

## Das mechanische Verhalten menschlicher Skelettmuskulatur während des Verlaufs der Totenstarre

PETER ZINK

Institut für Rechtsmedizin der Universität Erlangen-Nürnberg (BRD)

Eingegangen am 17. April 1972

### *The Mechanical Behaviour of Human Sceleton Muscle during the Course of Rigor Mortis*

*Summary.* Mechanical properties of human sceleton muscle and the change of these properties during the phases of rigor mortis have been examined. The course of rigor mortis was determined by automatisized stressing the vertical hanging m.sartorius with periodical stresses of maximum 20 pond. The results of the experiments are:

1. Human sceleton muscle has no ideal elasticity. During a constant stress there is found a decrease of the strain of fresh and rigid muscle according to the logarithmus of the time of stressing.

2. In case of isolated muscle it takes about 2—3 hrs for development of rigor. During this time stiffness increases, plasticity diminishes and a shortening of muscle can be observed.

3. In about 3 to 5 days post mortem the isolated muscle becomes longer spontaneously. At the same time plasticity is relatively high, while stiffness does not diminish.

4. Violent removing (breaking) of rigor mortis of an isolated muscle is always combined with an elongation of muscle, a decrease of stiffness is not an obligatory effect. If a muscle was not completely rigid, a shortening and stiffening of muscle returns after breaking. This is due to a shortening and stiffening of muscle fibres, which had not been rigid in the moment of breaking. The elongation after breaking the full rigor irreversible. Histological investigations confirm a morphological change of musclefibres by breaking.

5. The results of the trials in isolated human muscle can be transfered to the rigor mortis of the dead human body:

a) Rigor is not only a stiffening of muscle. There also exists an isometric contraction of the muscle in situ, which shifts the operating point of the rigid muscle in the steep part of the stress-strain-curvature. These two facts are the reason why the limbs of a dead and rigid human body oppose great forces when they are tried to be moved.

b) Spontaneous relaxing of rigor mortis of a dead human body is caused by an irreversible elongation of the muscle, which can appear a few days after death by small forces, e.g. the weight of extremities. A diminishing of stiffness of musculature is not connected with relaxing of rigor.

c) The breaking of rigor mortis of a dead body is a violent elongation of the rigid muscles. If all muscles have been totally rigid, elongation is irreversible. If rigor mortis is broken in the phase of increase of rigor, rigor returns in a smaller extend. This can be explained by a shortening and stiffening of those parts of musculature which have not been rigid before.

*Zusammenfassung.* Zur Untersuchung der mechanischen Eigenschaften des Muskels und der Veränderung dieser Eigenschaften im Verlauf der Totenstarre wurden Serienversuche an menschlichen Skelettmuskeln durchgeführt und der Verlauf der Totenstarre durch vollautomatisierte periodische Dehnungen kontinuierlich verfolgt. Im einzelnen hat sich folgendes ergeben:

1. Die Muskulatur ist elastisch unvollkommen. Bei konstanter Dehnung nimmt bei lebensfrischen und totenstarrten Muskeln die gegen die Dehnung entwickelte Kraft gesetzmäßig ab.

2. Die Erstarrungsphase des isolierten Muskels dauert etwa 2—3 Std. Während der „Erstarrung“ nimmt kontinuierlich die Steifheit des Muskels zu, die Plastizität ab, außerdem verkürzt sich der Muskel.

3. Etwa am 5.—7. Tag post mortem verlängert sich der isolierte Muskel spontan, gleichzeitig ist die Plastizität erhöht; eine Abnahme der Versteifung tritt nicht ein.

4. Gewaltsames Lösen (Brechen) der Starre am isolierten Muskel führt regelmäßig zu einer Verlängerung des Muskels, eine Abnahme der Versteifung kann auftreten. Ist die Erstarrung noch nicht vollständig abgeschlossen, so kommt es nach dem Brechen wieder zur Verkürzung und Versteifung des Muskels. Dies ist auf eine Verkürzung und Versteifung solcher Muskelfasern zurückzuführen, die zum Zeitpunkt des gewaltsamen Lösens noch nicht erstarrt gewesen waren. Die Verlängerung nach Brechen der voll ausgebildeten Starre ist irreversibel. Histologische Untersuchungen bestätigen den Befund einer morphologischen Veränderung der Muskelfasern beim gewaltsamen Lösen.

5. Die Ergebnisse lassen sich auf die Totenstarre an der Leiche übertragen:

a) Das Eintreten der Starre an der Leiche läßt sich nicht allein mit der Zunahme der Steifheit der Muskeln erklären. Zusätzlich wird auch durch eine isometrische Kontraktion der Arbeitspunkt der totenstarrten Muskulatur auf den steilen Teil der Spannungs-Dehnungs-Kurve verschoben. Dadurch wird auch kleinen Bewegungen etwa der Gliedmaßen in jeder Richtung erheblicher Widerstand entgegengesetzt.

b) Bei dem spontanen Lösen der Starre an der Leiche handelt es sich um eine irreversible Verlängerung der Muskulatur, die nach Ablauf von einigen Tagen durch geringe Kräfte, z. B. das Eigengewicht der Gliedmaßen, zustande kommen kann. Eine Abnahme der Größe der Steifheit der Muskeln ist damit nicht verbunden.

c) Das Brechen der Starre an der Leiche stellt eine Verlängerung der Muskulatur dar. Erfolgt sie bei voll ausgebildeter Starre, so ist die Verlängerung irreversibel. Wird die Starre in der Erstarrungsphase gebrochen, so führt eine Verkürzung und Versteifung vorher noch nicht erstarrter Muskelanteile zum Wiedereintritt der Starre.

*Key words:* Skelettmuskulatur, Mechanische Eigenschaften — Totenstarre, Verlauf.

Die Totenstarre der Muskulatur ist ein supravitales und postmortales Phänomen. Sie beweist nicht nur als sogenanntes sicheres Todeszeichen den eingetretenen Tod, sondern wird auch wegen der Gesetzmäßigkeiten in ihrem Ablauf, die erstmals ausführlich von Nysten beschrieben worden waren, zur Schätzung der seit dem Tod verstrichenen Zeit herangezogen. Während in einer früheren Veröffentlichung die Bedeutung der Skelettmuskel-Einzelfaser für die Totenstarre des Gesamtmuskels dargelegt wurde, soll in vorliegender Arbeit der zeitliche Ablauf des Rigor mortis behandelt werden, insbesondere die Vorgänge bei der Erstarrung, dem gewaltsamen Lösen und dem Wiedereintreten der Starre.

Die Zeitspanne zwischen dem Eintritt des Todes und der Lösung der Totenstarre läßt sich in vier Abschnitte gliedern: in eine Vorphase, die sogenannte „Erschlaffungsphase“; ihre Zeitdauer ist sehr unterschiedlich, sie kann zwischen 0 und 20 Std betragen (Bate-Smith u. Bendall, 1948). Der auf die Erschlaffungsphase folgende zweite Abschnitt, die Erstarrungsphase, reicht vom Beginn der Totenstarre bis zu ihrer vollständigen Ausbildung. Die dritte Phase umfaßt den Zustand vollständig ausgebildeter Starre mit ausgeprägter Versteifung der Leiche. Von einem Lösen der Totenstarre, dem vierten Abschnitt, spricht man, wenn nach einiger Zeit wieder eine zunehmend leichtere Beweglichkeit der zuvor erstarrten Körperteile festzustellen ist. Dies tritt je nach Temperatur etwa zwischen 1 und 12 Tagen post mortem ein (Morgenstern).

## Bisherige Untersuchungen

Messungen über den *Verlauf der Totenstarre* liegen u. a. von Bate-Smith u. Bendall vor, die 1947 die Änderungen der Dehnbarkeit des Kaninchenskelettmuskels nach dem Tode untersuchten, indem sie in zeitlichen Abständen immer wieder den Muskel mit gleichen Gewichten belasteten und Verlängerungen bzw. Verkürzungen aufzeichneten. In der Erschlaffungsphase blieb die Dehnbarkeit des Muskels unverändert. Mit Beginn der Erstarrungsphase nahm die Dehnbarkeit ab, um nach 5—6 Std einen Minimalwert zu erreichen, der dann unverändert blieb. Gegenüber dem frischen Muskel beobachteten Bate-Smith u. Bendall (1956) eine Zunahme des Elastizitätsmoduls in der Totenstarre um das 10- bis 40fache.

Forster veröffentlichte 1962/63 ausführliche und systematische Versuche zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften des totenstarren Skelettmuskels. Er verwendete Rattengastrocnemien, die am Fersenbein herausgelöst, sonst jedoch in situ belassen wurden. Die Muskeln wurden stufenweise mit steigenden Gewichten belastet und nach jeder Belastung wieder entlastet, bis zu einer Maximallast von 700 p, anschließend wurde der gleiche Vorgang mit abnehmenden Gewichten durchgeführt; dabei wurden die Längenänderungen registriert. Die Auswertung der Versuche ergibt, daß die elastischen Eigenschaften des Muskels während der Totenstarre auf ein Minimum sinken, im Durchschnitt ist die Steifheit im Vergleich zum frischen Muskel um das 2,9fache erhöht. Dies gilt für Zimmertemperatur und mittlere Dehnungsbereiche. Die plastischen Eigenschaften nehmen während der Starre zuerst zu und dann wieder ab.

Die Frage, ob der Eintritt der Totenstarre mit einer *Verkürzung der Muskeln* einhergeht, deren Klärung auch das Ziel unserer Untersuchungen war, ist bisher von mehreren Autoren mit widersprechenden Ergebnissen untersucht worden, wie Schmidt et al. (1964) festgestellt haben:

Meixner durchtrennte im Tierversuch (Frosch) die Sehnen der Beuger bzw. Strecker im Sprunggelenk. Mit Eintritt der Totenstarre ergaben sich nur geringe Stellungsänderungen der Extremitäten. Meixner wies weiter darauf hin, daß Leichen häufig mit offenem Mund erstarren; dies spreche gegen eine stärkere Kontraktion, da sonst wegen des Überwiegens der Schließmuskulatur des Mundes die Leichen stets mit geschlossenem Mund erstarren müßten. Dotzauer u. Tamaska berichteten, daß sich gelegentlich das Platysma kontrahieren kann.

Bate-Smith u. Bendall (1948) haben an totenstarren Kaninchenmuskeln Verkürzungen bis zu 45% beobachten können, allerdings nur bei erhöhten Temperaturen und erschöpften Tieren. Nach ihren Befunden entwickelt der Muskel bei Verkürzungen während der Totenstarre Kräfte, die kaum mehr als ein Zweitausendstel der maximalen Kraft in vivo betragen.

Nach Ansicht von Bendall (1951) „stellen die postmortale Kontraktur und der Rigor mortis eine sehr langsame, physiologische Kontraktion“ dar. Er erhärtete diese Hypothese durch die Beobachtung, daß unter dem Mikroskop die Querstreifung der Fasern im Rigor viel dichter erscheint. Da sich nicht alle Fasern zugleich im Zustand der Totenstarre befinden, gibt es außerdem nichtkontrahierte Fasern, die zwischen den kontrahierten liegen und ein gefälteles Aussehen haben.

Auch Perry (1956) beobachtete in eingehenden elektronenmikroskopischen Untersuchungen am totenstarren Muskel die gleichen strukturellen Veränderungen, wie bei einer vitalen Kontraktion.

Schmidt et al. (1964) stellten Versuche an Gastrocnemien von Ratten an. Sie beobachteten keine Verkürzung bei Eintritt der Totenstarre. Der Muskel kehrte lediglich nach einer vorausgegangenen Dehnung in die Ausgangslage zurück. Auch nach ihrer Ansicht müßte das Vorliegen eines echten Kontraktionszustandes mit dem Beginn der Leichenstarre Zwangshaltungen zur Folge haben, wie sie z. B. für Hitzeeinwirkungen typisch sind (sog. Fechterstellung).

Die Untersuchungen von Forster führten schließlich zur Lösung des Problems und klärten die scheinbaren Widersprüche auf. Er fand, daß sich unbelastete Muskeln nicht kontrahieren. Belastete Tiermuskeln dagegen kontrahieren sich regelmäßig. Das Ausmaß der Kontraktion hängt von der Höhe der Belastung ab, es nimmt bis zu einer temperaturabhängigen Lastgröße zu und ist bei größeren Lasten wieder geringer.

Bezüglich des *spontanen Lösens der Starre* liegen Untersuchungen von Marsh (1953) vor, der am isolierten Rindermuskel kein Nachlassen der Steifheit auch nach einer Lagerdauer von 7 Tagen bei 7°C beobachtete. Marsh schloß daraus, daß eine Lösung der Starre nicht erfolgt sei.

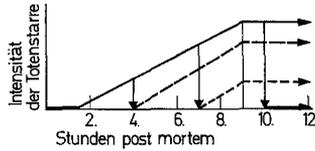


Abb. 1. Schematische Darstellung des Verhaltens der Totenstarre bei gewaltsamer Lösung nach Merkel. Die nach unten gerichteten Pfeile bedeuten gewaltsames Lösen der Starre

Zu ähnlichen Ergebnissen gelangten Bate-Smith u. Bendall (1956), die einen isolierten starren Kaninchenpsoas bei  $3,5^{\circ}\text{C}$  5 Tage lang aufbewahrten. Anschließend konnten sie durch Elastizitätsmessungen zeigen, daß nur eine ganz geringe Lösung der Starre eingetreten war. Sie stellten daher die Theorie auf, daß eine Lösung der Leichenstarre bei normalen Temperaturen zwischen  $10$  und  $20^{\circ}\text{C}$  in vitro überhaupt nicht eintritt.

Die Aufhebung des Rigor in situ führten sie auf eine „Kombination zwischen einer von außen erfolgten mechanischen Bewegung der Glieder und einer durch Fäulnis bedingten Erweichung des Muskelgewebes“ zurück.

Die Erschlaffung, die am isolierten Muskel häufig auf die Starre folgt, soll nach Bate-Smith u. Bendall (1956) mit der Lösung des Rigor nicht in Verbindung zu bringen sein. Diese Erscheinung, zusammen mit einer teilweisen Zerstörung des Bindegewebes, ist ihrer Meinung nach der Grund, daß Fleisch durch „Abhängen“ zarter wird. Auch nach Merkel (1937) erlangt der Muskel nach Lösung der Totenstarre zwar seine weiche Beschaffenheit, nicht aber seine Elastizität und Erregbarkeit wieder. Nach Reichel (1960) löst sich die Starre durch irreversible myolytische Veränderungen des Muskelgewebes. Villanova u. Morales (1960) nehmen an, daß mit fortschreitender Zersetzung des Muskels nach dem Tode „einige Proteine löslich werden, worauf die Leichenstarre verschwindet und nicht wieder eintreten kann“.

Forster kam bei seinen Messungen unter höherer Temperatur zu dem Ergebnis, daß die Lösung der Starre mit einer leichteren Deformierbarkeit der plastischen Elemente beginnt. Die Unterschiede im Verhalten der plastischen und elastischen Eigenschaften lassen vermuten, daß zwei verschiedene Elemente Träger dieser Eigenschaften sind.

Bei *gewaltsamer Lösung* der voll ausgebildeten Starre kommt es zur bleibenden Beweglichkeit der Glieder. Wird die Totenstarre jedoch während der Erstarrungsphase gebrochen, so bildet sie sich zumindest teilweise wieder aus; dies ist bereits 1833 von Sommer beschrieben und von Oppenheim u. Wacker (1919) untersucht worden. Merkel gibt 1937 in einem Handbuchartikel eine schematische Darstellung an, die das Verhalten der Starre bei gewaltsamer Lösung beschreibt (Abb. 1).

Nähere Vorstellungen über die Vorgänge beim Brechen der Totenstarre sind uns jedoch nicht bekannt.

Auf den *Ablauf der Starre haben verschiedene Faktoren einen Einfluß*. Die Länge der Erschlaffungsphase, nicht jedoch Verlauf und Dauer der Erstarrungsphase hängt in hohem Maße von den ATP-, Kreatinphosphat- und Glykogenreserven des Muskels ab; die Erschlaffungsphase ist bei reduziertem Ernährungszustand und bei erschöpfender, vor dem Tod geleisteter Arbeit kurz, wie auch im Tierversuch bewiesen wurde (Bate-Smith u. Bendall, 1949).

Eine Erhöhung der Temperatur beschleunigt den Verlauf der Vorgänge beim Ablauf der Totenstarre (Bierfreund, 1888; Baumann, 1917; Morgenstern, 1927; Lawry, 1953; Marsh, 1952; Bate-Smith u. Bendall, 1956; Forster, 1963 a). Am zeitlichen Ablauf der Totenstarre sind auch Vorgänge im Nervensystem beteiligt (Klingenbiehl, 1887; Laves, 1948; Berg, 1948; Villanova u. Morales, 1960). So verzögert z. B. das Durchschneiden des Nervus ischiadicus den Eintritt der Totenstarre im entsprechenden Glied um „einen gewissen Zeitraum“ (Bierfreund, 1888; Versuche am Frosch).

### Experimenteller Teil

Neben den Größen: Querschnitt des Muskels, Länge, Dehnung  $\epsilon$ , maximale Dehnung, Spannung  $\sigma$  und Zerreißfestigkeit werden die Begriffe Steifheit  $S$  und Plastizität benötigt.

Unter Steifheit wird, einem Vorschlag von Buchtal (1942) und Pieper et al. (1951) folgend, die Steilheit der Spannungs-Dehnungs-Kurve im  $\sigma$ - $\epsilon$ -Diagramm verstanden, in Zeichen:  $S =$

$\Delta\sigma/\Delta\varepsilon$ . Große Werte der Steifheit sind bei Muskulatur zu finden, zu deren Dehnung viel Kraft nötig ist, wie z. B. bei totenstarrten Muskeln. Niedrige Steifheitswerte bedeuten, daß zur Dehnung nur wenig Kraft erforderlich ist, wie bei lebensfrischer Muskulatur. Die Steifheit hängt von dem Ausmaß der Dehnung ab, sie ist bei niedriger Dehnung klein. Es gibt eine maximale Steifheit, die für lebensfrische und totenstarre Muskulatur etwa gleich ist, wie frühere Versuche ergeben haben (Zink). Bei Angaben über die Höhe der Steifheit ist also die Angabe des Dehnungsbereiches erforderlich, in dem die Messungen durchgeführt worden waren.

Die Größe zur Erfassung der plastischen Eigenschaften des Muskels wird später bei der Besprechung der Versuche definiert, sie ergibt sich aus der Abnahme der Kraft, die der Muskel einer konstanten Dehnung entgegengesetzt, also aus der inneren Verlängerung der Muskulatur unter der Einwirkung einer äußeren Belastung.

Bevor die Versuche mit fortlaufender Bestimmung der mechanischen Eigenschaften der Muskulatur während des Verlaufs der Totenstarre dargestellt werden, muß zunächst die Beschreibung einiger Experimente vorausgeschickt werden, deren Ergebnisse für die Bestimmung der plastischen Eigenschaften der Muskulatur nötig sind.

#### *Versuche an ganzen menschlichen Skelettmuskeln bei konstanter Dehnung*

Zusammen mit Beck wurden ganze menschliche Muskeln gedehnt, in gedehntem Zustand belassen und die Dehnung während des jeweiligen Versuchs konstant gehalten. Die Kraft wurde fortlaufend registriert. Während des gedehnten Zustandes sind nur die plastischen Eigenschaften (elastische Nachwirkungen und visköses Fließen) für das Verhalten der Muskulatur ausschlaggebend, die elastische Komponente ist ausgeschaltet. Die Experimente ergeben, daß die Kraft  $K_\varepsilon$ , die zum Aufrechterhalten der Dehnung notwendig war, im Laufe der Zeit abnahm, und zwar mit dem Logarithmus der Versuchsdauer  $t$ . Das läßt sich durch die Formel

$$K_\varepsilon = -\beta \ln \frac{t}{t_0}$$

beschreiben.

Das logarithmische Gesetz ist experimentell in dem Bereich  $1 \text{ sec} < t < 10^3 \text{ sec}$  erfüllt; es stellt eine Näherung dar und gilt nicht für sehr kleine und sehr große Zeiten.

Dieses Verhalten wurde sowohl bei lebensfrischen als auch totenstarrten Muskeln regelmäßig festgestellt und gilt bei starker Belastung (z. B. halbe Reißfestigkeit) und bei schwachen Kräften (z. B.  $10 \text{ p/mm}^2$ ). In obenstehender Gleichung beschreibt  $\beta$  die Größe des Kraftabfalls, verursacht durch die viskösen Eigenschaften und elastischen Nachwirkungen.  $\beta$  wird Fließgröße genannt. Das Fließen muß von einer inneren Veränderung herrühren, die die Muskulatur durch äußere Belastung erleidet.

#### *Versuche zur fortlaufenden Bestimmung mechanischer Eigenschaften des Skelettmuskels während des Verlaufs der Totenstarre durch vollautomatisierte periodische Dehnungen*

##### Versuchsanordnung

Die Versuche zur fortlaufenden Bestimmung der elastischen und plastischen Eigenschaften ganzer menschlicher Skelettmuskeln und ihre Veränderung nach dem Tode wurden in einer Dehnungsapparatur durchgeführt, die früher zur Bestimmung der Spannungs-Dehnungs-Kurven von Hautstücken und ganzen Muskeln verwendet worden war (Beschreibung s. Zink, 1965, 1971).

Die Versuche bestanden in einer periodischen Dehnung und Entdehnung der Muskeln in Stickstoffatmosphäre um kleine definierte Wegstrecken in definierten Zeitabschnitten mit automatischer Registrierung der auftretenden Kräfte. Die Temperaturen im Versuchsraum lagen um  $20\text{--}25^\circ\text{C}$ . Die Kräfte wurden mit einer induktiven Kraftmeßdose der Firma Hot-

tinger-Baldwin-Meßtechnik (Typ Q 11) mit einer Nennlast von 100 p gemessen. Als Spannungsquelle diente eine Trägerfrequenzeinheit (5 kHz, Typ MIG der Firma Hottinger-Baldwin-Meßtechnik) mit eingebauter Verstärkung für das Meßsignal.

Die erhaltene verstärkte Gleichspannung wurde mit einem Philips Kompensographen (max. Empfindlichkeit 1 mV/Vollausschlag) mit konstanter Papierablaufgeschwindigkeit (20 mm/min) registriert. Wegen der konstanten Dehnungsgeschwindigkeit war gewährleistet, daß während Dehnung und Entdehnung die Längenänderung am Muskel proportional dem Papiervorschub war.

Die Kräfteichung erfolgte empirisch mit Federwaagen.

Zur Steuerung der periodischen Dehnungen wurde eine Schaltvorrichtung entworfen und gebaut, mit der folgender Vorgang automatisch und periodisch abläuft:

1. Der Muskel wird von einer zu Versuchsbeginn gewählten Ausgangslage, bei der der Muskel nicht meßbar belastet ist, mit konstanter Dehnungsgeschwindigkeit gedehnt. Mit zunehmender Dehnung beginnt die Registriervorrichtung eine Kraft anzuzeigen, die der Muskel gegen die Dehnung entwickelt. Nach Überschreiten einer Kraftschwelle  $K_0$  von einigen Pond, die am Schreiber einstellbar ist, wird der Dehnvorgang noch eine bestimmte einstellbare Zeit (1—40 sec) fortgesetzt und dann durch Abschalten des Antriebsmotors automatisch beendet. Während der Dehnung steigt die Kraft zunehmend steiler an. Unter den gewählten Versuchsbedingungen betrug die Dehnung, gerechnet von  $K_0$  aus, etwa 1 mm.

2. In dem gedehnten Zustand wird der Muskel eine bestimmte einstellbare Zeit (1—40 sec) belassen, im Versuch meist 10 sec. Die Kraft nimmt in dieser Zeit infolge der viskösen Eigenschaften der Muskulatur und der elastischen Nachwirkungen ab, die Abnahme gehorcht dem beschriebenen logarithmischen Gesetz.

3. Der Muskel wird entdehnt, die Dehnungsapparatur läuft bis zu der bei Versuchsbeginn gewählten Ausgangslage zurück und wird automatisch abgeschaltet.

4. Es schließt sich eine bestimmte, einstellbare Ruhepause (1—60 min) in entdehntem Zustand an. Am Ende der Ruhepause beginnt automatisch eine neue Dehnung (s. Punkt 1).

Während der Dehnung, im gedehnten Zustand und während der Entdehnung (Punkte 1 bis 3) läuft der Papiervorschub des Schreibers, der die Kraft aufzeichnet. Während der Ruhepause ist der Papiertransportmotor abgeschaltet. Diese Zeit ist deshalb auf den Kurven (vgl. Abb. 2) nicht aufgezeichnet, die Dauer der Pausen (ca. 5 min in der Erstarrungsphase, ca. 15 min danach) wird auf den Kurven vermerkt.

Eine zusätzliche Schaltvorrichtung liefert 0,3 sec lange Signale, die auf der registrierten Kurve den Beginn der Dehnung, das Überschreiten der gewählten Kraftschwelle  $K_0$ , das Ende der Dehnung und den Beginn der Entdehnung aufzeichnen.

### Auswertung der bei den periodischen Dehnungsversuchen erhaltenen Kurven

Bei den periodischen Dehnungsversuchen werden Kurven erhalten wie in Abb. 2. Die Kurven liefern Meßwerte über die elastischen und plastischen Eigenschaften des Muskels und seine Längenänderung während des Versuchs:

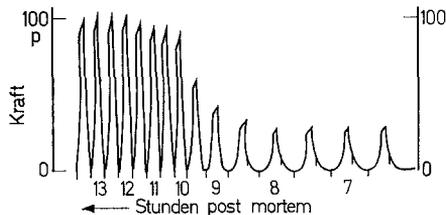


Abb. 2. Originalkurve einer automatischen periodischen Dehnung eines zu Versuchsbeginn noch nicht totenstarrten menschlichen *M. sartorius*. Um ein übersichtliches Bild zu erhalten, erfolgten bei diesem Versuch die Dehnungen im Abstand von etwa 30 min. Die Zeitachse verläuft von rechts nach links. Der Anstieg in der Zeit 9—10 Std post mortem stellt die Erstarrung dar

Die *elastischen* Eigenschaften und ihre Veränderung im Verlauf der Totenstarre können aus der Höhe der einzelnen Zacken abgelesen werden. Je steifer ein Muskel ist, desto höher ist die Maximalkraft. Die Differenz zwischen der Schwellenkraft  $K_0$  und der Kraftspitze ist direkt proportional der mittleren Steifheit des Muskels im Bereich dieser Dehnung, die als repräsentatives Maß für die elastischen Eigenschaften des Muskels verwendet wird.

Die *plastischen* Eigenschaften (viscöse Eigenschaften und elastische Nachwirkungen) werden durch die logarithmische Kraftabnahme während der Verweildauer im gedehnten Zustand charakterisiert. Die Größe des Kraftabfalls ist von der 1.—10., der 10.—100., der 100.—1000. sec gleich und wird Fließgröße  $\beta$  genannt. In den periodischen Dehnungsversuchen ist die Verweildauer in gedehntem Zustand mit 10 sec gewählt worden. Auch wegen der Trägheit der Meßapparatur (Zeitkonstante 1 sec) entspricht der registrierte Abfall der Kurve während der Verweildauer ziemlich genau der Fließgröße  $\beta$ . Die Fließgröße ist bei stärkerer Muskelbelastung größer, im Versuch sind unter sonst gleichen Bedingungen Fließgröße und Belastung einander proportional. Für die Auswertung wird deshalb die Fließgröße durch die entsprechende Maximalkraft geteilt. Dieser Quotient  $Q$  wird als Maß der plastischen Eigenschaften des Muskels verwendet (vgl. Versuche bei konstanter Dehnung).

Die *Länge* eines Muskels wird zu Versuchsbeginn und Ende abgemessen. Längenänderungen während des Versuchs ergaben sich wegen der konstanten Geschwindigkeit der Muskeldehnung und des Schreiberpapiers aus den Kurven, und zwar aus dem Intervall, das von Beginn der Dehnung bis zum Erreichen der Schwellenkraft  $K_0$  reicht.

### Ergebnisse der periodischen Dehnungsversuche an ganzen menschlichen Muskeln

Zu den Versuchen standen 12 menschliche, noch nicht totenstarre Muskeln (*M. sartorius*) zur Verfügung; zwischen Tod und Beginn der periodischen Dehnungen lag meist ein Zeitraum um 2 Std. Außerdem wurden Versuche an totenstarrten menschlichen Muskeln durchgeführt. Aus Vorversuchen zusammen mit Jantzen war bekannt, daß an Hunden- und Kaninchenmuskeln eine häufige periodische Belastung in der Größenordnung von 200 p/cm<sup>2</sup> Muskelquerschnitt bereits zu erheblichen Muskelverlängerungen führen und die Auswertung bzw. Interpretation der Versuchsergebnisse erschweren kann. Die Versuche wurden deshalb mit einer Belastung von nur etwa 20 p/cm<sup>2</sup> Muskelquerschnitt durchgeführt. Eine so geringe Zugkraft reichte nicht aus, um einen waagrecht eingespannten Muskel vollständig vom Boden abzuheben, die Muskeln wurden deshalb in senkrechter Lage hängend untersucht. Dabei werden die Muskeln ständig durch ihr eigenes Gewicht und das Gewicht der unteren Halterung (25 p) belastet, während der Dehnungszeit zusätzlich mit einer Kraft bis zu etwa 20 p/cm<sup>2</sup> Muskelquerschnitt.

Die Versuche wurden in der Regel bei Temperaturen zwischen 22 und 24°C durchgeführt.

Bei lebensfrisch entnommenen menschlichen Muskeln zeigte sich, daß die *Steifheit* in den ersten 5—10 Std nach dem Tod keine erheblichen Veränderungen aufwies; sie stieg dann im Verlauf von etwa 2 Std an und blieb mit geringen Schwankungen auf den hohen Werten (vgl. Abb. 3), auch bei Ausdehnung der Versuche über eine Zeitdauer von 24 Tagen.

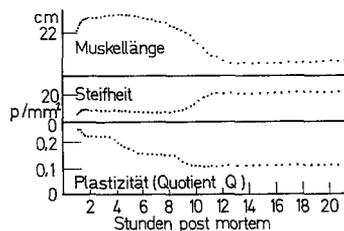


Abb. 3. Beispiel für die Veränderung von Muskellänge, Steifheit und Plastizität eines menschlichen *M. sartorius* während des 1. Tages nach dem Tod. Jeder Punkt der Kurve entspricht einem Meßwert. Die typischen Veränderungen bei Eintritt der Starre (ca. 8—11 Std post mortem) sind zu erkennen: Verkürzung, Versteifung und Abnahme der Plastizität

Die *Länge* der Muskeln blieb zu Beginn der periodischen Dehnungen unverändert oder nahm etwas zu, um dann regelmäßig zuerst langsam und dann schneller abzunehmen. Die Geschwindigkeit der „Kontraktion“ betrug bis zu 0,5 mm/min bei einer Muskellänge von etwa 20 cm (0,25%/min). Insgesamt betrug die Verkürzung unter den gewählten Versuchsbedingungen etwa 5% der Ausgangslänge. Der schnell verlaufende Teil der Kontraktion fiel zeitlich zusammen mit der Zunahme der Steifheit, die beginnende Verkürzung lief jedoch der Änderung der elastischen Eigenschaft (Steifheit) etwas voraus; im Experiment war die beginnende Verkürzung das erste Anzeichen des nahenden Starreeintritts.

Je nach Ruhelage der beiden Einspannpunkte des Muskels in der Dehnungsapparatur und ihrem Abstand führte die Muskelverkürzung zu einer rein isotonen oder zu einer zuerst isotonen und dann isometrischen Kontraktion. Zur isometrischen Kontraktion kam es, wenn die zu Versuchsbeginn vorgegebene Dehnungsreserve durch die Kontraktion aufgebraucht wurde und der zu Versuchsbeginn in der Apparatur hängende Muskel sich zu straffen begann; auch zwischenzeitliche Dehnungsbelastungen unterbrachen den Kontraktionsvorgang nicht erkennbar. Die hängenden, durch ihr eigenes Gewicht und die untere Halterung (25 p) belasteten Muskeln entwickelten Kräfte bis etwa 50 p. Nach den Versuchsergebnissen scheint auch die Entwicklung größerer Kräfte möglich.

Nach Abschluß der Verkürzung, die insgesamt eine Zeit von etwa 2—3 Std in Anspruch nahm, behielten die Muskeln trotz der fortlaufenden Dehnungen etwa 1 Tag ihre Länge, um dann zuerst langsam und dann zunehmend schneller länger zu werden (vgl. Abb. 4). Muskeln, die sich im isometrischen Spannungszustand befanden, begannen sich gleich nach Abschluß der Verkürzung langsam zu verändern.

Die Verlängerung des Muskels dauerte stets mehrere Tage; auch nach 12 Tagen (längste Beobachtungsdauer der Muskellänge) war sie noch nicht vollständig abgeschlossen. Sie verlief mit Ausnahme eines Intervalls etwa am 5.—7. postmortalen Tage weitgehend gleichmäßig; die Geschwindigkeit der Verlängerung betrug im

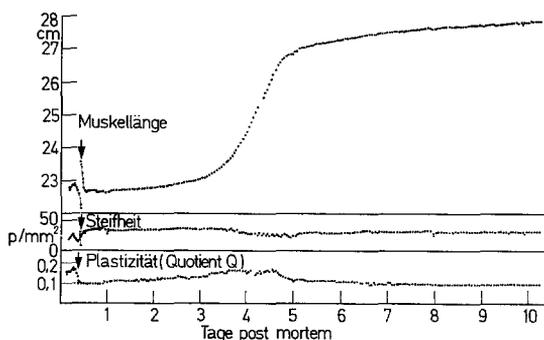


Abb. 4. Beispiel für die Veränderung von Muskellänge, Steifheit und Plastizität eines menschlichen *M. sartorius* während der ersten 10 Tage nach dem Tod. Jeder Punkt der Kurve entspricht einem Meßwert. Etwa in der Mitte der Erstarrungsphase, die an der beginnenden Verkürzung, Versteifung und Abnahme der Plastizität zu erkennen ist (nach etwa 10 Std), wurde die Starre gewaltsam gelöst (Pfeile). Dabei kam es zu einer Verlängerung und Abnahme der Steifheit, anschließend wieder zur Verkürzung und Versteifung (Wiedereintritt der Starre). Am 5. Tag post mortem erfolgte eine Verlängerung des Muskels (Lösen der Starre), gleichzeitig war die Plastizität erhöht

beobachteten Zeitraum etwa 1% der Ausgangslänge pro Tag. Die Verlängerung im Intervall schwankte bei verschiedenen Muskeln stark.

Die gesamte Verlängerung hängt vorwiegend von der Verlängerung im Intervall ab, sie beträgt durchschnittlich etwa 20% der Ausgangslänge.

Der Quotient  $Q$ , Maß für die plastischen Eigenschaften des Muskels, war zu Versuchsbeginn unregelmäßigen Schwankungen ausgesetzt, nach deren Abklingen er noch vor dem Auftreten der Starre konstant und verhältnismäßig hoch bei etwa 0,15—0,20 lag. Mit Einsetzen der Starre sank er deutlich auf Werte um 0,1. Mit dem allmählichen Auftreten der Muskelverlängerung stieg er langsam an, um in dem Intervall rascher Muskelverlängerung Werte um 0,15—0,20 anzunehmen. Anschließend sank der Quotient wieder ab. Das zeitliche Zusammentreffen von Änderungen des Quotienten und Änderungen der Muskelänge zeigt an, daß die plastischen Eigenschaften wesentlich das Einsetzen und Lösen der Starre mitbestimmen.

#### Ergebnisse der periodischen Dehnungsversuche ganzer menschlicher Muskeln mit Brechen der Starre

Menschliche Muskeln wurden *nach* vollständiger Ausprägung der Totenstarre mit einer Kraft von etwa 1 kp je Quadratzentimeter Muskelquerschnitt belastet; während der Belastung war ein deutliches Fließen des Muskels zu beobachten. Die Meßwerte bei periodischer Dehnung änderten sich; die wesentliche und stets beobachtete Veränderung bestand in einer *bleibenden* Verlängerung des Muskels um 10—15% der Ausgangslänge. Die Steifheit sank ab, stieg jedoch im Verlauf von einigen Dehnungen wieder an und erreichte zum Teil wieder den Ausgangswert vor Brechen der Starre. Die plastischen Eigenschaften blieben etwa unverändert.

Wurde der Muskel *während* der Ausbildung der Starre mit etwa 1 kp/cm<sup>2</sup> belastet, so trat ebenfalls eine Verlängerung und ein Absinken der Steifheit ein (vgl. Abb. 4).

Anschließend verkürzte sich der Muskel jedoch wieder. Auch die Steifheit nahm wieder zu.

Die Verlängerung durch Belastung betrug bei diesen Muskeln 5—15% der Ausgangslänge.

Die Gesamtdauer des Starreeintritts von etwa 2—3 Std wurde durch das Brechen nicht verändert. Das Ausmaß des Wiederauftretens der Starre war von der Zeitspanne abhängig, die zwischen Beginn der Starre und Brechen verstrichen war. Je eher die Totenstarre nach Einsetzen der Erstarrung gewaltsam gelöst wurde, desto kräftiger bildete sie sich wieder aus.

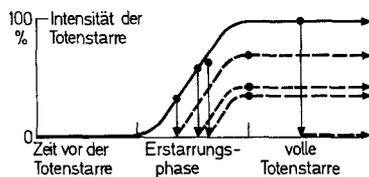


Abb. 5. Halbschematische Darstellung des Verlaufs der Totenstarre am Einzelmuskel. Als Meßwert für die Intensität der Totenstarre wurde die Verkürzung verwendet; die gesamte Verkürzung wurde mit 100% bezeichnet. Die Pfeile sollen das Brechen der Totenstarre andeuten. Der bogenförmige Verlauf der Intensitätskurven entspricht dem Verlauf der Änderungen von Länge und Steifheit des Muskels

Verwendet man Beginn und Ende der Verkürzung der Muskellänge als Zeitpunkte für Beginn und Ende des Eintretens der Starre und das Ausmaß der Verkürzung als Meßwert für die Intensität der Starre und trägt die gefundenen Werte in ein Diagramm auf, so erhält man Abb. 5. Diese Abbildung beschreibt den Verlauf der Totenstarre nach gewaltsamer Lösung.

*Untersuchungen zur Kontraktion der Muskulatur bei Eintritt der Totenstarre in situ*

Durch die folgenden drei Versuche sollte ein Anhaltspunkt über das Ausmaß der Kontraktion menschlicher Skelettmuskulatur mit Eintritt der Starre gewonnen werden.

Bei der Leiche einer 17 Jahre alt gewordenen Frau (Todesursache stumpfes Schädel-Hirn-Trauma) zeigten sich 6 Std nach dem Tod noch keine Zeichen beginnender Starre an der Skelettmuskulatur, auch nicht im Kieferbereich. Die Leiche wurde bei Zimmertemperatur auf den Rücken gelagert, die Streckmuskulatur des Ellenbogengelenks in der Gegend des Olecranon am rechten Arm völlig durchtrennt und die Hautwunde durch fortlaufende Naht verschlossen. Anschließend wurden durch Unterlegen von Klötzen beide Arme so gelagert, daß die Unterarme frei schwebten, sich frei bewegen ließen und im indifferenten Gleichgewicht gegenüber Abduktion und Adduktion waren; die Unterarme waren dabei im Ellenbogengelenk leicht gebeugt.

Bei fortlaufender Beobachtung zeigte sich in den nächsten 62 Std keine erkennbare Beugung im Ellenbogengelenk, trotz kräftiger Entwicklung der Starre, was am kontralateralen Gelenk geprüft wurde.

In einem zweiten Versuch wurde die Leiche eines 65 Jahre alt gewordenen Mannes (Todesursache Verbluten aus einem arrodierenden Lungengefäß bei Tbc) 2 Std nach dem Tod in gleicher Weise gelagert wie eben beschrieben und ebenfalls die Streckmuskulatur des rechten Oberarmes durchtrennt. Im Gegensatz zum vorhergehenden Versuch wurde das Ellenbogengelenk völlig gestreckt. Nach Ablauf von 9 Std, vom Tod aus gerechnet, begann sich das Ellenbogengelenk leicht zu beugen; insgesamt führte der Unterarm 25 cm distal vom Ellenbogen eine Bewegung von 5 mm aus.

In einem weiteren Versuch wurden an derselben Leiche des 65 Jahre alt gewordenen Mannes die oberflächlichen Muskelschichten der Innenseite des rechten Beines kurz nach dem Tod freipräpariert und das Bein so gelagert, daß die einzelnen Muskeln frei durchhängen konnten. Zur Vermeidung von Austrocknung wurden die Muskeln mit einem feinen Wassernebel besprüht. Der präparierte Bereich wurde vom selben Standort aus etwa alle Stunden photographiert.

Die Auswertung der Photographien ergab eine geringe Kontraktion der einzelnen Muskeln, die etwa 7 Std nach dem Tode einsetzte.

*Histologische Untersuchungen an Muskelgewebe*

Es wurden an 5 Leichen Teile der Oberschenkelmuskulatur vor Beginn der Starre, während der Erstarrungsphase, nach vollständig ausgebildeter Starre und nach gewaltsamem Lösen der Starre entnommen. Die Proben wurden in 10%igem Formalin fixiert und in Paraffin eingebettet. Die Schnitte wurden mit Hämalaun-



Abb. 6. Bildbeispiel für die morphologischen Veränderungen durch Brechen der Totenstarre. Bei gebrochener Starre (oberer Bildteil) liegen die Querstreifen weiter auseinander als bei ungebrochener Starre (unterer Bildteil). Vergrößerung 1:360

Eosin gefärbt. Im mikroskopischen Bild zeigte sich, daß bei den im totenstarren Zustand fixierten Muskelstücken die Querstreifung im Vergleich zu im frischen Zustand fixiertem Material deutlicher ausgeprägt war. Bei den Muskelstücken, die vor und nach Brechen der voll ausgebildeten Starre fixiert und geschnitten wurden, fand sich ein deutlicher Unterschied im Abstand der Querstreifung (vgl. Abb. 6).

Bei Muskeln mit gewaltsam gelöster Starre lagen die Querstreifen weiter auseinander als bei unverändertem totenstarren Muskel. Auch war die Breite der Querstreifen größer. Die Untersuchungen gaben damit Hinweise auf morphologische Veränderungen an den Muskelfasern bei gewaltsamer Lösung der Starre.

### Diskussion

Über die Totenstarre liegt eine Fülle von Veröffentlichungen vor, die sich mit dem Unterschied der mechanischen Eigenschaften von lebensfrischer und totenstarrer Muskulatur befassen. Die vorwiegend am isolierten Tiermuskel durchgeführten Untersuchungen haben ergeben, daß mit dem Eintreten der Starre eine Versteifung des Muskels verbunden ist. Bis vor kurzem bestand Unklarheit darüber, ob mit dem Starreeintritt eine Kontraktion der Muskulatur verbunden ist. Zur Klärung dieser Frage hat Forster beigetragen. Bei seinen grundlegenden Untersuchungen fand er am Rattenmuskel eine Abhängigkeit der Kontraktion von der Belastung; bei Zimmertemperatur trat die Kontraktion besonders kräftig bei einer Vorspannung um ca.  $0,1 \text{ p/mm}^2$  auf. Forster fiel bei Versuchen unter höherer Temperatur auf, daß das Lösen der Starre mit einer leichteren Verformbarkeit der „plastischen Elemente“ der Muskulatur verbunden war.

Die Durchsicht der Literatur ergab weiter, daß die Veränderungen bei Eintritt der Starre schon eingehend untersucht worden waren, während die Lösung der

Totenstarre bis auf die Versuche von Forster noch nicht experimentell ausführlich studiert worden sind. Ebenso liegen auch keine fortlaufenden Messungen über Änderungen der mechanischen Eigenschaften bei „gewaltsamem Lösen“ und Wiederausbilden der Totenstarre vor.

Ferner zeigte sich, daß Serienuntersuchungen am menschlichen Muskel und insbesondere genaue Beobachtungen des Verlaufs der Totenstarre mit fortlaufender Aufzeichnung der mechanischen Eigenschaften fehlten. Dies mag vor allem auf die apparativen Schwierigkeiten bei solchen Verlaufsbeobachtungen zurückzuführen sein.

Aufgabe der vorliegenden Arbeit war es, einen Beitrag zur Erforschung der bisher ungeklärten Probleme zu leisten. Dabei werden auch Ergebnisse einer früheren Arbeit benötigt, aus denen sich u. a. ergibt, daß die mit Eintreten der Starre am ganzen Muskel zu beobachtenden Veränderungen der mechanischen Eigenschaften auch an der isolierten menschlichen Skelettmuskelfaser ablaufen. Hieraus läßt sich schließen, daß die Starre ein Phänomen ist, das die Einzelfaser betrifft und nicht an den Gewebeverband der Muskulatur gebunden ist.

An Hand der Ergebnisse der automatisierten Dehnungsversuche an menschlichen Muskeln werden hauptsächlich folgende Fragenkomplexe diskutiert:

- welche Veränderungen treten am isolierten Muskel im Verlauf der Starre auf,
- wie verhält sich der Muskel bei gewaltsamem Lösen der Starre und
- was bedeuten die am isolierten Muskel erhobenen Befunde für den Ablauf der Totenstarre an der Leiche.

Bei der Besprechung unserer Befunde werden u. a. die Begriffe Steifheit und Plastizität verwendet. Unter Steifheit verstehen wir die Größe der Steigung der Spannungs-Dehnungs-Kurve, sie entspricht dem Elastizitätsmodul. Bei großer Steifheit ist zum Dehnen viel Kraft nötig. Der Zahlenwert der Steifheit hängt von dem Ausmaß der Dehnung ab, er ist bei niedrigen Dehnungen klein und steigt bei einer Belastung von etwa 10—20 p/mm<sup>2</sup> zu einem Maximum an, das bei lebensfrischer und totenstarrer Muskulatur etwa gleich ist; im Bereich niedriger Belastungen sind erhebliche Unterschiede der Steifheit lebensfrischer und totenstarrer Muskulatur zu finden (Zink). Für die hier dargestellten Versuche mit Prüfung des Verlaufs der Starre wird die Steifheit bei niedriger Belastung verwendet. Dies vor allem deshalb, weil nur bei sehr geringer Belastung eine wesentliche Störung des Ablaufs der Starre infolge ständiger gewaltsamer Lösung vermeidbar erscheint. Weiter ist bei Angaben über die Größe der Steifheit zu berücksichtigen, daß sie von Vordehnungen abhängt. Aus früheren Untersuchungen ergibt sich, daß bei mehrfacher Dehnung um gleiche Beträge die Steifheit von der ersten zur zweiten Dehnung etwa auf das Doppelte zunimmt, bei weiteren Dehnungen nur mehr geringfügig; die Steifheit strebt also rasch einem Grenzwert zu. Deshalb ist die Steifheit auch bei mehrfachen Dehnungen als Meßgröße verwendbar. Ihre Abhängigkeit von der Dehnungsgeschwindigkeit fällt nicht ins Gewicht, da bei den Versuchen die Dehnungsgeschwindigkeit konstant gehalten wurde.

Die Plastizität beschreibt die elastische Unvollkommenheit der Muskulatur, nämlich die viskösen Eigenschaften und die elastischen Nachwirkungen. Wie sich aus den Experimenten ergibt, vermindert sich bei einem Muskel, der in gedehntem Zustand gehalten wird, die Kraft, die zum Aufrechterhalten der Dehnung nötig ist, mit dem Logarithmus der Zeit, während der die Dehnung besteht. Der Kraftabfall

wird bei den automatischen Dehnungsversuchen registriert und dient zur Beschreibung der plastischen Eigenschaften.

Das logarithmische Verhalten der belasteten Muskulatur, das unseres Wissens bisher nur für Wollhaare (Feughelman u. Haly, 1962) und Hautstreifen (Zink, 1965) beschrieben wurde, ermöglicht eine theoretische Deutung: Der Muskel ist demnach, was sein passives mechanisches Verhalten unter Belastung betrifft, als ein statistisches Gitterfasernetz zu verstehen. Unter dem Einfluß einer äußeren Kraft kommt es zur Lösung überlasteter Verknüpfungsstellen des Gitterwerks und damit zu der gefundenen inneren Verlängerung. Unter diesen einfachen Voraussetzungen folgert mathematisch das gefundene logarithmische Verhalten, wie bereits früher ausgeführt. Aus welchen Komponenten das Gitterwerk gebildet wird, läßt sich vorläufig nicht entscheiden, es dürfte sich jedoch um Elemente der Einzel-faser des Skelettmuskels handeln.

#### *Änderungen der mechanischen Eigenschaften im Verlauf der Totenstarre*

Bei den periodischen vollautomatisierten Dehnungsversuchen an ganzen menschlichen Muskeln waren in den ersten Stunden des Versuchs keine charakteristischen Veränderungen der mechanischen Eigenschaften zu beobachten. 6—10 Std post mortem setzte eine 2—3 Std dauernde deutliche Veränderung ein; der Muskel verkürzte sich aktiv, seine Steifheit nahm zu, die plastischen Eigenschaften nahmen ab. Anschließend folgten etwa 5 Tage geringerer Veränderung. Zwischen etwa dem 5. und 7. Tag nahm die Länge deutlich zu, gleichzeitig war die Plastizität des Muskels erhöht. Die Steifheit änderte sich in diesem Bereich nicht. In der folgenden Zeit, auch bei Ausdehnung der Versuche bis zu 3 Wochen, waren die Veränderungen nur noch sehr gering.

Durch die Gesetzmäßigkeiten im Ablauf der Veränderungen, auf deren Bedeutung für die forensische Praxis erst kürzlich wieder Mallach u. Mittmeyer hingewiesen haben, lassen sich mehrere Phasen unterscheiden, die z.T. einer Einteilung entsprechen, wie sie auch Bate-Smith u. Bendall benutzt haben.

*Phase 1.* Nach dem Tod tritt zunächst eine Phase der Erschlaffung ein mit nur geringer Verlängerung des Muskels und Abnahme der plastischen Eigenschaften. Die Veränderungen in dieser Phase lassen sich als Folge der periodischen Dehnungen mit Parallelordnung und Ausrichtung der elastischen Elemente in der Muskulatur erklären. Dafür spricht auch, daß diese Veränderungen bei den Versuchen nicht zu finden waren, wenn die periodischen Dehnungen unterbrochen wurden.

*Phase 2.* 6—10 Std nach dem Tode folgt eine 2—3 Std dauernde Erstarrungsphase. Hier zeigen sich in unseren Versuchen die deutlichsten Veränderungen am Muskel: Die Steifheit nahm im Bereich geringer Dehnungen kontinuierlich zu, die Plastizität nahm ab, der Muskel wurde kürzer. Diese Befunde sind mit den Angaben in der Literatur zu vereinbaren: Tierexperimentell war eine Zunahme der Steifheit bereits von Nakamura (1924) beschrieben und seitdem immer wieder bestätigt worden. Sie wird von vielen Autoren als eine der wesentlichsten Veränderungen bei Eintritt der Starre betrachtet. Die von uns gefundene Abnahme der Plastizität deckt sich mit den Befunden von Forster an der Ratte.

*Phase 3.* In der folgenden Zeit, etwa bis zum 5. Tag nach dem Tode, finden sich keine wesentlichen Veränderungen der mechanischen Eigenschaften. Die in

einigen Fällen aufgetretene geringfügige Verlängerung des Muskels läßt sich auf die periodischen Dehnungen zurückführen, weil sie bei Unterbrechung der Dehnungsversuche ausblieb. In dieser Phase wurden von Bate-Smith u. Bendall auch nur geringe Veränderungen der biochemischen Werte gefunden.

*Phase 4.* Etwa zwischen 5. und 7. Tag tritt allmählich eine bleibende Verlängerung des Muskels mit gleichzeitiger Erhöhung der plastischen Eigenschaften auf. Diese Verlängerung kann nicht als Folge der periodischen Dehnungen angesehen werden, da sie sich bei Unterbrechung der Dehnung unter der Belastung mit dem Eigengewicht des Muskels weiter ausbildet. Auf die Erhöhung der Plastizität hat Forster nach Versuchen im Brutschrank bei 38°C mit ruckartiger Verlängerung der Muskeln nach 6 Std unter Belastung hingewiesen; er zog den Schluß, daß die Lösung der Starre mit einer „leichteren Verformbarkeit der plastischen Elemente einsetzt“. Zu bemerken ist, daß mit der in unseren Versuchen experimentell gesicherten Verlängerung des Muskels keine Verlängerung der Steifheit verbunden war.

*Phase 5.* Durch Ausdehnung der Versuchsdauer über 1 Woche ließ sich noch eine letzte Phase experimentell erfassen; in dieser nahm das Ausmaß der Verlängerung stark ab, entsprechend auch die Plastizität; Veränderungen der Steifheit wie in der 3. und 4. Phase wurden nicht mehr beobachtet. Untersuchungen anderer Autoren hierüber liegen nicht vor.

Einen Sonderfall im Verlauf der Totenstarre stellt das *gewaltsame Lösen* (Brechen) der Starre dar. Wurde im Versuch während der Erstarrungsphase oder der voll ausgebildeten Starre der Muskel durch Belastung mit ca. 1 kp/cm<sup>2</sup> 10 sec lang gedehnt, so kam es zu einer Verlängerung des Muskels und zu einer Abnahme der Steifheit. Bei Belastung während der Erstarrung trat nach der Belastung die Versteifung und Verkürzung wieder auf, wenn auch in geringerem Ausmaß. Bei Belastung des vollständig erstarrten Muskels konnte regelmäßig eine bleibende Verlängerung beobachtet werden. Als Erklärung für diese Verhaltensunterschiede kommt in Frage, daß im Muskelverband die einzelnen Muskelfasern nicht gleichzeitig, sondern in zeitlichen Abständen während der Erstarrungsphase des ganzen Muskels nacheinander erstarren. Diese Annahme wird durch frühere Untersuchungen bestätigt. Es war nämlich bei Experimenten an einzelnen Skelettmuskelfasern aufgefallen, daß die für die Erstarrung typischen Veränderungen der Spannungs-Dehnungs-Kurve in einem Zeitraum von weniger als 15 min auftreten. Die Dauer der Erstarrungsphase am Ganzmuskel beträgt dagegen 2—3 Std.

Es ist zu vermuten, daß das Wiederauftreten der Starre nur durch die Muskelfasern zustande kommt, die beim Vorgang des Brechens noch nicht starr waren. Die bereits erstarrten Fasern werden beim Brechen irreversibel verlängert und können zum Wiedereintreten der Starre nicht beitragen. So läßt sich auch erklären, daß nach Brechen die Starre um so schwächer wiederkehrt, je weiter die Ausbildung der Starre vor dem Brechen fortgeschritten war.

Nach Erstarrung aller Fasern, bei voll ausgeprägter Starre, kann nach gewaltsamer Lösung eine Verkürzung und Versteifung nicht mehr eintreten.

Histologische Untersuchungen stützen die Feststellung, daß dem gewaltsamen Lösen der Starre eine Verlängerung der Muskelfasern zugrunde liegt. Die Quersreifen in Muskelschnitten waren in Schnitten nach gewaltsamer Lösung breiter und die Abstände bis auf das Doppelte vergrößert.

*Vergleich der Befunde am isolierten Muskel mit den Befunden über den Ablauf der Starre an der Leiche*

Unsere Untersuchungen waren am isolierten Muskelgewebe durchgeführt worden. Es erhebt sich damit die Frage, inwieweit die Versuchsergebnisse auf den Eintritt der Starre an der Leiche übertragbar sind. Theoretisch ist es wegen der Änderung der Umweltbedingungen durch die Entnahme möglich, daß im Ablauf der Totenstarre am isolierten und in situ belassenen Muskel Verschiedenheiten auftreten. Zur Klärung dieser Frage sind Parallelversuche angestellt worden, bei denen der Eintritt der Totenstarre an der Leiche, insbesondere an der unteren Extremität, und die Veränderungen an einem isolierten *M. sartorius* derselben Leiche gleichzeitig verfolgt werden konnte.

Die Leichen befanden sich im selben Raum wie die Versuchsapparatur und damit unter etwa gleichen Temperaturbedingungen. Die Totenstarre an den unteren Extremitäten der Leichen begann regelmäßig etwa 1 Std früher als die Erstarrungsphase am isolierten, in Stickstoffatmosphäre untersuchten *M. sartorius*. Ob diese zeitliche Verschiebung auf einem Unterschied zwischen isoliertem Muskel und Muskel in situ beruht oder ob der *M. sartorius* auch in der Leiche später als andere Muskeln am Bein erstarrt, konnte nicht entschieden werden.

Die Verschiebung um 1 Std stellt keine sehr große Abweichung dar. Sie steht nicht der Annahme entgegen, daß gleiche Vorgänge sowohl der Totenstarre an der Leiche als auch den Veränderungen am isolierten Muskel zugrunde liegen. Nach unseren Experimenten erscheint es daher berechtigt, den verkürzten und versteiften Muskel als totenstarr zu bezeichnen, wie dies in der Literatur bereits in den zitierten tierexperimentellen Arbeiten geschah.

Somit kann das Erstarren der Muskulatur der Leiche auf eine Veränderung von Elastizität, Plastizität und Länge der Muskeln zurückgeführt werden. Die Änderung der Steifheit allein reicht nicht aus, um die starre Unbeweglichkeit der Glieder einer totenstarrten Leiche zu erklären, denn die Unterschiede der Spannungs-Dehnungs-Kurve totenstarrer und frischer Muskeln zeigen Änderungen nur im Größenbereich einer Zehnerpotenz. Wesentlich für das Phänomen der Totenstarre an der Leiche ist auch die Verkürzung des Muskels bei einer in situ physiologischerweise bestehenden geringen Vordehnung. Die Verkürzung der Muskulatur führt zu einer Verschiebung der Arbeitspunkte der totenstarrten Muskeln in den steilen Kurventeil der Spannungs-Dehnungs-Kurve; damit setzt die totenstarrte Muskulatur der Leiche auch geringen Längenänderungen erhebliche Kräfte entgegen.

Den Eintritt der Verkürzung der Muskulatur in situ konnten wir an den freipräparierten oberflächlichen Muskeln des Oberschenkels verfolgen. Voraussetzung für eine Verkürzung ist übereinstimmend mit Forster eine Vorspannung, die physiologischerweise in Ruhe meist vorhanden ist. Die Lösung der Starre kann nach unseren Befunden auf eine Verlängerung des Muskels zurückgeführt werden; eine Abnahme der Steifheit ist nicht erforderlich und wurde auch nicht gefunden. Die weichere Beschaffenheit des Muskels nach Lösen der Starre an der Leiche läßt sich auch ohne Abnahme der Steifheit durch leichtere Verschiebbarkeit der Muskelfasern nach der Lösung erklären.

Die Beobachtung von Marsh sowie Bate-Smith u. Bendall an Tiermuskeln, daß über die Dauer von 5—7 Tagen keine erhebliche Abnahme der Steifheit auftritt,

ist zu bestätigen. Die Folgerung von Bate-Smith u. Bendall, daß deshalb eine Lösung der Starre am isolierten Muskel nicht auftreten würde, berücksichtigt nicht die Möglichkeit der Verlängerung, die wir experimentell beweisen konnten. Am isolierten Muskel bedarf es mit fortschreitender Zeit nach dem Tode nur sehr geringer Kräfte, um eine Verlängerung herbeizuführen. Bei der länger liegenden Leiche reicht offensichtlich u. a. die Schwerkraft zur Lösung der Starre unter Verlängerung der Muskulatur aus.

Mit einer Verlängerung der Muskulatur lassen sich auch zwanglos die Veränderungen beim gewaltsamen Lösen der Starre erklären. Die Unterschiede des Wiedereintretens der Starre je nach Zeitpunkt des Brechens wurden bereits für den isolierten Muskel erklärt und dürften auf die Leiche übertragen werden. Die Richtigkeit dieser Auffassung wird gestützt durch die histologischen Untersuchungen von Muskelschnitten mit dem Nachweis eines größeren Abstandes der Querstreifung und Verbreiterung der einzelnen Streifen nach gewaltsamen Lösen der Starre.

Entscheidend ist, daß nach Erstarren aller Fasern ein gewaltsames Beugen oder Strecken eines Gelenkes auch an der Leiche zu einer bleibenden Verlängerung aller Fasern der entsprechenden Muskulatur führen muß. Ein Wiedereintreten der Starre ist nur möglich, solange ein Teil der Fasern noch nicht erstarrt war.

### Literatur

- Bate-Smith, E. C.: Changes in elasticity of mammalian muscle undergoing rigor mortis. *J. Physiol. (Lond.)* **96**, 176 (1939).
- Bate-Smith, E. C., Bendall, J. R.: Rigor mortis and adenosine triphosphate. *J. Physiol. (Lond.)* **106**, 177 (1947).
- Bate-Smith, E. C., Bendall, J. R.: Delayed onset of rigor mortis after administration of myosin. *J. Physiol. (Lond.)* **107**, 2 P (1948).
- Bate-Smith, E. C., Bendall, J. R.: Factors determining the time course of rigor mortis. *J. Physiol. (Lond.)* **110**, 47 (1949).
- Bate-Smith, E. C., Bendall, J. R.: Changes in muscle after death. *Brit. med. Bull.* **12**, 230 (1956).
- Baumann, W.: Untersuchungen über die Muskelstarre. *Pflügers Arch. ges. Physiol.* **167**, 117 (1917).
- Beck, R.: Untersuchungen über die mechanischen Eigenschaften des totenstarren, menschlichen Skelettmuskels. *Med. Diss., Erlangen* 1968.
- Bendall, J. R.: The shortening of rabbit muscles during rigor mortis: its relation to the breakdown of adenosine triphosphate and creatinephosphate and to muscular contraction. *J. Physiol. (Lond.)* **114**, 71 (1951).
- Berg, S. P.: Nervensystem und Totenstarre. *Dtsch. Z. ges. gerichtl. Med.* **39**, 429 (1948/49).
- Bierfreund, M.: Untersuchungen über die Totenstarre. *Pflügers Arch. ges. Physiol.* **43**, 193 (1888).
- Buchthal, F.: The mechanical properties of the single striated muscle fibre at rest and during contraction and their structural interpretation. *Det. Kgl. Dansk. Vidensk. Selskab. Biol. Medd.* **17**, 2 (1942).
- Dotzauer, G., Tamaska, L.: Hautveränderungen an Leichen. In: *Handbuch der Haut- und Geschlechtskrankheiten* von J. Jadassohn, Erg.-Werk I, 1. Bd. Normale und Pathologische Anatomie der Haut, Hrsrg. von O. Gans und G. K. Steigleder. Berlin-Heidelberg-New York: Springer 1968.
- Feughelman, M., Haly, A. R.: The physical properties of wool fibres at various regains. *Textile Res. J.* **32**, 227 (1962).
- Forster, B.: The plastic and elastic deformation of skeletal muscle in rigor mortis. *J. forens. Med.* **10**, 91 (1963a).

- Forster, B.: The contractile deformation of skeletal muscle in rigor mortis. *J. forens. Med.* **10**, 133 (1963 b).
- Forster, B.: The plastic, elastic and contractile deformation of the heart muscle in rigor mortis. *J. forens. Med.* **11**, 148 (1964).
- Heindl, H.: Untersuchungen über die elastischen Eigenschaften von isolierten, menschlichen Skelettmuskelfasern unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses der Totenstarre. *Med. Diss.*, Erlangen 1968.
- Jantzen, L.: Untersuchungen über die Änderung mechanischer Eigenschaften des Skelettmuskels von Hunden und Kaninchen im Verlauf der Totenstarre. *Med. Diss.*, Erlangen (im Druck).
- Klingenbiehl, A.: Untersuchungen über die Muskelstarre. *Inaug.-Diss.*, Halle 1887.
- Laves, W.: Über die Totenstarre. *Dtsch. Z. ges. gerichtl. Med.* **39**, 186 (1948).
- Lawrie, R. A.: The onset of rigor mortis in various muscles of the draught horse. *J. Physiol. (Lond.)* **121**, 275 (1953).
- Mallach, H. J., Mittmeyer, H.-J.: Totenstarre und Totenflecken: Methodische Auswertung der Todeszeit mit Hilfe maschineller Datenverarbeitung. *Z. Rechtsmedizin* **69**, 70 (1971).
- Marsh, B. B.: Observations on rigor mortis in whole muscle. *Biochim. biophys. Acta (Amst.)* **9**, 127 (1952).
- Marsh, B. B.: Shortening and extensibility in rigor mortis. *Biochim. biophys. Acta (Amst.)* **12**, 478 (1953).
- Meixner, K.: Die Totenstarre beim Menschen. *Dtsch. Z. ges. gerichtl. Med.* **2**, 298 (1923).
- Morgenstern, S.: Experimentelle Ergebnisse zur Frage des Temperatureinflusses auf die Leichenstarre. *Dtsch. Z. ges. gerichtl. Med.* **9**, 718 (1927).
- Nakamura, I.: Untersuchungen über die elastischen Eigenschaften der Muskeln bei verschiedenen funktionellen Zuständen. III. Mitt. Die Änderungen der Zugresistenz des quergestreiften Kaltblütermuskels während der Toten- und Wärmestarre. *Pflügers Arch. ges. Physiol.* **205**, 92 (1924).
- Nysten, H.: *Recherches de physiologie et de chimie pathologique*. Paris, 1811. *Hufelands Journal* **43** (1816).
- Oppenheim, F., Wacker, L.: Das Ausbleiben der postmortalen Säurebildung im Muskel als Ursache der verschiedenen Intensität der Totenstarre menschlicher Leichen. *Berl. klin. Wschr.* **1919 II**. Zit. nach Merkel, H.
- Perry, S. V.: Relation between chemical and contractile function and structure of the skeletal muscle cell. *Physiol. Rev.* **36**, 1 (1956).
- Pieper, H., Reichel, H., Wetterer, E.: Das Verhalten des ruhenden Skelettmuskels unter dem Einfluß aufgezwungener sinusförmiger Längenänderungen. *Z. Biol.* **104**, 469 (1951).
- Reichel, H.: *Muskelpysiologie*. Berlin-Göttingen-Heidelberg: Springer 1960.
- Schmidt, O., Forster, B., Döhring, G., Schulz, G.: Untersuchungen über die kontraktile, elastische und plastische Verformung des totenstarren Muskels und die Beziehung der Starre zum postmortalen Stoffwechsel. *Acta Med. leg. soc. (Liège)* **17**, 37 (1964).
- Villanova, Y., Morales, R.: *Rev. Med. legal Colomb.* **15**, 65 (1960). Zit. nach Heindl.
- Zink, P.: Methoden zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften der menschlichen Leichenhaut. *Dtsch. Z. ges. gerichtl. Med.* **56**, 349 (1965).
- Zink, P.: Über das Verhalten des menschlichen Skelettmuskels bei Dehnung während des Verlaufs der Totenstarre. *Habil.-Schrift*, Erlangen 1970.
- Zink, P.: Mechanische Eigenschaften lebensfrischer und totenstarrer menschlicher Skelettmuskelfasern und ganzer Muskeln. *Z. Rechtsmedizin* **70**, 163 (1972).

Priv.-Doz. Dr. med. Dr. rer. nat. P. Zink  
Institut für Rechtsmedizin  
der Universität Erlangen-Nürnberg  
D-852 Erlangen, Universitätsstraße 22  
Bundesrepublik Deutschland