

Zum postmortalen Verhalten der Rheobase

B. Madea und C. Henßge

Institut für Rechtsmedizin, Universität zu Köln, Melatengürtel 60–62, D-5000 Köln 30,
Bundesrepublik Deutschland

Eingegangen 1. November 1989

Postmortem rise of muscular threshold

Summary. Own investigations on the postmortem rise of muscular threshold were conducted on 20 bodies with exactly known time of death. Muscular contraction was objectified using a sensitive force transducer. The muscle was excited using rectangular impulses of 1 second duration of a current intensity which produces a force of muscular contraction of 2.5 mN. These excitations were continued over the postmortem interval until a current intensity of 80 mN doesn't cause a contraction of 2.5 mN any more. Investigations were mainly performed at the thenar muscles. There is a linear relationship between \ln of muscular threshold (current intensity) and the time since death ($r = 0.965$). For any case the linear regression line between \ln of muscular threshold and time since death was calculated. With mean values for slope and intercept the time of death was calculated for each measured threshold. Extrapolation of the time since death with mean values also for the slope reveals a much more precise estimation of the time since death than an extrapolation with an individual slope as proposed by Joachim and Feldmann (1980). The method was proved on a random sample of 8 practical cases. The real time since death was always within the 95%-limits of confidence of the extrapolated time since death.

Key words: Time since death – Muscular threshold – Electrical excitability of skeletal muscle

Zusammenfassung. An einem Kollektiv von 20 Leichen wurde die Schwellenstromstärke (Rheobase) bestimmt, welche zu einer Kontraktionskraft von 2,5 mN führt. Die Messung der Kontraktionskraft erfolgte mit in die Muskulatur (vorwiegend Thenar) eingestochenem Kraftaufnehmer. Es ergab sich ein weitgehend linearer Zusammenhang zwischen \ln der Schwellenstromstärke und der Todeszeit. Bei Verwendung des kollektiven Mittelwertes von Regressionskoeffizient und Intercept können am vorliegenden Material nach einmaliger Bestimmung der Rheobase Todeszeiten höherer Präzision zu-

rückgerechnet werden als nach mehrmaliger Bestimmung der Rheobase mit dem von Joachim und Feldmann (1980) angegebenen Verfahren. Eine erste Anwendung an 8 Praxisfällen ergab damit übereinstimmende Resultate.

Schlüsselwörter: Galvanische Reizschwelle – elektrische Erregbarkeit der Skelettmuskulatur – Todeszeit

Vorbemerkung

In der Terminologie der Physiologie ist Rheobase die Stromstärke, die bei extrem langer Reizdauer gerade noch zu einer Reizantwort führt. In der Praxis der klinischen Neurologie wird die „extrem lange Reizdauer“ auf 1000 ms beschränkt, unter anderem aus apparativen Gründen; die gerade noch wahrnehmbare Reizantwort in der Physiologie und klinischen Neurologie ist nicht fest definiert. Sie unterliegt Einflüssen von seiten des Untersuchungsobjektes (freigelegter Muskel, bedeckter Muskel, Dicke des Unterhautfettgewebes) als auch des Untersuchers (nur visuelle oder taktile, apparative Kontrolle des Reizerfolges).

Untersuchungsgröße der vorliegenden Untersuchung ist – streng formuliert – die Schwellenstromstärke bei einer Reizdauer von 1000 ms, die zu einem Kraftwert von 2,5 mN führt. Diese Schwellenstromstärke wird im folgenden ebenfalls als Rheobase bzw. galvanische Reizschwelle bezeichnet.

Einleitung

Nach tierexperimentellen Untersuchungen, in denen eine straffe Korrelation zwischen postmortalem Anstieg der Rheobase und Todeszeit gefunden worden war (Joachim 1976), führten Joachim und Feldmann (1980) Untersuchungen zur postmortalen galvanischen Reizschwelle an 11 Leichen durch. Kriterium der Todeszeit war der postmortale Anstieg der galvanischen Reizschwelle bei Reizung mit Rechteckimpulsen von einer Sekunde Dauer. Als Reizerfolg wurde eine deutlich erkennbare Zuckung der Muskulatur gewertet. Besonders gute Ergebnisse seien durch Untersuchungen des M. flexor digiti quinti und M. flexor digitorum communis brevis zu erzielen, da Bewegungen leicht erkannt werden können. Gereizt wurde mit einer Kugelelektrode über die intakte Haut.

Die galvanische Reizschwelle (untersucht wurden 15 Muskeln) soll an jedem Muskel 4mal innerhalb von 3 Stunden gemessen werden. Aus den Wertepaaren von t (in Minuten) und \ln der galvanischen Reizschwelle

$$y_t (\ln \text{ mA})$$

wird eine lineare Regression berechnet:

$$y_t = a_0 + b \times t(1).$$

Die Todeszeit t^* ergibt sich durch Extrapolation auf eine für alle Leichen gleiche primäre galvanische Reizschwelle (A^*) des entsprechenden Muskels in Form ihres $\ln a^*$ nach:

$$t^* = \frac{a_0 - a^*}{b}$$

Die primären Reizschwellen der einzelnen Muskeln wurden durch Mittelung (Median) der aus der Regression (1) berechneten Werte für a_0 bei bekannter Todeszeit ermittelt. Zugrunde lagen Messungen an zwei bis acht Leichen (unterschiedliche Todesursachen, unterschiedliche Temperatur der Leichenlagerung, unterschiedlicher postmortaler Untersuchungszeitraum). Für die praktische Anwendung wird empfohlen, die Messungen an mehreren Muskeln durchzuführen und die sich ergebenden Todeszeiten zu mitteln.

Die durch die viermalige Messung ermittelte individuelle Anstiegsgeschwindigkeit der Rheobase erübrige nach Joachim eine Berücksichtigung von Einflußfaktoren auf die Zeitdauer supravitaler Reagibilität und im übrigen eine „Erhebung von Eichwerten an Vergleichskollektiven“ (Joachim 1988).

Die Ermittlung des „individuellen Anstiegs“ der galvanischen Reizschwelle macht das Verfahren jedoch nur bedingt voraussetzungsfrei von äußeren und inneren Faktoren. Diese betreffen zuerst die individuelle primäre Reizschwelle, die selbst von der Todesursache und Umgebungstemperatur abhängig ist (siehe z. B. die vitalen Schwankungen des Normwertbereiches der Rheobase bei Harris 1971). Tatsächlich bedingten die Abweichungen zwischen „individueller primärer Reizschwelle“ und der der Rückextrapolation zugrundegelegten „interindividuell gültigen primären postmortalen Reizschwelle“ im wesentlichen die Abweichungen zwischen realer und berechneter Todeszeit im Material von Joachim (Henßge 1982). Die Analyse des von Joachim und Feldmann (1980) vorgelegten Datenmaterials ergab ferner:

- Die Vergrößerung der Anzahl untersuchter Muskeln (3 bis 8) am Einzelfall und Mittelung der erhaltenen Todeszeitzuordnungen führt nur zu geringfügig präziseren Todeszeitaussagen, die den erhöhten Mehraufwand kaum rechtfertigt.
- Der Gültigkeitsbereich der Methode ist aufgrund inhomogener Todesursachen (lange, kurze Agonie), inhomogener Temperaturbereiche der Leichenlagerung, inhomogener individueller Temperaturvorgeschichte groß. Die bei dem kleinen Untersuchungsumfang von 8 Leichen (bei 3 Fällen standen für die statistische Analyse zu wenig Daten zur Verfügung) bereits erzielten 95%-Toleranzgrenzen von $\pm 2,5$ Stunden um einen Mittelwert von 3 bis 11 untersuchten Muskeln im Untersuchungszeitraum von 2 bis 8 hpm lassen die Erwartung zu, daß bei größeren Stichprobenumfang oder auch bei homogenen Stichproben engere 95%-Toleranzgrenzen zu erreichen sind.

Ravache-Quiriny (1982, 1986) kommt bei Nachprüfung der Ergebnisse von Joachim und Feldmann (1980) zur Schlußfolgerung, daß nur in einem Teil der Fälle ein linearer Zusammenhang zwischen \ln der Reizschwelle und Todeszeit besteht. Offensichtlich wurden die Untersuchungen (19 Leichen, davon 2 mit Störungen des Elektrolythaushaltes, 1mal multiple Sklerose, 1mal Tumorkachexie) teilweise am freigelegten Muskel durchgeführt. Die Einschätzung von Ravache-Quiriny (1982) „the use of this fairly simple technique seems rather limited“ läßt sich am publizierten Datenmaterial leider nicht vollständig überprüfen.

Ramme und Staak (1983) modifizierten die Technik Joachims, indem sie den zu untersuchenden Muskel ebenfalls freipräparierten und Einstichelektroden verwendeten. Vermerkt wurde die „kleinste, mit bloßem Auge noch bemerkbare Muskelbewegung“. Angaben zum Untersuchungsumfang: 25 Leichen mit teilweise (!) bekannter Todeszeit, verschiedene Skelettmuskeln (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1. Tabellarische Darstellung zu Stichprobenumfang und Ergebnissen bisher vorliegender Untersuchungen zum postmortalen Anstieg der galvanischen Reizschwelle

Autor	Anzahl der untersuchten Fälle	Untersuchte Muskeln	Untersuchter Zeitraum	Präzision der Todeszeitschätzung, 95%-Toleranzgrenzen
Joachim/ Feldmann 1980	$n = 11$, statistische Auswertung jedoch nur für 8 Fälle, da bei 3 Fällen zu wenig Meßwerte vorlagen	Orbicularis oculi und oris, Levator palpebrae, Stenocleidomastoideus, Biceps brachii, Flexor digitorum superficialis, Flexor pollicis longus, Flexor + Opponens pollicis brevis, Flexor digiti V, Quadriceps femoris, Gastrocnemius, Fibularis longus, Flexor digitorum communis	2 bis etwa 15 hpm	$\pm 2,5$ h (nach Berechnungen von Henßge 1982)
Ravache- Quiriny 1982/1986	$n = 19$, davon 2 Fälle mit Störungen des Elektrolythaushaltes 1mal multiple Sklerose, 1mal Tumorkachexie, keine statistische Auswertung	Orbicularis oculi und oris, Sternocleidomastoideus, Flexor digitorum communis, Flexor digiti V	bis 12,25 hpm keine Angaben zum Untersuchungsbeginn	Keine Angaben
Ramme/ Staak 1983	25 Fälle mit teilweise (!) bekanntem Todeszeitpunkt, keine weiteren Angaben zum Stichprobenumfang, keine statistischen Berechnungen, auch nicht für die Fälle mit bekannter Todeszeit	Keine Angaben	bis = 16 hpm keine Angaben zum Untersuchungsbeginn	Keine Angaben
Madea 1989	20 Fälle mit geklärter Todeszeit (für diese Fälle statistische Berechnung), 8 Fälle mit nicht eindeutig geklärter Todeszeit	Thenar: Abductor pollicis brevis, Opponens pollicis Hypothenar: Abductor digiti minimi, Opponens digiti minimi Biceps brachii	2–13 hpm	$\pm 3,27$ h für Thenarmuskulatur

Bei 5 Fällen hätten sie analog zu Joachim einen linearen Anstieg des \ln der Rheobase über der Todeszeit gefunden. Der Untersuchungszeitraum dieser Fälle wird ebenso mitgeteilt wie die Fehlerbreite der Todeszeitschätzung oder welche Muskeln untersucht wurden. In anderen Fällen hätten die Autoren durch mehrfaches Einstechen der Reizelektroden an verschiedenen Arealen des gleichen Muskels bis 13 hpm (laut Abbildung der Originalarbeit bis 16 hpm) Rheobasenwerte zwischen 0,5 und 1 mA (laut Abbildung 0,5 bis 2 mA) erhalten. Die Diskussion der Autoren zu diesem überraschenden Befund, „daß mit der klassischen Erregbarkeitsprüfung keineswegs die Muskulatur direkt, sondern die peripheren Abschnitte der Motoneurone gereizt“ würden, ist allerdings theoretisch unbegründet und experimentell bereits widerlegt (Landois 1905; v. Frey 1907; Krause et al. 1976; Sliwka und Bloch 1988).

Zielsetzung der eigenen Untersuchungen

Im Rahmen einer größeren Untersuchungsserie zur Objektivierung der supravitalen skelettmuskulären Reaktion (Madea 1989) sollte das postmortale Verhalten der Rheobase überprüft werden. Joachim (1988) kündigt an, daß eine Objektivierung und Quantifizierung des Reizerfolges anzustreben sei, um sicherzustellen, daß bei ansteigender Reizschwelle auch immer eine gleich starke Zuckung ausgelöst werde.

Material und Methodik

Die Untersuchungen erfolgten im Zeitbereich von 2 bis 13 hpm an 20 Fällen mit geklärter Todeszeit bzw. an 8 Fällen mit nicht geklärter Todeszeit (zur Zusammensetzung des Untersuchungsmaterials siehe die Tabelle 2a und b, zu den untersuchten Muskelgruppen Tabelle 3). Zur Untersuchung wurden die Leichen unter „Standardbedingungen“ (Marshall und Hoare 1962; Henßge 1979) bei einer relativ konstanten Umgebungstemperatur von 19°C bis 20°C gelagert. Die Arme wurden gestreckt, die Unterarme supiniert und in dieser Lage fixiert (falls der Starregrad der Ellenbogengelenke dies zuließ, um einen übersichtlichen Zugang zur Thenar- und Hypothenarmuskulatur zu gewährleisten).

Zur Reizung wurden Reizelektroden aus Edelstahl von 2 mm Durchmesser und 40 mm Länge verwandt, die an der Spitze schräg angeschliffen sind. Einstich der Reizelektroden in einem Abstand von 3 bis 4 cm (je nach Länge des zu untersuchenden Muskels), 5 bis 7 mm tief in die Muskulatur.

Reizgerät: Neurotron 726 S der Firma Siemens. Zur Bestimmung der galvanischen Reizschwelle wurde mit Rechteckimpulsen von 1000 ms Dauer und Stromstärken gereizt, die zu einem definierten Kraftwert von 2,5 mN führen (entsprechend einem Ausschlag von 1 cm bei einer Eingangsempfindlichkeit des Registriergerätes von 250 mV/cm). Registrierung der Stromimpulse und Kraft-Zeit-Verläufe auf einem zwei-Kanal-Thermoschnellschreiber (8K-21-2/80) der Firma nbn-Elektronik mit integriertem Zwei-Kanal-Meßverstärker mit 14 Bereichen der Eingangsempfindlichkeit. Zur Registrierung der Kraft-Zeit-Verläufe der muskulären Reaktion (Objektivierung der Muskelkontraktion) wurden Kraftaufnehmer auf der Basis von Halbleiterdehnungsmeßstreifen verwandt, bestehend aus einer 1,2 mm dicken, 9 mm langen Kanüle mit seitlichem Fenster (Lunkenheimer et al. 1982, 1985). Das seitliche Fenster mit dem Biegebalken wird faserparallel in den zu untersuchenden Muskel zwischen den Reizelektroden eingestochen. Meßgröße ist ein — durch die einstichbedingte konkave Verformung der dem Kraftaufnehmer anliegenden Muskelfasern — senkrecht zur ursprünglichen Faserachse stehender, zentripetal zum Kraftaufnehmer hinggerichteter Vektor.

Tabelle 2a. Anamnestiche Angaben zur Bezugsstichprobe der eigenen Untersuchung

Nr.	L.-Nr.	Anamnestiche Daten/ Umstände	Befunde/ Todesursache	Todeszeit	Unter- suchungs- beginn	Unter- suchungs- ende
7	637/87	31 J., männl., Zugüberfahung	Suizid, Poly- trauma, vollstän- dige Dekapitation	03. 11. 1987, 07.40 Uhr	03. 11. 1987, 09.30 Uhr	03. 11. 1987, 18.30 Uhr
10	667/87	58 J., weibl., i. d. Wohnung in Blutlache aufge- funden	Unterkühlung bei hochgradig- em Blutverlust	24. 11. 1987, 19.33 Uhr	24. 11. 1987, 21.50 Uhr	25. 11. 1987, 06.59 Uhr
12	670/87	65 J., männl., auf Straße tot zusam- mengebrochen	Reinfarkt	27. 11. 1987, 12.35 Uhr	27. 11. 1987, 14.42 Uhr	27. 11. 1987, 21.15 Uhr
14	736/87	16 J., weibl., von Bus überrollt	Perthessche Druckstauung	21. 12. 1987, 15.00 Uhr	21. 12. 1987, 17.20 Uhr	21. 12. 1987, 23.00 Uhr
15	749/87	80 J., männl., i. Wohnung tot zusammenge- brochen	akuter Herztod	29. 12. 1987, 21.15 Uhr	30. 12. 1987, 00.35 Uhr	30. 12. 1987, 04.00 Uhr
22	22/88	62 J., männl., auf Straße zusam- mengebrochen	KHK, Herz- rhythmus- störungen	11. 01. 1988, 08.45 Uhr	11. 01. 1988, 11.20 Uhr	11. 01. 1988, 18.00 Uhr
23	28/88	56 J., männl., vom Dach gefallen	Polytrauma	12. 01. 1988, 12.10 Uhr	12. 01. 1988, 14.25 Uhr	12. 01. 1988, 23.00 Uhr
27	44/88	74 J., männl., nach Gaststätten- besuch in PKW verstorben	Schwere KHK, Herzrhythmus- störungen, Herz- insuffizienz	18. 01. 1988, 21.16 Uhr	19. 01. 1988, 00.00 Uhr	19. 01. 1988, 05.30 Uhr
28	46/88	76 J., weibl., auf Bahnhof tot zusammen- gebrochen	Herzinsuffizienz, AV-Block, Hypertonie	19. 01. 1988, 13.30 Uhr	19. 01. 1988, 16.00 Uhr	19. 01. 1988, 21.00 Uhr
30	49/88	26 J., männl., Fenstersprung aus dem 3. Stock (LKH)	Polytrauma	21. 01. 1988, 04.10 Uhr	21. 01. 1988, 08.10 Uhr	21. 01. 1988, 13.50 Uhr
31	60/88	28 J., männl., Fenstersprung	Polytrauma	26. 01. 1988, 13.30 Uhr	26. 01. 1988, 15.45 Uhr	26. 01. 1988, 22.00 Uhr
33	65/88	60 J., männl., in „Etablissement“ verstorben	Akuter Herztod	29. 01. 1988, 18.00 Uhr	29. 01. 1988, 23.00 Uhr	30. 01. 1988, 04.00 Uhr
35	69/88	36 J., weibl. in Treppenhaus tot zusammenge- brochen	Herzversagen bei akutem Asthma- anfall	01. 02. 1988, 00.52 Uhr	01. 02. 1988, 03.40 Uhr	01. 02. 1988, 09.50 Uhr
39	82/88	74 J., männl.	Plötzlicher Herz- tod bei bekannter Herzinsuffizienz	07. 02. 1988, 11.45 Uhr	07. 02. 1988, 18.30 Uhr	07. 02. 1988, 23.15 Uhr
41	90/88	75 J., männl. auf Straße tot zusam- mengebrochen	KHK, Herzrhyth- musstörungen, Herzinsuffizienz	12. 02. 1988, 12.05 Uhr	12. 02. 1988, 14.35 Uhr	12. 02. 1988, 21.35 Uhr

Tabelle 2a (Fortsetzung)

Nr.	L.-Nr.	Anamnestiche Daten/ Umstände	Befunde/ Todesursache	Todeszeit	Unter- suchungs- beginn	Unter- suchungs- ende
42	91/88	40 J., männl., über 20 m ver- teilte Bahnleiche	Polytrauma	13.02.1988, 04.25 Uhr	13.02.1988, 13.05 Uhr	13.02.1988, 17.55 Uhr
43	93/88	27 J., männl., Fenstersprung	Schädelzertrüm- merung, Poly- trauma	14.02.1988, 02.00 Uhr	14.02.1988, 13.00 Uhr	14.02.1988, 14.30 Uhr
46	129/88	49 J., weibl., Bahnleiche	Polytrauma	04.03.1988, 10.05 Uhr	04.03.1988, 12.05 Uhr	04.03.1988, 16.35 Uhr
49	145/88	46 J., männl., vor Gaststätte tot aufgefunden	Koronarthrom- bose, transmura- ler Herzinfarkt	12.03.1988, 14.20 Uhr	12.03.1988, 19.25 Uhr	12.03.1988, 23.55 Uhr
50	147/88	70 J., männl., verstarb im Bei- sein d. Ehefrau	Akutes Herzversagen	13.03.1988, 16.30 Uhr	13.03.1988 21.00 Uhr	14.03.1988 00.00 Uhr

Auswertung

Von allen Fällen mit bekannter Todeszeit wurden die linearen Regressionen zwischen \ln der Reizschwelle (am Thenar) und Todeszeit berechnet (mittlerer Korrelationskoeffizient $r = 0,965$) sowie die Mittelwerte für Slope und Intercept ($a = -1,738$; $b = 0,0129$).¹ Die Rückextrapolation auf die Todeszeit erfolgte entsprechend der umgewandelten Geradengleichung

$$t = \frac{a_i - a}{b}$$

mit a_i = gemessene Rheobasen

$a = -1,738$

$b = 0,0129$

für jede einzelne am Thenar gemessene Rheobase ($n = 267$, $N = 20$) unter Verwendung der kollektiven Mittelwerte für a und b . Für alle berechneten Todeszeiten wurden die Differenzbeträge zwischen berechneter und realer Todeszeit ermittelt (t berechnet – t real) mit Kennzeichnung einer überschätzten Todeszeit durch „+“, einer unterschätzten durch „–“. Aus diesen Differenzen wurden Fehlermittelwerte und Standardabweichungen berechnet.

Weiterhin wurde – analog zu Joachim – aus der ersten von vier konsekutiv (im 30 Minuten-Intervall) gemessenen Rheobasen ($N = 20$, $n = 67$) unter Verwendung individueller regressionsanalytisch ermittelter Steilheiten auf die Todeszeit rückextrapoliert. Hier wurden ebenfalls die Differenzbeträge zwischen berechneter und realer Todeszeit ermittelt sowie Fehlermittelwert und Standardabweichung berechnet. Den unter Verwendung individueller Steilheiten ermittelten Differenzbeträgen zwischen berechneter und realer Todeszeit wurden für die gleichen Reizschwellenwerte diejenigen bei Zugrundelegung einer mittleren Steilheit b gegenübergestellt.

¹ Für den Hypothenar stehen derzeit noch für den gesamten Untersuchungszeitraum zu wenig Einzelmessungen zur Verfügung

Tabelle 2b. Anamnestische Angaben zur Kontrollstichprobe der eigenen Untersuchung (Fälle mit kriminalistisch nicht exakt eingegrenzter Todeszeit)

Nr.	L.-Nr.	Anamnestische Daten/ Umstände	Befunde/ Todesursache	Todeszeit	Unter- suchungs- beginn	Unter- suchungs- ende
6	631/87	73 J., weibl. im Bett tot aufgefunden	Suizid, Intoxikation mit Ludiomil ^R	zw. 17. 10. 1987, 20.30 Uhr u. 28. 10. 1987, 09.30 Uhr	28. 10. 1987, 13.35 Uhr	28. 10. 1987, 16.20 Uhr
16	663/87	59 J., männl., erstochen	Verbluten bei Erstechen	22. 11. 1987, 15.30– 18.00 Uhr	22. 11. 1987, 22.36 Uhr	23. 11. 1987, 01. 04. Uhr
24	33/88	67 J., weibl., v. Ehemann tot i. Bett aufgefunden, Depress., psychiatr. Bhdg.	Ungeklärt	13. 01. 1988, zw. 05.00 u. 07.00 Uhr	13. 01. 1988, 11.00 Uhr	13. 01. 1988, 15.30 Uhr
26	38/88	81 J., weibl., in der Wohnung tot aufgefunden	Ungeklärt	15. 01. 1988, 14.15 Uhr tot gef.	15. 01. 1988, 16.30 Uhr	15. 01. 1988, 18.30 Uhr
32	64/88	66 J., männl., in der Wohnung verstorben	KHK, akutes Herzversagen bei Herzinsuffizienz	29. 01. 1988, zw. 11.30 u. 13.20 Uhr	29. 01. 1988, 15.10 Uhr	29. 01. 1988, 20.40 Uhr
38	79/88	79 J., männl., tot aufgefunden, kurz zuvor noch lebend gesehen worden	Zyankali-Intoxikation (13,4 mg/l im Blut)	06. 02. 1988, 11.20 Uhr tot aufgef.	06. 02. 1988, 15.40 Uhr	06. 02. 1988, 20.40 Uhr
44	96/88	53 J., männl., im Bett tot aufgefunden worden, Schmerzen im Brustbereich	Koronarsklerose, frischer Infarkt	14. 02. 1988, zw. 10.30 u. 11.30 Uhr	14. 02. 1988, 14.50 Uhr	14. 02. 1988, 19.30 Uhr
48	140/88	81 J., männl., Erhängen	Erhängen	11. 03. 1988, zw. 06.30 u. 10.40 Uhr	11. 03. 1988, 14.00 Uhr	11. 03. 1988, 17.30 Uhr

Tabelle 3. Untersuchungsumfang und untersuchte Muskelgruppen des eigenen Untersuchungskollektivs

Untersuchungszeitraum:	2 bis 13 hpm	
Untersuchungsumfang:		
20 Fälle mit geklärter Todeszeit	8 Fälle mit nicht geklärter Todeszeit (tot aufgefunden)	
Untersuchte Muskelgruppen:		
Thenar rechts	16	6
Thenar links	19	6
Hypothenar rechts	5	1
Hypothenar links	5	2
Biceps rechts	1	–
Biceps links	1	–

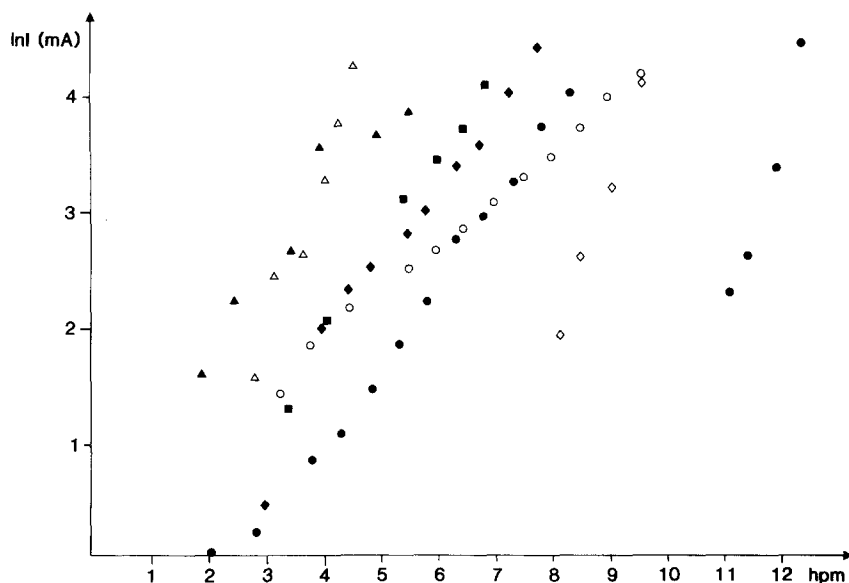


Abb. 1. Postmortaler Anstieg der galvanischen Reizschwelle. In der Reizschwelle für 8 Fälle (dargestellt durch verschiedene Symbole) über der Todeszeit. Linearer Zusammenhang zwischen logarithmierten Reizschwellen und Zeit

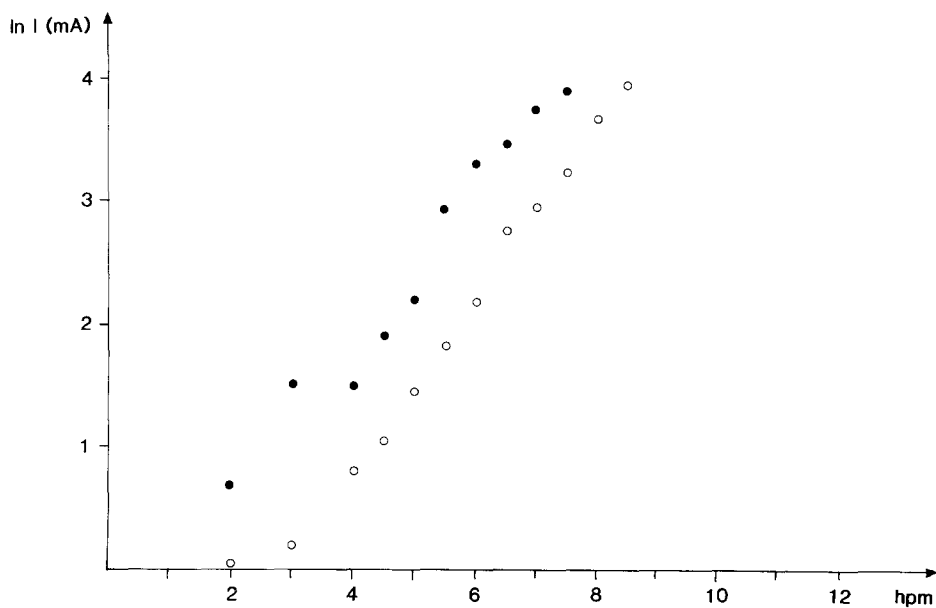


Abb. 2. Anstieg der Rheobase (ln) an 2 kontralateralen Meßstellen (Fall 7, rechter und linker Thenar, siehe auch Tabelle 6)

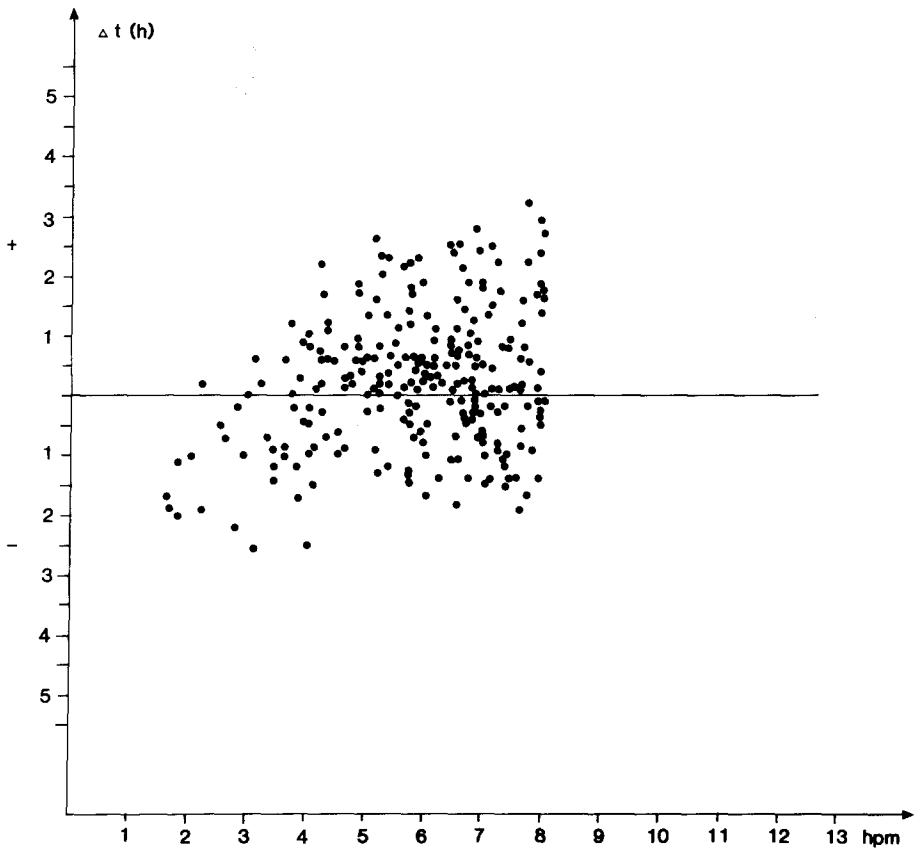


Abb. 3. Differenz zwischen berechneter und realer Todeszeit (in h) über der berechneten Todeszeit für 267 Meßwerte bei Extrapolation der Todeszeit mit dem kollektiven Mittelwert der Anstiegssteilheit

Ergebnisse

In allen Fällen war ein weitgehend linearer postmortaler Anstieg der Reizschwelle (in ihrer logarithmierten Form), die zu einem Kraftwert von 2,5 mN führt, festzustellen (Abb. 1). Die Korrelationskoeffizienten zwischen \ln der Reizschwelle und Todeszeit ($r = 0,965$) sind dabei ähnlich hoch wie bei Joachim. Eine Konstanz der Reizschwelle über dem Untersuchungszeitraum (bis 13 hpm), wie von Ramme und Staak (1983) beschrieben, fand sich nicht. Es bestehen jedoch lokale Unterschiede der Reizschwelle am gleichen Zielmuskel, zwischen kontralateralen Muskeln der gleichen Leiche (Abb. 2) sowie zwischen verschiedenen Muskeln, worauf bereits Joachim aufmerksam gemacht hat.

Die Differenzen zwischen berechneter und realer Todeszeit sind bei Verwendung individueller Anstiegssteilheiten wesentlich größer als bei Verwendung eines mittleren b (Abb. 3 und 4). Entsprechend sind auch die Werte des Fehlermittels und der Standardabweichung der Differenz zwischen berechneter und realer Todeszeit bei Rückextrapolation mit einer individuellen Anstiegssteilheit wesentlich größer als bei Zugrundelegung einer mittleren Steilheit b (Tabelle 4),

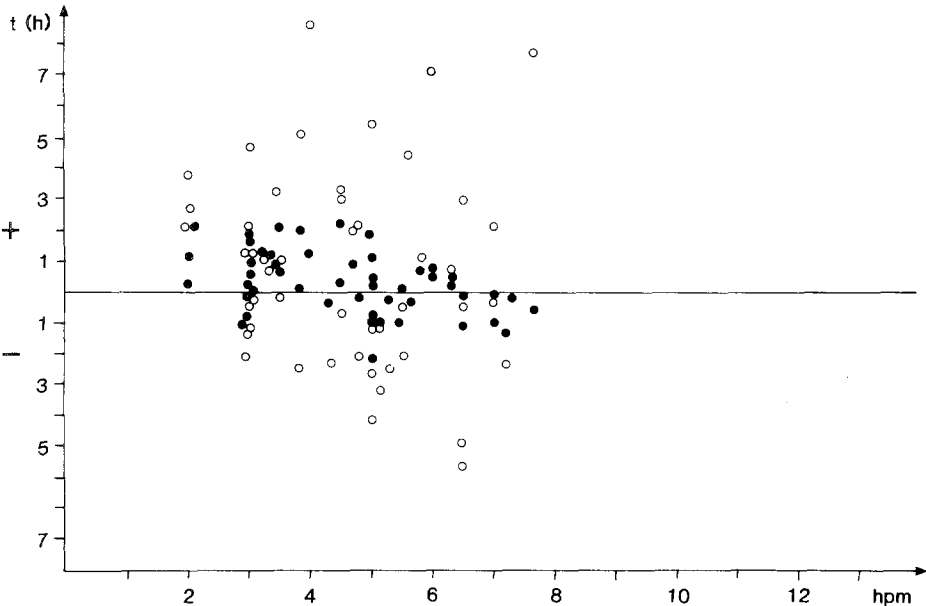


Abb. 4. Differenz zwischen berechneter und realer Todeszeit (in h) bei Extrapolation der Todeszeit ($n = 67$) mit einem kollektiven Mittelwert der Anstiegssteilheit (●) bzw. einer auf der Basis von 4 Meßwerten regressionsanalytisch berechneten individuellen Anstiegssteilheit (○). Wesentlich größere Abweichungen zwischen berechneter und realer Todeszeit bei Extrapolation mit individueller Anstiegssteilheit

Tabelle 4. Postmortale galvanische Reizschwelle. Mittelwerte und Standardabweichungen der Differenz zwischen berechneter und realer Todeszeit (dezimale Zeitangabe in Stunden). b_{ind} : Extrapolation der Todeszeit mit einer auf der Basis von 4 Meßwerten ermittelten individuellen Anstiegscharakteristik. \bar{b} : Extrapolation der Todeszeit mit einem kollektiven Mittelwert für die Anstiegssteilheit

	b_{ind}	\bar{b}	\bar{b}
n	67	67	267
\bar{x}	2	-0,12	-0,11
s	8,13	1,69	1,67

Tabelle 5. Postmortale galvanische Reizschwelle. Mittelwerte und Standardabweichungen der Differenz zwischen berechneter und realer Todeszeit; die Fälle mit großer Abweichung zwischen berechneter und realer Todeszeit (≥ 4 h) der Tabelle 4 wurden aus der statistischen Analyse eliminiert; auch nach Elimination dieser Fälle zeigt sich eine wesentlich höhere Präzision der Zeitschätzung bei Rückextrapolation mit einer mittleren Steilheit

	b_{ind1}	\bar{b}_1	\bar{b}_1
n	58	58	242
\bar{x}	0,62	0,074	0,245
s	8,08	1,17	1,16

Tabelle 6. Abweichungen zwischen berechneter und realer Todeszeit in Stunden (dezimal) an kontralateralen Meßstellen; Fall 7, rechter und linker Thenar; neben der realen Todeszeit ist die Abweichung der extrapolierten von der realen angegeben. + = Überschätzung, – = Unterschätzung der realen Todeszeit

t_{real}	Δ_t (Thenar rechts)	Δ_t (Thenar links)
2	0,2	1,1
3	-0,5	1,2
4	-0,7	0,2
4,5	-0,9	0,2
5	-0,9	0,1
5,5	-0,9	0,5
6	-0,9	0,5
6,5	-0,7	0,2
7	-1,0	0,1
7,5	-1,1	-0,3
8	-1,0	–
8,5	-1,2	–

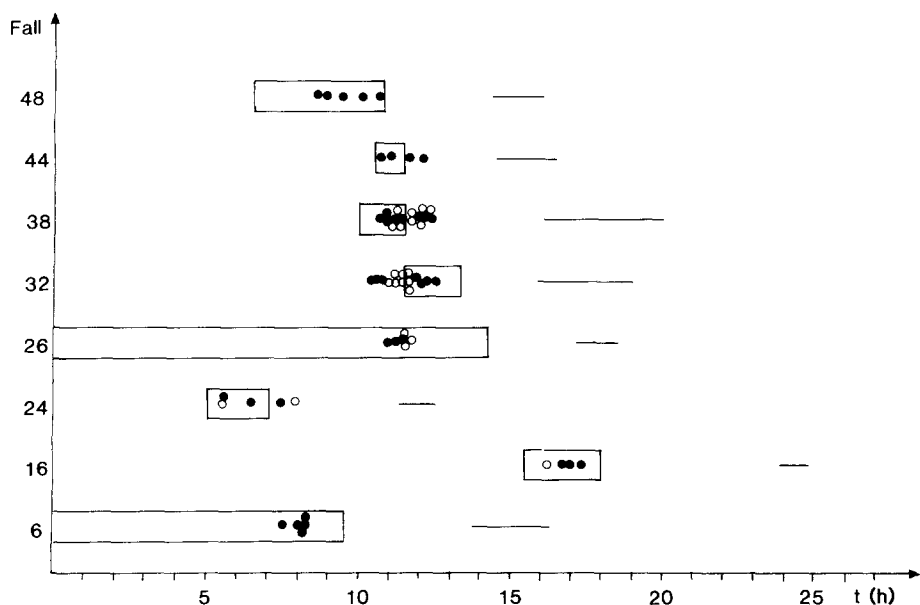


Abb. 5. Postmortale galvanische Reizschwelle. Extrapolation der Todeszeit für 8 unabhängige Fälle (mit kriminalistisch nicht exakt eingegrenzter Todeszeit) über der Zeit: Balken: Kriminalistisch eingegrenzte Todeszeit; Linien: Untersuchungszeit; berechnete Zeit für den rechten ● und den linken ○ Thenar; die Mittelwerte der extrapolierten Todeszeit liegen bereits im oder sehr nahe dem kriminalistisch eingegrenzten Todeszeitraum; dieser wird, wenn genügend eingegrenzt, durch die berechneten 95%-Toleranzgrenze von $\pm 3,3$ Stunden erfaßt

dies auch, wenn man Fälle mit großer Abweichung zwischen berechneten und realen Todeszeiten aus der statistischen Analyse eliminiert (Tabelle 5).

Für den Thenar ergeben sich am vorliegenden Material im Zeitbereich bis etwa 10 hpm 95%-Toleranzgrenzen der Todeszeitschätzung von $\pm 3,3$ Stunden. Bei lokal unterschiedlichen Reizschwellen an kontralateralen Muskeln liegt die reale Todeszeit immer innerhalb der Toleranzgrenzen der geschätzten Todeszeit (Tabelle 6).

Bei Überprüfung des Verfahrens an 8 Fällen mit einer kriminalistisch nicht exakt, teilweise jedoch auf 2 bis 3 Stunden eingrenzbarer Todeszeit (Praxisfälle) ergab sich, daß bei Rückextrapolation mit einem mittleren b bereits die Mittelwerte der Todeszeitschätzung entweder im oder sehr nahe dem eingegrenzten Todeszeitraum liegen. Die reale Todeszeit würde auf jeden Fall durch die berechneten 95%-Toleranzgruppen von $\pm 3,3$ Stunden um den Mittelwert der Todeszeitschätzung erfaßt (siehe Fälle Nr. 16, 24, 32, 38, 44 der Abb. 5).

Diskussion

Die Ergebnisse Joachims zum postmortalen Anstieg der Rheobase können auch bei Objektivierung der muskulären Reaktion bestätigt werden. Rheobase (Schwellenreizstromstärke bei einer Reizdauer von 1000 msec, die zu einem Kraftwert von 2,5 mN führt) und Todeszeit weisen einen exponentiellen Zusammenhang auf. Die physiologische Ursache auf zellulärer Ebene für diesen exponentiellen Zusammenhang bleibt dabei unklar²; es steht zu vermuten, daß eine Erschöpfung von Energiereserven der Muskelzellen (Verbrauch der Glykogenreserven mit Zusammenbruch des ATP-Spiegels) mit konsekutivem Sistieren aktiver Iontransportmechanismen hierfür ursächlich zugrundeliegt.

Bei der vorliegenden Untersuchungskonzeption darf aus dem Befund einer postmortal ansteigenden Schwellenstromstärke zur Erzeugung einer Kraft der Muskelkontraktion von 2,5 mN hypothetisch abgeleitet werden, daß

- die Muskelfasern aufgrund eintretender Ermüdung bei gleichbleibender Reizstromstärke mit Abnahme der Kraftamplitude reagieren und
- durch eine Erhöhung der Reizstromstärke zusätzliche Fasern rekrutiert werden.

Ergebnisse anderer Autoren (Ramme und Staak 1983; Ravache-Quiriny 1982, 1986), die eine postmortale Konstanz der Reizschwelle bzw. eine generelle Abweichung von der exponentiellen Anstiegscharakteristik der Rheobase über der Todeszeit unterstellen, sind aufgrund einer lückenhaften Darstellung von Reizmethodik und Untersuchungsbefunden nicht nachvollziehbar. Die Untersuchungen von Ramme und Staak weisen jedoch nochmals auf die Inhomogenität der Degeneration eines Muskels und die nur streng lokale Gültigkeit von Meßwerten, andererseits auf die Problematik einer „konstanten subjektiven Bewertung“ des Reizerfolges hin.

Am von Joachim und Feldmann publizierten Datenmaterial (1980; Joachim 1988) ergeben sich 95%-Toleranzgrenzen der Todeszeitschätzung von $\pm 2,5$ Stunden im Zeitbereich bis 8 hpm (nach Berechnungen Henßges 1982); am eigenen Material ergeben sich bei Extrapolation der Todeszeit mit einem kollekti-

² Diese Kärung war im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen auch nicht angestrebt

ven Mittelwert der Anstiegssteilheit bei Objektivierung der muskulären Reaktion 95%-Toleranzgrenzen der Todeszeitschätzung von $\pm 3,3$ Stunden bis etwa 10 hpm bei allerdings größerem Stichprobenumfang gegenüber Joachim ($n = 20$ gegenüber $n = 8$).

Die erzielbare Präzision der Todeszeitschätzung ist nur zum Teil ein Problem einer konstanten subjektiven Beurteilung der Reizantwort (in den eigenen Untersuchungen gelöst durch die Objektivierung), sondern im wesentlichen bedingt durch antemortale/agonale (Energiebestand der Muskulatur) und postmortale Einflüsse (Temperaturbedingungen der Leichenlagerung): bei quasi gleichzeitigem Untersuchungsbeginn zeigen verschiedene Fälle ganz unterschiedliche Ausgangswerte der Reizschwelle und ganz unterschiedliche Anstiegssteilheiten der Reizschwelle. Dieser Befund ist unseres Erachtens mit den inneren (Energiebestand) und äußeren (Temperatur) Einflußfaktoren auf die postmortale Degeneration der Skelettmuskulatur zu erklären. Der theoretisch begründete Versuch Joachims, diese Einflußfaktoren auf die Geschwindigkeit der postmortalen Degeneration des Skelettmuskels durch Messung der individuellen Anstiegssteilheit der Rheobase zu erfassen, kann am eigenen Material nicht bestätigt werden: die Extrapolation der Todeszeit mit einer individuellen Anstiegssteilheit führt zu größeren Abweichungen zwischen berechneter und realer Todeszeit als die Extrapolation mit einer mittleren Steilheit (Tabelle 4 und 5, Abb. 4). Hierfür sind folgende Gründe zu diskutieren: Die Steigung sagt bei Berechnung aus lediglich vier Meßwerten in einem definierten und am Leichenfundort nicht näher eingrenzbaeren postmortalen Zeitbereich zunächst nichts über die Steigung der gesamten Regressionsgeraden aus. Je nachdem, welche konsekutiven Meßwerte eines Falles in einem bestimmten Zeitbereich Grundlage der Regressionsberechnung werden, können sich ganz unterschiedliche Steilheiten ergeben (Tabelle 7).

Ein zweiter Grund ist, daß in unterschiedlichen postmortalen Zeitbereichen verschiedene Fälle quasi gleiche Ausgangswerte und Steilheiten des Anstiegs der galvanischen Reizschwelle aufweisen können (Abb. 6).

Eine individuelle Steilheit könnte nur dann zu einer genaueren Todeszeitberechnung führen, wenn auch das individuelle Intercept bekannt wäre. Das individuelle Intercept ist bei unbekannter Todeszeit jedoch unbekannt und weist offensichtlich eine erhebliche interindividuelle Variabilität auf. Auch in experimentellen Untersuchungen bleibt das Intercept eine berechnete³ und keine gemessene Größe, welche von der realen Todeszeit und der individuellen Steilheit determiniert wird.

In den eigenen Untersuchungen wird dieses Problem dadurch gemildert, daß generell mit einer mittleren Anstiegssteilheit auf die Todeszeit rückextrapoliert wird. Dieses Vorgehen führt am eigenen Material zwar zu einer insgesamt höheren Präzision der Todeszeitschätzung als die Extrapolation mit einer individuellen Anstiegssteilheit, jedoch ergibt sich auch eine gewisse Systematik der Fehlerabweichungen: Fälle mit frühem Untersuchungsbeginn und früh erloschener Erregbarkeit werden bezüglich der Todeszeit eher überschätzt, Fälle mit relativ spätem Untersuchungsbeginn und längerer Zeitdauer elektrischer Erregbarkeit werden eher unterschätzt. Im Gültigkeitsbereich der Methode (bis 10 hpm) ist die Todeszeitschätzung jedoch innerhalb der angegebenen Toleranzgrenzen zu-

³ Aufgrund der methodisch immanenten und praktisch nicht zu schließenden Lücke eines „beobachtungsfreien Intervalls“ von etwa 2 bis 3 Stunden zwischen Todeseintritt und Untersuchungsbeginn

Tabelle 7. Abhängigkeit der Anstiegsteilheit von den in die Regressionsanalyse einbezogenen Wertepaaren. a = Anstiegssteilheit für alle Wertepaare, b = für die ersten 4, c = für die folgenden 4 Wertepaare aus der Regression zwischen \ln der Reizschwelle und Zeit

Fall 7		Regression für n Meßpunkte	b
Thenar rechts	a	12	0,011
	b	erste 4 Meßpunkte	0,007
	c	folgende 4 Meßpunkte	0,014
Thenar links	a	10	0,0102
	b	erste 4 Meßpunkte	0,007
	c	folgende 4 Meßpunkte	0,016

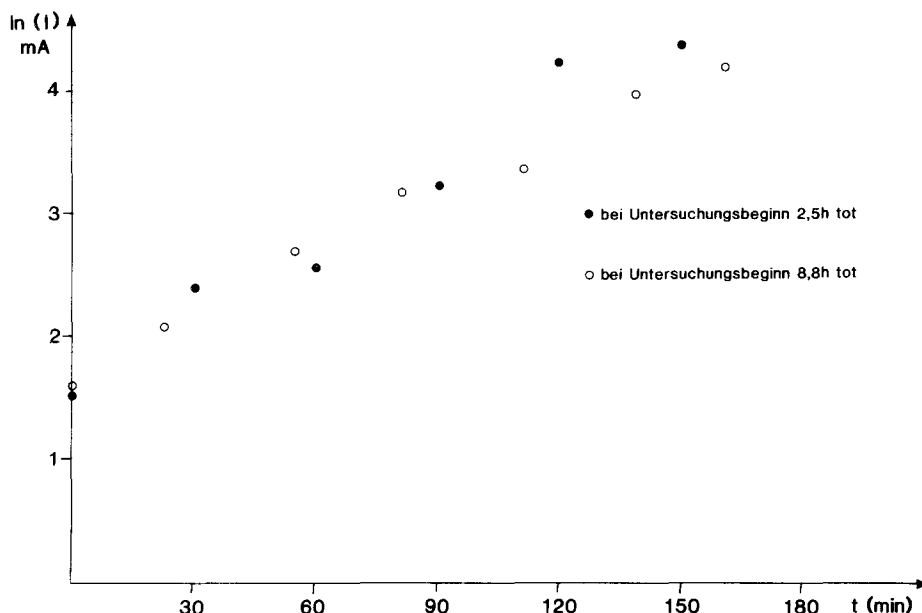


Abb. 6. Anstieg des \ln der galvanischen Reizschwelle über der Untersuchungszeit für 2 Fälle. Bei um mehr als 6 Stunden differierender Todeszeit fast gleicher Ausgangswert der Rheobase bei Untersuchungsbeginn und gleiche Anstiegscharakteristik

verlässig (Abb. 5). Es ist jedoch zu vermuten, daß bei Fällen, die im Zeitbereich von 12 bis 15 hpm noch einen Anstieg der galvanischen Reizschwelle aufweisen, die reale Todeszeit außerhalb der Toleranzgrenzen der extrapolierten Todeszeit liegen kann. Bislang sind diese Fälle an keinem Kriterium sicher erkennbar.

Aus dieser Diskussion wird deutlich, daß eine wesentliche Präzisierung der Todeszeitschätzung nur durch Berücksichtigung der Einflußfaktoren auf Ausgangswert (erste gemessene Rheobase) und Anstiegssteilheit der galvanischen Reizschwelle zu erzielen sein wird. Zudem ist die der Extrapolation zugrunde-

liegende primäre postmortale Reizschwelle selbst abhängig von diesen Einflußfaktoren (z. B. Temperatur). Hier liegt die Hauptaufgabenstellung für künftige Untersuchungen.

Dem Einwand, daß durch unsere invasive Untersuchungstechnik (Reizelektroden, Kraftaufnehmer) eine Traumatisierung des Muskels erfolgt und „die Geschwindigkeit der muskulären Degeneration durch den präparatorischen Eingriff beschleunigt“ wird (Joachim 1988), sind Ergebnisse von Lunkenheimer et al. (1982, 1985) entgegenzuhalten, daß zwar die innersten, dem Kraftaufnehmer anliegenden Muskelschichten bei histologischer Untersuchung eine Koagulationsnekrose aufweisen, dies jedoch zu keinen relevanten Einflüssen auf die Meßwerte führt, da ohnehin den weiter außen anliegenden Fasern nach Maß ihres Krümmungsradius der wesentliche Anteil am registrierten Meßsignal zukommt. Im Ergebnis dieser (vitalen) tierexperimentellen Befunde Lunkenheimers und den eigenen Untersuchungen am Leichenmuskel (Madea 1989) wird in der Verwendung miniaturisierter Kraftaufnehmer keine nennenswerte Beeinflussung der registrierten Kraftwerte durch die Implantation gesehen. Dementsprechend findet sich auch bei den eigenen Untersuchungen keine systematisch geringere Zeitdauer elektrischer Reagibilität gegenüber den Befunden Joachims bzw. anderer Untersucher mit nicht invasiver Untersuchungstechnik. Diese empirischen Befunde sind in gleicher Weise auf den immer wieder behaupteten Vorzug von Oberflächenelektroden gegenüber Einstichelektroden (Forster 1986; Joachim 1988) zu übertragen.

Schlußfolgerungen

Bei grundsätzlicher Bestätigung des von Joachim beschriebenen linearen Zusammenhangs zwischen \ln der galvanischen Reizschwelle und Todeszeit führt die Extrapolation der Todeszeit von einem einzelnen Reizschwellenwert mit einem kollektiven Mittelwert für die Anstiegssteilheit zu einer präziseren Todeszeitschätzung als die Extrapolation mit einer individuellen Anstiegssteilheit auf der Basis von vier im Abstand von je 30 Min ermittelten Reizschwellenwerten, wie von Joachim empfohlen. Damit wird das Verfahren arbeitsökonomisch wesentlich vereinfacht.

Die erzielte Präzision der Todeszeitschätzung ist mit $\pm 3,3$ Std nur geringfügig höher gegenüber der subjektiven Prüfung der elektrischen Erregbarkeit (Klein und Klein 1978; siehe auch Madea 1989; Madea und Henßge 1989, 1990), die einen wesentlich geringeren Untersuchungsaufwand erfordern. Die Präzision der Todeszeitschätzung aufgrund des Kriteriums Anstieg der galvanischen Reizschwelle ist jedoch geringer gegenüber anderen Kriterien der objektivierten skelettmuskulären Reaktion (Madea 1989, 1990; Madea und Henßge 1989), die den gleichen apparativen Aufwand erfordern.

Entgegen der Argumentation Joachims (1988), daß der Vorteil seines Verfahrens der regressionsanalytischen Berechnung der Todeszeit auf der Basis von vier im 30-Min-Intervall ermittelten Reizschwellenwerten in der Unabhängigkeit von Todesart, Umgebungstemperatur und anderer individueller Variablen bestehe, ist festzustellen, daß bereits der Ausgangswert der Rheobase bei Todesseintritt (primäre galvanische Reizschwelle) von diesen Einflußfaktoren abhängig ist.

Der theoretisch begründete Versuch, durch Messung der individuellen Anstiegscharakteristik der Rheobase die Einflüsse von Temperatur und Energiebestand des Muskels auf die postmortale Muskeldegeneration ohne Messung – sozusagen implizit – quantitativ für die Todeszeitaussage miterfaßt zu haben, kann im Ergebnis der eigenen Untersuchungen nicht bestätigt werden.

Zur Erhöhung der Präzision der Todeszeitschätzung sind daher Untersuchungen zur Abhängigkeit des Ausgangswertes der Rheobase bei Todeseintritt und der Anstiegscharakteristik der Rheobase von Temperatur und Glykogenkonzentration der Muskulatur anzustreben.

Literatur

- Forster B (1986) Thanatologie. In: Forster B (Hrsg) Praxis der Rechtsmedizin. Thieme, Stuttgart, S 2–46
- Frey M v (1907) Allgemeine Physiologie der quergestreiften Muskeln. In: Nagel W (Hrsg) Handbuch der Physiologie des Menschen, 4. Band, 2. Hälfte, 1. Teil. Vieweg, Braunschweig, S 427–543
- Harris R (1971) Chronaxy. In: Licht S (eds) Electrodiagnosis and electromyography. Waverly Press, Baltimore
- Henßge C (1979) Die Präzision von Todeszeitschätzungen durch die mathematische Beschreibung der rektalen Leichenabkühlung. Z Rechtsmed 83: 49–67
- Henßge C (1982) Methoden zur Bestimmung der Todeszeit – Leichenabkühlung und Todeszeitbestimmung. Diss. B, Humboldt-Universität, Berlin
- Joachim H (1976) Probleme der frühen Todeszeitbestimmung und die sogenannten supravitalen Reaktionen des Muskels im Tierversuch. Habil.-Schrift, Freiburg
- Joachim H (1988) Mechanische und elektrische Erregbarkeit der Skelettmuskulatur. In: Henßge C, Madea B: Methoden zur Bestimmung der Todeszeit an Leichen. Schmidt-Römhild, Lübeck, S 32–82
- Joachim H, Feldmann U (1980) Eine quantitative Methode der Todeszeitbestimmung durch Untersuchung der galvanischen Reizschwelle. Z Rechtsmed 85: 5–22
- Klein A, Klein S (1978) Die Todeszeitbestimmung am menschlichen Auge. Diss. Med. B, Dresden
- Krause D, Klein A, Zett L (1976) Todeszeitbestimmung mittels indirekter Muskelreizung über den N. ischiadicus und N. radialis. Kriminal Forensic Wiss 26: 66–67
- Landois L (1905) Lehrbuch der Physiologie des Menschen. In: Rosemann R (Hrsg) 11. Aufl. Urban und Schwarzenberg, Berlin Wien
- Lunkenheimer PP, Lunkenheimer A, Stroh N, Köhler F, Welham K, Graham G, Kirk E, Sonnenblick E, Kröller J (1982) Vergleich klassischer und neue Zugänge zum intramyokardialen Kraftverteilungsmuster. Zentralbl Vet Med A 29: 557–601
- Lunkenheimer PP, Lunkenheimer A, Torrent-Guasp F (1985) Kardiodynamik: Wege zur strukturgerechten Analyse der Myokardfunktion. Beiträge zur Kardiologie, Band 33. Perimed Fachbuchverlagsgesellschaft, Erlangen
- Madea B (1989) Supravitale elektrische Erregbarkeit der Skelettmuskulatur – Längsschnittuntersuchungen zur Objektivierung der muskulären Reaktion an 70 Leichen. Habil.-Schrift, Köln
- Madea B (1990) Zu den todeszeitinformativen Parametern der supravitalen Muskelkontraktion – Präzision der Todeszeitschätzung. Beitr Gerichtl Med (im Druck)
- Madea B, Henßge C (1989) Praktischer Stellenwert der supravitalen elektrischen Erregbarkeit bei der Todeszeitbestimmung. Festschrift Professor Pribilla. Schmidt-Römhild (im Druck)
- Madea B, Henßge C (1989) Objektivierung und Quantifizierung der supravitalen Muskelkontraktion auf elektrische Reizung. Beitr Gerichtl Med 47: 43–53
- Madea B, Henßge C (1990) Praktischer Stellenwert der supravitalen elektrischen Erregbarkeit bei der Todeszeitbestimmung – Zweite Mitteilung. Beitr Gerichtl Med (im Druck)
- Marshall TK, Hoare FD (1962) Estimating the time of death. The rectal cooling after death and its mathematical expression. J Forensic Sci 7: 56–81

- Ramme H, Staak M (1983) Vergleichende Untersuchungen zur Methodik der Todeszeitschätzung. *Beitr Gerichtl Med* 41:365–369
- Ravache-Quiriny J (1982) The time of death: some thoughts on the thrustworthiness of our response. *Int Actad Leg Med Soc Med, Newsletter no. 1*, 9–11, Liège
- Ravache-Quiriny J (1986) Les moments de la mort. *Cahiers de Médecine légale, Droits médicaux no. 3*, Association Lyonnaise Médecine légale. Editions Alexandre Lacassagne, Lyon
- Sliwka K (1984) Beurteilung der postmortalen elektrischen Erregbarkeit des Skelettmuskels an Ratten; ihre Bedeutung für die Todeszeitbestimmung. *Habil.-Schrift, Danzig* (1984 = polnisch). Deutsche Zusammenfassung als persönlich zugesandtes Manuskript 1988
- Sliwka K, Bloch E (1988) The application of the postmortem incitement of the nervous muscle specimen for the setting of the time since death. *Medycyna Sadowa i Kryminologica* 1:313–322