

## Eine neue Methode zur Messung der Totenstarre

Von

G. NEMITZ, W. PARTMANN und D. SCHARRA\*

Mitteilung aus der Bundesforschungsanstalt für Lebensmittelfrischhaltung, Karlsruhe

Mit 8 Textabbildungen

(Eingegangen am 1. Februar 1960)

Bei der Qualitätsbeurteilung von Fleisch und Fisch spielt bekanntlich der zeitliche Ablauf der Totenstarre eine große Rolle. Wenn man in den letzten Jahren auch neue Einblicke in das komplexe Geschehen bekommen hat<sup>1</sup>, das den Ablauf der Totenstarre bestimmt, fehlt es doch an ausreichenden Unterlagen über die Zeitabhängigkeit der *Rigor*-Veränderungen, speziell bei den Fischen. Aus Gründen der Qualitätsverbesserung und aus arbeitstechnischen Erwägungen sind aber Hochseefischerei und Fischindustrie in hohem Maße daran interessiert, genaueren Einblick in den Verlauf der Totenstarre zu erhalten. Im Hinblick auf die zunehmende Tendenz, Fisch auf See zu gefrieren, bedarf vor allen Dingen die Frage einer Klärung, ob es günstiger ist, Fisch vor Beginn der Totenstarre oder nach Erreichen des Starrehöhepunktes zu gefrieren. Auch beim Warmblüterfleisch interessiert das Problem, da insbesondere beim Waldfleisch, das im *Praerigor*-Zustand gefroren wurde, beim späteren Auftauen eine starke Kontraktur gefunden wurde, die mit großen Tropfsaftverlusten verbunden war<sup>2</sup>. Exakte quantitative Messungen des *Rigor*-Ablaufes sind allerdings bei Fischen wesentlich schwieriger als beim isolierten Säugetiermuskel. Vor allen Dingen stört die regelmäßige Metamerie der Fischmuskulatur und die damit verbundene geringe Länge der einzelnen Muskelfasern.

Wie beim Säugetiermuskel, so ist auch bei den postmortalen Vorgängen im Fischmuskel mit Konsistenzveränderungen zu rechnen.

STEINER hat bei Säugetiermuskeln den gesamten *Rigor*-Verlauf über die „Zähigkeitsveränderungen“ gemessen<sup>3</sup>. Er benutzte den Kauapparat nach WOLODKIEWITSCH. Bei der Messung wird das zu prüfende Material zwischen zwei Leisten mit halbzylindrischer Kante zerquetscht. Der Apparat, der inzwischen weiter vervollkommenet wurde und auch universell für andere Arten der Konsistenzmessung benutzt werden kann<sup>4</sup>, zeichnet zugleich ein Kraft-Weg-Diagramm des Quetschvorganges auf.

\* D.N.P.A. — D.I.P.O.A., Ministério da Agricultura, Rio de Janeiro, Brasilien, als Gastwissenschaftler der Bundesforschungsanstalt.

<sup>1</sup> PARTMANN, W.: Arch. Fischereiwiss. 5, 159—170 (1954).

<sup>2</sup> TANAKA, T., u. K. TANAKA: Studies of the “drip” from frozen whalemeat. Biochemical condition of whalemeat prior to freezing and cold storage of frozen meat. 9. Intern. Gefrierkongreß, Paris 1955. — SHARP, J. G., u. B. B. MARSH: Whalemeat: Production and preservation. S. 47. DSIR Food Invest. Spec. Rep. No. 58, London: H. Maj. Stat. Off. 1953.

<sup>3</sup> STEINER, G.: Z. Fleisch- u. Milchhyg. 50, 61 u. 74 (1939/40); Arch. Hyg. Bakt. 121, 193—209 (1939).

<sup>4</sup> GRÜNEWALD, TH.: Diese Z. 105, 1—12 (1957).

Eigene Versuche mit der gleichen Apparatur an Fischmuskeln ergaben, daß trotz der Anpassung der Quetschleisten an die geringe Faserlänge der Großteil der Muskulatur für diese Messungen unbrauchbar ist. Nur wenige Metamere der Gesamtmuskulatur liefern im Querschnitt rechteckige Faserblöcke der gewünschten Dimensionen mit genau senkrecht zum Querschnitt verlaufender Faserrichtung. Wie beim Rindermuskel<sup>1</sup> erwies es sich als zweckmäßig, die Fischmuskelproben vor dem Versuch in 0,5% iger Kochsalzlösung zu kochen. Nur so werden bei erhöhter Druckfestigkeit deutliche Bruchgrenzen und im Diagramm ausgeprägte Maxima erhalten. Leider fanden wir bei Anwendung dieser Methode innerhalb der Seitenrumpfmuskulatur eines Tieres beträchtliche Streuungen. Im Rindermuskel (*M. semitendinosus* und *M. semimembranosus*) waren von STEINER bereits vor Erreichen des Rigor-Maximums Streuungen der Meßwerte von  $\pm 25\%$  gefunden worden.

Da man bei den üblicherweise mit Schleppnetzen gefangenen Seefischen im allgemeinen mit einer starken Erschöpfung der Tiere zum Zeitpunkt des Todes rechnen muß<sup>2</sup>, ist ohnehin eine geringe Ausprägung des Rigor-Maximums zu erwarten. Infolgedessen ist zur Messung dieser Vorgänge eine Methode erwünscht, die geringere Abweichungen der ermittelten Werte liefert. Am einfachsten könnte das geschehen, wenn ein und dieselbe Probe nicht durch den Meßvorgang irreversibel verändert würde, sondern entweder dauernd oder in zeitlichen Abständen immer wieder benutzt werden könnte.

Die Durchsicht der älteren, von STEINER zitierten Literatur zur Konsistenzmessung an Lebensmitteln lehrt, daß die bisher benutzten Geräte im allgemeinen entweder die Scherfestigkeit messen oder die Eindrucktiefe bei konstanter Kraft oder die Kraft bei konstanter Eindrucktiefe. Auch in neueren Untersuchungen<sup>3</sup> zur Konsistenz von Lebensmitteln werden Geräte benutzt, die nach einem der angegebenen Prinzipien arbeiten und in den meisten Fällen die einmal gemessenen Proben für weitere Messungen unbrauchbar machen.

Im folgenden soll über eine neue Methode und das dazu entwickelte Gerät berichtet werden, welches es erlaubt, über Torsionsmessungen an einer Muskelprobe oder einem ganzen Fisch den zeitlichen Ablauf der Rigor mortis-Veränderungen zu messen.

### Grundlagen

Setzt man Muskelgewebe der Wirkung einer deformierenden Kraft aus und wird später die Kraftwirkung aufgehoben, so wird das Gewebe nahezu wieder seine ursprüngliche Form annehmen, insofern seine Elastizitätsgrenze nicht überschritten wird. Es verhält sich also annähernd wie ein elastischer Körper. Genaueren Einblick in den Grad der Elastizität des Muskelgewebes haben vor allen Dingen Dehnungs- und Entdehnungsversuche gegeben (Zusammenfassende Darstellung der Muskel-elastizität bei REICHEL)<sup>4</sup>. Wird ein frischer Skelettmuskel gedehnt und wieder vollständig entdehnt, so bleibt eine irreversible Verlängerung bestehen. Der Muskel nimmt eine neue Gleichgewichtslänge an. Wird dieser Dehnungs-Entdehnungs-Versuch wiederholt, verlängert sich der Muskel wiederum um einen kleinen Betrag irreversibel. Jedoch ist diese Verlängerung kleiner als im vorherigen Versuch. Der-

<sup>1</sup> Zit. S. 261, Anm. 3.

<sup>2</sup> Zit. S. 261, Anm. 1.

<sup>3</sup> MARSH, B. B.: Biochem. biophys. Acta 9, 127—132 (1952). — GUTSCHMIDT, J., u. W. KLOTZ: Industr. Obst- u. Gemüseverwert. 41, 157—161 (1956). — PROCTOR, B. E., S. DAVISON, G. J. MALECKI u. M. WELCH: Food Technol. 10, 471—477 (1955). — MEBSTORFF, J.: Kurze Mitt. Inst. Fischereibiol. Nr. 5. Univ. Hamburg: 1954. — KUPRIANOFF, J.: Kältetechnik 5, 250—252 (1953).

<sup>4</sup> REICHEL, H.: Ergebn. Physiol., 47, 469—554 (1952).

artige Experimente zeigen deutlich, daß der Muskel nicht vollkommen elastisch ist. Er besitzt offenbar neben den stark ausgeprägten elastischen auch plastische Strukturen, die auf eine Änderung der Spannung mit einer Änderung der Gleichgewichtslänge antworten.

Wählt man die Kraft so, daß bei der Dehnung nur eine Verlängerung bis zu 5% der Ausgangslänge des Muskels erfolgt, so zeigt das Kraft-Dehnungs-Diagramm nur eine geringe Abweichung von der Geraden. Der ganze Muskel gehorcht also dem Hooke'schen Gesetz in Annäherung. Es läßt sich daher die Elastizität quantitativ als Elastizitätsmodul angeben<sup>1</sup>. BATE-SMITH zeigte, daß beim *Musc. psoas* des Kaninchens der Elastizitätsmodul bei Ausbildung der Totenstarre von einem Wert zwischen 700 und 3000 auf etwa 10000 ansteigt<sup>1</sup>.

Dehnungs- und Entdehnungsversuche können somit gute Auskunft über den zeitlichen Ablauf der Totenstarre in isolierten Muskeln geben. Sie sind aber nicht anwendbar, wenn die postmortalen Vorgänge im ganzen Fisch verfolgt werden sollen, da das Skelet eine passive Dehnung der Muskulatur nicht zu messen erlaubt. Dagegen verspricht in diesem Falle die Messung der Torsionselastizität, deren Modul in direkter Beziehung zum Elastizitätsmodul steht, auswertbare Ergebnisse. Aus der technischen Festigkeitslehre folgt die Beziehung zwischen Elastizitätsmodul  $E$  und Torsionsmodul  $G$

$$E = 2 \cdot G(1 + \mu). \quad (1)$$

Hierin ist  $\mu$  die Poissonsche Querszahl, die für vollkommen elastische Körper etwa den Wert 0,3 und für plastische Körper einen solchen von 0,5 besitzt. Obige Gleichung gilt für homogene, isotrope Stoffe. Obwohl bei biologischen Systemen, wie z. B. Muskeln oder ganzen Tierkörpern weder Homogenität noch Isotropie vorliegt, hat es sich mangels anderer geeigneter Kenngrößen als nützlich erwiesen, die Festigkeit bzw. die Elastizität durch die Größe des Elastizitätsmoduls zu beschreiben. Solche Elastizitätsmessungen sind jedoch nur dann sinnvoll, wenn sie innerhalb des Gültigkeitsbereiches des Hooke'schen Gesetzes vorgenommen werden, d. h. wenn die erzwungenen Deformationen des Systems dem angelegten äußeren Zwang proportional sind.

Die Wirkungsweise des von uns entwickelten Gerätes zur Messung der Torsionselastizität ist in Abb. 1 schematisch dargestellt. An einem Ende eines Waagebalkens (1) befinden sich die oberen feststehenden Klemmböcken (2), in die der Fisch vor Beginn der Messung an seinem Kopfende eingespannt wird. Durch Anlegen eines Gewichtes  $P$  am anderen Ende des Waagebalkens wird das Eigengewicht des Fisches austariert. Mit dem Schwanzende wird der Fisch in die unteren Klemmböcken (3) eingespannt. Über diese Klemmböcken kann mittels einer Seiltrommel (4) durch Anlegen der Kraft  $p$  der Fisch einem Torsionsmoment bekannter Größe ausgesetzt werden. Der durch dieses Moment  $M_t$  erzeugte Torsionswinkel  $\psi$  wird an einer in Winkelgraden geteilten Skala (5) abgelesen. Für die Größe des Torsionswinkels  $\psi$  gilt die Beziehung:

$$\psi = \frac{M_t \cdot l}{G \cdot I_a}. \quad (2)$$

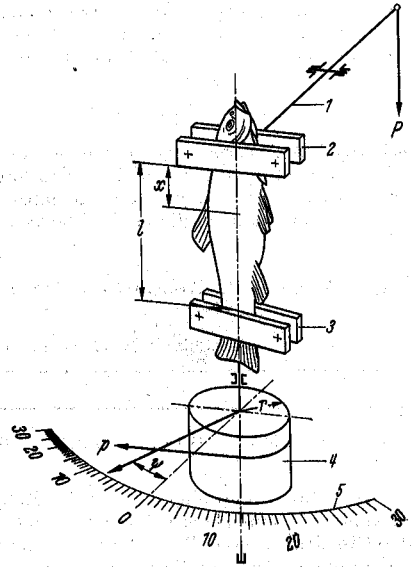


Abb. 1. Schema des Verfahrens zur Messung der Torsionselastizität (Erläuterung vgl. Text).

<sup>1</sup> BATE-SMITH, E. C.: J. Physiol. 96, 176—193 (1939).

Hierin bedeuten:

$\psi$  = Torsionswinkel im Bogenmaß

$M_t = p \cdot r$  = Torsionsmoment (kg · cm)

$l$  = Torsionslänge (cm)

$G$  = Torsionsmodul (kg · cm<sup>-2</sup>)

$I_d$  = Drillungswiderstand (cm<sup>4</sup>)

Auf der rechten Seite der Gleichung (2) sind die Torsionslänge  $l$  und der Drillungswiderstand  $I_d^*$  geometrische Größen und können für ein vorliegendes Objekt als konstant angesehen werden. Hält man weiterhin das Gewicht  $p$  und damit das Torsionsmoment  $M_t$  konstant, so ist der Torsionswinkel  $\psi$  allein eine Funktion des Torsionsmoduls  $G$ .

Es folgt also für einen beliebigen Zeitpunkt  $z$  in Stunden nach dem Töten des Tieres:

$$\psi_z = \frac{C}{G_z}, \text{ wo die Konstante } C = M_t \cdot \frac{l}{I_d} \text{ ist.} \quad (3)$$

Bezieht man die Werte  $\psi_z$  bzw.  $G_z$  auf die Werte  $\psi_0$  bzw.  $G_0$  unmittelbar nach dem Töten des Tieres, so erhält man

$$\frac{G_z}{G_0} = \frac{\psi_0}{\psi_z}. \quad (4)$$

Kennt man somit den Torsionswinkel  $\psi_0$  unmittelbar nach dem Töten des Tieres und den Torsionswinkel  $\psi_z$  nach  $z$  Std, so besagt Gleichung (4), um wieviel mal größer der Torsionsmodul gegenüber demjenigen unmittelbar nach dem Töten des Tieres geworden ist. Man kann daher das Verhältnis der Torsionsmoduln als Maß für die Starre des Tieres definieren:

$$S_z = \frac{G_z}{G_0}. \quad (5)$$

Die absoluten Werte für  $G$  lassen sich nur dann berechnen, wenn die Funktion  $I_d(x)$  bekannt ist oder ermittelt werden kann. In vielen Fällen ist es jedoch möglich, einzelne Muskelstreifen so zurechtzuschneiden, daß ein über die ganze Torsionslänge konstanter Rechteckquerschnitt vorliegt. Sind die Seitenlängen dieses Rechtecks  $h$  und  $b$  ( $h > b$ ), so gilt für den Drillungswiderstand

$$I_d = b^3 \cdot h \cdot c_1. \quad (6)$$

Einige Werte für die Konstante  $c_1$  für verschiedene Verhältnisse  $h/b$  sind in der Tabelle enthalten.

Tabelle. Konstante  $c_1$  zur Berechnung des Drillungswiderstandes<sup>1</sup>

| h/b   | 1     | 1,5   | 2,0   | 3,0   | 4,0   | 6,0   | 8,0   | 10,0  |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $c_1$ | 0,141 | 0,196 | 0,229 | 0,263 | 0,281 | 0,298 | 0,307 | 0,312 | 0,333 |

Die Abb. 2 zeigt eine Ansicht des Meßgerätes. Es besteht im wesentlichen aus der oberen Spannvorrichtung (1) mit Waagebalken (2) zum Ausgleich des Eigengewichtes des zu untersuchenden Objektes. Eine in Winkelgraden geteilte Skala (4) gestattet es, eventuell während der Messung auftretende Längenänderungen zu verfolgen. Die unteren drehbaren Klemmböcken (5) sind mit ihrer Haltevorrichtung radial verstellbar. Die Drehachse trägt eine in Winkelgraden geteilte Kreis-skala (6) sowie die Seiltrommel (7). Auf der Seiltrommel sind zwei 0,2 mm starke Perlonfäden (8) befestigt, die über je eine Umlenkrolle (9) laufen und an ihrem anderen Ende die Schalen (10) zur

\* Wegen der über die gesamte Torsionslänge  $l$  veränderlichen Querschnittsfläche, z. B. eines Fisches oder eines Muskels, und deren Lage zur Torsionsachse gilt für den Drillungswiderstand nach Einführen der Ordinate  $x: (I_d)_x = f(x)$ . Für den Torsionswinkel gilt daher exakt:

$$d\psi = \frac{M_t \cdot dx}{G \cdot I_d(x)} \text{ oder in der Integralform } \psi = \frac{M_t}{G} \int_0^l \frac{dx}{I_d(x)}$$

Man hat es also hier in Analogie zur technischen Festigkeitslehre mit einem „Stab veränderlichen Querschnitts“ zu tun.

<sup>1</sup> DUBBEL, H.: Taschenbuch für den Maschinenbau, 10. Aufl., Bd. I, S. 401. Berlin/Göttingen/Heidelberg: Springer 1949.

Auflage der Gewichte tragen. Der Torsionswinkel kann über einen feststehenden Zeiger (11) an der Kreisskala abgelesen werden. Sämtliche drehbaren Teile (Waagebalken, Drehachse und Umlenkrollen) sind kugelgelagert.

### Durchführung der Messung

Die Messungen wurden z. T. bis zum Abklingen des *Rigors* durchgeführt, was je nach Objekt und Temperatur unter Umständen mehrere Tage in Anspruch nahm. Um hierbei mikrobielle Veränderungen klein zu halten, war es erforderlich, bei niedrigen Temperaturen zu arbeiten. Die Umgebungstemperatur betrug im allgemeinen bei den Versuchen  $+5^{\circ}\text{C}$ . Die Temperaturverhältnisse entsprechen angenähert den bei der Kühlung von Fisch und beim Abhängen von Warmblüterfleisch vorliegenden. Bei Messungen an Fischen wurden diese vor dem Töten etwa 12 Std in einem auf  $+5^{\circ}\text{C}$  temperierten, gut belüfteten Wasserbehälter gehalten. Das Herausfangen der Tiere aus dem Behälter und das Töten erfolgten möglichst rasch und schonend. Hierauf mußte besonderer Wert gelegt werden, denn es hatte sich gezeigt, daß bei abgehetzten Fischen die *Rigor*-Veränderungen modifiziert und ihr Ablauf verkürzt wurde; ein Beispiel für eine solche Abweichung vom normalen Verlauf wird in Abb. 7 gegeben.

Nach dem Töten und Ausbluten des Fisches wurde dieser sofort mit dem Kopfende kurz hinter den Kiemendeckeln in die oberen Klemmbacken des Meßgerätes eingespannt. Durch Auflegen von Gewichten auf die Schale (3) wurde der Waagebalken austariert, um das Auftreten von Druckkräften in Längsrichtung des Fisches zu vermeiden und um die Einwirkung von zusätzlichen Achsialkräften auf das untere Lager auszuschalten. Nun wurde der untere drehbare Teil des Meßgerätes an der Stativstange so weit nach oben verschoben, bis der Fisch kurz vor der Schwanzflosse von den unteren Klemmbacken erfaßt werden konnte. Nach dem Einspannen am Schwanzende wurden nach Lösen der Schraube (12) die unteren Klemmbacken radial so verschoben, daß der Fisch genau senkrecht hing und seine Symmetrieachse der Torsionsachse entsprach. Nach Lösen der Schraube (13) wurde die Kreisskala genau auf Null gestellt und hierauf die Schraube (13) wieder angezogen. Bei zügigem Arbeiten werden für das Fangen, Töten und Einspannen des Tieres sowie für das Justieren des Gerätes etwa 10 min benötigt. Nun ist das Gerät betriebsfertig, und die erste Messung wird vorgenommen. Sie erfolgt durch Auflegen eines Gewichtes auf eine der Schalen (10). Nach 30 sec wird der Torsionswinkel  $\psi_0$  abgelesen. Die zeitliche Einstellung des Torsionswinkels verläuft asymptotisch gegen einen Endwert. Orientierende Vorversuche hatten ergeben, daß nach 30 sec dieser Endwert nahezu erreicht ist. Um übermäßige Verformungen des Versuchsobjektes zu vermeiden, soll die Größe des Gewichtes als Richtwert so gewählt werden, daß bei der ersten Messung der Verdrehungswinkel  $\psi_0$  in Winkelgraden etwa den ein- bis zweifachen Wert der Torsionslänge  $l$ , d. h. des Abstandes zwischen Unterkante der oberen Klemmbacken und Oberkante der unteren Klemmbacken nicht überschreitet. Es empfiehlt sich jedoch stets, bei der ersten Messung die Gültigkeit des Hookeschen Gesetzes zu prüfen, indem für verschiedene Gewichtsauflagen die Torsionswinkel bestimmt werden. Trägt man die gemessenen Torsionswinkel über der Gewichtsbelastung auf, so müssen die Punkte auf einer Geraden liegen (vgl. Abb. 3a u. b).

Infolge der Plastizität der Objekte, besonders vor dem *Rigor*-Beginn und der stets vorhandenen geringen Lagerreibung des Meßgerätes, wird nach der Entlastung im allgemeinen die Nullage nicht wieder genau eingenommen. Wir haben daher nach der Abnahme des Gewichtes den drehbaren unteren Teil des Gerätes wieder in die Nullage zurückgedreht und ihn durch eine an der Stativstange befestigte Geräteklemme in dieser Lage arretiert. Die Arretierung wurde erst bei der darauffolgenden weiteren Messung wieder gelöst. Die Messungen wurden zunächst stündlich,

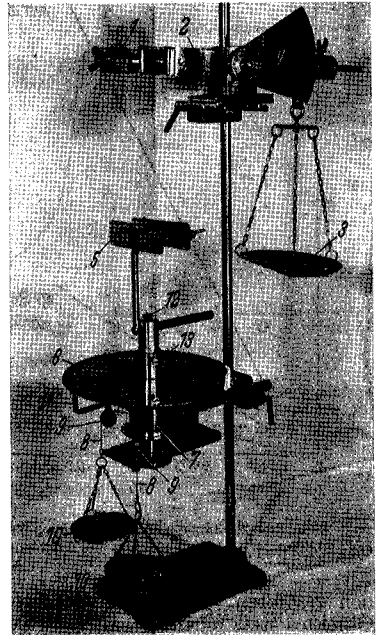


Abb. 2. Ansicht des Meßgerätes zur Bestimmung der Torsionselastizität. (1) obere Klemmbacken; (2) Waagebalken; (3) Gewichtsschale; (4) Skala für Längenänderungen; (5) untere Klemmbacken; (6) Kreisskala; (7) Seiltrommel; (8) Perlonfaden; (9) Umlenkrollen; (10) Gewichtsschalen; (11) Zeiger; (12) Stellschrauben zum Justieren der drehbaren Klemmbacken; (13) Stellschraube zum Justieren der Kreisskala

später in größeren Zeitabständen vorgenommen. Trägt man über der Zeit  $z$  das Verhältnis  $S_z = \psi_z / \psi_x$  nach Gleichung (4) bzw. Gleichung (5) auf, so erhält man charakteristische Kurven für den zeitlichen Verlauf der Totenstarre.

Um ein Austrocknen der Objekte während der mehrtägigen Messungen zu verhindern, wurde an der Stativstange über der oberen Einspannvorrichtung ein mit Leitungswasser gefüllter Weitkaskolben befestigt. In diesen Kolben tauchten schmale Streifen aus Filterpapier ein, die über

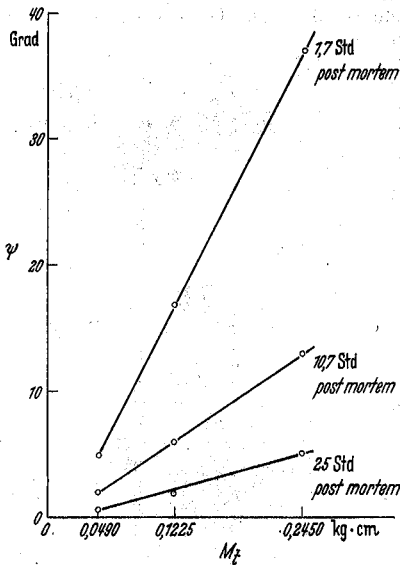


Abb. 3a. Torsionswinkel  $\psi$  des Rindermuskels (*M. gastrocnemius*) als Funktion des Torsionsmoments  $M_z$ .

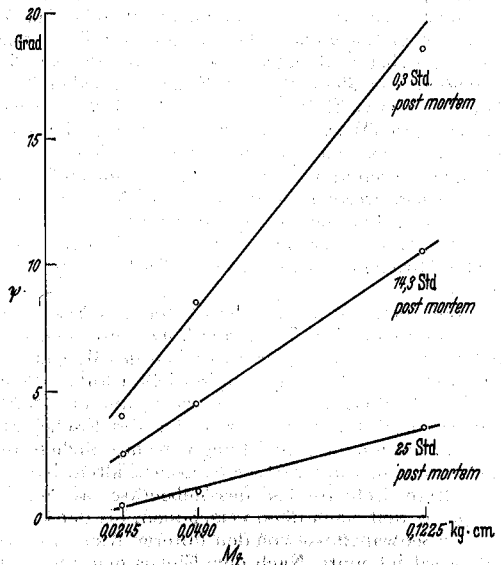


Abb. 3b. Torsionswinkel  $\psi$  der Regenbogenforelle (*Salmo irideus* GÜB.) als Funktion des Torsionsmoments  $M_z$ .

den gesamten Umfang des Objektes an diesem anlagen. Hierdurch wurde die Oberfläche des Objektes stets feucht gehalten. Während der einzelnen Messungen wurden die Streifen entfernt.

## Ergebnisse

### 1) Änderung des Elastizitätsmoduls bei der Ausbildung der Totenstarre von Rindermuskelstreifen

Wie wir bereits weiter oben sahen, ist bei den natürlichen, von uns gewählten Objekten die Ermittlung absoluter Meßgrößen schwierig, weil es sich um Proben veränderlichen Querschnittes handelt. Lediglich aus Muskelstreifen mit über der gesamten Länge gleichem rechteckigen Querschnitt ließen sich wenigstens angenähert die Größe des Elastizitätsmoduls und seine Änderung während der Rigor-Veränderungen ermitteln. In Abb. 4 sind die an einem Muskelstreifen vom *Musc. gastrocnemius* eines Rindes von 1,5 Jahren gefundenen Werte für den Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Zeit *post mortem* aufgetragen. Der beim Einspannen in das Gerät noch schlachtwarme Muskelstreifen wurde bei einer Lufttemperatur von  $+5^\circ \text{C}$  gemessen. Der erste  $1\frac{1}{4}$  Std nach dem Tode des Tieres ermittelte Wert beträgt knapp  $0,2 \text{ kg/cm}^2$ . Er steigt zunächst langsam und dann steiler an, um auf dem Höhepunkt der Totenstarre den Wert  $2,3 \text{ kg/cm}^2$  zu erreichen. Er nimmt also um den 11- bis 12fachen Betrag zu. Bei einem Muskelstreifen aus dem *Musc. gastrocnemius* eines anderen Tieres von 1,5 Jahren stieg der Elastizitätsmodul bei der Ausbildung der Totenstarre

auf von 0,1 auf 0,6 an. Von BUCHTHAL wird für die lebende Froschmuskelfaser ein Betrag von  $0,5 \text{ kg/cm}^2$  angegeben<sup>1</sup>.

Die BATE-SMITH, der die Veränderung des Elastizitätsmoduls während der Rigor-entwicklung am *Musc. psoas* des Kaninchens bei  $+25^\circ \text{C}$  über Längenänderungen bei Belastung gemessen hat, gibt Zunahmen um den 3- bis 14fachen Betrag an<sup>2</sup>.

Die von uns ermittelten Werte können nur in Annäherung als zuverlässig angesehen werden, da durch Verletzung von Muskelfasern bei der Präparation des Muskelstreifens der Rigor-Verlauf beeinflusst werden kann. Darauf soll an anderer Stelle ausführlicher eingegangen werden. Außerdem läßt der strukturelle Aufbau des *Musculus gastrocnemius* des Rindes keine Präparation von Muskelstreifen ausreichender Größe mit nur zur Hauptachse des Streifens parallel verlaufenden Muskelfasern zu. Immerhin liegen die von uns gemessenen Rigor-Veränderungen im Bereich der von BATE-SMITH am Kaninchen-*Psoas* gefundenen Werte. Ein Vergleich der an Einzelmuskelfasern erhaltenen Werte mit den am Ganzmuskel gefundenen ist ohnehin nur mit großen Vorbehalten möglich, zumal wenn Dehnungsversuche zugrunde liegen<sup>3</sup>.

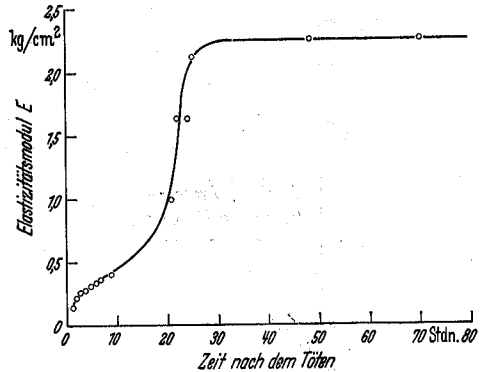


Abb. 4. Änderung des Elastizitätsmoduls  $E$  eines Streifens vom *Musculus gastrocnemius* während der Totenstarre als Funktion der Zeit post mortem. Temp.:  $+5^\circ \text{C}$

## 2) Allgemeiner Verlauf der Totenstarre

Es gilt heute als gesichert, daß der ATP-Schwund im Verlauf der Glykolyse die Ursache der physikalischen Veränderungen im Muskel ist und nicht, wie früher angenommen wurde, die Milchsäurebildung<sup>4</sup>. Trotzdem stehen die Veränderungen der mechanischen Eigenschaften nicht nur in enger Beziehung zum ATP-Schwund, sondern auch zum Abfall des  $p_{\text{H}}$ -Wertes. Das wurde z. B. u. a. von MARSH bei der Darstellung der Rigor-Veränderungen im Walmuskel<sup>5</sup> und beim Rindermuskel<sup>6</sup> gezeigt. Über die Messung der postmortalen  $p_{\text{H}}$ -Veränderungen im Muskel läßt sich somit auch die Eignung unserer Methode überprüfen. Eine weitere leicht meßbare Größe ist der Zeitpunkt des Aufhörens der elektrischen Reizbarkeit im Muskel. Es ist bekannt, daß zu diesem Zeitpunkt der Muskel bereits in die schnelle Phase der Totenstarre eingetreten, aber noch nicht auf ihrer Höhe angelangt ist. Im typischen Falle werden wir nach dem Herz- oder Hirntod des Tieres im Muskel eine Anfangsphase feststellen können, in der die Acidität nur langsam zunimmt, der ATP-Gehalt nahezu konstant bleibt und der Elastizitätsmodul sich wenig verändert. Diese Phase wird als Verzögerungsperiode bezeichnet. Wenn die ATP-Resynthese über die Glykolyse nicht mehr mit dem ATP-Abbau Schritt halten kann und der normale ATP-Spiegel schon beträchtlich — aber je nach den physiologischen Bedingungen vor dem Tode auf

<sup>1</sup> BUCHTHAL, F.: Det. kgl. danske Vidensk. Selsk. biol. Medd. 17, 2 (1942).

<sup>2</sup> BATE-SMITH, E. C.: Zit. S. 263, Anm. 1.

<sup>3</sup> REICHEL, H.: Zit. S. 262, Anm. 4.

<sup>4</sup> BATE-SMITH, E. C., u. J. R. BENDALL: Brit. Medic. Bull. 12, 230—235 (1956). — PARTMANN, W.: Zit. S. 261, Anm. 1.

<sup>5</sup> MARSH, B. B.: Zit. S. 262, Anm. 3.

<sup>6</sup> MARSH, B. B.: J. Sci. Food Agric. 5, 70—75 (1954).

unterschiedliche Werte — abgesunken ist, beginnt die rasche Phase. Sie ist vor allen Dingen durch eine starke Zunahme des Elastizitätsmoduls gekennzeichnet. An ihrem Ende erreicht der Muskel den *Rigor*-Höhepunkt mit dem End- $p_H$ -Wert. Die Elastizitätseigenschaften bleiben nunmehr viele Stunden konstant.

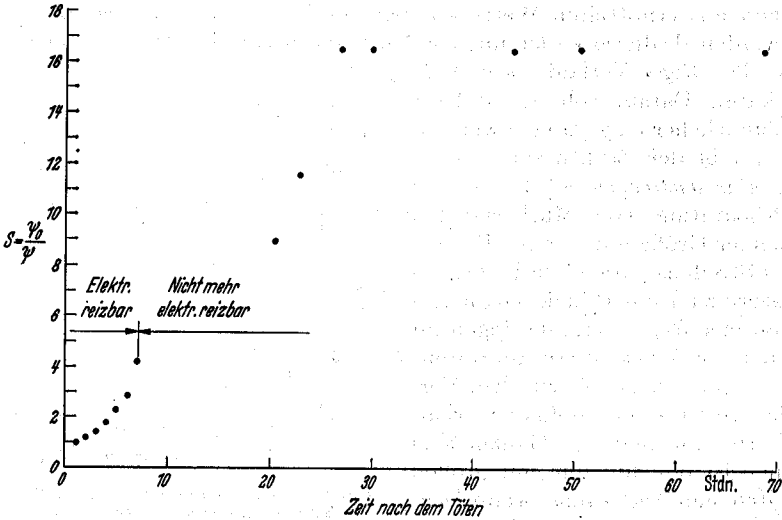


Abb. 5. Änderung des Starrewertes  $S$  des ganzen *Musculus gastrocnemius* während der Totenstarre als Funktion der Zeit post mortem. Temp.: +5° C

a) *Rigor mortis*-Verlauf am isolierten *Musculus gastrocnemius* des Rindes

Für den *Musc. gastrocnemius* eines Rindes sind die bei +5° C nach Gleichung (4) und (5) ermittelten Modulus- und S-Werte für die Starre in Abhängigkeit von der Zeit post mortem in Abb. 5 aufgetragen. Wie bereits am Streifen des gleichen Muskels und auch bei allen anderen Messungen am *Musc. gastrocnemius* des Rindes beobachtet wurde (z. B. Abb. 4), ist die Verzögerungsperiode nur angedeutet. So deuten z. B. die am gleichen Muskel eines anderen Rindes unter gleichen äußeren Bedingungen durchgeführten  $p_H$ -Messungen mit der Einstichelektrode (Abb. 6) darauf hin, daß die Verzögerungsperiode beim *Musc. gastrocnemius* des Rindes kaum ausgeprägt zu sein scheint. Auf dem Höhepunkt des *Rigor mortis*, der bei einer Lufttemperatur von +5° C im allgemeinen nach 20–30 Std erreicht wurde, hatte die Starre um den 12- bis 17fachen Betrag des Ausgangswertes zugenommen. Die Reizbarkeit war 5–8 Std post mortem erloschen. Je ausgeprägter die Zunahme der Starre war, um so länger sprach der Muskel auf elektrische Reize an.

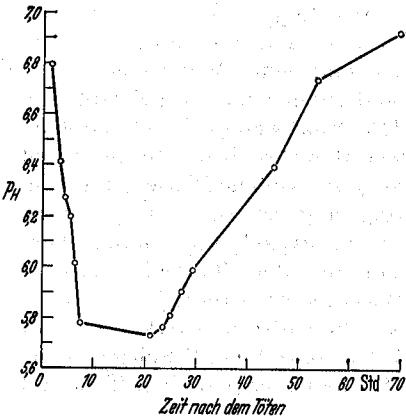


Abb. 6. Änderung des  $p_H$ -Wertes des *Musculus gastrocnemius* während der Totenstarre als Funktion der Zeit post mortem. Temp.: +5° C

Unter unseren Untersuchungsbedingungen wurde während der schnellen Phase keine Verkürzung des Muskels beobachtet. Sie scheint auch nur bei höheren Tempera-



turen und bei erschöpften Tieren besonders deutlich ausgeprägt zu sein. Außerdem müßte die Verkürzung in unserem Falle mit einer beträchtlichen Arbeitsleistung verbunden sein. Nach BENDALL wird aber bei der *Rigor*-Verkürzung nur etwa  $\frac{1}{2000}$  der maximalen Kraft der Fasermodelle entwickelt<sup>1,2</sup>. Das Ausbleiben der *Rigor*-Verkürzung ist für die Auswertung unserer Messungen außerordentlich günstig, da wir bei der von uns gewählten Definition der Starre (Gleichung 4 und 5) doch davon ausgegangen waren, daß die Torsionslänge  $l$  für ein Objekt als konstant anzusehen ist.

Die Lösung der Totenstarre bei isolierten Rindermuskeln scheint über Veränderungen der Elastizität kaum erfaßbar zu sein. So wurde bei einem Muskel auf dem Höhepunkt des *Rigor mortis* ein Starrewert von  $S = 14$  ermittelt; er fiel innerhalb von 12 Tagen, aber nur auf den Wert 6,5, ab. Diese Befunde stimmen mit den Beobachtungen von BATE-SMITH und BENDALL<sup>2</sup> überein. Die Messung der Quetschkraft von Muskelproben, die in 0,5- oder 1%iger NaCl-Lösung gekocht wurden, scheint die Lösung der Totenstarre wesentlich deutlicher werden zu lassen<sup>3</sup>. Diese Methode gibt jedoch wegen der großen Streuung der Einzelwerte während des *Rigor*-Anstiegs die zur Starre führenden physikalischen Veränderungen nicht so eindeutig wieder und ist für Totenstarre-Untersuchungen an Fischen weniger geeignet (vgl. S. 262).

#### b) Bei der Regenbogenforelle (*Salmo irideus* Gibb.)

In Abb. 7 sind die gemessenen Starrewerte für 4 Regenbogenforellen annähernd gleicher Größe (250—300 g Gewicht) in Abhängigkeit von der Zeit nach dem Tode

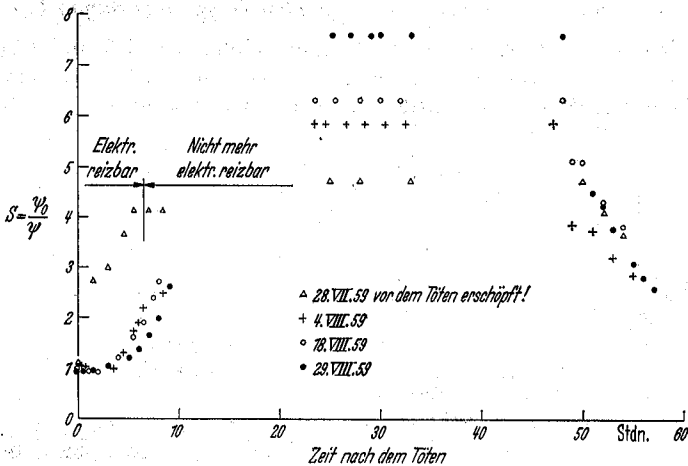


Abb. 7. Änderung der Starre  $S$  verschiedener Regenbogenforellen während der Totenstarre als Funktion der Zeit post mortem. Temp.:  $+5^{\circ}\text{C}$

aufgetragen. Die bei  $+5^{\circ}\text{C}$  durchgeführten Messungen fielen in die Monate Juli, August und September des sehr heißen Sommers 1959. Bis auf die vor dem Tode durch Jagen und Zappeln erschöpfte Forelle vom 28. VII. ist bei allen Tieren die etwa 3 Std. währende Verzögerungsperiode des *Rigor*-Ablaufs gut zu erkennen. Während dieser Zeit sinken die Starrewerte sogar etwas unter den Ausgangswert ab. Das ist

<sup>1</sup> MARSH, B. B.: Zit. S. 267, Anm. 6.

<sup>2</sup> BATE-SMITH, E. C., u. J. R. BENDALL: Zit. S. 267, Anm. 4.

<sup>3</sup> STEINER, G.: Zit. S. 261, Anm. 3.

darauf zurückzuführen, daß die Muskeln unmittelbar nach dem Töten des Tieres noch unter einem Tonus stehen. Mit dem fortschreitenden Absterben der Zellen und damit auch der Nervenzellen erlischt der Tonus und führt zur Abnahme des Elastizitätsmoduls. Bei den ausgeruhten Tieren wurde der Höhepunkt der Starre bei  $+5^{\circ}\text{C}$  nach etwa einem Tage erreicht, bei der erschöpften Forelle schon nach etwa 12 Std. Die Starre nahm bei den untersuchten Tieren um den 4- bis 8fachen Betrag des Ausgangswertes zu, bei dem erschöpften Tier um den niedrigsten Wert.

Die Reaktion auf elektrische Reize hört nicht in allen Muskeln zum gleichen Zeitpunkt auf. Das bedeutet, daß die maximale Überlebenszeit von Muskelfasern in den einzelnen Muskeln des gleichen Tieres unterschiedlich ist. So zeigte z. B. bei Forellen die Muskulatur der Analgegend und die der hinteren Hälfte der dorsalen Seitenrumpfmuskulatur im allgemeinen die am längsten anhaltende Reizbarkeit. Die Totenstarre bei einem ganzen Fisch wie auch bei Säugetieren tritt somit nicht im ganzen Körper zum gleichen Zeitpunkt auf, vielmehr erstreckt sich ihr Beginn über einen Zeitbereich. Bei der erschöpften Forelle erlosch der letzte Rest der Reizbarkeit nach  $6\frac{1}{2}$  Std, während sie bei den übrigen Tieren erst nach etwa 10 Std verschwand. Bei den Forellen wurde im allgemeinen nach etwa 2 Tagen ein beträchtlicher Rückgang der  $S$ -Werte beobachtet, wie auch Abb. 7 erkennen läßt. Wir möchten annehmen, daß in diesem Fall die mit dem Lösen der Totenstarre verbundenen Vorgänge nicht allein auf die Eigenfermente der Muskulatur zurückzuführen sind, sondern in hohem Maße auch auf die sehr aktiven Proteasen des Eingeweidedtraktes.

*c) Rigor mortis-Verlauf bei dem Spiegelkarpfen (*Cyprinus carpio* L.)*

Für zwei im Januar 1959 gemessene Spiegelkarpfen von 1,3 und 1,7 kg Gewicht sind die Starrewerte in Abb. 8 in Abhängigkeit von der Zeit nach dem Töten dargestellt. Bei dem leichteren Tier wurde bei einer Lufttemperatur von  $+10^{\circ}\text{C}$  und bei

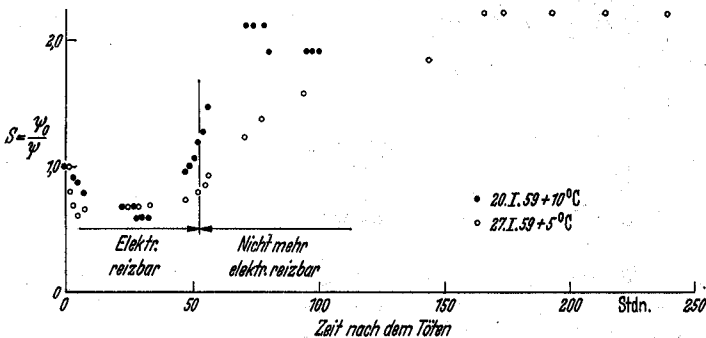


Abb. 8. Änderung der Starre  $S$  von Spiegelkarpfen während der Totenstarre als Funktion der Zeit post mortem.  
Temp.:  $+5^{\circ}\text{C}/+10^{\circ}\text{C}$

dem schwereren bei  $+5^{\circ}\text{C}$  gemessen. Vergleicht man den Starreverlauf mit dem der im Sommer gemessenen Regenbogenforellen, fällt auf, daß er bei den Winterkarpfen viel weiter auseinandergezogen ist. Die langsame Phase mit der durch das Erlöschen des Muskeltonus bedingten und der deutlicher als bei den Regenbogenforellen sichtbaren Abnahme des Starrewertes geht erst nach etwa 40 Std in die schnelle Phase über. Während aber das Rigor-Maximum bei höherer Temperatur nach etwa  $2\frac{1}{2}$ –3 Tagen erreicht wurde, wurden die maximalen Starrewerte bei  $+5^{\circ}\text{C}$  erst nach 4–6 Tagen

gemessen. In Streifen aus Karpfenfilets wurde das *Rigor*-Maximum bei  $+5^{\circ}\text{C}$  nach 3–4 Tagen erreicht. Dabei ist zu berücksichtigen, daß in Muskelstreifen mit einer großen Anzahl verletzter Fasern der *Rigor*-Ablauf beschleunigt wird.

Dieser uns überraschend langsam erscheinende *Rigor*-Verlauf bei den Winterkarpfen wurde auch durch die Messung der Reizbarkeit bestätigt. Sie erlosch in den beiden von uns dargestellten Fällen erst nach zwei Tagen. Von 29 Spiegelkarpfen von 1–1,5 kg Gewicht, die beim Jahreswechsel 1958/1959 in Behältern über weite Strecken transportiert und vor dem Töten noch mehrere Tage in Wasserbecken gehalten worden waren, war die Muskulatur von 18 Tieren noch nach einer Lagerung von zwei Tagen bei  $+10^{\circ}\text{C}$  *post mortem* elektrisch reizbar. Es ist zu erwähnen, daß die Tiere ausgeweidet und die Muskulatur einer Seite entnommen worden war. Bei Tieren, die nicht ausgesonnen und nicht einseitig filetiert sind, deren Muskulatur also unverletzt ist, ist mit einer noch längeren Dauer der elektrischen Reizbarkeit zu rechnen. Längste Reizbarkeit wurde auch bei den Karpfen im allgemeinen wieder am distalen Ende in der Analgegend und in der dorsalen Seitenrumpfmuskulatur festgestellt.

Die  $\text{pH}$ -Werte am Vorderende der dorsalen Seitenrumpfmuskulatur von Spiegelkarpfen annähernd einheitlicher Größe (1–1,5 kg Gewicht) wurden bei mindestens je 10 Tieren zu verschiedenen Zeiten nach dem Tode mit der Wasserstoffelektrode gemessen. Zur Stabilisierung des  $\text{pH}$ -Wertes wurden die Muskelproben gleich nach Entnahme mit 0,005 m-Natriumjodacetatlösung und Seesand zerrieben. Die Lager-temperatur betrug in diesem Fall  $+10^{\circ}\text{C}$ . Als Mittelwerte erhielten wir: 1 Std nach dem Tode 6,99; 1 Tag nach dem Tode 6,89; 2 Tage nach dem Tode 6,64; 3 Tage nach dem Tode 6,62 und 4 Tage nach dem Tode 6,65. Auch diese Ergebnisse deuten darauf hin, daß bei den meisten Winterkarpfen das *Rigor*-Maximum erst nach 2 Tagen erreicht wird.

Die im Winter 1958/1959 an einigen Schleien (*Tinca vulgaris* Luv.) durchgeführten Messungen ergaben annähernd die gleiche Zeitabhängigkeit der Starreänderungen wie bei Karpfen. Wie bei den Karpfen und auch beim Rindermuskel war das Lösen der Totenstarre über unsere Torsionsmessungen auch bei Schleien weniger gut feststellbar als bei der Forelle. Die Muskelelastizität dürfte erst beim massiven Angriff proteolytischer Fermente, z. B. bei starkem Bakterienbefall, deutlich abfallen.

Insgesamt haben die erwähnten Beispiele gezeigt, daß die Methode der Messung des Verdrehungswinkels bei konstanter Kraffteinwirkung und das von uns entwickelte Gerät dazu geeignet sind, den zeitlichen Ablauf der *Rigor*-Veränderungen, die sich u. a. in Veränderungen der Muskelelastizität äußern, sowohl am isolierten Muskel wie am ganzen Fisch zu ermitteln. Die Messungen an Muskelstreifen mit gleichbleibenden rechteckigem Querschnitt gestatten es sogar, Absolutwerte für die Veränderung des Elastizitätsmoduls anzugeben.

Selbst wenn es methodisch leicht möglich wäre, hätte es wenig Sinn, für die Starreänderungen bei ganzen Fischen Absolutwerte zu ermitteln. Die Totenstarre ist bedingt durch Veränderungen der Muskulatur. Der ganze Fisch ist jedoch ein heterogenes System, dessen mechanische Eigenschaften wesentlich durch das Skelet und nur zum Teil durch die Muskulatur bestimmt werden. Es wird somit verständlich, daß die relativen Starreänderungen beim Fisch wesentlich geringer sind als beim isolierten Säugetiermuskel. Darüber hinaus scheinen die Starreänderungen im quergestreiften Fischmuskel weniger ausgeprägt zu sein als im Skeletmuskel des Säugetiers. Das drückt sich auch in den im allgemeinen höheren  $\text{pH}$ -Werten des Fischmuskels auf dem Höhepunkt der Totenstarre aus. Aus den von uns angegebenen Beispielen über den Starreverlauf der Fische darf nicht der Schluß gezogen werden, daß

der zeitliche Ablauf für eine Fischart über ein Jahr hinweg unter vergleichbaren Temperatur- und Schlachtbedingungen annähernd konstant sei. Wenige — zu anderen Jahreszeiten als den hier angegebenen — durchgeführte Messungen deuten darauf hin, daß eine deutliche jahreszeitliche Abhängigkeit des *Rigor*-Verlaufs vorliegt. Untersuchungen, die den Entwicklungszustand berücksichtigen sollen, sind geplant.

### Zusammenfassung

Es wird ein neu entwickeltes Gerät und eine neue Methode beschrieben, die es erlauben, den zeitlichen Ablauf der *Rigor mortis*-Veränderungen an Muskelproben oder ganzen Fischen zu messen. Die Arbeitsweise des Geräts beruht darauf, daß die Veränderungen der Elastizität der Proben, d. h. in diesem Fall die Zunahme der „Starre“, über Torsionsmessungen ermittelt werden können.

Der am Muskelstreifen gemessene Elastizitätsmodul von *Musculus gastrocnemius* des Rindes stieg bei der Ausbildung des *Rigor mortis* von Werten um  $0,1-0,2 \text{ kg/cm}^2$  auf Werte bis zu  $2,3 \text{ kg/cm}^2$  an.

Als relatives Maß für die Starre von eingespannten Muskeln oder Fischen wurde das Verhältnis der Torsionswinkel zum Zeitpunkt 0 und zum Zeitpunkt  $z$  nach dem Töten des Tieres gewählt.

An Hand einiger Beispiele für den *Musculus gastrocnemius* des Rindes, die Regenbogenforelle und den Karpfen wurde der mit dem neuen Gerät gemessene Starreverlauf diskutiert. Er zeigt gute Korrelation zu den Ergebnissen der  $\text{pH}$ -Messungen und den Messungen der elektrischen Reizbarkeit.

Die für den Beginn der postmortalen Veränderungen des quergestreiften Muskels typische Verzögerungsperiode war beim *Musculus gastrocnemius* des Rindes nur angedeutet. Bei Forellen und Karpfen war sie gut ausgeprägt und sogar von einem geringen Absinken der Starrewerte infolge des Absinkens des Muskeltonus begleitet. In die folgende rasche Phase der *Rigor*-Veränderungen fiel in allen untersuchten Fällen das Aufhören der elektrischen Reizbarkeit.

Beim Vergleich des zeitlichen Ablaufs der zur Starre führenden Veränderungen fiel vor allen Dingen der schleppende Verlauf bei den untersuchten Winterkarpfen auf.