

Originalarbeiten / Original Works

Todeszeitbestimmung durch Messung der zentralen Hirntemperatur*

C. Henßge¹, E.-R. Beckmann², F. Wischhusen² und B. Brinkmann¹

¹ Institut für Rechtsmedizin der Universität Münster, von-Esmarch-Straße 86, D-4400 Münster,
Bundesrepublik Deutschland

² Institut für Rechtsmedizin der Universität Hamburg, Butenfeld 34, D-2000 Hamburg 54,
Bundesrepublik Deutschland

Determination of Time of Death by Measuring Central Brain Temperature

Summary. The central brain temperature was recorded in 53 human corpses, stored at constant ambient temperatures between 10° and 30°C. The measurements were started on average 1.6h post mortem and continued for 8–50h. The sigmoidal shape of the temperature curves fitted the mathematical model of Marshall and Hoare (1962). This model provides a precise description of the temperature curves. For 44 corpses, studied at temperatures between 10° and 25°C, the time of death was calculated using fixed values for the adaptation parameters of the model. The margins of error for the 95% tolerance limit were ± 1.5 h up to 6.5 h post mortem, ± 2.5 h between 6.5 and 10.5 h post mortem and ± 3.5 h between 10.5 and 13.5 h post mortem. For the recommended practical application a “brain temperature–time of death” nomogram is presented. We found that the rate of cooling was influenced by the amount of hair. Furthermore, it has been argued that the study method could be improved further. In consequence, we expect the central brain temperature to be even more accurate in the calculation of the time of death than has been discussed and shown on the basis of the present material.

Key words: Computation of time of death, brain cooling – Brain temperature-time of death nomogram

Zusammenfassung. Von 53 in relativ konstanter Umgebungstemperatur zwischen 10° und 30°C gelagerten Leichen wurde die Temperatur im Zentrum des Gehirns registriert. Die Messungen wurden im Mittel 1,6h post mortem begonnen. Die Meßdauer betrug zwischen 8 und 50 Stunden. Die sigmoidalen Abkühlkurven wurden mit dem von Marshall und Hoare (1962) angegebenen Modell mathematisch beschrieben. Das Modell ist für eine präzise Beschreibung der Abkühlkurven geeignet. Für die 44 Untersuchungen im

* Herrn Prof. Dr. O. Grüner zum 65. Geburtstag gewidmet
Sonderdruckanfragen an: Prof. Dr. B. Brinkmann (Adresse siehe oben)

Umgebungstemperaturbereich zwischen 10° und 25°C ergaben sich bei Verwendung von Festwerten für die Anpaßparameter des Modells berechnete Todeszeiten, die innerhalb der 95%-Toleranzgrenzen von ±1,5 h bis 6,5 h post mortem bzw. von ±2,5 h zwischen 6,5 und 10,5 h post mortem bzw. von ±3,5 h zwischen 10,5 und 13,5 h post mortem lagen. Für die empfohlene praktische Anwendung der Teilmethode zur Todeszeitbestimmung wird ein Hirntemperatur-Todeszeit-Nomogramm vorgelegt. Aus dem Nachweis des Einflusses der Behaarungskriterien auf die Abkühlungsgeschwindigkeit und aus Argumenten zur Verbesserung der Untersuchungsmethodik wird die Erwartung abgeleitet, daß die zentrale Hirntemperatur geeignet sein sollte, Todeszeiten innerhalb engerer Toleranzgrenzen berechnen zu können, als es am vorliegenden Material nachweisbar war.

Schlüsselwörter: Todeszeitberechnung, Abkühlung des Gehirns – Hirntemperatur-Todeszeit-Nomogramm

Verwendete Symbole und ihre Bedeutung

T	zentrale Hirntemperatur (°C) als Funktion der Zeit
t	Todeszeit in Stunden (dezimal) post mortem
t_r	reale Todeszeit
t_b	berechnete Todeszeit
dt	Abweichung zwischen berechneter und realer Todeszeit $dt = (t_b - t_r)$
t_{exp}^a	Zeit seit Todeseintritt bei Meßbeginn
t_{exp}^e	Zeit seit Todeseintritt bei Meßende
T_U	Umgebungstemperatur (°C)
T_0	zentrale Hirntemperatur (°C) bei Todeseintritt
Q	normierte Temperatur als Funktion der Zeit $Q = (T - T_U) / (T_0 - T_U)$
T_{exp}^a	zentrale Hirntemperatur bei Meßbeginn
A, B	Anpaßparameter des Zwei-Exponenten-Modells
b_{yx}	Anstieg der Regressionsgeraden t (Abszisse) gegen $\ln(T - T_U)$ (Ordinate)
a_{yx}	Intercept, Ordinatenabschnitt der Regressionsgeraden
N	Anzahl der Leichen
n	Anzahl der Meßwerte
95%	95%-Toleranzgrenzen
Var.	Variationsbreite
\ln	natürlicher Logarithmus
Nr.	Fallbezeichnung
h	Stunde(n)
pm	post mortem

In zwei vorangehenden Untersuchungen (Brinkmann et al. 1976, 1978) wurde eine praktisch verletzungsfreie Untersuchungsmethode der postmortalen Hirntemperaturmessung angegeben und deren Eignung zur forensischen Todeszeitbestimmung prinzipiell nachgewiesen. Folgende Feststellungen konnten getroffen werden: Die Temperaturabfallkurve ist, ebenso wie jene im Zentrum des Rumpfes (Leber, Rektum, Radix mesostenii), von sigmoidaler Gestalt. Im Vergleich zur Temperaturabfallkurve im Zentrum des Rumpfes ist die Steilheit über

die Zeit wesentlich größer, die Dauer des postmortalen Temperaturplateaus wesentlich kürzer und konstanter. Die interindividuelle Variabilität potentieller leichenbezogener Einflußfaktoren der Abkühlgeschwindigkeit (Schädelmaße, thermischer Kontakt mit der Umgebung) ist geringer. In Übereinstimmung mit diesen Feststellungen wurde eine geringere Streuung bei gleichen Abkühlungsbedingungen nachgewiesen. Danach ist zu erwarten, daß durch Messung der zentralen Hirntemperatur innerhalb der ersten Stunde post mortem eine präzisere Todeszeitbestimmung möglich sein wird.

Die vorliegende Untersuchung an einem erweiterten Datenmaterial hat die mathematische Verallgemeinerung der Temperaturabfallkurve im Zentrum des Gehirns und ihre praxisorientierte Umsetzung in eine Teilmethode zur Todeszeitbestimmung zur Aufgabe. Aufgrund der sigmoidalen Kurvenform auch des zentralen Hirntemperaturabfalls bot sich dafür ein prinzipiell gleichartiges analytisches Vorgehen an, wie es zuerst von Marshall und Hoare (1962), später von Brown und Marshall (1974) sowie Henßge (1979, 1981, 1982) für die Todeszeitbestimmung aus der Rektaltemperatur angewendet wurde.

Material und Methodik

Material

Das aus insgesamt 53 ausgewerteten Fällen bestehende Leichenkollektiv setzt sich aus Daten von 15 in Berlin erarbeiteten und 13 in Hamburg untersuchten Fällen sowie aus den Daten von 25 Leichen einer vorangegangenen Untersuchung von Brinkmann et al. (1978) zusammen. Es handelt sich um plötzliche Todesfälle, deren Todeszeitpunkt bekannt war. Das Lebensalter variierte zwischen 22 und 87 Jahren, etwa 20% waren weiblichen Geschlechts. Der Zeitraum zwischen Todeseintritt und Meßbeginn betrug im Mittel 1,6 h (0,83 bis 2,75 h), die Meßdauer lag zwischen 8 und 50 h. Die teilweise veränderlichen thermischen Einflüsse während der verschiedenen Transportphasen wurden nicht genau eruiert und müssen als systematische Fehlerquelle dieser Untersuchungsreihe angesehen werden. Bei einem Teil der Fälle wurde die Todesursache durch anschließende Sektion festgestellt. Als individuelle Einflußgrößen wurden Hirnmasse, Hirnvolumen, Kopfmaße und „Behaarungszahl“ bestimmt. Die „Behaarungszahl“ wurde nach einem Haartableau durch Addition der willkürlich festgelegten Maßzahlen für Wuchsform, Wuchsdichte und Wuchslänge festgelegt (Tabelle 1). Die „Behaarungszahl“ bedeckt damit einen Bereich von 0 bis 6 für „unbehaart“ bis „normale, dichte und lange“ Behaarung.

Meßmethodik

Die Temperaturmeßtechnik, Angaben zur Leichenlagerung, die Applikation der Meßsonden in das „Hirnzentrum“ und weitere Einzelheiten der Untersuchungsmethodik sind in vorgehenden Arbeiten eingehend dargestellt worden (Brinkmann et al. 1976, 1978; Henßge 1979).

Thermoelemente mit steifer (jedoch verbiegbarer) Ummantelung (Außendurchmesser 0,5 bzw. 1 mm).

Tabelle 1. Haartableau, modifiziert nach Brinkmann et al. (1976)

Wuchsform	Wuchsdichte	Wuchslänge
Normal (2)	Dicht (2)	Lang (2)
Stirnglatze (1)	Mittel (1)	Mittel (1)
Vollglatze (0)	Schütter (0)	Kurz (0)

Registrierung der Thermospannungen mit 6-Kanal-y-t-Schreiber. Einführen der Meßsonden im oberen medialen Anteil der Fissura orbitalis superior. Einführungstiefe in sagittaler Richtung entsprechend etwa der halben größten Kopflänge.

Leichenlagerung in relativ konstanter Umgebungstemperatur (10 ... 30°C) im Gang des Kühlzellenkellers des Berliner Institutes (100m³) bzw. in einer thermostatischen Klimakammer von 2m³ Rauminhalt (Hamburg). Gestreckte Rückenlage der Leichen auf Holz (Hamburg) bzw. deckenbelegter Metalltrage (Berlin).

Bei 4 Leichen wurden Temperatursonden bilateral angelegt, um einen Anhaltspunkt über die Ortsabhängigkeit der Temperatur bei vermeintlich gleicher Positionierung der Meßsonden zu erhalten.

Mathematisches Modell

Für die analytische Darstellung des sigmoidalen Temperaturverlaufs postmortaler Organtemperaturen sind verschiedene mathematische Funktionen vorgeschlagen worden. Als praktikables Modell hat sich das Zwei-Exponenten-Modell von Marshall und Hoare (1962) bewährt. Für diesen analytischen Ausdruck sind inzwischen verschiedene Schreibweisen angegeben worden. Wir benutzten die von Brown und Marshall (1974) publizierte Form.

Als Beschreibung für die reale Temperatur als Funktion der Zeit kann eine Reihenentwicklung in e-Funktionsterme gewählt werden:

$$T = \sum_i a_i \cdot (\exp(b_i \cdot t)). \quad (1)$$

Da die Terme höherer Ordnung rasch an Einfluß verlieren (s. Brown und Marshall 1974), erscheint die Beschränkung auf nur zwei Terme vertretbar. Damit reduziert sich die Funktion (1) auf:

$$T = a_1 \cdot \exp(b_1 \cdot t) + a_2 \cdot \exp(b_2 \cdot t). \quad (2)$$

Die Zahl der unabhängigen Variablen läßt sich durch zwei Nebenbedingungen für die spezielle Anwendung auf zwei verkleinern:

a) Die Temperatur wird als relativer Temperaturabfall zwischen ‚Start‘- und Umgebungs-temperatur angegeben und wird auf das Intervall ‚1‘ normiert, d.h., die linke Seite von Gleichung (2) bekommt die Form:

$$(T - T_U)/(T_0 - T_U) = Q. \quad (3)$$

Diese Bedingung fordert jeweils einen konstanten Wert der ‚Start‘- und der Umgebungs-temperatur für den Gültigkeitsbereich der Gleichung.

Aus der Normierung auf ‚1‘ zum Zeitpunkt des Todes ($t = 0$) folgt die Elimination der Variablen a_2 :

$$Q = 1 \rightarrow 1 = a_1 + a_2 \rightarrow a_2 = 1 - a_1. \quad (4)$$

b) Die Steigung der Kurve zum Todeszeitpunkt ($t = 0$) soll gleich ‚0‘ sein (waagerechte Tangente im Ursprung), d.h., die Ableitung der Funktion zum Zeitpunkt ‚0‘ soll gleich Null sein:

$$\frac{dQ}{dt} \Big|_0 = 0 \rightarrow 0 = a_1 \cdot b_1 + a_2 \cdot b_2 \rightarrow b_2 = -(a_1 \cdot b_1)/a_2$$

und mit der 1. Nebenbedingung:

$$b_2 = (a_1 \cdot b_1)/(a_1 - 1). \quad (5)$$

Damit folgt aus Formel (2) mit Definition (3) und den Nebenbedingungen (4) und (5) nach Umbenennung der Variablen a_1 in A und b_1 in B folgende Formel:

$$Q = (T - T_U) / (T_0 - T_U) = A \cdot \exp(B \cdot t) + (1 - A) \cdot \exp\left(\frac{A \cdot B}{A - 1} \cdot t\right). \quad (6)$$

Durch diese relativierte Form der Darstellung ergibt sich eine gute Vergleichbarkeit von Kurven aus unterschiedlichen Bedingungen. Der 2. Exponentialterm trägt dabei zur initialen Plateauphase bei und verliert zu späterer Zeit an Einfluß, während der 1. Term den rein exponentiellen Temperaturabfall in der späteren Phase beschreibt.

Aufbereitung der primären Meßdaten

Die primären Registrierkurven wurden von Hand in halbstündigen Abständen digitalisiert. Die Wertepaare für t (Abszisse) und $\ln(T - T_U)$ (Ordinate) wurden graphisch aufgetragen (Abb. 1). Aus den Wertepaaren des linear erscheinenden Bereichs der Auftragung wurde eine lineare Regression erster Art berechnet. Der Anstieg der Geraden (Regressionskoeffizient b_{yx}) ist identisch zum Anpaßparameter B (Henßge 1979). Der Ordinatenabschnitt (Intercept) a_{yx} der Regression wird zur Berechnung des Anpaßparameters A verwendet:

$$A = \frac{\exp(a_{yx})}{T_0 - T_U} \quad (7)$$

Berechnung der Todeszeit

Die Berechnung der Todeszeit erfolgte nach Formel (6) längstens bis zur 30. h der realen Todeszeit. Von jeder realen Todeszeitstunde wurde jeweils nur ein Hirntemperaturwert zur Todeszeitberechnung verwendet und zwar derjenige, der am dichtesten an einer vollen realen Todeszeitstunde lag. Da Formel (6) nicht nach t aufzulösen ist, wurde t durch numerische Iteration in 0,1 Stundenschritten als Näherung berechnet. Die Berechnungen wurden mit einem Computer durchgeführt.

Abweichungen zwischen berechneten und realen Todeszeiten, statistische Behandlung

Die Differenz „berechnete – reale Todeszeit“ ergibt die Abweichung der berechneten Todeszeit von der realen; negatives Vorzeichen bedeutet somit eine Unterschätzung der realen Todeszeit durch die Todeszeitberechnung, positives Vorzeichen eine Überschätzung. Entsprechend der o. g. Modalitäten bei der Berechnung der Todeszeiten am vorliegenden Datenmaterial wurde von jedem Fall innerhalb einer laufenden Stunde der realen Todeszeit jeweils auch nur eine Abweichung ermittelt. Die Abweichungen der aufeinanderfolgenden realen Todeszeitstunden eines Falles sind im mathematisch-statistischen Sinne keine voneinander unabhängigen Größen.

Hingegen sind die Abweichungen verschiedener Fälle innerhalb der einzelnen realen Todeszeitstunden voneinander unabhängige Größen. Im Interesse einer besseren Übersicht wurden die Einzelabweichungen auch aufeinander-

folgender Todeszeitstunden dann zusammengefaßt, wenn die statistischen Maßzahlen (Mittelwerte, Standardabweichungen) untereinander homogen waren, als handele es sich um voneinander unabhängige Größen.

Unter dem Gesichtspunkt einer allgemeinen Darstellung der Fehlerbreite ist es zweckmäßiger, die Abweichungen zwischen berechneten und realen Todeszeiten nicht über der realen Todeszeit, sondern über der normierten Temperatur $Q = (T - T_U)/(T_0 - T_U)$ darzustellen. Diese normierte Temperatur erklärt die bei Todeseintritt gegebene Differenztemperatur zwischen Hirnzentrum und Umgebung zu „1“ und den vollständigen Temperaturaustausch zwischen Hirnzentrum und Umgebung zu „0“. Alle nachfolgenden Darstellungen von Abweichungen zwischen berechneten und realen Todeszeiten erfolgen deshalb mit Bezug auf die normierte Temperatur. Zur Orientierung des Lesers werden in Tabelle 8 die mittleren Todeszeiten an der unteren Klassengrenze der jeweils zusammengefaßten Bereiche der normierten Temperatur angegeben. Für die praktische Anwendung des Verfahrens spielt diese Betrachtung keine Rolle. Im am Ende der Arbeit angegebenen Nomogramm können die jeweils zutreffenden Toleranzbereiche direkt abgelesen werden.

Ergebnisse

Zur Linearität des Zusammenhangs zwischen $\ln(\text{Differenztemperatur (Hirnzentrum – Umgebung)})$ und Zeit

Abgesehen vom postmortalen Temperaturplateau am Anfang und im Bereich geringer Differenztemperaturen am Ende der Abkühlkurven, wiesen 49 der 53 vorliegenden Abkühlkurven einen sehr straffen linearen Zusammenhang zwischen $\ln(\text{Differenztemperatur})$ und Zeit auf (Korrelationskoeffizient $> 0,9$). Bei 4 Fällen bestand keine Linearität. Es handelt sich dabei um Untersuchungen, die bei einer Klimakammertemperatur um 30°C gewonnen wurden; die Um-

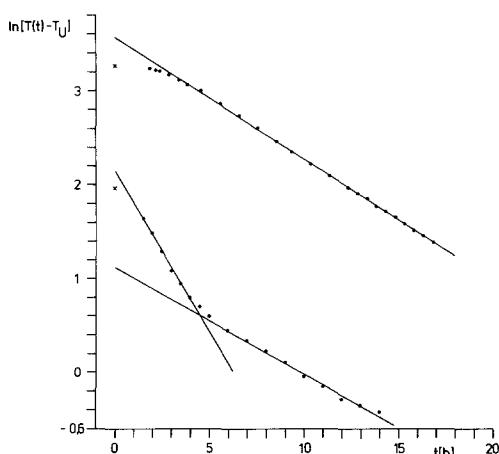


Abb. 1. Zwei Kurvenbeispiele für den Zusammenhang von $\ln(\text{Differenztemperatur (Hirnzentrum – Umgebung)})$ und Zeit. Punkte: Meßwerte. Kreuze bei $t = 0$: $\ln(37,2 - \text{Klimakammertemperatur})$. Obere Kurve: Klimakammertemperatur 10°C . Temperatur vor Meßbeginn $23,5^\circ\text{C}$ für 1,75 h. Regressionsgerade aus Meßwerten zwischen 2,8 und 19,3 hpm: $\ln(\text{Differenztemperatur}) = 3,56 - 0,129 t$. Untere Kurve: Klimakammertemperatur $29,2^\circ\text{C}$. Temperatur vor Meßbeginn 10°C für 1,5 h. Regressionsgerade aus Meßwerten zwischen 1,5 und 4 hpm: $\ln(\text{Differenztemperatur}) = 2,15 - 0,345 t$. Regressionsgerade aus Meßwerten zwischen 6 und 14 hpm: $\ln(\text{Differenztemperatur}) = 1,12 - 0,114 t$ (weiteres s. Text)

gebungstemperatur bei Todeseintritt und während des Leichentransports bis zum Untersuchungsbeginn lag um 10°C. Es ist anzunehmen, daß die Nichtlinearität bei diesen 4 Kurven auf den sehr großen Unterschied der Umgebungstemperaturen vor und während der Untersuchung zurückzuführen ist. Eine der 4 Kurven ist in Abb. 1 dargestellt. Die anfänglich ungewöhnlich große Steilheit der Abkühlung wird als Nachwirkung der Lagerungstemperatur von 10°C vor Meßbeginn betrachtet. Etwa 3 h nach Meßbeginn (4,5 hpm) wird eine Steilheit erreicht, die im Steilheitsbereich der übrigen Kurven liegt. Die Nichtlinearität der o. g. 4 Kurven wird deshalb als Artefakt interpretiert („präanalytischer“ Fehler; vgl. Diskussion). Als präanalytischen Fehler in umgekehrter Richtung interpretieren wir auch ein (scheinbar) verlängertes postmortales Temperaturplateau bei einigen Fällen, bei denen die Leichen vor Meßbeginn in hoher (z. B. 23,5°C) und mit Meßbeginn in niedriger (10°C) Umgebungstemperatur gelagert waren. Ein derartiges Beispiel ist ebenfalls in Abb. 1 dargestellt.

Die individuellen Werte des Anpaßparameters B

Bei den Untersuchungen im Umgebungstemperaturbereich 10 bis 25°C (während der Messung) wurden am vorliegenden Material von 44 Leichen Werte zwischen –0,094 und –0,173 ermittelt. Der Mittelwert lag bei –0,128, die Standardabweichung betrug $\pm 0,02$. Im mittleren Umgebungstemperaturbereich zwischen 10 und 20,5°C lag das Mittel bei –0,127, die Standardabweichung bei $\pm 0,02$.

Die individuellen Werte des Anpaßparameters A

Eine Ermittlung wirklich individueller Werte für A war nicht möglich, weil zur Berechnung dieses Wertes die individuelle zentrale Hirntemperatur bei Todeseintritt benötigt wird. Diese Größe liegt aber am vorliegenden Untersuchungsmaterial als individuelle Meßgröße nicht vor. Es mußte stattdessen ein Festwert verwendet werden. Er wurde (willkürlich) auf 37,2°C festgelegt. Demzufolge sind die in Tabelle 2 genannten Werte für A keine echten Individualwerte, sondern sie sind eine Mischung aus einem individuellen und einem Festwertanteil. (Eine Bestimmung des tatsächlich individuellen Wertes für A wäre nur möglich, wenn die zentrale Hirntemperatur unmittelbar nach Todeseintritt als Meßwert vorläge.)

Zur Präzision berechneter Todeszeiten bei Verwendung der individuellen Werte für die Anpaßparameter B sowie A bei einem Festwert für T_0 (37,2°C)

Die Ergebnisse (Tabelle 3 und Abb. 2) beinhalten folgende Aussagen: Der zur mathematischen Beschreibung der Hirnabkühlung benutzte analytische Zweienponentenausdruck ergibt am vorliegenden Datenmaterial von 44 Leichen, gewonnen in Umgebungstemperaturen zwischen 10 und 25°C, berechnete Todeszeiten, die bis zu einer normierten Temperatur von $Q = 0,2$ (im Mittel bis zur 13,5. hpm) von den realen Todeszeiten im Mittel um –3 min bei einer Standardabweichung von ± 16 min abweichen. Im Bereich einer normierten Tempera-

Tabelle 2. Daten zum Untersuchungsablauf, „individuelle“ Werte für die Anpaßparameter B und A , Behaarungszahl und Horizontalumfang des Schädelns

Nr.	T_U (°C)	$t_{\text{exp}}^{\text{a}}$ (hpm)	$t_{\text{exp}}^{\text{e}}$ (hpm)	Linearitäts- bereich für Regression von ... bis (hpm)	$B_{\text{indiv.}}$	$A_{\text{indiv.}}$	Behaa- rungs- zahl	Schädel- umfang (cm)
4	30	1,4	8	1,7 ... 6,8	-0,289	1,01	-	-
5	30	1,8	9	2,0 ... 7,4	-0,241	1,01	-	-
6	30	1,2	8	2,2 ... 8,2	-0,192	1,01	-	-
7	30	0,8	8	1,1 ... 7,5	-0,250	1,02	-	-
8	30	1,0	8	1,0 ... 7,0	-0,252	1,01	-	-
68	29,7	1,7	17	1,8 ... 4,0	-0,393	1,07	2	55
67	29,2	1,5	14	1,5 ... 4,0	-0,345	1,07	3	55
69	29	1,0	15	1,0 ... 2,5	-0,474	1,12	3	55
70	29	1,3	15	1,3 ... 3,5	-0,316	1,08	6	52
9	25	2,0	14	3,0 ... 14,0	-0,147	1,11	-	-
10	25	1,0	14	1,0 ... 13,0	-0,131	1,17	-	-
11	25	1,3	16	2,0 ... 16,3	-0,127	1,06	-	-
12	25	1,4	13	1,4 ... 12,4	-0,134	1,11	-	-
13	25	2,0	16	2,0 ... 14,5	-0,161	1,03	-	-
65	20,5	1,8	21	5,2 ... 15,2	-0,134	1,28	2	59
59	20	2,0	26	5,0 ... 16,0	-0,116	1,01	3	57
14	20	1,0	16	2,0 ... 16,0	-0,134	1,04	-	-
15	20	1,1	11	2,3 ... 10,6	-0,123	1,08	-	-
16	20	1,3	11	1,8 ... 9,8	-0,173	1,04	0	-
17	20	1,4	11	2,1 ... 10,9	-0,136	1,04	2	-
18	20	0,9	13	1,4 ... 10,4	-0,161	1,02	2	-
61	19,8	1,9	30	2,2 ... 14,2	-0,109	1,01	2	58
60	19,6	2,3	29	2,8 ... 20,0	-0,102	1,01	5	58
62	19,6	1,6	40	1,9 ... 15,3	-0,138	1,01	5	51
64	19,5	1,0	21	3,0 ... 9,0	-0,128	1,01	5	56
63	18	1,8	28	4,2 ... 12,2	-0,134	1,13	2	54
58	17,8	1,4	25	3,1 ... 12,1	-0,124	1,10	4	54
3	16,9	2,5	20	3,5 ... 14,3	-0,128	1,09	6	57
2	16,7	2,0	37	4,0 ... 13,5	-0,138	1,40	4	55,5
47	16,1	2,5	24	2,5 ... 13,0	-0,170	1,16	1	55
46	16	1,5	20	2,5 ... 10,8	-0,116	1,08	5	57
66	16	1,8	23	3,0 ... 14,0	-0,122	1,07	2	-
48	15,5	2,8	10	3,0 ... 10,3	-0,130	1,10	3	57
19	15	1,7	17	2,7 ... 15,2	-0,162	1,25	3	-
20	15	1,0	17	2,0 ... 14,0	-0,142	1,14	3	-
21	15	1,0	19	2,0 ... 14,0	-0,126	1,01	1	-

Tabelle 2 (Fortsetzung)

Nr.	T_U (°C)	t_{exp}^a (hpm)	t_{exp}^e (hpm)	Linearitäts- bereich für Regression von ... bis (hpm)	$B_{\text{indiv.}}$	$A_{\text{indiv.}}$	Behaa- rungs- zahl	Schädel- umfang (cm)
72	15	0,8	17	1,5 ... 9,3	-0,160	1,11	0	-
71	15	1,3	17	1,8 ... 12,2	-0,128	1,15	3	-
54	14,8	2,0	48	2,0 ... 14,0	-0,101	1,04	6	55,5
1	14,6	2,0	38	2,0 ... 14,0	-0,128	1,09	3	57
49	14,5	2,3	28	3,0 ... 13,0	-0,120	1,27	6	55
55	13,3	2,0	25	2,0 ... 15,0	-0,099	1,09	3	56
53	13,3	2,5	43	3,0 ... 16,0	-0,107	1,02	3	60
57	13	2,0	31	3,0 ... 16,0	-0,111	1,10	4	57
56	13	2,0	50	2,0 ... 14,0	-0,112	1,06	6	52
52	13	1,8	29	2,0 ... 13,0	-0,101	1,01	5	54
50	13	1,5	40	2,0 ... 10,0	-0,094	1,05	6	56
51	12,4	1,5	42	2,5 ... 9,0	-0,117	1,05	2	55
22	10	1,8	19	2,8 ... 19,3	-0,125	1,25	3	-
23	10	0,9	14	2,1 ... 13,9	-0,127	1,16	3	-
24	10	1,9	15	2,5 ... 14,9	-0,104	1,18	3	-
25	10	1,7	15	2,5 ... 14,7	-0,142	1,31	3	-
26	10	1,7	18	3,0 ... 16,2	-0,131	1,31	2	-

Tabelle 3. Statistische Maßzahlen der Abweichungen zwischen berechneten und realen Todeszeiten bei Berechnung der Todeszeiten mit den „individuellen“ Werten für die Anpaßparameter B und A (vgl. Abb. 2)

$Q = \frac{T - T_U}{37,2 - T_U}$	\overline{dt}	S_{dt}	n	$N = 44$
1,0 ≤ Q	-1,00	± 0,0	1	
0,9 ≤ $Q < 1,0$	-0,35	± 0,47	14	0,2 ≤ $Q < 1,0$:
0,8 ≤ $Q < 0,9$	-0,13	± 0,24	29	$n = 510$
0,7 ≤ $Q < 0,8$	-0,04	± 0,23	47	$\overline{dt} = -0,05$; $s = 0,26$
0,6 ≤ $Q < 0,7$	0,02	± 0,22	51	
0,5 ≤ $Q < 0,6$	0,05	± 0,21	65	95% = +0,5 ... -0,7
0,4 ≤ $Q < 0,5$	0,07	± 0,23	74	
0,3 ≤ $Q < 0,4$	0,01	± 0,23	104	Var. = +0,9 ... -1,1
0,2 ≤ $Q < 0,3$	-0,16	± 0,31	126	
0,1 ≤ $Q < 0,2$	-0,78	± 1,45	140	
0,0 ≤ $Q < 0,1$	-0,08	± 2,84	76	

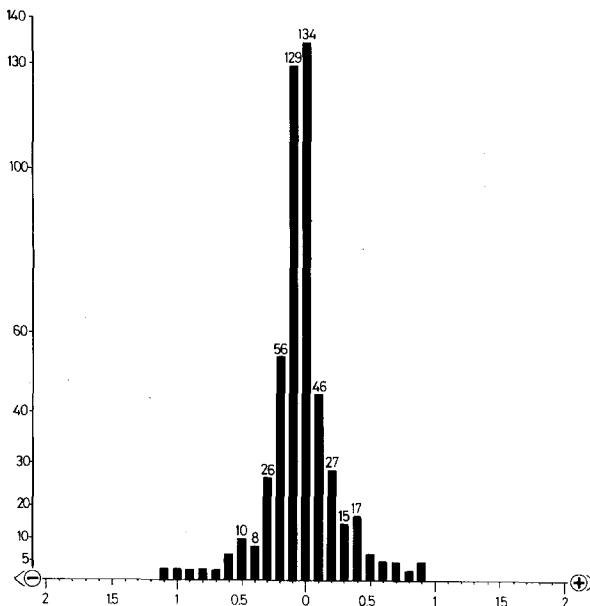


Abb. 2. Verteilung der Einzelabweichungen zwischen berechneter und realer Todeszeit bei Berechnung der Todeszeiten mit den „individuellen“ Werten für die Anpaßparameter B und A im Bereich einer normierten Temperatur $0,2 \leq Q < 1$. Abszisse: dt . Ordinate: n . $N=44$; $n(\text{gesamt})=510$; T_U zwischen 10 und 25°C (vgl. Tabelle 3)

tur $0,1 \leq Q < 0,2$ (jenseits der 13,5. bis zu 19. hpm) betrug die mittlere Abweichung 47 min und die Standardabweichung ± 87 min. Dieses Ergebnis sagt zunächst nur aus, daß der benutzte analytische Ausdruck offenbar geeignet ist, die Abkühlkurve bis zu einer normierten Temperatur von $Q = 0,2$ (im Mittel bis zur 13,5. hpm) hinreichend genau zu beschreiben. Ob eine derartige Präzision auch dann erreicht werden kann, wenn die individuell zutreffenden Werte für die Anpaßparameter B und A nicht aufgrund langfristiger Temperaturmessungen direkt aus dem vorliegenden Kurvenverlauf bestimmt werden können, hängt davon ab, mit welcher Genauigkeit sie auf indirektem Wege ermittelt werden können; die Notwendigkeit dazu ergibt sich aus der praktischen Anwendung mit einmaliger Temperaturmessung.

Zur Präzision berechneter Todeszeiten bei Verwendung von Festwerten für die Anpaßparameter B , A und T_0

Der einfachste Schritt in dieser Richtung ist die Verwendung von Festwerten für B , A und T_0 . Wir verwendeten als Festwerte für $B = -0,127$, für $A = 1,135$ und für $T_0 = 37,2^\circ\text{C}$. Der Festwert für B entspricht dem Mittelwert der vorliegenden Abkühlkurven im Umgebungstemperaturbereich zwischen 10 und 20,5°C. T_0 wurde willkürlich festgelegt. Mit einem Festwert von 1,135 für A wurden empirisch die besten Kurvenanpassungen erreicht. Die damit berechneten Todeszeiten (Tabelle 4 sowie Abb. 3 und 4) erlauben folgende Aussagen: Bei Verwendung der o. g. Festwerte für B , A und T_0 können am vorliegenden Daten-

Tabelle 4. Statistische Maßzahlen der Abweichungen zwischen berechneten und realen Todeszeiten bei Berechnung der Todeszeiten mit Festwerten für B ($-0,127$) und A ($1,135$) (vgl. Abb. 3 und 4)

$Q = \frac{T - T_U}{37,2 - T_U}$	\bar{dt}	S_{dt}	n	$N = 44$
$1,0 \leq Q$	-1,00	$\pm 0,0$	1	
$0,9 \leq Q < 1,0$	-0,44	$\pm 0,68$	14	$0,5 \leq Q < 1,0:$
$0,8 \leq Q < 0,9$	-0,09	$\pm 0,63$	29	$n = 206$
$0,7 \leq Q < 0,8$	0,08	$\pm 0,76$	47	$\bar{dt} = +0,08; S_{dt} = \pm 0,77$
$0,6 \leq Q < 0,7$	0,23	$\pm 0,78$	51	$95\% = +1,6 \dots -1,5$
$0,5 \leq Q < 0,6$	0,14	$\pm 0,86$	65	$\text{Var.} = +2,1 \dots -1,7$
$0,4 \leq Q < 0,5$	-0,01	$\pm 1,02$	74	$0,3 \leq Q < 0,5:$
$0,3 \leq Q < 0,4$	-0,07	$\pm 1,33$	104	$n = 178$
				$\bar{dt} = -0,05; S_{dt} = \pm 1,21$
				$95\% = +2,4 \dots -2,5$
				$\text{Var.} = +2,7 \dots -3,1$
$0,2 \leq Q < 0,3$	-0,24	$\pm 1,59$	126	$95\% = +3,0 \dots -3,5$
				$\text{Var.} = +3,1 \dots -3,6$
$0,1 \leq Q < 0,2$	-0,84	$\pm 2,58$	140	
$0,0 \leq Q < 0,1$	-0,39	$\pm 3,6$	76	

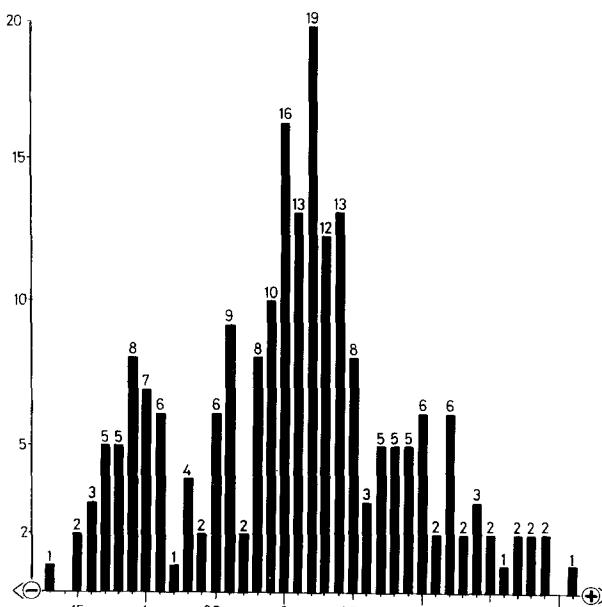


Abb.3. Verteilung der Einzelabweichungen zwischen berechneter und realer Todeszeit bei Berechnung der Todeszeiten mit Festwerten für B ($-0,127$) und A ($1,135$) im Bereich einer normierten Temperatur $0,5 \leq Q < 1$. Abszisse: dt . Ordinate: n . $N = 44$; $n(\text{gesamt}) = 206$; T_U zwischen 10 und 25°C (vgl. Tabelle 4)

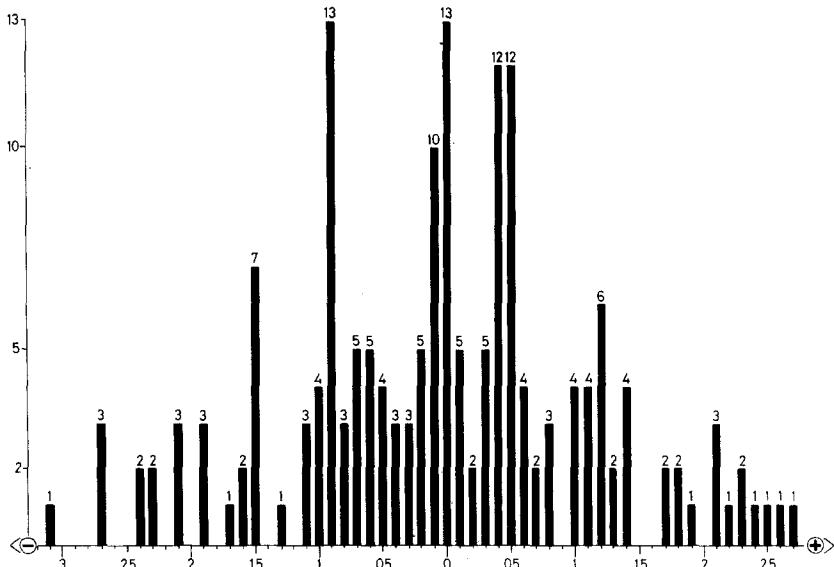


Abb. 4. Verteilung der Einzelabweichungen zwischen berechneter und realer Todeszeit bei Berechnung der Todeszeiten mit Festwerten für B ($-0,127$) und A ($1,135$) im Bereich einer normierten Temperatur $0,3 \leq Q < 0,5$. Abszisse: dt . Ordinate: n . $N = 44$; $n(\text{gesamt}) = 178$; T_U zwischen 10 und 25°C (vgl. Tabelle 4)

material von 44 Leichen, gewonnen in einem Umgebungstemperaturbereich von 10 bis 25°C , Todeszeiten berechnet werden, die von den realen Todeszeiten im Mittel wie folgt abweichen:

- um $+5$ min bei einer Standardabweichung von ± 46 min bis zu einer normierten Temperatur von $Q = 0,5$ (im Mittel bis $6,5$. hpm) bzw.
- um -3 min bei einer Standardabweichung von ± 73 min zwischen normierten Temperaturen $0,3 \leq Q < 0,5$ (jenseits der $6,5$. bis zur $10,5$. hpm) bzw.
- um -14 min bei einer Standardabweichung von ± 95 min zwischen normierten Temperaturen $0,2 \leq Q < 0,3$ (jenseits der $10,5$. bis zur $13,5$. hpm).

Eine Verbesserung dieser Rückrechnungs-Präzision wäre nur möglich, wenn es gelänge, die Festwerte für B und A auf indirektem Wege über leicheneigene (z. B. Behaarung, Kopfmaße) oder leichenbezogene (z. B. Nässe, Bedeckung) Größen des Einzelfalls zu individualisieren.

Der Einflußfaktor Behaarung

Aus den in Tabelle 5 zusammengestellten Daten geht ein statistisch signifikanter Einfluß der in einem Summenmaß zusammengefaßten Behaarungskriterien (vgl. Tabelle 1) auf die Abkühlungsgeschwindigkeit, insbesondere die Größe des Anpaßparameters B hervor: Die Fälle mit auffallend großem Betrag des individuellen Wertes für B haben im Mittel eine hoch signifikant geringere Behaarungszahl (1,2) als Fälle mit einem auffallend kleinen Betrag des individuellen B (Tabelle 5 oben). Ganz analog haben die Fälle mit Behaarungszahl 0 oder 1 im Mittel einen hoch signifikant größeren Betrag des individuellen B als die Fälle

Tabelle 5. Einfluß der Behaarungskriterien (Bhaarungszahl) auf die Größe des Anpaßparameters B (s. Text)

Bhaarungszahl bei B -Werten außerhalb $-0,127 \pm 0,2$ (vgl. Tabelle 2)					
$B_{\text{indiv.}} \geq -0,147$			$B_{\text{indiv.}} \leq -0,107$		
Nr.	$B_{\text{indiv.}}$	Bhaarungs-zahl	Nr.	$B_{\text{indiv.}}$	Bhaarungs-zahl
16	-0,173	0	60	-0,102	5
18	-0,161	2	64	-0,107	5
47	-0,170	1	54	-0,101	6
19	-0,162	3	55	-0,099	3
72	-0,160	0	53	-0,107	3
			52	-0,101	5
			50	-0,094	6
N bzw. \bar{x}	5	-0,165	1,2	7	-0,102
S_x		$\pm 0,005$	$\pm 1,17$		$\pm 0,004$
Sign. 0,001					
B-Werte bei Behaarungszahl 0 oder 1 bzw. 6 oder 5					
Behaarungszahl 0 oder 1			Behaarungszahl 6 oder 5		
Nr.	$B_{\text{indiv.}}$	Bhaarungs-zahl	Nr.	$B_{\text{indiv.}}$	Bhaarungs-zahl
16	-0,173	0	60	-0,102	5
47	-0,170	1	62	-0,138	5
21	-0,126	0	64	-0,107	5
71	-0,160	0	3	-0,128	6
			46	-0,116	5
			54	-0,101	6
			49	-0,120	6
			56	-0,112	6
			52	-0,101	5
			50	-0,094	6
N bzw. \bar{x}	4	-0,157	0,5	10	-0,112
S_x		$\pm 0,019$			$\pm 0,013$
Sign. 0,001					

mit Behaarungszahl 5 oder 6 (Tabelle 5 unten). Aus diesen Daten können Individualisierungen (Normierungen) des Festwertes für B ($-0,127$) über die Behaarungszahl (Mittelwert = 3,4) abgeleitet werden. Wir berechneten nach der Behaarungszahl normierte B -Werte nach: (festgestellte Behaarungszahl – 3,4) \times 0,008–0,127 und nach: (festgestellte Behaarungszahl – 3,4) \times 0,01–0,127, setzten die behaarungs-normierten B -Werte unter Beibehaltung der Festwerte

für A (1,135) und T_0 (37,2°C) in die Formel (6) ein und berechneten damit die Todeszeiten für die Fälle, bei denen die Behaarungszahl erfaßt worden war ($N=37$). Die statistischen Maßzahlen der auf diese Weise erhaltenen Abweichungen waren gegenüber der Todeszeitberechnung mit Festwerten für B (Tabelle 4) im Bereich der normierten Temperatur $0,5 \leq Q < 1$ praktisch unverändert. Eine deutliche Verbesserung der Präzision berechneter Todeszeiten war erst im Bereich einer normierten Temperatur von $Q < 0,3$ (entsprechend Todeszeiten von über 13,5 h) zu erreichen.

Der Einflußfaktor Kopfmaße

Dem Datenmaterial der vorliegenden Untersuchungsreihe kann eine Tendenz dahingehend entnommen werden, daß auch die Kopfmaße einen Einfluß auf den Betrag von B haben: die Fälle mit großem Horizontalumfang und/oder großem Sagittaldurchmesser haben im Mittel einen geringeren Betrag für B als jene Fälle mit kleinem Horizontalumfang und/oder Sagittaldurchmesser. Die Anzahl der Fälle unseres Materials mit auffallend großen oder kleinen Kopfmaßen war jedoch zu gering, eine detaillierte Analyse war nicht möglich.

Hinsichtlich eines etwaigen Einflusses der weiteren miterfaßten Größen auf die Abkühlungsgeschwindigkeit waren aus dem vorliegenden Material keine Aussagen möglich.

Ergebnisse zur Ortsabhängigkeit der zentralen Hirntemperatur

Bei den 4 Fällen mit bilateral in das „Zentrum“ des Gehirns eingeführten Sonden wurden zu gleichen Zeitpunkten Temperaturdifferenzen bis zu 1,5°C registriert; gleiche Temperaturen werden mit zeitlichen Differenzen bis zu etwa einer Stunde erreicht.

Diskussion

Zur Ortsabhängigkeit der Hirntemperatur

Bei den Untersuchungen von Brinkmann et al. (1976, 1978) wurden Doppelsonden benutzt; die beiden Meßfühler waren 9 cm voneinander entfernt, der eine lag an der Innenseite der Dura occipital, der andere „in der geometrischen Hirnmitte“. Dadurch, daß vor dem Einführen der Sonde eine starre Hülse bis zur Dura vorgetrieben wurde, wurde ein axiales Abweichen der flexiblen Sonde weitestgehend vermieden. Die Differenztemperatur zwischen Hirnzentrum und Hirnperipherie zeigte eine Abhängigkeit von Todeszeit und Umgebungs temperatur. Die gemessenen Maxima lagen zwischen 1,8 und 4,6°C, das Mittel bei 3,2°C. Die bei den vorliegenden Untersuchungen mit beidseitiger Sonden einführung auf vermeintlich gleiche zentrale Position beobachteten Temperaturdifferenzen bis zu 1,5°C, entsprechend einer Zeitdifferenz bis zu einer Stunde, sind überraschend hoch. Die Art der bei diesen Fällen verwendeten Sonden (Außendurchmesser 0,5 mm), insbesondere ihre Verbiegbarkeit und/oder die nur „anatomische“ Vorschrift ihrer Einführung haben offenbar keine Gewähr

dafür geboten, daß die Meßfühler tatsächlich immer im „Zentrum“ des Gehirns, d. h. „funktionell“ am Ort der höchsten Temperatur gelegen haben. Daraus sind vor allem zwei Schlußfolgerungen zu ziehen. Erstens, die Sonden müssen starr armiert sein. Zweitens, die rein „anatomische“ Vorschrift, die Sonden auf eine Tiefe einzuführen, die der halben größten Kopflänge entspricht, ist möglicherweise unzureichend. Sie sollte evtl. „funktionell“ ergänzt werden: nach dem Einführen der Sonde auf die vorgeschriebene Tiefe und Temperaturäquilibrierung, sollte die Meßfühlerposition durch Sondenverschieben in sagittaler Richtung auf den Ort der höchsten zentralen Hirntemperatur korrigiert werden. Mit der Anwendung von (trägheitsarmen) Digitalthermometern ist das leicht durchzuführen. Weil angenommen werden muß, daß bei einigen Fällen der vorliegenden Untersuchung der Meßfühler nicht am Ort der höchsten Hirntemperatur gelegen hat, ist damit zu rechnen, daß dieser Umstand die Fehlerbreite der Todeszeitberechnungen negativ beeinflußt hat.

Zur Methodologie vorliegender Untersuchungen

Die vorliegenden Untersuchungen leiden, wie die meisten vergleichbaren Untersuchungen zur Leichentemperatur, unter einem „präanalytischen“ Fehler: die Lagerungstemperatur der Leichen kann am Ort des Todeseintritts bzw. während des Leichentransports unter Umständen erheblich von der Lagerungstemperatur während der Untersuchung abweichen. Für die Todeszeitrückrechnung wird hingegen nur eine Umgebungstemperatur zugrundegelegt, die des Untersuchungszeitraums. Das Problem ist bekannt (Marshall und Hoare 1962; Henßge 1981, 1982). Auf die vorliegenden Untersuchungen scheint es sich aus zwei Gründen besonders gravierend auszuwirken. Erstens, weil das kleinere Meßobjekt Kopfschneller (kürzeres postmortales Plateau) und empfindlicher (größere Abkühlungssteilheit) auf große Unterschiede der Umgebungstemperatur reagiert als vergleichsweise die Temperatur im Zentrum des Rumpfes. Zweitens, weil mit Hilfe der Klimakammer Umgebungstemperaturen während der Untersuchung vorgegeben werden konnten, die ganz erheblich von der Lagerungstemperatur am Ort des Todeseintritts bzw. während des Leichentransports abgewichen sind. Naturgemäß gefährdet dieser Umstand besonders die Fälle, die in einer Klimakammertemperatur um 30°C untersucht wurden. Tatsächlich war die Umgebungstemperatur am Ort des Todeseintritts bzw. während des Leichentransports in 4 Fällen dieser Gruppe wesentlich niedriger als 30°C; darauf führen wir die deutlich höheren Werte des Abkühlungskoeffizienten „B“ in den ersten Stunden zurück, was ausschließlich Fälle der 30°C-Gruppe betraf¹. (Zu bedenken wäre allerdings auch, daß sich die Temperaturleitzahl des Gewebes mit der Gewebstemperatur verändern könnte, zumindest in bestimmten Temperaturbereichen, z. B. auch niedrigen. Dieses Problem muß im Auge behalten werden, kann aber mit vorliegendem Datenmaterial nicht geklärt werden.) Die Gruppe

¹ Untersuchungen an Modellen von Aschoff und Wever (1959) haben ergeben, daß auch einmalige plötzliche Änderungen von Wärmeleitzahl oder Wärmeübergangszahl lang nachhinkende Verformungen der Abkühlkurve bewirken. Damit ist das „Problem“ der 30°C-Kurven generell hinreichend zu erklären, die genaue Ursache freilich auch nicht zu differenzieren

Tabelle 6. Daten zu den Fällen, die durch einen Fehler der berechneten Todeszeiten (Festwerte $B = -0,127$, $A = 1,135$) von $> 1\text{ h}$ (rechts) und $> -1\text{ h}$ (links) bereits in den ersten Stunden der Temperaturmessungen auffallen (s. Text)

Nr.	T_U (°C)	T_{exp}^a (°C)	t_{exp}^a (hpm)	Nr.	T_U (°C)	T_{exp}^a (°C)	t_{exp}^a (hpm)
2	16,7	36,7	2,0	13	25	34,2	2,0
22	10	35,3	2,0	16	20	32,5	2,1
24	10	35,6	2,0	18	20	32,6	2,0
26	10	36,5	2,0	21	15	31,8	2,0
49	13	35,4	2,3	47	16,1	31,5	2,5
				62	19,6	33,3	1,9
				64	19,5	32,0	2,0
<i>N</i>		5		7			
\bar{x}		11,9	35,9	2,1		19,3	32,6
S_x		± 2,6	± 0,6	± 0,1		± 3,0	± 0,9
Sign. 0,001							

der 30°C-Untersuchungen wurde daher aus der weiteren Analyse ausgeklammert. Der vorstehend diskutierte „präanalytische“ Fehler kann sich natürlich auch auf die Untersuchungen der übrigen Umgebungstemperaturen während der Untersuchung ausgewirkt haben¹, allerdings in geringerem Ausmaß. Daß er sich tatsächlich ausgewirkt hat, entnehmen wir indirekt den Daten der Tabelle 6:

Jene 5 Fälle, die durch eine *Unterschätzung* der berechneten Todeszeit von mehr als einer Stunde bereits in den ersten Stunden der Temperaturmessung auffallen (links in Tabelle 6), haben eine statistisch signifikant höhere zentrale Hirntemperatur bei Meßbeginn (im Mittel 35,9°C zum Zeitpunkt 2,1hpm) bei zugleich statistisch signifikant niedrigerer Lagerungstemperatur während der Untersuchung (im Mittel 11,9°C) als jene Gruppe von 7 Fällen (rechts in Tabelle 6), die durch eine *Überschätzung* der berechneten Todeszeit von mehr als einer Stunde bereits in den ersten Stunden auffallen: zentrale Hirntemperatur bei Meßbeginn im Mittel nur 32,6°C zum gleichen mittleren Zeitpunkt von 2,1hpm bei gleichzeitig höherer Lagerungstemperatur während der Untersuchung, im Mittel 19,3°C. Dieser scheinbar paradoxe Sachverhalt ist nach unserer Meinung durch Auswirkung des oben diskutierten „präanalytischen“ Fehlers zu erklären.

Dieser präanalytische Fehler könnte bei weiteren Untersuchungen sehr wohl zumindest geringer gehalten werden: die einstellbare Klimakammertemperatur sollte nach der aktuellen Umgebungstemperatur am Ort des Todeseintritts bzw. während des Leichentransports gewählt werden; es sollten nur Leichen innerhalb einer Zeitspanne von unter 1 h zwischen Todeseintritt und Untersuchungsbeginn zur Untersuchung gelangen. Auf die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungsreihe hat sich die Nichtbeachtung beider Empfehlungen wiederum negativ auf die Fehlerbreite der berechneten Todeszeiten nach Tabelle 4 ausgewirkt.

Um eine Vorstellung zu gewinnen, in welchem Ausmaß sich die Fehlerbreite der berechneten Todeszeiten reduzieren könnte, wenn sowohl die Position des

Tabelle 7. Statistische Maßzahlen der Abweichungen zwischen berechneten und realen Todeszeiten bei Berechnung der Todeszeiten mit Festwerten für B ($-0,127$) und A ($1,135$) nach Elimination der in Tabelle 6 dargestellten Fälle aus dem in Tabelle 4 dargestellten Material (vgl. Abb. 5)

$Q = \frac{T_t - T_U}{37,2 - T_U}$	\overline{dt}	S_{dt}	n	$N=44$
$1,0 \leq Q$	-1,0	$\pm 0,0$	1	
$0,9 \leq Q < 1,0$	-0,07	$\pm 0,45$	9	$0,5 \leq Q < 1,0:$
$0,8 \leq Q < 0,9$	-0,03	$\pm 0,34$	22	$n = 152$
$0,7 \leq Q < 0,8$	-0,13	$\pm 0,43$	34	$\overline{dt} = -0,11; S_{dt} = \pm 0,47$
$0,6 \leq Q < 0,7$	-0,17	$\pm 0,47$	38	$95\% = +1,1 \dots -0,9$
$0,5 \leq Q < 0,6$	-0,12	$\pm 0,55$	49	$\text{Var.} = +1,1 \dots -1,2$
$0,4 \leq Q < 0,5$	-0,04	$\pm 0,77$	58	$0,3 \leq Q < 0,5:$
$0,3 \leq Q < 0,4$	-0,18	$\pm 1,08$	79	$n = 137$
				$\overline{dt} = -0,12; S_{dt} = \pm 0,96$
				$95\% = +1,9 \dots -2,1$
				$\text{Var.} = +1,4 \dots -3,6$
$0,2 \leq Q < 0,3$	-0,54	$\pm 1,37$	97	$95\% = +2,3 \dots -3,4$
$0,1 \leq Q < 0,2$	-1,11	$\pm 2,32$	101	
$0,0 \leq Q < 0,1$	-0,88	$\pm 3,65$	62	

Meßfühlers auf den Ort der höchsten zentralen Hirntemperatur (wie oben angegeben) eingestellt als auch der präanalytische Fehler minimiert wird, haben wir die 12 Fälle der Tabelle 5 aus dem Material der Tabelle 4 eliminiert und das so „bereinigte“ Material einer Fehleranalyse unterzogen, vgl. Tabelle 7 und Abb. 5. Bis zu einer normierten Temperatur von $Q \geq 0,5$ (im Mittel bis zur 6,5. hpm) reduziert sich der 95%-Toleranzbereich auf ± 1 h, im Bereich einer normierten Temperatur von $0,3 \leq Q < 0,5$ (jenseits der 6,5. bis zur 10,5. hpm) auf etwa ± 2 h. Ausdrücklich wird betont, daß dies eine Mutmaßung ist; der Nachweis müßte durch Untersuchungen mit verbesselter Methodologie erst erbracht werden.

Zur interindividuellen Variabilität der Abkühlkurven

Die interindividuelle Variabilität der Abkühlkurven ist offenkundig nicht vernachlässigbar gering. Sie drückt sich in der Variationsbreite insbesondere des Anpaßparameters B aus. In welchem Ausmaß die Variationsbreite B auf die Präzision berechneter Todeszeiten penetriert, läßt sich am Vergleich der statistischen Maßzahlen zwischen individuellen Werten für B und A und mit Festwerten für B und A berechneten Todeszeiten, also am Vergleich der Tabellen 3 und 4 ablesen. Die Präzision berechneter Todeszeiten läßt erheblich nach, wenn die Todeszeiten mit Festwerten für die Anpaßparameter B und A berechnet werden müssen.

An dieser Aussage ändern auch die Diskussion zu den methodischen und methodologischen Mängeln vorliegender Untersuchungen mit hierdurch beding-

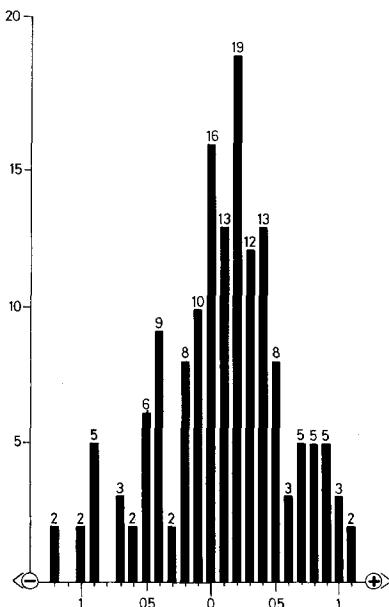


Abb. 5. Verteilung der Einzelabweichungen zwischen berechneter und realer Todeszeit bei Berechnung der Todeszeiten mit Festwerten für B ($-0,127$) und A ($1,135$) im Bereich einer normierten Temperatur $0,5 \leq Q < 1$ nach Elimination der in Tabelle 6 dargestellten Fälle aus dem in Abb. 3 und Tabelle 4 dargestellten Material.
Abszisse: dt . Ordinate: n . $N = 32$; $n(\text{gesamt}) = 152$; T_U zwischen 10 und 25°C (vgl. Tabelle 7)

$Q = \frac{T_t - T_U}{37,2 - T_U}$	Todeszeit im Mittel
$0,5 \leq Q \leq 1,0$	6,5h
$0,3 \leq Q < 0,5$	10,5h
$0,2 \leq Q < 0,3$	13,5h
$0,1 \leq Q < 0,2$	19,0h

Tabelle 8. Mittlere Todeszeit an der unteren Klassengrenze der normierten Temperatur Q

ten Präzisionsverlusten wenig. Der Nachweis eines Einflusses von Behaarung und Kopfmaßen auf die Abkühlungsgeschwindigkeit ist wie folgt zu diskutieren:

Am vorliegenden Material konnten zwar ein statistisch zu sichernder Einfluß des Behaarungskoeffizienten und die Tendenz eines Einflusses von Kopfmaßen auf die Größe des Anpaßparameters B nachgewiesen werden, doch erbrachte eine entsprechende Normierung keine nennenswerte Reduktion der Fehlerbreite damit berechneter Todeszeiten für die ersten 13 hpm. Mit den oben diskutierten Verbesserungen der Untersuchungsmethodik bzw. -methodologie wie auch mit Vergrößerung des Stichprobenumfangs ist aber vermutlich eine schärfere Normierung der Anpaßparameter über die Einflußfaktoren „Behaarung“ und „Kopfmaße“ mit Einengung der Streubreite berechneter Todeszeiten zu erreichen.

Zur Eignung des Zwei-Exponenten-Modells nach Marshall für die mathematische Beschreibung der Hirnabkühlung

Das benutzte Zwei-Exponentialmodell enthält drei Anpaßparameter, wovon einer, nämlich T_0 , kaum als Anpaßparameter für den Einzelfall betrachtet werden kann, sondern als Konstante behandelt werden muß, weil die zentrale

Hirntemperatur am gegenständlichen Einzelfall in der Regel unbekannt bleibt und individuell nicht zu eruieren ist. Demnach verbleiben die beiden Anpaßparameter B und A , die anhand von Einflußgrößen (etwa Behaarung, Kopfmaße, Nässe, Bedeckung des Kopfes) auf indirektem Wege individualisiert werden können. Der Vorteil des benutzten analytischen Ausdrucks liegt ganz zweifellos darin, daß er mit nur zwei Anpaßparametern „auskommt“ und damit die Hirnabkühlung bemerkenswert präzise mathematisch beschreiben kann (Tabelle 3 und Abb. 2).

Mit einem Vergleich der Tabellen 3 und 4 bzw. der Abb. 2 sowie 3 und 4 ist diese Meinung nachgerade zu beweisen: Das Modell ist, obwohl es nur zwei Anpaßparameter und eine Konstante benötigt, in der Lage, aus einer einmalig gemessenen Hirntemperatur Todeszeiten zu berechnen, die an 44 Leichen im Umgebungstemperaturbereich zwischen 10 und 25°C bis zur 13,5. hpm im Mittel um – 3 min bei einer Standardabweichung von ± 16 min abwichen. Lediglich Todeszeitberechnungsverfahren auf der Basis mehrfacher Temperaturmessungen in bestimmten zeitlichen Intervallen (z. B. Greene and Wright 1982) könnten nach unserer Meinung theoretisch geeignet sein, ohne die Notwendigkeit zur indirekten Ermittlung von individuell zutreffenden Zahlenwerten für die benötigten Anpaßparameter auszukommen und dennoch präzise Todeszeitberechnungen zuzulassen. Derartige Verfahren würden allerdings den Zeitaufwand für Todeszeitbestimmung am Leichenfundort deutlich erhöhen. Derzeit fehlen zu derartigen Rückrechnungsverfahren allerdings noch Ergebnisse bezüglich ihrer Anwendung auf repräsentative Stichproben mit Angaben von statistischen Maßzahlen der Abweichungen zwischen berechneten und realen Todeszeiten. Die in diesem Abschnitt gemachten Aussagen können ohne Einschränkungen auch auf die Anwendung des Zwei-Exponenten-Modells auf Todeszeitbestimmungen aus Rektaltemperaturen (Henßge 1979, 1981, 1982) ausgedehnt werden. Wenn es auch durch weitere Bemühungen nicht gelingen sollte, diese (nur) zwei Anpaßparameter auf indirektem Wege zu individualisieren, um dadurch die Präzision von mit Festwerten berechneten Todeszeiten (Tabelle 4, Abb. 3 und 4) zu erhöhen, so dürften die Chancen für präzisere Todeszeitberechnungen durch kompliziertere Rechenmodelle, wie z. B. jene, die für Zylinder von unendlicher Länge entwickelt (Gröber et al. 1957) und auf die Leichenabkühlung übertragen wurden (Sellier 1958), eigentlich geringer sein, weil sie wesentlich mehr als zwei Anpaßparameter und eine Konstante benötigen. Sellier (1958) empfiehlt aus gleichem Grund bei seinem Modell eine Beschränkung auf die „Grundwelle“. Nach unserer Meinung besteht das Problem präziser Todeszeitrückrechnungen aus gemessenen Leichentemperaturen seit Marshall und Hoare (1962) nicht mehr darin, einen geeigneten mathematisch-analytischen Ausdruck zu finden, sondern darin, die beiden Anpaßparameter der als optimal zu bezeichnenden Marshall-Formel am konkreten Einzelfall in der Praxis tatsächlich als Anpaßparameter behandeln zu können und sie mangels hinreichender Kenntnisse nicht durch Konstante (Mittelwerte) ersetzen zu müssen.

Zur nachgewiesenen Präzision berechneter Todeszeiten

Bei Verwendung von Festwerten für die Anpaßparameter B , A und T_0 konnten an vorliegender Stichprobe von 44 Leichen Todeszeiten berechnet werden,

deren Präzision durch einen 95%-Toleranzbereich von rund $\pm 1,5$ h bis zu einer normierten Temperatur von $Q \geq 0,5$ (im Mittel bis zur 6,5. hpm) bzw. von rund $\pm 2,5$ h im Bereich einer normierten Temperatur von $0,3 \leq Q < 0,5$ (jenseits der 6,5. bis zur 10,5. hpm) charakterisiert ist. Ungeachtet o. g. eventueller Reduktion der Fehlerbreite ist die zur Zeit nachweisbare Präzision berechneter Todeszeiten in den ersten 10 hpm bereits größer als bei Ermittlung der Todeszeit durch andere Verfahren (Prokop 1976) einschließlich durch Messung der Rektaltemperatur (Henßge 1979, 1981, 1982). Die von Brinkmann et al. (1976 und 1978) geäußerte Meinung, die Todeszeit könne durch Messung der Hirntemperatur mit einer Präzision von ± 1 h ermittelt werden, kann mit dem gegenwärtigen Stand noch nicht bewiesen werden, doch kann die Vermutung begründet aufrecht erhalten werden, daß eine solche Präzision potentiell erreichbar ist.

Zur praktischen Anwendung des Verfahrens

Der durch vorliegende Untersuchungen nachweisbare Stand berechtigt dazu, die Methode der Todeszeitbestimmung durch Messung der zentralen Hirntemperatur zur praktischen Anwendung zu empfehlen. Um den Anwender von der Mühe der Berechnungen zu entlasten, haben wir den gegenwärtigen Stand (Formel 6, statistische Maßzahlen der Abweichungen zwischen berechneten und realen Todeszeiten nach Tabelle 4 bzw. Abb. 3 und 4) in die Form eines Nomogramms, analog zu den Nomogrammen zur Bestimmung der Todeszeit durch Messung der Rektaltemperatur (Henßge 1981 und 1982), gebracht (Abb. 6).

Das Nomogramm könnte gegebenfalls später durch Hinzufügen weiterer Kreisbögen für Gruppen von Behaarungszahlen und/oder Kopfmaßen ergänzt werden. Die angegebenen 95%-Toleranzgrenzen könnten dann durch geringere ersetzt werden. Auch könnte sich die Notwendigkeit einer, allerdings geringfügigen, Korrektur durch evtl. Veränderung der gegenwärtig zugrundegelegten zentralen Hirntemperatur von 37,2°C bei Todeseintritt ergeben.

Ausdrücklich ist auf den Gültigkeitsbereich des vorliegenden Nomogramms hinzuweisen:

- Relativ konstante Umgebungstemperatur zwischen vermutlichem Zeitpunkt des Todeseintritts und Zeitpunkt der Auffindung der Leiche bzw. der Temperaturmessung
- Umgebungstemperaturbereich von 10 bis 25°C
- Ruhende Umgebungsluft
- Keine Besonderheiten der Abkühlungsbedingungen wie z. B.: Bedeckung des Kopfes, Nässe oder Wassersuspension, Wärmestrahlung (Sonnen-, Heizkörperstrahlung), Verdacht auf allgemeine Unterkühlung(!) Verdacht auf Vorliegen hohen Fiebers bei Todeseintritt.

Vergleich mit den Untersuchungsergebnissen von Naeve und Apel (1973)

Ein Vergleich der am vorliegenden Datenmaterial herausgearbeiteten mathematischen Beschreibung der Abkühlkurven bei Benutzung der o. g. Festwerte für B , A und T_0 mit den von Naeve und Apel (1973) publizierten Ergebnissen fort-

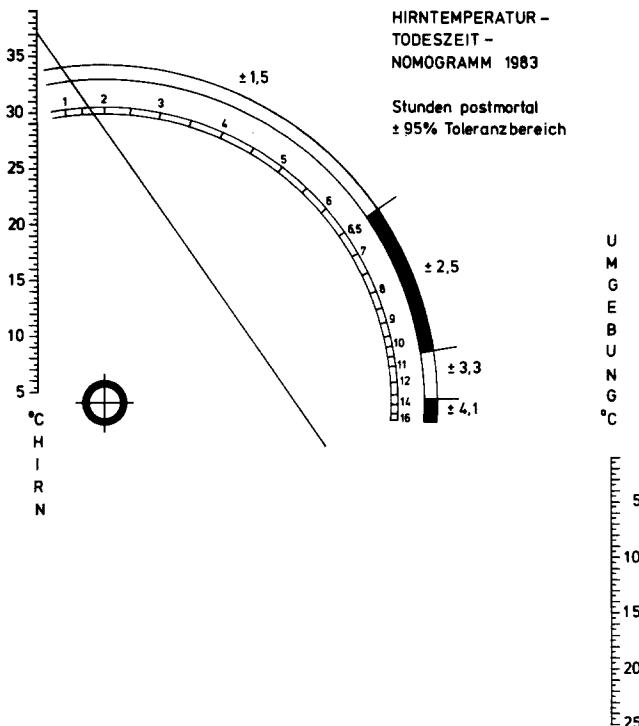


Abb.6. Nomogramm zur Ermittlung der Todeszeit aus einer zu unbekanntem Zeitpunkt nach Todeseintritt gemessenen zentralen Hirntemperatur. *Benutzungsanleitung:* 1. Schritt: Verbinde die Skalenpunkte der vorliegenden Temperaturen (Hirn: linke Skala; Umgebung: rechte Skala). Markiere den Schnittpunkt dieser Verbindungslinie mit der Diagonalen des Nomogramms. 2. Schritt: Ziehe eine Gerade vom Zentrum des Fadenkreuzes (links unten) durch den im 1. Schritt markierten Punkt auf der Diagonalen bis zum Auftreffen auf den Halbkreisbogen. Ablesung der Todeszeit in hpm (weiteres s. Text)

laufender ($N=30$) und punktueller ($N=40$) Hirntemperaturmessungen in Umgebungstemperaturen zwischen „ca. +16 bis +18°C“ (dortige Abb.2 und 4) ergibt: Mittelwertkurve und Kurven der oberen und unteren Variationsbreite sowie sämtliche punktuellen Temperaturmessungen von Naeve und Apel werden von der auf $T_U=17^\circ\text{C}$ bezogenen Normkurve mit den angegebenen oberen und unteren 95%-Toleranzgrenzen vorliegender Arbeit dann eingeschlossen bzw. die Kurven verlaufen nahezu deckungsgleich, wenn die Temperaturskalen um $1,8^\circ\text{C}$ gegeneinander verschoben werden: zu sämtlichen Temperaturwerten von Naeve und Apel müßten $1,8^\circ\text{C}$ addiert bzw. von unseren Werten $1,8^\circ\text{C}$ subtrahiert werden. Ohne eine derartige Verschiebung der Temperaturskalen liegen sämtliche Werte von Naeve und Apel unterhalb unserer Normkurve; die Kurve der oberen Variationsgrenze von Naeve und Apel ist praktisch deckungsgleich mit unserer Normkurve für $T_U=17^\circ\text{C}$. Aus unserer Sicht bieten sich folgende Erklärungsmöglichkeiten für die Unterschiede beider Meßreihen an:

1. Die Richtigkeit der Temperatureichungen der Temperaturmeßeinrichtungen ist in Frage zu stellen. Die vorliegenden Untersuchungen setzen sich aus

drei Meßreihen zusammen (Hamburg 1978 und 1982/83 sowie Berlin 1982/83), deren Ergebnisse nicht systematisch differierten.

2. Die Lage der Meßsonden spitze im Gehirn dürfte bei den Untersuchungen von Naeve und Apel peripherer gewesen sein (s.o.: „Zur Ortsabhängigkeit der Hirntemperatur“).

3. Der größere Außendurchmesser der Meßsonden von Naeve und Apel könnte eine nicht vernachlässigbare konduktive Wärmeleitung entlang der Sonde verursacht haben.

Literatur

- Aschoff J, Wever R (1959) Die Abkühlung menschlicher Extremitäten. Pflügers Arch 269: 207–213
- Brinkmann B, May D, Riemann U (1976) Postmortaler Temperaturausgleich im Bereich des Kopfes. I. Meßtechnik, prinzipielle Untersuchungen. Z Rechtsmed 78: 69–82
- Brinkmann B, Menzel G, Riemann U (1978) Postmortale Organtemperaturen unter verschiedenen Umweltbedingungen. Z Rechtsmed 81: 207–216
- Brown A, Marshall TK (1974) Body temperature as a means of estimating the time of death. Forensic Sci 4: 125–133
- Greene MA, Wright IC (1982) A computer based study of body temperature and postmortem interval. 7. Jahrestagung der Gesellschaft Gerichtl Med DDR, 4.–6. Nov, Leipzig
- Gröber, Erk, Grigull (1957) Wärmeübertragung. Springer, Berlin Göttingen Heidelberg
- Henßge C (1979) Die Präzision von Todeszeitschätzungen durch die mathematische Beschreibung der rektalen Leichenabkühlung. Z Rechtsmed 83: 49–67
- Henßge C (1981) Todeszeitschätzungen durch die mathematische Beschreibung der rektalen Leichenabkühlung unter verschiedenen Abkühlungsbedingungen. Z Rechtsmed 87: 147–178
- Henßge C (1982) Methoden zur Bestimmung der Todeszeit-Leichenabkühlung und Todeszeitbestimmung. Med Habilitationsschrift, Humboldt-Universität Berlin
- Marshall TK, Hoare FE (1962) Estimation the time of death. The rectal cooling after death and its mathematical expression. J Forensic Sci 7: 56–81
- Naeve W, Apel D (1973) Hirntemperatur der Leiche und Todeszeit. Z Rechtsmed 73: 159–169
- Prokop O (1976) In: Prokop O, Göhler W (Hrsg) Forensische Medizin. Gustav Fischer, Stuttgart New York
- Sellier K (1958) Determination of the time of death by extrapolation of the temperature decrease curve. Acta Med Leg Soc 11: 279–302

Eingegangen am 24. November 1983