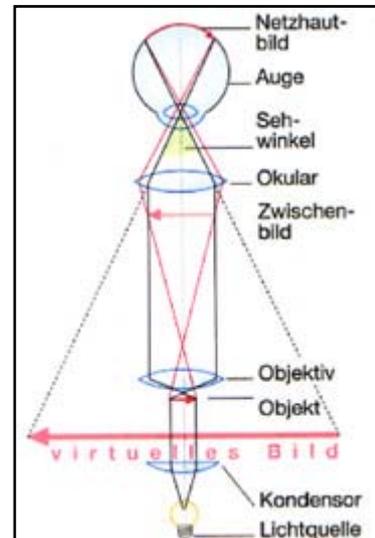
Zur Beurteilung erstens der Morphologie und zweitens der Form und Ausprägung der Metallisation in der Tiefe der Strom- und Hitzemarken wurden histologische Schnitte

senkrecht zur Hautoberfläche angefertigt, welche angefärbt und anschließend im Lichtmikroskop untersucht wurden.

2.3.1 Lichtmikroskopie

Das Funktionsprinzip des Lichtmikroskops, dessen Strahlengang in Abbildung 2.9⁴ dargestellt ist, soll als bekannt vorausgesetzt werden. In dieser Studie wurde zur histologischen Auswertung der verschiedenen Versuche ein Lichtmikroskop vom Typ Olympus BH-2 mit Kameraaufsatz Hitachi HV-C20A verwendet.

Abbildung 2.9
Strahlengang in einem Lichtmikroskop



2.3.2 Histologische Präparation

2.3.2.1 Herstellung eines Präparates für das Lichtmikroskop

Nach Versuchsdurchführung wurden die jeweiligen Hautproben zur Fixierung sofort in 4%iges Formaldehyd gegeben. Danach folgte, wie im Kapitel 2.2.2.1.2 beschrieben, nach drei bis fünf Tagen eine Paraffineinbettung des Gewebes. Aus dem Paraffinblock wurden dann mit dem „Microm HM 335 E“ 4-5 µm dicke Serienschnitte senkrecht zur Hautoberfläche angefertigt. Die Entparaffinisierung erfolgte über Xylol (2 x 20 min.) und in einer absteigenden Alkoholreihe (100%, 96%, 96%, 70%, NH₃-Alk., 70%, 600 ml Aqua dest. / 15 Tropfen CH₃COOH). Anschließend erfolgte die Anfärbung des Präparates.

2.3.2.2 Färbemethoden

In den entsprechend präparierten Gewebeschnitten konnte die Morphologie von Hitze- und Strommarken mittels HE-Färbung dargestellt werden. Zur Beurteilung der Diffusion von Metallen in die Tiefe der Haut wurde exemplarisch Kupfer angefärbt.

⁴ <http://www.biogen-one.de/cytologie/elmi1.html> [01.06.04]

2.3.2.2.1 Hämatoxilin-Eosin-(HE-)Färbung

Die Kernfärbung der Hautschnitte erfolgte mit Shandon Instant Hematoxylin der Firma Thermo (20 min), danach wurde in Aqua dest. gespült, in HCL-Alk. differenziert und anschließend in Leitungswasser gebläut. Die Anfärbung des Bindegewebes erfolgte mit 1% Eosin - Lösung in 70 % Alkohol (5 min). Entwässert wurde über eine aufsteigende Alkoholreihe (70%-, 96%-, 2x 100% Alk. Und 2x Xylol je 3 min.). Anschließend wurden die Schnitte mit Objektgläschen eingedeckt.

2.3.2.2.2 Kupferfärbung (DMABR-Methode)

Die Paraffinschnitte wurden 15 Minuten in Xylol entparaffiniert, in einer absteigenden Ethanolreihe (99%-70%) entwässert und über Nacht bei 37° C in der frisch angesetzten DMABR (p-Dimethylamino-Benzylidine-Rhodanin) - Lösung inkubiert. Anschließend wurden sie in Aqua dest. gespült, mit Mayer´s Hämatoxylin angefärbt, fließend gewässert, zweimal kurz in 96%igen, zweimal in 99%igen Alkohol und schließlich in Xylol überführt. Das Kupfer erscheint in dieser Färbung rosa-rot, die Kerne blau.

2.4 DNA-Analyse von Geweberückständen auf der Elektrode

Die DNA-Typisierung von Hautgeweberückständen auf verschiedenen Elektroden nach kurzzeitigem elektrischen Stromkontakt erfolgte mittels des genRES[®] MPX-2 Kit. Mittels einer Multiplex-PCR-Reaktion wurden so gleichzeitig die STR-Systeme **TH01, vWA, SE33, FGA, D21S11, D3S1358, D8S1179, D18S51** sowie der Geschlechtsmarker **Amelogenin (AMG)** typisiert, indem die amplifizierten Allel-spezifischen Fragmente „allelischen Leitern“ zugeordnet wurden. Überlappende Fragmentlängen der verwendeten STR-Systeme konnten somit durch unterschiedliche Fluoreszenzmarkierungen eindeutig zugeordnet werden (vWA, SE33, AMG → **6-FAM (blau)**; TH01, D21S11, D8S1179 → **HEX (grün)**; FGA, D3S1358, D18S51 → **NED (schwarz)**). Die Detektion erfolgte dabei mit dem ABI PRISM[®] 310 Genetic Analyzer über Laser-induzierte Fluoreszenz.

3 Ergebnisse

3.1 Die Strommarke nach Stromfluss bis zu einer Sekunde

3.1.1 Morphologie

Die vorliegenden Untersuchungen zeigen, dass die morphologische Ausprägung von Kurzzeitkontaktstrommarken (Stromflussdauer bis zu 1 Sekunde) in Abhängigkeit von verschiedenen Einflussfaktoren von einer kaum sichtbaren Veränderung der Hautoberfläche bis hin zu einem fast klassischen Aussehen mit begrenzter zentraler Einsenkung mit verkohlter Haut und umgebendem erhabenen Randwall mit Blasenbildung reichen kann. In dieser Arbeit wird näher untersucht: Die Morphologie beeinflussende Parameter wie die Kontaktdauer, der Anpressdruck, der Hautwiderstand als Funktion von Leitfähigkeit und Durchfeuchtung der Haut, die Stromdichte, welche bedingt wird durch die Kontaktfläche zwischen Elektrode und Hautoberfläche und der Stromstärke, und das Umgebungsmilieu mit Lagerung der Haut bei Versuchsdurchführung an Luft oder im Wasser.

3.1.1.1 Einflussfaktoren

Kontaktdauer:

Eine entscheidende Einflussgröße für den Grad der Ausprägung einer Strommarke ist die Dauer des Kontaktes zwischen Elektrode und Hautoberfläche. So kann eine an Luft hergestellte Strommarke bei einer Stromflussdauer von 160 ms auf der Haut kaum sichtbar sein, während unter gleichen Versuchsbedingungen, insbesondere gleicher Stromstärke, bei stetiger Zunahme der Kontaktzeit von Elektrode und Haut die Ausprägung der Strommarkenmorphologie konstant zunimmt (Abbildung 3.1 - 3.3).

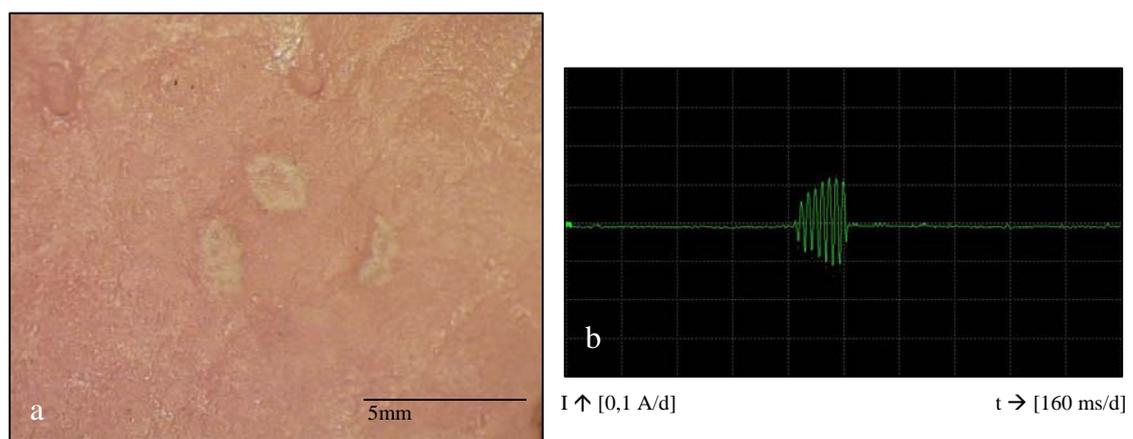
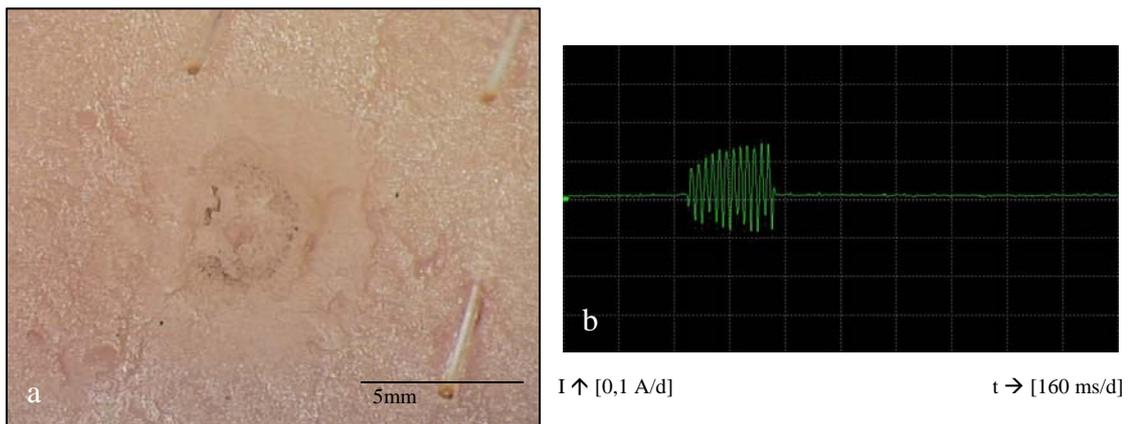


Abbildung 3.1

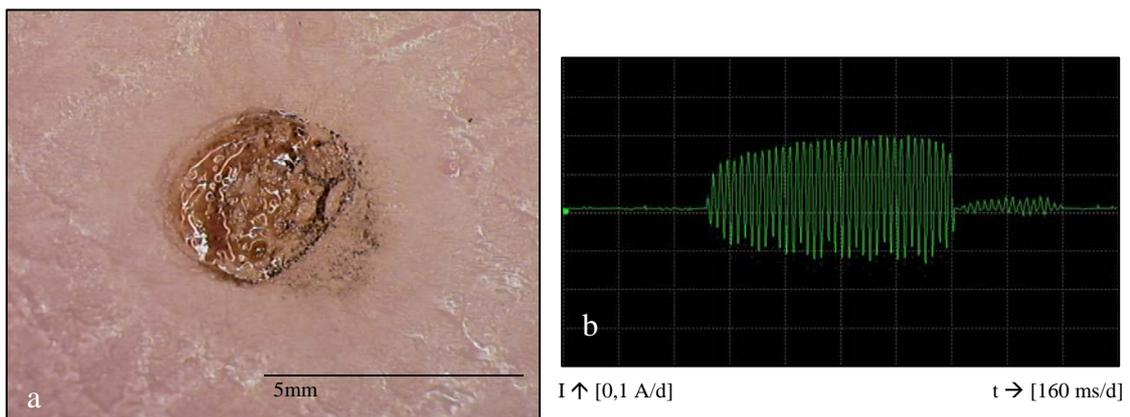
Kurzkontaktstrommarke (a) mit Stromflussdauer von 160 ms (b, Speicheroszillographische Aufzeichnung des Stromflusses):

Auf der Haut ist nur eine geringe farbliche Veränderung zu erkennen.

Stereomikroskop Leica MZ 75

**Abbildung 3.2**

Kurzkontaktstrommarke (a) mit Stromflussdauer von 310 ms (b):
 Auf der Haut ist nur eine geringe morphologische Veränderung mit beginnendem Randwall und zentraler Einsenkung zu erkennen.
 Stereomikroskop Leica MZ 75

**Abbildung 3.3**

Kurzkontaktstrommarke (a) mit Stromflussdauer von 1040 ms (b):
 Auf der Haut ist eine nahezu klassisch morphologische Veränderung als begrenzt zentrale Einsenkung mit verkohlter Haut und umgebendem erhabenem Randwall zu erkennen, beginnende Randblasenbildung.
 Stereomikroskop Leica MZ 75

Hautwiderstand:

Geringe thermische Hautschäden finden sich häufig bei hohen Hautwiderständen, zum Beispiel bei Verwendung von menschlicher Fußsohlenhaut als Probenmaterial (Abbildung 3.4).

Dagegen zeigt sich ein völlig anderes morphologisches Bild bei Verwendung von Haut mit einem nur geringen Widerstand, zum Beispiel der Haut der Handoberfläche. Da sie eine Nacht vor Versuchsdurchführung in Wasser gelagert worden ist, besteht zusätzlich eine hohe Durchfeuchtung, wobei der Widerstand dann bei nahezu 0Ω

liegt. Schon bei kurzem Stromkontakt ($t \sim 0,3$ Sekunden) stellt sich eine starke thermische Schädigung der Haut mit Randwall- und Blasenbildung dar. Erst bei längerem Stromfluss ($t \geq 1$ Sekunde) jedoch fängt das Gewebe an zu verkohlen und sich stärker zusammenzuziehen (Abbildung 3.4).

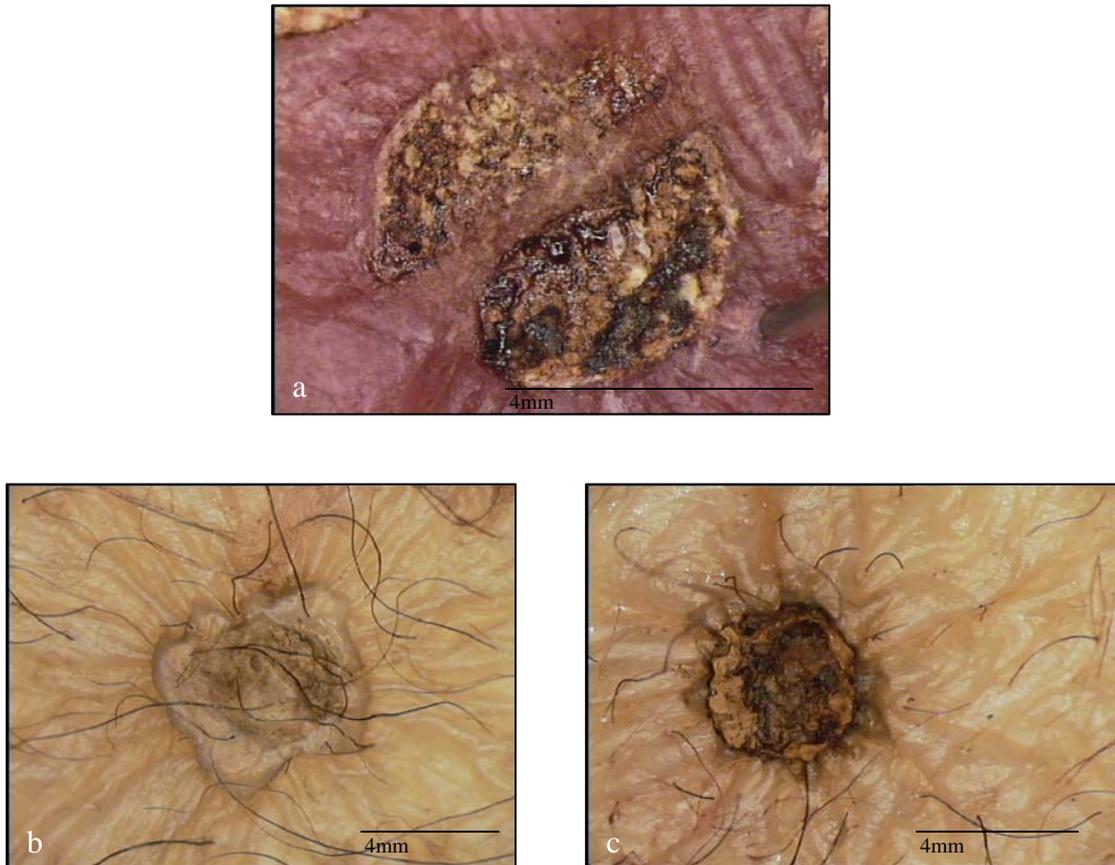


Abbildung 3.4

Strommarken ($t \sim 1$ Sekunde [a und c] bzw. $t \sim 0,3$ Sekunden [b]) auf menschlicher Haut der Fußsohle (a) bzw. durchfeuchteter Haut der Handoberfläche mit einem Widerstand von 0Ω (b und c):

Aufgrund des höheren Widerstandes nur geringe thermische Veränderung der Schweinehaut im Gegensatz zur durchfeuchteten Leichenhaut, bei der schon nach nur 0,3 Sekunden eine Randblasenbildung zu beobachten ist, eine Verkohlung des Hautgewebes allerdings erst nach etwa 1 Sekunde stattfindet.

Stereomikroskop Leica MZ 75

Stromdichte:

Ein weiterer wesentlicher Einflussfaktor auf die Ausprägung einer Strommarke ist die Stromstärke (gemessene Stromhöhe bei den Hautversuchen: 0 - 1,5 A, theoretisch maximal erreichbare Stromstärke 8 A). Bei höheren Stromstärken (1-1,5 A) kommt es zu einer deutlich stärkeren thermischen Schädigung der Haut als es bei gleichen Versuchsbedingungen mit niedrigeren Stromstärken (bis 1 A) der Fall ist (Abbildung 3.5).

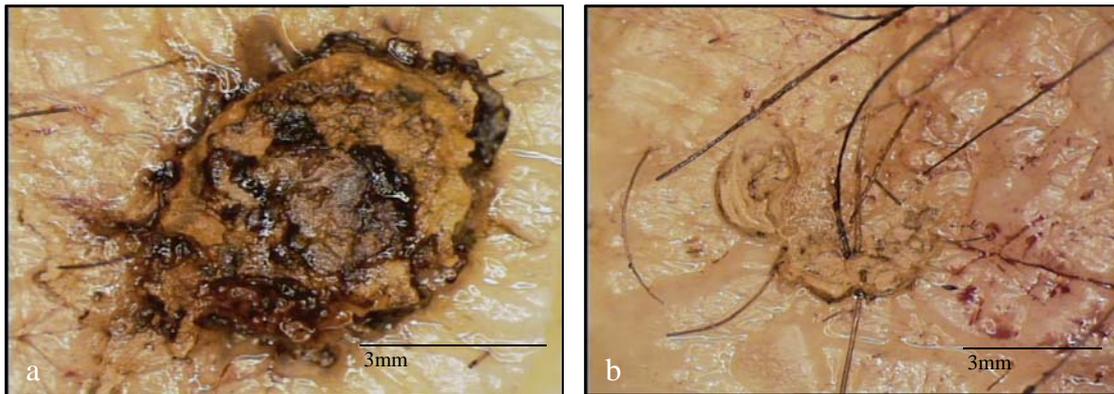


Abbildung 3.5

Strommarken ($t \sim 0,3$ Sekunden) auf stark durchfeuchteter Haut der Handoberfläche (Widerstand 0Ω) unter Verwendung der stumpfen Seite des Messingstabs mit hoher Stromstärke ($I \sim 1,2$ A) (a) bzw. mit niedriger Stromstärke ($I \sim 0,3$ A) (b):

Deutlich stärkere thermische Schädigung der Haut bei der höheren Stromstärke.

Stereomikroskop Leica MZ 75

Bei gegebener Stromstärke hat auch die Form der Elektrode, insbesondere die Größe der Kontaktfläche, einen Einfluss auf den Grad der morphologischen Ausprägung einer Strommarke. So kommt es nur zu einer sehr geringen thermischen Veränderung bei Erzeugung einer Marke auf Bauchhaut mittels des Kupfer-Stabs mit 4 mm Durchmesser. Demgegenüber wird bei gleichen Versuchsbedingungen unter Verwendung des Messingstabs mit 1 mm Durchmesser aufgrund von Randwallbildung und Randblasenbildung eher eine klassische Kurzkontaktstrommarke erzeugt (Abbildung 3.6).

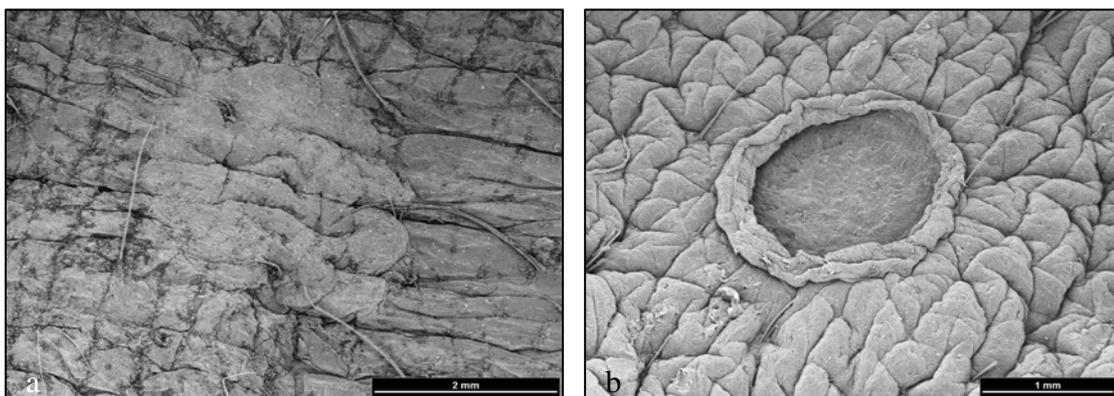


Abbildung 3.6

Strommarken auf Bauchhaut bei Zunahme der Stromdichte mittels Kupfer-Stab (0,4 cm Durchmesser) (a) bzw. Messingstab (0,2 cm Durchmesser) (b):

Differierender Grad der thermischen Schädigung.

Lufttrocknung (a), CPD (b), S-180, SE-Mode

Umgebungsmilieu:

Während es bei Strommarkenerzeugung an Luft häufig zu einer Verkohlung der Hautoberfläche im Bereich der Elektrodenkontaktfläche (Abbildung 3.4) kommt, zeigt die Schweinehaut, welche sich bei Versuchsdurchführung im Leitungswasser befindet, lediglich eine leichte farbliche Veränderung (Abbildung 3.7).

Bei der im Wasser gelagerten, durchfeuchteten Haut der Handoberfläche kommt es immer zu einer stärkeren morphologischen Strommarkenausprägung als bei der Schweinehaut. Die Intensität der thermischen Schädigung ist jedoch auch hier im Vergleich zu der bei Versuchsdurchführung an Luft (Abbildung 3.4) deutlich geringer ausgeprägt (Abbildung 3.7).

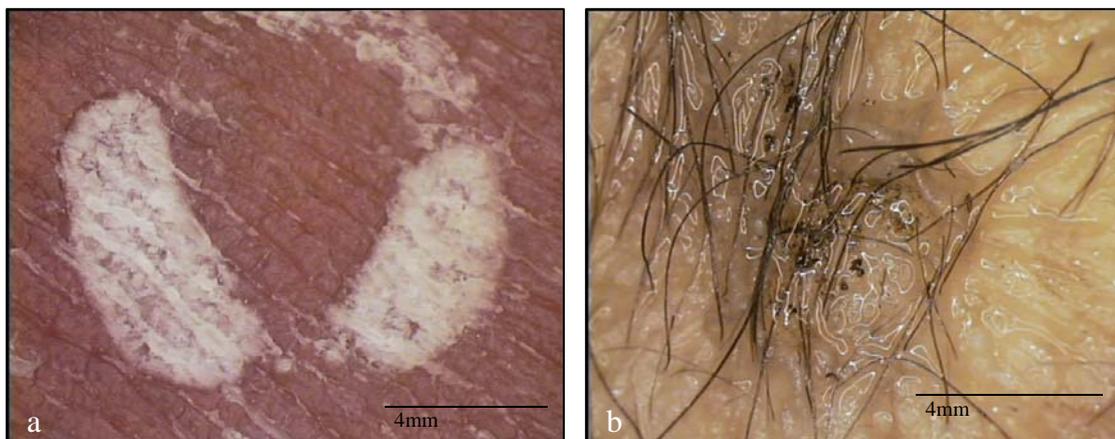


Abbildung 3.7

Strommarken ($t \sim 1$ Sekunde) auf bei Versuchsdurchführung im Wasser gelagerter Schweinehaut (a) bzw. auf im Wasser befindlicher stark durchfeuchteter Haut der Handoberfläche (b): Kaum thermische Veränderungen in beiden Fällen, wobei auf der Schweinehaut nur eine leichte farbliche Veränderung zu erkennen ist, während die Strommarke auf Leichenhaut eine beginnende Randblasenbildung zeigt.

Stereomikroskop Leica MZ 75

3.1.1.2 Randblasenbildung:

Bei Kontakt von vor allem stark durchfeuchteter Haut mit der stromführenden Elektrode wölbt sich das Gewebe schon nach sehr kurzer Zeit ($t = 0,3$ Sekunden) an den Rändern der Elektrodenauflagefläche auf, und es bilden sich Blasen aus. Während der Stromfluss weiter fort, so kommt es zur Austrocknung dieser Blasen und Verkohlung des Gewebes mit Kontraktion und Schrumpfung der Strommarke bei längeren Kontakten deutlich über einer Sekunde (Abbildung 3.8).

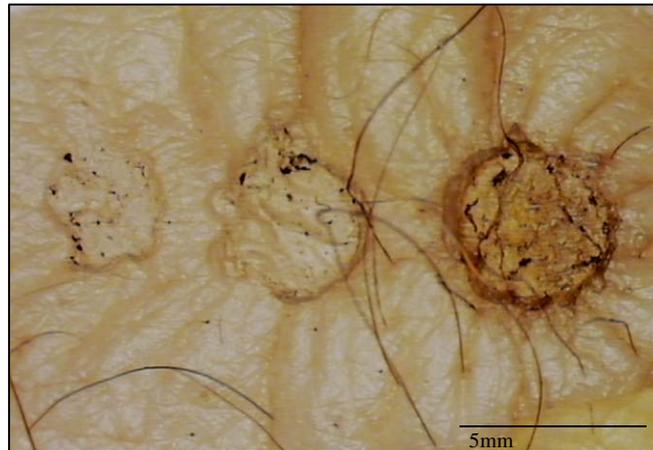


Abbildung 3.8

Strommarkenerzeugung mit dem Messingstab auf der stark durchfeuchteten Haut der Handoberfläche:
 Verschiedene Stadien der Blasenbildung am Rand der Elektrodenauflagefläche, Strommarken von links nach rechts:

Stromfluss ~0,1 Sekunde: beginnende leichte Hautaufwerfung

Stromfluss ~0,3 Sekunden: stärkere Blasenbildung mit Abhebung der Oberhaut

Stromfluss ~1 Sekunde: Eintrocknung der Randblasen und beginnende Verkohlung des Hautgewebes in der Marke

Stereomikroskop Leica MZ 75

Auffällig dabei ist ein abrupter Abfall der Stromstärke bei beginnender Verkohlung des Hautgewebes (Abbildung 3.9).

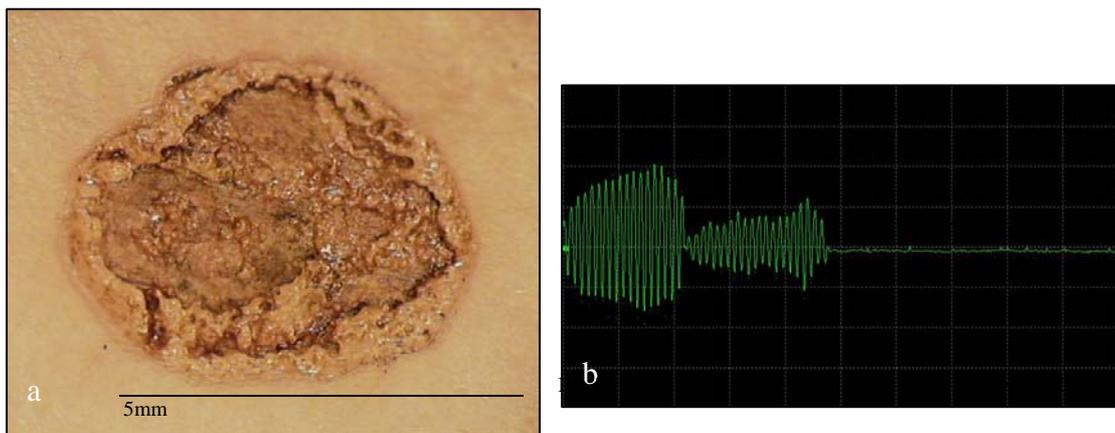


Abbildung 3.9

Kurzkontaktstrommarke (a) mit Stromflussdauer von ~ 800 ms (b):
 Morphologisch klassische Ausprägung mit begrenzter zentraler Einsenkung mit verkolter Haut und umgebendem erhabenen Randwall, nur geringe Randblasenbildung, abrupter Abfall der Stromstärke bei beginnender Verkohlung des Hautgewebes.

Stereomikroskop Leica MZ 75

Die Randblasenbildung ist bei Experimenten mit nicht durchfeuchteter menschlicher Bauchhaut oder durchfeuchteter Haut der Handoberfläche stärker ausgeprägt, als es bei Verwendung der verhornten Haut der Fußsohle oder bei der Schweinehaut der Fall ist.

Besonders deutlich ist die Randwall- und Randblasenbildung bei Strommarken im REM zu erkennen (Abbildung 3.10).

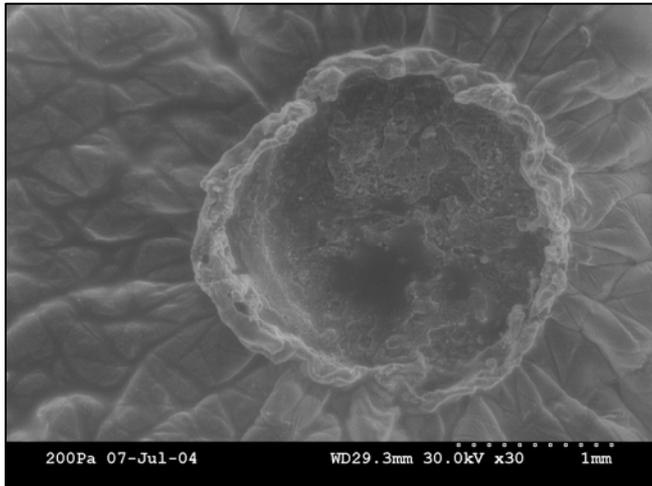


Abbildung 3.10

Strommarke ($t \sim 0,7$ Sekunden) auf Bauchhaut mittels des Messingstabs (Durchmesser: 0,2 cm):
Blasen- und Wallbildung am Rand der Elektrodenauflagefläche.
Hitachi S- 3600N SEM, ESED

3.1.1.3 Bläschenbildung

Ein speziell bei Strommarken mit nur kurzer Stromflussdauer bis 1 Sekunde regelmäßig beobachtetes Charakteristikum ist im Bereich der Elektrodenauflagefläche eine feine Bläschenbildung in der Haut. Diese Veränderung stellt sich unabhängig von der verwendeten Hautart dar und findet sich sowohl bei der stark durchfeuchteten Haut der Handoberfläche als auch bei nicht durchfeuchteter Bauchhaut und häufig ebenfalls bei verhornter Fußsohlenhaut, welche eine Nacht vor Versuchsdurchführung in Wasser gelagert worden und somit ebenfalls stark durchfeuchtet ist (Abbildung 3.11).

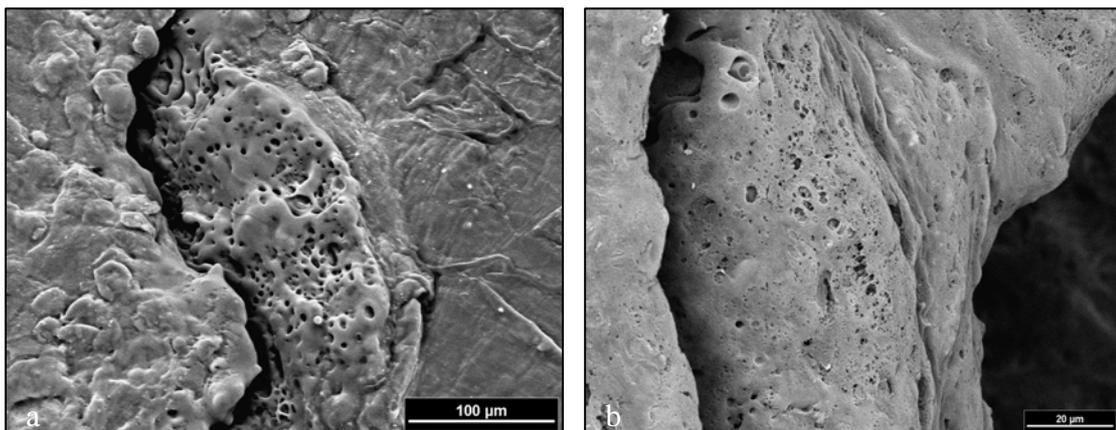


Abbildung 3.11

Strommarken ($t \sim 0,5$ Sekunden) auf menschlicher Fußsohlenhaut (a) bzw. Bauchhaut (b) mittels der Schraube 2 (a) bzw. des dünnen Messingstabs (b):
Bläschenbildung in der Haut der Elektrodenauflagefläche als Zeichen des nur kurzzeitigen Stromflusses.
Lufttrocknung (a), CPD (b), S-180, SE-Mode

3.1.1.4 Interposition von Textilien

Ist der Haut bei Strommarkenerzeugung ein dünner Viskosestoff aufgelagert, so kommt es fast immer zu einer Verschmelzung der Stofffasern und zur thermischen Schädigung der unter dem Stoff befindlichen Haut. In der entstehenden Strommarke lassen sich auch nach Abnahme des Textils von der Haut Reste des zerstörten Stoffs nachweisen. Auch in diesem Fall bildet sich trotz des interponierten Viskosestoffs ein Randwall in der Strommarke aus (Abbildung 3.12).

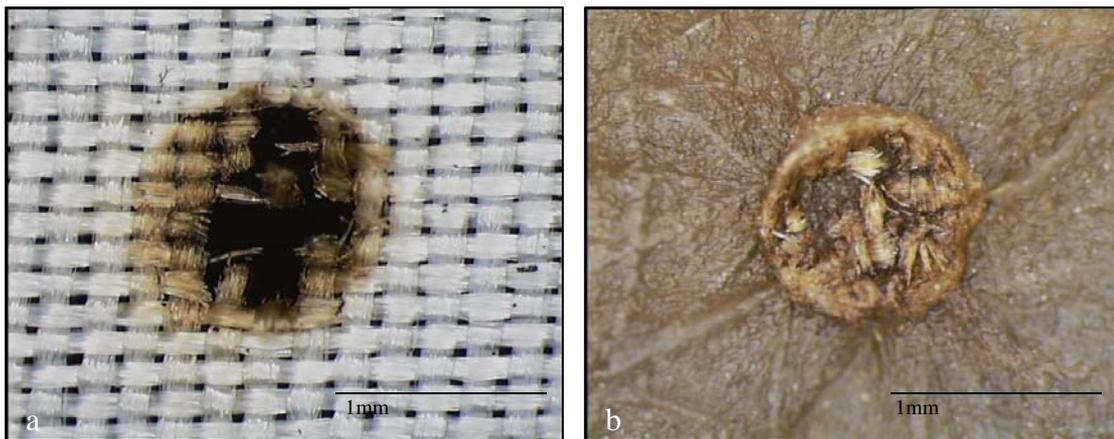


Abbildung 3.12

Strommarke (t~1 Sekunde) auf mit Viskose bedeckter Bauchhaut mittels des Messingstabs (Durchmesser: 0,1 cm):
Zerstörung des Viskosestoffs (a) und Strommarkenentstehung auf der unterliegenden Haut mit Ausbildung eines Randwalls, verschmolzene Viskosefasern in der entstandenen Strommarke (b).
Stereomikroskop Leica MZ 75

Die in der Strommarke verbliebenen verschmolzenen Viskosefasern (Abbildung 3.12) zeigen, ebenso wie die Haut der Elektrodenkontaktfläche, eine feine Bläschenbildung (Abbildung 3.13).

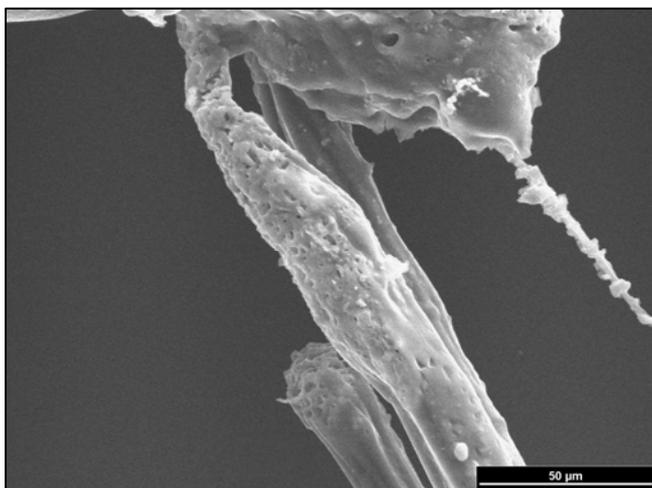


Abbildung 3.13

Auf der Haut verbliebene Viskosefasern nach Kontakt der mit Stoff bedeckten Bauchhaut mit einer stromführenden Elektrode: An den Enden verschmolzene Stofffasern mit feiner Bläschenbildung in diesem Bereich.

S-180, SE-Mode

3.1.1.5 Haare

Ein weiterer Befund bei Strommarken mit kurzer Stromflussdauer bis 1 Sekunde ist, dass Haare auf der lediglich kurz mit Strom kontaktierten Haut häufig nur gering geschädigt sind und dass deren Cuticula fast immer erhalten ist (Abbildung 3.14).

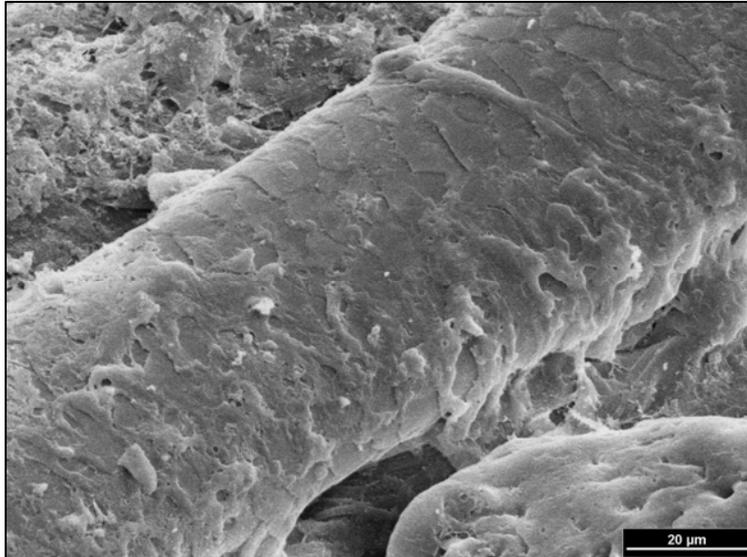


Abbildung 3.14

Menschliches Haar innerhalb der Auflagefläche der stromführenden Elektrode: Cuticula weitestgehend erhalten, Gewebereste, metallische Partikel und Kugeln lagern sich dem Haar auf.

CPD, S-180, SE-Mode

3.1.1.6 Strommarke als Abbild der stromführenden Elektrode

Generell gilt, dass die Strommarke ein Abbild der stromführenden Elektrode ist. So sind zum Beispiel zur Erzeugung einer Strommarke mittels des 4fach-Steckers auf der Haut entsprechend der Form der Elektrode vier Pünktchen sichtbar, wobei der lichte Abstand zwischen ihnen 1 - 3 mm beträgt. Bei Versuchsdurchführung an Luft kommt es zum Einbrennen der vier elektrischen Kontakte tief in die Haut mit Verkohlung des randständigen Hautgewebes (Abbildung 3.15).

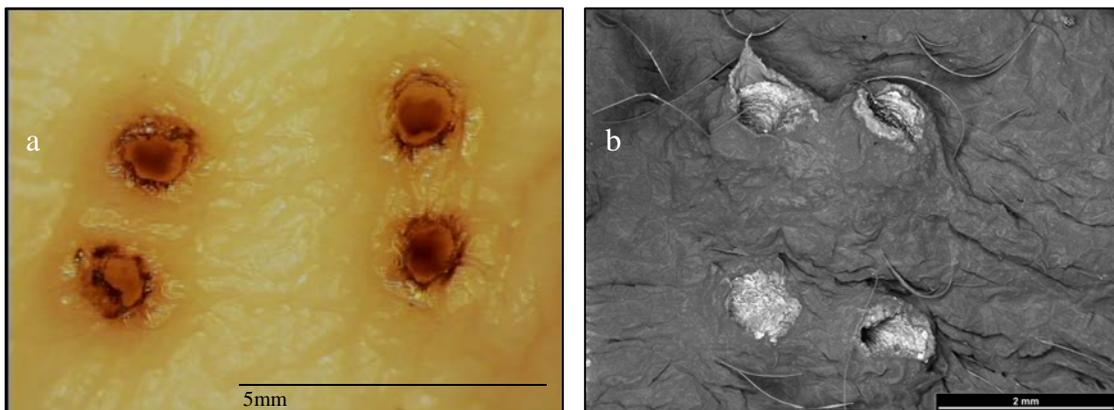


Abbildung 3.15

Strommarken ($t \sim 0,7$ Sekunden) mittels des 4fach-Steckers, Versuchsdurchführung an Luft: Strommarke als Abbild der stromführenden Elektrode, wobei die Abstände zwischen den einzelnen elektrischen Kontakten auf der Haut geringer sind als bei der eigentlichen Elektrode. Stereomikroskop Leica MZ 75 (a), S-180, RE-Modus (b).

Auch hier zeigt sich eine Abhängigkeit der morphologischen Ausprägung der Strommarke von den im Kapitel 3.1.1.1 aufgezeigten Einflussfaktoren, zum Beispiel dem Umgebungsmilieu oder der Stromflusszeit.

So sind die Hautveränderungen auf bei Versuchsdurchführung in Wasser gelagerter Haut deutlich geringer ausgeprägt und nehmen bei kürzeren Stromflusszeiten sogar noch weiter ab, wenn zum Beispiel der FI-Schalter den Stromkreis bei Erreichen eines Fehlerstroms von 400 mA unterbricht (Abbildung 3.16).

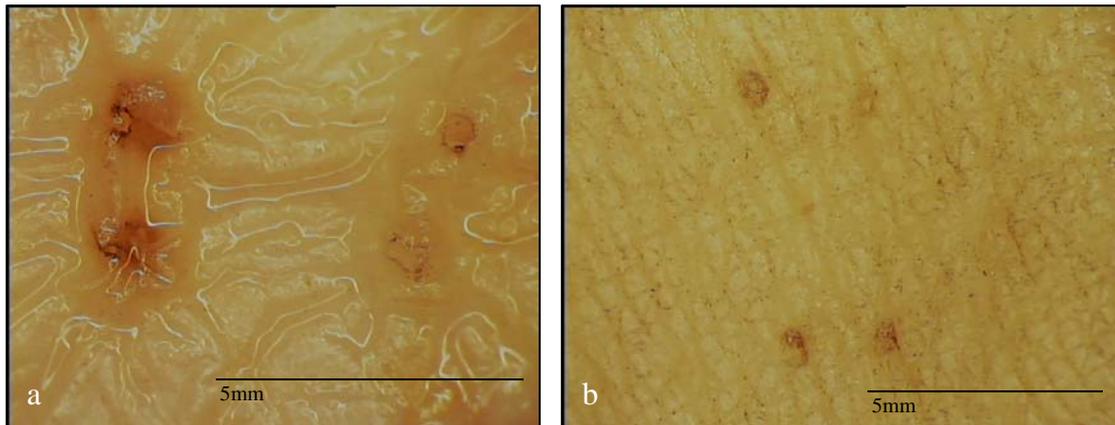


Abbildung 3.16

Strommarken mittels 4fach-Stecker ($t \sim 0,7$ Sekunden) (a) und nach Abschalten des FI-Schalters (b) auf vollständig von Wasser umschlossener Bauchhaut:

Geringere thermische Schädigung der Haut an den vier Kontaktstellen als bei Versuchsdurchführung an Luft (vergleiche Abbildung 3.15) mit weiterer Abnahme der Intensität einer thermischen Hautschädigung durch Verkürzung der Kontaktzeit, beispielsweise durch FI-Schalter vermittelte Unterbrechung des Stromkreises (b).

Stereomikroskop Leica MZ 75

3.1.2 Histologie

Auch im histologischen Schnitt kann dokumentiert werden, dass sich die Strommarke nach nur kurzem Kontakt (bis 1 Sekunde) bezüglich deren Form in der Tiefe der Haut deutlich von Strommarken nach längerem Kontakt (> 1 Sekunde) oder bei Fließen von höheren Stromstärken (1-1,5 Ampere) unterscheidet.

3.1.2.1 Strommarkenform in der Tiefe der Haut

So ist die nekrotische Zone bei Kurzkontaktstrommarken (bis 1 Sekunde) relativ gering ausgeprägt und auf den Bereich direkt unter der makroskopisch sichtbar zerstörten Epidermis unter der Elektrodenauflagefläche beschränkt. Bei längerem Stromfluss (> 1 Sekunde) oder höheren Stromstärken (1-1,5 A) ist das nekrotische Areal spitz zulaufend und weiter in tiefere Hautschichten ausgedehnt (Abbildung 3.17).

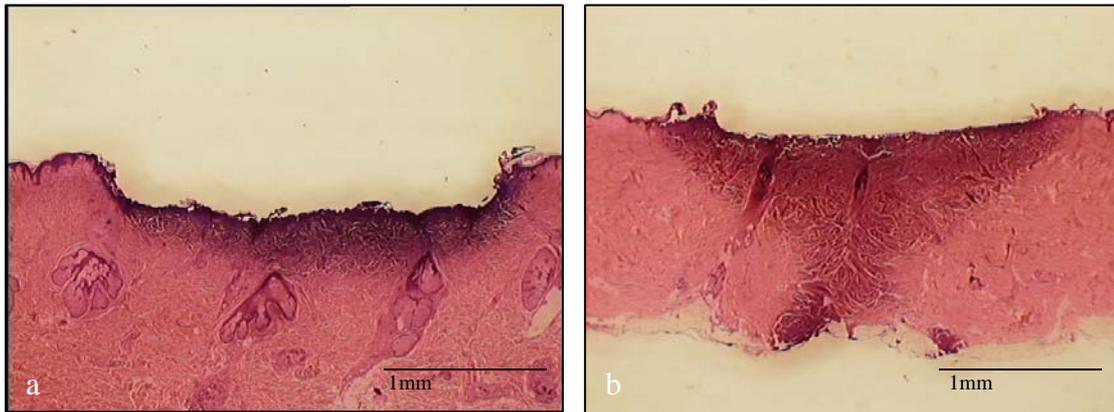


Abbildung 3.17

Paraffinschnitte von Kurzkontaktstrommarken ($t \sim 1$ Sekunde) mittels des Messingstabs und niedriger Stromstärke ($I \sim 0,4$ A) (a) bzw. hoher Stromstärke ($I \sim 1,5$ A) (b): Deutlich intensiveres, spitz zulaufendes Nekroseareal bei der Strommarke in Abbildung b. Im Bereich der Elektrodenauflagefläche ist die Epidermis zerstört, wodurch ein Krater mit den Ausmaßen der Elektrode sichtbar ist.
HE-Färbung, Lichtmikroskop Olympus BH-2

3.1.2.2 Bläschenbildung

Die schon im Rasterelektronenmikroskop regelmäßig auf der Hautoberfläche zu beobachtende Bläschenbildung (Abbildung 3.11) kann auch im histologischen Schnitt dargestellt werden (Abbildung 3.18).

Die Bläschen finden sich besonders häufig im Randbereich der Strommarke. Bei insgesamt nur gering thermisch geschädigter Haut können die Bläschen jedoch auch im Zentrum der Marke nachgewiesen werden. Im histologischen Schnitt erkennt man weiterhin, dass sich die beschriebenen blasigen Veränderungen nur auf den oberen, verhornten Bereich der Epidermis beschränken, welcher auch sehr häufig von den restlichen Epidermisschichten abgehoben ist.

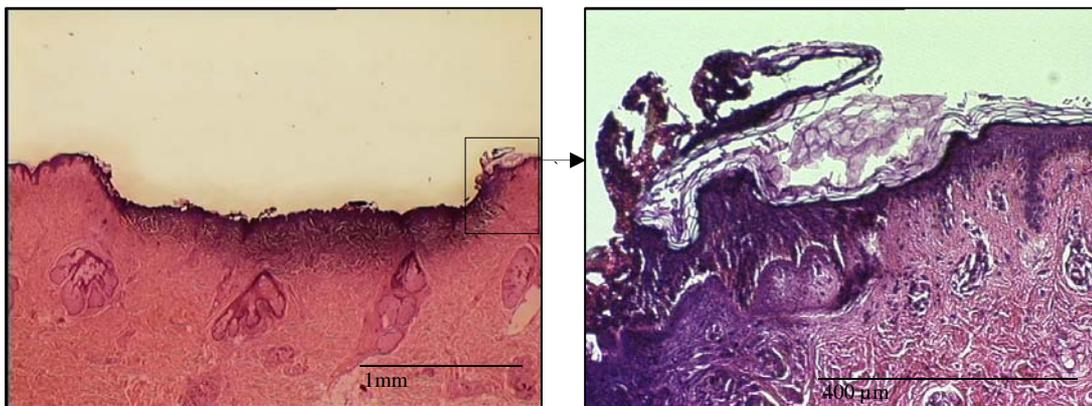


Abbildung 3.18

Bläschenbildung im Randbereich einer Kurzkontaktstrommarke.
HE-Färbung, Lichtmikroskop Olympus BH-2

3.1.2.3 Zell- und Kernelongationen

Auch bei Kurzkontaktstrommarken (bis 1 Sekunde) finden sich bei stärker geschädigter Epidermis die für Strommarken charakteristischen Zell- und Kernelongationen im Randbereich der Strommarke (Abbildung 3.19).

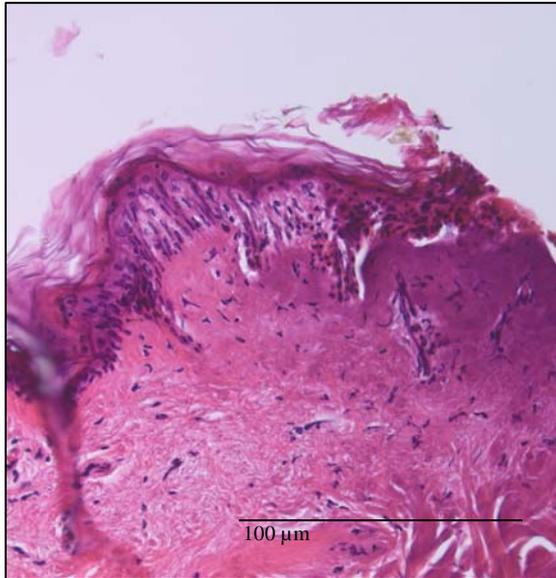


Abbildung 3.19

Kernausziehungen im Randwall einer Kurzkontaktstrommarke, Bläschenbildung der Hornhaut.

HE-Färbung, Lichtmikroskop Olympus BH-2

3.1.3 Metallisation

3.1.3.1 Metallablagerungen auf der Hautoberfläche

Nach Erzeugung von Strommarken mit kurzer Stromflussdauer bis 1 Sekunde mittels der beschriebenen Elektroden finden sich auf der Oberfläche sowohl der Leit-Tabs als auch der einzelnen für die Versuche verwendeten Hautarten regelmäßig Metallablagerungen, welche je nach Versuchsdurchführung verschiedenartig ausgeprägt sind. Diese Ablagerungen auf der Probenoberfläche lassen sich grundsätzlich in drei Kategorien einteilen (Abbildung 3.20).

Es zeigen sich:

1. **Metallische Kugeln**, welche je nach Versuchsbedingung eine Größe von etwa 0,5 µm bis zu 30 µm aufweisen und durch die BSE hell abgebildet werden.
2. **Metallische Partikel** verschiedenster Form und Größe, welche ebenfalls durch die BSE hell abgebildet werden.
3. **Diffus im Gewebe abgelagerte Metalle**, welche sich ebenfalls im BSE-Bild regelmäßig als hellere Bezirke im Vergleich zur Umgebung darstellen.

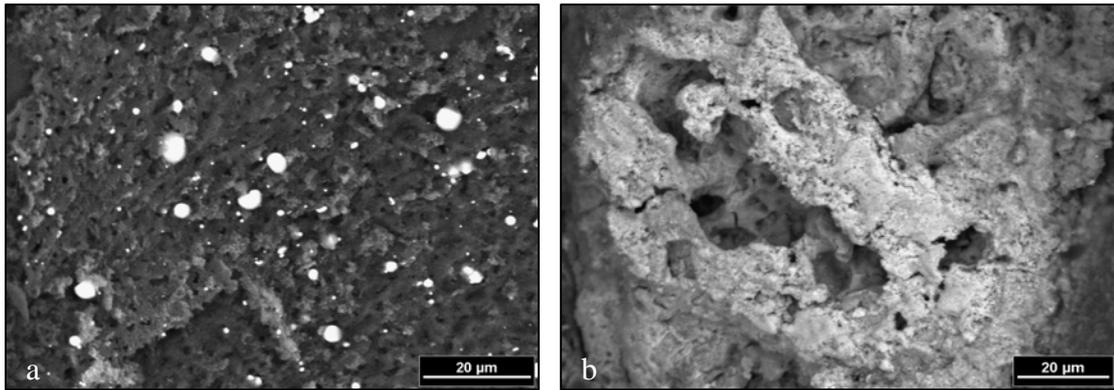


Abbildung 3.20
Metallische Kugeln und Partikel (a) und diffus auf und in der Haut abgelagertes Metall (b).
S-180, RE-Mode

3.1.3.1.1 Metallische Kugeln

Metallkugeln auf der Probenoberfläche treten bei solchen Versuchen auf, bei denen es zwischen Elektrode und Probe zu einer leichten Funkenentwicklung bis hin zu einem explosionsartigen Überschlag kommt.

Vorversuche: Leit-Tab auf REM-Halter

Bei Vorversuchen mit Leit-Tabs finden aufgrund des hohen Widerstands der Leit-Tabs regelmäßig elektrische Entladungen statt. Bei Versuchsdurchführung an Luft finden sich nach fast jedem Stromkontakt metallische Kugeln auf der Oberfläche des Leit-Tabs. Von diesen sind einige bei sehr hohen Stromstärken ($\geq 1,5$ A) deutlich größer als solche, die bei Experimenten mit niedrigeren Stromstärken (bis 1 A) zu finden sind (Abbildung 3.21).

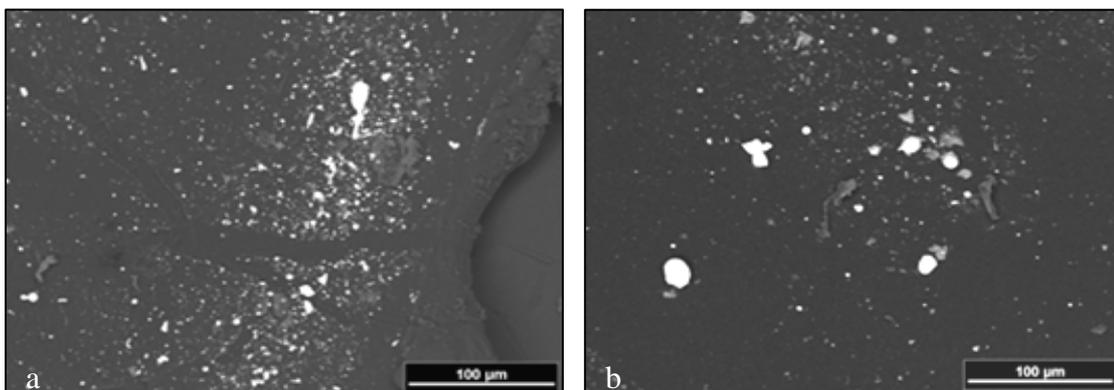


Abbildung 3.21
Strommarke mit der stumpfen Seite des Messingstabs auf Leit-Tab, Versuchsdurchführung mit niedriger Stromstärke ($I \sim 0,5$ A) und nur leichter Funkenbildung (a) bzw. hoher Stromstärke ($I \sim 2$ A) und explosionsartigem elektrischen Überschlag (b):
Auf den Leit-Tabs abgelagerte Kugeln, wobei die Metallkugeln in Abbildung a deutlich kleiner sind als die in Abbildung b.
S-180, RE-Mode

Kommt es bei Versuchsdurchführung zu keiner sichtbaren elektrischen Entladung, so finden sich auch keine Kugeln, sondern nur metallische Partikel (Kapitel 3.1.3.1.2) auf der Leit-Tab-Oberfläche. Dies ist ganz besonders der Fall, wenn auf einen REM-Halter nicht nur ein, sondern zwei oder drei Leit-Tabs übereinander geklebt werden (Abbildung 3.35).

Interposition von Textilien:

Wird ein Leit-Tab zusätzlich mit einem trockenen oder befeuchteten *Viskosestoff* bzw. mit einem trockenen oder befeuchteten dünnen *Wollstoff* bedeckt, so kommt es ebenfalls zu elektrischen Entladungen, sodass auf den Fasern der genannten Textilien eine Vielzahl von metallischen Kugeln nachzuweisen sind (Abbildung 3.22).

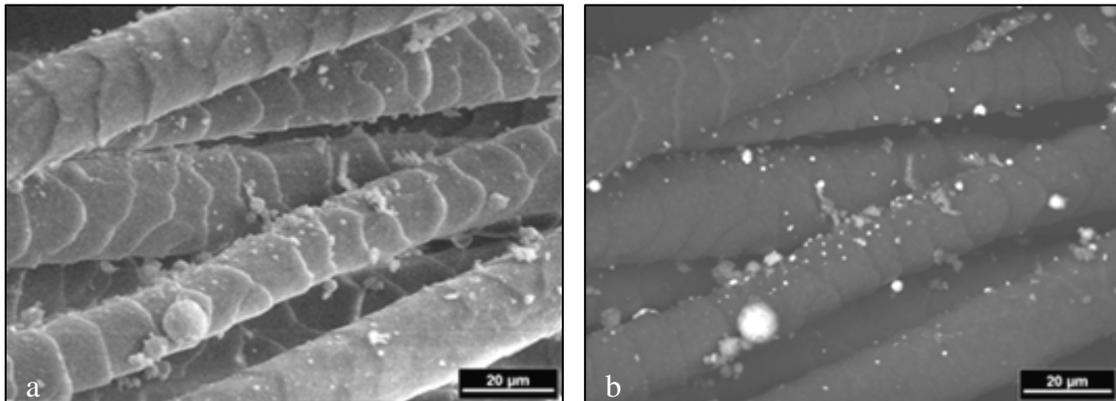


Abbildung 3.22

Messingkugeln auf befeuchtetem Wollstoff nach elektrischem Überschlag.
S-180, SE-Mode (a), RE-Mode (b)

Funken oder elektrische Überschlüge fehlen jedoch häufig bei Interposition eines dickeren, trockenen oder befeuchteten Jeansstoffs. In diesem Fall können im REM auch keine Metallkugeln, sondern nur Metallpartikel als Zeichen des Stromflusses auf den Fasern nachgewiesen werden.

Auffällig ist eine grundsätzlich intensive Funkenbildung bei den Versuchen mit trockenem Stoff, wobei dann die Anzahl der entstandenen Kugeln, und auch Partikel, höher ist als auf feuchtem Stoff. Zudem steigt die Anzahl der Kugeln mit zunehmender Dauer der Stromexposition und damit einhergehender intensiver Funkenbildung.

Hautversuche:

Bei Verwendung von Haut anstatt von Leit-Tabs sind ebenfalls nach elektrischen Überschlügen zwischen Elektrode und Haut häufig Metallkugeln auf der Probenoberfläche zu finden (Abbildung 3.20).

Interposition von Textilien:

Wird trockener bzw. befeuchteter, dünner *Wollstoff* auf die Schweinehaut gelegt und mit der spitzen Seite des Messingstabs der Stromkreis für nur einige Millisekunden geschlossen, so kommt es zu keiner sichtbaren Funkenbildung. Der Stoff scheint unbeschädigt. Dennoch können in beiden Fällen rasterelektronenmikroskopisch kleine Metallkugeln in den nicht zerstörten Fasern des Wollstoffs dargestellt werden (Abbildung 3.23), wobei tendenziell im trockenen Wollstoff mehr und auch größere metallische Kugeln und im befeuchteten Wollstoff mehr metallische Partikel abgelagert sind.

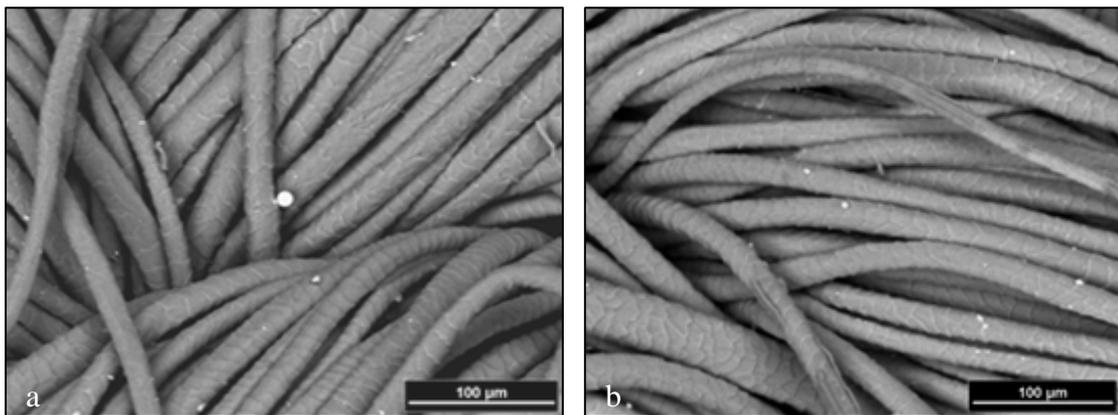


Abbildung 3.23

Cu/Zn-Kugeln auf trockenem (a) und feuchtem (b) Wollstoff nach Kontakt des auf der Schweinehaut liegenden Stoffs mit dem stromführenden Messingstab:
Keine sichtbare Funkenbildung, keine Zerstörung des Textils.
S-180,RE-Mode

Bei gleichen Versuchsbedingungen und Interposition eines trockenen bzw. befeuchteten *Viskosestoffs* kommt es bei Stromkontakt bis zu einer Sekunde ebenfalls zu keiner sichtbaren Reaktion. Erst bei stärkerem bzw. längerem Anpressen der Elektrode auf den Stoff zeigen sich in beiden Fällen schwarze Punkte unter der Elektrodenauflagefläche. Im REM finden sich an besagten Stellen runde Durchschläge mit Zerstörung des Stoffs und Verschmelzung der einzelnen Fasern. Dabei lassen sich sowohl auf trockenem als auch auf befeuchtetem Viskosestoff neben einer Vielzahl metallischer Partikel wiederum Metallkugeln nachweisen, deren Anzahl auf dem Textil dann höher

zu sein scheint, wenn der Viskosestoff auf der Haut belassen und für die rasterelektronenmikroskopische Untersuchung nicht vorher abgezogen wird. Weiterhin können auf den einzelnen Stofffasern regelmäßig Hautbestandteile nachgewiesen werden (Abbildung 3.24).

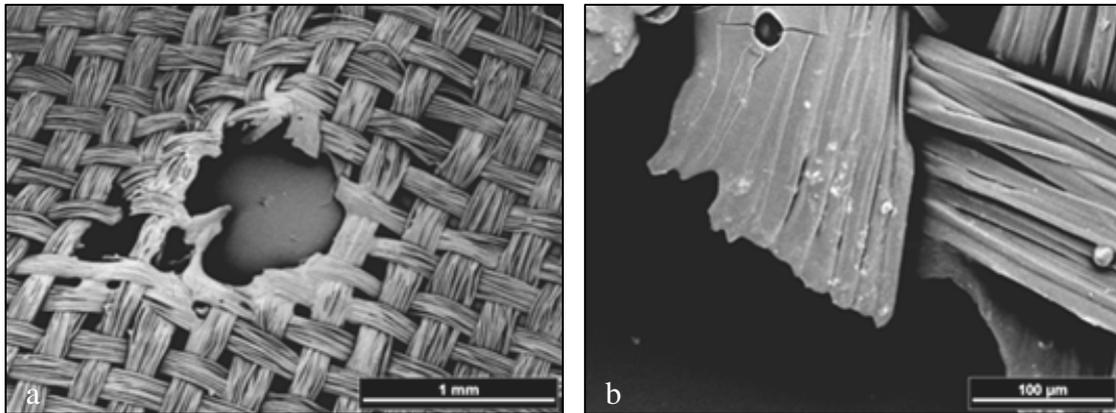


Abbildung 3.24

Zerstörung des der Schweinehaut aufliegenden trockenen Viskosestoffs nach Kontakt mit dem stromführenden Messingstab:

Verschmelzung der Fasern (a), Ablagerung von Messingkugeln und -partikeln und Hautbestandteilen auf den Fasern (b).

S-180, RE-Mode

Entfernt man den Viskosestoff nach Versuchsdurchführung von der Haut, so stellt sich eine Strommarke im Bereich des Elektrodenkontakts dar, welche morphologisch der runden Form des verwendeten Messingstabs entspricht. In der entstandenen Strommarke zeigt sich, neben eingeschmolzenen Viskosefasern mit wiederum aufgelagerten Hautbestandteilen, auch eine Vielzahl von Metallpartikeln. Metallische Kugeln dagegen können in diesem Fall in deutlich geringerem Maße als bei Belassen des Stoffes auf der Haut nachgewiesen werden (Abbildung 3.25).

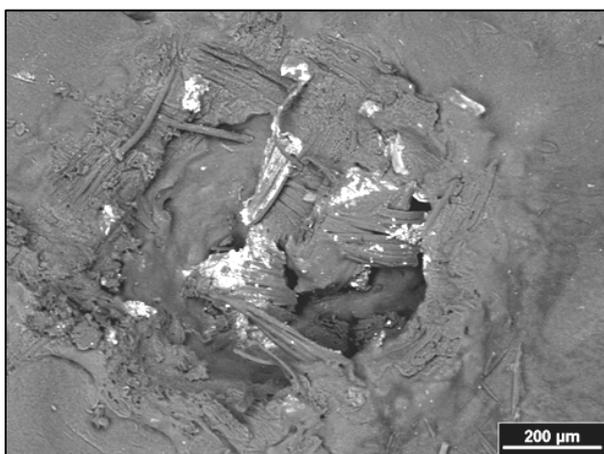


Abbildung 3.25

Strommarke auf Schweinehaut nach Entfernen des bei Versuchsdurchführung aufliegenden Viskosestoffs:

In der Strommarke können eingeschmolzene Stofffasern und metallisches Material in Form von Kugeln und auch Partikeln nachgewiesen werden.

S-180, RE-Mode

Werden die entsprechenden Textilversuche mit menschlicher Bauchhaut als Probe durchgeführt, so sind die erzielten Ergebnisse mit den oben beschriebenen vergleichbar. Auch in diesem Fall lassen sich auf den zerstörten Stofffasern Metallkugeln nachweisen. Dies ist wiederum der Fall sowohl auf der Oberfläche des Stoffs, als auch auf den Fasern, welche sich nach Entfernen desselben in der Strommarke befinden (Abbildung 3.26).

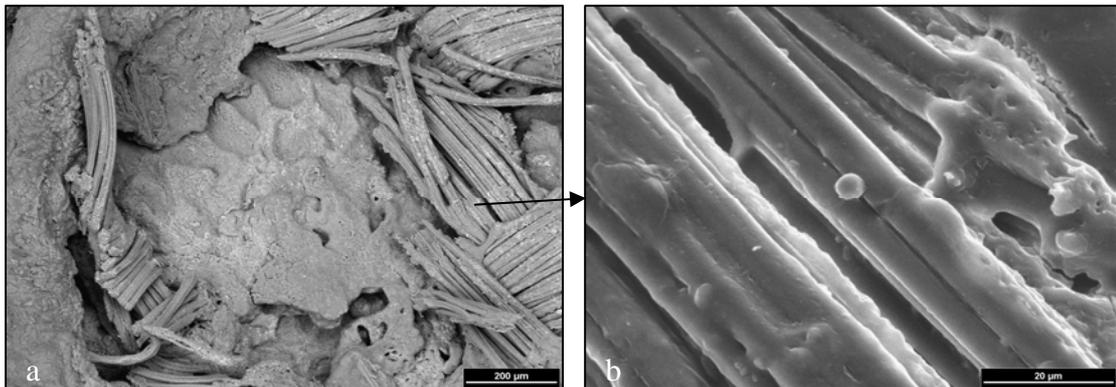


Abbildung 3.26

Strommarke auf menschlicher Bauchhaut mittels Messingstab nach Entfernen der bei Versuchsdurchführung aufliegenden Viskose (a), Messingkugel auf den in der Marke befindlichen Viskosefasern (b).

S-180, RE-Mode (a), SE-Mode (b)

Metallische Zusammensetzung der Kugeln

Die mittels REM abbildbaren und mittels EDX analysierbaren Metallkugeln bei den einzelnen Leit-Tab- und Hautversuchen bestehen jeweils aus den Metallen, aus denen auch die jeweilig verwendeten Elektroden zusammengesetzt sind. Allerdings entspricht die relative Elementzusammensetzung dieser Kugeln häufig nicht der Elementzusammensetzung im Elektrodenmaterial (Abbildungen 3.27 und 3.28) und variiert in den einzelnen Kugeln zufällig (Abbildung 3.28 und 3.29). Weiterhin finden sich auch Kugeln, die zu 100% aus nur einem Element der Elektrode bestehen.

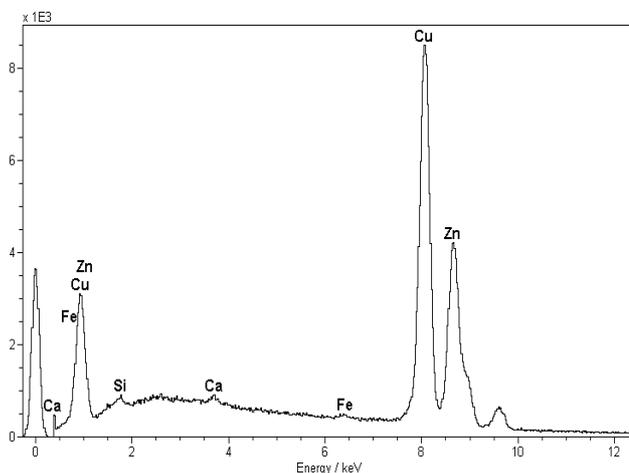
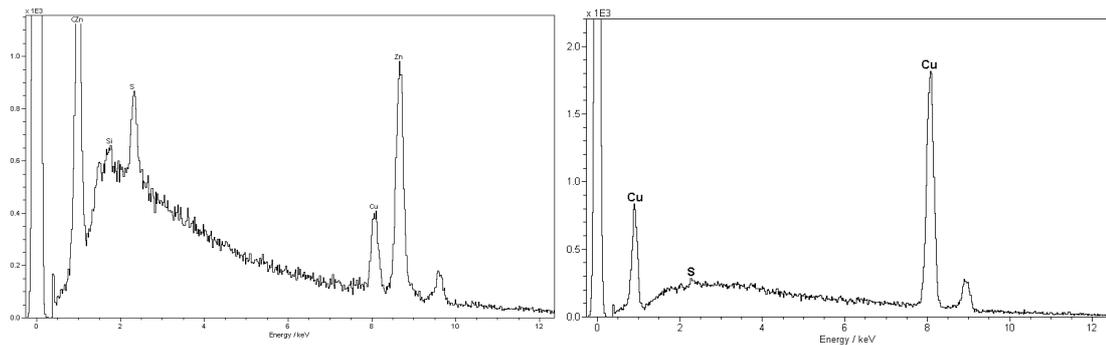
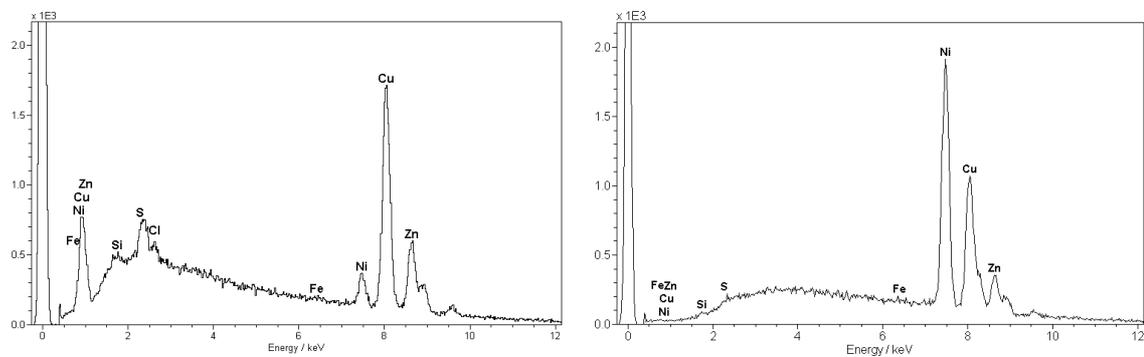


Abbildung 3.27

EDX-Spektrum des Messingstabs (Durchmesser: 0,5 cm): Nachweis von Kupfer, Zink und Eisen (Streustrahlung), vergleiche mit der metallischen Zusammensetzung der in der Strommarke abgelagerten Kugeln (Abbildung 3.28). RÖNTEC X-flash-Detektor

**Abbildung 3.28**

Elementzusammensetzung zweier auf dem Leit-Tab abgelagerter Metallkugeln nach Erzeugung einer Strommarke unter Benutzung des Messingstabs (Durchmesser: 0,5 cm).
RÖNTEC X-flash-Detektor

**Abbildung 3.29**

Elementzusammensetzung zweier auf dem Leit-Tab abgelagerter Metallkugeln nach Erzeugung einer Strommarke unter Benutzung des vernickelten Bananensteckers.
RÖNTEC X-flash-Detektor

Insgesamt ergeben die EDX - Analysen, dass die in den verschiedenen Haut- und Leit-Tab-Versuchen gefundenen metallischen Kugeln bestehen bei Benutzung:

- des Messingstabs:
 - aus Kupfer mit einer Spur Zink.
 - aus Zink mit einer Spur Kupfer.
 - aus reinem Kupfer.
- der Stahlelektrode:
 - aus reinem Eisen.
- des vergoldeten und vernickelten Messingbananensteckers:
 - aus Kupfer und Zink mit einer Spur Nickel.
 - aus hauptsächlich Kupfer neben Nickel und einer Spur Zink.
 - aus hauptsächlich Nickel neben Kupfer und einer Spur Zink.
 - aus Kupfer und Nickel.
 - aus reinem Nickel.
 - Gold-Kugeln zeigen sich nur bei frischer unverbrauchter

Elektrode.

- des vernickelten Messingbananensteckers:
 - aus Kupfer, Zink und Nickel mit einer Spur Eisen.
 - aus Kupfer und Zink mit einer Spur Nickel.
 - aus hauptsächlich Kupfer neben Nickel und einer Spur Zink.
 - aus hauptsächlich Nickel neben Kupfer und einer Spur Zink.
 - aus Nickel mit einer Spur Kupfer.
 - aus Kupfer mit einer Spur Nickel.
 - aus reinem Nickel.
- der Schraube 0:
 - aus Zink und Eisen.
 - aus reinem Kupfer.
- der Schraube 4:
 - aus Eisen mit einer Spur von Nickel.
 - aus Nickel mit einer Spur von Eisen.
 - aus reinem Eisen.
- des abgerundeten 0,7 x 9 cm großen Blechs:
 - aus Silber und Kupfer und einer Spur Zink.
 - aus Silber und Zink mit einer Spur Kupfer.
- des eckigen 0,7 x 9 cm großen Blechs:
 - aus Nickel mit einer Spur Eisen.
 - aus Eisen mit einer Spur Nickel.
- des Kupfer-Stabes: - aus reinem Kupfer.
- des Alu-Stabes: - aus reinem Aluminium.
- des 4fach-Steckers: - aus Zinn mit Spuren von Blei.
- des Kohlestabes: - keine Kugeln.

Kugeln aus dem Material des REM-Halters:

Wird ein Leit-Tab für die Versuche verwendet, so findet sich, zusätzlich zu den für die jeweiligen Elektroden spezifischen Kugelarten, eine große Anzahl von Aluminiumkugeln auf der Leit-Tab-Oberfläche. Das Material zur Bildung dieser Kugeln stammt aus dem unterliegenden aluminiumhaltigen REM-Halter, auf welchen der Leit-Tab geklebt ist. Aufgrund der Durchschlagung des Leit-Tabs wird somit aus dem REM-Halter ebenfalls metallisches Material herausgelöst, welches sich in Form von Kugeln auf der Leit-Tab-Oberfläche verteilt (Abbildung 3.30).

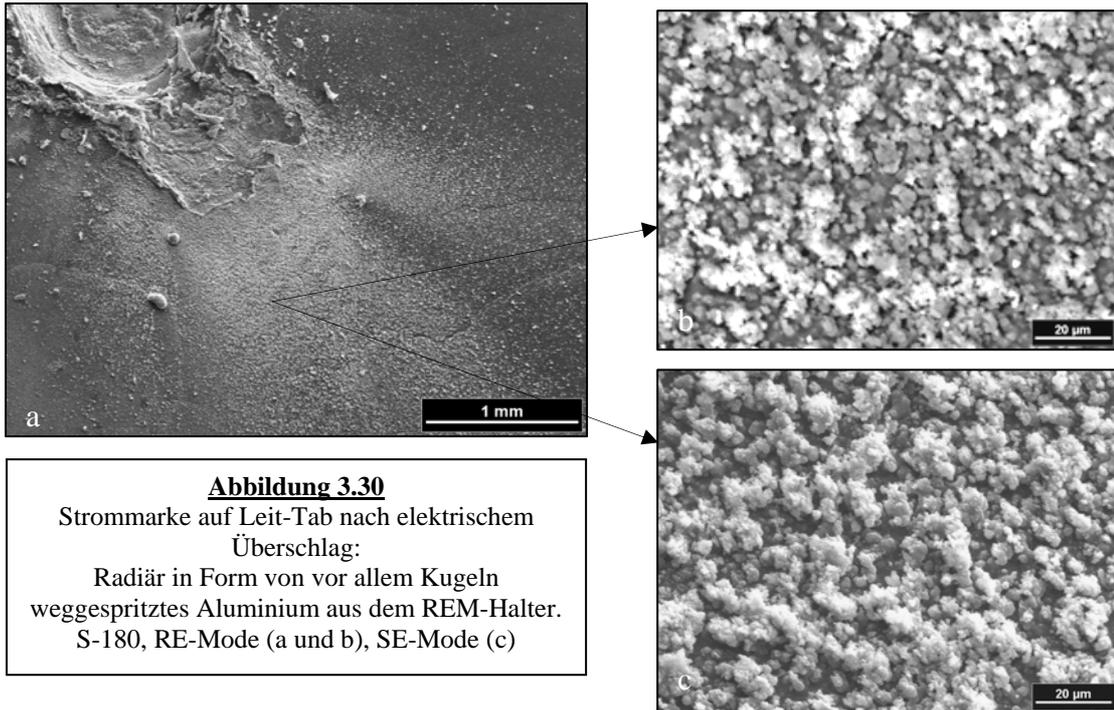


Abbildung 3.30
 Strommarke auf Leit-Tab nach elektrischem
 Überschlag:
 Radiär in Form von vor allem Kugeln
 weggespritztes Aluminium aus dem REM-Halter.
 S-180, RE-Mode (a und b), SE-Mode (c)

Kugeln nach Intermediärkontakt:

Nach Erzeugung einer Kurzkontaktstrommarke unter Verwendung der Messingelektrode findet sich bei einem der Versuche neben Kupfer/ Zinkkugeln eine ungewöhnlich hohe Anzahl etwa 30 µm großer, reiner Zinkkugeln auf der Hautoberfläche (Abbildung 3.31). Vor Strommarkenerzeugung auf der Haut ist dabei der Stromfluss durch einen kurzzeitigen Intermediärkontakt zwischen Elektrode und einer Zinkplatte überprüft worden.

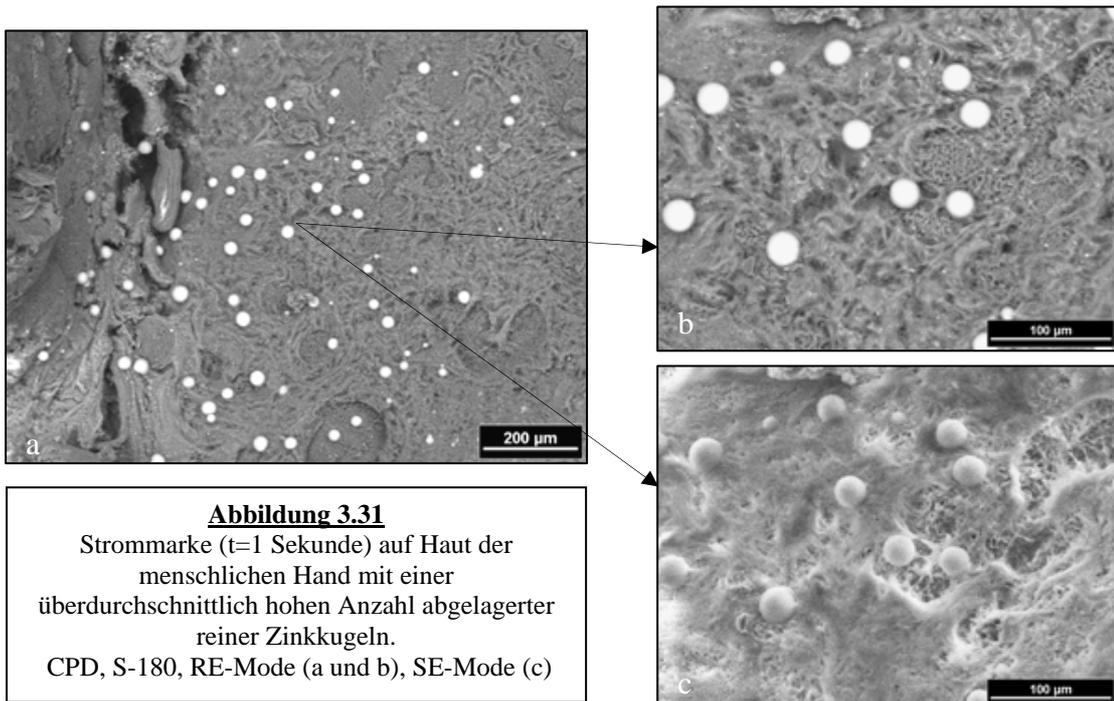


Abbildung 3.31
 Strommarke ($t=1$ Sekunde) auf Haut der
 menschlichen Hand mit einer
 überdurchschnittlich hohen Anzahl abgelagerter
 reiner Zinkkugeln.
 CPD, S-180, RE-Mode (a und b), SE-Mode (c)

Bei rasterelektronenmikroskopischer Untersuchung der in den Experimenten verwendeten Elektroden können neben einer, aufgrund der hohen Temperaturen und der Funkenbildung entstandenen, starken Verschmelzung und lokalen Zerstörung der Elektrodenoberfläche zusätzlich metallische Partikel, vereinzelt Metallkugeln und koaguliertes Hautgewebe nachgewiesen werden (Abbildung 3.32).

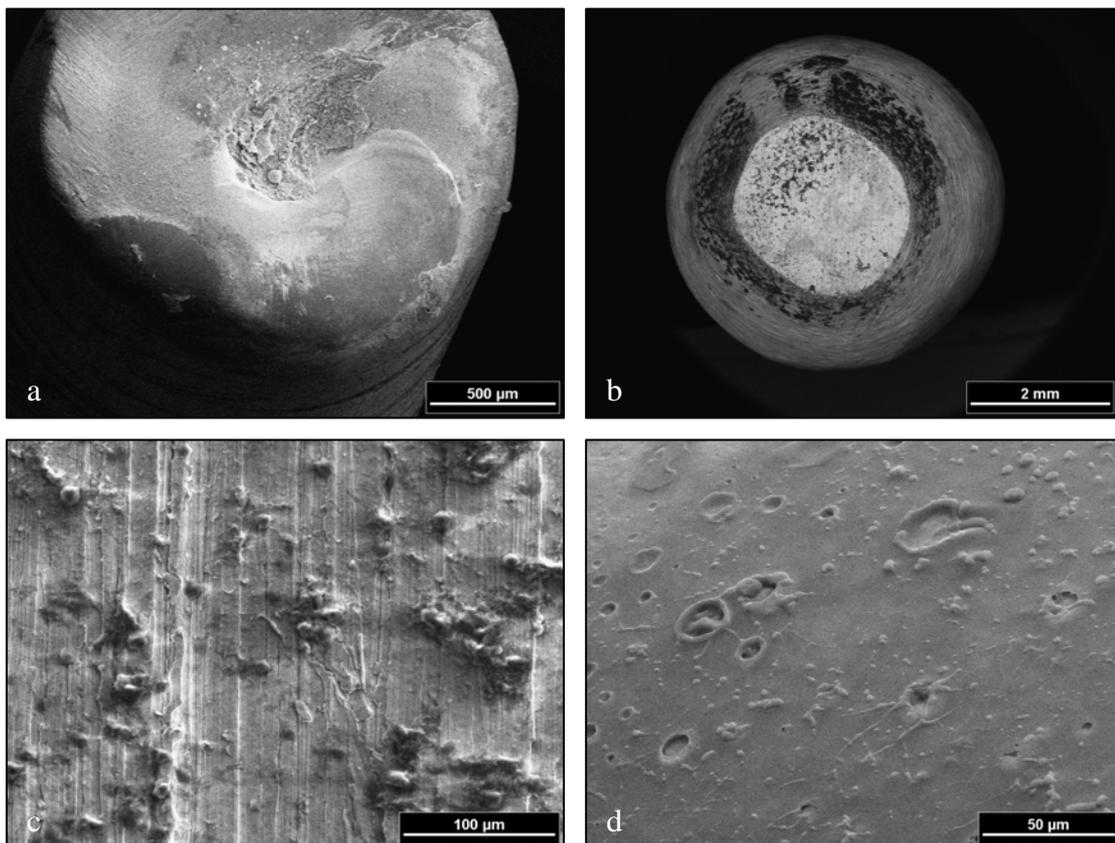


Abbildung 3.32

Metallische Ablagerungen und Hautbestandteile auf der Messingelektrode nach Erzeugung einer Strommarke auf Haut:

Der Elektrode anhaftende Zinkkugel (a), Ablagerung von Metall und Hautbestandteilen auch im der Elektrodenspitze benachbarten Bereich (b), koaguliertes und in Kugelform erstarrtes Hautgewebe auf der Elektrodenoberfläche (c), kraterförmige Einschmelzungen des Elektrodenmaterials nach Funkenentwicklung (d).

S-180, SE-Mode

3.1.3.1.2 Metallische Partikel

Metallische Partikel von variabler Anzahl, Form und Größe sind in dieser Arbeit in nahezu allen erzeugten Strommarken mit nur kurzer Stromflussdauer (bis 1 Sekunde) sowohl auf der Leit-Tab- als auch auf der Hautoberfläche nachzuweisen. Insgesamt finden sich metallische Partikel nach Stromkontakt deutlich regelmäßiger als Metallkugeln.

In Versuchen mit elektrolytisch polierten Elektroden dagegen werden keine metallischen Partikel auf der Probenoberfläche nachgewiesen, wohingegen Metallkugeln und diffus im Hautgewebe befindliches Metall (Kapitel 3.1.3.1.3) zu finden sind (Abbildung 3.33).

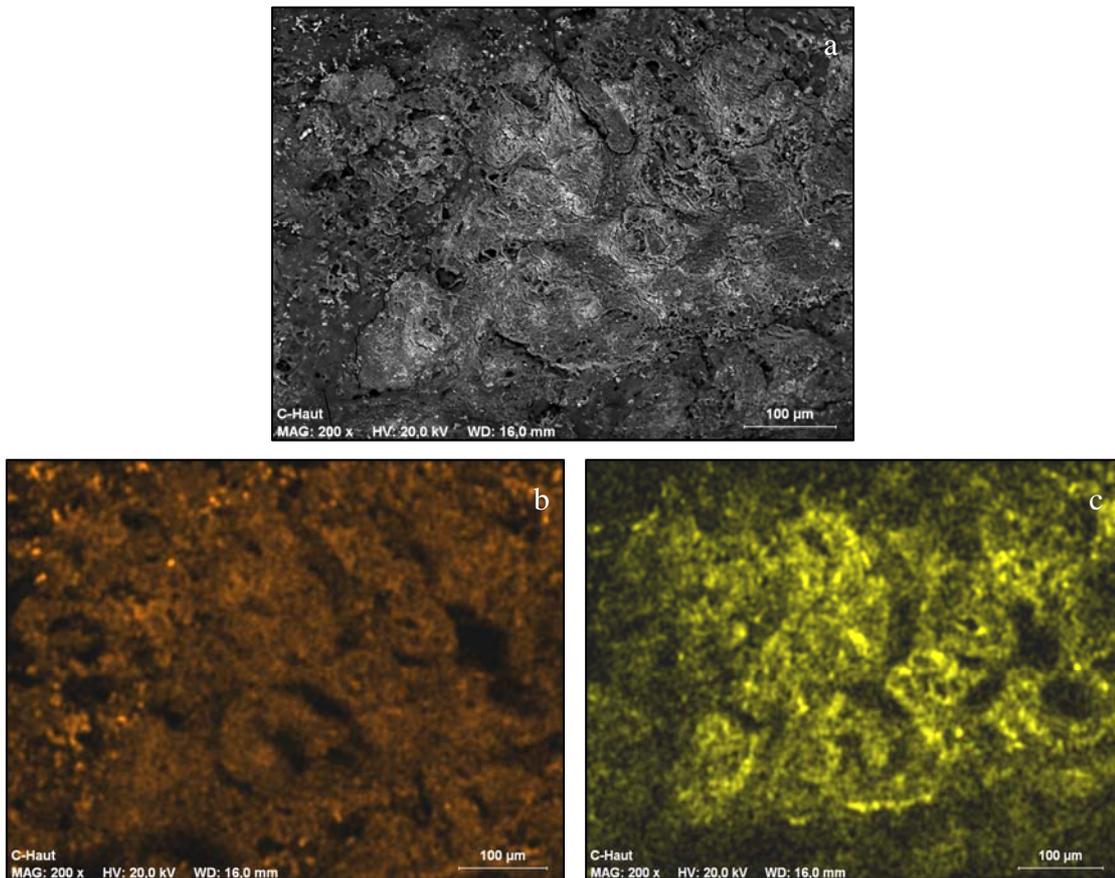


Abbildung 3.33

Strommarke auf Schweinehaut mittels einer elektrolytisch polierten Elektrode (a): Keine Ablagerung von metallischen Partikeln in der Strommarke, Kugeln aus Zirkon (b) und Vanadium (c) und eine diffuse Einlagerung beider Metalle auf und in die Haut sind in den Verteilungsbildern dagegen zu erkennen.
S-180, RE-Modus (a), EDAX 32 Genesis (b und c)

Metallische Partikel in großer Anzahl können sich entweder innerhalb der Elektrodenauflagefläche auf dem Leit-Tab bzw. der Haut oder, wie übrigens auch die oben beschriebenen Metallkugeln, außerhalb der eigentlichen Strommarke befinden.

Vorversuche: Leit-Tab auf REM-Halter

Metallische Partikel in einigem Abstand zur Strommarke finden sich besonders bei den Leit-Tab-Experimenten. Dabei sind die Partikel umso weiter entfernt von der Strommarke, je stärker der elektrische Überschlag zwischen Elektrode und Leit-Tab ausfällt. Oftmals ist dann aufgrund der Richtung, in welche die Metalle weggespritzt

sind, eine Aussage über die Art des Kontaktes zwischen Elektrode und Probe möglich (Abbildung 3.34).

Kommt es bei Versuchsdurchführung zu keiner sichtbaren elektrischen Entladung, was allerdings bei den Hautexperimenten deutlich häufiger der Fall ist, so finden sich im REM als Zeichen des Stromdurchgangs auf der Leit-Tab-Oberfläche dennoch regelmäßig Ablagerungen von metallischen Partikeln, welche dann hauptsächlich auf den Bereich der Kontaktfläche mit der Elektrode beschränkt sind (Abbildung 3.35). Bei Strommarkenerzeugung auf Leit-Tab mittels der Kohlelektrode erkennt man nie ein sichtbares Anzeichen eines Stromflusses. Dennoch können nach Versuchsdurchführung mit dem Rasterelektronenmikroskop Graphitstücke auf der Oberfläche des Leit-Tab dargestellt werden (Abbildung 3.36). Kugeln auf der Probenoberfläche finden sich bei Verwendung des Kohlestabs zur Erzeugung einer Strommarke nie.

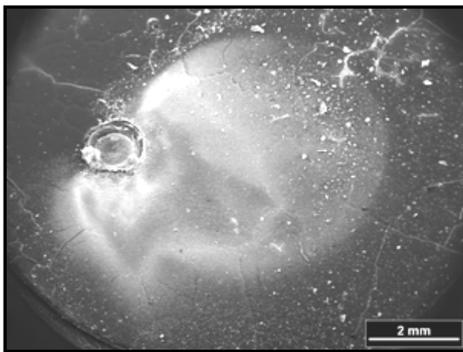


Abbildung 3.34

Kurzzeitkontaktstrommarke auf Leit-Tab unter Benutzung der Spitze des vergoldeten und vernickelten Messingbananensteckers, starker elektrischer Überschlag:
Cu/Zn-Partikel und -kugeln sind weit nach rechts weggespritzt, da die Elektrode von schräg links auf den Tab aufgesetzt wird.
S-180, RE-Mode

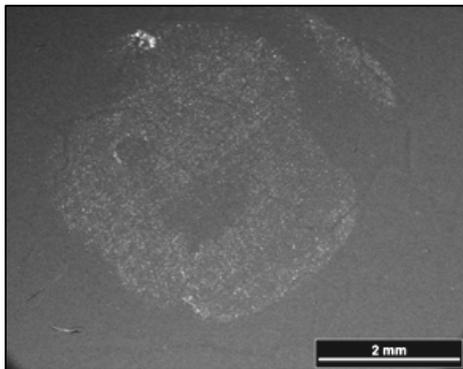


Abbildung 3.35

Kurzzeitkontaktstrommarke auf drei übereinandergeklebten Leit-Tabs mittels der stumpfen Seite des Messingstabs:
Abgelagerte Cu/Zn-Partikel sind auf die Kontaktfläche zwischen Elektrode und Leit-Tab begrenzt.
S-180, RE-Mode

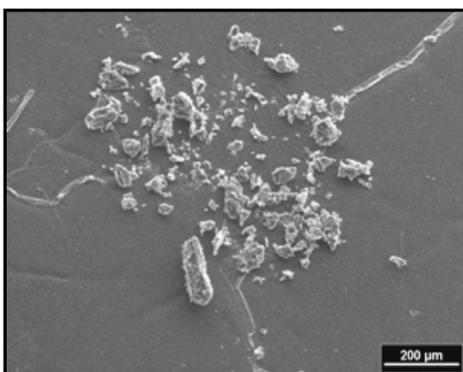


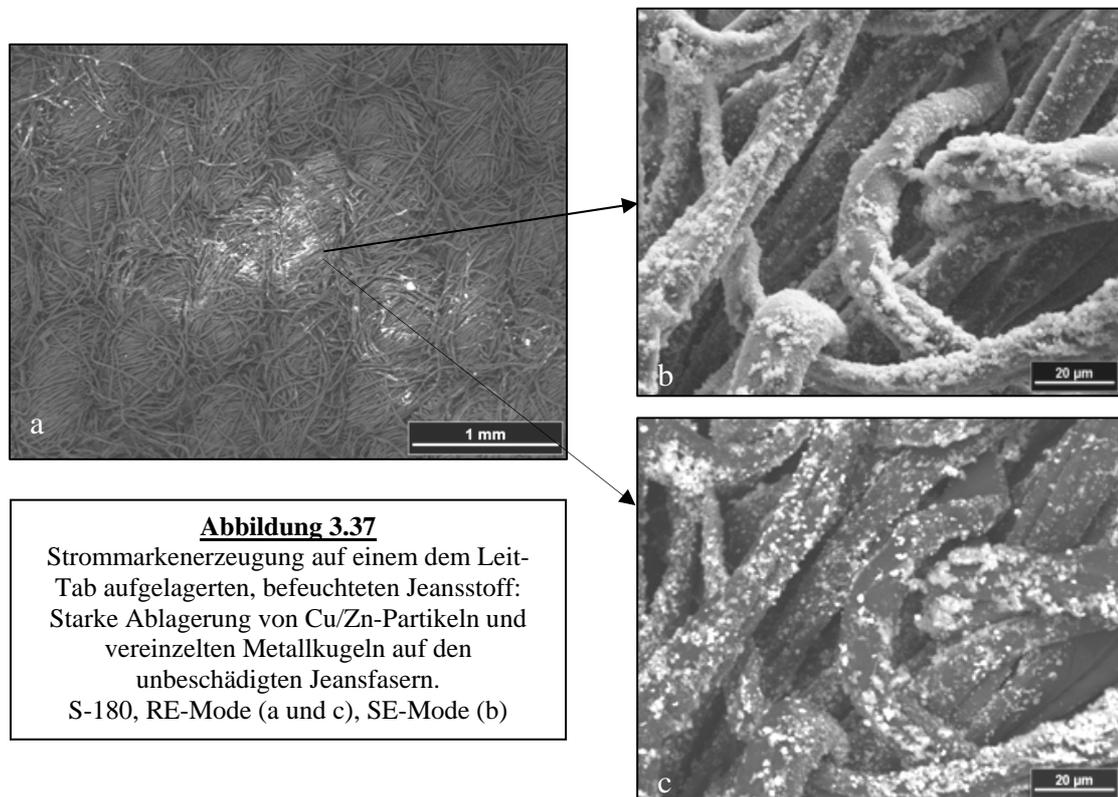
Abbildung 3.36

Graphitstücke auf Leit-Tab nach Strommarkenerzeugung unter Benutzung des Kohlestabs als Elektrode, keine Funkenbildung.
S-180, SE-Mode

Interposition von Textilien:

Bei den schon im vorherigen Kapitel 3.1.3.1.1 beschriebenen Versuchen, bei denen Strommarken auf mit trockenen oder befeuchteten Textilien bedeckten Leit-Tabs erzeugt werden, sind auf den Textilien in allen Experimenten neben Metallkugeln immer auch abgelagerte Metallpartikel im Bereich der Elektrodenkontaktfläche und auch darüber hinaus zu finden.

So kommt es bei Erzeugung einer Strommarke auf einem trockenen oder befeuchteten Jeansstoff mittels des Messingstabs zwar fast nie zu einer erkennbaren Funkenentwicklung, dennoch können auch in diesem Fall mit dem REM massive Ablagerungen von Kupfer/ Zink-Partikeln auf den unbeschädigten Jeansfasern unter der Elektrodenauflagefläche nachgewiesen werden (Abbildung 3.37).



Wird ein Viskose- oder dünner Wollstoff als Interponat verwendet, so kommt es dagegen regelmäßig zur sichtbaren Funkenentwicklung zwischen Leit-Tab und Elektrode, sodass der jeweilig verwendete Stoff lokal zerstört wird. Es lassen sich dann, neben einer Vielzahl von Metallkugeln, massenhaft feine Partikel auf den geschmolzenen Fasern und auch noch in einiger Entfernung davon nachweisen (Abbildungen 3.38 und 3.39).

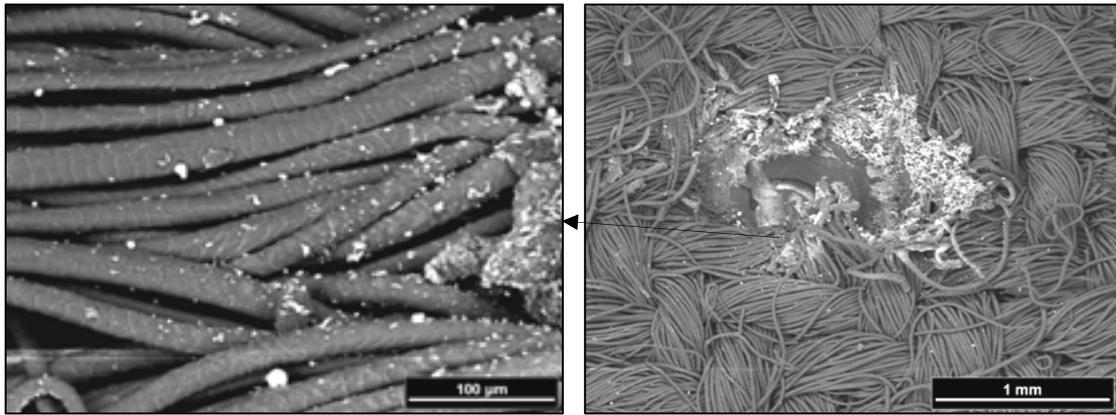


Abbildung 3.38

Strommarkenerzeugung auf einem dem Leit-Tab aufgelagerten, befeuchteten Wollstoff mittels des Messingstabs:

Ablagerung von Cu/Zn-Partikeln und -Kugeln auf den Stofffasern vor allem am Rand der Strommarke, jedoch auch im weiter entfernten Textilgewebe.

S-180, RE-Mode

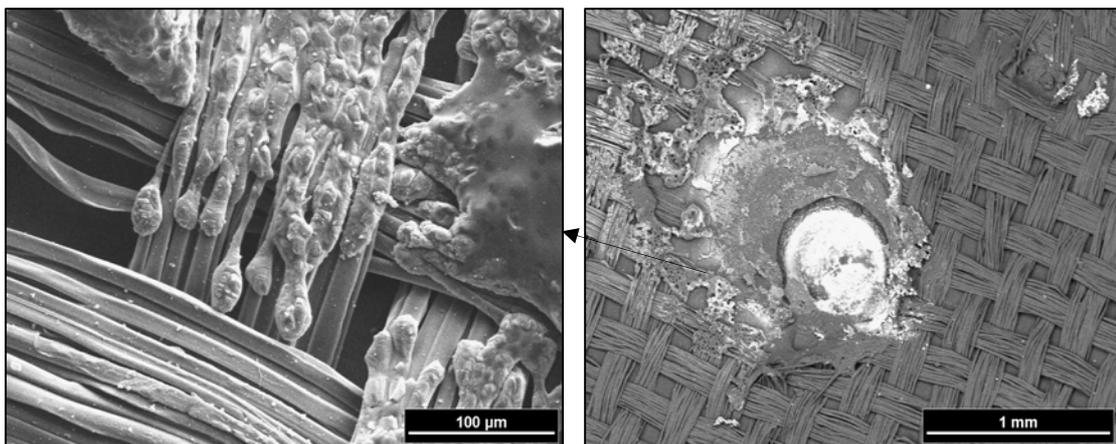


Abbildung 3.39

Strommarkenerzeugung auf einem dem Leit-Tab aufgelagerten, befeuchteten Viskosestoff mittels des Messingstabs:

Ablagerung von feinen Cu/Zn-Partikeln und -Kugeln vor allem auf den angeschmolzenen Stofffasern am Rand der Marke.

S-180, RE-Mode

Hautversuche:

Werden Strommarken mit einer Stromflussdauer bis zu einer Sekunde auf Schweine- oder Menschenhaut erzeugt, so finden sich nach Versuchsdurchführung auch hier bei allen Experimenten auf der Hautoberfläche abgelagerte Partikel direkt in der Strommarke und je nach Stärke der Funkenentwicklung ebenfalls in einiger Entfernung davon (Abbildung 3.40).

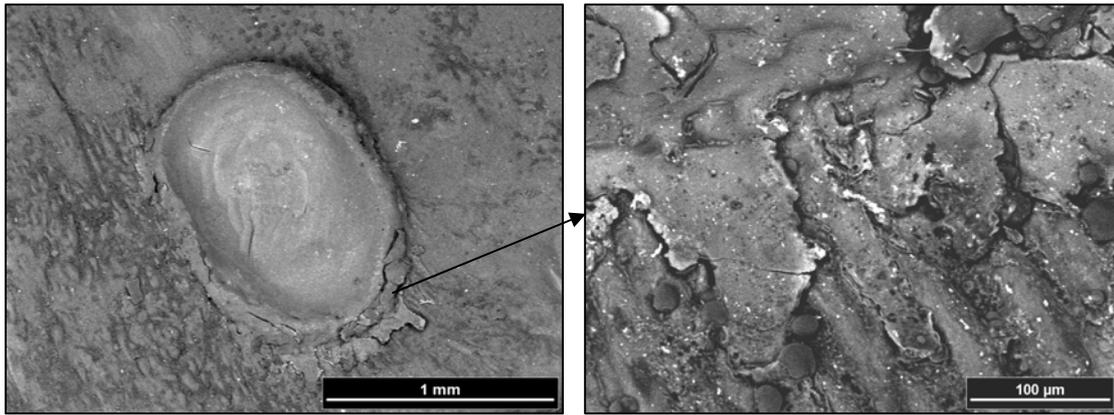


Abbildung 3.40

Strommarke (t~1 Sekunde) auf Schweinehaut mittels der stumpfen Seite des Messingstabs:
 Viele abgelagerte Partikel aus Kupfer und Zink direkt in der Marke und aufgrund von
 Funkenentwicklung bei Versuchsdurchführung auch in einiger Entfernung davon,
 Partikelverdichtung vor allem im Bereich des erhabenen Randbereichs der Strommarke.
 S-180, RE-Mode

Bei Verwendung von vor allem der durchfeuchteten Haut der menschlichen Hand können bei gleichen Versuchsbedingungen allerdings insgesamt weniger metallische Partikel und Kugeln auf der Hautoberfläche als bei Benutzung der Schweinehaut nachgewiesen werden, obwohl die elektrische Feldstärke und somit die Funkenentwicklung in der Nähe einer Spitze besonders hoch sein sollte (Abbildung 3.41). Dafür ist allerdings die stärkere diffuse Verteilung von Metall in und auf der Haut bei der höher durchfeuchteten Leichenhaut auffällig (Kapitel 3.1.3.1.3 und 3.1.3.2).

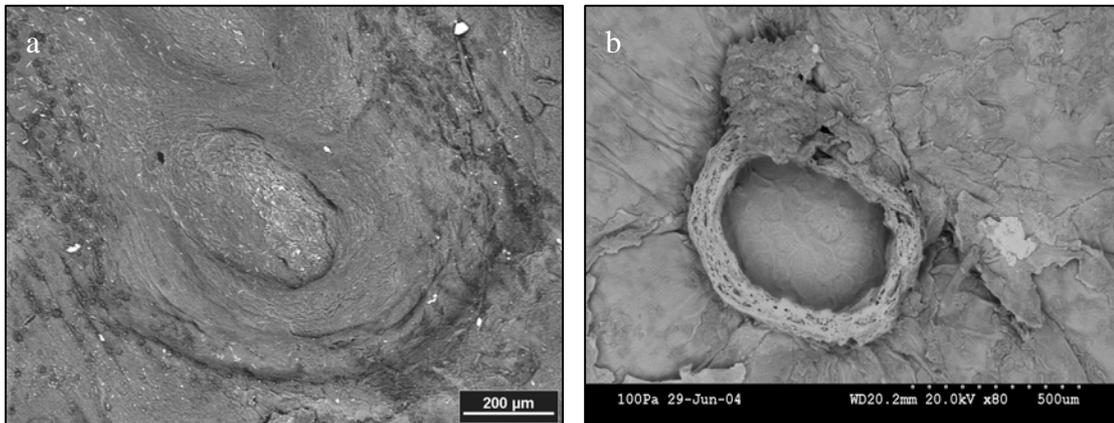


Abbildung 3.41

Strommarken (t~0,3 Sekunden) auf Schweinehaut (a) und Haut der durchfeuchteten Leichenhand (b) mittels der stumpfen (a) bzw. der angespitzten Seite (b) des Messingstabs:
 Deutlich weniger Partikelablagerungen auf der Oberfläche der durchfeuchteten Menschenhaut als auf der nicht durchfeuchteten Schweinehaut, dafür stärkere diffuse Einlagerung von Metall vor allem im Randbereich der morphologisch ausgeprägten Strommarke der Leichenhaut.
 RE-Mode, S-180 (a), Hitachi S-3600N SEM, BSE 2 (b)

Vergleicht man die Anzahl der auf der Probenoberfläche abgelagerten metallischen Partikel nach Versuchsdurchführung mit Stromflussdauer von etwa 1 Sekunde (Abbildung 3.40) mit der bei Stromflussdauer von etwa 0,3 Sekunden (Abbildung 3.41), so

nimmt die Anzahl der Partikel mit sich verringernder Stromflussdauer tendenziell ebenfalls ab.

Minimale Ablagerungen von metallischen Partikeln auf der Strommarkenoberfläche finden sich häufig auch bei Versuchsdurchführung mit höheren Stromstärken (1-1,5 A). Dabei kommt es zu hauptsächlich thermischen Veränderungen der Haut mit nur vereinzelt Metallablagerungen auf der Probenoberfläche, vor allem im Randbereich (Abbildung 3.42).

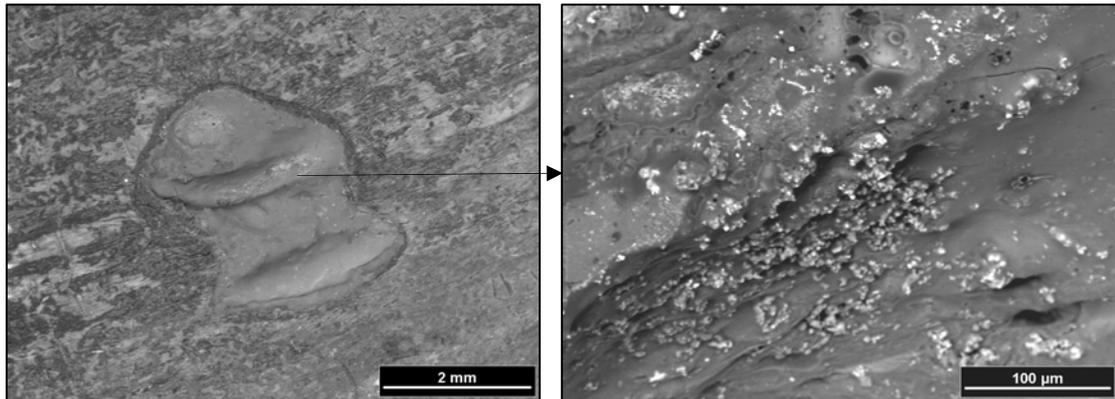


Abbildung 3.42

Strommarke auf Schweinehaut ($t \sim 1$ Sekunde) mit hoher Stromstärke ($I \sim 1,2$ A) und Schraube 0:
Nur vereinzelte oberflächliche Ablagerungen von Eisen und Zink am Rand der Marke, punktueller
Nachweis von Metall diffus im Hautgewebe.
S-180, RE-Mode

Interposition von Textilien:

Wie schon weiter oben beschrieben, werden metallische Partikel bei Stromkontakt auch auf den Fasern von Kleidungsstücken abgelagert.

Ein Unterschied zu den entsprechenden Versuchen mit den Leit-Tabs ist, dass der dünne *Wollstoff* bei Versuchsdurchführung mit Leichenhaut nicht zerstört wird und sich die metallischen Partikel in den unbeschädigten Fasern ablagern.

Der Haut aufgelagerter *Viskosestoff* dagegen wird bei Stromfluss in den meisten Versuchen thermisch geschädigt, sodass aufgrund des entstandenen Kontaktes zur darunterliegenden Haut auf dieser eine Strommarke entsteht (Abbildung 3.44).

Bei sehr kurzen Stromflusszeiten von etwa 0,3 Sekunden kann es jedoch ebenfalls vorkommen, dass der Stoff nur leicht angeschmolzen, aber nicht vollständig zerstört wird und dass somit die darunter liegende Haut durch die Wirkung des Stroms unbeeinflusst bleibt. Auch in diesem Fall finden sich eine Vielzahl von Partikeln und,

abhängig vom Grad der Funkenentwicklung, natürlich auch Kugeln im Textil (Abbildung 3.43).

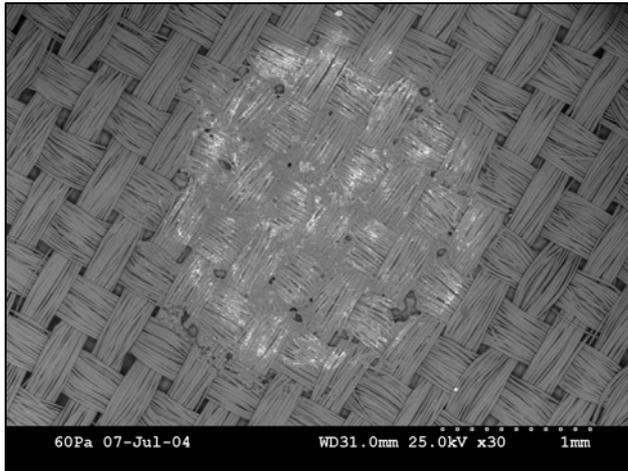


Abbildung 3.43

Strommarke ($t \sim 0,3$ Sekunden) mit der stumpfen Seite des Messingstabs (Durchmesser: 0,2 cm):
Nur angeschmolzene Viskosefasern nach Stromkontakt mit aufgelagerten metallischen Partikeln und Kugeln.

Hitachi S-3600N SEM, BSE 2

Kommt es jedoch, wie in den meisten Fällen, zur Zerstörung des Viskosestoffs und somit zur Strommarkenentstehung auf der darunterliegenden Haut (vergleiche auch Abbildung 3.12), so finden sich zum Beispiel bei Verwendung des Messingstabs Kupfer/ Zink-Partikel sowohl auf den zerstörten Viskosefasern des aufgelagerten Stoffs, als auch in der eigentlichen Strommarke auf der Haut. Die meisten metallischen Ablagerungen finden sich dabei auf den in der Strommarke abgelagerten Stofffasern, wobei sich einige wenige Kupfer/ Zink-Partikel ebenfalls auf der Haut in der Mitte der Strommarke oder auf der Innenseite des Strommarkenrandwalls befinden (Abbildung 3.44).

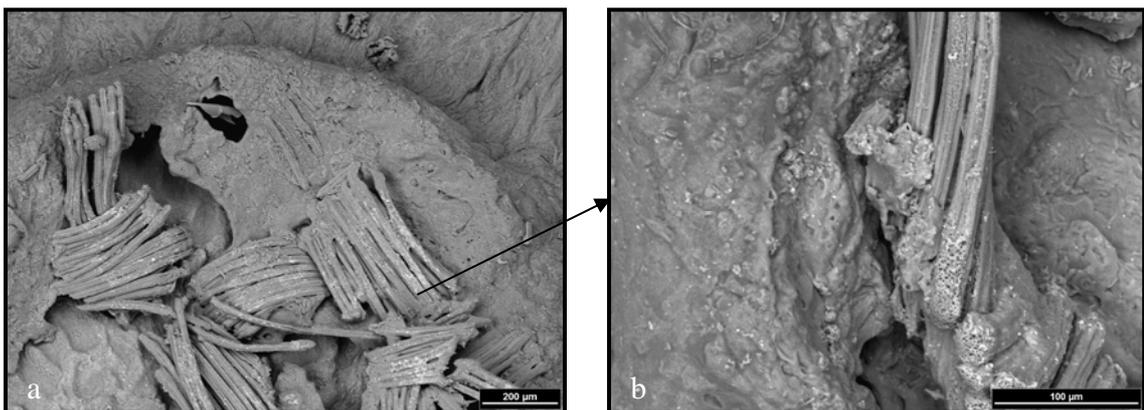


Abbildung 3.44

Strommarke auf menschlicher Bauchhaut mittels des Messingstabs (Durchmesser 0,2 cm) nach Entfernen des bei Versuchsdurchführung der Haut aufgelagerten Viskosestoffs:
Großflächige metallische Ablagerungen auf den verschmolzenen Viskosefasern und auf der Innenseite des Strommarkenrandwalls (a und b), Bläschenbildung in den Viskosefasern (b).
S-180, RE-Mode

Dabei können bei allen Hautversuchen, in denen es zur Zerstörung des interponierten Stoffes gekommen ist, grundsätzlich zwei Typen der Partikelablagerung unterschieden werden:

Einerseits finden sich die beschriebenen *solitären Metallpartikel* auf den Fasern des Textils. Andererseits können großflächige Mixturen nachgewiesen werden, welche aus erstens dem *Metall des Elektrodenmaterials*, zweitens aus *Titan*, das dem Textilgewebe entstammt, und drittens aus *Schwefel, Phosphor* und *Chlorid* des Hautgewebes bestehen (Abbildung 3.45).

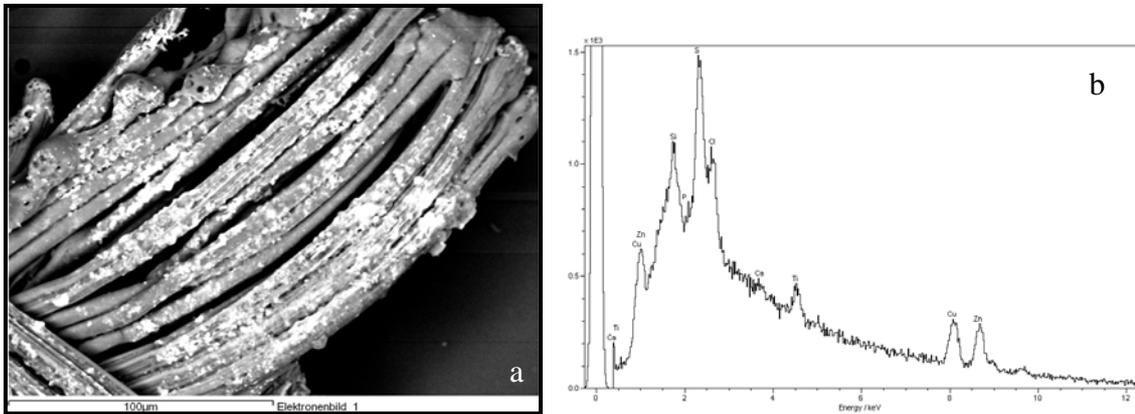


Abbildung 3.45

Großflächig, diffus abgelagerte Mischung von Kupfer, Zink, Titan, Schwefel, Phosphor und Chlorid auf den thermisch geschädigten Textilfasern des bei Versuchsdurchführung (Messingstab) interponierten Viskosestoffs. Dieser Mischung aufgelagert sind metallische Kugeln und solitäre Metallpartikel. S-180, RE-Mode (a), RÖNTEC X-flash-Detektor (b)

Werden mittels EDX Verteilungsbilder von Kupfer und Zink im Bereich der zerstörten Viskosefasern erstellt, so erkennt man deutlich die großflächigen Ablagerungen von beiden Metallen auf den Stofffasern, wobei die Kupferkonzentration tendenziell überwiegt. Weiterhin sind Kupferpartikel und Zinkpartikel diesen diffusen Ablagerungen aufgelagert (Abbildung 3.46).

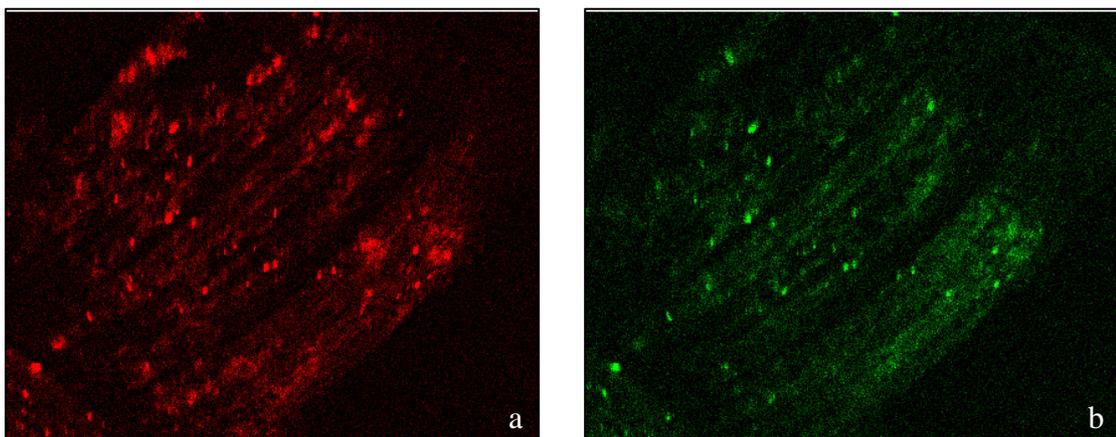


Abbildung 3.46

Elementverteilungsbilder von CuKa1 (a) und ZnKa1 (b) der zerstörten Viskosefasern in der Strommarke (Abbildung 3.45): In der den Viskosefasern aufgelagerten diffusen Mischung ist hauptsächlich Kupfer und in geringerem Maße auch Zink nachzuweisen. Den diffusen Ablagerungen sind einzelne metallische Partikel aufgelagert, welche fast immer aus Kupfer und Zink bestehen.

EDAX 32 Genesis

Metallische Zusammensetzung der Partikel

Die in den einzelnen Versuchen auf der Probenoberfläche abgelagerten metallischen Partikel setzen sich, wie auch schon für metallische Kugeln beschrieben, aus den Metallen zusammen, welche mittels EDX in den entsprechend verwendeten Elektroden nachgewiesen werden können. Dabei entspricht die relative Zusammensetzung der Partikel meistens nicht der der jeweiligen Elektrode (Abbildungen 3.47 und 3.48). Auch variiert das relative Verhältnis der einzelnen metallischen Bestandteile innerhalb verschiedener Partikel einer Strommarke (Abbildung 3.48).

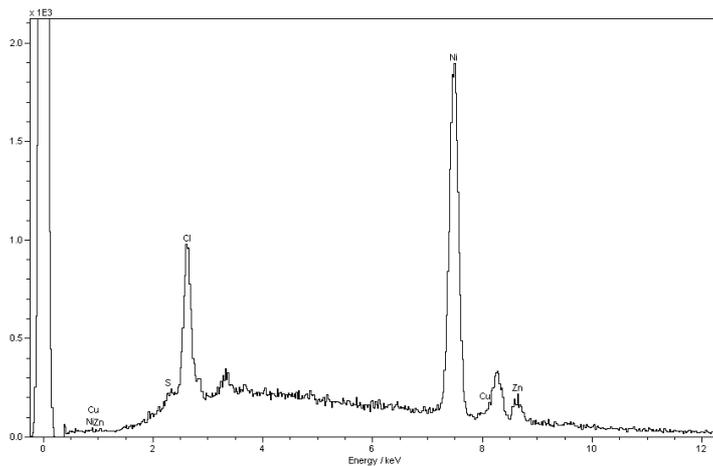


Abbildung 3.47

EDX-Analyse des vernickelten
Messingbananensteckers.

RÖNTEC X-flash-Detektor

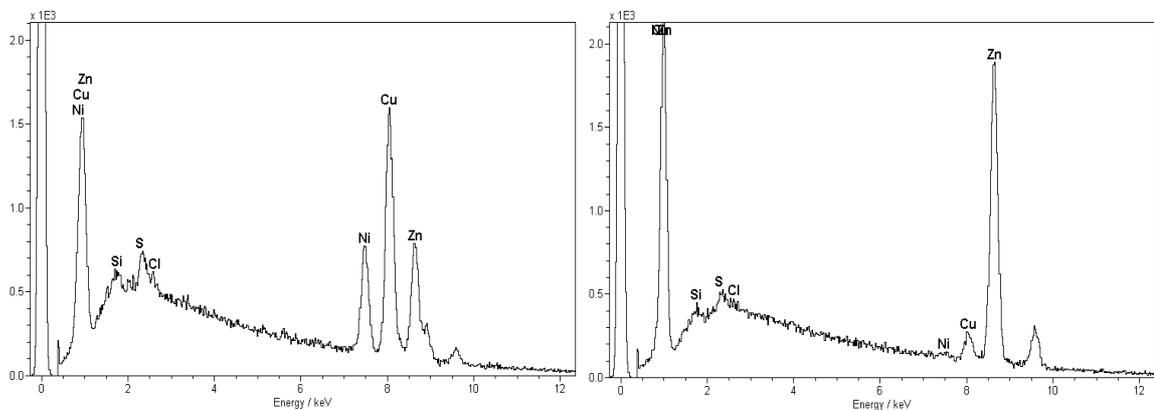


Abbildung 3.48

EDX-Analyse zweier auf der Probenoberfläche abgelagerter, metallischer Partikel nach Strommarkenerzeugung auf Leit-Tab mittels des vernickelten Messingbananensteckers:
Verschiedene relative Zusammensetzung der Partikel.

RÖNTEC X-flash-Detektor

Insgesamt ergeben die EDX - Analysen, dass die in den verschiedenen Haut- und Leit-Tab-Versuchen gefundenen metallischen Partikel bestehen bei Benutzung:

- des Messingstabs:
 - aus Kupfer mit einer Spur von Zink.
 - aus Zink mit einer Spur von Kupfer.
 - Blei lässt sich ebenfalls in manchen Partikeln nachweisen.

- des Stahlstabes: - aus reinem Eisen.
- des vergoldeten und vernickelten Messingbananensteckers:
 - aus Kupfer und Nickel mit Spuren von Zink.
 - aus Kupfer und Nickel mit Spuren von Gold.
 - aus Gold und Nickel.
 - aus reinem Nickel.
 - Gold-Partikel zeigen sich nur bei frischer unverbrauchter Elektrode.
- des vernickelten Messingbananensteckers:
 - aus Kupfer, Zink und Spuren von Nickel.
 - aus Kupfer, Nickel und Spuren von Zink.
 - aus Zink und Nickel.
 - aus reinem Nickel.
- der Schraube 0: - aus Eisen, Zink und Spuren von Mangan.
 - aus Eisen, Zink und Spuren von Chrom.
- der Schraube 1: - aus Eisen, Chrom und Zink.
 - aus reinem Zink.
- der Schraube 2: - aus Kupfer, Zink und Spuren von Nickel.
 - aus Kupfer, Zink und Spuren von Cadmium.
- der Schraube 4: - aus vorwiegend Nickel neben Eisen.
 - aus Eisen, Nickel und einer Spur von Cadmium.
- des abgerundeten 0,7 x 9 cm großen Blechs:
 - aus Silber, Kupfer und Zink.
 - aus Silber und Kupfer.
- des Alu-Stabes: - aus reinem Aluminium.
- des Kupfer-Stabes: - aus Kupfer mit einer Spur von Eisen.
 - aus Eisen und einer Spur von Kupfer.
 - aus reinem Kupfer.
- des Kupfer-Drahtes:
 - aus reinem Kupfer.
- des Kohlestabes: - aus Graphit.
- des 4fach-Steckers: - aus Zinn, Blei und Zink.
 - aus Zinn und Blei.
 - aus reinem Zinn.

3.1.3.1.3 Diffus auf und im Gewebe abgelagertes Metall

In Strommarken auf Haut stellen sich im rasterelektronenmikroskopischen RE-Bild je nach Versuchsbedingung (Hautbeschaffenheit, Art der Elektrode, Kontaktdauer, wässriges Milieu) regelmäßig hellere Areale innerhalb der Strommarke dar, in welchen mittels EDX starke Metallanreicherungen nachgewiesen werden können.

Da in Abbildungen mittels Rückstreuelektronen die Helligkeit proportional der Ordnungszahl bzw. der Dichte ist, weisen diese Areale darauf hin, dass sich hier Materialien hoher Ordnungszahl befinden. Dies kann mittels EDX bestätigt werden.

Elementverteilungsbilder dieser Hautbereiche zeigen beispielsweise, dass sich verschiedene Elemente der Elektrode auch unterschiedlich im Hautgewebe verteilen. So erscheinen beispielsweise bei Erstellung von Kupfer- und Zinkverteilungsbildern nach Verwendung des Messingstabs zur Strommarkenerzeugung zwar einige Hautareale in nahezu gleicher Metallkonzentration, häufiger jedoch überwiegt ein Element in dem einen, das andere in einem anderen Bereich des Gewebes (Abbildung 3.49).

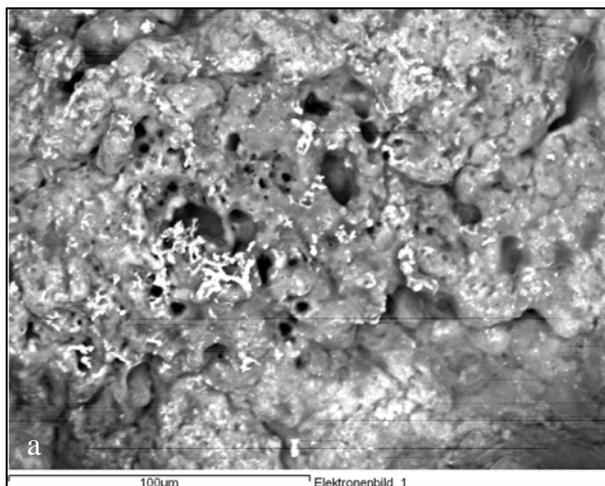
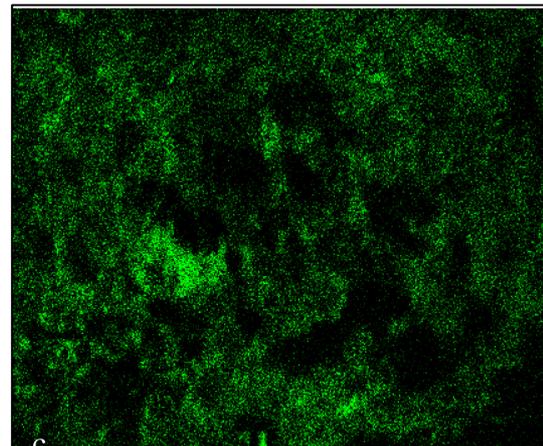
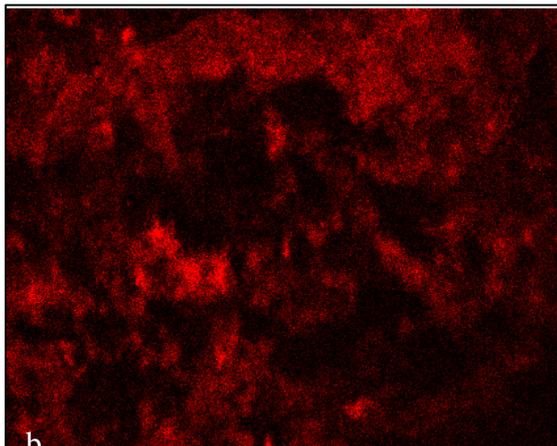


Abbildung 3.49

Strommarke (t~1 Sekunde) mittels Messingstab auf nicht durchfeuchteter Bauchhaut:

Hellere Bereiche innerhalb der Strommarke weisen auf diffuse Metalleinlagerungen in die Haut hin (a), Verteilungsbilder von CuKa1 (b) und ZnKa1 (c) zeigen eine leicht unterschiedliche Verteilung von Kupfer und Zink in der Haut. S-180, RE-Mode (a), EDAX 32 Genesis (b und c)



Einfluss der Hautbeschaffenheit:

Einen bedeutenden Einfluss auf das Phänomen der diffusen Metallverteilung im Bereich der Strommarke hat die Wahl der für die Versuche verwendeten Hautart mit ihren verschiedenen Widerständen.

Wird beispielsweise eine Strommarke auf *Schweinehaut* erzeugt, so lassen sich regelmäßig und elementunabhängig im RE-Bild die beschriebenen hellen Bereiche nahezu in der gesamten Strommarke darstellen. Elementverteilungsbilder zeigen dabei die Verteilung verschiedener Elemente innerhalb dieser Areale (Abbildung 3.50).

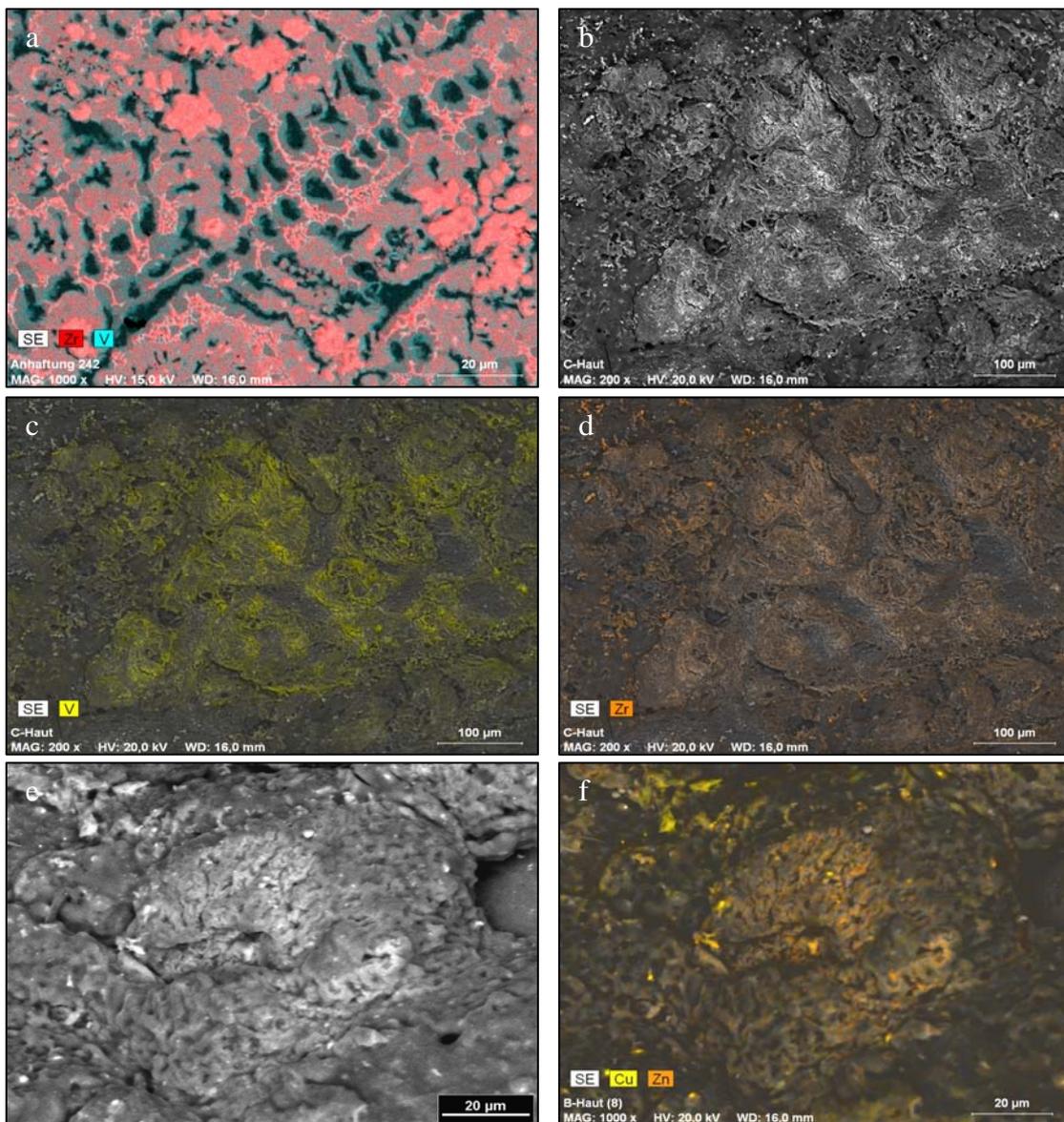


Abbildung 3.50

Strommarken ($t \sim 1$ Sekunde) mittels elektrolytisch polierter Elektrode (b-d) und Messingelektrode (e und f) auf *Schweinehaut*:

Metallverteilung von Vanadium und Zirkonium in der elektrolytisch polierten Elektrode selbst (a) und anschließend starke diffuse Anreicherung von Vanadium (c), Zirkonium (d), Kupfer (f) und Zink (f) in der Strommarke auf der Schweinehaut.

S-180, RE-Mode (b und e), EDAX 32 Genesis (a, c, d und f)

Wie in Abbildung 3.51 zu erkennen ist, kann nach Stromkontakt dagegen in *stark verhornter Fußsohlenhaut* mit einem hohen Widerstand nur punktuell Metall in der Haut nachgewiesen werden, auch wenn diese durchfeuchtet oder bei Versuchsdurchführung vollständig von Wasser umschlossen ist (siehe auch Kapitel 3.1.3.3).

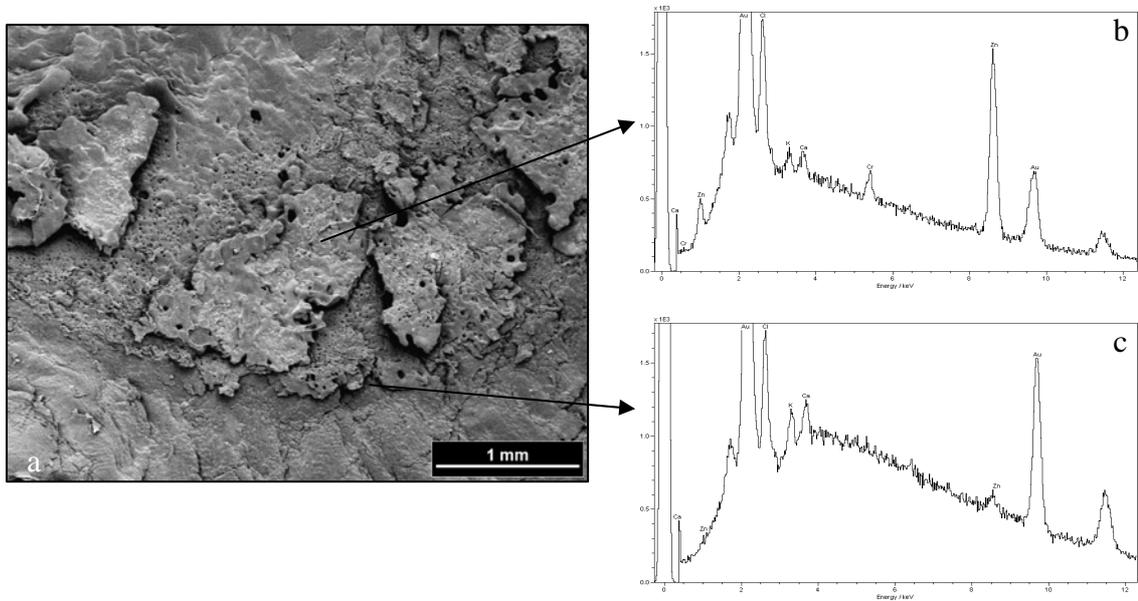


Abbildung 3.51

Strommarke (t~1 Sekunde) auf stark durchfeuchteter *Fußsohlenhaut* mittels Schraube 1(a): Nur punktueller Nachweis von Zink und Chrom innerhalb der Strommarke (b). Im Randbereich der Marke lässt sich ebenfalls eine Spur Zink nachweisen (c). Es finden sich weiterhin keine zur Umgebung helleren Bereiche innerhalb der Strommarke, eine insgesamt nur geringe morphologische Veränderung mit Bläschenbildung und ebenfalls wenige metallische Ablagerungen auf der Hautoberfläche.

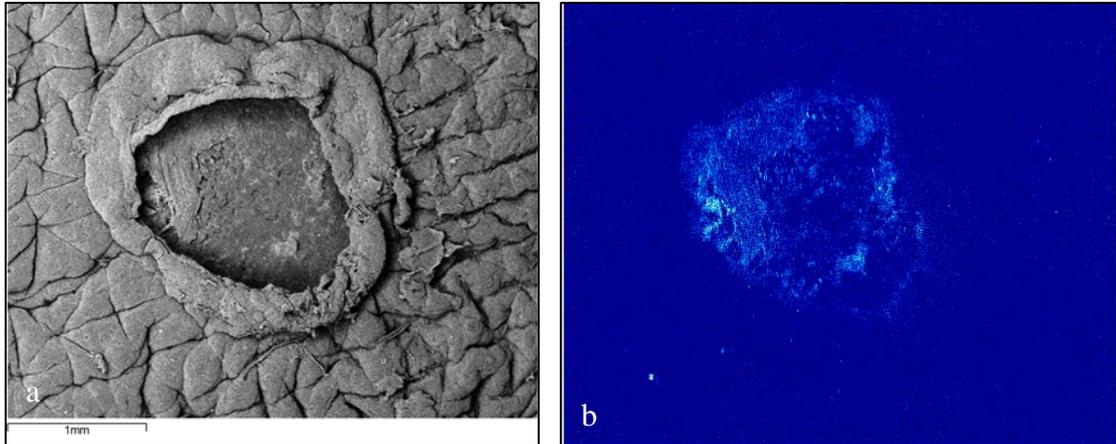
Goldbesputterung (Gold-Peak), S-180, RE-Mode (a), RÖNTEC X-flash-Detektor (b und c)

Fast immer kommt es bei Verwendung von *stark durchfeuchteter Haut*, zum Beispiel der Handoberfläche, zur ausgeprägten diffusen Metallverteilung im Hautgewebe der Strommarke. Häufig ist in diesen Fällen die Metallablagerung auf der Hautoberfläche mit metallischen Partikeln und Kugeln dafür nur gering ausgeprägt.

Bei *nicht durchfeuchteter, menschlicher Bauchhaut* schließlich variiert die Ausprägung der diffusen Metallisation in und auf der Haut in Abhängigkeit von der Stromstärke und der Stromflussdauer stark. Auch die Oberflächenablagerung von metallischen Partikeln und –kugeln kann entsprechend der verschiedenen Einflussfaktoren in ihrer Ausprägung differieren.

Randblasenbildung:

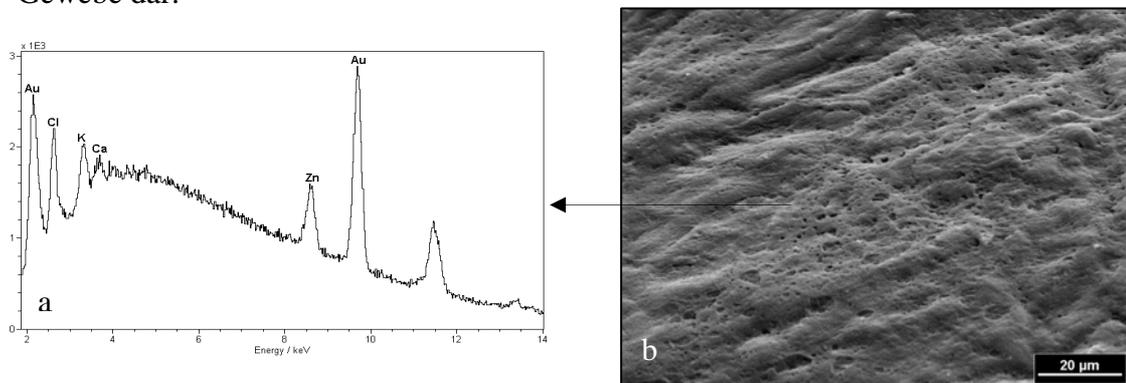
Werden Elementverteilungsbilder einer Strommarke mit Randblasenbildung (Kapitel 3.1.1.2) erstellt, so zeigt sich, dass es weniger im Bereich der Blasenbildung, sondern vielmehr im Bereich der direkten Elektrodenauflagefläche auf der Haut zu einer hauptsächlich diffusen Ablagerung von Elektrodenmaterial kommt (Abbildung 3.52).

**Abbildung 3.52**

Strommarkenerzeugung ($t \sim 1$ Sekunde) mittels des Stahlstabs:
Eisen findet sich in der Strommarke vor allem in der direkten Auflagefläche der Elektrode in Form einer diffusen Einlagerung auf und in die Haut. Es zeigen sich nur vereinzelte Eisenpartikel im Zentrum der Marke, auf der Randblase und weiter entfernt von der Strommarke.
S-180, RE-Mode (a), EDAX 32 Genesis (b)

Bläschenbildung:

Bei der im Kapitel 3.1.1.3 und 3.1.2.2 beschriebenen Bläschenbildung in der Haut nach Strommarkenerzeugung lassen sich ebenfalls mittels EDX-Analyse regelmäßig Metalle entsprechend der verwendeten Elektrode in der Haut nachweisen (Abbildung 3.53). Diese Bereiche stellen sich im RE-Modus jedoch nicht heller als das umgebende Gewebe dar.

**Abbildung 3.53**

Strommarke ($t \sim 0,2$ Sekunden) auf Fußsohlenhaut mittels verzinkter Edelstahlschraube:
Kaum morphologische Veränderungen mit Bläschenbildung (b), wenige Metallablagerungen auf der Hautoberfläche, Nachweis von Zink diffus in der Haut im Bereich der Bläschen (a).
Goldbespaltung (Gold-Peak), RÖNTEC X-flash-Detektor (a), S-180, RE-Mode (b)

3.1.3.2 Metallablagerungen in der Tiefe der Haut

Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen:

Fertigt man Paraffin- oder Kryoschnitte von Kurzzeitkontaktstrommarken bis 1 Sekunde an und untersucht die Querschnitte der Haut anschließend im REM mittels EDX, so kann, wie schon bei der Analyse der Hautoberfläche vermutet, Metall nicht nur im Oberflächenbereich, sondern diffus auch in tieferen Schichten der Epidermis nachgewiesen werden (Abbildung 3.55).

Weiterhin zeigen sich neben diesen diffus in der Haut verteilten Metallen sogar vereinzelte metallische Partikel und Kugeln in der Epidermis eingelagert. Diese befinden sich bei den in dieser Arbeit hergestellten *Kurzkontaktstrommarken* allerdings häufig nur in den oberen Bereichen der thermisch geschädigten Epidermis (Abbildung 3.54 und 3.55).

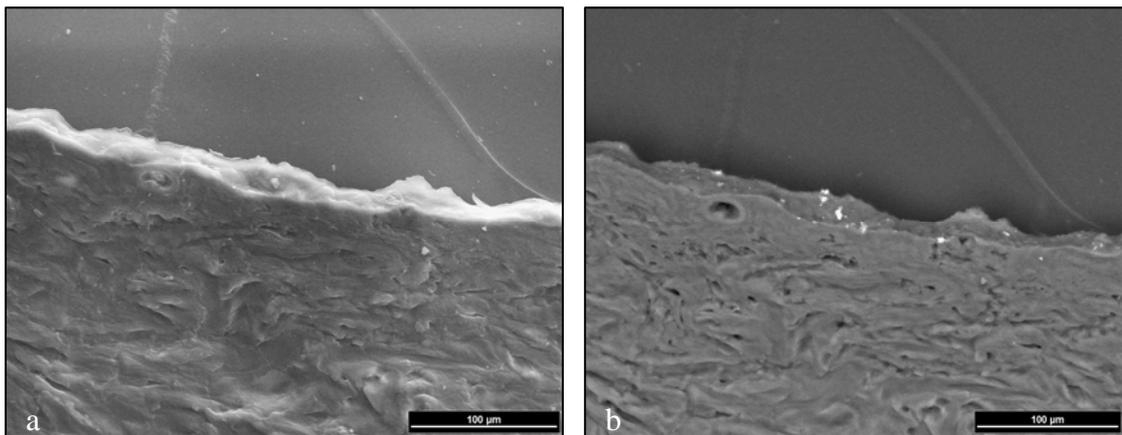
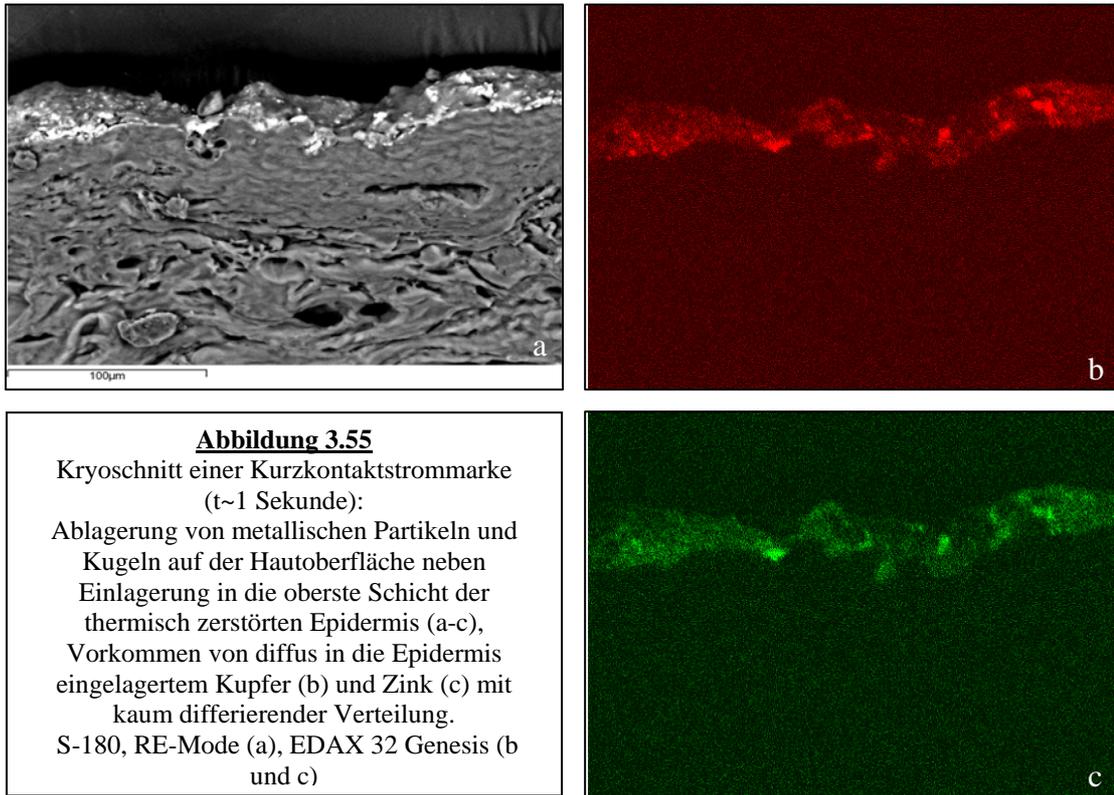


Abbildung 3.54

Kryoschnitt einer Kurzkontaktstrommarke ($t \sim 0,3$ Sekunden):
Einlagerung von metallischen Partikeln und Kugeln in der obersten Schicht der thermisch geschädigten Epidermis, nur schwach ausgeprägte diffuse Einlagerung von Metall.

S-180, SE-Mode (a), RE-Mode (b)

Das Vorhandensein metallischer Partikel und Kugeln nicht nur auf der Hautoberfläche, sondern auch innerhalb der obersten Schicht des thermisch zerstörten Epidermisgewebes lässt sich bereits bei der rasterelektronenmikroskopischen Betrachtung der Hautoberfläche aufgrund der größeren Austrittstiefe der Rückstreuелеktronen im RE-Bild darstellen.



Metallische Partikel und Kugeln, aber auch diffus in der Haut verteiltes Metall, können nicht nur innerhalb der oberen Epidermisschichten, sondern auch in tieferen epidermalen Strukturen nachgewiesen werden, wenn es zu einer stärkeren thermischen Zerstörung der Epidermis bei einerseits *höheren Stromstärken* (1-1,5 A) oder andererseits *zunehmender Kontaktdauer* (> 1 Sekunde) kommt. Je länger dabei der Stromkontakt bzw. je höher die Stromstärke ist, desto größer ist auch die Anzahl der eingelagerten metallischen Partikel und Kugeln. Die diffuse Verteilung von Metall in der Haut ist in beiden Fällen ebenfalls deutlich stärker ausgeprägt. Eine Metallanreicherung über die Epidermis hinaus in anderen Hautanteilen ist allerdings nicht vorhanden (Abbildung 3.56).

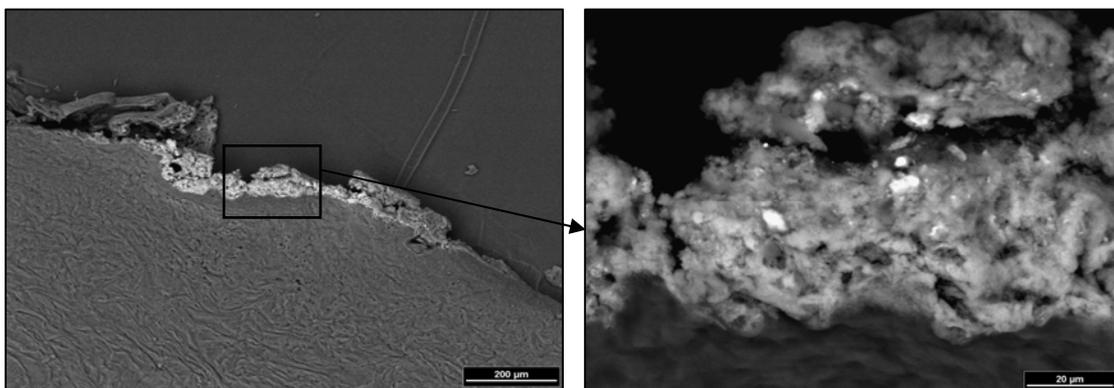
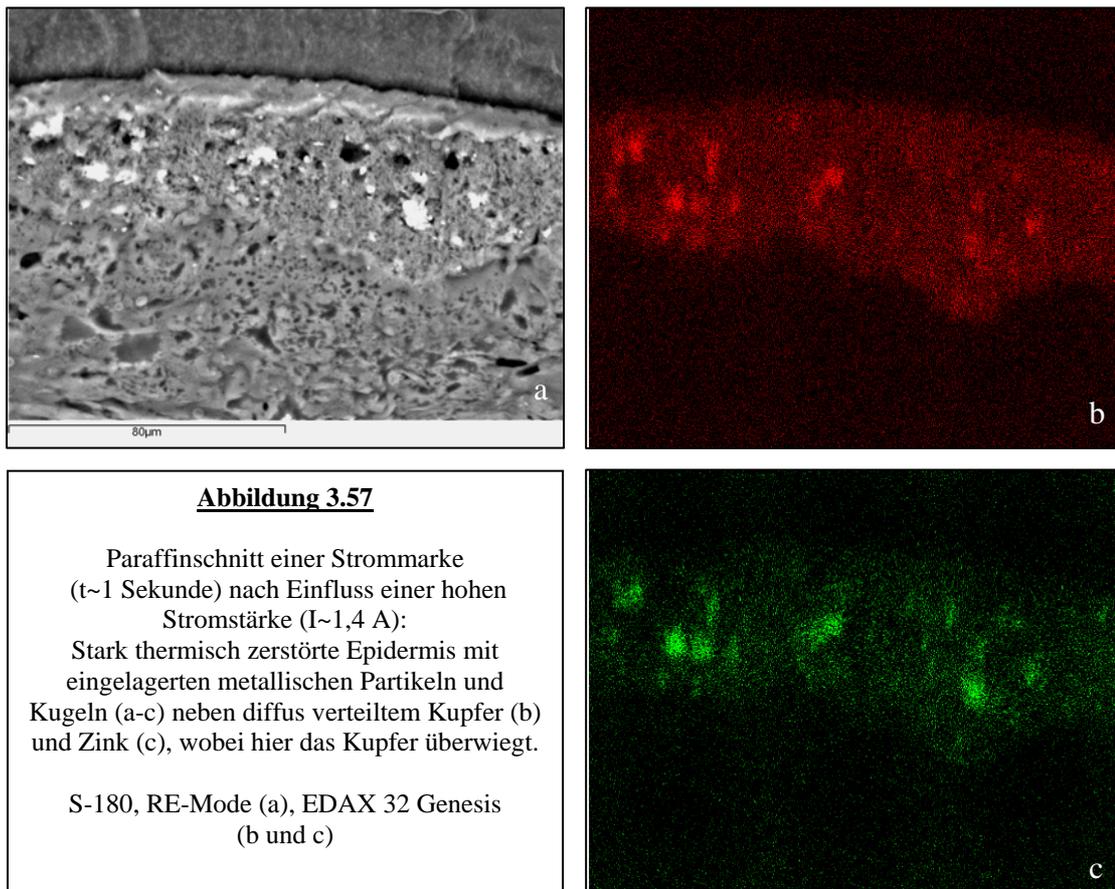


Abbildung 3.56
Kryoschnitt einer Kurzkontaktstrommarke (t~1 Sekunde) mit hoher Stromstärke (I~1,4 A): Starke thermische Zerstörung der Epidermis mit einer Vielzahl eingelagerter metallischer Partikel und Kugeln und einer intensiv diffusen Einlagerung von Metall in die Haut.

Elementverteilungsbilder der Epidermis einer mit höheren Stromstärken (1-1,5 A) erzeugten Strommarke zeigen die scharfe Begrenzung der diffusen Einlagerung von beispielsweise Kupfer oder Zink auf den Bereich der stärksten thermischen Zerstörung der Epidermis. Dabei sind in eben diesem Areal auch die eingelagerten metallischen Partikel und Kugeln zu finden (Abbildung 3.57).



Mittels EDX-Punktanalyse lässt sich gelegentlich bei Strommarken, welche eine insgesamt starke thermische Zerstörung auch tieferer epidermaler Schichten aufweisen, auch in der weniger geschädigten Epidermis unterhalb der beschriebenen koagulierten Zone diffus angereichertes Metall (vor allem Zink) nachweisen (Abbildung 3.58). Diese Areale sind weder im RE-Bild noch in Elementverteilungsbildern (Abbildung 3.57) sichtbar.

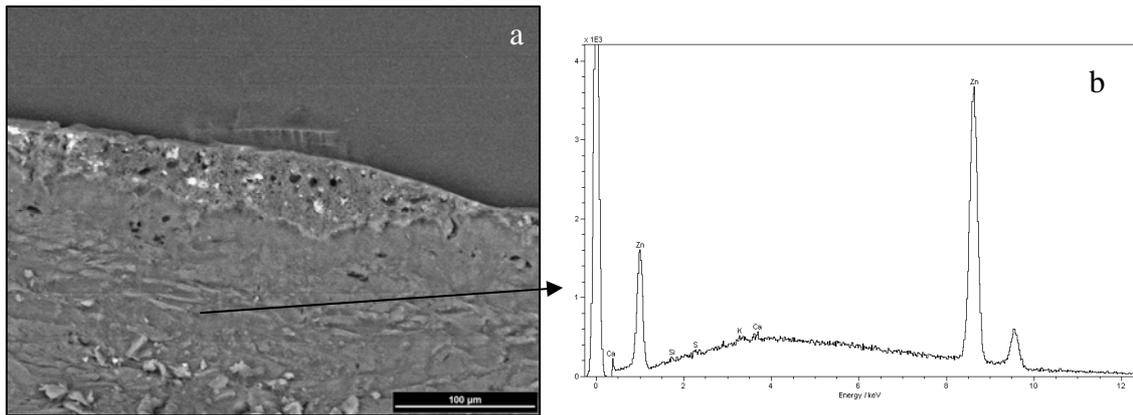


Abbildung 3.58

Paraffinschnitte einer Strommarke ($t \sim 1$ Sekunde) mit hoher Stromstärke ($I \sim 1,4$ A):
 Eingelagerte Metallpartikel und -kugeln im Bereich der stärksten epidermalen Zerstörung (a), im
 RE-Modus nicht sichtbare diffuse Zink-Einlagerung in die darunterliegende, thermisch weniger stark
 geschädigte Epidermis (b).
 S-180, RE-Mode (a), RÖNTEC X-flash-Detektor (b)

Histologische Untersuchungen:

Im HE-gefärbten histologischen Schnitt ist die oben beschriebene Zone aus stark zerstörter Epidermis mit einerseits diffus verteiltem Metall und andererseits eingelagerten metallischen Partikeln und Kugeln als diffus braune Schicht auf dem weniger zerstörten, darunterliegenden Hautgewebe zu identifizieren (Abbildung 3.59).

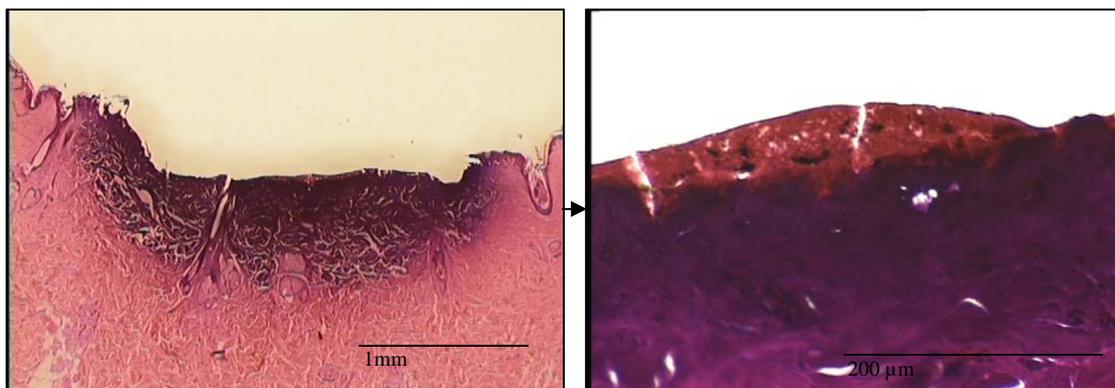


Abbildung 3.59

Paraffinschnitt einer Kurzkontaktstrommarke ($t \sim 1$ Sekunde) mit hoher Stromstärke ($I \sim 1,2$ A):
 Eingelagerte Metallpartikel und -kugeln im Bereich der stärksten epidermalen Zerstörung, wobei
 sich dieses Areal als braune Schicht von der weniger thermisch geschädigten unterliegenden Haut
 unterscheidet.

HE-Färbung, Lichtmikroskop Olympus BH-2

Zum Kupfernachweis in Strommarken wird eine DMABR-Färbung durchgeführt:

Durch diese kann vor allem bei Stromkontakten mit höheren Stromstärken (1-1,5 A) oder längerer Kontaktdauer (> 1 Sekunde) sowohl die diffuse Kupferanreicherung als

auch die beschriebene Einlagerung von metallischen Partikeln und Kugeln in tiefere Schichten der thermisch zerstörten Epidermis nachgewiesen werden (Abbildung 3.60, vergleiche Abbildungen 3.57 und 3.58).

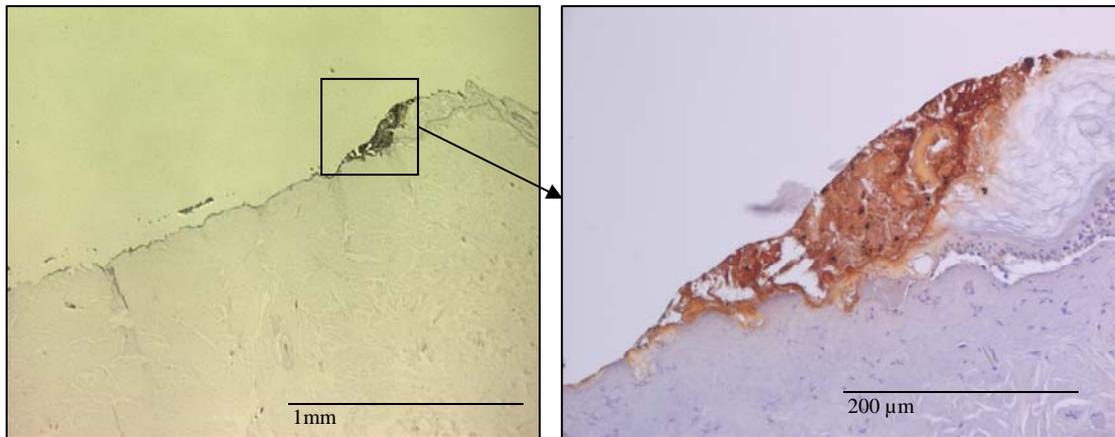


Abbildung 3.60

Strommarke mit längerem Kontakt ($t > 1$ Sekunde) und hoher Stromstärke ($I \sim 1,3$ A):
Starke thermische Zerstörung der Haut mit vor allem im Randbereich diffuser Kupferanreicherung
und Einlagerung von Kupferpartikeln.
DMABR-Färbung, Lichtmikroskop Olympus BH-2

Mittels dieser Färbung ist es ebenfalls möglich, die häufig nur schwache und oberflächliche Einlagerung von Metall in die thermisch zerstörte Epidermis bei Kurzkontaktstrommarken bis 1 Sekunde darzustellen. Kupferhaltiges Material findet sich hier nur als oberflächlich dünne, zum Teil abgelöste Schicht in der Strommarke, wobei es zu einer stärkeren Ansammlung mit eingelagerten Partikeln vor allem im Randbereich der Marke kommt.

Weiterhin kann Kupfer mittels DMABR-Färbung gelegentlich im Bereich der elongierten Basalzellen nachgewiesen werden, obwohl keine Zerstörung der darüberliegenden Epidermis stattgefunden hat (Abbildung 3.61).

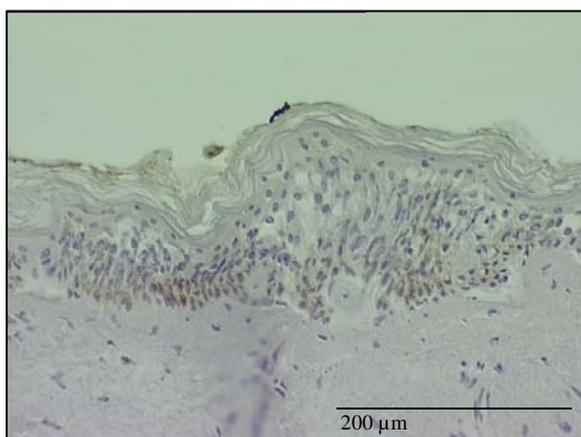


Abbildung 3.61

Kupfer-Nachweis auch im Bereich der elongierten Basalzellen neben Bläschenbildung der Hornhaut vor allem im Randbereich der Marke, im Zentrum der Strommarke kann Kupfer nur als oberflächlich dünne Schicht dargestellt werden.
DMABR-Färbung, Lichtmikroskop Olympus BH-2

Haare:

Bei der EDX-Analyse auf Metallanreicherungen an Haarschäften im REM findet sich dort weder in Kurzkontaktstrommarken bis 1 Sekunde noch nach Stromkontakten mit langer Kontaktdauer (> 1 Sekunde) oder hohen Stromstärken (1-1,5 A) ein Hinweis auf metallisches Material.

Lediglich bei der Anfärbung von Kupfer im histologischen Schnitt kann dieses Metall gelegentlich bei morphologisch intensiv ausgeprägten Strommarken entlang der Haarschäfte nachgewiesen werden (Abbildung 3.62).



Abbildung 3.62

Paraffinschnitt einer Strommarke (t~1 Sekunde) mit hoher Stromstärke (1,4 A):

Stark thermisch geschädigte Epidermis mit Verkohlung, diffus verteiltem Kupfer und eingelagerten Kupferpartikeln im Zentrum der Marke, Kupfer kann diffus auch im oberen Bereich der Haarschäfte nachgewiesen werden.

DMABR-Färbung, Lichtmikroskop Olympus BH-2

Gleichstrom:

Durch die Erstellung von Elementverteilungsbildern mittels Mikroröntgenfluoreszenzanalyse kann ebenfalls eine Beurteilung der Metallverteilung in der Tiefe des Hautgewebes nach Stromeinfluss erfolgen.

Das untenstehende Beispiel beruht auf einem Fall aus dem Sektionsgut der Universität Münster, bei dem das Opfer Kontakt mit einem stromführenden Leiter aus verzinktem Eisen (Gleichstrom) hatte und an den Folgen des Stromkontaktes verstarb. Von der in Paraffin eingebetteten Strommarke wurden im Verlaufe der Ermittlungen unter anderem mit dem EAGLE III Micro-XRF Benchtop Analyzer Elementverteilungsbilder von Eisen und Zink erstellt, wobei sich das gesamte Paraffinblöckchen zur Untersuchung in das Gerät einbauen ließ (Abbildung 3.63). Wie in den Verteilungsbildern ersichtlich, kann in der Strommarke eine zum Teil unterschiedliche Verteilung von Eisen und Zink in der Tiefe der Haut nachgewiesen werden. Zwar können in vielen Bereichen beide Metalle detektiert werden, jedoch finden sich auch Ansammlungen, in denen dann jeweils nur eines der beiden Elemente vorkommt. Weiterhin auffällig ist

ein stärkeres Eindringen von Zink in tiefere Schichten der Epidermis, wohingegen Eisen hauptsächlich an der Hautoberfläche lokalisiert ist.

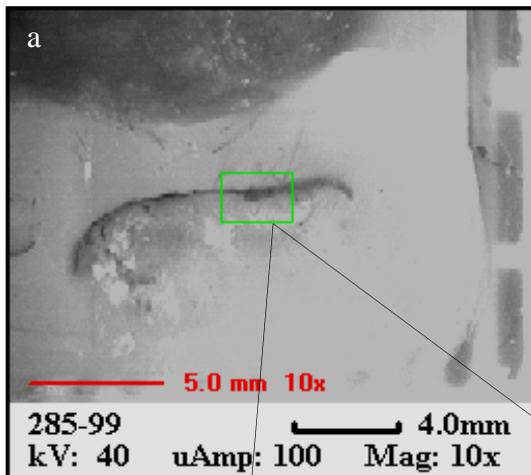
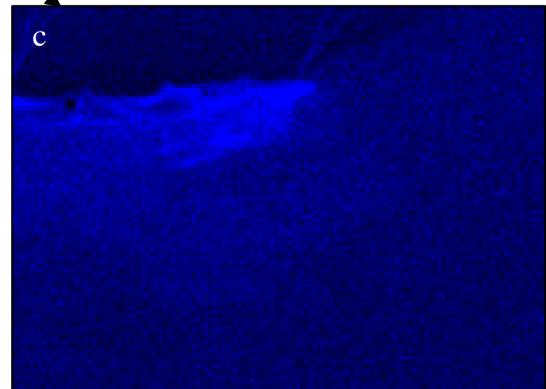
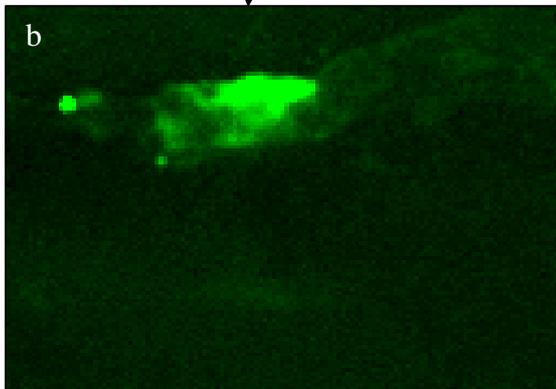


Abbildung 3.63

Elementverteilungsbilder von Eisen (b) und Zink (c) mittels Mikroröntgenfluoreszenzanalyse einer in Paraffin eingebetteten Gleichstromstrommarke (a): Verschiedene Verteilung von Eisen und Zink in der Epidermis.

EAGLE III Micro-XRF Benchtop Analyzer der Firma EDAX



In beschriebenem Fall sind weiterhin Verteilungsbilder von Phosphat und Schwefel erstellt worden, in welchen sich die Haarschäfte darstellen (Abbildung 3.64). Ein Vergleich der vier Mappings zeigt, dass weder Kupfer noch Zink entlang der Haare in die Tiefe der Epidermis eingedrungen ist.

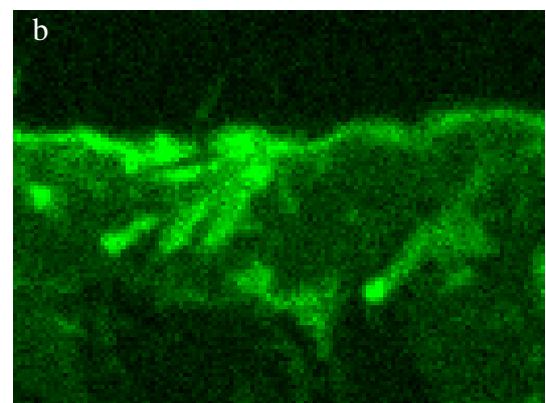
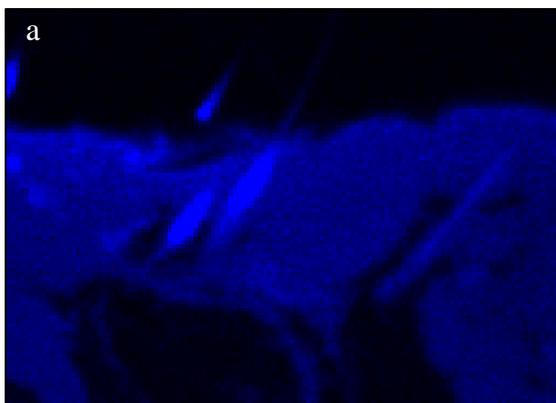


Abbildung 3.64

Elementverteilungsbilder der Gleichstromstrommarke aus Abbildung 3.63 von Schwefel (a) und Phosphat (b) mit Darstellung der Haarschäfte: Der Vergleich mit dem Zink- und Eisenverteilungsbild zeigt, dass beide Metalle unabhängig von den Haaren in die Tiefe des Gewebes eingedrungen sind.

EAGLE III Micro-XRF Benchtop Analyzer

3.1.3.3 Metallisation von Strommarken auf im Wasser gelagerter Haut

Im Hinblick auf die im Kapitel 1.5 beschriebene Kasuistik werden Strommarken auch auf in Wasser befindlicher Haut erzeugt. Die Metallisation einer unter Wasser erzeugten Strommarke ähnelt dabei grundsätzlich einer an Luft erzeugten Strommarke. Auch hier finden sich metallische Kugeln und Partikel. Weiterhin ist Metall diffus auf und im Hautgewebe abgelagert. Dennoch zeigen sich einige Unterschiede, welche im Folgenden erläutert werden.

Vorversuche: Leit-Tab auf REM-Halter

Wird bei Versuchsdurchführung ein Leit-Tab in einer mit Leitungswasser gefüllten Plastikwanne gelagert und auf diesem eine Strommarke erzeugt, so kommt es bei Annäherung von Elektrode und Leit-Tab auch unter Wasser zur Funkenbildung. Im REM lassen sich anschließend vereinzelte Kugeln (Abbildung 3.65) und metallische Partikel, welche sich häufig am Rand der Marke verdichten (Abbildung 3.66), auf der Leit-Tab-Oberfläche nachweisen.

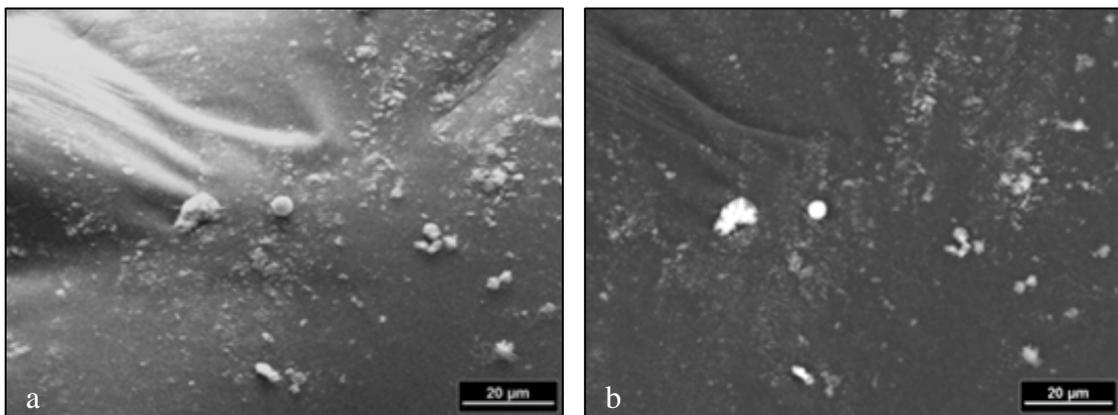


Abbildung 3.65

Eisenkugel auf der Leit-Tab-Oberfläche nach elektrischer Entladung unter Wasser, Umgebung: Eisen- und Nickel-Partikel mit Spuren von Cadmium und CaCl-Ablagerungen.

S-180, SE-Mode (a), RE-Mode (b)

Tendenziell überwiegen bei Strommarkenerzeugung auf einem nicht im Wasser gelagerten Leit-Tab fast immer die Metallkugeln auf der Oberfläche (Kapitel 3.1.3.1.1), wohingegen bei wasserumschlossener Probe, trotz gelegentlich sichtbarer Funkenbildung, dort in den meisten Fällen metallische Partikel zu finden sind.

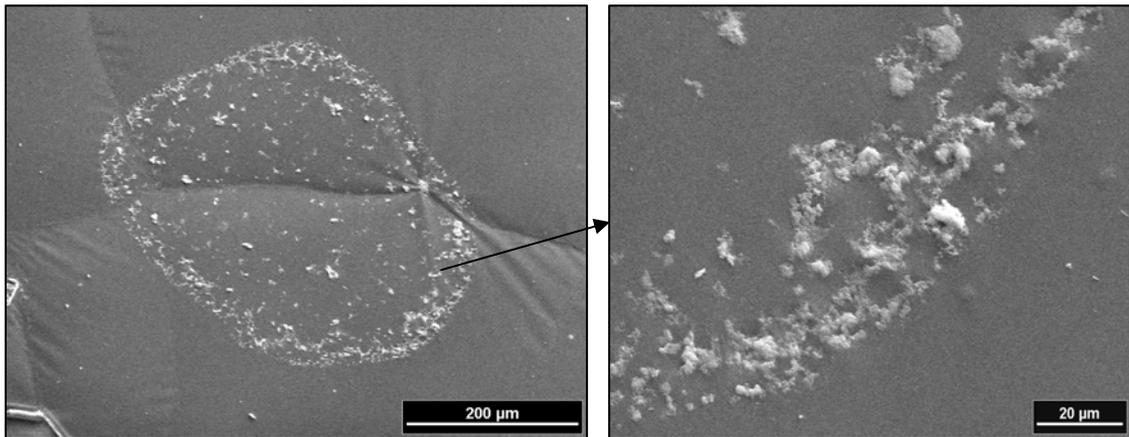


Abbildung 3.66

Kurzkontaktstrommarke auf einem im Wasser befindlichen Leit-Tab mittels der stumpfen Seite des Messingstabs:

Kaum thermische Schäden in der Kohleschicht, Cu/Zn-Partikel im Bereich der Elektrodenauflagefläche mit Verdichtung am Rand der Marke.

S-180, SE-Mode

Bei Verwendung des Messingstabs finden sich neben Kupfer- und Zink- auch Bleiablagerungen und bei Benutzung der vernickelten Eisenschraube neben Eisen- und Nickel- zusätzlich *Cadmium*ablagerungen auf der Leit-Tab-Oberfläche. Sowohl Blei als auch Cadmium lassen sich bei Durchführung entsprechender Versuche an Luft nie nachweisen.

Hautversuche:

Bei Erzeugung einer Kurzkontaktstrommarke auf im Wasser gelagerter Schweine- oder Menschenhaut kann es ebenfalls zur Funkenbildung mit Ablagerung von metallischen Kugeln und Partikeln auf der Probenoberfläche kommen. Dies ist jedoch deutlich seltener als bei den Leit-Tab-Versuchen der Fall und kommt am häufigsten bei der Fußsohlenhaut mit ihrem hohen Widerstand vor (Abbildung 3.67).

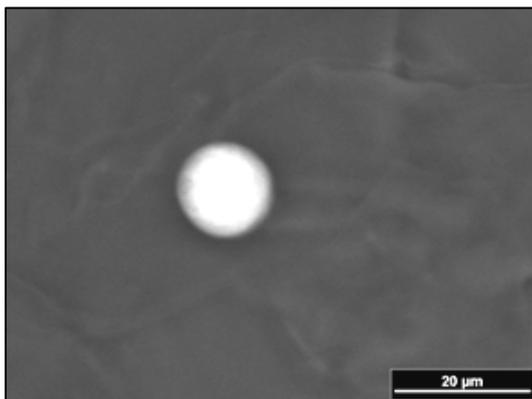


Abbildung 3.67

Cu/Zn-Kugel auf Fußsohlenhaut nach Funkenentwicklung unter Wasser.

S-180, RE-Mode

In im wässrigen Milieu entstehenden Strommarken kann neben metallischen Partikeln (Kapitel 3.1.3.1.2) und seltener Metallkugeln (Kapitel 3.1.3.1.1) häufig auch diffus auf und im Gewebe verteiltes Metall (Kapitel 3.1.3.1.3 und 3.1.3.2) nachgewiesen werden. Dabei beeinflusst die Wahl der für die Versuche verwendeten Hautart mit ihren verschiedenen Widerständen die diffuse Metallverteilung im Hautgewebe zusätzlich. So bildet sich beispielsweise auf der *Schweinehaut* bei Verwendung der stumpfen Seite des Messingstabs und Stromflussdauer von etwa einer Sekunde eine runde Strommarke aus, welche kaum morphologische Veränderungen (Kapitel 3.1.1.1) aufweist. In dieser Strommarke sind Metalle hauptsächlich diffus auf und im Hautgewebe nachzuweisen (Abbildung 3.68). Auf der Hautoberfläche abgelagerte Kupfer/ Zink-Partikel finden sich nur sporadisch, metallische Kugeln gar nicht (vergleiche Abbildung 3.50).

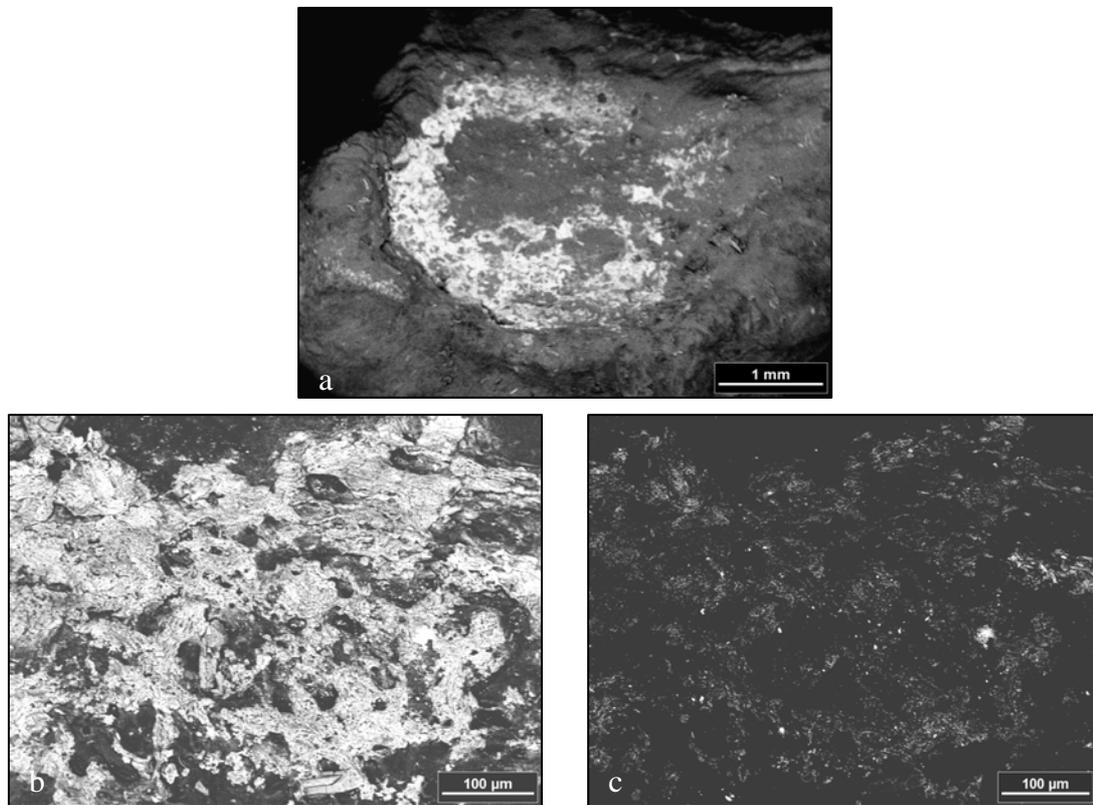


Abbildung 3.68

Strommarke ($t \sim 1$ Sekunde) auf in Leitungswasser befindlicher *Schweinehaut* mittels der stumpfen Seite des Messingstabs:
Die runde Strommarke (a) zeigt vor allem am Rand eine hohe Konzentration von Kupfer und Zink diffus auf und in der Haut (b) und der Haut aufgelagerte Cu/Zn-Partikel (c).
S-180, RE-Mode

Wird dagegen zur Erzeugung einer Strommarke die menschliche *Fußsohlenhaut* mit ihrem deutlich höheren Widerstand benutzt, so zeigt sich eine noch geringer ausgeprägte morphologische Veränderung der Haut, wobei der klassische Abdruck der

Elektrode sogar ganz fehlen kann. Es lassen sich auch nur wenige Areale von diffus auf und im Hautgewebe abgelagertem Metall nachweisen (Abbildungen 3.69 und 3.70). Oberflächliche Metallisation findet man hier ebenfalls nur punktuell und unregelmäßig über die Marke verteilt. Die wenigen abgelagerten Metallpartikel bestehen aus Nickel, Gold und einer Spur von Zink. Metallische Kugeln finden sich nicht (vergleiche Abbildung 3.51).

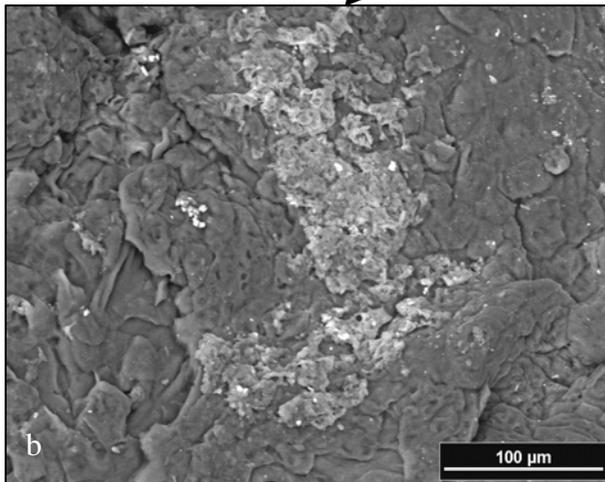
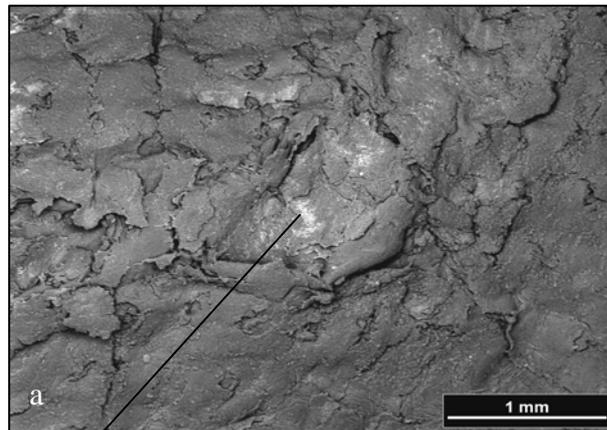


Abbildung 3.69
Strommarke (t~1 Sekunde) auf in Leitungswasser gelagerter, durchfeuchteter *Fußsohlenhaut* mittels des vergoldeten und vernickelten Messingbananensteckers:
Kaum morphologische Veränderung der Haut (a), isolierte Areale mit diffus auf und in der Haut befindlichem Metall und nur vereinzelte auf der Oberfläche abgelagerte Partikel aus Nickel, Zink und Gold im Bereich der Strommarke (b).
S-180, RE-Mode

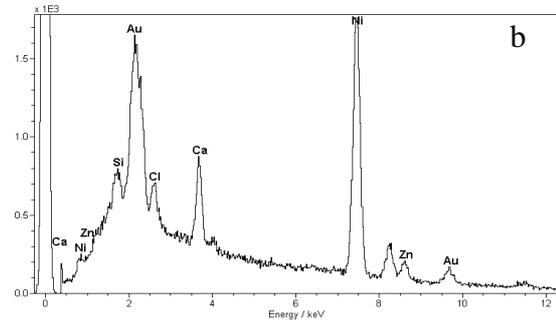
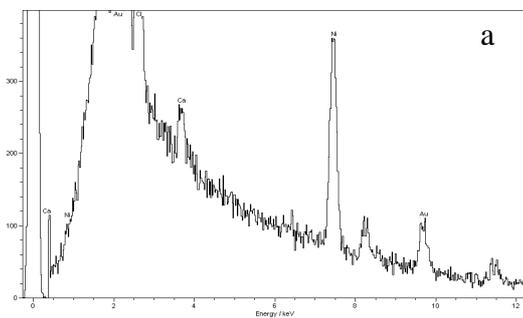


Abbildung 3.70
Nachweis von diffus auf und in der Strommarke der Abbildung 3.69 eingelagertem Gold und Nickel (a), Nachweis von Nickel, Zink und Gold in einem der in der Strommarke abgelagerten Partikel (b).
RÖNTEC X-flash-Detektor

Bei Strommarkenerzeugung auf vollständig von Wasser umschlossener Haut überwiegt somit die diffuse Einlagerung von Metall auf und in die Haut, während bei Markenerzeugung an Luft häufiger auf der Oberfläche abgelagertes metallisches Material zu finden ist. Dabei kommt es bei wasserumschlossener Haut zur Ablagerung von mehr metallischen Partikeln als von Metallkugeln auf der Probenoberfläche.

So lassen sich bei Erzeugung einer Strommarke ($t \sim 1$ Sekunde) an Luft fast immer metallische Partikel und Metallkugeln auf der Probenoberfläche, aber eine nur geringe Konzentration von diffus auf und in der Haut verteiltem Metall, welches dann vornehmlich in der Mitte der Strommarke zu sehen ist, nachweisen. Überführt man die Haut dagegen in Wasser und stellt unter gleichen Versuchsbedingungen eine Strommarke ($t \sim 1$ Sekunde) her, so lassen sich im gesamten Kontaktbereich zwischen Elektrode und Haut starke diffuse Anreicherungen von Metall in und auf der Haut nachweisen (Abbildung 3.71 und 72). In diesem Fall finden sich dann jedoch nur wenige oberflächliche Ablagerungen im Sinne von Partikeln und Kugeln.

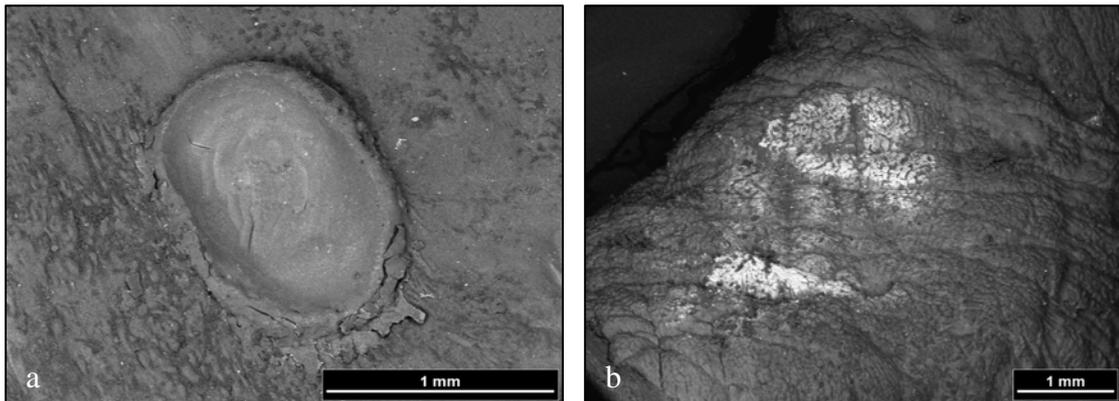


Abbildung 3.71

Strommarken ($t \sim 1$ Sekunde) mittels stumpfer Seite des Messingstabs und Lagerung der Haut bei Versuchsdurchführung an Luft (a) bzw. im Wasser (b):

Differierender Grad der morphologischen Schädigung, kaum diffuse Einlagerung von Metall auf und in die Haut bei an Luft gelagerter Haut (a), dagegen zeigen sich viele helle Bereiche mit diffuser Metalleinlagerung im Bereich der Elektrodenkontaktfläche bei der im Wasser gelagerten Haut.

S-180, RE-Mode

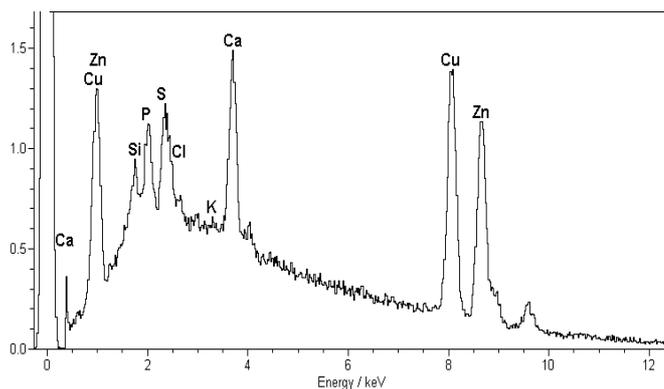


Abbildung 3.72

Nachweis von diffusem Kupfer und Zink in den Strommarken der Abbildung 3.71.

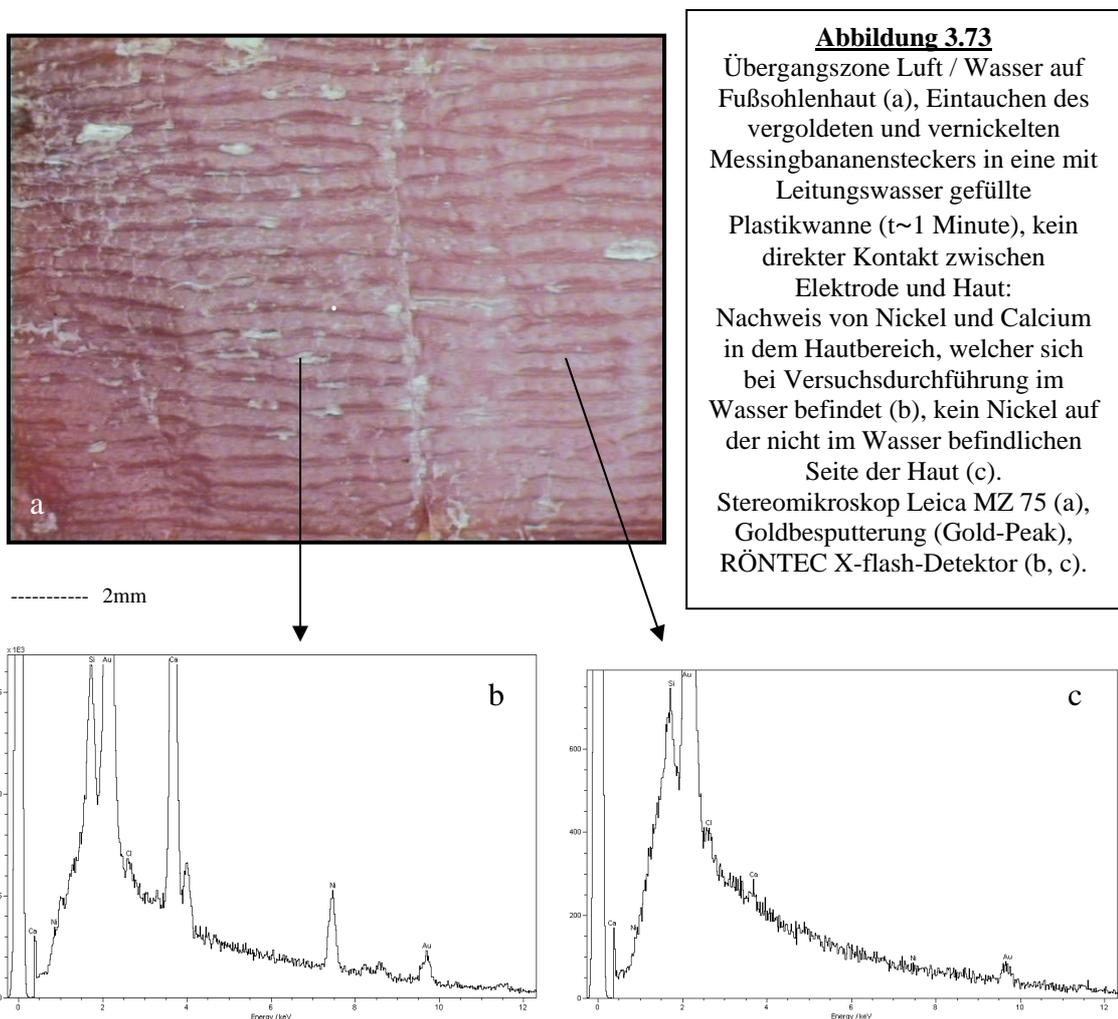
RÖNTEC X-flash-Detektor

3.1.3.3.1 Metallablagerungen auf nicht thermisch geschädigter Haut

Neben der Strommarkenerzeugung auf in Wasser gelagerter Haut werden weiterhin Experimente durchgeführt, bei denen eine Elektrode mit einem Abstand von ca. 1 cm für etwa 20 Sekunden über die im Wasser befindliche Haut gehalten wird ohne einen Kontakt zu ihr herzustellen. Der Stromkreisschluss erfolgt bei Eintauchen der Elektrode ins Wasser.

Bei Strommarkenerzeugung im wässrigen Milieu lässt sich mittels EDX regelmäßig *diffus verteiltes Metall* auch auf der unbeschädigten Haut, welche der Strommarke benachbart ist, nachweisen. Diese Areale erscheinen im RE-Modus nicht heller.

Wird keine Strommarke auf der Haut erzeugt, sondern die stromführende Elektrode nur für einige Zeit ohne Kontakt zur Haut im Wasser belassen, so kann ebenfalls im gesamten Bereich der bei Versuchsdurchführung von Wasser umschlossenen Haut neben Calcium Metall diffus auf der Oberfläche nachgewiesen werden. Der bei Stromfluss nicht im Wasser gelagerte Hautteil dagegen weist keine Calcium- und Metallablagerungen auf (Abbildung 3.73).



Wird eine Elektrode in einigem Abstand zur Haut ins Wasser gehalten und keine Strommarke erzeugt, so können trotzdem gelegentlich *metallische Partikel* und sogar *Metallkugeln* auf der Hautoberfläche nachgewiesen werden, obwohl es zu keinem Kontakt mit sichtbarem elektrischen Überschlag zwischen Elektrode und Haut gekommen ist.

So finden sich bei Benutzung des Messingstabs zum Beispiel großflächig verteilte Messingpartikel, häufig auch in Depotform, mit variablem Kupfer/ Zink-Verhältnis (Abbildung 3.74) und häufig nur Spuren von Zink.

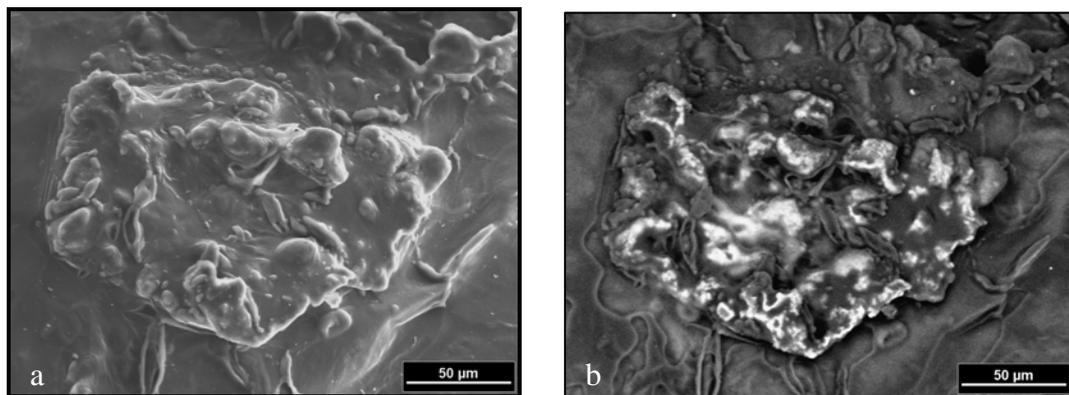


Abbildung 3.74

Messing in Depotform abgelagert auf Fußsohlenhaut nach 20-sekündigem Stromfluss, wobei die Messingelektrode in eine mit Leitungswasser gefüllte Plastikwanne getaucht wird, Abstand zwischen Elektrode und Haut etwa 1 cm, kein Kontakt zur Haut, keine sichtbare Funkenbildung.
S-180, SE-Mode (a), RE-Mode (b)

Bei Verwendung des vergoldeten und vernickelten Messingbananensteckers können, allerdings nicht so ausgeprägt wie bei dem Messingstab, Kupfer/ Zink-Partikel mit fast immer nur Spuren von Kupfer (Abbildung 3.75), Zink-Partikel und schließlich vereinzelte Kugeln aus Kupfer, Zink und Nickel dargestellt werden.

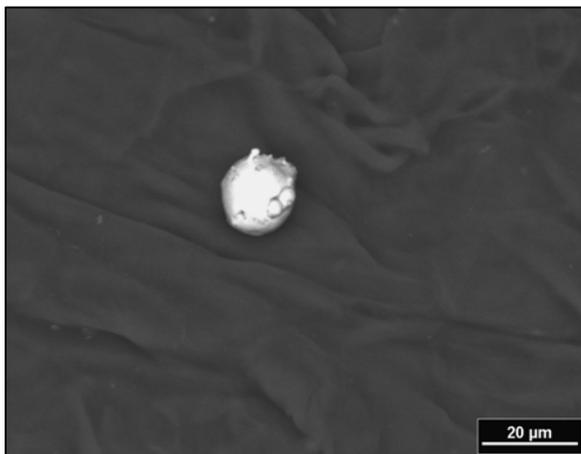


Abbildung 3.75

Runder Partikel aus Kupfer, Nickel und einer Spur von Zink nach Stromfluss von etwa 20 Sekunden, wobei der vergoldete und vernickelte Messingbananenstecker in einem Abstand von etwa 1 cm zu der im Wasser befindlichen Haut gehalten wird.

S-180, RE-Mode

Vergrößert sich der Abstand der jeweils ins Wasser getauchten Elektrode zur Haut, so treten keine geformten metallischen Ablagerungen auf der Hautoberfläche mehr auf.

3.1.3.3.2 Kristallablagerungen

Nebenbefundlich können häufig in Experimenten, bei denen entweder eine Strommarke auf wasserumschlossener Haut erzeugt oder bei denen eine Elektrode mit einem Abstand von etwa 1 cm für etwa 20 Sekunden über die im Wasser befindliche Haut gehalten wird, ohne einen Kontakt zu ihr herzustellen, auf der Hautoberfläche abgelagerte *Kristalle* dargestellt werden.

So treten bei Strommarkenerzeugung auf vollständig von Wasser umschlossener Schweinehaut in einigen Versuchen *Magnesiumphosphat*kristalle in Nachbarschaft zur eigentlichen Marke auf der Haut auf (Abbildung 3.76).

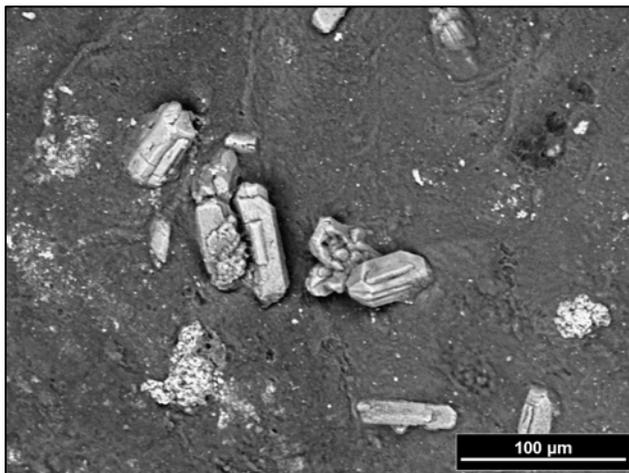


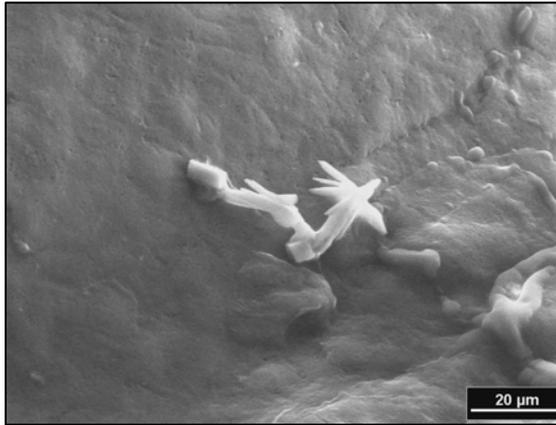
Abbildung 3.76

Abgelagerte Magnesiumphosphatkristalle bei Strommarkenerzeugung auf im Wasser gelagerter Schweinehaut mittels der vergoldeten und verzinkten Messingelektrode.

S-180, SE-Mode

Wird die Schweinehaut nur zur Hälfte ins Wasser getaucht und eine Strommarke im wässrigen Milieu erzeugt, so können in einem der Versuche im Bereich des Überganges zwischen Wasser und Luft eine Vielzahl von ovalen *Calciumphosphat*- und *Calciumoxalat* - Kristallen auf der im Wasser befindlichen Hautoberfläche nachgewiesen werden.

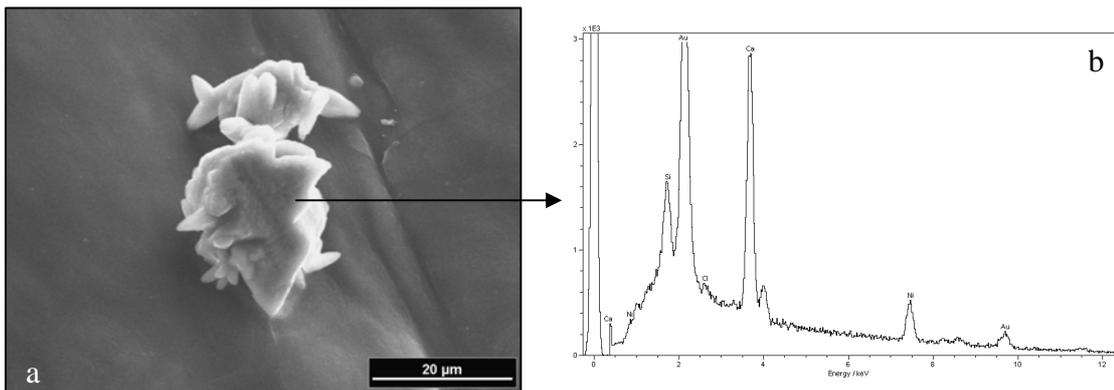
Häufig handelt es sich bei den darstellbaren kristallinen Strukturen aber um *Kalk*-kristalle (Abbildung 3.77 und 3.78), wobei diese auch bei identischem Versuchsaufbau nicht in allen Fällen zu finden sind.

**Abbildung 3.77**

Kalkkristall auf der Oberfläche der menschlichen Fußsohlenhaut nach Stromfluss von etwa 20 Sekunden mittels Eintauchen von Schraube 2 in eine mit Leitungswasser gefüllte Plastikwanne, kein direkter Kontakt zwischen Elektrode und Haut.

S-180, SE-Mode

In den meisten Versuchen finden sich Kalkkristalle auf der gesamten von Wasser umschlossenen Hautoberfläche verteilt, wobei sich eine Häufung an der Grenzfläche von Wasser zu Luft abzeichnet. Häufig lässt sich in den Kalkkristallen mittels EDX auch eine Spur von Metall nachweisen (Abbildung 3.78).

**Abbildung 3.78**

Kalkkristall auf der Oberfläche menschlicher Fußsohlenhaut nach Stromfluss von etwa 20 Sekunden mittels Eintauchen des vergoldeten und vernickelten Messingbananensteckers in eine mit Leitungswasser gefüllte Plastikwanne, kein direkter Kontakt zwischen Elektrode und Haut (a).

Mittels EDX ist eine Spur Nickel im Kristall nachzuweisen (b).

S-180, SE-Mode (a), Goldbesputterung (Gold-Peak), RÖNTEC X-flash-Detektor (b)

Hält man die stromführende Elektrode in einem größeren Abstand (> 1 cm) zur Haut ins Wasser, treten keine großkristallinen Salze mehr auf der Hautoberfläche auf.

So finden sich beispielsweise bei Benutzung der Messingelektrode keine Kalkkristalle auf der Hautoberfläche, wenn zwischen Elektrode und Haut ein Abstand von etwa 4 cm und ein Widerstand von etwa 2 M Ohm besteht. Dies ist auch dann nicht der Fall, wenn die Stromflussdauer etwa 10 Minuten beträgt.

In den Versuchen werden diffuse Kalkablagerungen ohnehin deutlich häufiger als großkristalliner Kalk (Abbildung 3.77 und 3.78) gefunden. Erstere zeigen sich ebenfalls, wenn entweder eine Strommarke unter Wasser erzeugt wird oder wenn die jeweilige Elektrode in einigem Abstand zur Haut ins Wasser getaucht wird. Dabei fällt

eine deutliche Zunahme der Kalkpartikelzahl auf, je länger der Strom fließt (Abbildung 3.79).

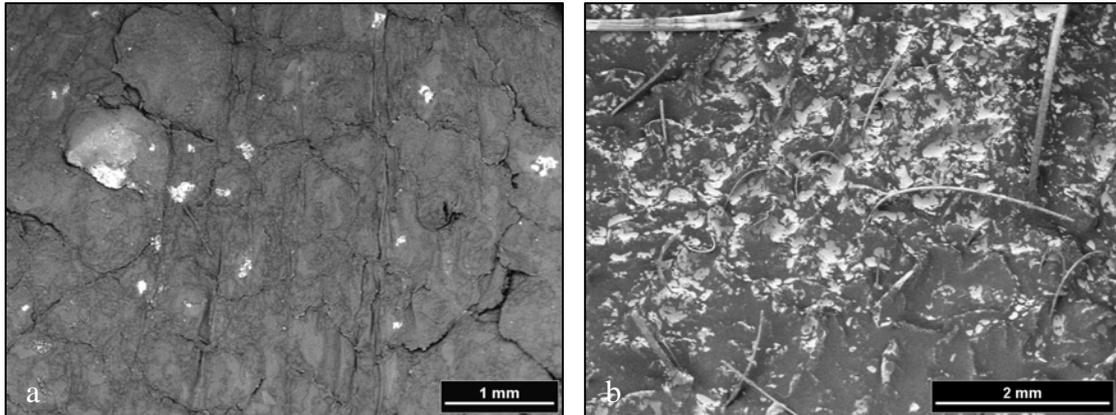


Abbildung 3.79

Diffuse Kalkablagerungen auf Fußsohlenhaut (a) und Haut der behaarten Handoberfläche (b) nach Stromfluss von etwa 20 Sekunden (a) bzw. 5 Minuten (b), wobei der Messingstab in eine mit Leitungswasser gefüllte Plastikwanne getaucht wird und der Abstand zwischen Elektrode und Haut 1 cm (a) bzw. 4 cm (b) beträgt.
S-180, RE-Mode

Dennoch treten vereinzelte, diffuse Kalk- und Calciumphosphatpartikel auf der Hautoberfläche auch dann auf, wenn der FI-Schalter den Stromkreis aufgrund des entstehenden Fehlerstromes schon kurz nach Eintauchen der Elektrode ins Wasser, also nur sehr kurzer Stromflusszeit, unterbricht.

Diffus abgelagerter Kalk, in dem sich immer auch Zink nachweisen lässt, findet sich zudem regelmäßig auf den Haaren der bei Versuchsdurchführung im Wasser gelagerten Haut (Abbildung 3.80).

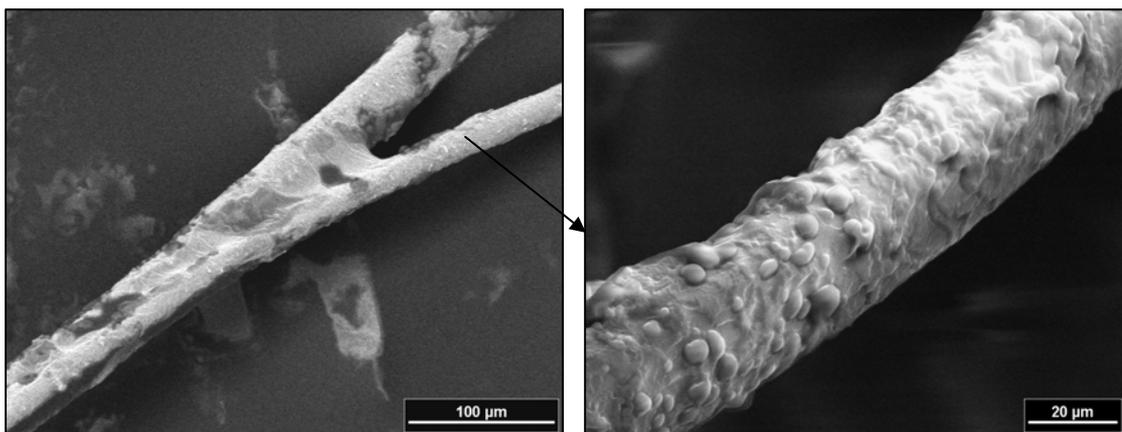


Abbildung 3.80

Starke Kalkablagerungen auf menschlichem Haar nach Stromfluss mittels des Messingstabs, der für 5 Minuten mit einem Abstand von 4 cm zu der halb aus dem Wasser herausragenden Haut der Handoberfläche in eine mit Leitungswasser gefüllte Plastikwanne gehalten wird:
Im abgelagerten Kalk kann Zink nachgewiesen werden.
S-180, RE-Mode

Letztlich kann großkristalliner Kalk neben hauptsächlich diffusen Kalkablagerungen in einigen Fällen sogar auf mit Leitungswasser nur *befeuchteter* Menschenhaut nachgewiesen werden.

3.1.4 FI-Schalter

Eine besondere Bedeutung kommt FI-Schalter abgesicherten Stromkreisen zu. In den Experimenten dieser Arbeit kommt es zur FI-Schalter vermittelten Abschaltung des Stromkreises häufig nur dann, wenn zwischen verwendeter Haut und unterliegender Zink-Platte eine gute Leitfähigkeit besteht, weiterhin die zur Versuchsdurchführung verwendete Haut nur einen geringen Widerstand und eine hohe Leitfähigkeit aufweist und letztlich ein genügend hoher Anpressdruck der Elektrode auf die Haut besteht.

Morphologie und Metallisation:

Wird zur Versuchsdurchführung beispielsweise nicht durchfeuchtete Bauchhaut verwendet, so ist nach Abschalten des FI-Schalters häufig eine Strommarke kaum sichtbar und die thermische Schädigung der Haut nur sehr gering ausgeprägt (Abbildung 3.81).

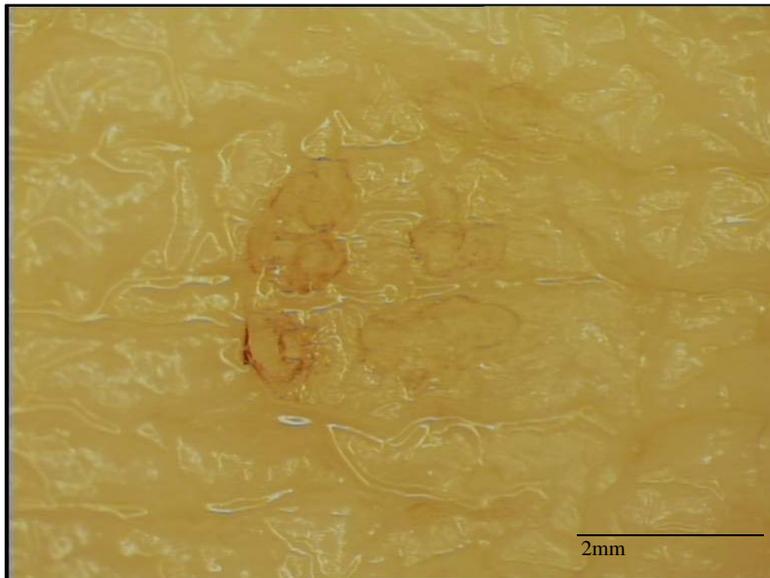
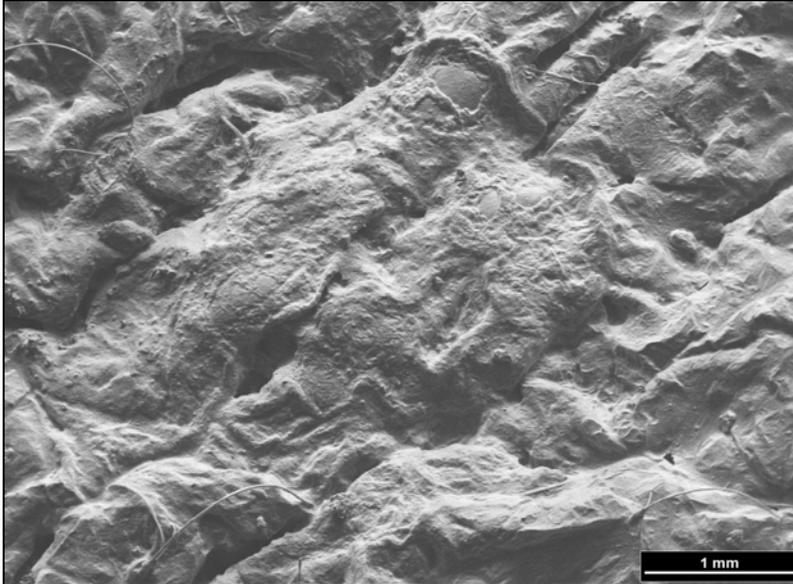


Abbildung 3.81

Strommarke mittels stumpfer Seite des Messingstabs auf nicht durchfeuchteter Bauchhaut nach Abschalten des Stroms durch den FI-Schalter: Kaum sichtbare Strommarke mit nur geringer thermischer Schädigung des Hautgewebes.
Stereomikroskop Leica MZ 75

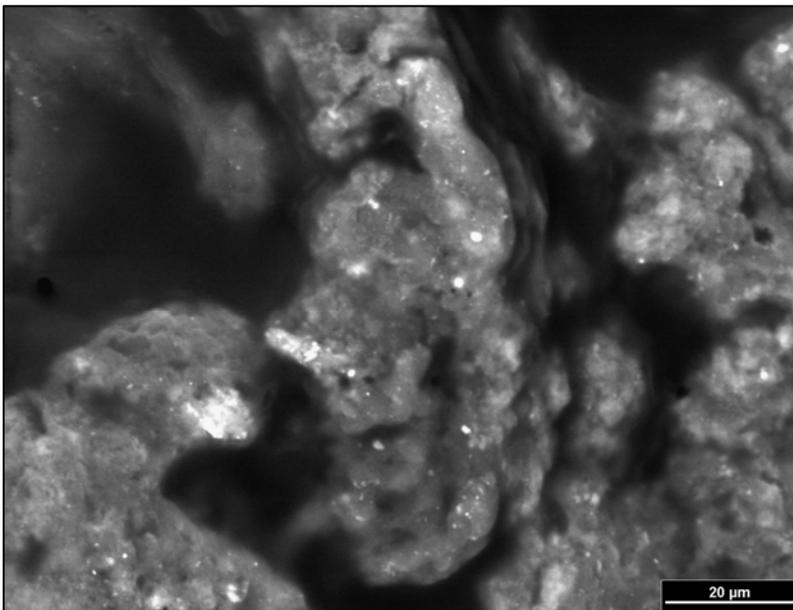
Auch bei der Betrachtung der Strommarke aus Abbildung 3.81 im REM zeigt sich, wie schon im Stereomikroskop, eine nur leichte thermische Veränderung der Haut (Abbildung 3.82).

**Abbildung 3.82**

Rasterelektronenmikroskopische Darstellung der Strommarke aus Abbildung 3.81.

S-180, SE-Mode

Trotz der sehr kurzen Stromflusszeit lässt sich mittels Punktanalyse eine erstaunlich große Anzahl von metallischen Partikeln, vorwiegend aus Zink und Kupfer, aber auch aus reinem Zink, weiter Messingkugeln und vereinzelt Blei-Partikel nachweisen (Abbildung 3.83). Auffällig bei den sehr kurzen Stromflusszeiten ist eine höhere Anzahl von reinen Zinkpartikeln, welche bei längeren Stromflusszeiten um eine Sekunde seltener zu finden sind.

**Abbildung 3.83**

Strommarke auf Bauchhaut mittels des Messingstabs nach Abschalten des FI-Schalters:

Metall diffus im Gewebe mit aufgelagerten Metallpartikeln und metallischen Kugeln, die Anzahl der Zinkpartikel überwiegt tendenziell der Anzahl von Kupferpartikeln, nur vereinzelte Bleipartikel.

S-180, RE-Mode

Werden Elementverteilungsbilder der Strommarke aus Abbildung 3.82 erstellt, so fällt auch hier die intensive Metallisation der thermisch nur gering geschädigten Haut der Strommarke auf (Abbildung 3.84).

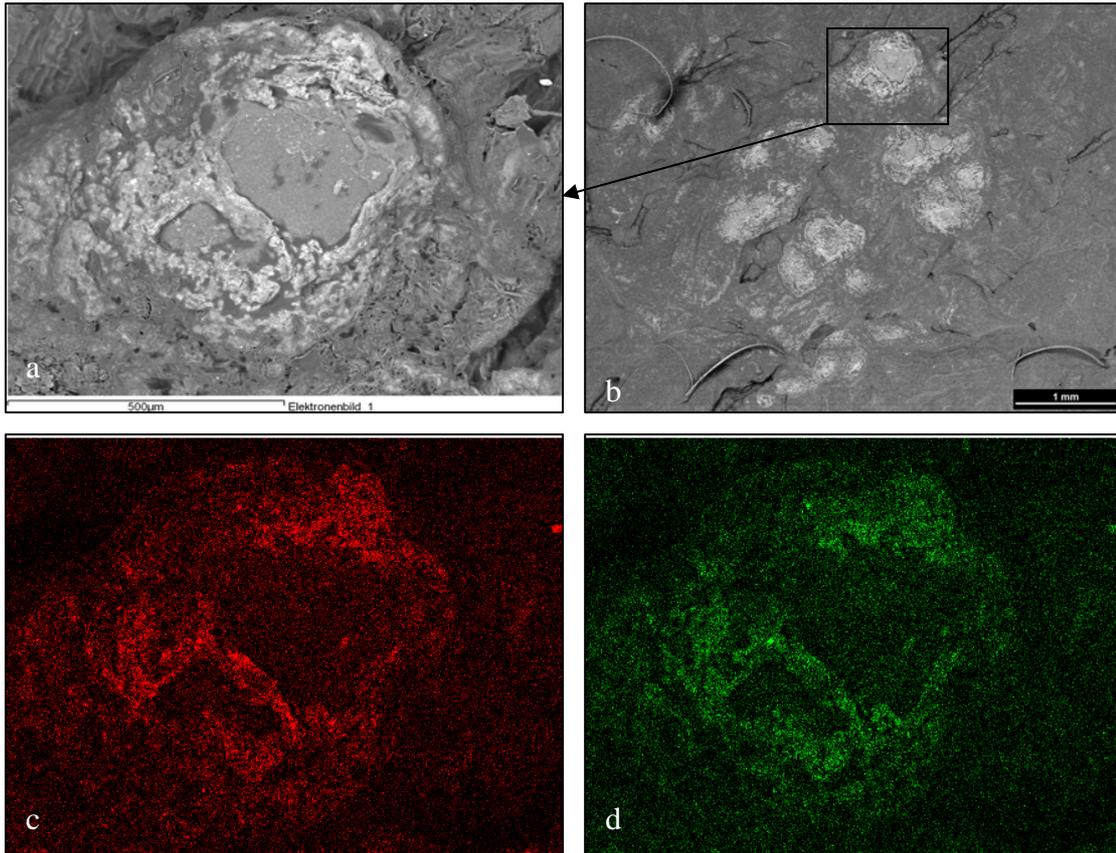


Abbildung 3.84

Strommarke aus Abbildung 3.82 (a und b), Verteilungsbilder von Kupfer (c) und Zink (d): Die Bereiche, in denen sowohl Kupfer als auch Zink diffus in der Haut verteilt dargestellt werden kann, weisen ebenfalls aufgelagerte metallische Partikel aus Kupfer und/ oder Zink auf. Auffällig ist auch die inhomogene Verteilung beider Metalle in der Haut mit zum Teil differierender Verteilung.

S-180, RE-Mode (a und b), EDAX 32 Genesis (c und d)

Strommarkenerzeugung auf im Wasser gelagerter Haut:

Wird die geerdete Zinkplatte mit der ihr aufgelagerten Haut in eine mit Leitungswasser gefüllte Plastikwanne gegeben, so unterbricht der FI-Schalter den Stromkreis sofort bei Eintauchen der Elektrode ins Wasser. Eine Annäherung der stromführenden Elektrode an die Haut mit Strommarkenerzeugung ist scheinbar nicht möglich.

Dennoch lassen sich rasterelektronenmikroskopisch neben vielen auf der Oberfläche abgelagerten metallischen Partikeln und vereinzelt Kalkablagerungen gelegentlich auch leichte thermische Veränderungen der Haut darstellen (Abbildung 3.85). Bei Verwendung von zum Beispiel einer Schraube als Elektrode kann sogar der Abdruck des Schraubengewindes auf der Haut abgebildet werden.

Bei allen entsprechenden Versuchen treten nie Kugeln auf der Hautoberfläche auf.

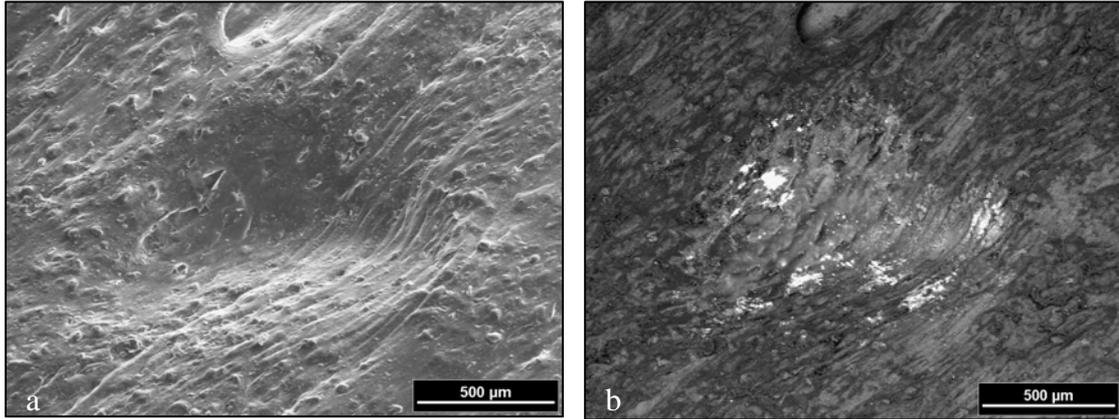


Abbildung 3.85

Strommarke auf Schweinehaut, welche sich bei Versuchsdurchführung mittels Kupfer-Draht auf der im Wasser gelagerten, geerdeten Zinkplatte befindet:

Der FI-Schalter unterbricht den Stromkreis sofort nach Eintauchen der Elektrode ins Wasser, eine Annäherung der stromführenden Elektrode an die Haut ist scheinbar nicht möglich. Trotzdem kann eine leichte thermische Veränderung der Haut unter der Elektrodenauflagefläche nachgewiesen werden (a), welche diffuse Kupfer-Ablagerungen vor allem am Rand der Marke aufweist (b).

S-180, SE-Mode (a), RE-Mode (b)

3.2 Die Hitzemarke

3.2.1 Morphologie der Hitzemarke

3.2.1.1 Einflussfaktoren und Randblasenbildung

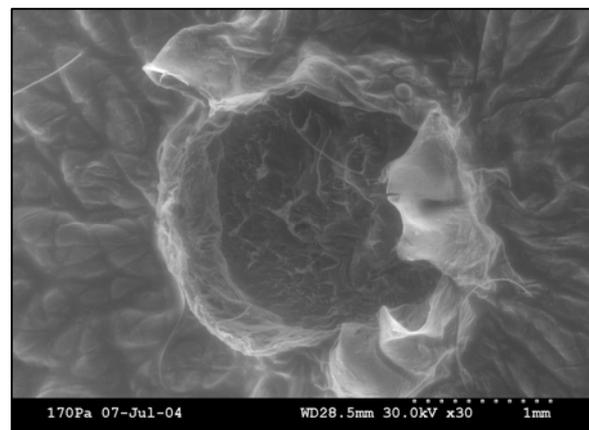
In ihrem morphologischen Erscheinungsbild ist die bei 480° C erzeugte Hitzemarke abhängig von der *geometrischen Form der jeweiligen Hitzequelle* (vergleiche Abbildungen 3.86 und 3.87), von den in den verschiedenen Versuchen verwendeten *Hautarten* und von der *Kontaktdauer*.

So kommt es bei Verwendung von stark durchfeuchteter Haut der Handoberfläche oder frischer Bauchhaut auch bei reiner Hitzeeinwirkung deutlich häufiger zu Blasen- und Randwallbildung (Abbildung 3.86) als bei Benutzung von verhornter Fußsohlenhaut.

Abbildung 3.86

Hitzemarke ($t \sim 0,7$ Sekunden) auf Bauchhaut mittels des Messingstabs (Durchmesser: 0,2 cm):
Blasen- und Wallbildung am Rand der Auflagefläche des erhitzten Metalls mit Aufplatzen der Blasen.

Hitachi S-3600N SEM, ESED



Je länger dabei der Kontakt zwischen erhitztem Metall und Haut besteht, desto stärker ist auch die Randwall- und Randblasenbildung ausgeprägt.

Aufgrund sofortiger Abkühlung durch das wässrige Milieu kann auf im Wasser befindlicher Haut keine Hitzemarke erzeugt werden.

3.2.1.2 Bläschenbildung

Die feine Bläschenstruktur in der Haut der Kontaktfläche, für Strommarken mit einer Stromflussdauer bis zu einer Sekunde typisch, findet sich in den bei den einzelnen Versuchen erzeugten Hitzemarken ebenfalls regelmäßig, wenn es nur zu einem kurzen Kontakt bis zu 1 Sekunde zwischen erhitztem Metall und Haut kommt.

So zeigt sich bei Hitzemarkenerzeugung zum Beispiel mit der erhitzten Schraube 2 und anschließender Präparation der Hautprobe mittels CPD bei der rasterelektronenmikroskopischen Oberflächenbetrachtung eine Bläschenbildung in der Haut der Elektrodenauflagefläche. Die entstandenen Vakuolen sind in diesem Fall deutlich größer als die Bläschen, welche regelmäßig bei Kurzzeitstromkontakt entstehen (Abbildung 3.87).

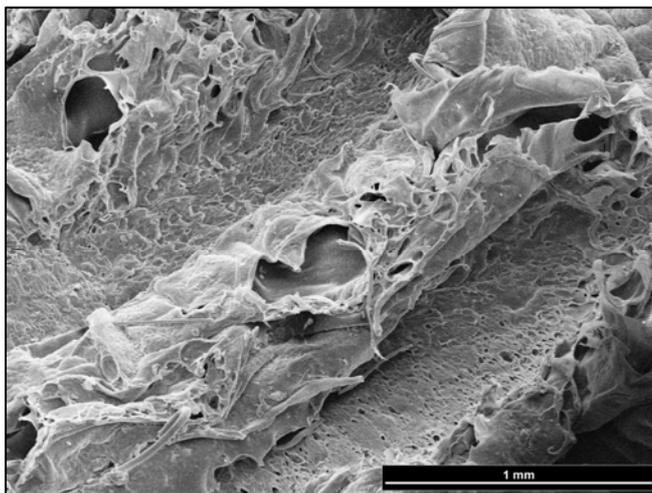


Abbildung 3.87

Hitzemarke ($t \sim 0,7$ Sekunden)
mittels Schraube 2:
Bläschenstruktur in den
Hautvertiefungen, welche dem
Schraubengewinde entsprechen. Die
Bläschen erscheinen größer als die
bei Kurzkontaktstrommarken und
sind vor allem am Rand in die
Länge gezogen.

CPD, S-180, SE-Mode

3.2.1.3 Interposition von Textilien

Wird ein Stück Bauchhaut mit Viskosestoff bedeckt und eine Hitzemarke mittels des Messingstabs erzeugt, so kommt es sofort zu einer intensiven Verschmelzung des Textils mit anschließender thermischer Veränderung der unterliegenden Haut. Dabei wird vor allem das Stoffgewebe deutlich stärker geschädigt, als es bei Strommarkenerzeu-

gung der Fall ist. Bei der anschließenden Untersuchung im REM können innerhalb der entstandenen Hitzemarke auf der Haut kaum abgelagerte Textilfasern nachgewiesen werden (Abbildung 3.88).

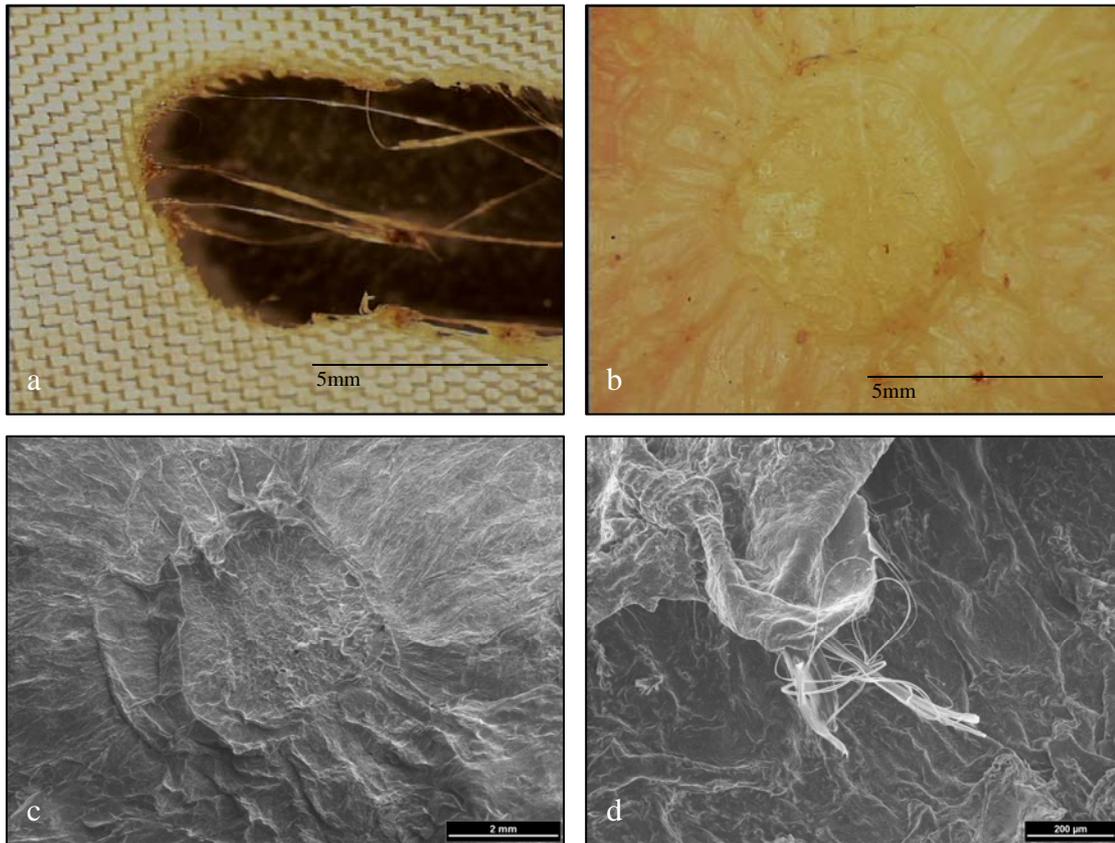


Abbildung 3.88

Hitzemarke ($t \sim 1$ Sekunde) auf mit Viskosestoff bedeckter Bauchhaut mittels des Messingstabs:
Zunächst starke Verschmelzung des interponierten Viskosestoffs und anschließend nur leichte thermische Veränderungen der unterliegenden Bauchhaut (a und b), rasterelektronenmikroskopisch lassen sich kaum Viskosefasern (d) in der entstandenen Hitzemarke (c) nachweisen.
Stereomikroskop Leica MZ 75 (a und b), S-180, SE-Mode (c und d)

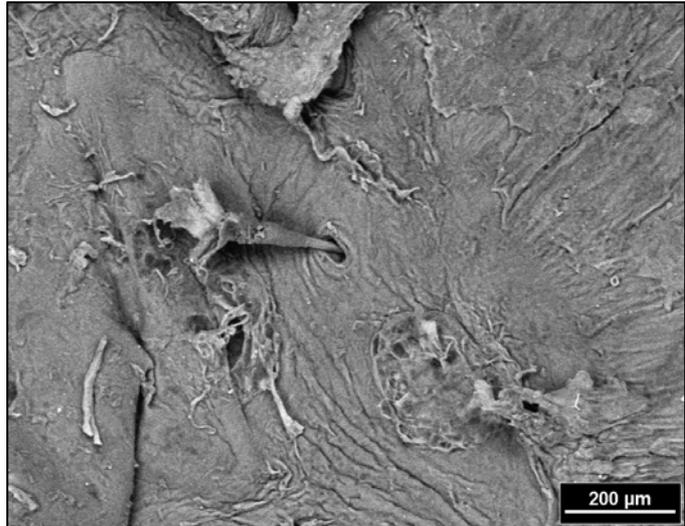
3.2.1.4 Haare

Im Gegensatz zu den häufig relativ gering geschädigten Haaren in Kurzkontaktstrommarken bis 1 Sekunde weisen Haare in Hitzemarken regelmäßig stärkere thermische Veränderungen auf. Der Schädigungsgrad reicht von einer Zerstörung der Cuticula des sonst weitestgehend erhaltenen Haares bis hin zu einer vollständigen Verbrennung einzelner Haare (Abbildung 3.89).

Abbildung 3.89

Hitzemarke (t~1 Sekunde) mittels
des Messingstabs:
Vollständige thermische Zerstörung
des in der Kontaktfläche
befindlichen Haares.

S-180, SE-Mode



3.2.2 Histologie der Hitzemarke

3.2.2.1 Hitzemarkenform in der Tiefe der Haut

Im histologischen Schnitt der in dieser Arbeit erzeugten Hitzemarken können gegenüber den produzierten Kurzzeitkontaktstrommarken bis 1 Sekunde, aber auch gegenüber elektrischen Kontakten mit längerer Kontaktdauer (> 1 Sekunde) oder höheren Stromstärken (1-1,5 A), bezüglich der Form in der Tiefe des Gewebes einige Charakteristika herausgestellt werden:

So ist die nekrotische Zone, ähnlich der bei Kurzkontaktstrommarken mit niedrigen Stromstärken (siehe auch Abbildung 3.17 a), nur gering ausgeprägt und ebenfalls auf den Bereich direkt unter der Elektrodenauflagefläche beschränkt. Auffällig aber ist, dass die Hautoberfläche insgesamt nicht so stark geschädigt ist, sodass sich ein Krater im Bereich der Elektrodenauflagefläche, wie er selbst bei Kurzkontaktstrommarken mit niedrigen Stromstärken zu beobachten ist, nicht zeigt (Abbildung 3.90).

Ein weiteres nur für Hitzemarken charakteristisches histologisches Merkmal ist eine „Ausfransung“ der Epidermis im Bereich der Auflagefläche des erhitzten Metalls mit Abhebung und Zerstörung epidermaler Strukturen (Abbildung 3.90).

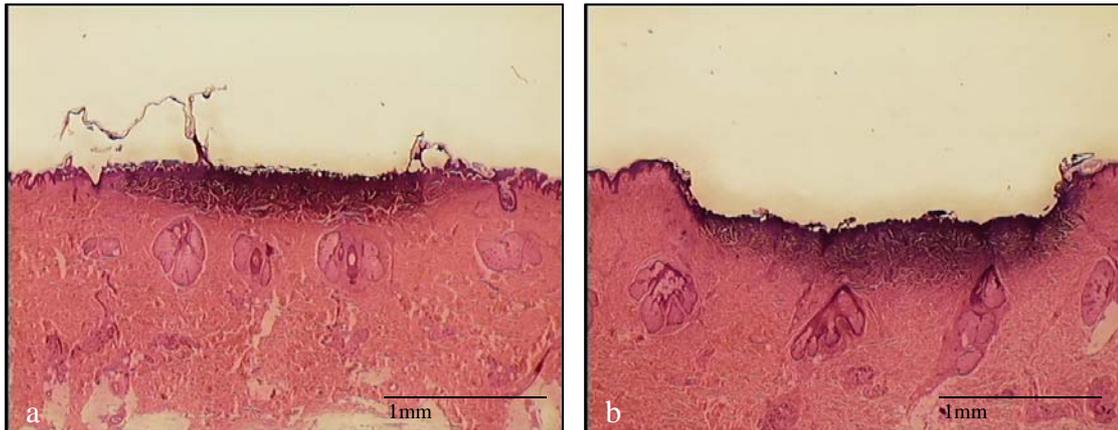


Abbildung 3.90

Paraffinschnitt einer Kurzzeitkontakthitzemarke (a) und einer Kurzzeitkontaktstrommarke (b) (t~1 Sekunde):

Stärkere Schädigung der gesamten Hautoberfläche mit Kraterbildung bei der Strommarke, wobei die nekrotische Zone in beiden Fällen etwa gleich intensiv ausgeprägt ist, „Ausfransung“ der Hitzemarkenoberfläche mit Abhebung und Zerstörung der Epidermis.

HE-Färbung, Lichtmikroskop Olympus BH-2

3.2.2.2 Bläschenbildung

Ein weiteres, speziell für Kurzzeitkontakthitzemarken bis 1 Sekunde, charakteristisches Zeichen ist die, schon bei der Oberflächenbetrachtung im REM sichtbare (Abbildung 3.87), lokale Bläschenbildung (vergleiche Kapitel 3.1.1.3 und 3.1.2.2).

Im histologischen Schnitt erkennt man, dass sich diese Vakuolisierung auf die oberflächliche Hornschicht beschränkt (Abbildung 3.91).

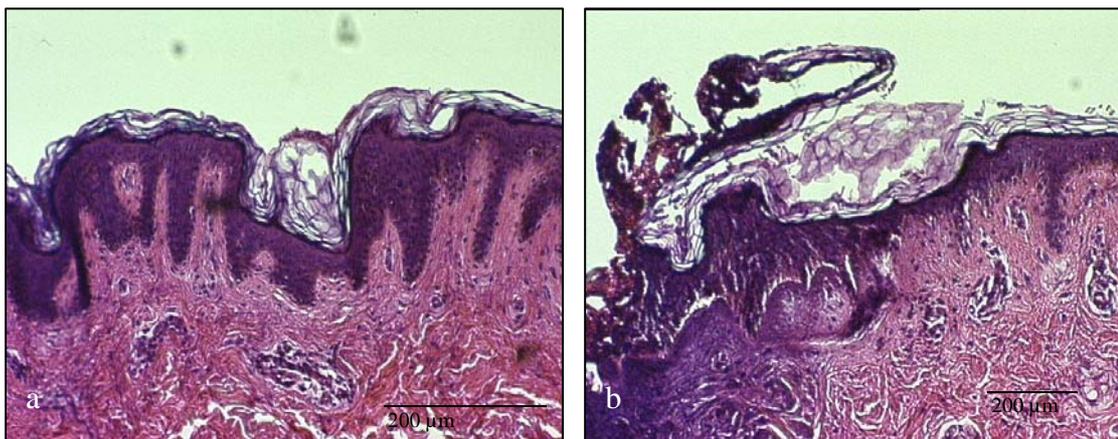


Abbildung 3.91

Paraffinschnitt einer Kurzkontakthitzemarke (a) und einer Kurzkontaktstrommarke (b) bis 1 Sekunde:

Bläschenbildung in der Hornhaut als charakteristisches Zeichen in beiden Fällen, Kernelongationen innerhalb der Epidermis der Strommarke.

HE-Färbung, Lichtmikroskop Olympus BH-2

3.2.2.3 Zell- und Kernelongationen

Eine Zell- und Kernelongation, wie sie bei Kurzzeitkontaktstrommarken bis 1 Sekunde mit stark geschädigter Epidermis zu finden ist, zeigt sich in den HE-gefärbten Paraffinschnitten von bei 480° C erzeugten Hitzemarken dieser Arbeit nie.

3.2.3 Metallisation der Hitzemarke

3.2.3.1 Metallablagerungen auf der Hautoberfläche

Die Oberflächenmetallisation ist bei Hitzemarken insgesamt deutlich geringer ausgeprägt als es bei Kurzzeitstromkontaktmarken bis 1 Sekunde der Fall ist. Dennoch können im REM auch in Hitzemarken regelmäßig metallische Ablagerungen in Form von **Metallpartikeln** variabler Form und Größe und überraschenderweise auch als vereinzelte **metallische Kugeln** nachgewiesen werden.

Erzeugt man mittels des Messingstabs eine Hitzemarke ($t \sim 0,3$ Sekunden) auf der durchfeuchteten Haut der Handoberfläche, so lassen sich vereinzelte in der Hitzemarke verteilte Metallpartikel nachweisen (Abbildung 3.92). Sie bestehen aus reinem Blei, einer Legierung aus Kupfer, Zink und Blei oder einer Legierung aus Kupfer und Zink, welches häufig im Legierungsverhältnis des erhitzten Metalls vorliegt. In der näheren Umgebung der Marke, außerhalb des direkten Kontaktes zwischen Elektrode und Haut, können jedoch keine metallischen Partikel nachgewiesen werden.

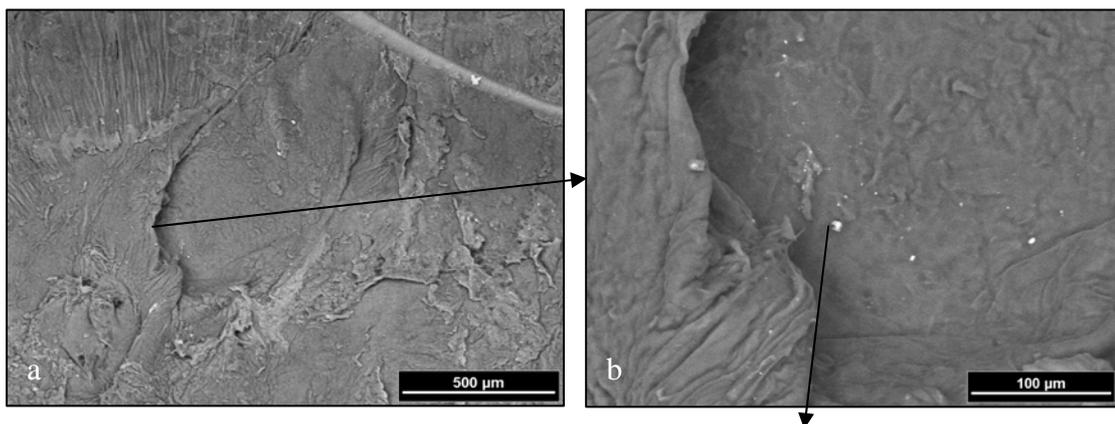
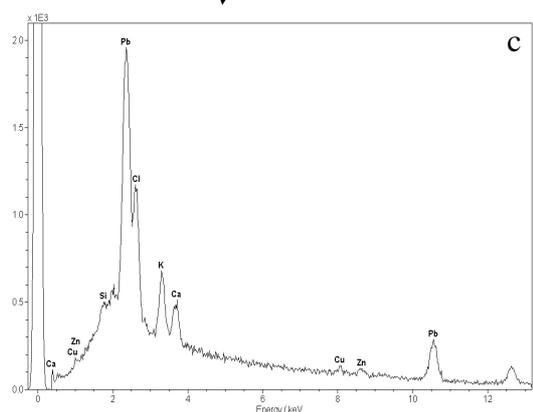


Abbildung 3.92
Hitzemarke ($t \sim 0,3$ Sekunden) mittels des Messingstabs auf durchfeuchteter Haut der Handoberfläche (a und b): Innerhalb der Auflagefläche verteilte Partikel aus Kupfer, Zink und Blei (c), auf der unbeschädigten Haut in Nachbarschaft zur Hitzemarke finden sich keine metallischen Partikel.
S-180, RE-Mode (a und b), RÖNTEC X-flash-Detektor (c)



Wird dagegen eine Hitzemarke mit längerer Kontaktdauer (> 1 Sekunde) unter den gleichen Versuchsbedingungen erzeugt, so lagern sich deutlich mehr Partikel auf der Hautoberfläche direkt in der Marke ab. Diese bestehen wiederum aus reinem Blei, einer Legierung aus Kupfer, Zink und Blei und einer Legierung aus Kupfer und Zink. Auch in diesem Fall können keine metallischen Partikel in der näheren Umgebung der Marke nachgewiesen werden (Abbildung 3.93).

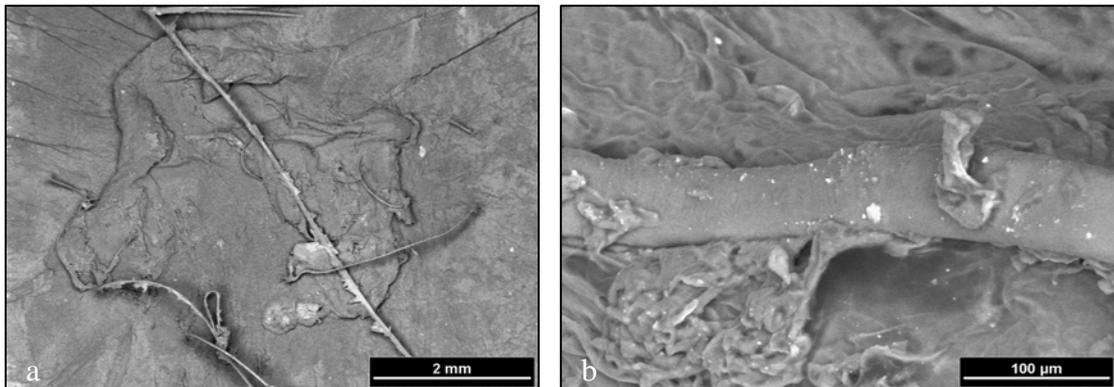


Abbildung 3.93

Hitzemarke ($t \sim 3$ Sekunden) mittels Messingstab auf durchfeuchteter Haut der Handoberfläche (a): Über die gesamte Auflagefläche der Hitzemarke verteilte Partikel aus Kupfer, Zink und Blei, starke Ablagerungen auch auf den Haaren (b).
S-180, RE-Mode

Zusätzlich zu den abgelagerten Partikeln finden sich bei beschriebenem Versuch vereinzelte 1-3 μm große Kugeln auf der Hautoberfläche abgelagert. Diese Metallkugeln bestehen aus dem schon bei niedrigen Temperaturen schmelzenden Blei (Abbildung 3.94), welches nur als Spurenelement im Messingstab vorhanden ist, jedoch nie aus dem erst bei hohen Temperaturen schmelzenden Kupfer. Alternativ findet sich eine Legierung aus Blei und Zink.

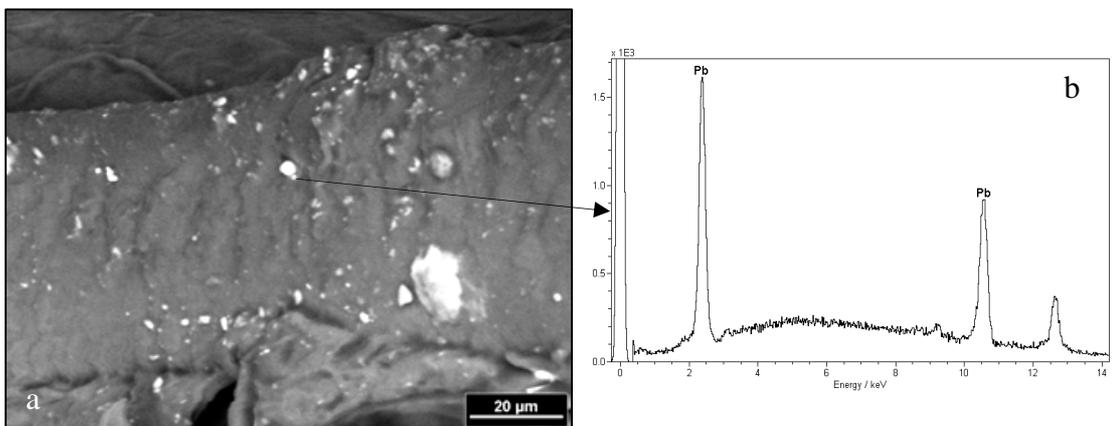


Abbildung 3.94

Bleikugel auf einem Haar der durchfeuchteten Haut der Handoberfläche nach Erzeugung einer Hitzemarke ($t \sim 3$ sec) mit dem Messingstab:
Umgebung : Cu/Zn- und Cu/Zn/Pb-Partikel, kleinere Pb-Kugeln
S-180, RE-Mode (a), RÖNTEC X-flash-Detektor (b)

Je länger der Kontakt zwischen erhitztem Messingstab und Haut besteht, desto mehr Bleikugeln finden sich in der entstandenen thermischen Hautveränderung, wobei sie sich dann ebenfalls nur direkt in der Marke und nicht in deren näheren Umgebung nachweisen lassen. Bleikugeln, ebenso wie die diversen metallischen Partikel, lagern sich nicht nur direkt auf der Hautoberfläche, sondern auch stark auf evt. in der Marke befindlichen Haaren ab, wie es in den Abbildungen 3.93 und 3.94 zu sehen ist.

Wird zur Versuchsdurchführung alternativ der *Stahlstab* verwendet, so finden sich nur punktuell metallische Ablagerungen von Eisenpartikeln in der Hitzemarke. Kugeln können auch bei längerem Kontakt nicht dargestellt werden (Abbildung 3.95).

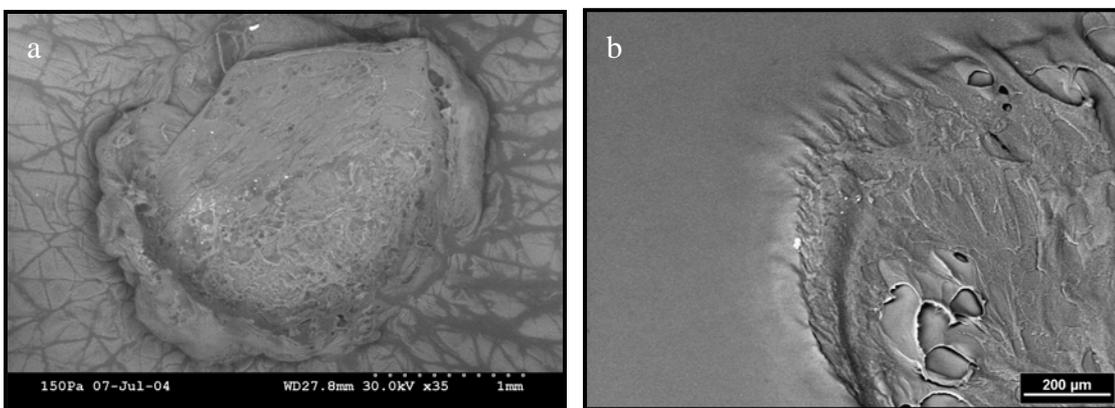


Abbildung 3.95

Hitzemarke (t~3 Sekunden) mittels des erhitzten Edelstahlstabs auf menschlicher Bauchhaut (a) bzw. auf Leit-Tab (b):

Nur punktuelle Ablagerung von Eisenpartikeln in beiden Versuchen, kein Nachweis von metallischen Kugeln.

Hitachi S-3600N SEM, BSE (a), S-180, RE-Mode (b)

Bei Benutzung der *Schraube 2* zur Erzeugung einer Hitzemarke auf Bauchhaut finden sich ebenfalls keine Kugeln. Dafür sind auch hier in der Marke verteilte Partikel aus primär Eisen und Kupfer und weniger Zink nachzuweisen, welche sich insgesamt größer und flacher darstellen als es bei metallischen Partikeln in Kurzkontaktstrommarken der Fall ist. Cadmium kann nicht nachgewiesen werden.

Die für (Kurzkontakt-) Strommarken typisch helleren Bereiche in der Haut, welche sich im RE-Mode des Rasterelektronenmikroskops darstellen und in denen regelmäßig Metalle nachgewiesen werden können, finden sich in keiner der mit 480° C erzeugten Hitzemarken. Es zeigen sich lediglich die oben beschriebenen metallischen Partikel auf der Hautoberfläche (Abbildung 3.96).

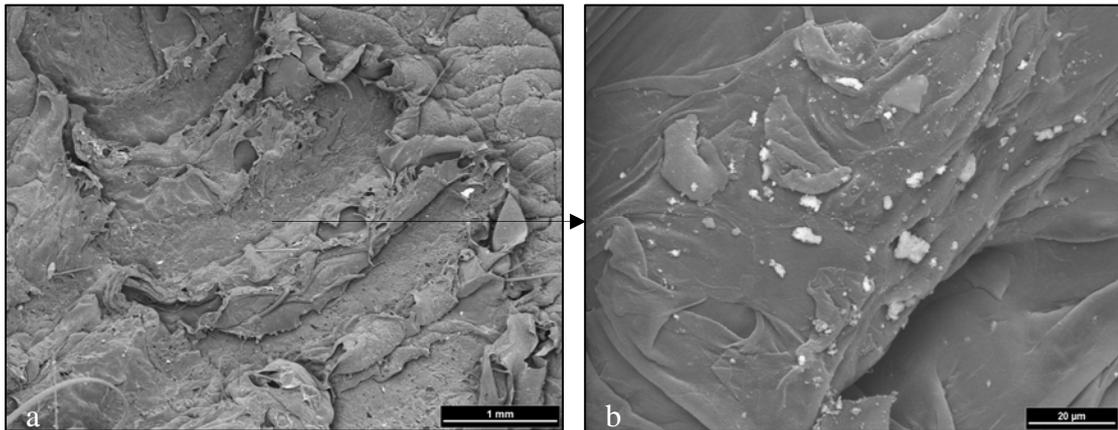


Abbildung 3.96

Hitzemarke ($t \sim 3$ Sekunden) mit dem Gewinde der Schraube 2 (vermessingte Eisenrundkopfschraube) auf menschlicher Bauchhaut (a):
Mittels EDX lassen sich keine Metalle diffus in der Haut nachweisen, lediglich vereinzelte metallische Partikel aus Eisen, Kupfer und/ oder Zink sind auf der Hautoberfläche abgelagert (b).
CPD, S-180, RE-Mode

3.2.3.2 Metallablagerungen in der Tiefe der Haut

Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen:

Werden von Kurzzeithitzemarken (bis 1 Sekunde) Kryo- oder Paraffinschnitte hergestellt und diese anschließend im REM untersucht, so lassen sich mittels EDX-Punktanalyse in beiden Fällen keine diffusen Metalleinlagerungen in der Epidermis nachweisen. Auch die im REM auf der Hitzemarkenoberfläche identifizierbaren Metallpartikel sind im Querschnitt nicht mehr zu erkennen (Abbildung 3.97).

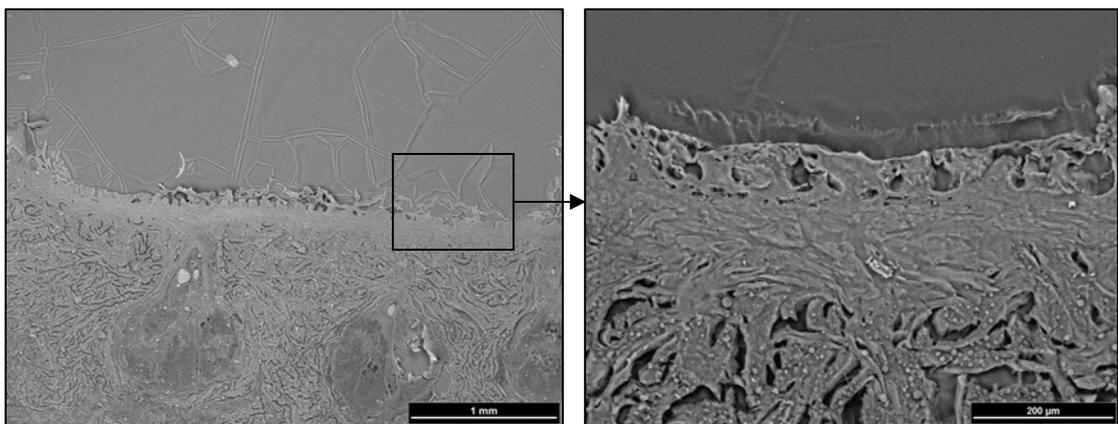


Abbildung 3.97

Paraffinschnitt einer Hitzemarke:
Metallablagerungen in Form von metallischen Partikeln, Kugeln oder in diffuser Form können mittels EDX-Punktanalyse nicht nachgewiesen werden, „ausgefranzte“ Epidermis.
S-180, RE-Mode

Eine Anfertigung von Elementverteilungsbildern ist bei Querschnitten von Hitzemarken aufgrund der zu geringen Elementkonzentration nicht möglich.

Histologische Untersuchungen:

Bei der Anfärbung von aus Kurzzeitkontaktthitzemarken bis 1 Sekunde hergestellten Paraffinschnitten mittels der DMABR-Methode stellt sich keine rosa-rote Färbung von Kupfer in der Epidermis dar, wie es demgegenüber bei entsprechenden Kurzzeitstromkontaktmarken bis 1 Sekunde der Fall ist (Abbildung 3.98).

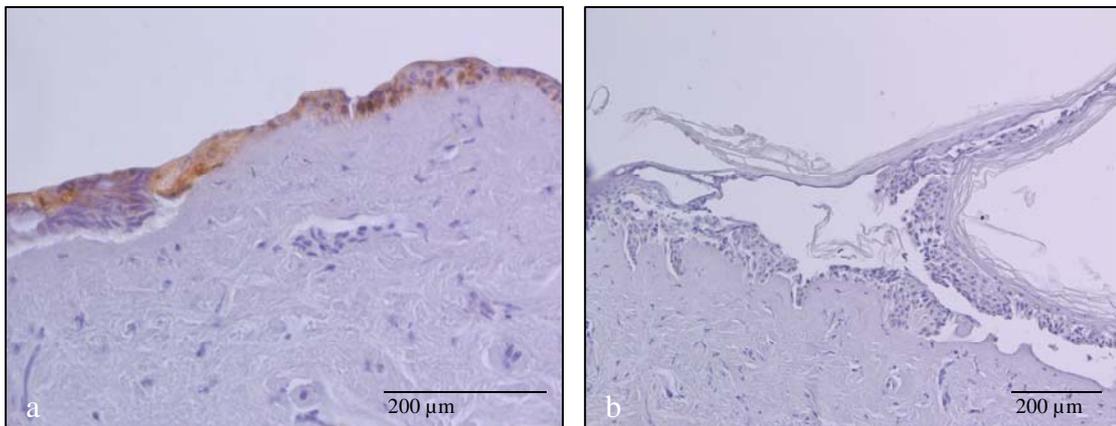


Abbildung 3.98

Paraffinschnitte von Kurzzeitkontaktstrommarke (a) und Kurzzeitkontaktthitzemarke (b) bis 1 Sekunde:

Diffus rosa-rote Anfärbung von Kupfer in der Epidermis der Strommarke (a), kein Kupfernachweis in der Hitzemarke (b).

DMABR-Färbung, Lichtmikroskop Olympus BH-2

3.3 Methodik

3.3.1 Einfluss der Präparation auf die Abbildung der Morphologie von Strom- und Hitzemarken

Beschichtung:

Bei der Untersuchung von Hautproben im S-180 zeigen sich aufgrund des Hochvakuums trotz Leit-C-Einbettung und anschließender Kohlebeschichtung bzw. Goldbesputterung der Probe regelmäßig Aufladungserscheinungen der untersuchten Haut bzw. der aufgelagerten Stoffe, welche bei Untersuchung mit dem Hitachi S 3600 N im Niedervakuummodus nicht auftreten (Abbildung 3.99).

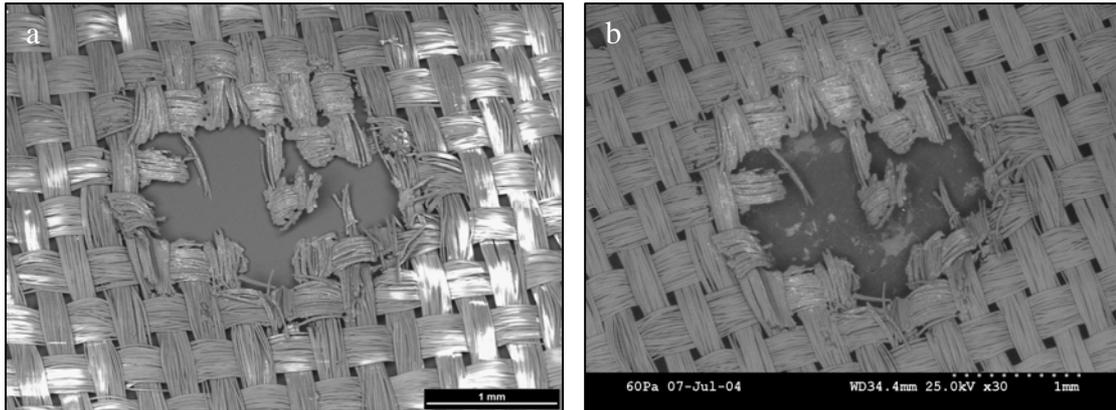


Abbildung 3.99

Untersuchung von Viskosestoff mit dem Stereoscan 180 (a) bzw. dem Hitachi S-3600 N (b):
Starke Aufladungen der Stofffasern des Randbereiches im Hochvakuumrasterelektronen-
mikroskop (a), keine Aufladungen bei 60 Pascal im Niedervakuumgerät (b).

Um Aufladungserscheinungen im Hochvakuum zu minimieren, ist eine Beschichtung oder Besputterung der Probe erforderlich.

Durch die Kohlebeschichtung werden oberflächliche Strukturen der Haut jedoch häufig verdeckt. Oftmals platzt auch die aufgedampfte Kohleschicht stellenweise wieder ab, sodass eine optimale topographische Darstellung im SE-Mode des Hochvakuumgerätes erschwert oder sogar unmöglich wird. Bei Besputterung der Haut mit Gold bleibt die Topographie zwar weitestgehend erhalten, eine Metallanalyse mittels EDX ist jedoch erschwert (Abbildung 3.100).

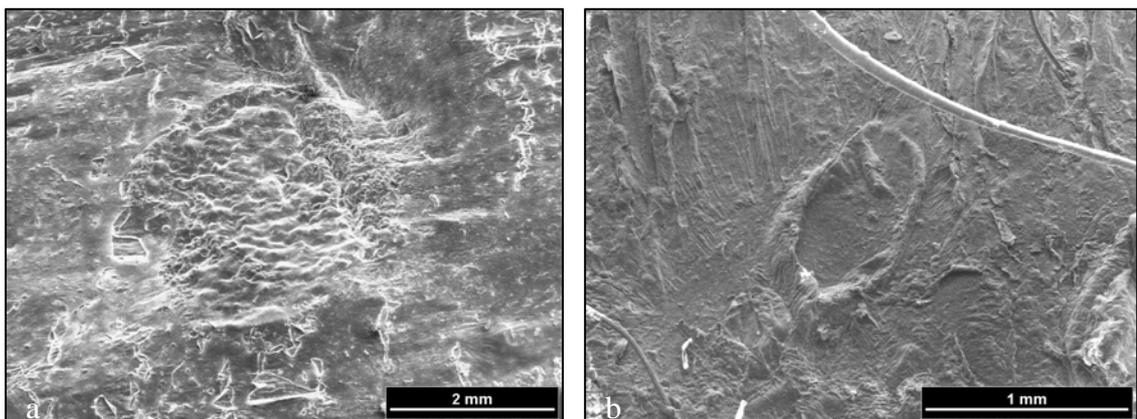
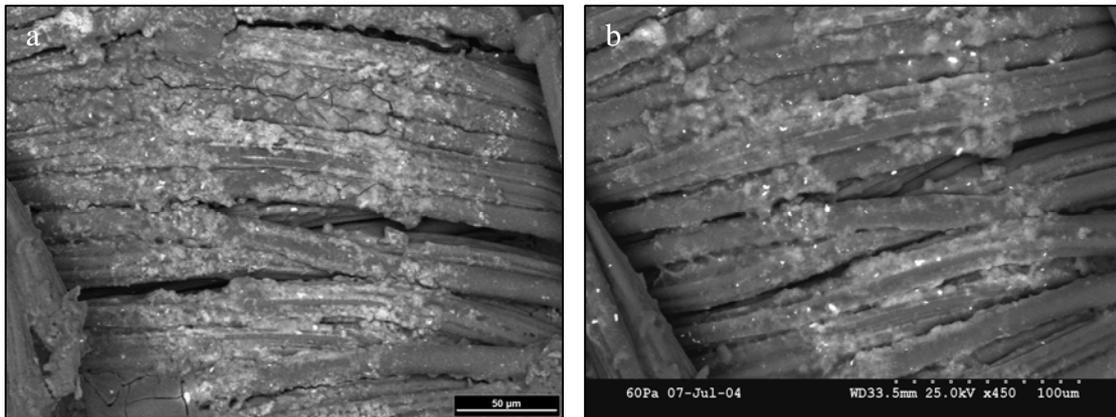


Abbildung 3.100

Beschichtung der an Luft getrockneten Hautproben mit Kohle (a) bzw. Besputterung mit 4 nm
Gold (b):
Abplatzen der Kohleschicht und Verdeckung der Hautstruktur, partielle Aufladungserscheinungen
(a), Topographie erhalten, Trocknungsartefakte mit Hautaufwerfungen (b).
S-180, SE-Mode

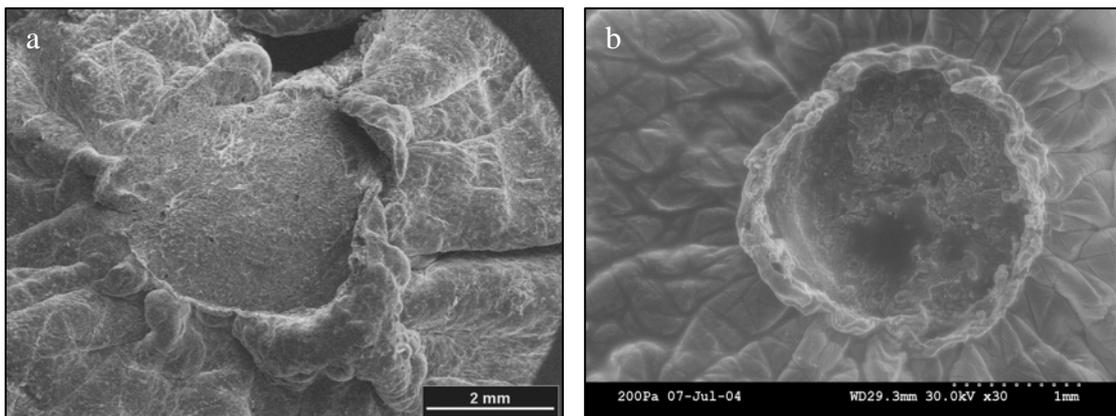
Trocknung:

Für die Untersuchung der Hautproben im Hochvakuumrasterelektronenmikroskop ist eine vorherige Trocknung der Haut erforderlich. Erfolgt diese Trocknung an Luft, so kommt es zu Trocknungsartefakten mit Veränderung der oberflächlichen Hautstruktur. Es entstehen beispielsweise Risse in einer Probe oder durch Schrumpfung bedingte Hautaufwerfungen (Abbildungen 3.100 und 3.101).

**Abbildung 3.101**

Kleine Risse in den Viskosefasern aufgrund der für die Untersuchung im Hochvakuum-REM notwendigen Trocknung (a), welche bei 60 Pascal im Niedervakuumgerät nicht zu finden sind (b). S-180, RE-Mode (a), Hitachi S-3600N SEM, BSE 2 (b)

Wird die Haut dagegen vor der Untersuchung im Hochvakuum mittels CPD getrocknet bzw. wird sie im gefrorenen Zustand nativ im Niedervakuum untersucht, kann diese Artefaktbildung weitestgehend umgangen werden (Abbildung 3.102).

**Abbildung 3.102**

Untersuchung von Hautproben im Hochvakuumrasterelektronenmikroskop mit vorheriger Trocknung mittels CPD (a) bzw. im Niedervakuumrasterelektronenmikroskop (b): Kaum Trocknungsartefakte, erhaltene Hautfelderung. S-180, SE-Mode (a), Hitachi S-3600N SEM, ESED (b)

Sieht man von der Veränderung des feingeweblichen Aufbaus bei Trocknung der Haut an Luft durch Hautaufwerfungen, Schrumpfung, Rissbildung etc. ab, so bleibt die gro-

be morphologische Struktur der Strom- und Hitzemarken nach Untersuchung der jeweils eingefrorenen Probe auf dem Kryotisch des Hitachi S-3600N SEM, anschließendem Auftauen und Lufttrocknung der Haut zur weiteren Betrachtung im Hochvakuum des S-180 erstaunlich gut erhalten (Abbildung 3.103).

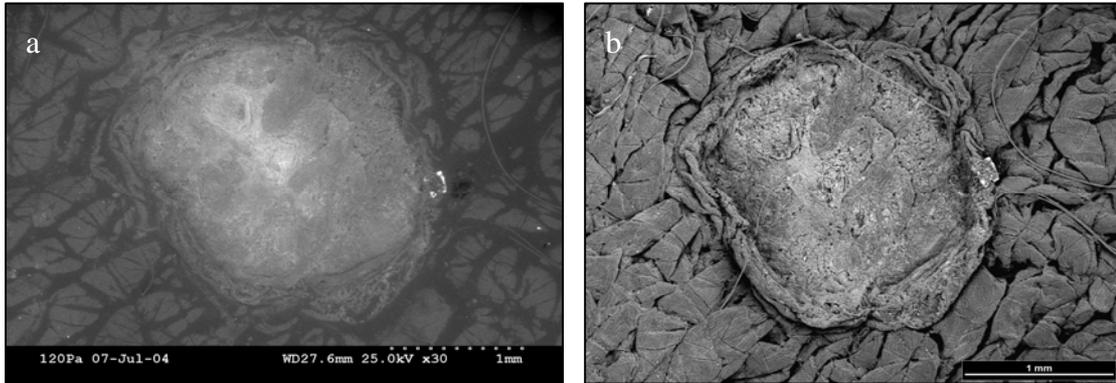


Abbildung 3.103

Untersuchung einer mittels des Kryotischs eingefrorenen Hautprobe im Niedervakuumrasterelektronenmikroskop (a), anschließendes Auftauen, Trocknen an Luft und weitere Präparation zur Betrachtung im Hochvakuumgerät (b):

Die grobe morphologische Struktur der Strommarke ist weitestgehend erhalten geblieben, Eintrocknung und Schrumpfung der einzelnen Hautzellen vor allem des die Strommarke umgebenden Hautgewebes.

S-3600N SEM, BSE2 (a), S-180, SE-Mode (b)

Vergleicht man die Hautstruktur, welche sich bei Untersuchung der Haut im Niedervakuum-REM darstellt, mit der bei Abbildung im Hochvakuumgerät nach Kritisch-Punkt-Trocknung, so erkennt man einen Unterschied im feingeweblichen Aufbau der Haut in Strom-, aber auch in Hitzemarken (Abbildung 3.104), obwohl es in beiden Fällen, wie beschrieben, zu keinen typischen Trocknungsartefakten kommt.

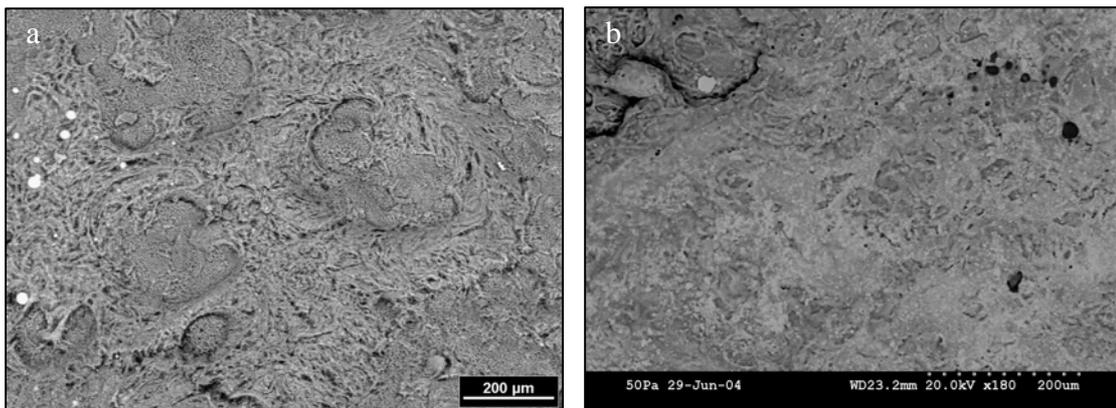


Abbildung 3.104

Kritisch-Punkt-Trocknung mit anschließender Untersuchung im Hochvakuumrasterelektronenmikroskop (a) bzw. Einfrieren der Probe auf dem Kryotisch sofort nach Versuchsdurchführung mit anschließender Untersuchung im Niedervakuum bei 50 Pascal (b):

Unterschiedliche Hautstruktur beider Strommarken.

S-180, RE-Mode (a), Hitachi S-3600N SEM, BSE 2 (b)

Wie in Abbildung 3.104 ersichtlich ist die Hautstruktur von Strommarken nach Präparation mittels CPD gut erhalten und stellt sich im Hochvakuum sehr detailliert dar, wohingegen die Strukturen des nativen, eingefrorenen Präparates eher verwaschen erscheinen. Auch in den in Abbildung 3.105 dargestellten Hitzemarken erkennt man einen solchen Unterschied im feingeweblichen Aufbau.

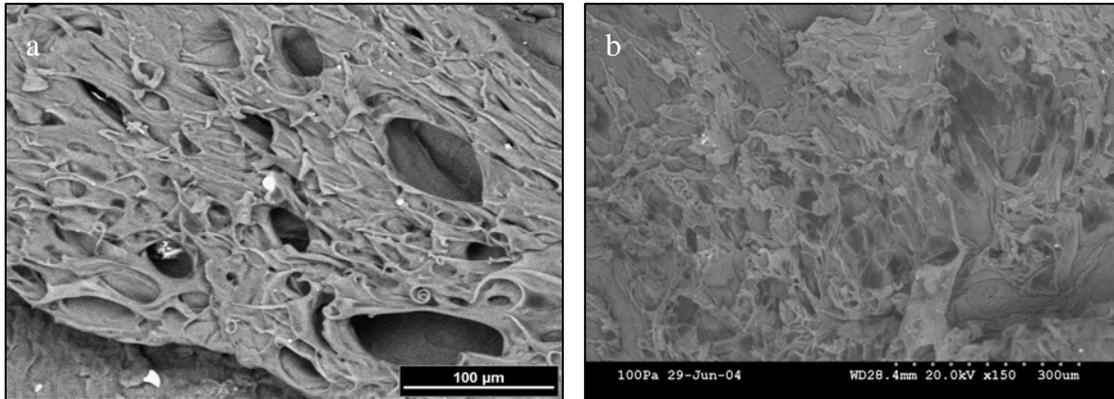


Abbildung 3.105

Kritisch-Punkt-Trocknung mit anschließender Untersuchung im Hochvakuumrasterelektronenmikroskop (a) bzw. Einfrieren der Haut direkt nach Versuchsdurchführung auf dem Kryotisch des Hitachi S-3600N SEM mit Untersuchung im Niedervakuum bei 100 Pascal (b):

Unterschiedliche Hautstruktur beider Hitzemarken.
S-180, RE-Mode (a), Hitachi S-3600N SEM, BSE (b)

3.3.2 Darstellung der Metallverteilung in Strom- und Hitzemarken

Der Nachweis von Metall auf der Oberfläche und in der Tiefe des Hautgewebes kann mittels verschiedener histologischer und physikalisch-technischer Verfahren erfolgen.

Oberflächenverteilung von Metall:

Zur Beurteilung der Oberflächenverteilung von Metall stehen in dieser Arbeit die den Materialkontrast darstellende RE-Abbildung (Abbildungen 3.106, 3.107) und die Punkt- bzw. Flächenanalyse mittels EDX (Abbildung 3.45) sowohl im Hochvakuum als auch im Niedervakuum-REM zur Verfügung. Weiterhin kann mittels EDX ein Mapping einzelner Elemente erfolgen (Abbildungen 3.46, 3.106, 3.107).

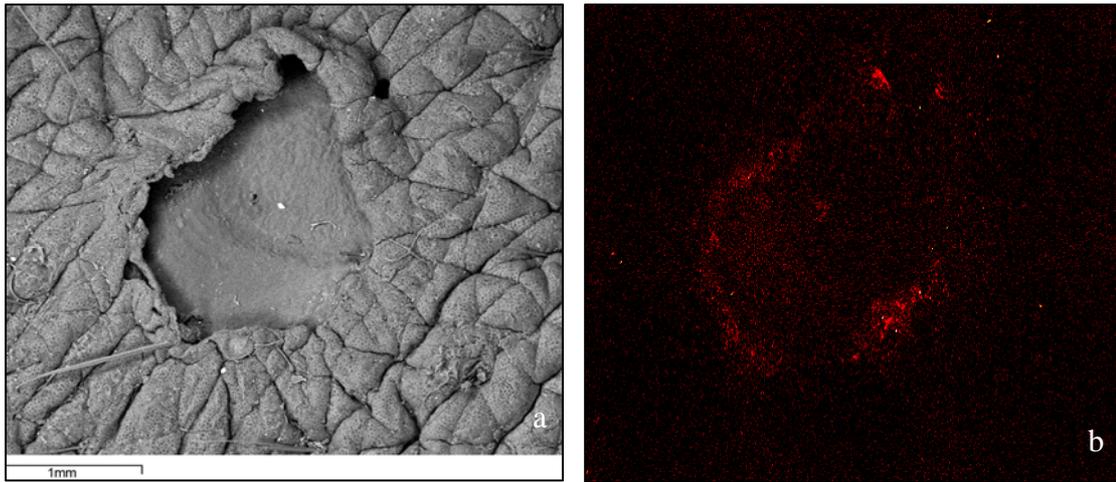


Abbildung 3.106
 Strommarke mittels des Kupfer-Stabs auf Bauchhaut (a):
 Elementverteilungsbild von Kupfer mit diffuser Einlagerung in die Haut und Partikelablagerung
 vor allem im Randbereich (b).
 S-180, RE-Mode (a), EDAX 32 Genesis (b)

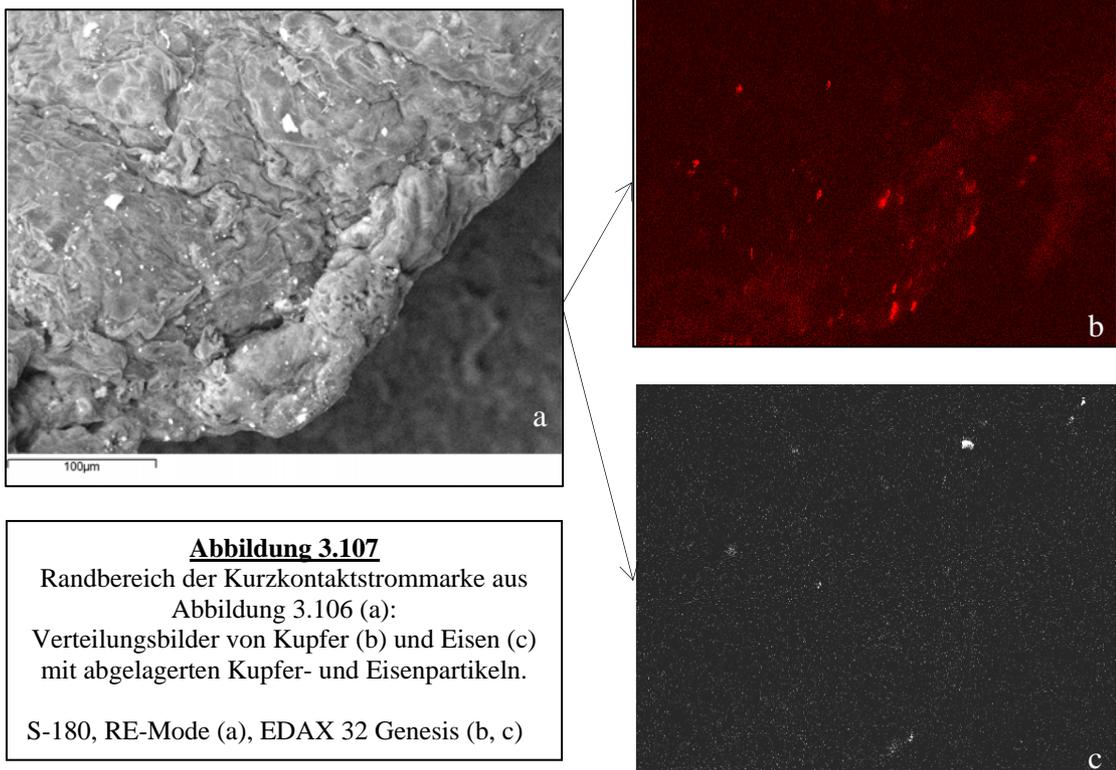


Abbildung 3.107
 Randbereich der Kurzkontaktstrommarke aus
 Abbildung 3.106 (a):
 Verteilungsbilder von Kupfer (b) und Eisen (c)
 mit abgelagerten Kupfer- und Eisenpartikeln.
 S-180, RE-Mode (a), EDAX 32 Genesis (b, c)

Tiefenverteilung von Metall:

Die Beurteilung der Tiefenverteilung von Metall in der Haut von Strom- und Hitze-
 marken erfolgt in dieser Arbeit mittels Paraffinschnitten, welche einerseits histolo-

gisch aufgearbeitet und angefärbt (Kupfer-Färbung: DMABR-Methode) (Abbildungen 3.60.-3.62) und andererseits nach Beschichtung mit Kohle bzw. Besputterung mit Gold direkt ins Hochvakuum-REM (Abbildungen 3.57, 3.58, 3.108 und 3.109) bzw. unbeschichtet ins EAGLE (Abbildung 3.63) eingebaut werden.

Alternativ zur Paraffineinbettung wird die Haut sofort nach Versuchsdurchführung in flüssigem Stickstoff eingefroren, wobei von den Kurzzeitkontaktstrommarken (Abbildungen 3.54, 3.55 und 3.108) und von den Strommarken nach längerem Kontakt bzw. mit höheren Stromstärken (Abbildungen 3.56, 3.109) anschließend Kryoschnitte hergestellt werden.

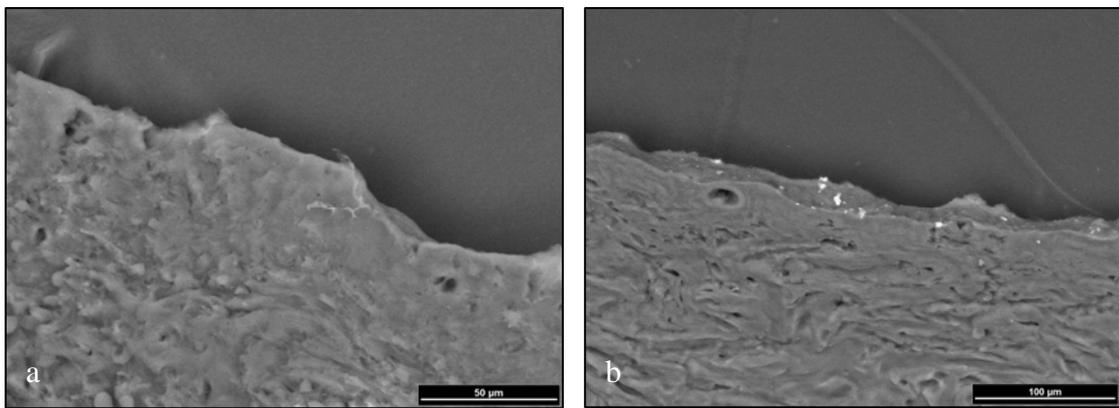


Abbildung 3.108

Paraffin- (a) und Kryoschnitt (b) einer Kurzkontaktstrommarke bis 1 Sekunde: Nachweis der Ablagerung von metallischen Partikeln auf der Hautoberfläche und partiell diffuse Einlagerung von Metall auf und in die Epidermis beim Kryoschnitt. Der Paraffinschnitt dagegen weist keine metallischen Ablagerungen auf.

S-180, RE-Mode

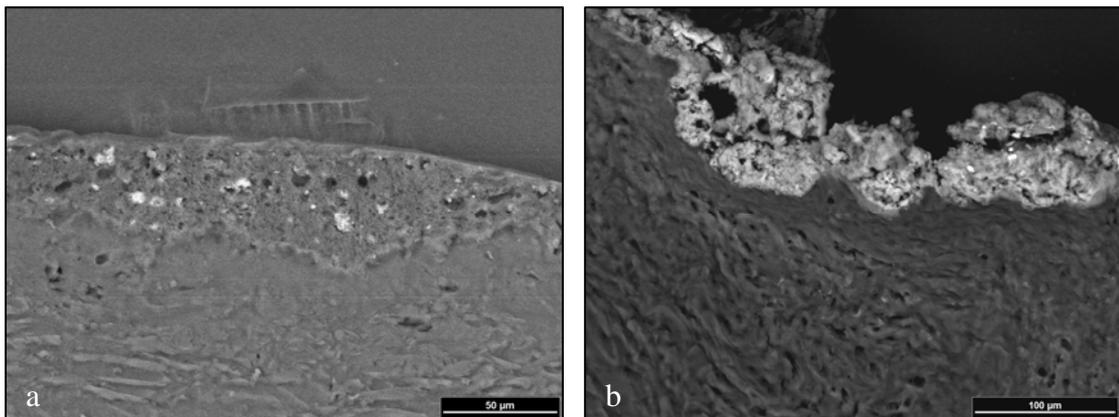


Abbildung 3.109

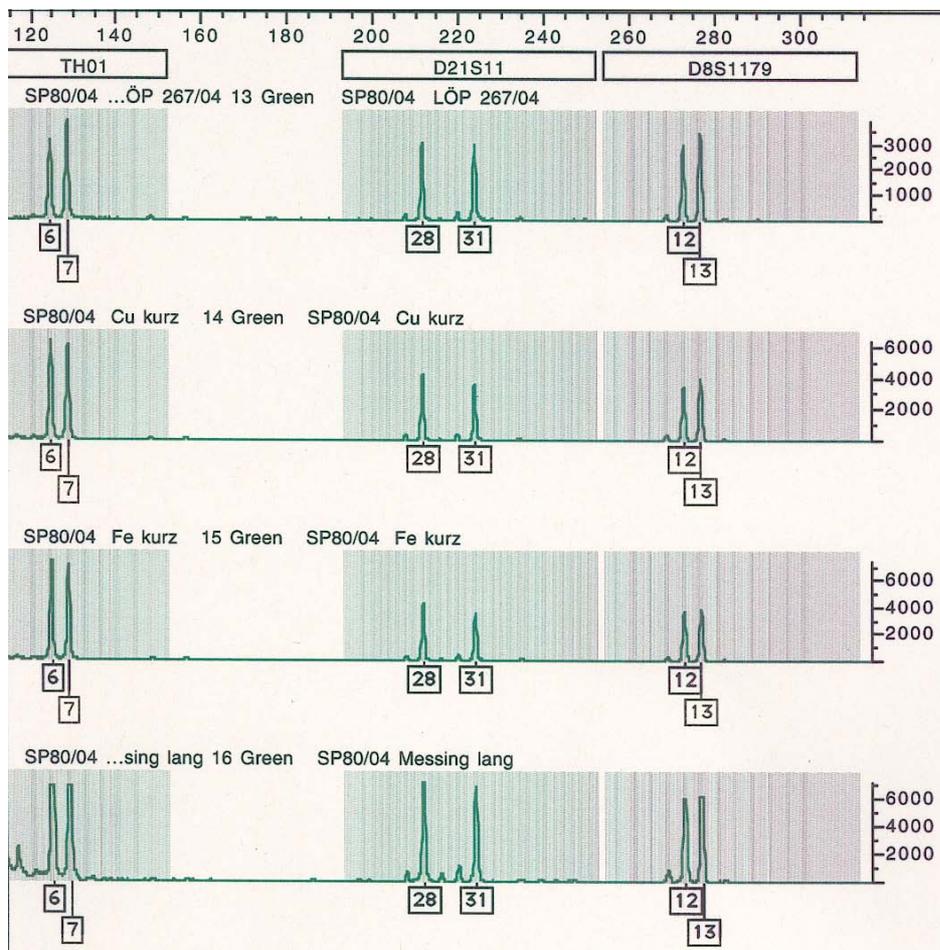
Paraffin- (a) und Kryoschnitt (b) einer Strommarke mit längerer Kontaktdauer (> 1 Sekunde): Intensivere Einlagerung von diffusem Metall in die Epidermis beim Kryoschnitt, die Anzahl der eingelagerten metallischen Partikel ist bei beiden Präparationsmethoden etwa gleich hoch.

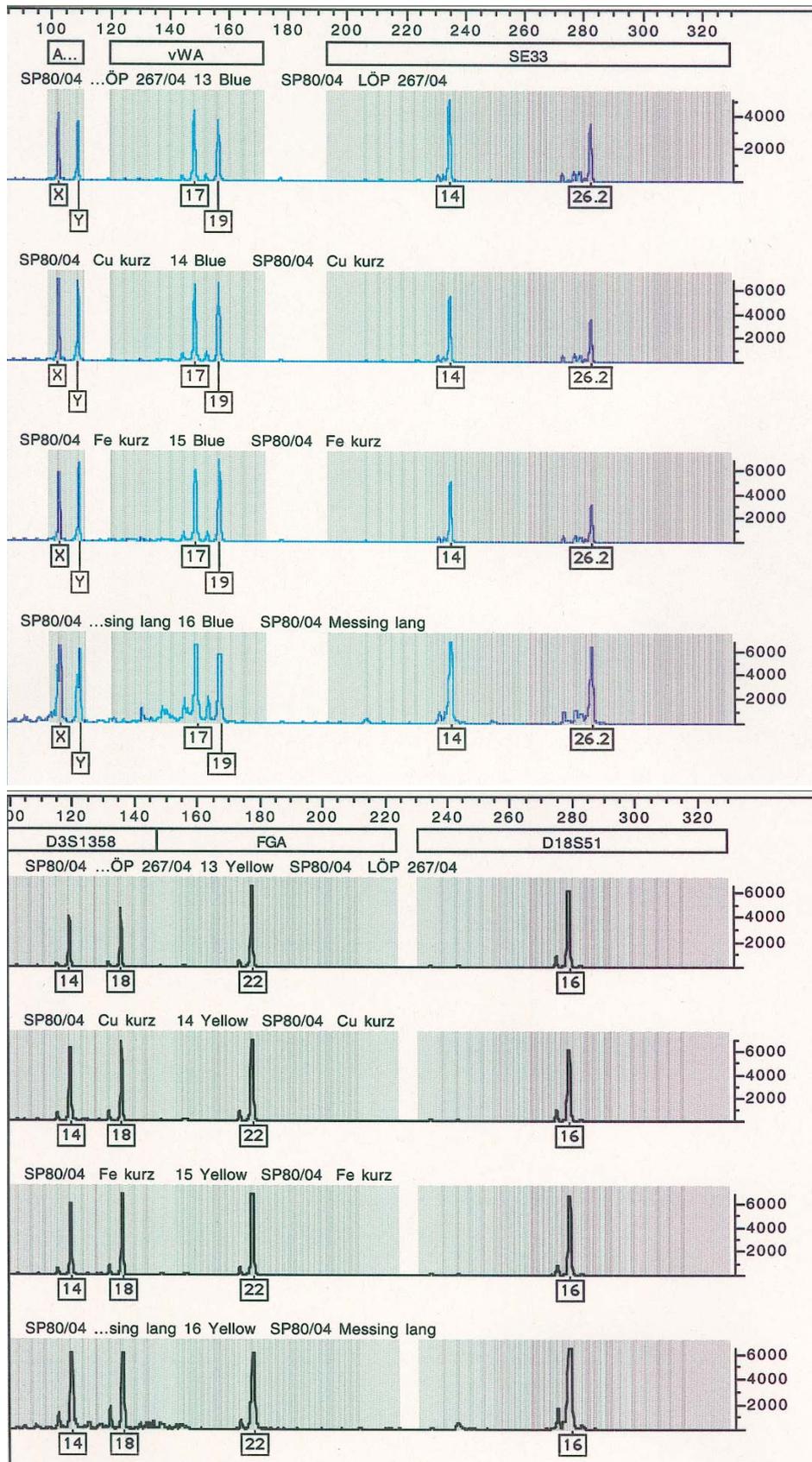
S-180, RE-Mode

3.4 DNA-Analyse von Geweberückständen auf der Elektrode

Die Menge der auf den Elektroden nachweisbaren DNA liegt in den Versuchen bei sehr kurzem Kontakt ($t \sim 0,3$ Sekunden) des stromführenden Kupfer-Drahtes mit der Haut bei $0,9 \text{ ng}/\mu\text{l}$, bei etwas längerem Kontakt ($t \sim 0,6$ Sekunden) mit dem Stahlstab bei $2,3 \text{ ng}/\mu\text{l}$ und bei einem Kontakt über einer Sekunde mit dem Messingstab bei $17,6 \text{ ng}/\mu\text{l}$.

In einem zum Vergleich erstellten Elektropherogramm einer Blutprobe eines Verstorbenen, dessen Bauchhaut für die Versuche verwendet worden ist, werden die TH01-Allele 6/7, die D21S11-Allele 28/31, die D8S1179-Allele 12/13, die AMG-Allele X/Y, die vWA-Allele 17/19, die SE33-Allele 14/26.2, die D3S1358-Allele 14/18, das FGA-Allel 22 und das D18S51-Allel 16 detektiert. Die Elektropherogramme der an den jeweiligen Elektroden haftenden Geweberückstände in den einzelnen Versuchen zeigt dieselbe Auftrennung, sodass eine eindeutige Zuordnung der untersuchten Geweberückstände zu der für die Versuche verwendeten Probenhaut erfolgen kann (Abbildung 3.110).



**Abbildung 3.110**

Elektropherogramme einer Blutprobe und von Geweberückständen auf Elektroden nach Kurzzeitstromkontakt bis 1 Sekunde mittels des Kupfer-Drahtes bzw. der Stahl-Elektrode und längerem elektrischem Kontakt (> 1 Sekunde) mittels des Messingstabs:
Die in den einzelnen STR-Systemen detektierten Allele stimmen in allen Proben überein.
genRES[®]MPX-2-Kit

4 Diskussion

Vorbemerkung:

Die Erzeugung von Strom- und Hitzemarken auf vom Körper abgetrennter Leichenhaut und die nachfolgend direkte Übertragung der dort gewonnenen Ergebnisse auf die rechtsmedizinische Praxis sind zulässig:

1. Verschiedene Autoren weisen nach, dass es keinen Unterschied zwischen vitalen und postmortalen Hautveränderungen nach Strom- [108, 116] und Hitzekontakt [108] gibt, im Gegensatz zu beispielsweise petechialen Blutungen als *eindeutig* vitales Zeichen [49] oder zu den von Böhm E [16] beschriebenen thrombotischen Veränderungen an Gefäßendothelien im Stromweg als *wahrscheinlich* vitales Zeichen des Stromtodes.
2. Vitale Reaktionen, zum Beispiel im Sinne einer entzündlichen Veränderung an der Strommarke, in den meisten Fällen aufgrund der häufig nur kurzen Überlebenszeit nach Stromkontakt sind nicht zu erwarten [17], wobei der Tod fast immer relativ schnell durch Herzkammerflimmern eintritt [26, 35, 63, 71]. Einschränkend gilt dies natürlich nicht für Kasuistiken des überlebten Stromkontaktes [34], bei denen es zu eben solchen Reaktionen kommt [76, 77, 78, 101] und bei denen deshalb eine direkte Übertragung der in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse erschwert ist.
3. Letztlich weist die Epidermis nach Böhm E [17] eine langdauernde Resistenz gegenüber autolytischen Prozessen auf, wobei das „Widerstandsverhalten der Hornschicht (...) vital und postmortal nur geringfügige Unterschiede [zeigt]“.

4.1 Die Strommarke nach Stromflussdauer bis zu einer Sekunde

4.1.1 Morphologie

Die Ausprägung der klassischen Morphologie einer Strommarke mit zentraler Einsenkung und Verkohlung neben einem erhabenen, porzellanartigen Randwall [32, 62, 86] unterliegt einer starken Variationsbreite, da sie abhängig von verschiedenen Parametern ist. Bei Erzeugung einer Strommarke auf im Wasser befindlicher Haut fehlen Strommarken, häufiger als bei vollständig trockener Haut, vielfach sogar ganz [22, 33, 72, 79, 88, 94, 110, 115]. Bei Karger B et al [49] finden sich beispielsweise nur in 75% der Todesfälle mit elektrischem Strom niedriger Spannung die charakteristischen Marken auf der Haut.

Weiterhin muss festgestellt werden, dass jede Strommarke als Individuum bezeichnet werden muss [44, 95]. In den Experimenten dieser Arbeit konnte auch nach Konstanthaltung aller Versuchsbedingungen nie eine morphologisch völlig identische Marke erzeugt werden.

4.1.1.1 Einflussfaktoren

Dennoch lassen sich nach Durchführung der in dieser Arbeit beschriebenen Experimente Faktoren aufführen, durch die die morphologische Ausprägung einer Kurzzeitkontaktstrommarke bis 1 Sekunde regelmäßig variiert [106]. Dazu gehören neben der **Stromflusszeit** und **Stromstärke** auch die **Form und Zusammensetzung der benutzten Elektrode (Stromdichte)** und weiterhin die **Leitfähigkeit der kontaktierten Haut (Widerstand)**. Darüber hinaus beeinflusst das **Umgebungsmilieu** mit Lagerung der Haut an Luft bzw. im wässrigen Milieu bei Versuchsdurchführung die Morphologie zusätzlich.

Am besten nachzuvollziehen ist wohl der Zusammenhang zwischen Morphologie und *Stromflussdauer* bzw. *Stromdichte*. So nimmt die morphologische Ausprägung einer Strommarke mit zunehmender Kontaktdauer zwischen stromführender Elektrode und Haut (Abbildungen 3.1, 3.2 und 3.3) bzw. mit Erhöhung der Stromstärke (Abbildung 3.5) oder Verkleinerung der Elektrodenkontaktfläche (Abbildung 3.6) [44, 46, 47] zu. Da somit die Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer morphologischen Veränderung auf der Haut mit Verkürzung der Kontaktdauer zwischen Haut und Elektrode sinkt [76], liegt die Problematik bei der gerichtsmedizinischen Stromtoddiagnose (siehe Kapitel 1.2) durch vor allem Kurzzeitstromkontakte, insbesondere bei gleichzeitig nur geringer Stromdichte [32], auf der Hand.

Komplizierend kommen zusätzlich noch die oben beschriebenen weiteren Einflussfaktoren wie *Hautbeschaffenheit* und *Umgebungsmilieu* hinzu:

Wird stark durchfeuchtete Haut mit einem Widerstand von nahezu 0Ω in den Experimenten verwendet, wie es in der rechtsmedizinischen Praxis nach einem langen und intensiven Wasserkontakt der Haut vorkommen kann, so zeigen sich trotz geringer Kontaktzeiten, auch bei eventuell nur niedriger Stromstärke (bis 1 A), ausgeprägte morphologische Veränderungen. Jedoch tritt die zentrale Verkohlung, im Gegensatz

zur peripheren Blasen- und Randwallbildung, häufig erst nach längerer Stromflussdauer (> 1 Sekunde) nach Verdampfung der Flüssigkeit im Gewebe auf (Abbildung 3.4). Dies widerspricht der Auffassung von Al-Alousi LM [1], der die Meinung vertritt, dass bei niedriger Impedanz, wie es bei nasser oder auch in Wasser gelagerter Haut der Fall ist, der Strom so schnell durch sie hindurchfließt, dass die Zeit durch den extrem niedrigen Hautwiderstand zur Entstehung von Hitzeenergie nicht ausreicht.

Ist die Haut bei Versuchsdurchführung vollständig von Wasser umschlossen, so gelten zwar nach wie vor die oben genannten Einflussfaktoren für die Entstehung einer Strommarke, jedoch in abgeschwächter Form. Durch die kühlende Wirkung des wässrigen Milieus kommt es zur sekundären Reduktion der ebenfalls bei sehr kurzen Stromflusszeiten [95] entstehenden Joule'schen Wärme, welche für die morphologische Strommarkenausprägung durch lokale Verbrennung [17, 20, 23, 32, 45, 62, 68, 76, 77, 92, 108] verantwortlich ist. Aufgrund dieser sekundären Abschwächung, und nicht durch die primär fehlende Ausbildung von Hitze unter Wasser [1], weist das Hautgewebe eine geringere thermische Zerstörung auf, als es bei Versuchsdurchführung an Luft der Fall ist (vergleiche Abbildungen 3.4 und 3.7).

Aufgrund verschiedener Hautwiderstände hat auch die ursprüngliche Lokalisation der verwendeten Leichenhaut am Körper einen bedeutenden Einfluss auf den Grad der Ausprägung einer Marke bei Stromkontakt. Wird in den Experimenten beispielsweise trockene Bauchhaut mit einer nur geringen Hornschicht verwendet, so kommt es deutlich häufiger zur zentralen Verkohlung des Gewebes mit Entstehung eines peripheren Randwalls, als wenn trockene Fußsohlenhaut mit ihrer dicken, isolierenden [20], gegen thermische und mechanische Einflüsse relativ stabilen Hornschicht Verwendung findet. Bei verhornter Fußsohlenhaut kommt es zwar häufig, jedoch fast immer erst nach längeren Stromflussdauern (> 1 Sekunde), zu einer zentralen Verkohlung, weniger ausgeprägt aber zur typischen Randwall- und Blasenbildung (Abbildung 3.4). Böhm E [17, 20] sieht die Ursache hierfür in einem Fehlen der von ihm beschriebenen Verschiebephase mit Gewebsschrumpfung bei Haut mit stabiler Hornschicht und bei Versuchen mit nur streifendem Elektrodenkontakt. Aufgrund der häufig nur geringen morphologischen Veränderungen stellt die Stromtoddiagnostik im Falle von Strommarken an Handinnenflächen und Fußsohlen daher eine besondere Herausforderung dar.

Die praktische Bedeutung des *Elektrodenmaterials* auf den Grad der thermischen Hautschädigung mit Ausbildung einer Strommarke ist, im Gegensatz zu den oben beschriebenen anderen morphologischen Einflussfaktoren, als relativ gering einzuschätzen. Dennoch soll an dieser Stelle auf die verschiedene Wärmeleitfähigkeit einzelner Metalle mit unterschiedlicher Elektrodenaufheizung hingewiesen werden [7, 15, 20, 95]. In den Versuchen zeigt sich auch in dieser Arbeit die Tendenz, dass Elektroden verschiedenen Materials bei Kontakt mit der Haut eine unterschiedliche Intensität zeigen, morphologische Veränderungen hervorzurufen (Abbildung 3.6). Allerdings sind Form und Durchmesser der in dieser Arbeit verwendeten Elektroden nicht identisch, sodass weitere zukünftige Untersuchungen notwendig sind, um diesen Aspekt näher zu beleuchten. Eine typische, regelmäßig bei Einsatz eines bestimmten Elektrodenmaterials wiederkehrende Oberflächenveränderung und Metallisation, wie Böhm E sie in Form seiner „Elektro-Pittings“ beschreibt [11, 13, 15, 17] kann jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht bestätigt werden.

4.1.1.2 Randblasenbildung

Die in Abbildung 3.8 dargestellten Stadien der Blasenbildung bei der Erzeugung von Kurzzeitkontaktstrommarken finden sich, bei gleichen Versuchsbedingungen, identisch auch bei der Herstellung von Hitzemarken. Somit ist eine Differentialdiagnose zwischen Strom- und Hitzemarken anhand dieses Kriteriums nicht möglich (vergleiche Abbildungen 3.10 und 3.86 und Kapitel 4.2):

Makroskopisch kommt es bei der Erzeugung von Kurzzeitkontaktstrommarken zunächst zu einer nur leichten Aufwölbung der Haut an den Rändern der Elektrodenauflagefläche, dann zur Ausbildung von randständigen Blasen und zentraler Verflüssigung der Haut im Sinne einer Koagulationsnekrose (Abbildung 3.32 c) und schließlich zu einer Verkohlung und Schrumpfung des Gewebes bei fortwährendem Stromfluss. Dabei erhöht sich durch zunehmende Verkohlung des Hautgewebes der elektrische Widerstand, was sich messtechnisch in einem plötzlichen Abfall der Stromstärke widerspiegelt (Abbildung 3.9) [20].

Böhm E et al [20] vertreten die Meinung, dass „die Joule'sche Wärme (...) in der Phase C zu einer großflächigen Mobilisierung (Elektrodenauflagefläche) der Epidermis gegenüber dem Corium [führt]“, welche dann durch geringes Verkanten der Elektrode, verstärkt durch die Blasenbildung, eine mechanische Verschiebung der Epider-

mis mit „ringförmige[n] Ausreißungen an den Haaraustrittsstellen [und] ovale[n] radial gestellte[n] Defektbildungen“ verursacht. Die Vermutung, dass vor allem die Hitzeeinwirkung bei Stromkontakt zusammen mit einer geringen mechanischen Komponente die typische Morphe einer Strommarke hervorruft, erklärt, warum die morphologische Ausprägung von unter gleichen Voraussetzungen entstandenen Strom- und Hitzemarken identisch ist.

Die Ergebnisse der in dieser Arbeit durchgeführten Experimente bestätigen somit die Böhmsche Hypothese.

4.1.1.3 Bläschenbildung

Ein typisches, regelmäßig auftretendes Phänomen bei sehr kurzen Stromkontakten ist eine Bläschenbildung in der Haut (Abbildung 3.11). Histologische Schnitte zeigen, dass die Bläschen überwiegend am Rand der Strommarke und dort vor allem im verhornten Bereich der Epidermis vorkommen (Abbildung 3.18). Als mögliche Ursachen für das Phänomen der Vakuolisierung in der Hornschicht diskutiert Böhm E [17] drei Ursachen:

1. Eine starke örtliche Gewebsaufheizung mit Dampfbildung bei 100°C .
2. Eine nicht-elektrolytische Stromleitung (Gasentladungshitze) mit Verdampfung von Hornsubstanz.
3. Eine elektrolytisch bedingte Gasentwicklung im Gewebe.

Da eine Bläschenbildung in der Epidermis auch regelmäßig bei Erzeugung von Hitzemarken mit nur kurzer Kontaktdauer zwischen Haut und erhitztem Metall (bis 1 Sekunde) auftritt (Abbildungen 3.87 und 3.91), erscheint Böhms erste Erklärung, bei der die Vakuolenbildung stromunabhängig ist, also nur rein thermische Ursachen hat, am naheliegendsten. Die Frage, ob sie auch als Vorstufe der klassischen Randblasenbildung bei zum Beispiel längerer Stromflussdauer (> 1 Sekunde) zu sehen ist, bedarf allerdings weiterer Abklärung: So könnte man vermuten, dass die Bläschenbildung bei nur gering thermisch geschädigter Haut, wie es bei Strom- und Hitzekontakten bis eine Sekunde häufig der Fall ist, von den anatomisch-dermatologischen, thermisch noch nicht geschädigten Barrieren begrenzt wird. Das entstehende Gas kann sich also nur in vorbestehenden Hohlräumen ausbreiten. Kommt es zur weiteren wärmebedingten Zer-

störung der Epidermis bei zum Beispiel längerem Strom- oder Hitzekontakt (> 1 Sekunde), so verschwinden auch diese Barrieren und das Gas kann sich schrankenlos im Sinne einer großen Blase im Hautgewebe verteilen. Dies geschieht allerdings häufiger im Randbereich der Elektrode, da es im Zentrum der Auflagefläche durch die stärkere Hitzeentwicklung schneller zur vollständigen Zerstörung aller Hautstrukturen bis hin zur zentralen Verkohlung kommt. Für diese Behauptung würde auch die Beobachtung sprechen, dass eine Bläschenbildung durch die geringere Hitzeentwicklung bei extrem kurzen Stromkontakten, bei denen es zu einer kaum makroskopisch sichtbaren Veränderung der Hautstruktur kommt, auch gelegentlich zentral in der Strommarke zu finden ist.

In Einzelfällen werden Bläschen auch in Textilfasern nachgewiesen, welche bei Erzeugung von Kurzkontaktstrommarken der Haut aufgelagert sind (Abbildung 3.13), und die natürlich keinerlei dermatologische Barrieren aufweisen. Allerdings könnte man auch hier eine interne Begrenzung durch die Struktur der einzelnen Fasern vermuten. Weiterhin findet sich eine „feinwabige Oberflächengliederung unter Verlust der Cuticula-Struktur“ [11] auch in thermisch geschädigten Haaren bei intensiverem Stromkontakt [87].

4.1.1.4 Interposition von Textilien

Wird der Haut bei Versuchsdurchführung ein Stück Textilgewebe (Viskosestoff, Wollstoff, Jeansstoff) aufgelagert, so fließt der Strom, trotz der isolierenden Eigenschaften des Stoffs, aufgrund der hohen Stromstärke in den meisten Fällen durch das Textil hindurch. Dabei kommt es, je nach Schmelztemperatur des jeweilig verwendeten Stoffs, zu einer partiellen bis totalen Zerstörung des Textilgewebes, welche bei Viskosestoff natürlich deutlich stärker als bei zum Beispiel Jeansstoff ausgebildet ist. Es lassen sich in beiden Fällen Ein- und Abschmelzungen einzelner Stofffasern mit kolbigen Auftreibungen im Rasterelektronenmikroskop nachweisen (Abbildung 3.13) [17, 86, 89].

Wird das aufliegende Kleidungsstück aufgrund einer niedrigen Schmelztemperatur des Textils oder durch eine starke Hitzeentwicklung bei Stromkontakt vollständig zerstört, so bildet sich nach oben erläuterten Einflussfaktoren eine Strommarke auf der unterliegenden Haut aus, in der zentral im Bereich der größten Hitzeschädigung immer auch

mit der Haut verschmolzene Stofffasern nachgewiesen werden können (Abbildung 3.12).

4.1.1.5 Haare

Nebenbefundlich kann festgestellt werden, dass eine thermische Schädigung von Haaren in Kurzkontaktstrommarken häufig deutlich geringer ausgeprägt ist, als es in Kurzkontakthitzemarken der Fall ist (vergleiche Abbildung 3.14 und 3.89).

Aufgrund einer nur sehr kurzen Kontaktzeit zwischen stromführender Elektrode und Haut kann nur wenig Joule'sche Wärme entstehen, welche das Haar schädigt, während das schon vorgeheizte Metall bei Kurzkontakthitzemarken sofort eine thermische Schädigung hervorruft. Für diese Behauptung spricht auch die Beobachtung von Böhm E [11], der ebenfalls erst bei langen Stromflusszeiten mit genügend hoher Hitzeentwicklung eine stärkere thermische Schädigung von Haaren mit plump aufgetriebenen Enden und Abschmelzungserscheinungen beobachten kann. Zu diesem Zeitpunkt treten dann auch die wabigen Umwandlungen in der Haarstruktur auf (Kapitel 4.1.1.3). Die Bläschenbildung in Haaren scheint also, im Gegensatz zur Vakuolenbildung in der Epidermis als Zeichen des nur kurzen elektrischen Kontaktes, ein Hinweis auf einen intensiveren Stromfluss zwischen Elektrode und Haut zu sein.

4.1.1.6 Bedeutung für die rechtsmedizinische Praxis

An die Diagnose des Stromtods sollte immer dann gedacht werden, wenn auf der Haut eine thermische Veränderung im Sinne einer klassischen Strommarke zu sehen ist. Schwierigkeiten bereiten jedoch solche Fälle, bei denen aufgrund der aufgeführten Einflussfaktoren eine Strommarke morphologisch nur gering ausgebildet ist [66, 79, 86].

Um die Wahrscheinlichkeit der klassischen Ausprägung mit zentraler Nekrose, porzellanartigem Randwall und Blasenbildung am Elektrodenrand einschätzen zu können, ist es besonders wichtig zu eruieren, ob der mit Strom kontaktierte Hautbereich zum Todeszeitpunkt *trocken oder durchfeuchtet* war. So zeigt stark durchfeuchtete Haut, welche jedoch bei Stromfluss nicht vollständig von Wasser umschlossen sein darf, aufgrund ihres niedrigen Widerstandes die stärkste Tendenz, eine klassische Strommarke auszubilden. Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn das Opfer bis kurz vor dem Stromtod noch ein längeres Bad genommen, dieses jedoch zum Todeszeitpunkt

schon beendet hat. Dabei ist für den Grad der morphologischen Ausprägung einer Strommarke, im Gegensatz zum Aspekt der Oberflächenmetallisation (Kapitel 4.1.3.1), die Frage, ob die Haut in diesem Augenblick auf der Oberfläche schon vollständig trocken oder noch leicht feucht gewesen ist, im Vergleich zum Faktor der totalen Hautdurchfeuchtung nur von untergeordneter Bedeutung.

Weiterhin muss natürlich immer auch mitberücksichtigt werden, dass die Lage der Strommarke am Körper und somit die jeweilig vorherrschende *Hautbeschaffenheit* einen entscheidenden Einfluss auf die morphologische Ausprägung hat. Es sollte immer bedacht werden, dass sich eine morphologisch klassische Strommarke auch bei starker Durchfeuchtung weniger wahrscheinlich auf der stark verhornten Haut der Fußsohle oder Handinnenfläche finden wird, als in weniger verhornten Körperarealen wie zum Beispiel am Bauch oder am Oberschenkel.

Ebenso ist es wichtig am Fundort auszuschließen, dass sich zum Zeitpunkt des Stromflusses der mit einer Elektrode kontaktierte Hautbereich vollständig unter Wasser befunden hat. Ist dies nämlich der Fall, so sinkt die Wahrscheinlichkeit der morphologischen Hautveränderung bei Stromkontakt durch die kühlende Wirkung des wässrigen Umgebungsmilieus auch bei ansonsten optimalen Bedingungen (lange Stromflussdauer, hohe Stromstärke, kleiner Elektrodendurchmesser, niedriger Hautwiderstand) beträchtlich (vergleiche Abbildungen 3.4 und 3.7).

Differentialdiagnostisch dazu muss allerdings bei geringen morphologischen Veränderungen der Haut nach Stromkontakt immer auch eine nur *kurze Stromflussdauer*, wie es ebenfalls in der beschriebenen Kasuistik (Kapitel 1.5) der Fall ist, in Betracht gezogen werden. So kann der Grad einer morphologischen Veränderung bei Strommarkenerzeugung an Luft und nur sehr kurzer Stromflussdauer, zum Beispiel nach Abschalten des Stromes durch den FI-Schalter, identisch sein zur morphologischen Ausprägung bei Strommarkenerzeugung auf im Wasser gelagerter Haut und längerer Stromflusszeit. Trotz der in beiden Fällen gleichen Morphologie kann eine Unterscheidung anhand des charakteristischen Metallisationsmusters auf der Hautoberfläche und in der Tiefe der Haut bei Strommarkenerzeugung an Luft bzw. im Wasser (Kapitel 4.1.3) eindeutig erfolgen. Weitere Kriterien für die orientierende Einschätzung der Kontaktdauer zwischen Elektrode und Haut sind aber auch die Bläschenbildung der Epidermis nach Kurzzeitstromkontakt und der Grad der thermischen Schädigung von Haaren in der Strommarke (Kapitel 4.1.1.3 und 4.1.1.5).

Da natürlich neben der Stromflussdauer auch die *Stromstärke* bei Todesfällen durch elektrischen Strom einen entscheidenden Einfluss auf die morphologische Ausprägung einer Strommarke hat, ist die technische Rekonstruktion des Tat- bzw. Unfallhergangs ebenfalls sehr wichtig, um eine Vorstellung über die Höhe der die Haut durchflossenen Stromstärke zu bekommen.

Weiterhin sei noch darauf verwiesen, dass anhand der charakteristischen Morphologie einer Strommarke (Abbildungen 3.4) gelegentlich auch Rückschlüsse auf die Form der verursachenden Elektrode möglich sind [1, 23, 44, 45, 46, 87].

Interposition von Textilien:

Letztlich kann anhand eingeschmolzener Fasern in der Strommarke (Abbildungen 3.12 und 3.44) eindeutig nachgewiesen werden, dass die Haut bei Stromkontakt bekleidet gewesen sein muss, wobei eine Zuordnung dieser Stoffresiduen zu dem zum Todeszeitpunkt getragenen Kleidungsstück ebenfalls möglich ist. Kommt es jedoch lediglich zu einer Anschmelzung des bei Stromkontakt interponierten Textils, so entsteht zwar auf dem Stoffgewebe, nicht jedoch auf der Haut eine sichtbare Strommarke (Abbildung 3.43). Aufgrund dessen ist eine Stromtoddiagnose dann gegebenenfalls erschwert, wenn nicht sogar unmöglich, wenn das bei Stromfluss die Haut bedeckende Kleidungsstück später entfernt wird. Dies könnte zum Beispiel der Fall sein, wenn im Falle des Homizids der Täter sein Opfer nach dem Tod an entsprechender Stelle entkleidet.

4.1.2 Histologie

Die Intensität der Ausprägung einer Strommarke in der Tiefe des Gewebes ist sehr variabel und letztlich abhängig von den gleichen Parametern, wie sie schon im vorherigen Kapitel für die Morphologie beschrieben worden sind.

So nimmt der Grad der Epidermiszerstörung mit Zunahme der **Kontaktdauer** zwischen Haut und stromführender Elektrode [76] zu, ebenso mit Erhöhung der **Stromintensität** (Abbildung 3.17). Der Einfluss vom **Widerstand** und damit der **Leitfähigkeit** der kontaktierten Haut, von **Elektrodenmaterial und -form** [76] und die Beziehung zwischen **Umgebungsmilieu** und histologischer Ausprägung einer Strommarke entsprechen ebenfalls den Einflussfaktoren für die Morphologie (Kapitel 4.1.1.1).

Auf die Strommarkenform in der Tiefe der Haut, auf die histologischen Aspekte der Bläschenbildung und auf die Zell- und Kernelongation in Strommarken soll im Hinblick auf eine differentialdiagnostische Abgrenzung zu Hitzemarken erst im Kapitel 4.2 näher eingegangen werden.

4.1.3 Metallisation

Die Metallisation von Kurzzeitkontaktstrommarken (bis 1 Sekunde) ist in ihrer Ausprägung zwar sehr variabel, in Abhängigkeit von verschiedenen Randbedingungen jedoch durchaus charakteristisch [106].

Grundsätzlich lassen sich mit Hilfe eines REM auf der Probenoberfläche *innerhalb* und, als Differentialdiagnose zur Hitzemarke, auch *außerhalb* der Strommarke abgelagerte metallische Kugeln von Metallpartikeln unterscheiden. Weiterhin ist Metall *innerhalb* der Strommarke diffus auf und in der Haut abgelagert (Abbildung 3.20). Im den Materialkontrast darstellenden RE-Bild der Hautoberfläche können diffuse Metallareale zumeist als hellere Zone im Vergleich zum angrenzenden Gewebe dargestellt werden, wobei die Helligkeit proportional zur Konzentration des eingelagerten Metalls ist. Diese Form der Metallisation, welche sich primär auf der Hautoberfläche befindet, jedoch auch bis in tiefere Schichten der Haut reichen kann, soll erst im Kapitel 4.1.3.3 diskutiert werden.

Bei der Strommarkenerzeugung auf im Wasser gelagerter Haut zeigen sich zusätzlich unbeschädigte Hautareale mit diffus aufgelagertem Metall, welche rasterelektronenmikroskopisch nicht heller erscheinen.

4.1.3.1 Oberflächenverteilung von Metall

Metallische Kugeln

Entstehung:

Metallische Kugeln auf der Hautoberfläche nach Stromkontakt entstehen durch Funkenentwicklung zwischen stromführender Elektrode und Haut. Sie sind auch von Böhm E [7, 15, 17, 18] beschrieben worden. Ihre Entstehung bei Strommarkenerzeugung ist die Folge eines funkenerosiven Abtragungsprozesses, bei dem durch die im

Rahmen einer elektrischen Entladung entstehenden hohen Temperaturen das Metall der jeweilig verwendeten Elektrode in einem kleinen Bereich aufgeschmolzen wird und in Kugelform erstarrt (Abbildung 4.1⁵). Durch akustische Wellen werden die entstandenen Metallkugeln dann herausgeschleudert und lagern sich in der Umgebung ab. Metallische Kugeln finden sich somit immer dann, wenn die stromführende Elektrode der Haut nicht vollständig aufliegt und es aufgrund des entstehenden elektrischen Feldes zwischen beiden zum elektrischen Ladungsausgleich mit Funkenentwicklung kommt. Die isolierende Luftschicht wird so innerhalb einiger Mikrosekunden durchbrochen.

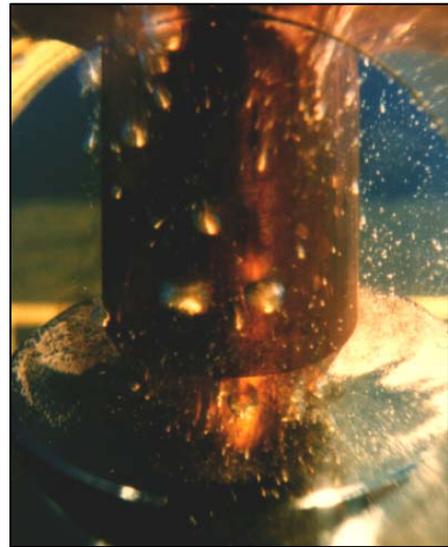


Abbildung 4.1

Funkenerosiver Abtragungsprozess von Metall der Elektrode und Ablagerung in Form von metallischen Kugeln auf der Probenoberfläche

Einflussfaktoren:

Die *Stärke der Funkenentwicklung* ist abhängig von der **elektrischen Feldstärke** in der Funkenstrecke. Diese wiederum wird beeinflusst durch den **Abstand zwischen Elektrode und Probe**, der zwischen beiden bestehenden **Spannungsdifferenz** und der **Form der verwendeten Elektrode**, wobei die Feldstärke in der Nähe einer Spitze besonders hoch ist. Weiterhin wird die Funkenentwicklung in den Versuchen durch den **Widerstand von Leit-Tab bzw. Haut** [17], welcher wiederum vom Durchfeuchtungsgrad und der verwendeten Hautart abhängig ist, und durch den **Übergangswiderstand** zwischen Haut bzw. Leit-Tab und der unterliegenden Zink-Platte beeinflusst. So kommt es bei Verwendung des Leit-Tab aufgrund des hohen Übergangswiderstandes zwischen Elektrode und Leit-Tab regelmäßig zu einem explosionsartigen Funkenüberschlag, der bei Erhöhung der Stromstärke noch an Intensität zunimmt (Abbildung 3.21).

⁵ <http://erosion.de>

Die *Anzahl und Größe der abgelagerten Metallkugeln* nun hängen einerseits von der Dauer und Intensität dieser **elektrischen Entladungen**, andererseits jedoch auch vom jeweilig verwendeten **Elektrodenmetall** (siehe *Metallische Zusammensetzung*) ab. So sind die abgelagerten Kugeln dann größer, wenn es bei Versuchsdurchführung zu einer explosionsartigen Entladung kommt, als wenn eine Funkenentwicklung kaum sichtbar ist (Abbildung 3.21). Aufgrund der Sprengwirkung der Funken können jedoch in beiden Fällen die metallischen Kugeln auch noch in einigem Abstand zur Strommarke nachgewiesen werden. Dabei wächst die Entfernung zur Strommarke proportional zur Stärke des Funkenüberschlags. Häufig führt eine schräg auf die Haut oder den Leit-Tab aufgesetzte stromführende Elektrode zu einem Wegspritzen von metallischen Kugeln in die Gegenrichtung (Abbildungen 3.30 und 3.34), sodass Rückschlüsse auf die Anpressrichtung einer Elektrode möglich sind.

Der beschriebene funkenerosive Prozess findet, jedoch in geringerem Maße, auch unter Wasser statt. Das wässrige Milieu nimmt, wie auch die Luft, die Funktion eines isolierenden Dielektrikums ein. Bei genügend hoher Feldstärke kommt es zu Funkenüberschlägen zwischen Elektrode und Leit-Tab bzw. Haut. So finden sich in beiden Fällen ebenfalls vereinzelte metallische Kugeln (Abbildungen 3.65 und 3.67) auf der Probenoberfläche [19]. Ihre Anzahl liegt jedoch deutlich unter der bei Strommarkenerzeugung an Luft. Dies ist natürlich vor allem durch die geringere Funken- und Temperaturentwicklung unter Wasser verursacht. Allerdings wäre in diesem Zusammenhang auch denkbar, dass die funkenerosiv entstandenen Kugeln durch das wässrige Milieu zusätzlich in weiter entfernte Areale weggeschwemmt werden.

Bei der Strommarkenerzeugung auf im Wasser gelagerter Haut überwiegt jedoch grundsätzlich die diffuse Einlagerung von Metall in die Haut (Kapitel 4.1.3.3 und 4.1.3.4).

Da alle Versuche dieser Arbeit mit Wechselstrom von 220 Volt und 50 Hertz durchgeführt werden, kann der oben beschriebene funkenerosive Vorgang ebenso in die Gegenrichtung erfolgen. Bei Verwendung des auf einen REM-Halter geklebten Leit-Tab als Hautäquivalent können bei starker Funkenentwicklung neben metallischen Kugeln, welche aus dem Elektrodenmetall bestehen, regelmäßig auch Aluminiumkugeln nachgewiesen werden, obwohl kein Aluminium in der Elektrode vorhanden ist. Aufgrund der starken Hitzeentwicklung beim Funkenüberschlag wird der Leit-Tab zerstört, sodass ein direkter Kontakt zum darunter befindlichen aluminiumhaltigen REM-Halter hergestellt wird. Aus diesem wird nach einer konstanten Periodendauer regelmäßig

funkenerosiv Material abgetragen und in Kugelform auf der Probe abgelagert (Abbildung 3.30). Dieses Phänomen ist für die rechtsmedizinische Praxis jedoch nur von untergeordneter Bedeutung.

Metallische Zusammensetzung:

Auch das jeweilig verwendete Elektrodenmaterial hat neben der Stärke der elektrischen Entladung (siehe *Einflussfaktoren*) aufgrund unterschiedlicher **Wärmeleitfähigkeit** und **Schmelztemperatur** Einfluss auf Anzahl und Größe der abgelagerten Metallkugeln. So finden sich bei den Leit-Tab-Versuchen regelmäßig Aluminiumkugeln auf der Probenoberfläche (Abbildung 3.30), wobei deren Anzahl die der Erosionskugeln aus dem eigentlichen Elektrodenmaterial (Messing, Stahl etc.) deutlich übersteigt.

Der Grund hierfür liegt in der hohen Wärmeleitfähigkeit ($237 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) und dem relativ niedrigen Schmelzpunkt ($660,32^\circ \text{ C}$) von Aluminium gegenüber zum Beispiel Eisen mit einer Wärmeleitfähigkeit von $80,2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ und einem Schmelzpunkt von 1535° C oder Kupfer mit einer Wärmeleitfähigkeit von $401 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ und einem Schmelzpunkt von $1084,4^\circ \text{ C}$. Gleiches gilt im Übrigen auch für Zink (Wärmeleitfähigkeit: $116 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, Schmelzpunkt: $419,5^\circ \text{ C}$). Aufgrund der hohen Schmelztemperatur von Kohlenstoff (3500° C) finden sich bei Benutzung des Kohlestabes als Elektrode in den Versuchen nie Kugeln, jedoch eine große Anzahl durch Funkenbildung mobilisierter Graphitstücke auf der Probenoberfläche (Abbildung 3.36).

Werden mit einer Metallbeschichtung versehene Elektroden zur Durchführung der Experimente verwendet, so bestehen die metallischen Kugeln aus dem reinen Beschichtungsmaterial oder aus einer Legierung aus Beschichtungs- und Grundmaterial. Dies ist dadurch zu erklären, dass beide Materialien bei Funkenüberschlag aufgeschmolzen werden und eine Legierung bilden, welche anschließend in Kugelform erstarrt. Hierbei wird das Verhältnis einzelner Legierungsbestandteile nach mehrmaliger Benutzung derselben Elektrode zunehmend hin zum Grundmaterial verschoben. Weiterhin kann die Beschichtung nach mehrmaliger Benutzung auch vollständig verbraucht sein, und es finden sich im Folgenden nur noch Kugeln, bestehend aus dem Grundmaterial der Elektrode, wie es bei Verwendung von Elektroden aus Reinmetallen immer der Fall ist. Beschriebenes Phänomen hat sich auch in den Versuchen gezeigt, wenn bei Benutzung zum Beispiel des vergoldeten und vernickelten Messingbananensteckers die auf

der Strommarkenoberfläche abgelagerten Kugeln zunächst noch Gold enthalten, dieses jedoch nach mehrmaliger Benutzung nicht mehr nachzuweisen ist. Böhm E [17] vermutet, dass sich das Verhältnis Deckschicht/ Matrix-Elemente in den von ihm beschriebenen Metallisationszonen bei Verlängerung der Stromflusszeiten auch innerhalb eines Versuchs zugunsten der Matrix-Elemente verschiebt.

Bei Verwendung einer Elektrode, bestehend aus einer Legierung, werden durch die Hitzeentwicklung bei Funkenüberschlag alle Legierungsbestandteile aufgeschmolzen, bilden in dieser flüssigen Form ein zufällig neu zusammengesetztes Gemisch und erstarren in Kugelform. So ist es auch zu begründen, dass das Mengenverhältnis der einzelnen Legierungsbestandteile sowohl innerhalb verschiedener Kugeln eines Versuchs variabel ist als auch zwischen abgelagerten Kugeln und ursprünglicher Zusammensetzung in der Elektrode variiert (Abbildungen 3.27, 3.28 und 3.29) [15].

Auch bei der Erzeugung von Hitzemarken mittels des auf 480°C erhitzten Messingstabs sind in unseren Versuchen metallische Kugeln entstanden, welche sich in der Marke ablagern (Abbildung 3.94), obwohl eine Funkenentwicklung wie beim Stromfluss nicht vorkommt. Diese Kugeln bestehen aus reinem Blei (Schmelztemperatur: $327,46^{\circ}\text{C}$) oder alternativ aus einer Legierung aus Blei und Zink und stellen somit reine Schmelzprodukte dieser Metalle dar, wobei das Metall mit dem niedrigeren Schmelzpunkt in seiner Konzentration überwiegt. Das Kupfer der Elektrodenlegierung mit seinem hohen Schmelzpunkt ($1084,4^{\circ}\text{C}$) geht aufgrund der hier vorliegenden niedrigen Temperatur des erhitzten Messingstabs nicht in den flüssigen Zustand über. Es kann somit nie in Kugeln nach reinem Hitzekontakt nachgewiesen werden.

Im Gegensatz dazu bestehen die Kugeln, welche bei Verwendung des Messingstabs durch Funkenerosion entstanden sind, immer nur aus Kupfer und Zink oder aus reinem Zink, jedoch nie aus Blei. Dies ist dadurch zu begründen, dass Blei im Messingstab nur in einer sehr geringen Konzentration vorhanden ist. Bei der Erzeugung von Hitzemarken kann dieses durch langsames Erwärmen des Messingstabs über 10 - 15 Minuten zusammenfließen. Die entstandenen kugelförmigen Bleiagglomerate lagern sich bei Versuchsdurchführung sofort auf der Hautoberfläche ab. Bei der Erzeugung von Strommarken dagegen reicht die nur kurze Zeit während der Funkenentwicklung nicht zur Agglomeration des Bleis im Messingstab aus. Durch den elektrischen Überschlag wird die Elektrode zwar punktuell angeschmolzen, wobei in der entstehenden

Legierung dann Blei als Spurenelement vorhanden ist. Dieses kann aufgrund einer zu niedrigen Nachweisempfindlichkeit der EDX jedoch nicht detektiert werden.

Metallische Partikel

Entstehung:

Metallische Partikel kommen im Gegensatz zu metallischen Kugeln, welche nur nach Funkenentwicklung vorhanden sind, auch unabhängig von einer sichtbaren elektrischen Entladung vor. Das Auftreten von metallischen Partikeln ist noch nicht eindeutig geklärt. Wahrscheinlich handelt es sich bei diesen Metallpartikeln um durch einen Oberflächenangriff mechanisch mobilisierte und durch den Kontakt zur Haut bei Stromfluss passiv der Hautoberfläche aufgelagerte Metallteilchen [17]. Ihr Vorhandensein in der Strommarke ist somit auch bedingt durch Bearbeitung des Elektrodenmaterials, wobei sie trotz Reinigung der Elektrode unter fließendem Wasser und anschließender Trocknung mit einem Stofftuch vor Versuchsdurchführung noch in der Strommarke nachzuweisen sind. Für diesen Entstehungsmechanismus spricht, dass in ersten Versuchen mit elektrolytisch polierten Elektroden (Abbildung 3.33) keine Metallpartikel in der Strommarke vorhanden sind.

Der Stromfluss als primäre Ursache der Entstehung von Metallpartikeln ist eher unwahrscheinlich, da diese, wenn auch in deutlich geringerer Anzahl, ebenso in Hitzemarken anzutreffen sind (Abbildung 3.92). Allerdings dürfte durch die Sprengkraft der sichtbaren elektrischen Überschläge oder nicht makroskopisch sichtbaren Mikrolichtbögenüberschläge (Abbildung 3.32 d) [77] zumindest eine Verstärkung der mechanischen Mobilisierung von Metallpartikeln erfolgen, sodass in der Folge die Anzahl der Partikel in Strommarken deutlich höher liegt als in Hitzemarken.

Für diese Behauptung spricht auch, dass bei einer Reihe der Versuche eine Verdichtung der abgelagerten Metallpartikel vor allem am Rand der entstandenen Strommarke auffällig ist (Abbildung 3.66). Es kommt aufgrund des nur geringen Anpressdrucks (Eigengewicht) vor allem im Randbereich zu einem unvollständigen Kontakt zwischen Elektrode und Leit-Tab bzw. Haut, wodurch vor allem hier Lichtbogenüberschläge [6] entstehen, welche die Abspregung von mechanisch mobilisierten Metallpartikeln verstärken.

Die Annahme der Funkenentwicklung vor allem im Elektrodenrandbereich wird durch den Nachweis von Partikeln und Hautbestandteilen im einer Elektrodenspitze benach-

barten Bereich weiter gestützt (Abbildung 3.32 b). Kommt es dagegen zur Randblasenbildung bei Erzeugung einer Strommarke, so finden sich demgegenüber nur wenig abgelagerte Metallpartikel im Randbereich der Marke (Abbildung 3.52). Im Gegenteil lässt sich eine Metallisation dann eher in Form von metallischen Partikeln und Kugeln vor allem im Strommarkenzentrum nachweisen. In diesem Zusammenhang sei auf Böhm E [15] verwiesen, der eine Funkenentwicklung in den Blaseninnenraum nach Selbstisolierung der Elektrode vermutet und entsprechende rasterelektronenmikroskopische Befunde beschreibt. Eine Partikel- und auch Kugelablagerung wird also in die randständige Blase hinein erfolgen, wodurch sie bei der rasterelektronenmikroskopischen Betrachtung und Analyse der Probenoberfläche nicht identifiziert werden kann.

Sind innerhalb der Elektrodenauflagefläche Bereiche vorhanden, in denen die Elektrode der Haut oder dem Leit-Tab nicht vollständig aufliegt, so kommt es aufgrund von nicht mit dem bloßen Auge erkennbaren Mikrolichtbogenüberschlägen hier ebenfalls zu einer Anhäufung von metallischen Partikeln (Abbildung 3.35). Die von Böhm E [6, 9] in diesem Zusammenhang noch Ende der 60er Jahre beschriebene schießscheibenförmige Metallisation auf der Strommarkenoberfläche mit zentraler Perforation und ringförmig angeordnetem Metallisationswall bei nur kurzen Stromflusszeiten ist in dieser klaren Ausprägung von uns nicht zu identifizieren. In den meisten Fällen kommt es aufgrund der Funkensprengkraft eher zu einer weiträumigen Verteilung von Partikeln (Abbildung 3.34) [56], wobei Böhm E [17] dieses Phänomen bei seinen rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen von Strommarken später dann ebenfalls beschreibt.

Einflussfaktoren:

Da ein Zusammenhang zwischen Partikelentstehung und Funkenentwicklung besteht, ist die Anzahl der auf der Probenoberfläche abgelagerten Metallpartikel ebenfalls von allen schon für die Kugelentstehung durch Funkenerosion beschriebenen Einflussfaktoren abhängig.

So finden sich deutlich weniger metallische Partikel auf der Probenoberfläche bei Verwendung von stark durchfeuchteter Haut der Handoberfläche als bei Benutzung von Schweinehaut (Abbildungen 3.40 und 3.41) oder nicht durchfeuchteter menschlicher Bauchhaut. Der Grund hierfür ist, dass durch einen Flüssigkeitsfilm auf der Haut und das ohnehin stark durchfeuchtete Gewebe (Widerstand $\sim 0 \Omega$) der (**Übergangs-**) **Wi-**

derstand und somit die elektrische Feldstärke herabgesetzt wird und es zu keiner Funkenentwicklung kommt. Dies führt in der Folge zu einer deutlich geringeren Anzahl von metallischen Partikeln auf der Probenoberfläche und weiterhin auch zu einer fehlenden Bildung von Metallkugeln bei direktem Kontakt. Proben- und (Übergangs-) Widerstände scheinen ohnehin für den Aspekt der Ablagerung von metallischen Partikeln und auch Kugeln auf der Probenoberfläche bei Strommarkenerzeugung einen besonderen Stellenwert einzunehmen, der sogar noch höher als die zeitliche Komponente oder die Höhe der Stromstärke eingeschätzt werden muss. So zeigen **höhere Stromstärken** (1-1,5 A) zwar häufig intensive morphologische Veränderungen (Kapitel 4.1.1.1), dagegen grundsätzlich nur eine schwache Metallisation auf der Hautoberfläche (Abbildung 3.42). Ein **längerer Elektrodenkontakt** mit der Haut (> 1 Sekunde) führt, allerdings nur unter der Voraussetzung von Funkenentladungen, zu einer Intensivierung der metallischen Oberflächenablagerung gegenüber Kurzzeitstromkontakten (Kapitel 4.1.5).

Die Widerstände der verschiedenen, für die Versuche verwendeten Hautarten stellen nur Mittelwerte dar, weil sie zwischen verschiedenen Hautstücken derselben Probe und aufgrund der Hautbinnenstruktur (Haare, Drüsen, verschiedene Dicke der Epidermis etc.) sogar innerhalb eines Hautstücks variieren können. Weiterhin besteht, beispielsweise bei nur unvollständigem Kontakt, ein regelmäßig unterschiedlicher Übergangswiderstand zwischen Haut und Zinkplatte. Aufgrund dessen ist es nicht möglich, auch bei Konstanzhaltung der Versuchsbedingungen zwei Strommarken mit gleicher Oberflächenverteilung von Metall herzustellen, zumal durch das manuelle, kurzzeitige Aufsetzen der Elektrode auf die Haut und somit häufig „geringfügiges Verkanten der Elektrode die Übergangsverhältnisse des elektrischen Stromes von der Elektrode zur Haut nicht genau reproduzierbar sind“ [95]. So ist jede Strommarke nicht nur morphologisch, sondern auch bezüglich der Oberflächenablagerung von Metall zwar letztendlich ein Individuum, dennoch besteht grundsätzlich eine Vergleichbarkeit aller erzeugten Strommarken aufgrund der beschriebenen, wiederkehrend regelhaften Charakteristika bei verschiedenen Einflussfaktoren.

Metallische Zusammensetzung:

Metallische Partikel auf der Probenoberfläche setzen sich aus dem Material zusammen, aus dem auch die stromführende Elektrode besteht. Allerdings kann das relative

Verhältnis verschiedener Metalle sowohl zwischen einzelnen Partikeln als auch zwischen Partikel und Elektrode variieren (Abbildungen 3.47 und 3.48).

In Strommarken kann dabei ein gleichzeitiger Nachweis von Metallen einerseits aus dem Beschichtungsmaterial und andererseits aus dem Grundmaterial der Elektrode in einem Partikel erfolgen. Darüber hinaus wird gelegentlich auch nach Erzeugung von Hitzemarken mittels einer auf 480° C erwärmten Elektrode innerhalb eines Partikels gleichzeitig das Grund- und Beschichtungsmaterial analysiert (Abbildung 3.96). Da beispielsweise Eisen jedoch nicht bei einer Temperatur von 480° C schmelzen kann, ist zumindest im genannten Beispiel einer Hitzemarke die Legierungsbildung bestehend aus Eisen, Kupfer und Zink nicht möglich. Die Metalle müssen also getrennt im Partikel vorliegen und werden lediglich aufgrund der Kleinheit der einzelnen Metallpartikel und des im Verhältnis breiten Elektronenstrahls in der EDX-Analyse zusammen detektiert. Dies ist aufgrund des Skirt-Effekts (Kapitel 2.2.1.3) im Niedervakuum-REM natürlich besonders ausgeprägt. Eine reine Hitzewirkung durch Aufschmelzung einzelner Metalle mit anschließendem Erstarren der entstandenen Legierung, wie für die Kugelentstehung beschrieben, kann somit für die Partikelentstehung ausgeschlossen werden.

4.1.3.2 Interposition von Textilien

Wird dem Leit-Tab bzw. der Haut ein Stück Stoffgewebe aufgelagert, so kommt es, abhängig von den schon beschriebenen Parametern, bei Strommarkenerzeugung ebenfalls zur Funkenentwicklung zwischen Elektrode und Probe. Dabei wird das jeweilig interponierte Textil gegebenenfalls zerstört, wobei sich metallische Partikel und Kugeln einerseits auf den zerstörten Stofffasern und andererseits in der entstehenden Strommarke ablagern.

Auch bei Experimenten mit interponierten Textilien kommt es aufgrund des **höheren (Übergangs-) Widerstandes** bei Versuchsdurchführung mit dem Leit-Tab zu einer intensiveren Funkenentwicklung als bei Verwendung von Haut.

Aufgrund der Herabsetzung des Übergangswiderstandes spielt in diesem Zusammenhang ebenfalls die Durchfeuchtung des aufgelagerten Stoffgewebes eine entscheidende Rolle. Grundsätzlich finden sich zwar ähnliche Ergebnisse bei Interposition sowohl

von trockenem als auch von befeuchtetem Textil, allerdings nimmt die thermische Schädigung der feuchten Stofffasern mit anschließender Strommarkenerzeugung auf der unterliegenden Haut im Vergleich zu trockenem Stoff einen längeren Zeitraum in Anspruch, da zunächst eine Verdampfung der im Textilgewebe enthaltenen Feuchtigkeit stattfinden muss. Die nur schwache Funkenentwicklung durch Befeuchtung des der Probe aufgelagerten Stoffs führt zur verminderten Bildung funkenerosiv entstehender Metallkugeln, weshalb im nassen Textil tendenziell mehr metallische Partikel als Kugeln nachgewiesen werden können (Abbildung 3.23).

Zusätzlich hat die **Art des aufgelagerten Stoffgewebes** Einfluss auf die Ausbildung von elektrischen Entladungen. Dabei zeigt der von uns verwendete Jeansstoff eine stärker isolierende Wirkung als der verwendete Viskose- oder Wollstoff. Bei Interposition eines Jeansstoffs ist keine mit dem bloßen Auge sichtbare Funkenentwicklung zu beobachten. Dennoch muss es auch in diesen Fällen zu Mikrolichtbogenüberschlägen kommen, da regelmäßig eine Vielzahl metallischer Partikel und sogar vereinzelte kleine Metallkugeln auf den unbeschädigten Jeansfasern abgelagert sind (Abbildung 3.37). Dagegen zeigen sowohl der Viskose- als auch der dünne Wollstoff eine weniger stark isolierende Wirkung. Bei den Leit-Tab-Versuchen kommt es in beiden Fällen mit entsprechender Stoffinterposition regelmäßig zu explosionsartigen Funkenüberschlägen mit einhergehender Kugelbildung und Zerstörung der Stofffasern (Abbildungen 3.22, 3.38 und 3.39). Dabei weist der Viskosestoff aufgrund dessen niedrigerer Schmelztemperatur eine stärkere Verschmelzung der einzelnen Fasern mit „Zusammensinterung und Auflösung (Defekte) der Fasern (...), Verklebungen unter partiellem und totalem Strukturschwund und wabiger Umwandlung“ [17] auf. Bei den Hautversuchen dagegen ist die Funkenbildung aufgrund des geringeren Übergangswiderstandes sowohl bei dem Viskose- als auch dem Wollstoff schwächer ausgeprägt. Hierdurch wird der Wollstoff fast nie zerstört und der Viskosestoff vor allem bei sehr kurzen Stromflusszeiten und/ oder geringem Anpressdruck evt. nur angeschmolzen (Abbildung 3.43) [86]. In beiden Fällen finden sich neben metallischen Partikeln funkenerosiv entstandene Metallkugeln auf den nicht oder nur gering geschädigten Stofffasern.

Zumeist wird durch die Hitzeentwicklung bei Funkenüberschlag der auf der Haut befindliche Viskosestoff aufgrund dessen niedriger Schmelztemperatur jedoch zerstört (Abbildung 3.24), wobei als Funkenresiduen wiederum metallische Kugeln und Parti-

kel zu finden sind (Abbildungen 3.25, 3.26 und 3.44). Die Vermischung von Haut-, Elektroden- und Textilanteilen (Abbildungen 3.45 und 3.46) ist, auch als Differentialdiagnose zur Hitzemarke (Kapitel 4.2), ein Charakteristikum von Strommarken nach Stromkontakt der mit Stoff niedriger Schmelztemperatur bedeckten Haut.

4.1.3.3 Tiefenverteilung von Metall

Bei der rasterelektronenmikroskopischen Betrachtung der Strommarkenoberfläche fallen regelmäßig im, den Materialkontrast darstellenden, RE-Bild hellere Bereiche in der Haut auf. In diesen Arealen können mittels Punkt- oder Flächenanalyse Metalle entsprechend der Zusammensetzung der zur Strommarkenerzeugung verwendeten Elektrode nachgewiesen werden (Abbildungen 3.49 und 3.50 b-d). Es handelt sich hierbei jedoch nicht um geformtes metallisches Material auf der Probenoberfläche, sondern um diffus in der Haut befindliches Metall. Die Helligkeit der Areale entspricht dabei der Höhe der Metallkonzentration im Hautgewebe.

Aufgrund fehlender rasterelektronenmikroskopischer Abbildungsmöglichkeiten in der Vergangenheit sind diese hellen Bereiche innerhalb von Strommarken in der Literatur bisher nicht beschrieben worden. Das zugrunde liegende Phänomen, dass Metall der Elektroden bei Stromfluss von der Hautoberfläche in die Tiefe der Haut wandert, ist jedoch seit langer Zeit bekannt. Dessen Entstehungsmechanismus dagegen wird kontrovers diskutiert:

Böhm E [5] zeigt in den 60er Jahren, dass das Eindringen von Kupfer ins Hautgewebe bei Stromkontakt ein rein *temperaturabhängiger Diffusionseffekt* ist, wobei er den Übergang des edlen Metalls Kupfer in die ionisierte Form mit lokalen Potentialdifferenzen an Metalloberflächen erklärt. Er [8] weist zwar mittels der Versilberungsmethode nach Timm eine identische Metallisation in der Gewebstiefe sowohl in Strom- als auch in Hitzemarken nach, grundsätzlich jedoch hält er eine Differenzierung zwischen beiden, unter anderem auch anhand unterschiedlicher Metallisationsmuster, für durchaus möglich [7, 9, 15].

In späteren elektronenmikroskopischen Untersuchungen erklärt Böhm E [13, 15, 17, 20] die Entstehung der von ihm beschriebenen Papeln der Primärmetallisationsphase sowohl bei Gleich- als auch bei Wechselstrom durch einen *korrosiv-elektrolytischen*

Prozess (Phase B). Er gesteht einer thermisch bedingten Kontaktmetallisation zu diesem Zeitpunkt lediglich die Rolle einer zusätzlich unspezifischen, gleichmäßig diffusen Verteilung über die Kontaktfläche Elektrode/ Haut zu, wie sie auch bei Hitzemarken zu finden ist.

Auch andere Autoren vertreten nach Durchführung verschiedener Experimente entweder die Theorie der *temperaturabhängigen Diffusion* von Metall in die Haut [76, 95], wobei dann kein Unterschied bei der Tiefenverteilung von Metall in Strom- und Hitzemarken besteht, alternativ die der *stromabhängigen Elektrolyse* [56] oder einer *Kombination aus beidem* [41].

Einflussfaktoren:

Im Gegensatz zu den Beobachtungen von Schöffner M [84], der eine „Abhängigkeit der Stärke der Metallisation von der Höhe der Spannung oder von der Stromfließdauer“ nicht erkennen kann, ist die Tiefenverteilung von Metall in ihrer Ausprägung eindeutig abhängig von der **Stromflussdauer** [64, 95] und der **Stromstärke**. Weiterhin zeigt sie sich vor allem bei **Haut niedrigen Widerstandes** oder bei **in Wasser gelagerter Haut**.

Strommarken, welche aufgrund einer *langen Kontaktdauer* (> 1 Sekunde) oder aufgrund *hoher Stromstärken* (1-1,5 A) eine ausgeprägte Zerstörung mit Verkohlung der Epidermis aufweisen, zeigen bei der rasterelektronenmikroskopischen Betrachtung von Kryo- bzw. Paraffinschnitten eine diffuse Einlagerung von Metall in tiefere Schichten der Epidermis (Abbildungen 3.56 und 3.57) als es bei Kurzzeitstromkontaktmarken (bis 1 Sekunde) mit niedrigen Stromstärken (bis 1 A) der Fall ist (Abbildung 3.54 und 3.55). Haut mit nur *geringem Widerstand* durch eine dünne Hornschicht oder eine starke Durchfeuchtung zeigt grundsätzlich eine intensivere diffuse Einlagerung von Metall in die thermisch meist stark geschädigte Epidermis als es beispielsweise bei Verwendung von Fußsohlenhaut mit hohem Widerstand der Fall ist (vergleiche Abbildungen 3.50 b-d und 3.51) (Kapitel 3.1.1.1). Hier kann Metall nur punktuell in der Tiefe des kaum thermisch veränderten Gewebes nachgewiesen werden, auch wenn sie bei Strommarkenerzeugung unter Wasser gelagert wird oder durchfeuchtet ist (Abbildungen 3.69 und 3.70). In diesem Fall ist die Metallablagerung auf der Hautoberfläche aufgrund der Herabsetzung des Übergangswiderstandes dann ebenfalls nur gering ausgeprägt (Kapitel 4.1.3.1). Die *in Wasser gelagerte Haut* zeigt eine intensivere Metalleinlagerung ins Hautgewebe als es bei Versuchsdurchführung an Luft der

Fall ist, wobei hier dann häufig die Ablagerung von Partikeln und Kugeln überwiegt (Abbildungen 3.50, 3.68, 3.71 und 3.72).

Entstehung:

Die Arbeitshypothese von Böhm E [15] erklärt die Anreicherung von diffus verteiltem Metall in der Haut bei Wechselstromversuchen durch einen elektrolytischen Prozess, bei dem „in der positiven Anstiegsphase des Stroms (Halbwelle einer Schwingung) (...) Metall an den umschriebenen Stromdurchtrittsstellen ionisiert“ wird. Dabei werden die Ionen durch verschiedene Umgebungsbedingungen anschließend entweder gebunden oder alternativ in eine elektrisch neutrale Zustandsform überführt. In der „negativen Phase des Stromflusses kann eine ausreichende Entladung an der nunmehr zur Kathode gewordenen Elektrode nicht mehr erfolgen“. Dies führt in der Folge zu einer starken lokalen Anhäufung von Metall.

Wird die Hypothese den Untersuchungen dieser Arbeit zugrunde gelegt, so erklärt sich, warum durchfeuchtete Haut mit geringem Widerstand eine starke Einlagerung von Metall in die Haut aufweist. Die in der positiven Anstiegsphase entstandenen Metallionen können hier leichter und schneller in Lösung gehen, Wechselwirkungen mit der durch die thermischen Einflüsse bei Stromfluss verflüssigten Haut eingehen, dabei gebunden werden und sich so im Gewebe anreichern. Bei der stark verhornten Fußsohlenhaut mit hohem Widerstand ist dieser leichte Übergang auf die Haut nicht möglich, sodass die in der positiven Anstiegsphase entstandenen Ionen in der negativen Phase wieder entladen und somit auf die Elektrode begrenzt bleiben. Wird die Fußsohlenhaut jedoch in Wasser gelagert bzw. ist sie durchfeuchtet, so können die Ionen partiell in Lösung gehen und es kommt zu einem punktuellen Nachweis von diffus in die Haut eingelagertem Metall (vergleiche Abbildungen 3.51 und 3.69).

Auffällig bei langem Stromkontakt (> 1 Sekunde) bzw. bei Stromstärken (1-1,5 A) mit starker Zerstörung der Epidermis ist die häufige Begrenzung des diffus in die Haut eingelagerten Metalls auf die Schicht stärkster Epidermiszerstörung (Abbildung 3.57). Somit hat der Grad der thermischen Schädigung von Hautgewebe, welcher bei verhornter Haut natürlich nur gering ausgeprägt ist, für die Bindung von Metallionen im Gewebe einen entscheidenden Einfluss. Dabei kommt es aufgrund der starken Hitzeentwicklung bei andauerndem Stromfluss zu einer Verflüssigung der Haut im Sinne

einer Koagulationsnekrose. Im Folgenden durchmischt sich das von der Elektrode stammende Material, also sowohl diffuses als auch geformtes Metall (Partikel, Kugeln), mit der verflüssigten Haut, wobei die Abhängigkeit von der Zeit offensichtlich ist. Dies ist auch der Grund, warum die Metallisation in den von Schäffner M [84] durchgeführten Experimenten, ebenso wie rein thermisch eingebrannter Metallstaub, auch noch bis zum fünften Tag nach Versuchsdurchführung und auch nach Reinigung der Haut nachweisbar bleibt. Im HE- und DMABR-gefärbten histologischen Schnitt ist beschriebene Mixtur vom restlichen Hautgewebe ebenfalls gut abzugrenzen (Abbildungen 3.59 und 3.60).

In einigen Proben unter Verwendung des Messingstabs als Elektrode lassen sich in tieferen epidermalen Schichten, unterhalb der Mixtur aus koagulierter Haut und Metallbestandteilen der Elektrode, punktanalytisch lokale Zinkspuren nachweisen (Abbildung 3.58). Diese Areale können weder im RE-Bild noch im Verteilungsbild von Zink (Abbildung 3.57) dargestellt werden. Der Entstehungsmechanismus dieser Bereiche ist mittels der Böhm'schen Hypothese nicht eindeutig zu erklären, da sie keinen direkten Kontakt zu den an der Elektrode stromspezifisch mobilisierten Ionen haben.

Weiterhin zeigen sich in DMABR-gefärbten, histologischen Schnitten von unter gleichen Versuchsbedingungen hergestellten Proben im Bereich der elongierten Basalzellkerne Spuren diffus verteilten Kupfers (Abbildung 3.61). Dieses Kupfer befindet sich ebenfalls unterhalb einer nicht geschädigten, nicht Kupfer-gefärbten Epidermisoberfläche.

Das Vorhandensein von Zink im Bereich der weniger zerstörten Epidermis der Abbildung 3.58 könnte mittels des oben beschriebenen Mechanismus durchaus so interpretiert werden, dass nach beispielsweise langer Stromflusszeit eine „Zink-Übersättigung“ des koagulierten, oberflächlichen Epidermisbereichs resultiert. Die Metallatome würden aufgrund dessen in tiefere epidermale Schichten, welche ebenfalls denaturiert erscheinen, vorgeschoben. Wahrscheinlicher jedoch ist eine zusätzlich hitzebedingte Diffusion des stromspezifisch aus der Elektrode gelösten Metalls. Dabei ist die geringere Konzentration des scheinbar schnell in die Haut diffundierenden Metalls „Zink“ in tieferen Schichten der Epidermis durch die höhere Viskosität des in diesem Bereich weniger verflüssigten Hautgewebes zu erklären.

Dies könnte auch die Erklärung für den regelmäßigen Nachweis von diffus verteiltem Zink innerhalb der für Kurzzeitstromkontakt charakteristischen, im RE-Mode eben-

falls nicht heller erscheinenden Bläschenstrukturen sein (Abbildung 3.53) (Kapitel 4.1.1.3). Durch die im Bereich der Bläschen kaum thermisch geschädigte Haut werden die durch Stromfluss gelösten Ionen schlecht am Gewebe gebunden und nur Metalle mit einer hohen Diffusionsgeschwindigkeit können in die Tiefe des Gewebes vordringen. Damit ein Areal innerhalb einer Strommarke im RE-Mode heller erscheint, muss somit eine Mischung aus verflüssigter Haut und einer ausreichenden Konzentration von diffus in der Haut verteiltem Metall vorliegen.

Beschriebener Mechanismus könnte auch für das im Bereich der elongierten Basalzellen diffus vorhandene Kupfer verantwortlich sein.

Die Überlegung der zusätzlich hitzebedingten Diffusion von durch Stromeinfluss mobilisierten Metallionen in die Tiefe des Gewebes wird dadurch gestützt, dass die beschriebenen metallischen Spuren bei Stromkontakt vor allem in den Hautbereichen zu finden sind, welche eine thermisch bedingte Schädigung aufweisen, beispielsweise in hitzedenaturierter Epidermis (Abbildungen 3.54-3.60), im Bereich elongierter Basalzellen [100] (Abbildung 3.61) oder in den Bläschen bei Kurzzeitkontaktstrommarken (Abbildung 3.53).

Bei stromunabhängigem Hitzekontakt kann eine diffuse Einlagerung von Metall in die ebenfalls stark thermisch geschädigte Epidermis dagegen nicht nachgewiesen werden (Abbildung 3.97 und 3.98). Dies ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass aufgrund der alleinigen Wärmewirkung Metallionen nicht in dem Maße aus der „Elektrode“ herausgelöst werden, wie es unter Stromeinfluss der Fall ist. Bei Hitzemarken ist deshalb nur mit einer geringfügigen, oberflächlich-diffusen Metallisation der Kontaktfläche zwischen Elektrode und Haut, wie sie auch bei zufälliger Kontamination bei rein mechanischem Kontakt [84, 95] vorkommt, zu rechnen. Eine Einlagerung von Metall in tiefere Schichten der Epidermis kommt bei reinem Hitzekontakt dagegen nicht vor [56, 64, 84], wobei weitere orientierende Untersuchungen mit höher erhitzten Metallen und längeren Kontaktzeiten folgen sollten.

Die Hypothese der diffusen Metalleinlagerung durch Wanderung von Ionen in die Tiefe der Epidermis aufgrund alleiniger Stromeinwirkung, also ohne eine zusätzlich hitzeabhängige Diffusion, ist „bei Wechselstrom schon aus theoretischen Gründen zweifelhaft“ [95]. Bei Gleichstromstrommarken ist sie dagegen durchaus vertretbar:

Die Aussage von Marcinowski T und Pankowski M [64], nach der eine Metallisation bei Gleichstromstrommarken deutlich stärker ausgeprägt ist als bei Wechselstromstrommarken, schließt jedoch ebenfalls nicht aus, dass sowohl Strom als auch Hitze in beiden Fällen eine Rolle spielen. So könnte beim Gleichstrom eine zusätzlich strominduzierte Elektrolyse die hitzeabhängige Diffusion von Metallionen in die Tiefe der Haut verstärken. Diffus verteiltes Metall wird dann bei Gleichstromstrommarken in tieferen Hautschichten nachgewiesen. Die eindeutige Beurteilung dieses Sachverhaltes ist aufgrund der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Experimente jedoch nicht möglich und sollte ebenfalls das Ziel weiterführender Untersuchungen vor allem mit Gleichstrom sein.

Beteiligung von Haaren:

Bei der untersuchten Gleichstromstrommarke (Abbildung 3.63), bei der eine allein strominduzierte Metallionenwanderung in die Tiefe des Gewebes aufgrund des Gleichstroms theoretisch denkbar wäre, ist eine Metallanreicherungen weder von Eisen noch von Zink im Bereich der widerstandsärmeren Haarschäfte zu erkennen [84] (Abbildung 3.64). Somit ist die Behauptung der Anreicherung von Metall besonders an Haarschäften und Schweißdrüsenausführungsgängen aufgrund der „Wegspuren des elektrischen Stromes“ [9, 91] in Frage zu stellen.

In DMABR- gefärbten histologischen Schnitten von Wechselstromstrommarken dagegen kann gelegentlich eine Kupfer-Anreicherung an den Haaraustrittsstellen nachgewiesen werden (Abbildung 3.62). Eine schlüssige Erklärung dieses Phänomens, unter der Voraussetzung der hitzeabhängigen Diffusion von durch Stromeinfluss mobilisierten Metallionen, wäre die geringere Viskosität der Haarschäfte gegenüber dem umgebenden Hautgewebe, sodass Metallionen schneller in die Tiefe diffundieren können. Da jedoch sowohl in Paraffin- als auch in Kryoschnitten von Strommarken mittels EDX-Punktanalyse nie auffällige Metallanreicherungen entlang der Haarschäfte identifiziert werden, könnte vermutet werden, dass durch die histologische Präparation gelöstes Kupfer erst sekundär in die Haarschäfte diffundiert und es sich somit bei diesem Phänomen um ein Präparationsartefakt handelt [11, 84] (Kapitel 4.3.2).

Metallische Zusammensetzung:

Die in der Tiefe des Gewebes und auf der Hautoberfläche detektierten Metalle entsprechen, wie auch schon die auf der Hautoberfläche abgelagerten metallischen Partikel

und Kugeln, in ihrer Zusammensetzung dem Elektrodenmaterial [42], wobei auch in diesem Fall bei Verwendung von legierten oder beschichteten Elektroden das Mengenverhältnis der einzelnen abgelagerten Metalle nicht mit dem ursprünglichen in der Elektrode identisch ist.

Verteilungsbilder der Strommarkenoberfläche (Abbildung 3.49) und von Paraffin- bzw. Kryoschnitten (Abbildungen 3.55 und 3.57) zeigen aufgrund der Durchmischung von Elektrodenbestandteilen und verflüssigter Haut eine weitestgehend identische Lokalisation der einzelnen Metalle in der zerstörten Epidermis. Jedoch weist die Metallverteilung vor allem in der Tiefe des Gewebes häufig lokale Unterschiede auf, welche wahrscheinlich zufällig entstanden sind.

Besonders interessant ist hierbei jedoch der schon beschriebene Nachweis von solitären Zinkspuren in tieferen, weniger stark thermisch geschädigten Schichten der Epidermis sowohl in einer Wechselstromstrommarke (Abbildung 3.58) als auch in einer Gleichstromstrommarke (Abbildung 3.63). Ohnehin kann diffus verteiltes Zink überzufällig häufig auch in weniger thermisch geschädigten Hautarealen nachgewiesen werden (Abbildungen 3.51 und 3.53). Dies legt die Vermutung nahe, dass es sich um ein Element mit einer höheren Diffusionsgeschwindigkeit in die Haut gegenüber beispielsweise Kupfer oder Eisen handelt. Diese Frage sollte jedoch noch näher abgeklärt werden.

4.1.3.4 Bedeutung für die rechtsmedizinische Praxis

Oberflächenverteilung von Metall:

Der zeitliche Faktor des elektrischen Kontaktes und die Höhe der Stromstärke treten bei der Oberflächenverteilung von Metall gegenüber anderen Faktoren, welche sich auf die Funkenentwicklung auswirken, in den Hintergrund. So finden sich auch bei nur kurzem Stromkontakt eine Vielzahl metallischer Kugeln und Partikel auf der Probenoberfläche, wenn ansonsten optimale Bedingungen für eine Funkenentwicklung herrschen (Abbildung 3.83). Insbesondere der Aspekt des (Übergangs-) Widerstandes spielt in diesem Zusammenhang eine Rolle.

Besonders wichtig ist es daher, am Fundort zu eruieren, ob die Haut zum Todeszeitpunkt durchfeuchtet bzw. oberflächlich nass war (zum Beispiel nach einem Bad) oder sich zum Todeszeitpunkt sogar vollständig im Wasser befunden hat. Aufgrund des he-

rabgesetzten (Übergangs-) Widerstands und der dadurch weniger intensiven Funkenbildung bei Stromkontakt lagern sich in allen genannten Fällen weniger metallische Partikel und Kugeln auf der Hautoberfläche ab. Vor allem bei Fehlen von metallischen Kugeln kann eine nachträgliche Abgrenzung zur Hitzemarke gegebenenfalls erschwert sein, wobei eine solche Differentialdiagnose auch in diesem Fall aufgrund der unterschiedlichen Tiefenverteilung von Metall durchaus noch möglich ist (Kapitel 4.2).

Die in den Metallablagerungen auf der Probenoberfläche detektierten Metalle lassen Rückschlüsse auf die ursprünglich metallische Zusammensetzung der zur Strommarkenerzeugung verwendeten Elektrode zu [15], wobei aufgrund der Partikelzusammensetzung und Kugellegierung nicht entschieden werden kann, ob es sich um eine beschichtete oder eine legierte Elektrode gehandelt hat. Selbst aus der Analyse reiner Elemente in den Kugeln kann nicht eindeutig geschlossen werden, ob eine Reinmetallelektrode oder eine beschichtete Elektrode mit abgenutzter Beschichtung zur Strommarkenerzeugung benutzt worden ist. Bei Beschichtung finden sich aufgrund einer nur inhomogenen Abnutzung bei mehrmaliger Verwendung der Elektrode häufig noch Spuren des ehemaligen Beschichtungsmaterials in den Kugeln oder Partikeln, sodass eine Differenzierung in den meisten Fällen doch möglich ist.

Eine Schwierigkeit bei der Zuordnung von Metallablagerungen auf der Hautoberfläche zu einer zur Strommarkenerzeugung verwendeten Elektrode besteht darin, dass durch einen elektrischen Kontakt der Elektrode mit einem Metall schon vor Strommarkenerzeugung auch metallische Kugeln aus elektrodenfremdem Material gebildet werden. Diese Kugeln können durch die Elektrode verschleppt (Abbildung 3.32) und bei der anschließenden Strommarkenerzeugung auf der Haut abgelagert werden, wobei sie dann ein Artefakt darstellen (Abbildung 3.31). Solche Produkte eines elektrischen Intermediärkontaktes können die Zuordnung von in der Strommarke abgelagertem Metall zu einer potentiell verwendeten Elektrode erschweren oder sogar unmöglich machen.

In neuerer Zeit wird die Frage diskutiert, ob eine potentielle Strommarke von anderen Hautschädigungen, insbesondere von Hitzemarken oder Elektroschockresiduen, abzugrenzen ist. Dies ist durch die Beurteilung der Oberflächenverteilung von Metall in der rechtsmedizinischen Praxis eindeutig möglich:

Auf der Strommarkenoberfläche zeigt sich häufig ein deutliches Überwiegen von metallischen Partikeln variabler Form und Größe gegenüber der Anzahl von Metallkugeln. Zusätzlich zur fehlenden Metallisation in der Tiefe des Gewebes bei Elektroschockkontakt ermöglicht dieses Kriterium somit eine eindeutige Differenzierung zwischen einer Strommarke und einer Hautveränderung nach Einwirkung eines Elektroschockers, bei der ausschließlich eine Kugelbildung zu finden ist [85]. Auf die Abgrenzung einer Strommarke zur Hitzemarke soll im Rahmen von vergleichenden Untersuchungen im Kapitel 4.2 näher eingegangen werden.

Interposition von Textilien:

Anhand von verschmolzenen, in ihrer Gewebsstruktur häufig noch identifizierbaren Faserresten in einer auf der Haut befindlichen Strommarke kann darauf geschlossen werden, dass die betroffene Körperregion des Opfers bei Stromkontakt bekleidet gewesen ist. Das getragene Kleidungsstück muss an entsprechender Stelle ebenfalls eine Zerstörung und Verschmelzung der Gewebsfasern aufweisen. Häufig in der Strommarke und auf dort eingeschmolzenen Stofffasern abgelagerte Metallpartikel und -kugeln lassen auch im Fall von stoffbedeckter Haut Rückschlüsse auf die metallische Zusammensetzung der verwendeten Elektrode zu. Abgelagertes metallisches Material ist immer auch auf den Fasern des getragenen Kleidungsstückes nachzuweisen [17, 74]. Dies ist auch der Fall, wenn es zu keiner Zerstörung des Stoffgewebes und somit fehlender Strommarkenbildung auf der Haut gekommen ist. Folglich kann bei Verdacht auf einen Stromkontakt und fehlender Strommarke auf der Haut durch den Nachweis von stromspezifischen metallischen Kugeln auf den Fasern eines vom Opfer getragenen Kleidungsstückes der Verdacht des Stromkontaktes erhärtet werden.

Tiefenverteilung von Metall:

Da die diffuse Einlagerung von Metall in der Tiefe des Hautgewebes von der Stromflussdauer, der Stromdichte, dem Widerstand des kontaktierten Hautbereichs und der Frage abhängt, ob die Haut zum Todeszeitpunkt im Wasser gelegen hat, ist es auch unter dem Aspekt der Tiefenverteilung von Metall nötig, eine genaue technische Rekonstruktion von Tat- bzw. Unfallhergang durchzuführen und weiterhin die Frage zu klären, ob der mit Strom kontaktierte Hautbereich zum Todeszeitpunkt im Wasser gelegen hat.

Auch anhand der Tiefenmetallisation einer Strommarke ist es mittels EDX oder alternativ Mikroröntgenfluoreszenz möglich, unter mehreren potentiellen Elektroden diejenige zu eruieren, welche zum Stromtod geführt hat. Dies ist möglich, da das in der Tiefe des Gewebes diffus eingelagerte Metall, wie schon für die metallischen Kugeln und Partikel auf der Probenoberfläche beschrieben, auch im Elektrodenmaterial zu finden sein muss [71].

Durch rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen einer potentiellen Strommarke kann anhand stromspezifischer Charakteristika der Tiefenverteilung von Metall, unter Berücksichtigung der Ausprägung metallischer Ablagerungen auf der Probenoberfläche, eine eindeutige Abgrenzung der Strommarke zur Hitzemarke (Kapitel 4.2), zu Elektroschockerresiduen oder gar zur Kontamination der Haut durch mechanischen Abrieb erfolgen, bei denen eine Einlagerung von Metall in die Gewebstiefe zumindest bei nur kurzem Kontakt (bis 1 Sekunde) nicht zu finden ist.

4.1.4 Versuchsdurchführung mit im Wasser gelagerter Haut

Ist die Haut bei Versuchsdurchführung vollständig von Wasser umschlossen, so besitzen die erzeugten Strommarken einige in den vorangegangenen Kapiteln beschriebene Charakteristika bezüglich Morphologie, Histologie und Metallisation auf der Strommarkenoberfläche und in der Tiefe des Hautgewebes. So kommt es zu:

1. einer nur **geringen morphologischen Strommarkenausprägung** durch sekundäre Abschwächung der bei Stromfluss entstehenden Joule'schen Wärme (Kapitel 4.1.1.1).
2. einer **geringen histologischen Strommarkenausprägung** mit Zerstörung nur oberflächlicher Epidermisschichten (Kapitel 4.1.2).
3. einer **Ablagerung von metallischen Partikeln und sehr selten auch Metallkugeln** auf der Hautoberfläche, wobei die Anzahl beider aufgrund geringer Funkenentwicklung im Wasser unter der bei Versuchsdurchführung an Luft liegt (Kapitel 4.1.3.1).
4. einer fast immer **intensiv diffusen Einlagerung von Metall auf und in die Haut** (Kapitel 4.1.3.3).

Weiterhin lassen sich **diffus bzw. geformtes Metall** und weiterhin **Salzkristalle** auf der gesamten von Wasser umschlossenen, thermisch unbeschädigten Hautoberfläche nachweisen (Kapitel 4.1.4.1 und 4.1.4.2).

4.1.4.1 Metallablagerungen auf nicht thermisch geschädigter Haut

Diffus abgelagertes Metall:

Bei Strommarkenerzeugung auf von Wasser umschlossener Haut treten Areale auch außerhalb der Strommarke auf, in denen mittels EDX Spuren von Metall nachgewiesen werden. Sie finden sich auch dann, wenn die stromführende Elektrode in einigem Abstand zur Haut für einige Sekunden bis Minuten im Wasser belassen wird (Abbildung 3.73) und zeichnen sich im RE-Mode nicht durch einen Helligkeitsunterschied zur Umgebung aus.

Obwohl nach Trocknung meist eine farbliche oder morphologische Veränderung der Haut im Übergangsbereich zwischen Wasser und Luft weder makroskopisch noch (rasterelektronen-) mikroskopisch zu erkennen ist, könnte ein Zusammenhang dieses Phänomens mit der Frage der häufig beschriebenen linearen Strommarke bei Stromtodesfällen in der Badewanne bestehen [21, 22, 48, 82, 92, 93, 94, 114]. Schröder G et al [92] interpretieren besagte Abblassungen entlang der Wasserlinie als Hinweis darauf, dass die „Leiche innerhalb des frühpostmortalen Zeitintervalles in Wasser mit einem entsprechenden Wasserstand gelegen hat“ und dass ein Rückschluss anhand dieses Kriteriums auf Stromfluss unzulässig sei. Wollenek G et al [115] zeigen, dass sich aufgrund lokaler Einwirkung von Phasenübergängen „der geschilderte Streifen von gegenüber der Umgebung deutlich abgeblaßter Haut auch als Erscheinung des späteren Leichenstadiums ausbilden kann“. Böhm E [19] dagegen sieht eine eindeutige phänomenologische Beziehung zwischen Metallisation des Badewassers bei Stromkontakt und horizontaler Strommarke.

Er erklärt in diesem Zusammenhang den Entstehungsmechanismus von diffus auf der Hautoberfläche nachweisbarem Metall bei Versuchsdurchführung unter Wasser durch einen elektrolytisch anodischen Oxidationsprozess im positiven Teil der Wechselstromwelle mit einhergehender Elektrodenauflösung und, abhängig von Stromdichte und Einwirkungsdauer, nachfolgendem Übertritt von Metallionen in das Wasser.

Entstandene Ionen

1. bleiben dann entweder stabil in Lösung *oder*
2. sinken zu Boden und bilden dort einen Bodensatz *oder*
3. bilden auf der Haut (vor allem am Wasserlinienrand) eine oberflächliche, metallische Deckschicht.

Dieser Prozess, so Böhm E [19], sei stromspezifisch, da auch korrosionsfeste Metalle wie Chrom oder Zinn nach Stromdurchfluss im Wasser nachzuweisen seien, welche sich aufgrund ihrer Stellung in der Spannungsreihe „unter alltäglichen Bedingungen nicht oxidativ verändern oder gar in Lösung gehen“.

Bei Strommarkenerzeugung auf von Wasser umschlossener Haut kommt es zunächst ebenfalls zur beschriebenen Mobilisierung von Metallionen aus der Elektrode in der positiven Anstiegsphase des Stroms (Kapitel 4.1.3.3). Dieser Prozess findet im Wasser besonders intensiv statt, da die Metallionen schnell in Lösung gehen können. Allerdings wird ein großer Teil dieser Ionen sofort von Wassermolekülen gebunden und in die weitere Umgebung der Strommarke transportiert. Da dort jedoch durch fehlende strombedingte Hitzeeinwirkung die Haut nicht verflüssigt und weiterhin eine hitzebedingte Diffusion der Metallionen aufgrund zusätzlicher Kühlung durch das wässrige Milieu nicht sehr ausgeprägt ist, dürfte das diffus detektierbare Metall in der Nachbarschaft der unter Wasser erzeugten Strommarke lediglich sehr oberflächlich der Haut aufgelagert sein und nicht in tiefere Schichten der Haut reichen. Diese Überlegung wird durch die Beobachtungen von Böhm E [19] gestützt, der zur weiteren Untersuchung in der rechtsmedizinischen Praxis ein einfaches Abstreifen solcher „oxidischer Deckschichten“ mit dem Spatel empfiehlt.

Die Frage, ob beschriebene oberflächliche Metallablagerungen tatsächlich für die Ausprägung einer linearen Strommarke verantwortlich sind, sollte durch weiterführende Untersuchungen noch weiter abgeklärt werden.

In der rechtsmedizinischen Praxis sollte bei fraglichem Stromtod in der Badewanne eine Probenasservierung des aus der Elektrode abgelösten metallischen Materials erfolgen. Dabei muss das Badewasser aller Kompartimente, der in der Wanne abgelagerte Bodensatz und die der unter Wasser befindlichen Haut oberflächlich aufgelagerte Metallschicht mittels EDX-Analyse untersucht werden. Der Verdacht einer stromspezifischen Genese des Todes in der Badewanne kann so erhärtet werden.

Geformt abgelagertes Metall:

Interessanterweise finden sich auf der Hautoberfläche abgelagerte Metallpartikel und – kugeln auch in solchen Versuchen, in denen die Elektrode für etwa 20 Sekunden in einem Abstand von etwa 1 cm direkt über der Haut ins Wasser getaucht und bewusst keine Strommarke erzeugt wird (Abbildungen 3.74 und 3.75). Besagter Abstand reicht somit offenbar auch im Wasser nicht aus, um (Mikro-) Lichtbogenüberschläge zu verhindern, sodass es trotz fehlender morphologischer Veränderungen zu einer Ablagerung von metallischen Partikeln und Kugeln auf der Hautoberfläche kommt.

4.1.4.2 Kristallablagerungen

Schon Böhm E [19] beschreibt im Rahmen von Stromexperimenten im wässrigen Milieu nebenbefundlich „kristallitisches Material“ im Bodensatz, auf der „Wendeloberfläche und auch auf den Schaltkontakten“, in welchem er mittels EDX Calcium detektiert. In den Versuchen dieser Arbeit wird auf der vollständig von Wasser umschlossenen Hautoberfläche ebenfalls regelmäßig Calcium abgelagert, auch wenn keine Strommarke auf der Haut erzeugt wird. Dabei finden sich:

1. **Diffuse Kalkablagerungen** (Abbildungen 3.79 und 3.80)
2. **Calcium in großkristalliner Struktur** in Form von Kalk- (Abbildungen 3.77 und 3.78), Calciumphosphat- und Calciumoxalat-Kristallen

Böhm E [19] interpretiert seine Beobachtungen als nicht stromspezifische, dafür hitzebedingte Ablagerungen von im Leitungswasser vorhandenem Calciumcarbonat, welches die Wasserhärte bestimmt.

Die Ergebnisse unserer Untersuchungen lassen demgegenüber durchaus auch an eine strombedingte Genese der einzelnen Ablagerungen denken, da sowohl in den großkristallinen Salzkristallen als auch in den diffusen Kalkablagerungen häufig Metall detektiert werden kann (Abbildung 3.78). Dieses Metall entstammt der jeweils verwendeten Elektrode und wird aufgrund des elektrolytisch anodischen Oxidationsprozesses im positiven Teil der Wechselstromwelle aus der Elektrode herausgelöst. Anschließend liegt es in ionischer Form im Wasser vor und wird bei Kristallentstehung mit in diesen eingebaut. Allerdings müssen bezüglich dieser Frage weitere Versuche mit lediglich erhitztem Wasser erfolgen, um den Einfluss einer reinen Hitzeeinwirkung auf die Kristallbildung zu eruieren. Dabei sollten dem Wasser jeweils verschiedene metal-

lische und nicht metallische Ionen zugesetzt werden. Sicher ist allenfalls, dass nicht nur Calcium und die aus der Elektrode herausgelösten Metalle, sondern alle bei Stromfluss im Leitungswasser enthaltenen Ionen Bindungen untereinander eingehen können, sodass in unseren Versuchen neben Calciumphosphat-, Calciumoxalat- und Kalkkristallen unter anderem auch solche aus Magnesiumphosphat auf der Haut abgelagert sind (Abbildung 3.76).

Da trotz gleicher Versuchsbedingungen nicht in allen Versuchen und ohnehin eher selten eine Ablagerung von Salzen großkristalliner Struktur zu beobachten ist, wird derzeit im Rahmen einer weiteren Dissertation unter anderem dieses Phänomen untersucht, wobei vor allem Rahmenbedingungen für die mögliche Kristallentstehung ermittelt werden [96]. Dabei wird erstens die Frage weiter abgeklärt, inwieweit die im Stromkreis befindliche Haut vollständig von Wasser umschlossen sein muss, da es in einigen Experimenten mit lediglich befeuchtetem Gewebe ebenfalls zur Kristallentstehung auf der Hautoberfläche kommt. Zweitens wird auch der Aspekt einer möglichen Abhängigkeit von örtlichen Stromliniendichten unter Wasser (Abstand Elektrode-Haut etc.) näher beleuchtet. Als gesichert kann derzeit lediglich die Beziehung zwischen der Anzahl auf der Probenoberfläche abgelagerter Salzkristalle und der Stromflussdauer angesehen werden (Abbildung 3.79).

4.1.5 FI-Schalter

Die FI-Schalter bedingte Unterbrechung eines Stromkreises kann als Spezialfall der extrem kurzen Stromflussdauer angesehen werden. Erst wenn ein genügend hoher Fehlerstrom zur Erde erreicht ist, kommt es zur Unterbrechung des Stromkreises nach etwa 20-50 ms. Durch das unterschiedliche Widerstandsverhalten innerhalb einer Hautprobe, den differierenden Übergangswiderstand zwischen Zink-Platte und der ihr aufliegenden Haut und den gegebenenfalls unterschiedlichen Anpressdruck der Elektrode auf die Haut sind somit zu erklären, warum es auch unter gleichen Versuchsbedingungen nicht immer zur sofortigen Stromkreisunterbrechung durch den FI-Schalter kommt.

Wie schon in den vorherigen Kapiteln diskutiert, führt eine nur kurze Stromflusszeit zu:

1. einer nur **geringen morphologischen Strommarkenausprägung** (Abbildungen 3.81 und 3.82, Kapitel 4.1.1.1).

2. einer **geringen histologischen Strommarkenausprägung** mit Zerstörung nur oberflächlicher Epidermisschichten (Kapitel 4.1.2).
3. einer, abhängig von den anderen Einflussparametern, gegebenenfalls erstaunlich **intensiv ausgeprägten Metallisation auf der Strommarkenoberfläche** und in der **Tiefe des Hautgewebes** (Abbildungen 3.83 und 3.84, Kapitel 4.1.3).

Jacobsen H [41] sieht keine klare Beziehung zwischen der Metallablagerung in einer Strommarke und der Dauer einer elektrischen Exposition. Sein Standpunkt kann von uns nur im Hinblick auf die Ablagerung von metallischen Kugeln und Partikeln auf der Hautoberfläche und auch nur unter der Voraussetzung einer fehlenden Funkenentwicklung bestätigt werden. Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn zur Versuchsdurchführung die durchfeuchtete Haut der Handoberfläche (Widerstand $\sim 0 \Omega$) verwendet wird. In diesem Fall fällt eine Metallablagerung auf der Hautoberfläche geringer aus (Abbildung 3.41 b) als nach FI-Schalter vermittelter Stromkreisunterbrechung bei Strommarkenerzeugung auf nicht durchfeuchteter Bauchhaut (Abbildung 3.83). In letzterem Fall kommt es aufgrund des höheren Hautwiderstandes auch bei den sehr kurzen Stromflusszeiten regelmäßig zur Funkenbildung und somit zur Ablagerung von metallischen Partikeln und Kugeln auf der dagegen kaum makroskopisch erkennbaren Strommarke (Abbildungen 3.81 und 3.82) [64, 74].

Die Stromflussdauer bei der FI-Schalter vermittelten Stromkreisunterbrechung dürfte in den von Böhm E [17] und Milz U [20] beschriebenen Bereich der Phase B oder C, also in die Phase der Primärmetallisation fallen, in der von den Autoren eine Funkenbildung messtechnisch noch nicht nachgewiesen werden kann. Die Metallisation der Strommarke bestehe zu diesem Zeitpunkt lediglich aus kleinen Primärpapeln elektrolytischen Ursprungs.

Dennoch finden sich in den Versuchen nach Unterbrechung des Stromkreises durch den FI-Schalter bei Verwendung von dünnen bis mittleren Elektroden (Durchmesser: 5 mm) eine Vielzahl funkenerosiv entstandener Kugeln (Abbildung 3.83). Dies spricht somit gegen die Böhm'sche These der Funkenentwicklung erst in Phase D, also der Verschiebephase mit Verkürzung und Verdickung der Bindegewebsfasern, Randwall- und Blasenbildung, Widerstandszunahme bei Erreichen des Siedepunktes und Abnahme der Stromstärke. Allerdings findet diese frühe Funkenbildung wiederum nur statt,

wenn alle Voraussetzungen zur Entstehung einer elektrischen Entladung erfüllt sind (Kapitel 4.1.3.1).

Das Phänomen der nur kurzen Stromflussdauer bezeichnet Böhm E [17] im Übrigen als streifender oder lockerer Elektrodenkontakt, bei welchem „die primären Metallisationszentren (...) rasch durch Gasentladungsprozesse mit entsprechender Funkenmetallisation überlagert [werden]“. Somit macht auch er deutlich, dass nicht die Dauer des Stromflusses der entscheidende Faktor für eine Funkenentwicklung und somit die Metallablagerung auf der Probenoberfläche ist, sondern vor allem andere Einflussfaktoren eine Rolle spielen.

Zukünftige quantitative Untersuchungen sollten deshalb den zeitlichen Verlauf von Stromstärke und Funkenbildung bei verschiedenen Anpressdrücken, Elektrodendurchmessern und -formen, Hautarten und -widerständen etc. ermitteln, um so eine Übersicht über die Wahrscheinlichkeit metallischer Ablagerungen auf der Probenoberfläche bei verschiedenen Umgebungsbedingungen zu bekommen und so Rückschlüsse auf den Tat- bzw. Unfallhergang zu ermöglichen.

Strommarkenerzeugung auf im Wasser gelagerter Haut:

Trotz sofortiger Unterbrechung des Stromkreises durch den FI-Schalter nach Eintauchen der Elektrode ins Wasser lassen sich in einigen Fällen morphologische Veränderungen im Sinne einer Strommarke auf der von Wasser umschlossenen Haut nachweisen (Abbildung 3.85). Es muss also zu einem kurzzeitigen Kontakt zwischen stromführender Elektrode und der unter Wasser befindlichen Haut gekommen sein.

In der rechtsmedizinischen Praxis sollte daher bei Todesfällen in der Badewanne eine strombedingte Todesursache auch dann nicht ausgeschlossen werden, wenn die technische Rekonstruktion des Leichenfundortes eine FI-Schalter vermittelte Stromkreisunterbrechung feststellt. Die morphologische Ausbildung einer Strommarke auf der Haut, wenn überhaupt vorhanden, fällt in diesem Fall zwar nur sehr gering aus, trotzdem könnte der nur sehr kurze Stromfluss durch Einfallen in eine vulnerable Herzphase ein tödliches Herzkammerflimmern auslösen (Abbildungen 1.2 und 1.3).

4.2 Differentialdiagnostische Überlegungen zur Abgrenzung von Strom- und Hitzemarken

Die Schwierigkeit einer Differenzierung zwischen Hitze- und Strommarken ist seit langer Zeit bekannt (Kapitel 1.4) und bereitet auch nach wie vor Probleme. Im Folgenden soll anhand der Morphologie, Histologie und Metallisation von Strom- und Hitzemarken diskutiert werden, ob eine eindeutige Unterscheidung zwischen beiden möglich ist.

Morphologie:

Eine Differenzierung zwischen (Kurzkontakt-) Strom- und Hitzemarken anhand rein oberflächenmorphologischer Veränderungen ist in der rechtsmedizinischen Praxis aufgrund der Ähnlichkeit zwischen beiden nur schwierig möglich (vergleiche Abbildungen 3.10 und 3.86):

Torre C et al [108] entwickelten in den 80er Jahren eine Methode, mit der die Oberfläche von, mittels CPD getrockneter, Strom- und Hitzemarken nach Ablösung der Epidermis im Rasterelektronenmikroskop betrachtet werden kann, um so eine Differenzierung beider anhand rein morphologischer Oberflächenkriterien zu ermöglichen. Letztlich jedoch ist dies mittels beschriebener Methode nicht möglich.

Der Grund hierfür ist die Joule'sche Wärme, die für die morphologische Ausprägung von Strommarken verantwortlich ist. Die *klassische Strommarkenmorphologie* mit zentraler Einsenkung und Verkohlung, neben einem erhabenen, porzellanartigen Randwall und einer Randblasenbildung [32, 62, 86] entsteht somit durch einen rein thermischen Effekt, wobei die Stadien der Blasenbildung bei Hitze- und Strommarken unter gleichen Versuchsbedingungen identisch sind (Abbildung 3.8) und von den gleichen Einflussfaktoren (Kontaktdauer, Hautdurchfeuchtung etc.) abhängen.

Da eine *Bläschenbildung* in der Epidermis aufgrund örtlicher Gewebsaufheizung mit Dampfbildung sowohl bei Kurzkontakthitzemarken (Abbildung 3.87) als auch bei elektrischem Kurzzeitkontakt (Abbildung 3.11) vorkommt, ist auch sie nicht als differentialdiagnostisches Kriterium geeignet, auch wenn die entstehenden Vakuolen bei reinem Hitzekontakt tendenziell größer sind.

Nach theoretischen Überlegungen kann eine rein oberflächenmorphologische Unterscheidung zwischen Strom- und Hitzemarken nur dadurch erfolgen, dass die stromfüh-

rende Elektrode und das erhitzte Metall aufgrund des unterschiedlichen Temperaturanstiegs und -abfalls ein differierendes Schädigungsmuster hervorrufen. So regeneriert sich bei Stromfluss die schädigende Hitze ständig neu, während sie bei erhitztem Metall durch Wärmeabgabe an die Umgebung kontinuierlich abfällt [20, 68, 95]. Diese Annahme sollte in weiterführenden Untersuchungen durch Temperaturmessungen in Abhängigkeit von der Zeit bei Strom- und Hitzemarkenerzeugung quantifiziert werden. In dieser Arbeit lassen sich folgende Ergebnisse auf beschriebenen Zusammenhang zurückführen:

1. Bei Versuchsdurchführung mit im Wasser gelagerter Haut kann aufgrund der kühlenden Wirkung des wässrigen Milieus keine Hitzemarke (sofortige Abkühlung des Metalls), demgegenüber jedoch eine Strommarke erzeugt werden.
2. Die schon in Kapitel 4.1.1.5 diskutierte stärkere Schädigung von Haaren in thermischen Läsionen.
3. Die starke Schädigung von interponiertem Textilgewebe bei reinem Hitzekontakt mit gleichzeitig nur geringer morphologischer Ausbildung einer Hitzemarke auf der Haut, in der nur wenig eingelagerte Stofffasern nachzuweisen sind:

Interponiertes Textilgewebe wird sowohl bei Hitze- als auch bei Stromkontakt abhängig von der Schmelztemperatur des Stoffgewebes und der Höhe der Metall- bzw. Elektrodentemperatur zerstört und es bildet sich eine Strommarke auf der unterliegenden Haut aus (Abbildungen 3.12 und 3.88, Kapitel 4.1.1.4). Durch die kontinuierliche Wärmeabgabe bei reiner Hitzeeinwirkung, bei der zu Beginn des Kontakts das Wärmemaximum vorliegt, wird zunächst nur das Stoffgewebe geschädigt bis es vollständig zerstört ist. Die Haut bleibt intakt. Erreicht nun die schädigende Hitze die Hautoberfläche, so hat das erwärmte Metall schon soviel Wärmeenergie verloren, dass eine Hautschädigung nur gering ausfällt. Bei Stromkontakt dagegen entsteht Joule'sche Wärme erst nach einiger Zeit, wobei sie aufgrund des Stromflusses durch Textil und Haut nahezu gleichzeitig das Stoffgewebe schädigt und die Haut verflüssigt. Aufgrund dessen kommt es vor allem bei (Kurzkontakt-) Strommarken zu einer Vermischung beider Komponenten mit Einlagerung von Textilfasern in die Strommarke. Bei reiner Hitzeeinwirkung dagegen erfolgen Textilerstörung und Hautverflüssigung nacheinander, sodass weniger Fasern in die Haut eingelagert werden. In diesem Zusammenhang sei noch einmal auf das differentialdiagnostisch bedeutsame Kriterium der

Vermischung von Haut-, Elektroden- und Textilanteilen bei Stromkontakt verwiesen (Abbildung 3.45 und 3.46, Kapitel 4.1.3.2).

Das rein morphologische *Schädigungsmusters von interponiertem Textilgewebe* und von in Strom- und Hitzemarken befindlichen *Haaren* jedoch weist häufig nur sehr geringe Abweichungen auf, die leicht übersehen werden können. Aufgrund dessen erscheint es als differentialdiagnostisches Kriterium für die rechtsmedizinische Praxis nur schwierig einsetzbar zu sein.

Histologie:

Eine Unterscheidung von Strom- und Hitzemarken anhand rein *histologisch-morphologischer Kriterien* ist aufgrund einer starken Variabilität in Abhängigkeit von verschiedenen Einflussfaktoren nur vorsichtig vorzunehmen:

Strommarken nach langer Stromflussdauer (> 1 Sekunde) oder hoher Stromintensität (1-1,5 A) zeigen nach HE-Färbung ein spitz zulaufendes, „brotförmiges“ Nekroseareal (Abbildung 3.17 b) [9, 56, 76], das weder bei Kurzkontaktstrommarken (Abbildung 3.17 a und 3.90 b) noch bei Hitzemarken (Abbildung 3.90 a) in dieser Form zu finden ist. Bei Kurzkontaktstrommarken und Hitzemarken legt sich dieses Areal eher „schüsselförmig“ [9, 56, 76] dem Krater, also dem Bereich des vollständig durch Koagulationsnekrose zerstörten Coriums [62], an. Ein Krater im Bereich der Elektrodenauflagefläche ist bei Strommarken im Gegensatz zu Hitzemarken in allen Versuchen stärker ausgeprägt.

Die Ursache für die histologisch-morphologischen Unterschiede zwischen Hitzemarken und Strommarken mit unterschiedlichem Schädigungsgrad könnte im beschriebenen, unterschiedlichen Temperaturanstieg und -abfall von Elektrode und erhitztem Metall liegen. Während die gewebsschädigende Wärme bei Hitzemarken kontinuierlich von der Kontaktstelle fortgeleitet [9, 76] wird und sich durch Wärmeverlust an das umliegende Gewebe relativ schnell abschwächt, bleibt bei konstantem Stromfluss die Joule'sche Wärme [17, 20, 23, 32, 45, 62, 68, 76, 77, 92, 108] bestehen oder steigt nach Böhm E et al [20] sogar stetig an. Die fortwährende Hitze bei Stromkontakt kann mit der Zeit somit auch tiefere Hautabschnitte thermisch schädigen. Allerdings schwächt auch sie sich in von der Elektrode weiter entfernt liegenden Hautschichten schließlich ab, was an der spitz zulaufenden Form der Nekrose zu erkennen ist. Der Grund für das nur „schüsselförmige“ Nekroseareal bei Kurzkontaktstrommarken (bis 1 Sekunde) könnte sein, dass die hier entstehende Hitze, welche nach Böhm E et al [20]

erst in Phase C ihr Maximum erreicht, aufgrund der nur kurzen Stromflusszeit lediglich ausreicht, um den direkt um die Elektrodenkontaktfläche befindlichen Hautbereich zu schädigen, nicht jedoch tiefere Abschnitte.

Eine Differentialdiagnose zwischen Strom- und Hitzemarke anhand rein histologisch-morphologischer Kriterien sollte deshalb nur vorsichtig erfolgen, weil auch „bei Verbrennungen durch hohe Hitze nach sehr kurzem Kontakt das geschädigte Areal ebenfalls die Form eines „flachen Brotes“ annehmen kann“ [76]. Die Ausprägung der Nekrosezone innerhalb von Strom- und Hitzemarken ist somit sehr variabel und abhängig von den verschiedenen Einflussfaktoren (Kapitel 4.1.2). Dies steht jedoch im Gegensatz zur Meinung von Böhm E [9], der eine eindeutige Differenzierung von Strom- und Hitzemarken anhand mehrerer spezifischer histologisch-morphologischer Charakteristika für möglich hält. Die primär von ihm beschriebenen diskontinuierlichen Verbrennungen mit Höhlenbildung bei Strommarken durch Lichtbogensmelzeffekte [9, 56] bis hin zu zahlreichen Einzelherden vor allem bei dicken/ großen Elektroden [20] können in dieser Arbeit histologisch nicht beobachtet werden. Im Gegenteil zeigen sowohl Hitze- [9, 56] als auch Strommarken bei den von uns durchgeführten Versuchen eine zur Umgebung eher scharfe Abgrenzung, wobei allerdings nach theoretischen Überlegungen durch die im Kapitel 4.1.3.1 beschriebene Funkenentwicklung eine vor allem „periphere Durchlöcherung“ der Haut [15] zumindest vorstellbar wäre.

Die schon im vorherigen Abschnitt diskutierte, auch im histologischen Schnitt darstellbare *Bläschenbildung in der Epidermis* bei Kurzzeitkontaktstrom- (Abbildung 3.18) und –hitzemarken (Abbildung 3.91) (bis 1 Sekunde) eignet sich aufgrund der hitzebedingten Genese ebenfalls nicht zur histologischen Differenzierung.

In der Literatur wird häufig die Frage aufgegriffen, inwieweit die typischerweise in Strommarken zu findenden *Kernausziehungen im Stratum basale und spinosum* eine strom- bzw. hitzebedingte Folge sind oder ob sie sogar vollständig andere Ursachen haben [31, 43, 47, 52, 76, 84, 100, 101, 102]. Im Rahmen dieser Arbeit kann dieses Phänomen in histologischen Schnitten von Kurzkontaktstrommarken (Abbildung 3.19), nicht jedoch in solchen von Kurzkontakthitzemarken gefunden werden. Dies legt natürlich die Vermutung einer eher strominduzierten Veränderung nahe. Nichts-

destotrotz sollten weitere Untersuchungen mit höher erhitzten Metallen folgen, um diesen Aspekt näher zu beleuchten.

Nach histologischer Untersuchung von Kurzkontaktstrommarken (bis 1 Sekunde) lässt sich jedoch eindeutig folgern, dass der Zusammenhang zwischen Kernausziehungen und Stromflussdauer vor dem Grad der morphologischen Schädigung der Epidermis in den Hintergrund tritt. So kommt es zwar auch bei der Erzeugung von Kurzzeitkontaktstrommarken regelmäßig zu charakteristischen Kernelongationen in den beschriebenen Schichten der Haut (Abbildung 3.19), die Wahrscheinlichkeit des Auftretens ist dabei jedoch stark abhängig von der Intensität der morphologischen Ausprägung der Strommarke [76]. Das heißt: Je stärker die thermische Schädigung der Epidermis bei nur kurzem Stromkontakt (Kapitel 4.1.1.1), desto intensiver zeigt sich auch eine Kernelongation. Dieser Aspekt unterstützt wiederum eher die Annahme einer hitzebedingten Genese von Zell- und Kernelongationen.

Aufgrund der beschriebenen Unspezifität sollte eine Unterscheidung zwischen Strom- und Hitzemarken allein anhand dieses Kriteriums somit ebenfalls nicht erfolgen.

Ein histologisches Charakteristikum von vor allem Hitzemarken ist die „*Ausfransung*“ der Epidermis im Bereich der Auflagefläche des erhitzten Metalls (Abbildung 3.90 a). Diese dürfte durch das Abziehen des warmen Metalls von der unterliegenden koagulierten Haut entstanden sein. Ob und warum dieses Phänomen allerdings nur beim Hitze- und nicht beim Stromkontakt vorkommt und ob eine differentialdiagnostische Entscheidung zwischen thermischer und elektrischer Genese anhand dieses Kriteriums erfolgen kann, sollte in weiteren Untersuchungen abgeklärt werden.

In der rechtsmedizinischen Praxis kann somit anhand keiner der dargestellten histologischen Kriterien eine klare Unterscheidung zwischen Hitze- und Stromkontakt erfolgen. Die Forschergruppe um Danielsen L, Karlsmark T und Thomsen HK [29, 30, 31, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 68, 101, 102, 103, 104, 105] jedoch legt weitere histologische Kriterien dar, anhand derer die Abgrenzung einer Hitzemarke von anderen Hautläsionen, insbesondere der elektrischer Natur, möglich ist.

Bei fraglichen Todesfällen soll eine histologische Untersuchung von potentiellen Strommarken trotzdem immer erfolgen, um typische, nach Stromfluss klassisch beobachtete Veränderungen wie die Vakuolenbildung in der Hornschicht oder Kernausziehungen im Stratum basale und spinosum zu eruieren und den Verdacht eines Stromkontaktes somit weiter zu erhärten. Da diese Kriterien, wie oben dargestellt, jedoch

keineswegs stromspezifisch sind, sollte die Diagnose des Stromtodes allerdings nicht allein anhand histologischer Kriterien erfolgen.

Metallisation:

Oberflächenverteilung von Metall:

Metallische Kugeln finden sich als Schmelzprodukte von Metallen niedriger Schmelztemperatur zwar selten auch in Hitzemarken (Abbildungen 3.94 und 3.95), können in Strommarken jedoch aufgrund ihrer Größe (1-3 μm) und des Vorhandenseins von Metallen hoher Schmelztemperatur in der Kugellegierung (Abbildungen 3.28 und 3.29) eindeutig als Funkenerosions- und somit Stromprodukt identifiziert werden. Böhm E [15] bezeichnet metallische Kugeln als einen die Elektrogenese unterstreichenden Befund.

Im Gegensatz zu auf der Oberfläche abgelagerten, metallischen Partikeln in Hitzemarken, welche auf die *Auflagefläche des erhitzten Metalls beschränkt* sind (Abbildungen 3.92 und 3.93), kann abgelagertes Metall aufgrund elektrischer Entladungen bei Strommarkenerzeugung auch in einiger Entfernung zur Marke gefunden werden (Abbildung 3.40) [17].

Die *Anzahl abgelagerter Metallpartikel* in Hitzemarken ist aufgrund fehlender funkenbedingter Mobilisierung (Kapitel 4.1.3.1) grundsätzlich geringer als in Strommarken, steigt in beiden Fällen jedoch vor allem mit Zunahme der Kontaktdauer zwischen erhitztem Metall bzw. Elektrode und Haut.

Die in Kurzkontaktstrommarken (bis 1 Sekunde) regelmäßig auftretenden, im RE-Mode zur Umgebung *helleren Areale* als Zeichen der diffusen Metallablagerung auf und in der Haut (Kapitel 4.1.3.3) finden sich in keiner der erzeugten Hitzemarken (Abbildungen 3.92 - 3.96). Jedoch sollten weiterführende Untersuchungen mit höheren Temperaturen und längeren Kontaktdauern durchgeführt werden, um dieses differentialdiagnostische Kriterium zu verifizieren.

In der rechtsmedizinischen Praxis kann somit anhand der charakteristischen Metallablagerung auf der Strom- und Hitzemarkenoberfläche eine eindeutige Unterscheidung zwischen beiden erfolgen.

Tiefenverteilung von Metall:

Das anhand der rasterelektronenmikroskopischen Oberflächenbetrachtung von Hitzemarken schon zu vermutende Fehlen einer diffusen Metalleinlagerung in tiefere epidermale Schichten kann durch Untersuchung von Kryo- und Paraffinschnitten im Rasterelektronenmikroskop bestätigt werden (Abbildung 3.97). Auch mittels klassisch-histologischer Techniken, durch zum Beispiel die Anfärbung von Kupfer, kann das Eindringen von Metall in die Epidermis einer Hitzemarke in den von uns durchgeführten Versuchen nicht nachgewiesen werden (Abbildung 3.98).

Diese Ergebnisse unterstützen ebenfalls die im Kapitel 4.1.3.3 diskutierte Erklärung für die Einlagerung von Metall in tiefere Schichten der Epidermis bei Strommarken als einen stromspezifischen Prozess im Sinne einer elektrolytischen [23, 41, 56] Loslösung von Ionen aus der Elektrode in der positiven Stromanstiegsphase mit gleichzeitig hitzeabhängiger Diffusion [5, 41, 76, 95] in die Tiefe der Haut. Aufgrund dieser stromspezifischen Loslösung von Ionen als Schlüsselreaktion ist verständlich, warum bei reinen Hitzemarken nur eine geringfügig diffuse Metallisation auf der Hautoberfläche zu finden ist, welche nie in tiefere Epidermisschichten reicht und die einer zufällig mechanischen Kontamination entspricht. In diesem Zusammenhang sollte durch weiterführende Untersuchungen die Frage geklärt werden, inwieweit der zeitliche Faktor für die Einlagerung von diffussem Metall in tiefere epidermale Schichten bei rein mechanischer Kontamination eine Rolle spielt.

In der rechtsmedizinischen Praxis ist somit eine Differentialdiagnose zwischen Strom- und Hitzemarken anhand der stromspezifisch diffusen Einlagerung metallischen Materials in tiefere Schichten der Epidermis, im Gegensatz zur Meinung von Pioch W [76], zumindest bei nur kurzer Kontaktdauer (bis 1 Sekunde) möglich. Zur eindeutigen Unterscheidung sollte jedoch immer gleichzeitig das charakteristische Metallisationsmuster (Kugeln und Partikel) auf der Probenoberfläche herangezogen werden.

4.3 Methodik

An dieser Stelle soll ein Vergleich verschiedener Methoden zur Darstellung der Morphologie und der Metallverteilung in Strom- und Hitzemarken erfolgen.

4.3.1 Darstellung der Morphologie von Strom- und Hitzemarken

Die morphologische Darstellung von Strom- und Hitzemarken im Rahmen dieser Arbeit erfolgt mittels Stereomikroskop, Hochvakuumrasterelektronenmikroskop nach entsprechender Präparation (Lufttrocknung versus Kritisch-Punkt-Trocknung, Kohlebeschichtung versus Goldbesputterung) und Niedervakuumrasterelektronenmikroskop in Verbindung mit einem Kühltisch.

Aufgrund der höheren Schärfentiefe [69] und des höheren Vergrößerungsvermögens (10x-10.000x) des REM gegenüber dem Stereomikroskop (6x-50x) sollte die Untersuchung von Strom- und Hitzemarken primär rasterelektronenmikroskopisch erfolgen. Nur im REM ist die Beurteilung differentialdiagnostisch bedeutsamer Parameter (Kapitel 4.2) adäquat möglich (vergleiche Abbildungen 3.81-3.84). Dabei sollte aufgrund der zeitaufwendigen und mit Artefakten belasteten (Abbildungen 3.100, 3.101 und 3.103) Präparation von nicht leitenden und gasenden Hautproben für das Hochvakuum-REM die Untersuchung bevorzugt durch ein Niedervakuum-REM mit Kühltisch erfolgen. Die Probe kann hier sofort nach Versuchsdurchführung nativ ins Gerät eingebaut und anschließend tiefgekühlt werden, ohne dass es zum Gasen der Probe oder zu Aufladungserscheinungen (Abbildung 3.99) kommt. Dadurch ist die Methode kostengünstig und schnell durchzuführen.

Wenn man von genannten Nachteilen absieht, ist die morphologische Abbildung von Strom- und Hitzemarken einerseits im Hochvakuum-REM nach CPD-Trocknung und andererseits im Niedervakuum-REM nach Einfrieren auf dem Kühltisch nahezu gleichwertig möglich (Abbildungen 3.102). Die Hautstruktur bei der eingefrorenen Probe stellt sich jedoch verwaschener dar (Abbildungen 3.104 und 3.105). Der Grund hierfür ist wahrscheinlich eine Herauslösung der oberflächlichen Hautlipidschicht durch die alkohollastige Kritisch-Punkt-Trocknung. Die Abbildung der Hautstruktur nach Einfrieren auf dem Kühltisch der Probe dürfte somit der Realität am nächsten kommen. Inwieweit jedoch auch dieses Einfrieren der Haut Einfluss auf die Oberflächenstruktur nimmt, ist noch abzuklären.

Die Methode der Wahl in der rechtsmedizinischen Praxis ist somit das Niedervakuum-REM mit Kühltisch, da es durch fehlende Probenpräparation eine schnelle, artefaktfreie und kostengünstige Untersuchung der Morphologie von Strom- und Hitzemarken ermöglicht und gleichzeitig die realistischste Oberflächenabbildung bietet.

4.3.2 Darstellung der Metallverteilung in Strom- und Hitzemarken

Oberflächenverteilung von Metall:

Die Untersuchung der Oberflächenmetallisation von Strom- und Hitzemarken erfolgt mittels EDX in Form einer Punkt- oder Flächenanalyse im Hochvakuum- oder im Niedervakuum-Rasterelektronenmikroskop. Alternativ wird ein Mapping erstellt.

Auch für die Beurteilung des Metallisationsmusters auf der Oberfläche von Strom- und Hitzemarken als differentialdiagnostisch zentrales Kriterium (Kapitel 4.2) sollte das (Niedervakuum-) REM mit EDX Verfahren wie der Emissionsspektralanalyse [56], der ICP-AES-Analyse [62], der Elektrographie [64] oder der Spektrographie [86] vorgezogen werden. Einige der genannten Methoden können Metalle zwar zum Teil sehr empfindlich nachweisen, was einen Rückschluss auf das ursprüngliche Elektrodenmaterial erlaubt, jedoch muss die Probe hierfür, beispielsweise durch Veraschung, zerstört werden. Die für eine Differentialdiagnose zwischen Strom- und Hitzemarken entscheidende Verteilungsbeurteilung von Metallen auf der Probenoberfläche ist dann nicht mehr möglich [86]. Ein Vorteil verschiedener dieser Verfahren ist dagegen, dass zusätzlich quantitative Aussagen über die Metallisation von Strom- und Hitzemarken getroffen werden können. Da jedoch aufgrund der verschiedenen Einflussfaktoren (Kapitel 4.1.3) eine hohe Variabilität der eingelagerten Metallmenge besteht, ist eine quantitative Bestimmung von Metall unter differentialdiagnostischen Aspekten häufig nicht aussagekräftig.

Demgegenüber ist die Analyse der Metallzusammensetzung, -form und -verteilung in Strom- und Hitzemarken nahezu zerstörungsfrei mittels EDX-Analyse möglich. Dabei erlaubt die, den Materialkontrast darstellende, RE-Abbildung eine Bewertung der reinen Metallverteilung auf der Probenoberfläche, wohingegen sich mittels EDX-Punktanalyse die exakte Zusammensetzung einzelner Ablagerungen ermitteln lässt. Das Mapping schließlich kombiniert die Eigenschaften beider Methoden: So werden einzelne, gleichzeitig detektierte Elemente in verschiedenen farbigen Bildern in ihrer Oberflächenverteilung dargestellt (Abbildung 3.106, 3.107).

In der rechtsmedizinischen Praxis ist somit die Methode der Wahl zur Beurteilung der differentialdiagnostisch entscheidenden Oberflächenverteilung von Metall in Strom- und Hitzemarken die EDX-Analyse in einem Niedervakuum-Rasterelektronenmikroskop [57].

Tiefenverteilung von Metall:

Die Untersuchung der Tiefenmetallisation von Strom- und Hitzemarken erfolgt einerseits im REM mittels EDX nach Herstellung von Kryo- bzw. Paraffinschnitten und andererseits mittels klassisch-histologischer Verfahren im Lichtmikroskop nach DMABR-Färbung, alternativ im EAGLE III.

Physikalisch-technische Analysemethoden besitzen dabei im Gegensatz zu histologisch-histochemischen Verfahren grundsätzlich eine hohe Selektivität [62], Spezifität [62, 89] und Sensitivität [41, 62, 89], wobei es mit dem EAGLE III weiterhin sogar möglich ist, das gesamte Paraffinblöckchen zu untersuchen, ohne dass es zu Aufladungserscheinungen oder Ähnlichem kommt.

Während bei der Metallanfärbung des histologischen Präparates die Verteilung jeweils nur eines Elementes dargestellt werden kann, ist es mittels EDX-Punkt- und Flächenanalyse oder mittels Mikroröntgenfluoreszenz möglich, mehrere Metalle gleichzeitig zu detektieren und in ihrer Verteilung darzustellen. Das bedeutet, dass auf der Oberfläche oder in der Tiefe der Epidermis abgelagerte Metallpartikel oder –kugeln bzw. diffus in die Haut eingelagertes Metall in dessen exakter metallischer Zusammensetzung identifiziert werden kann, während bei Anwendung histologischer Färbemethoden und „Vorliegen verschiedener Metalle selbstverständlich keine zuverlässigen Ergebnisse zu erzielen“ sind [11]. So wird bei Verwendung von beschichteten Elektroden oder Legierungen zur Strommarkenerzeugung abhängig von der jeweiligen Färbung immer nur einer der im abgelagerten Partikel enthaltenen Legierungsbestandteile nachgewiesen. Dadurch ist die Zuordnung der in der Strommarke eingelagerten Metalle zur verwendeten Elektrode bei alleiniger Anwendung histologischer Färbemethoden erschwert.

Weiterhin kann durch physikalisch-technische Methoden aufgrund der gleichzeitigen Darstellung verschiedener Metalle im gleichen Schnitt deren unterschiedlich diffuse Verteilung innerhalb der Epidermis besser beurteilt werden, als es bei der Anfärbung verschiedener Paraffinschnitte mit klassischen Färbemethoden der Fall ist.

Die mittels EDX und Mikroröntgenfluoreszenz eindeutig als solche zu identifizierenden Metallpartikel und –kugeln sind im Kupfer-gefärbten Präparat häufig nicht klar als metallischen Ursprungs zu erkennen, wobei die Interpretation der histologischen Befunde dann stark von der Erfahrung des Untersuchers abhängt. Die histologische Prä-

paration ist zudem sehr zeitaufwendig und häufig durch Artefaktbildung belastet. So vermutet auch Böhm E [11], dass „bei allen naßchemischen Verfahren durch Diffusionserscheinungen Artefaktbildungen vorkommen können“.

Bei der Formalinfixierung mit anschließender Paraffineindeckung zeigt sich zusätzlich eine Ablösung von der Haut aufliegenden Metallbestandteilen [84]. So zeigt das paraffineingebettete Präparat der Kurzzeitkontaktstrommarke keinerlei Metalleinlagerungen, während das kryogeschchnittene, also native Präparat derselben Strommarke deutliche Ablagerungen von Partikeln und Kugeln auf der Hautoberfläche aufweist (Abbildung 3.108). Gleiches Phänomen findet sich bei Strommarken nach längerem Stromfluss (Abbildung 3.109). So weist die kryogeschchnittene Strommarke starke oberflächliche Metallablagerungen und zusätzlich auch eine intensiv diffuse Einlagerung von Metall in die Haut auf. Demgegenüber sind beide Metallisationstypen in der paraffinbehandelten Strommarke deutlich abgeschwächt. Folglich findet also neben einer Abwaschung von der Oberfläche aufliegenden Metallkugeln und -partikeln wahrscheinlich auch eine Auswaschung von in der Haut diffus verteiltem Metall statt. Lediglich die Anzahl der durch thermisch bedingte Einflüsse mit der Haut verschmolzenen metallischen Kugeln und Partikel wird nicht beeinflusst.

Als Konsequenz aus diesen Ausführungen lässt sich festhalten, dass die schnellste, einfachste und artefaktfreiste Methode zur Untersuchung der Tiefenverteilung von Metall in Strommarken mit hoher Sensitivität, Spezifität und Selektivität die der Herstellung von Kryoschnitten und anschließender Untersuchung im REM mittels EDX oder alternativ im EAGLE mittels Mikroröntgenfluoreszenz ist.

Handlungsvorschlag für die rechtsmedizinische Praxis:

In der rechtsmedizinischen Praxis sollte eine fragliche Strommarke, wenn immer möglich, zunächst als Ganzes einer rasterelektronenmikroskopischen Untersuchung und EDX-Analyse im Niedervakuum zugeführt werden, um neben morphologischen Aspekten immer auch eine Beurteilung der Metallverteilung und –ausprägung auf der Hautoberfläche zu ermöglichen. Dazu gehören zunächst die geformten Metalle im Sinne von Partikeln und Kugeln, weiterhin das diffus nur oberflächlich abgelagerte Metall, wie es bei Versuchsdurchführung unter Wasser auf der Haut zu finden ist, und letztlich die im RE-Mode heller erscheinenden Bereiche innerhalb der Strommarke, welche für eine Einlagerung von diffusem Metall in die Epidermis sprechen.

Erst im zweiten Schritt sollte eine „Zerteilung“ der Strommarke erfolgen, wobei die eine Hälfte histologisch aufgearbeitet werden kann, um typische, jedoch nicht stromspezifische Veränderungen aufzudecken und so die „Stromtoddiagnose“ weiter zu erhärten. Von der anderen Hälfte der Marke sollten in jedem Fall Paraffin- oder besser Kryoschnitte angefertigt werden, um mittels EDX einen Metallnachweis in der Tiefe des Hautgewebes durchführen zu können, da diese Methode durch ihre einfache und schnelle Durchführung, ihre hohe Sensitivität und Spezifität und letztlich aufgrund geringer Artefaktbildung dem klassisch histologischen Metallnachweis überlegen ist.

4.4 DNA-Analyse von Geweberückständen auf der Elektrode

Wie in dem von Ortmann C et al [71] beschriebenen Fall ist es manchmal schwer, die verursachende Elektrode einer offensichtlichen Strommarke zu eruieren. Dies ist auch ganz besonders der Fall bei Homiziden mit Verschleierung der Tat durch den Täter [32, 63, 77].

Eine Möglichkeit der Identifizierung ist die Analyse von Metallspuren in der Strommarke, durch die Rückschlüsse auf die ursprüngliche Zusammensetzung der verwendeten Elektrode möglich sind (Kapitel 4.1.3). Eine solche Analyse schließt jedoch nur die Verwendung von elektrischen Leitern mit vollständig anderer metallischer Zusammensetzung aus. Werden bei der Fundortuntersuchung aber mehrere in Frage kommende Elektroden mit ähnlicher oder gleicher Metallzusammensetzung gefunden, so ist die eindeutige Zuordnung erschwert oder gar unmöglich.

Zur Lösung dieses Problems kann das beispielsweise von Ortmann C et al [70] vorgestellte, forensisch signifikante Verfahren der Detektion und Typisierung von der Elektrode anhaftenden Geweberückständen dienen. Bei dieser Methode wird die DNA auf der Elektrode für eine komplette Individualisierung verwendet, sodass eine eindeutige Identifizierung der zur Strommarkenerzeugung verwendeten Elektrode möglich ist. Die von Ortmann C et al [70] erzeugten Strommarken liegen bei Stromflusszeiten von etwa 5 Sekunden, die auf der Elektrode abgelagerten DNA-Mengen zwischen 3,1 und 800 ng. Bei der Erzeugung von Kurzkontaktstrommarken (bis 1 Sekunde) im Rahmen dieser Arbeit kann unter den gegebenen Versuchsbedingungen aufgrund der ausreichend nachweisbaren DNA-Mengen auf der Elektrode sowohl bei längerem Kontakt knapp über eine Sekunde (17,6 ng/ μ l) als auch bei sehr kurzem Kontakt von nur etwa 0,3 Sekunden (0,9 ng/ μ l) ebenfalls eine eindeutige Zuordnung von Geweberückstän-

den auf der Elektrode zu der bei Versuchsdurchführung verwendeten Haut erfolgen (Abbildung 3.110).

Somit stellt die DNA-Analyse von Geweberückständen auf der Elektrode auch bei Kurzzeitkontaktstrommarken bis 1 Sekunde eine signifikante Analysemethode dar, mittels der in unklaren Fällen eine individualisierte Zuordnung zwischen Strommarke und verursachender Elektrode möglich ist.

4.5 Kasuistik

Die im Kapitel 1.5 beschriebene rechtsmedizinische Kasuistik soll unter Berücksichtigung aller Erkenntnisse dieser Arbeit hier abschließend bewertet werden. Der Entstehungsmechanismus der unklaren Hautalteration am linken Oberschenkel der Toten dürfte stromspezifisch sein.

Dafür spricht neben der für Stromkontakt typischen Histologie auch die klassische Metallisation der Veränderung mit Ablagerung metallischer Partikel auf der Hautoberfläche und diffuser Einlagerung von Metall in die Haut (Abbildung 1.3). Differentialdiagnostisch können somit eindeutig sowohl das Elektroschockresiduum als auch die Hitzemarke abgegrenzt werden. In ersterem Fall würden sich primär metallische Kugeln und keine Partikel auf der Hautoberfläche zeigen, wohingegen bei der Hitzemarke primär Metallpartikel und nur selten Kugeln aus nur niedrig schmelzendem Material zu finden sind. In beiden Fällen jedoch würde es, im Gegensatz zur beschriebenen Kasuistik, nicht zu einer diffusen Ablagerung von Metall in die Haut kommen.

Auch die Frage, ob der Kontakt mit einem stromführenden Leiter unter Wasser stattgefunden hat, lässt sich aufgrund des Metallisationsmusters der Hautveränderung beantworten. So zeigt die Strommarke (Abbildung 1.4) viele Areale mit diffuser Einlagerung von Metall in die Haut, wobei die Dichte der auf der Oberfläche abgelagerten Metallpartikel oder -kugeln nur relativ gering ausgeprägt ist. Dies spricht somit für eine Strommarkenerzeugung auf vollständig von Wasser umschlossener Haut (Kapitel 4.1.3).

Diese Behauptung kann weiterhin durch morphologische Aspekte unterstützt werden. So kommt es vor allem bei Strommarkenerzeugung auf im Wasser befindlicher Haut zu einer nur geringen thermischen Schädigung, wie es auch in beschriebener Kasuistik der Fall ist. Differentialdiagnostisch hierfür käme zwar auch die Erzeugung einer Kurzzeitkontaktstrommarke an Luft in Frage. Allerdings würde die Metallisation der

entstehenden Strommarke nach nur kurzzeitigem elektrischen Kontakt vor allem auf der Oberfläche abgelagerte Metallpartikel und –kugeln und weniger diffus in der Haut befindliches Metall erwarten lassen (Abbildungen 3.83 und 3.84). Somit kann auch in diesem Fall eine Differenzierung anhand typischer Metallisationsmuster erfolgen.

Weiterhin zeigt die Hautveränderung am linken Oberschenkel der Toten eine untypische Morphologie. Es zeigt sich nicht die klassisch begrenzte, rundlich bis elliptische, verhärtete Einsenkung der Haut mit erhabenem, blass bis porzellanartigem Randwall und zentraler Verkohlung, sondern es finden sich vier quadratisch angeordnete, stecknadelspitzgroße, unterschiedlich intensiv braune Pünktchen. In den Versuchen kann durch Strommarkenerzeugung mittels eines Vierfachsteckers ein ebensolches Bild imitiert werden (Abbildungen 3.15 und 3.16).

Der Tod von Frau B. ist somit am wahrscheinlichsten durch strominduziertes Herzkammerflimmern verursacht worden, wobei der Kontakt des stromführenden Leiters mit der Haut aufgrund der typischen Metallisation und nur schwach ausgeprägten Morphologie der Strommarke unter Wasser stattgefunden haben muss.

Frau B. hat somit am 30.09.2001 gerade ein Bad im Badezimmer ihrer Wohnung genommen, als sie mit dem stromführenden Teil in Kontakt geriet. Da die nachfolgende kriminaltechnische Untersuchung am Tatort jedoch weder die Voraussetzung für einen tödlichen elektrischen Schlag feststellte, noch eine der Strommarkenform entsprechende Elektrode sicherstellen konnte, handelt es sich in der beschriebenen Kasuistik am wahrscheinlichsten um einen Mord. Dabei muss der potentielle Täter nach seiner Tat alle auf einen Stromkontakt deutenden Hinweise beseitigt haben. Dies wiederum lässt auf eine gewisse Sachkenntnis bezüglich elektrotechnischer Grundlagen schließen.

Die Frage, warum Frau B. nicht im Badezimmer, sondern im Arbeitszimmer der Wohnung tot aufgefunden wurde, lässt sich zwar dadurch erklären, dass nach Stromkontakt zunächst noch eine Handlungsfähigkeit bestehen kann [71]. Frau B. könnte also durchaus noch selbstständig aus der Wanne gestiegen und ins Arbeitszimmer gegangen sein, wo sie dann tot zusammensackte. Aufgrund der massiven, an Griffspuren erinnernden Hämatome an den Oberarmen und am Rücken ist jedoch ein nachträgliches Herausheben aus der Badewanne durch den potentiellen Täter eher wahrscheinlich. Das Ablegen der Toten im Arbeitszimmer stellt somit einen zusätzlichen Verschleierungsversuch dar, um beispielsweise einen plötzlichen Herztod zu imitieren.

5 Literaturverzeichnis

1. **al-Alousi LM**
Homicide by electrocution.
Med Sci Law (1990), 30(3): 239-46
2. **Altmann S, Jühling J, Kieback D, Zürneck H**
Elektrounfälle in Deutschland – Unfälle durch Elektrizität am Arbeitsplatz und im privaten Bereich.
Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: Forschungsbericht Fb 941, Wirtschaftsverlag NW Verlag für neue Wissenschaft GmbH, 1. Auflage, Bremerhaven (2002).
3. **Anders S, Matschke J, Tsokos M**
Internal current mark in a case of suicide by electrocution.
Am J Forensic Med Pathol (2001), 22(4): 370-3
4. **Arnold R, Giebe W, Winnefeld K, Klein A**
An initially unexplained death during prison sentence. Diagnostic verification by atomic absorption spectrometry.
Arch Kriminol (2002), 209(1-2): 14-9
5. **Böhm E**
Untersuchungen über das Verhalten von Kupfer in und auf der Haut nach zufälliger und elektrischer Metallisation.
Dtsch Z Gesamte Gerichtl Med (1966), 58(3): 166-75
6. **Böhm E**
Untersuchungen über die Gestalt oberflächlicher Metallisationen der Haut.
Dtsch Z Gesamte Gerichtl Med (1967), 59(1): 26-34
7. **Böhm E**
Differentialdiagnostisch bedeutsame Unterschiede zwischen Strom- und Wärmemarke.
Dtsch Z Ges Gerichtl Med (1967), 61: 128-36

8. **Böhm E**
Die Versilberungsmethode nach Timm als Nachweisreaktion für elektrische Metallisationen.
Dtsch Z Gesamte Gerichtl Med (1968), 62(1): 26-31
9. **Böhm E**
Zur Frage der Differentialdiagnose zwischen thermischen und elektrischen Verbrennungen.
Dtsch Z Gesamte Gerichtl Med (1968), 63: 149-53
10. **Böhm E**
Über den Selbstmord einer Frau durch elektrischen Strom.
Dtsch Z Gesamte Gerichtl Med (1969); 65(3): 87-95
11. **Böhm E**
Untersuchungen an experimentellen Stromverletzungen mit Elektronenstrahlen
Z Rechtsmedizin (1970), 67(5), 293-308
12. **Böhm E**
Die Anwendung des Rasterelektronenmikroskops in der Rechtsmedizin.
Beitr Gerichtl Med (1971), 28: 121-35
13. **Böhm E**
Einige Befunde und neuere Untersuchungsmethoden zur Spezifität von Hautveränderungen nach Einwirkung von elektrischem Strom.
Biomed Tech (Berl) (1972), 17(5): 192-7
14. **Böhm E**
Spezielle Entnahme-, Präparations- und Untersuchungstechniken für die Anwendung der Rasterelektronenmikroskopie in der forensischen Medizin.
Beitr Gerichtl Med (1972), 29: 228-58
15. **Böhm E**
Einige Befunde und neuere Untersuchungsmethoden zur Spezifität von Hautveränderungen nach Einwirkung von elektrischem Strom.
Biomed Tech (Berl) (1972), 17(6): 228-37

16. **Böhm E**
Zum Nachweis des Stromtodes.
Beitr Gerichtl Med (1975), 33: 154-9
17. **Böhm E**
Morphologische Befunde zur Differenzierung thermischer und elektrischer
Hautverletzungen und ihre Bedeutung für die forensische Praxis.
Habilitationsschrift Aachen (1976/77)
18. **Böhm E**
Metallisation nach elektrischer und thermischer Hautschädigung –
transmissionselektronenmikroskopische Befunde.
Beitr Gerichtl Med (1978), 36: 323-31
19. **Böhm E**
Die forensische Bedeutung der elektrischen Metallisation des Badewassers bei
Todesfällen durch elektrischen Strom in der Badewanne.
Beitr Gerichtl Med (1986), 45: 359-76
20. **Böhm E, Milz U**
Elektrische und morphologische Grundprozesse bei Verletzung mit niederge-
spanntem Wechselstrom.
Beitr Gerichtl Med (1975), 33: 308-19
21. **Böhm E, Weiler G**
Experimentelle Erzeugung horizontaler Strommarken im Wasser.
Beitr Gerichtl Med (1986), 44: 460-7
22. **Bonte W, Sprung R, Huckenbeck W**
Probleme bei der Beurteilung von Stromtodesfällen in der Badewanne.
Z Rechtsmed (1986), 97: 7-19
23. **Bosch K**
Makroskopische und lupenmikroskopische Untersuchungen zur Oberflächen-
beschaffenheit an Strommarken.

- Dtsch Z Gesamte Gerichtl Med (1965), 56(5): 318-23
24. **Bratzke H**
Tötung durch elektrischen Strom.
Beitr Gerichtl Med (1980), 38: 139-45
25. **Breton PJ**
From microns to nanometres: early landmarks in the science of scanning electron microscope imaging.
Scanning Microscopy (1999), 13 (1): 1-6
26. **Brinkmann K, Schäfer H**
Der Elektrounfall
Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York (1982)
27. **Carlsson L, Machly AC, Rudh E**
Tötungsversuch mit elektrischem Strom. Eine kriminaltechnische Untersuchung.
Arch Kriminol (1976), 157(1-2): 30-6
28. **Cooper PN, Milroy CM**
Violent suicide in South Yorkshire, England.
J Forensic Sci (1994), 39: 657-67
29. **Danielsen L, Gniadecka M, Thomsen HK, Pedersen F, Strange S, Nielsen KG, Petersen HD**
Skin changes following defibrillation. The effect of high voltage direct current.
Forensic Sci Int. (2003), 134(2-3): 134-41
30. **Danielsen L, Karlsmark T, Thomsen HK, Thomsen JL, Balding LE**
Diagnosis of electrical skin injuries. A review and a description of a case.
Am J Forensic Med Path (1991), 12(3): 222-6
31. **Danielsen L, Thomsen HK, Nielsen O, Aalund O, Nielsen KG, Karlsmark T, Genefke IK**

- Electrical and thermal injuries in pig skin – evaluated and compared by light microscopy.
Forensic Sci Int. (1978), 12(3): 211-25
32. **Dreßler J, Müller E**
Der Elektrotod aus gerichtsmedizinischer Sicht.
Z Ärztl Fortbild (Jena) (1990), 84(22): 1159-61
33. **Dürwald W, Holzhausen G, Hunger H**
Elektro-Todesfälle in der Badewanne.
Arch Kriminol (1964), 134:164-71
34. **Duff K, McCaffrey RJ**
Electrical injury and lightning injury: a review of their mechanism and neuropsychological, psychiatric and neurological sequelae.
Neuropsychol Rev (2001), 11(2): 101-16
35. **Fechner G, Brinkmann B, Heckmann M**
Herzstromdichte als wichtigster biologischer Parameter bei Stromexposition in der Badewanne.
Beitr Gerichtl Med (1990), 48: 335-8
36. **Fernando R, Liyanage S**
Suicide by electrocution.
Med Sci Law (1990), 30(3): 219-20
37. **Földes V, Lászik A**
Ein besonderer Fall des Selbstmordes durch elektrischen Strom.
Arch Kriminol (1992), 189: 140-4
38. **Garnier M, Marc B, Cattin JM**
Familial homicide tentative by electrocution. Tentative familiale d'homicide par electrocution.
J médecine légale droit médical (1993), 36 : 115-8

39. **Grellner W**
Fatal electrocution in prison.
Arch Kriminol (2008 Nov-Dec), 222(5-6) :145-51
40. **Hilgermann R**
Unusual suicide by electric current.
Z Rechtsmed (1972), 71(1): 68-71
41. **Jacobsen H**
Electrically induced deposition of metal on the human skin.
Forensic Sci Int (1997), 90(1-2): 85-92
42. **Jakubeniene M, Zakaras A, Minkuviene ZN, Benoshys A**
Application of atomic absorption spectroscopy for detection of multimetal traces in low-voltage electrical marks.
Forensic Sci Int (2006 Aug 10), 161(1): 36-40
43. **Janssen W**
Forensische Histologie; in: Arbeitsmethoden der medizinischen und naturwissenschaftlichen Kriminalistik, Bd.10 (Hrsg.: E. Weinig, S. Berg).
Schmidt-Römhild, Lübeck (1977)
44. **Jellinek S**
Die äußere Form der Strommarke.
Dtsch Z Ges Gerichtl Med (1922), 1: 596-600
45. **Jellinek S**
Der elektrische Unfall.
Franz Deuticke (1925), Leipzig und Wien
46. **Jellinek S**
Klinische und histologische Bilder als poldifferenzierte Stromeffekte.
Wien Klin Wochenschr (1952), 64(28): 501
47. **Jellinek S**
Anschauliche Feststellungen zum Problem der Strommarke.

- Beitr Gerichtl Med (1955), 20: 56-8
48. **Kallieris D, Miltner E, Schmidt G, Joachim H**
Stromtod in der Badewanne.
Beitr Gerichtl Med (1987), 46: 301-5
49. **Karger B, Süggeler O, Brinkmann B**
Electrocution- autopsy study with emphasis on „electrical petechiae”.
Forensic Sci Int (2002), 126(3): 210-3
50. **Karlsmark T, Danielsen L, Aalund O, Thomsen HK, Nielsen O, Nielsen KG, Lyon H, Ammitzboll T, Moller R, Genefke IK**
Electrically-induced collagen calcification in pig skin. A histopathologic and histochemical study.
Forensic Sci Int (1988), 39: 163-74
51. **Karlsmark T, Danielsen L, Thomsen HK, Aalund O, Nielsen KG, Nielsen O, Genefke IK**
The effect of sodium hydroxide and hydrochloric acid on pig dermis. A light microscopic study.
Forensic Sci Int (1988), 39(3): 227-33
52. **Karlsmark T, Danielsen L, Thomsen HK, Aalund O, Nielsen O, Nielsen KG, Johnson E, Genefke IK**
Tracing the use of torture: electrically induced calcification of collagen in pig skin.
Nature. (1983), 301(5895): 75-8
53. **Karlsmark T, Danielsen L, Thomsen HK, Johnson E, Aalund O, Nielsen KG, Nielsen O, Genefke IK**
Ultrastructural changes in dermal pig skin after exposure to heat and electric energy and acid and basic solutions.
Forensic Sci Int. (1988), 39(3): 235-43
54. **Karlsmark T, Thomsen HK, Danielsen L, Aalund O, Nielsen O, Nielsen KG, Genefke IK**

Immediate dermal changes in pig skin after exposure to moderate amounts of heat and electrical energy.

J Invest Dermatol. (1986), 87(4): 528-32

55. **Karlsmark T, Thomsen HK, Danielsen L, Aalund O, Nielsen O, Nielsen KG, Genefke IK**

The morphogenesis of electrically and heat-induced dermal changes in pig skin. Forensic Sci Int. (1988), 39(2): 175-88

56. **Kernbach-Wighton G, Kijewski H**

Metallisation durch Stromeinwirkung: Nachweis und Quantifizierung. Rechtsmedizin (1997), 7: 45-8

57. **Kinoshita H, Nishiguchi M, Ouchi H, Minami T, Kubota A, Utsumi T, Sakamoto N, Kashiwagi N, Shinomiya K, Tsuboi H, Hishida S**

The application of a variable-pressure scanning electron microscope with energy dispersive X-ray microanalyser to the diagnosis of electrocution: a case report.

Legal Med (2004), 6: 55-60

58. **Klein K**

Die gerichtsmedizinische Diagnose des Stromtodes.

Dtsch Z Ges Gerichtl Med (1958), 47: 29-54

59. **Klitschar M, Grabuschnigg P, Beham A**

Death from electrocution during autoerotic practice: case report and review of the literature.

Am J Forensic Med Path (1998), 19(2): 190-3

60. **Kósa F, Viragos-Kis E**

Sudden death after „home electrotherapy”.

Arch Kriminol (1981), 167(1-2): 43-51

61. **Leygraf E**

Suizidale Stromtodesfälle außerhalb der Badewanne.

Beitr Gerichtl Med (1990), 48: 551-9

62. **Logemann E, Raule P, Hellerich U, Krutzfeldt B**
Zum Nachweis von Metallspuren in Strommarken.
Arch Kriminol (1995), 196: 156-64

63. **Marc B, Baudry F, Douceron H, Ghaith A, Wepierre JL, Garnier M**
Suicide by electrocution with low-voltage current.
J Forensic Sci (2000), 45(1): 216-22

64. **Marcinowski T, Pankowski M**
Significance of skin metallization in the diagnosis of electrocution.
Forensic Sci Int (1980), 16(1): 1-6

65. **Marcinkowski T, Pukacka-Sokolowska L, Wojciechowski T**
Planned complex suicide.
Forensic Sci (1974), 3(1): 95-100

66. **Mätzler A**
Der Tod in der Badewanne I+II.
Kriminalistik (1981), 35, 372-8 + 432-7

67. **Maxeiner H**
Survival of a homicide attempt by electric current.
Beitr Gerichtl Med (1985), 43: 399-402

68. **Nielsen KG, Nielsen O, Thomsen HK**
Device and methods for the measurement of energy transfer in experiments involving thermal and electrical injuries of skin.
Forensic Sci Int (1981), 17(3): 203-9

69. **Ohnsorge J**
Möglichkeiten und Grenzen der Rasterelektronenmikroskopie.
Beitr Gerichtl Med (1972), 29: 259-65

70. **Ortmann C, Rolf B, Fechner G**
DNA-typing of cellular material on current conductors.
Int J Legal Med (1998), 111(4): 177-9

71. **Ortmann C, Schmidt PF, Teige K, Fechner G**
Rhythmogener Stromtod mit zunächst erhaltener Handlungsfähigkeit.
Rechtsmed (1998), 8: 98-101
72. **Pack-Dietrich B**
Zur Diagnose des Stromtods vom versicherungsrechtlichen Standpunkt.
Med. Diss. (Berlin 1971)
73. **Pfeiffer H, DuChesne A, Brinkmann B**
An unusual case of homicidal near drowning followed by electrocution.
Int J Legal Med (2006 Jan), 120(1): 36-41
74. **Pierucci G, Danesino P**
The macroscopic detection of metallization in the latent current mark.
Z Rechtsmed (1980), 85(2): 97-105
75. **Pierucci G, Danesino P**
Flourescent technique for macroscopic detection of electric metallization.
Z Rechtsmed (1981), 86(4): 245-8
76. **Pioch W**
Histologisch - histochemische Untersuchungen zur Identifizierung von Strommarken.
Dtsch Z Ges Gerichtl Med. (1966), 57(1): 165-9
77. **Pioch W**
Zur gerichtsmedizinischen Untersuchung von Tötungsdelikten durch elektrischen Strom.
Forschungserg. d. Ger. Med., Festschrift f. H. ELBEL, Lübeck (1967)
78. **Pollak S, Mortinger H**
Bullöse Strommarken.
Beitr. Gerichtl Med (1987), 45: 377-85
79. **Püschel K, Hülsken H, Brinkmann B**
Stromtodesfälle in der Badewanne.

- Arch Kriminol (1985), 176: 96-100
80. **Reimann W, Prokop O, Geserick G**
Vademecum Gerichtsmedizin.
Gesundheit (1990), Berlin, S 223-33
81. **Risse M, Weiler G, Kaiser H**
Rare suicidal death by electrocution using a timer and vital reaction.
Arch Kriminol (1996), 197(5-6): 149-54
82. **Roll P**
Interessante Beobachtung bei Stromtodesfall in der Badewanne.
Beitr Gerichtl Med (1988), 46: 307-12
83. **Rothschild MA, Bockholdt B, Schneider V**
Zur Problematik der suizidalen Strombeibringung in der Badewanne.
Z Rechtsmed (1997), 7: 131-4
84. **Schäffner M**
Untersuchungen über Histologie und Metallisation nach elektrischen
Einwirkungen auf die Haut.
Dtsch Z Gesamte Gerichtl Med (1965), 56(4): 269-80
85. **Schmiederer B, Du Chesne A, Schmidt PF, Brinkmann B**
Specific traces in stun gun deployment.
Int J Legal Med (2005), 119: 207-12
86. **Schneider V**
Bemerkenswerte Fälle von Strombeibringung durch fremde Hand.
Arch Kriminol (1973), 151(5): 149-58
87. **Schneider V**
Die Strommarke als Abbild stromführender Teile.
Arch Kriminol (1978), 162: 86-91
88. **Schneider V**

- Zum Elektrotod in der Badewanne.
Arch Kriminol (1985), 176: 89-95
89. **Schneider V, Hantsche H**
Über Untersuchungen an Strommarken mit Rasterelektronenmikroskop und
Mikrosonde.
Beitr Gerichtl Med (1973), 31: 192-202
90. **Schott JC, Davis GJ, Hunsaker JC 3rd.**
Accidental electrocution during autoeroticism: a shocking case.
Am J Forensic Med Pathol (2003 Mar), 24(1):92-5
91. **Schrader G**
Experimentelle Untersuchungen zur Histopathologie elektrischer
Hautschädigungen durch niedergespannten Gleich- und Wechselstrom.
Jena (Fischer) 1932
92. **Schröder G, Windus G, Tröger HD**
Experimentelle Untersuchungen zur Entstehung linearer Strommarken.
Arch Kriminol (1989), 183(1-2): 21-8
93. **Schwerd W**
Über die Ausbildung von Strommarken bei der Einwirkung von Elektrizität im
Wasser.
Dtsch Z Gerichtl Med (1959), 49: 218-23
94. **Schwerd W, Lautenbach L**
Mord mit elektrischem Strom in der Badewanne.
Arch Kriminol (1960), 12: 33-49
95. **Sellier K**
Untersuchungen an Strommarken in Abhängigkeit von der Stromstärke und der
Einwirkungsdauer. 1. Metallnachweis und Temperaturmessung.
Dtsch Z Gesamte Gerichtl Med (1966), 57(1): 161-5
96. **Sellmeier AC**

Private Mitteilung

97. **Somogyi E, Rosza G, Toro I, Nevelos A**
Electron microscopic observations on the epidermis of the electrocuted skin of rats.
Med Sci Law (1967), 7(3): 152-5
98. **Sótonyi P, Darok M**
Die rasterelektronenmikroskopische Elementanalyse in der Rechtsmedizin.
Z Rechtsmedizin (1995), 5: 37-44
99. **Statistisches Bundesamt, Wiesbaden**
Todesursachenstatistik der Jahre 2000 und 2005-07
100. **Takamiya M, Saigusa K, Nakayashiki N, Aoki Y**
A histological study on the mechanism of epidermal nuclear elongation in electrical and burn injuries.
Int J Legal Med (2001), 115(3): 152-7
101. **Thomsen HK, Danielsen L, Nielsen O, Aalund O, Nielsen KG, Karlsmark T, Genefke IK**
Early epidermal changes in heat- and electrically injured pig skin. I. A light microscopic study.
Forensic Sci Int (1981), 17(2): 133-43
102. **Thomsen HK, Danielsen L, Nielsen O, Aalund O, Nielsen KG, Karlsmark T, Genefke IK**
Early epidermal changes in heat- and electrically injured pig skin. II. An electronic microscopic study.
Forensic Sci Int (1981), 17(2): 145-52
103. **Thomsen HK, Danielsen L, Nielsen O, Aalund O, Nielsen KG, Karlsmark T, Genefke IK**
Epidermal changes in heat and electrically injured pig skin: a light microscopic study of the sequences in morphology.
Acta Pathol Microbiol Immunol Scand [A] (1982), 90(5): 327-32

104. **Thomsen HK, Danielsen L, Nielsen O, Aalund O, Nielsen KG, Karlsmark T, Genefke IK, Christoffersen P**
Epidermal changes in heat and electrically injured pig skin. A light microscopic study of the influence of heat energy intensity and electrical current frequency.
Acta Pathol Microbiol Immunol Scand [A] (1983), 91(5): 297-306
105. **Thomsen HK, Danielsen L, Nielsen O, Aalund O, Nielsen KG, Karlsmark T, Genefke IK, Christoffersen P**
The effect of direct current, sodium hydroxide and hydrochloric acid on pig epidermis. A light microscopic and electron microscopic study.
Acta Pathol Microbiol Immunol Scand [A] (1983), 95(5): 307-16
106. **Thüte S, Schmidt PF, Fechner G, Du Chesne A, Brinkmann B**
P 82: Morphologische und analytische Untersuchungen von Strommarken nach Kurzzeitstromkontakten.
Rechtsmedizin (2004), 14: 359-60
107. **Torre C, Varetto C**
The ultrastructure of the electric burn in man: a transmission electron microscopy-scanning electron microscopy study.
J Forensic Sci (1985), 30(2): 448-55
108. **Torre C, Varetto L**
Dermal surface in electric and thermal injuries. Observations by scanning electron microscopy.
Am J Forensic Med Pathol (1986), 7(2): 151-8
109. **Tröger HD, Urban R, Weller JP**
Homicide simulating electrocution suicide by spinal anesthesia.
Beitr Gerichtl Med (1992), 50: 1-5
110. **Trübner K, Püschel K**
Todesfälle in der Badewanne.
Arch Kriminol (1991), 188: 35-46
111. **Verhoff MA, Risse M, Weiler G**

- Satellitenschüssel als Stromquelle. Kasuistik eines tödlichen und beinahe tödlichen Unfalls am Arbeitsplatz.
Arch Kriminol (2001), 208 (5-6): 159-64
112. **Wang Y, Liu M, Cheng WB, Li F, Liao Z, Wang Y**
Endothelial cell membrane perforation of aorta and pulmonary artery in the electrocution victims.
Forensic Sci Int (2008 Jul), 178(2-3): 204-6
113. **Wang Y, Yang L, Cheng W, Liu M, Chen X, Zhang K, Hong-min C, Liao Z**
Scanning electron microscopic observation of erythrocytes and endothelial cells of electrified death rabbits
Leg Med (Tokyo) (2009 Mar 2), [Epub ahead of print]
114. **Weiler G, Risse M**
Tötung durch elektrischen Strom in der Badewanne. Beweisführung durch eine geformte lokale sowie eine lineare Strommarke.
Arch Kriminol (1985), 176(3-4): 82-8
115. **Wollenek G, Dietl H, Denk W, Laufer G**
Ein Grenzphänomen an der Haut im Badewasser liegender Leichen.
Z Rechtsmed (1989), 102: 473-86
116. **Xu X, Xu H, Zhu J, Deng P**
A preliminary study of skin electrical injury with computerized image analysis.
Forensic Sci Int (1995), 73(3): 197-202
117. **Yamazaki M, Terada M, Ogura Y, Wakusugi C, Mitsukuni Y**
A suicidal case of electrocution with hypnotic drug poisoning: an autopsy report.
Nippon Hoi Zasshi (1997), 51: 95-101
118. **Zhang P, Cai S**
Study on electrocution death by low-voltage.
Forensic Sci Int (1995 Dec 18), 76(2): 115-9

6 Lebenslauf

Name: Sandra Christiane Thüte
Geburtsdatum: 09.08.1979
Geburtsort: Warendorf
Familienstand: ledig
Staatsangehörigkeit: deutsch
Eltern: Peter Thüte, Anni Thüte, geb. Linnemann

SCHULAUUSBILDUNG:

1985-1989 St. Johannes-Grundschule in Greffen
1989-1999 CJD-Gymnasium in Versmold
1999 Allgemeine Hochschulreife

STUDIUM:

1999- 2006 Studium der Humanmedizin an der WWU Münster
17.08.2001 Ärztliche Vorprüfung
29.08.2002 1. Teil Ärztliche Prüfung
18.03.2005 2. Teil Ärztliche Prüfung
08.05.2006 3. Teil Ärztliche Prüfung
26.05.2006 Approbation als Ärztin

10/06-06/08 Assistenzärztin in der Unfallchirurgie, Brüderkranken-
haus St. Josef Paderborn
07/08-10/09 Assistenzärztin in der Augenklinik Bellevue Kiel
Seit 11/09 Assistenzärztin in der Universitäts-Augenklinik Kiel

Kiel, den 12.12.2009

7 **Danksagung**

Frau Prof. Dr. H. Pfeiffer und Herrn Prof. Dr. B. Brinkmann danke ich für die freundliche Überlassung des Themas dieser Arbeit.

Besonders fühle ich mich Herrn Priv.-Doz. Dr. P. F. Schmidt für die wertvolle Unterstützung bei Durchführung und Auswertung der vorgenommenen Experimente und seinen unermüdlichen Einsatz bei der Fertigstellung dieser Arbeit zu Dank verpflichtet.

Ein ganz besonderer Dank gilt weiterhin Frau Schwantge für ihr hilfreiches Engagement und die angenehm herzliche Atmosphäre.

Auch danken möchte ich Herrn Prof. Dr. Du Chesne und Herrn Prof. Dr. Fechner für Beratung und fachliche Unterstützung bei der Planung dieser experimentellen Arbeit.

Weiterhin gilt mein Dank Frau Anuss, Frau Spalthoff, Frau Grabiniok und Herrn Huda für ihre Hilfe bei der Probenpräparation.