

Aus dem Institut für gerichtliche Medizin der Universität Göttingen
(Direktor: Prof. Dr. med. Dr. jur. OTTO SCHMIDT)

Studie über postmortale Abbauvorgänge*

Von

O. SCHMIDT, D. LORKE und B. FORSTER

Mit 1 Textabbildung

Der postmortale Stoffwechsel ist von den Vorgängen des Lebens nicht grundsätzlich verschieden. Fermente, die zu Lebzeiten den Stoffwechsel katalysieren, sind auch nach dem Tode wirksam; sie sind jedoch nicht mehr einer das Leben erhaltenden Ordnung unterworfen. Ihre Aktivität ist von den durch die Fäulnis gegebenen Bedingungen abhängig.

Über Teilvorgänge des postmortalen Abbaues liegen zahlreiche Einzeluntersuchungen vor. In welchem Maße die Zerfallsprodukte des einen Systems sich auf ein anderes und weiteres auswirken, ist aus diesen Untersuchungen nicht zu entnehmen. Die Beziehungen sind unüberschaubar und zahlreich; sie im einzelnen untersuchen zu wollen, ist eine unlösbare Aufgabe. Schon einen großen Gewinn würde es bedeuten, die Reihenfolge des Abbaues der Grundsubstanzen kennenzulernen. Nach Speziellerem zu fragen, ist bei der lückenhaften Kenntnis des postmortalen Stoffwechsels verfrüht. Wir müssen uns zunächst mit dieser Fragestellung zufriedengeben.

Diese Aufgabe in Angriff zu nehmen, ist schwierig. Die bei der Fäulnis auftretenden Zerfallsprodukte führen zu einem Gemisch der aller verschiedensten Stoffgruppen. Die chemische Analyse dieses Substrats verliert sich in Teilprozessen, die sich nur schwer zu einem Gesamtbild vereinigen lassen. Aussichtsreicher erscheinen physikalische Methoden. Sie bringen gemeinsame Eigenschaften der allerverschiedensten Stoffgruppen zur Darstellung; aus ihnen lassen sich bei entsprechendem Vorgehen Abläufe ersehen, die dem Gesamtprozeß zukommen.

Bei der Fäulnis werden hochmolekulare Stoffe in niedermolekulare Stoffgruppen zerspalten. Das bedeutet eine Zunahme der Teilchen. Ihre jeweilige Zahl bestimmten wir durch die *Gefrierpunktniedrigung*. Aus ihr ergeben sich Hinweise auf die Höhe und die Art des Zerfalls. Eine Abnahme der Teilchen erfolgt ausschließlich durch die Aufspaltung in gasförmige Endprodukte, die aus der Lösung entfernt werden. Der Zerfall in nichtflüchtige anorganische oder organische Reste oder die Ab-

* Vortrag auf der Tagung der Deutschen Gesellschaft für gerichtliche und soziale Medizin in Zürich, September 1958.

spaltung gasförmiger Seitenketten vermindert die Konzentration der Lösung nicht.

Die Gefrierpunktserniedrigung wird durch die Summe der Ionen und die Zahl der gelösten Moleküle bestimmt. Die ionisierten Anteile genauer anzugeben, ist bei der Vielzahl der in Frage kommenden Spaltprodukte und ihrer unterschiedlichen Größe und Wertigkeit nicht möglich. Einen Hinweis auf die Zahl der Ionen vermittelt die Bestimmung der *Leitfähigkeit*. Bei der Annahme durchschnittlicher Wanderungsgeschwindigkeit und gleicher Ladung ergeben sich Schätzwerte. Darüber hinaus werden sich aus der jeweils in Lösung befindlichen Zahl der Teilchen, die sich aus der Gefrierpunktsbestimmung ergibt, Änderungen des Dissoziationsgrades und der Wertigkeit erkennen lassen. Zu konkreten Zahlenwerten zu gelangen, ist jedoch nicht möglich. Aus diesen Gründen ist die Bestimmung der Leitfähigkeit für die Deutung der Vorgänge nur von geringerem Wert.

Einen wichtigen Einblick in die Abbauvorgänge gibt das p_H der Lösung. Sauer reagierende Spaltprodukte gehören dem Kohlenhydratstoffwechsel, alkalische Bereiche dem Eiweißzerfall an. In saurem Milieu entweicht spontan die Kohlensäure, bei alkalischer Reaktion das Ammoniak. Aus dem angezeigten p_H ist die Zahl der H- und OH-Ionen berechenbar. Für die Untersuchung benutzten wir die Glaselektrode.

Von beherrschendem Einfluß ist die Redoxlage. Wir untersuchten die Vorgänge bei Anwesenheit von Sauerstoff und in parallel geführten Versuchen im Stickstoffstrom. Die Durchströmung wurde mit Gasuhr gemessen. Die stündlichen Werte lagen zwischen 2,4 und 2,7 Liter. Die Absorption der Gase erfolgte in Kugelrohren mit Natronlauge und Salzsäure. Daß hierbei nur Kohlensäure und Ammoniak erfaßt wurden, ergaben die Fällung als Bariumkarbonat und die Untersuchung mit Platinchlorwasserstoffsäure.

Die Gasdurchströmung erwies sich als von großem Vorteil: Das bei der Fäulnis gebildete Ammoniumkarbonat wird an der Luft und im Stickstoffstrom in CO_2 und NH_3 gespalten. Die bei der Analyse gewonnenen Gase sind im Rahmen eines geringen Fehlers auf die in den jeweiligen Zeitintervallen tatsächlich entstandenen Fäulnisgase zurückzuführen.

Wir untersuchten die Fäulnisvorgänge an einer Reihe von Organen und Körperflüssigkeiten unterschiedlicher Zusammensetzung. Leber und Muskulatur zeigten in ihrem Abbau keine wesentliche Verschiedenheit. Bei kohlenhydratreichen Organen kann die Säuerung erhebliche Grade erreichen. In faulendem Serum oder Vollblut tritt bei Mangel an Kohlenhydraten die Säurebildung zurück. Eine Abhängigkeit des Abbaues von der Bakterienflora trat bei den Untersuchungen nicht sonderlich hervor: Organe gleicher Zusammensetzung zeigten einen annähernd gleichen Zerfall.

Am Beispiel einer faulenden Rinderleber zeigen wir die Ergebnisse eines Versuches. Die Leber ist für das Studium des postmortalen Abbaues besonders geeignet. Sie ist reich an Fermenten, an Kohlenhydraten

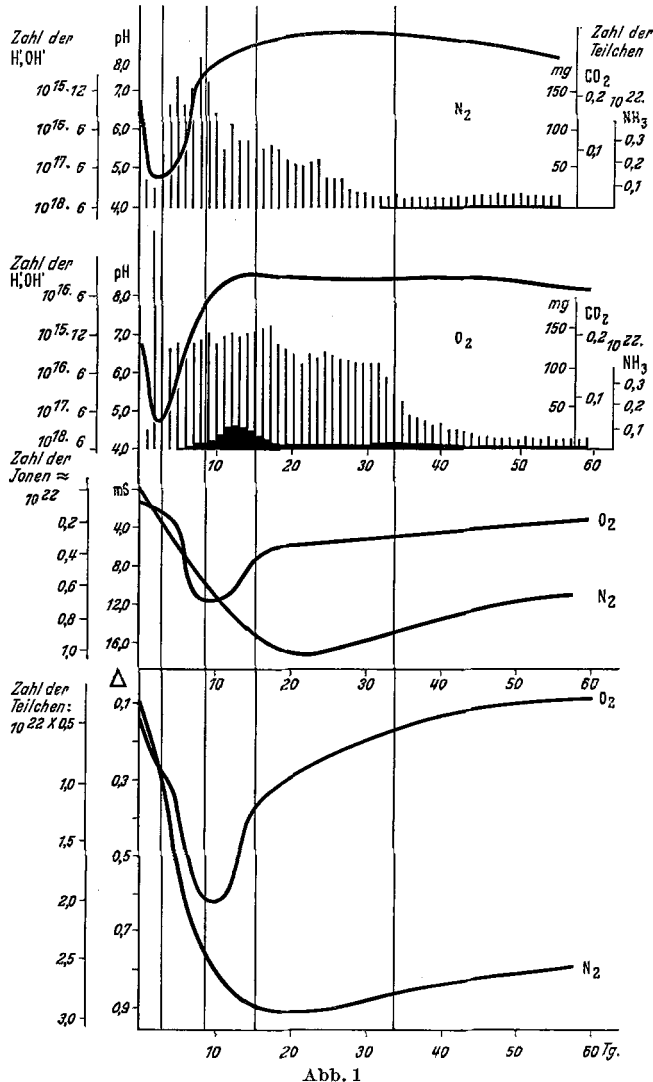


Abb. 1

und Eiweißstoffen. Der Glykogengehalt kann 10% ihres Gewichtes betragen. 25% des Trockengewichtes sind Proteine. Der Fettgehalt unterliegt erheblichen Schwankungen. Die Ableitungen sind einer Versuchsanordnung entnommen, bei der 20 g frische, feinzerkleinerte Rinderleber

in 100 ml Wasser im Brutschrank bei 28° während der Dauer von 60 Tagen der Fäulnis überlassen wurden.

Die Gefrierpunkterniedrigung ist in °C angegeben. Die Zahl der Teilchen bezieht sich auf das Gesamtgewicht des in 100 ml gelösten Lebergewebes. Die Sauerstoffdurchströmung zeigt nach kurzzeitigem Anstieg einen schnellen Abfall. Am Ende des Versuches findet sich kaum noch Gelöstes. Im Stickstoffstrom erreicht der Zerfall höhere Werte. Die Zahl der Teilchen wird nur langsam reduziert.

Die Leitfähigkeit ist in Milli-Siemens berechnet. Die Zahl der Ionen gibt Schätzwerte an, bei denen eine unverändert mittlere Wanderungsgeschwindigkeit und gleichbleibende Ladung unterstellt werden.

Die Zahl der H- und OH-Ionen liegt in der Größenordnung 10^{15} — 10^{18} ; sie ist um einige Dezimale niedriger als die Zahl der übrigen Ionen und die Gesamtzahl der Teilchen. Auf Leitfähigkeit und Gefrierpunkt sind die H- und OH-Ionen ohne Einfluß.

Die CO_2 - und NH_3 -Mengen sind als Tageswerte in mg aufgetragen und als Molekelzahlen angegeben; sie liegen in der Größenordnung 10^{22} . Bei vollständigem Zerfall in Kohlensäure, Ammoniak und Wasser ist die Menge der abgehenden Gase von konzentrationsbestimmendem Einfluß.

Dieses Vorgehen charakterisiert jeden Zeitpunkt der Fäulnis durch eine Reihe physikalischer und chemischer Daten. Die Zunahme oder der Schwund der gelösten Teilchen bei unterschiedlicher Redoxlage, der Grad ihrer Ionisierung, die saure oder alkalische Reaktion der Lösung, der Zerfall in Kohlensäure und Ammoniak lassen auf bestimmte Vorgänge und das Vorliegen bestimmter Zerfallsprodukte schließen. Der Kurvenverlauf der Untersuchungen läßt verschiedene Phasen des Abbaues, die dem Zerfall der einzelnen Grundsubstanzen zuzuordnen sind, erkennen.

Mit Beginn der Fäulnis wird das Gewebe sauer. Die maximale Säuerung wird bereits nach 2 Tagen erreicht. In beiden Gefäßen ist — unabhängig von der Durchströmung — das p_{H} auf 4,7 abgesunken. Die Säuerung ist auf die Bildung von Milchsäure zurückzuführen. Die Menge der Milchsäure entspricht dem Glykogengehalt. In einer glykogenreichen Leber können die p_{H} -Werte so weit absinken, daß hierdurch jeder weitere Abbau verhindert wird. Der Zerfall des hochmolekularen Glykogens und zusätzlich wohl auch noch anderer Stoffe führt zu einer starken Vermehrung der Teilchen. Der Gefrierpunkt fällt in dieser Phase stark ab.

Die Untersuchungen zeigen, daß der postmortale Zerfall mit dem Abbau der Zucker beginnt. Wir bezeichnen diese ersten Fäulnisvorgänge als die Phase des glykolytischen Zerfalls; sie ist nur von kurzer Dauer. Die Milchsäurebildung in Körperorganen für die Bestimmung der Todeszeit zu nutzen, könnte durchaus von Wert sein.

Die Entwicklung der Kohlensäure zeigt in dieser Phase ein sehr auffälliges Verhalten: im Stickstoffstrom ein allmählicher Anstieg, bei der Sauerstoffdurchströmung eine explosionsartige Zunahme am 2. und 3. Tag, deren Gesamtmenge etwa 0,5 g — das sind 6×10^{22} Moleküle — ausmacht. Eine Abnahme der gelösten Teilchen wird hierdurch nicht herbeigeführt. Ein endgültiger Zerfall in Kohlensäure und Wasser liegt dieser CO_2 -Entwicklung nicht zugrunde; sie hätte sich auf den Gefrierpunkt ausgewirkt. Teilverbrennungen oder Dekarboxylierungen sind anzunehmen.

Die nächste Phase wird durch den Umschlag des p_H zum Alkalischen charakterisiert. Der Abbau der Milchsäure und die Entwicklung von NH_3 bestimmen das Bild. Im Stickstoffstrom ist der p_H -Anstieg gegenüber der Sauerstoffdurchströmung verzögert. Der Abbau der Milchsäure ist redoxabhängig. Bemerkenswert ist die rapide Zunahme der Leitfähigkeit, die im Vergleich zur Gesamtzahl der Teilchen um ein Mehrfaches ansteigt. Das deutet auf eine Änderung der Ionenladung hin. Die Annahme, daß mit dem Abbau der Milchsäure nunmehr die zweiwertigen Salze der Kohlensäure die Leitfähigkeit bestimmen, hat ihre Berechtigung.

Erst in dieser zweiten Phase des Abbaues zeigt sich der Beginn der proteolytischen Spaltung; sie ist zugleich das Ende des glykolytischen Zerfalls.

Den weiteren Abbau bestimmen die Eiweiße. Im Sauerstoffstrom ergeben der Zerfall der Milchsäure und die Entwicklung von Ammoniak ein stark alkalisches Milieu, das auf p_H 8,6 ansteigt. Erstmals nach 14tägiger Versuchsdauer wird in deutlichen Mengen Ammoniak frei. Die Zahl der Teilchen fällt rapide ab. Die Entwicklung von Kohlensäure und Ammoniak bedeutet den endgültigen Zerfall größerer Eiweißmengen.

Während der gesamten Versuchsdauer sind im Sauerstoffstrom mehr als 5 g Kohlensäure in Freiheit gesetzt. Die CO_2 -Menge ist größer als das Trockengewicht der Leber, das etwa 4 g beträgt. Dieses Zahlenverhältnis darf nicht überraschen: es ist der Ausdruck einer stattgehabten Sauerstoffaufnahme und -verbrennung. Wir nennen dieses Stadium die Phase des oxydativen Eiweißzerfalls.

Die Verbrennung hat zu einer so schnellen und weitgehenden Zerstörung der organischen Substanzen geführt, daß sich das Ende des Abbaues bereits in der 5. Versuchswoche abzuzeichnen beginnt. Die CO_2 -Entwicklung, deren tägliches Quantum mehr als 100 mg betrug, fällt auf 10—20 mg ab und erfährt bis zum Ende des Versuchs keine weiteren Anstiege. Die Reduktion der CO_2 -Entwicklung dürfte auf einen eingetretenen Mangel an leicht oxydierbaren Substanzen zurückzuführen sein. Im Hinblick auf die geringe Zahl der noch in Lösung befindlichen Teilchen liegt diese Annahme näher, als den Rückgang auf eine Zer-

störung oder Aktivitätsminderung der an der Verbrennung beteiligten Fermente zurückzuführen.

Im Sauerstoffstrom bleibt nach 60tägiger Versuchsdauer nur wenig zurück: Der Gefrierpunkt liegt nahe bei 0° . Gelöstes findet sich kaum noch vor; auch die Leitfähigkeit ist erheblich abgesunken. Sie liegt kaum höher als der Ausgangswert, ist aber im Vergleich zur Zahl der gelösten Teilchen überraschend hoch. Das deutet auf die Anwesenheit stark dissoziierter und mehrwertiger Salze hin. Phosphate und Sulfate sind anzunehmen, ihre Menge ist jedoch verschwindend gering. Das Ammoniumcarbonat ist in seine gasförmigen Bestandteile, Kohlensäure und Ammoniak, zerlegt und aus der Lösung entfernt worden. Von einer Mineralisierung der organischen Substanzen, die in den Lehrbüchern genannt wird, kann nicht die Rede sein. Organisches wird — von wenigen und leicht zu übersehenden Ausnahmen abgesehen — flüchtig und zerfällt in CO_2 , NH_3 und Wasser.

In reduktivem Milieu verläuft der Abbau verzögert. Das p_{H} steigt nur langsam an. Die CO_2 -Entwicklung bleibt gegenüber der Sauerstoffdurchströmung zurück. Freies Ammoniak zeigt sich erst gegen Ende des Versuchs. Die Zahl der Teilchen nimmt zunächst noch weiterhin zu; sie fällt erst allmählich ab. Dieses Verhalten zeigt den bestimmenden Einfluß der Redoxlage: im Sauerstoffstrom reichliche Entwicklung von Kohlensäure und Ammoniak. Bei fehlendem Sauerstoff ist die Bildung von freiem Ammoniak gering. Endgültiger und schneller Zerfall bei stark positivem Potential, stabilere Produkte bei fehlendem Sauerstoff. Um welche Abbaustufen es sich bei dem reduktiven Abbau im einzelnen handelt, ist den Untersuchungen nicht zu entnehmen; ihrer Natur nach sind es alkalisch reagierende Stoffe. Amine anzunehmen, liegt nahe. Die Identität dieser Stoffgruppen kann nur durch speziellere Untersuchungen gesichert werden.

Der verzögerte Abbau bei Sauerstoffabschluß oder vermindertem Luftzutritt entspricht der Erfahrung. Wir sehen ihn bei Bestattungen in fest verschlossenen Zinksärgen, bei Wasserleichen und Erdbestattungen. Diese Beobachtung findet hier ihre experimentelle Bestätigung.

Über den Zerfall der Fette geben die von uns durchgeführten Verfahren keine Auskunft.

Unser Vorgehen, physikalische und chemische Verfahren zu kombinieren und die Meßergebnisse als Teilchenzahl anzugeben, hat sich für die Untersuchung eines so heterogenen Materials, wie es die Fäulnis liefert, als recht brauchbar erwiesen. Es vermittelt Einblicke in den Verlauf der Abbauvorgänge, die durch Einzelanalysen — gleich welcher Art — nicht zu erreichen wären. Die Untersuchungsverfahren zusätzlich durch weitere, speziellere Nachweisverfahren zu erweitern, erscheint zweckmäßig. Die Untersuchung jedes einzelnen Abbauvorganges findet

in dem hier aufgezeichneten Schema seinen Platz und ist ihm in zeitlicher Hinsicht nach Zugehörigkeit zur Grundsubstanz und Redoxstellung einzuordnen.

Zusammenfassung

Die Abbauvorgänge der Fäulnis werden in der flüssigen Phase durch die Bestimmung des Gefrierpunktes, der Leitfähigkeit und des p_H , die gasförmigen Zersetzungsprodukte auf ihren Gehalt an CO_2 und NH_3 untersucht. Dieses Vorgehen gewährt durch die Zahl der jeweils in Lösung befindlichen Teilchen, ihren abzuschätzenden Dissoziationsgrad und der Wertigkeit sowie durch die Anzahl der H- und OH-Ionen und die Menge der gasförmig aus der Lösung entweichenden Moleküle einen guten Einblick in den Verlauf des Abbaues. Am Beispiel einer faulenden Rinderleber — 20 g feinzerkleinertes Gewebe werden in 100 ml Wasser bei 28° während der Dauer von 60 Tagen der Fäulnis überlassen — lassen sich mehrere Phasen des Abbaues zeigen.

Die Fäulnis beginnt mit dem Abbau der Kohlenhydrate. Bei erheblicher Zunahme der gelösten Teilchen wird das Gewebe — unabhängig vom herrschenden Potential — zunehmend sauer. Die Säuerung ist auf die Bildung von Milchsäure, deren p_H dem Glykogengehalt entspricht, zurückzuführen.

Im nächstfolgenden Abbau beginnt der proteolytische Zerfall. Die Lösung wird alkalisch, die Leitfähigkeit ist durch die Bildung kohlen-saurer Salze erhöht. Diese Phase ist zugleich das Ende des glykolytischen Zerfalls. Der Abbau der Milchsäure ist redox-abhängig.

Bei Anwesenheit von Sauerstoff erfolgt im weiteren unter reichlicher Bildung von Ammoniak und Kohlensäure und erheblichem Abfall der in Lösung befindlichen Teilchen der schnelle und endgültige oxydative Zerfall der Eiweißkörper. In der Lösung verbleibt ein geringer Rest schwer oxydierbarer Substanzen, deren tägliche CO_2 - und NH_3 -Entwicklung stark abfällt.

Im reduktiven Milieu bilden sich dagegen stabilere, alkalisch reagierende Abbauprodukte, wahrscheinlich Amine. Die Untersuchungsverfahren zusätzlich durch speziellere Nachweisverfahren zu erweitern, erscheint zweckmäßig.

Prof. Dr. Dr. OTTO SCHMIDT,
Institut für gerichtliche Medizin der Universität Göttingen