

Der Feinbau der Zellwände.

Von A. FREY-WYSSLING, Zürich.

Die pflanzlichen Zellwände werden bei den höheren Pflanzen durch die sog. Zellplatte im Äquator der sich teilenden Zellen angelegt. Gegen diese Zellplatte, die später die unpaare Mittellamelle zwischen den Zellen bildet, werden von beiden Seiten dünne Membranen niedergelegt, die man als *Primärwände* bezeichnet. Die primären Zellhäute umkleiden die Zellen während der wichtigen Phase der *Zellstreckung*. Sie weisen dabei ein außergewöhnliches Flächenwachstum auf, das durch Intussuszeption erfolgt. Gegen Abschluß des Streckungswachstums gelangt eine neue Zellwandlage zur Ablagerung, die durch Apposition oft mächtig in die Dicke wächst und als *Sekundärwand* bezeichnet wird. In Fig. 1 ist die Entwicklungsgeschichte der Scheidewand von zwei ausgewachsenen Zellen schematisch dargestellt. Wie

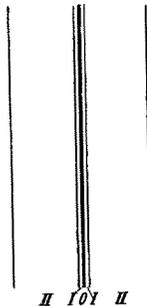


Fig. 1. Schematischer Aufbau der Scheidewand von zwei benachbarten Zellen. O = Mittellamelle (isotrop), I = Primärwand (Flächenwachstum), II = Sekundärwand (meist geschichtet durch Appositionswachstum).

jedes Schema gibt sie die tatsächlichen Verhältnisse nur in ganz groben Zügen wieder. Die Mittellamelle, die sich im Polarisationsmikroskop stets durch vollkommene Isotropie auszeichnet, ist bei ausgewachsenen Zellwänden ohne Anwendung von Quellungsmitteln oft mikroskopisch nicht sichtbar; die Primärwand erscheint dann unpaar, was häufig zu Verwechslungen mit der ursprünglichen Mittellamelle führt. Während der Zellstreckung kann man neben dem Flächenwachstum polarisationsoptisch auch eine gewisse Dickenzunahme der Primärwand feststellen¹⁾, und der Beginn der Sekundärwandbildung kann schon während des Streckungswachstums einsetzen, so daß zwischen Primär- und Sekundärwand entwicklungsgeschichtlich tatsächlich kein so schroffer Gegensatz besteht, wie er hier verallgemeinernd geschildert worden ist. Dagegen ist der innere Feinbau der beiden Zellhüllen weitgehend verschieden, so daß sie getrennt besprochen werden sollen.

1. Sekundäre Zellwand.

Die sekundären Zellwände sind bisher sehr einseitig bearbeitet worden, da, abgesehen von polari-

¹⁾ K. u. M. WUHRMANN-MEYER, Jb. Bot. 87, 642 (1939).

sationsoptischen Untersuchungen²⁾, ausschließlich *faserartige Zellen* wegen ihrer botanischen und technischen Wichtigkeit zur Feinbauanalyse herangezogen worden sind. Da die Fasern hochspezialisierte Zellen sind, darf man an ihren Zellwänden gewonnene Erkenntnisse jedoch nicht ohne weiteres verallgemeinern, wie dies immer wieder geschieht. In einem kurzen Abschnitt soll daher auf den großen Unterschied zwischen dem Verhalten der Zellwände isodiametrischer Zellen und der Faserzellwände eingegangen werden, nachdem die vielen neuen Daten über den Faserbau besprochen sein werden.

a) Zellwandfeinbau der Fasern.

Schichtung und Fibrillierung. Die mächtigen Sekundärwände der Fasern zeigen in der Regel eine mikroskopisch leicht sichtbare Schichtung (z. B. Bambus) oder eine feine Lamellierung, die erst nach Anwendung von Quellungsmitteln in Erscheinung tritt (z. B. Baumwolle). Die Schichtung ist die Folge des Appositionswachstums. Sie ist ein sehr bezeichnendes Merkmal der Sekundärwände; trotzdem darf man ihr für die Erklärung des Faserfeinbaues keine entscheidende Bedeutung zumessen. Denn BAILEY und KERR³⁾ haben bei vielen Holzfasern an Stelle der üblichen konzentrischen Lamellierung interessante Radialstrukturen gefunden, die die Sekundärwand in ihrer ganzen Dicke ununterbrochen durchsetzen. ANDERSON und KERR⁴⁾ ist es sogar gelungen, Baumwollhaare mit mikroskopisch homogenem Querschnitt zu erhalten, indem sie die Baumwollkapseln unter peinlich gleichförmigen Wachstumsbedingungen (konstante Belichtung, konstante Temperatur von 30°) heranwachsen ließen. Die Berücksichtigung der Lamellierung ist somit keine unumgänglich notwendige Voraussetzung für das Verständnis des submikroskopischen Faserfeinbaues.

Ähnlich verhält es sich mit der *Fibrillierung*. Die Sekundärwände pflanzlicher Fasern kann man durch Quellung oder auf mechanischem Wege in Fibrillen zerlegen. Die meisten Faserforscher nehmen an, daß die Fibrillen in der Form, wie sie nach der Mazeration erscheinen, in der Zellwand individualisiert als Elementarbausteine vorgebildet oder sogar von Fremdstoffen umhüllt seien. Im Gegensatz hierzu habe ich die Ansicht vertreten⁵⁾, daß die Fibrillen keine nach Länge und

²⁾ A. FREY, Jb. Bot. 65, 195 (1925) — Z. Mikrosk. 47, 1 (1930).

³⁾ BAILEY u. KERR, J. Arnold Arboretum 18, 261 (1937).

⁴⁾ ANDERSON u. KERR, Ind. Chem. 30, 48 (1938).

⁵⁾ A. FREY-WYSSLING, Protoplasma (Berl.) 25, 261 (1936).

Oberfläche definierten Bausteine sind, sondern lediglich Bruchstücke eines kohärenten submikroskopischen Micellargerüstes vorstellen. Die Dichte der Zellulose ist zufolge mangelhafter Kristallisation örtlich verschieden; die Fibrillen stellen daher Spaltstücke mit besser kristallisierten Zellulosebereichen dar. Daß die Fibrillen der Baumwolle einen scheinbar bestimmten Durchmesser von $0,25 \mu$ besitzen, ist nicht erstaunlich, da eine Lamelle von dieser Dicke bei der Verquellung am

bei vielen Fasern diese zusammenhängende anastomosierende Struktur mikroskopisch sichtbar machen können, und es besteht wohl kein Zweifel, daß ähnliche Bilder auch für das submikroskopische Gebiet gelten (Fig. 2). Zellulosefremde Membransubstanzen, wie z. B. das Lignin, befinden sich in den auskeilenden Spalträumen zwischen den Zellulosesträngen und bilden ihrerseits ein zusammenhängendes Gerüst. Dasselbe gilt für die Verteilung der Aschensubstanzen. Man kann daher aus entsprechend inkrustierten Zellwänden durch Zerstörung oder Auflösung der Zellulose kohärente Kiesel-⁸⁾ oder Lignin-Skelette⁹⁾ gewinnen. Umgekehrt bleibt aber die Zellwand auch nach Entfernung der inkrustierenden Pektinstoffe⁹⁾ oder des Lignins (Bleichung) mikroskopisch unverändert. Die verschiedenen Zellwandsubstanzen durchdringen sich daher gegenseitig als morphologisch gleichwertige Partner. Man kann nicht von einer Umhüllung der Zellulose durch Fremdsubstanzen sprechen, sondern es liegt eine *Durchdringungsstruktur* vor.

Fig. 2 gibt den Aufbau einer pflanzlichen Faser wieder, wie man ihn sich auf Grund der vorliegenden chemischen, röntgenometrischen und polarisationsoptischen Daten vorzustellen hat⁵⁾. Das Schema stammt aus dem Hochschulpavillon der schweizerischen Landesausstellung in Zürich.

Querstrukturen. Durch die verschiedensten Eingriffe gelingt es, die Fasern in Zonen zu zerlegen, die vorgebildete Querstrukturen vortäuschen. Bekannt sind die Kugelquellung intakter Fasern mit Kupferoxydammoniak und die Fasersegmentierung durch Säurebehandlung mit nachfolgender Erhitzung (Karbonisation). LÜDTKE versuchte diese Erscheinungen durch die Annahme von Querhäuten zu erklären, die die Fasern quer durchsetzen. Derselbe Querzerfall legt sich, wenn man gebleichte Fasern (z. B. Ramie) in konzentrierte Zinkchloridlösung legt¹⁷⁾, oder bei Leinenfasern aus ägyptischen Mumienbinden^{9a)}.

Größere Zonierungen treten bei der heterogenen Veresterung von Fasern auf (Fig. 3). Ihre Entstehung ist an hydrophobe Veresterungsgemische gebunden¹⁰⁾, deren Ausbreitung in der Faserrichtung erschwert ist. Mit hydrophilen Veresterungsgemischen tritt die Zonierung nicht auf. Mit kolloidem Silber gefärbte Fasern können unter Umständen eine augenfällige zebraartige Querstreifung aufweisen, die noch größere Perioden aufweist als bei der heterogenen Veresterung (Fig. 4).

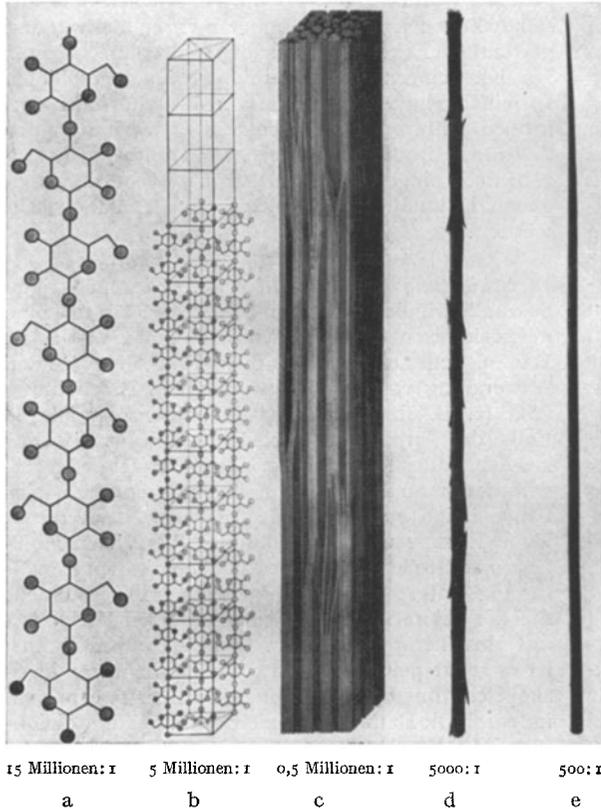


Fig. 2. Schema des Faserfeinbaues mit Angabe des Darstellungsmaßstabes, a) Zellulosekette, b) Kettengitter [nach MEYER u. MISCHE, Helvet. chim. Acta 20, 232 (1937)], c) Micellartextur, d) Fibrille = Faserspaltstück, e) Ende einer Flachsfaser.

ehesten in Spaltstücke von isodiametrischem Querschnitt zerfällt. Es liegt der gleiche Fall vor wie die Zerlegung der Schichten von Stärkekörnern in „Blöckchen“, deren Selbständigkeit als vorgebildete Bauelemente von mir ebenfalls bestritten worden ist⁶⁾; BADENHUIZEN⁷⁾ hat denn auch gezeigt, daß eine zusammenhängende Grundstruktur vorliegt, aus der die Blöckchen durch regelmäßige Zerklüftung entstehen. BAYLEY und KERR³⁾ haben

⁶⁾ A. FREY-WYSSLING, Submikroskopische Morphologie des Protoplasmas und seiner Derivate. S. 280. Berlin 1938.

⁷⁾ N. P. BADENHUIZEN, Rec. trav. bot. néerl. 35, 559 (1938).

⁸⁾ FREUDENBERG, ZOCHER u. DÜRR, Ber. dtsch. chem. Ges. 62, 1814 (1929).

⁹⁾ J. BONNER, Jb. Bot. 82, 377 (1935).

^{9a)} F. NETOLITZKI, Z. allg. österr. Apothekerverein 41, 916 (1903).

¹⁰⁾ A. FREY-WYSSLING, Protoplasma (Berl.) 26, 45 (1936).

Hier sind die ungefärbten Querstreifen Stellen, deren submikroskopisches Kapillarsystem durch Stauchung aufgelockert ist, so daß das in die Faser eingelagerte Silbernitrat, aus dem die kolloiden Silberteilchen erzeugt werden, durch das Reduktionsmittel ausgewaschen wird, bevor die Reduktion erfolgt ist.

Man kann somit in den Fasern, je nach der gewählten Vorbehandlung, die verschiedensten Größenordnungen von Querstrukturen finden: ganz grobmikroskopische bei der Zebrafärbung, eine etwas weniger grobe Zonierung bei der heterogenen Veresterung und eine feine Segmentierung bei der Verquellung in konzentriertem Zinkchlorid; all diese Beobachtungen können beim selben Muster gebleichter Ramiefasern gemacht werden.

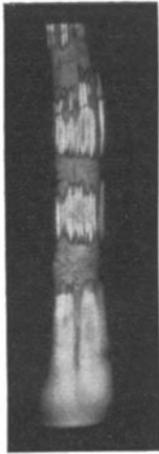


Fig. 3. Heterogene Veresterung einer Ramiefaser, im Polarisationsmikroskop. Weiß: unveresterte Zellulose, grau: Zelluloseacetat. Vergr. 175 fach.

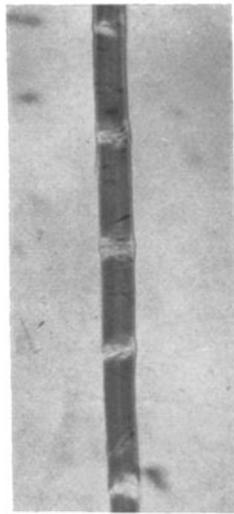


Fig. 4. Zonierte Silberfärbung einer Ramiefaser. Wo die Micellartextur aufgelockert ist, ist die Färbung unterblieben. Vergr. 100 fach.

An Baumwollhaaren hat FARR¹¹⁾ eine noch feinere Querunterteilung gefunden: durch Behandlung mit Salzsäure gelingt es, die Zellwand in Teilchen von 1μ Breite und etwa $1,1 \mu$ Länge zerfallen zu lassen. Diese Teilchen entsprechen etwa den seinerzeit von WIESNER postulierten Dermatosomen, und FARR behauptet, daß diese „Einheiten“ im Zytoplasma vorgebildet und dann ähnlich wie Backsteine in die Zellwand eingemauert werden. Sie geht sogar so weit zu sagen, es stehe nichts im Wege, diese mikroskopischen Teilchen mit den NÄGELISchen Micellen zu identifizieren! Als Kittsubstanz soll eine pektinähnliche Verbindung unbekannter Zusammensetzung dienen. Da diese

¹¹⁾ K.W. FARR, J. Physical. Chem. 42, 1113 (1938) — FARR u. ECKERSON, Contrib. Boyce Thompson Inst. 6, 309 (1934).

Zellwandteilchen durch Einwirkung starker Säuren entstehen, habe ich sie als Hydrolyseprodukte⁵⁾ bezeichnet, und WERGIN¹²⁾ drückt den Sachverhalt wohl richtig aus, wenn er schreibt: „Alle bisher erzielten Unterteilungen bei der mikroskopisch heterogenen Reaktion und der Zerlegung in Dermatosomen ergeben künstlich erzeugte Zerfallsstücke und keine in der Zellwand präformierte Gebilde.“

WERGIN hat nun noch feinere Querunterlagen in der Baumwolle entdeckt, indem es ihm gelang, im Ultraviolettmikroskop an mit Kupferoxydammoniak verquollenen Mikrotomlängsschnitten Teilchen von $0,2-0,25 \mu$ Länge und ähnlicher Breite nachzuweisen. Während er durch Übernahme unserer Auffassung alle größeren Querunterteilungen ablehnt, glaubt er in den neuen Zellwandbruchstücken, deren Ausmaße an der Grenze des lichtmikroskopischen Auflösungsvermögens liegen, die wahren Bausteine der Zellmembranen gefunden zu haben. Er schreibt ausdrücklich, daß diese durch eine Fremdschubstanz, die sie umhüllt, zusammengekittet seien. Er teilt also die Ansichten von FARR¹¹⁾, nur sind seine Teilchen, linear gemessen, 4–5 mal kleiner. Ein solcher Feinbau, der individuelle Zellulosepartikel voraussetzt, die wie bei einem Backsteinbau durch eine zementartige Fremdschubstanz zusammengekittet sind, soll als „Dermatosomen-Feinstruktur“ bezeichnet werden (Fig. 6 b).

Micellar-Textur versus Dermatosomen-Feinstruktur. Nach Fig. 2 kommt den Fasern eine durchgehende Kettengitterstruktur zu, die durch zahllose Fehl- und Lockerstellen gestört ist. Die ungestörten Gitterbereiche entsprechen den Micellen NÄGELIS; aber diese Micellen sind nicht individualisiert, sondern sie sind alle kontinuierlich untereinander verbunden; sie haften seitlich durch Kohäsionskräfte zusammen, ähnlich wie die Fasern in einem gesponnenen Faden. Die Zellwände besitzen nach dieser Auffassung ein zusammenhängendes Micellagerüst, oder eine *Micellar-Textur*.

Die Anhänger der Dermatosomen-Feinstruktur, berufen sich darauf, daß sich ihre Ansicht mit derjenigen NÄGELIS decke, der im submikroskopischen Gebiete ebenfalls individuelle, durch Fremdschubstanz getrennte Zellulosemicelle angenommen hat. Dabei wird jedoch das wesentlichste Postulat von NÄGELI übersehen, nämlich daß die Teilchen stark *anisodiametrisch* sein müssen, um die Anisotropie der Zellwände zu verstehen. Dies trifft nun aber von den neuen mikroskopischen Zellwand-Backsteinen nicht zu, denn sie sind nach den Angaben der Autoren fast isodiametrisch, nur sehr wenig länger als breit. Da bei einer Backsteinstruktur die Quellungsseigenschaften vornehmlich auf dem Quellungsvermögen der unbekannteren Kittsubstanz beruhen, kann die erstaunliche Tatsache, daß pflanzliche Fasern in Wasser bis 20% in die Breite aber praktisch nicht in die Länge quellen, nicht erklärt werden; es sei denn, man nehme für die

¹²⁾ W. WERGIN, Ber. dtsch. bot. Ges. 56, 448 (1938) — Naturwiss. 26, 613 (1938).

Quer- und die Längsrichtung verschiedene Kittsubstanzen oder doch verschiedene Mengen dieser unbekannt Substanz an. Ferner müßte, wie bei einem Mauerwerk, die gesamte Zugfestigkeit von der Kittsubstanz bestritten werden, denn wenn die Zelluloseiteilchen durch Querwände voneinander geschieden sind, so kann die hohe Zugfestigkeit ihres Kettengitters bei Zerreiversuchen gar nicht zur Geltung kommen, da es ja alle $0,25 \mu$ völlig unterbrochen wäre. Die Zugfestigkeit der Zellulose könnte nur ausgenützt werden, wenn die Teilchen miteinander verzahnt wären, wie z. B. die Tracheiden im Koniferenholz (Fig. 5). Dort zerreißen, auch wenn man die Kittsubstanzen der Zellwand-Mittelamellen weich macht, die Zellen quer, weil die Bruchlinie den Mittelamellen entlang 20mal länger wre¹³). Eine solche Auskeilung wird jedoch bei den mikroskopischen „Zellwandbausteinen“ nicht beobachtet, sondern die Querbegrenzung verläuft rechtwinklig, und da diese Bausteine außerdem nicht ausgesprochen anisodiametrisch sind, kann eine wirksame Verzahnung überhaupt nicht zustande kommen. Die Verfechter von verkittenden Fremdhautsystemen, müssen daher zuerst beweisen, daß die hypothetischen Fremdsubstanzen so großartige Festigkeitseigenschaften besitzen, wie wir sie von den Zellulosefasern

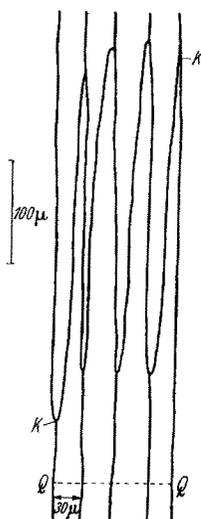


Fig. 5. Verzahnung der Holztracheiden. Die Kontaktlinie K-K der 8 Tracheiden ist etwa 20mal so lang wie die Querbruchlinie Q-Q.

daß die hypothetischen Fremdsubstanzen so großartige Festigkeitseigenschaften besitzen, wie wir sie von den Zellulosefasern

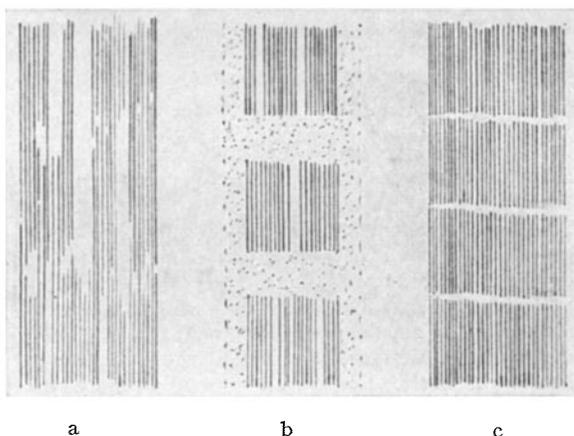


Fig. 6. a) Kettengitter mit Lockerstellen. b) Dermatosen-Feinstruktur. Micellarpakete von einer Fremdsubstanz (punktiert) vollständig umkleidet. c) Moleklgitter von langen Stabmoleklen.

¹³) A. FREY-WYSSLING, Ber. Nr. 119, Eidg. Materialprüfungs- und Versuchsanstalt Zürich 1938.

kennen. Eine aufgelockerte Kettengitterstruktur läßt dagegen die auffallende Festigkeitsanisotropie der Fasern ohne weiteres verständlich erscheinen.

WERGIN stellt sich seine Zellwandbausteine als Micellpakete vor, denen nach seinen Angaben ein Aufbau wie in Fig. 6b zukäme. Verglichen mit Fig. 6a erkennt man, daß nach seiner Auffassung ein Moleklgitter vorliegt mit etwa 2000 \AA langen Stabmoleklen. Es ist nun interessant, daß STAUDINGER und Mitarbeiter¹⁴) eine ganz analoge Struktur für die faserigen Kristalle von hochpolymeren β -Polyoxymethylen annehmen, abgesehen natürlich von den dort unmöglichen Fremdhautsubstanzen (Fig. 6c). In außerordentlich demonstrativen Bildern zeigen sie, wie diese Kunstfasern in Fibrillen (z. B. mit Säuren) oder in Schichten (z. B. mit Laugen) aufgespalten werden können. Trotzdem scheinen moleklgitterartige Anordnungen wie in Fig. 6c wenig wahrscheinlich, denn bei einem solchen Aufbau müßten quer zur Faser ausgesprochene Spalt-ebenen im mineralogischen Sinne durch das Kristallgitter verlaufen. Nun ist es jedoch gerade ein Hauptcharakteristikum der Fasern, daß sie sich quer zur Faserachse mechanisch nicht glatt spalten lassen. Man kommt daher um eine gegenseitige Verzahnung der Fadenmoleküle oder Moleklbndel wie in Fig. 6a nicht herum; es ist auch außerordentlich unwahrscheinlich, daß Fadenmoleküle mit einem Breiten-Längenverhältnis von eins zu einhundert bis einigen Tausend^{14a}) bei der Kristallisation wie kurzstbige Moleküle alle ihre Endgruppen in dieselbe Gitterebene einzuordnen vermögen; ja dies ist geradezu unmöglich, wenn man bedenkt, daß die Kettenlänge solcher Fadenmoleküle wahrscheinlich in weiten Grenzen schwankt.

Die Länge der Querzerfallprodukte von Fasern oder Fibrillen können daher kaum als Maßstab der Länge von Makromolekülen gelten. Sie müssen vielmehr als Querbruchstcke eines Kettengitters betrachtet werden. Bei den Zellulosefasern können für eine solche Querspaltung in erster Linie chemische Kräfte in Betracht kommen. Gewöhnlich sind sie hydrolytischer oder oxydativer Art. WERGIN hat diesen Abbaufaktor, wie aus seinen Viskositätsmessungen hervorgeht, ausgeschaltet. Dagegen besteht die Möglichkeit, daß die Verkupferung, die in einer Komplexsalzbildung besteht, heterogen erfolgt, wie bei der Veresterung von Fig. 3. In Bereichen, wo die Lockerstellen des Micellargerstes häufiger oder stärker entwickelt sind, dringt das Kupferoxydammoniak ein und verflüssigt die Zellulose. Die Gallertesegmente zwischen den Teilchen von WERGIN brauchen deshalb nicht aus Fremdsubstanz zu bestehen, sondern sie

¹⁴) H. STAUDINGER, M. STAUDINGER u. SAUTER, Z. physik. Chem. (B) 37, 403 (1937).

^{14a}) Auf die Streitfrage der Moleklkettenlnge soll nicht eingetreten werden; STAUDINGER gibt für native Fasern Moleküllängen von $1,0-1,5 \mu$ an (Polymerisationsgrade von 2000-3000), während sie WERGIN auf $0,2 \mu$ beschränkt (Breite der Molekülketten $7,5 \text{ \AA}$).

können Stellen anzeigen, wo das Zelluloseketten-gitter zuerst verquollen wird. Daß sich die Teilchen nur zögernd von einander trennen, ist der beste Hinweis dafür, daß sie noch durch submikroskopische „Fransen“ zusammenhängen, die langsam voneinander abgleiten.

Korrosionsbilder und Verschiebungslinien. Neben den senkrecht zur Faserachse verlaufenden Querstrukturen findet man auch schiefe begrenzte Struktureigentümlichkeiten. Verpilzte Fasern können z. B. geradlinig begrenzte Korrosionsfiguren aufweisen, wie sie in Fig. 7 abgebildet sind^{15, 16}). Aus der Kettengitterstruktur der Fasern kann man diese eigentümlichen Figuren verstehen, wenn man sie als Hydrolysebilder auffaßt. Wenn die Hydrolyse im Kettengitter quer fortschreitet, muß sie im Kristallgitter eine flache Zickzacklinie be-

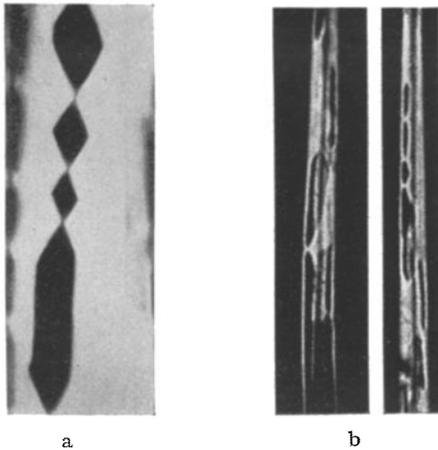


Fig. 7. Korrosionsfiguren der Faserwandung durch Pilze verursacht. a) nach BAILEY u. VESTAL¹⁵) Vergr. etwa 400fach, b) nach BAKER¹⁶). Vergr. etwa 90fach.

schreiben (punktirierte Linie in Fig. 8). Folgt sie dagegen einer Geraden, müssen schiefe Hydrolyseebenen entstehen (strichpunktierte Linien in Fig. 8.) Die Winkel, die sich aus der Fig. 8 berechnen lassen, stimmen mit den spitzen Winkeln der Korrosionsfiguren überein. Diese Winkel werden durch die Lockerstruktur nicht verändert, wohl aber durch Quellungsvorgänge, wie dies auch tatsächlich beobachtet wird¹⁷).

Von ganz allgemeiner Verbreitung sind die sog. Verschiebungslinien, die stets geneigt zur Faserachse verlaufen. Sie treten bei allen Zellen mit Faserstruktur auf, so z. B. auch bei den Sanduhrzellen (Fig. 9) der Leguminosensamen¹⁸). Sie entstehen durch leichte Stauchung der Zellen, z. B. wenn man Längsschnitte durch die Faserstränge herstellt, oder in viel reichlicherem Maße bei der

technischen Aufbereitung der pflanzlichen Textilfasern. Die Deutung dieser Verschiebungslinien ist in verschiedener Richtung gesucht worden¹⁹); doch konnte schließlich nachgewiesen werden, daß ihre Entstehung einfach eine Folge der Ketten-gitterstruktur der Fasern ist: Der Faserfeinbau

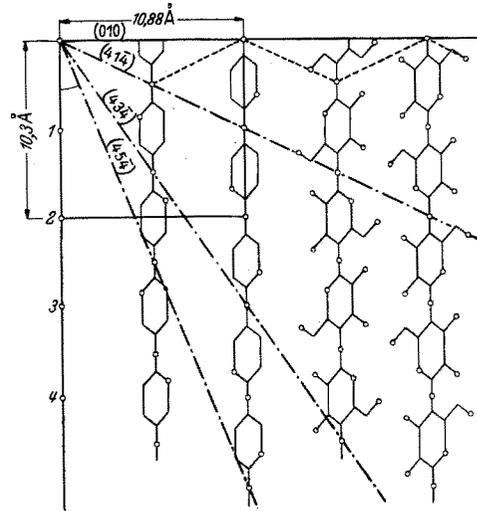


Fig. 8. Hydrolyse-Ebenen im Kettengitter der Zellulose. Quer zur Faserachse erfolgt die Hydrolyse längs einer schwach gebrochenen Zickzacklinie (· · · · ·), schief zur Faserachse dagegen längs Geraden (— · — · —).

wird durch die Stauchung in einer bestimmten Richtung submikroskopisch aufgelockert; die aufgelockerte Stelle erhält dadurch einen elliptischen Querschnitt, während die ungestörte Faser ihren runden Querschnitt beibehält. Es müßte daher bei der gestauchten Stelle ein Bruch eintreten, wenn keine Kettenstruktur vorliegen würde. Diese verhindert jedoch Gleitungen senkrecht zur Faserachse, und der neu entstandene elliptische Querschnitt muß sich daher an einen elliptischen Schnitt durch den Faserzylinder anlegen, d. h. also schief

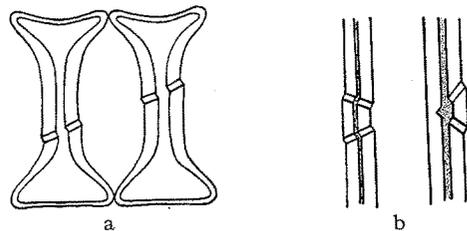


Fig. 9. Verschiebungsfiguren. a) Sanduhrzellen aus dem Samen der Sojabohne. b) Bastfasern (nach v. HÖHNEL).

zur Faserachse verlaufen. Aus der Neigung der Verschiebungslinien kann die submikroskopische Auflockerung berechnet werden; sie beträgt linear gemessen in der Regel etwa 10–15 %²⁰). Die

¹⁵) BAILEY u. VESTAL, J. Arnold Arboretum 18, 196 (1937).

¹⁶) F. BAKER, Nature 143, 522 (1939).

¹⁷) A. FREY-WYSSLING, Papierfabrikant 36, 212 (1938).

¹⁸) A. FREY-WYSSLING, Z. Mikrosk. 51, 29 (1934).

¹⁹) H. AMBRONN, Kolloid-Z. 36, 119 (1925).

²⁰) A. FREY-WYSSLING, Z. Mikrosk. 56, 309 (1939).

Richtigkeit dieser Überlegungen wird bewiesen durch den Nachweis von gleichartigen Verschiebungsfingern bei Asbestfasern, wo die Auflockerung mikroskopisch sichtbar erfolgt (Fig. 10). Da nun der Asbest sicher eine reine Kettengitterstruktur ohne hypothetische Kittsubstanzen besitzt,

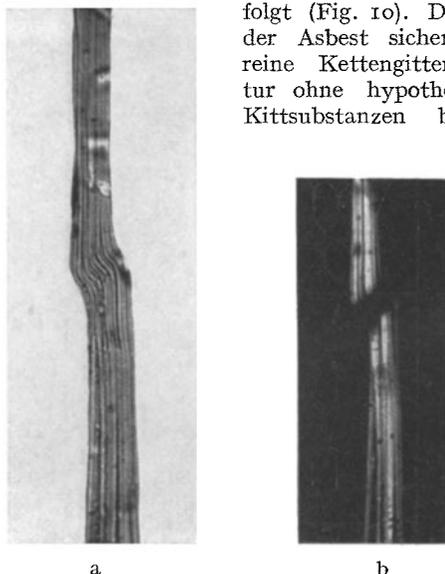


Fig. 10. Verschiebungsfingern von Asbestfasern. a) im nat. Licht, b) im pol. Licht bei gekreuzten Nicols. Schwingungsebenen \times diagonal. Vergr. 175fach.

sind die Verschiebungslinien der Fasern sicher kein Ausdruck einer besonderen Biostruktur.

Für die Vertreter der Dermatosomen-Feinstruktur mit Querunterteilungen der Fibrillen,



Fig. 11. Hydrolysierte Ramiefaser mit Querrissen zufolge der Faserverkürzung durch Behandlung mit Mercerisierlauge. Vergr. 175fach.

dürfte es schwer fallen eine plausible Erklärung für die hier geschilderten Korrosions- und Verschiebungsbilder zu geben.

Faserverkürzung. Auf ähnliche Schwierigkeiten stößt jene Theorie, wenn sie die bekannte Verkürzung der Fasern bei der Mercerisierung erklären sollte; denn durch die Quellung der die Zellulosestränge quer unterteilenden Fremdsubstanz kann doch wohl nur eine Faserverlängerung zustande kommen. Auch die Dermatosomen können sich nicht verkürzen, da ja bei der Mercerisierung nur eine seitliche Ausweitung des Zellulosegitters erfolgt, unter Wahrung der ursprünglichen Faserperiode. Nimmt man dagegen eine Micellar-Textur wie in Fig. 2c an, so wird die Faserverkürzung ohne weiteres verständlich: Durch die starke Quellung wird die schwach schiefe Stellung der anastomosierenden Zellulosestränge verstärkt, wodurch sich eine Verkürzungstendenz geltend macht. Die Richtigkeit dieser Auffassung läßt sich am besten dadurch belegen, daß man die Faserverkürzung ohne Schwierigkeit, und ohne daß in der Faser Querbrüche entstehen, verhindern kann, indem man die Fasern in gespanntem Zustande mercerisiert. Daß dabei trotzdem eine Verkürzungsspannung auftritt, kann man beweisen, indem man die Faser vor der Mercerisierung in Schwefelsäure hydrolysiert. Dies kann geschehen, ohne daß der Faser mikroskopisch äußerlich etwas anzusehen wäre¹⁷⁾. Bringt man sie nun gestreckt in die Mercerisierlauge, so entstehen durch die Verkürzungstendenz sofort Querbrüche wie in Fig. 11.

Lockerstruktur. Das Kettengitter der nativen Zellulosefasern ist nicht kompakt wie beim Asbest, sondern es ist von größeren und feineren Lockerstellen durchsetzt. Die größeren Lockergebiete sind mikroskopisch sichtbar, wie bei den von BAILEY und KERR²⁰⁾ beschriebenen Radialstrukturen. Solche Gebiete, die weniger dichte Zellulose oder Inkrusten beherbergen, sind Stellen, wo die Faser bei geeigneter Behandlung in Fibrillen auseinanderbricht. Sie haben aber nichts mit einem Fremdhautsystem zu tun, denn sie keilen nach unten und oben aus, anastomosieren ihrerseits miteinander und bilden so ein zusammenhängendes Hohlraumsystem.

Feinere Lockerstellen sind von kolloiden Abmessungen. Es sind die Wege, die kolloiden Farbstoffen, wie z. B. Kongorot, den Eintritt in die Faser erlauben. Wären diese Wege periodisch mit Fremdhäuten gesperrt, so könnte man die substantiv Färbbarkeit der Fasern mit kolloiden Baumwollfarbstoffen nicht verstehen. Auch diese Lücken müssen nach oben und unten ausgeilen, denn es kann gezeigt werden, daß die Farbstoffe viel leichter seitlich in die Faser eindringen als diese in der Längsrichtung durchwandern²¹⁾. Man kann die submikroskopischen Räume aufsprengen, indem man in ihnen Jod²²⁾ oder Edelmetalle²³⁾ kristallisieren

²¹⁾ PFENNINGER u. FREY-WYSSLING, *Protoplasma* (Berl.) 33, 371 (1939).

²²⁾ BAILEY u. VESTAL, *J. Arnold Arboretum* 18, 185 (1937).

²³⁾ A. FREY-WYSSLING, *Protoplasma* (Berl.) 27, 563 (1937).

läßt (Fig. 12). Es können dann unter Umständen mikroskopisch sichtbare Kriställchen oder Kristallaggregate entstehen, die über den Verlauf der submikroskopischen Kettengitterspalten Auskunft geben. In diesem anastomosierenden submikroskopischen Kapillarsystem muß man sich die Inkrusten, wie Lignin, Mineralstoffe usw., als das Zellulosegerüst durchwirkendes Inkrustengerüst vorstellen.

Schließlich müssen noch feinere intermicellare Räume für die Quellungserscheinungen der Fasern verantwortlich gemacht werden²⁴). (Daß die Faserquellung nicht ausschließlich auf der Aufquellung von Begleit- und Fremdstoffen beruht, geht daraus hervor, daß Kunstfasern aus umgefällter Zellulose ein den nativen Fasern analoges Quel-

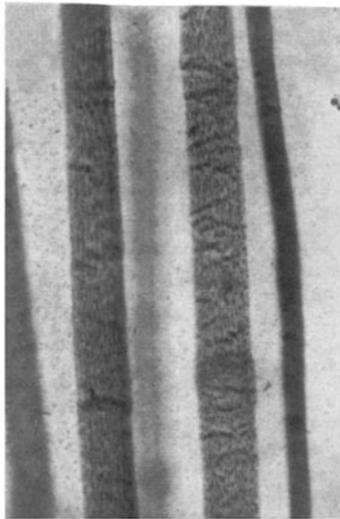


Fig. 12. Stäbchenförmige Haufwerke aus submikroskopischen Silberkriställchen in einer Ramiefaser bis zur mikroskopischen Sichtbarkeit herangezüchtet. Vergr. 175fach.

lungsvermögen besitzen.) Die Inhomogenitäten im Kettengitter nativer Fasern sind daher von ganz verschiedener Größenordnung, und es ist wahrscheinlich, daß die gröberen und feineren Spalträume kontinuierlich in einander übergehen. Es liegt also eine *heterokapillare Lockerstruktur* vor.

Schrauben-Textur. Im allgemeinen verlaufen die submikroskopischen Micellarstränge bei den nativen Fasern nicht parallel zur Faserachse, sondern auf einer Schraubenlinie. Die Richtungsabweichung der Schraubenlinientangente von der Achsenrichtung wird als Steigungswinkel bezeichnet. Dieser beträgt z. B. bei der Baumwolle ungefähr 30°. Die Schrauben-Textur äußert sich im Polarisationsmikroskop dadurch, daß die Fasern

keine vollständige Auslöschung aufweisen, und auf dem Röntgendiagramm durch bogenartige Verbreiterung der Interferenzen des Faserdiagramms zu *Sichelinterferenzen*. Auch die wenigen Bastfaserarten, wie Lein, Hanf, Ramie, Nessel, bei denen die Micellarstränge annähernd achsenparallel verlaufen und so scheinbar eine ideale Fasertextur aufweisen, besitzen eine schwache Schraubungstendenz, nur beträgt der Steigungswinkel dann bloß wenige Grade.

Die Schraubungstendenz kann in der ganzen Sekundärwand einheitlich sein^{25, 26}), oder in den verschiedenen Schichten nach Steigungswinkel und Schraubungssinn verschieden erscheinen²⁷). Soweit solche Bilder durch Verquellung der Fasern gewonnen werden, müssen die Beobachtungen, und namentlich die Messungen von Steigungswinkeln, jedoch vorsichtig gedeutet werden, denn bei der Quellung werden die äußersten Schichten unvergleichlich viel stärker deformiert als die innersten, so daß außen ein flacherer Schraubengang vorgetauscht werden kann, als er tatsächlich vor der Verquellung war. Einwandfreie Ergebnisse erhält man auf Querschnitten durch unverquollene Fasern im Polarisationsmikroskop, wo die verschiedenen Schichten je nach ihrem Steigungswinkel verschieden stark aufleuchten.

Die Schrauben-Textur ist dadurch ausgezeichnet, daß die Micellarstränge, wie bei der idealen Faser-Textur, untereinander parallelisiert sind: es liegt eine *Parallel-Textur* vor. Fasern mit Schraubenbau, wie z. B. die Baumwollhaare, weisen daher alle Baueigentümlichkeiten der Bastfasern auf, wie: Zerlegbarkeit in Fibrillen, Querspaltung in Dermatosomen, Kugelquellung, Verschiebungslinien usw. Sobald jedoch diese Parallelität verschwindet, gehen auch die aufgezählten Eigenschaften verloren.

Gekreuzte Systeme. Einen besonderen Fall stellen die Zellwände der Siphonocladen-Algen *Valonia*²⁸), *Chaetomorpha*²⁹) usw. dar, in denen das Röntgendiagramm zwei sich annähernd senkrecht überschneidende Faser-Texturen verrät. Bei *Valonia* lassen sich aus den sich überkreuzenden Schichten nur noch mit Mühe Fibrillen gewinnen³⁰), während dies bei *Chaetomorpha*, wo submikroskopisch dünne, sich kreuzende oder durchwebende Lamellen vorliegen²⁹), nicht mehr gelingt. Mit dem Verlust der Parallel-Textur gehen also auch die für die Fasern charakteristischen mikroskopischen Eigenschaften verloren, wenn schon röntgenometrisch am Gitterbau sich nichts verändert hat.

²⁵) JACCARD u. FREY, Jb. Bot. 68, 84 (1928).

²⁶) R. D. PRESTON, Phil. Trans. 224 B, 131 (1934).

²⁷) H. REIMERS, Mitt. Forsch.inst. Textilstoffe Karlsruhe 1922, 109.

²⁸) PRESTON u. ASTBURY, Proc. roy. Soc. London 122, B 76 (1937).

²⁹) NICOLAI u. FREY-WYSSLING, Protoplasma (Berl.) 30, 401 (1938).

³⁰) G. V. IFFERSON, Chem. Weekblad 30, 1 (1933).

²⁴) A. FREY-WYSSLING, Protoplasma (Berl.) 27, 372 (1937).

b) Zellwandfeinbau isodiametrischer Zellen.

Neben den technisch wichtigen Fasern kommen in der Pflanze große Mengen von dickwandigen Zellen vor, die bei den üblichen Hypothesen über den Aufbau der sekundären Zellwände gewöhnlich außer acht gelassen werden: nämlich die *Holzparenchymzellen* und die *Steinzellen*. Mikroskopisch weisen sie eine charakteristische Tüpfelung und die übliche Zellwandschichtung auf. Dagegen lassen sie sich weder in Fibrillen noch in Dermatosomen zerlegen, und zeigen bei der Verquellung nie die Erscheinung der Kugelquellung. Sie besitzen also, vom Standpunkt der Fremdhaut- und Dermatosomenfeinbau-Theorie aus betrachtet, lauter negative Merkmale, so daß jene sicher keinen Anspruch auf Allgemeingültigkeit erheben kann.

Andererseits weisen die Holzparenchym- und Steinzellen alle jene Eigenschaften auf, die einem in Unordnung geratenen Kettengitter mit heterokapillarer Lockerstruktur entsprechen, wie Quellungsanisotropie, Doppelbrechung, Dichroismus usw. Alle diese anisotropen Eigenschaften sind weniger ausgeprägt als bei den Fasern; es gibt je nach den Verhältnissen alle Übergänge bis zu vollkommener Isotropie. Dies ist so zu verstehen, daß die geordneten Gitterbereiche oder Micelle in ihrer gegenseitigen Lage Richtungsverschiedenheiten aufweisen, so daß die anisotropen Effekte abgeschwächt und bei völliger Unordnung durch statistische Isotropie abgelöst werden. Diese Streuung braucht nun nicht in einer Ebene zu erfolgen. Das zusammenhängende Micellargerüst macht es im Gegenteil wahrscheinlich, daß die verschiedenen Richtungen der submikroskopischen Zellulosestränge sich in verschiedenen, dicht aufeinanderfolgenden Ebenen überkreuzen und sich vielleicht gegenseitig sogar durchweben. In diesem Sinne kann man PRESTON³¹⁾ beipflichten, wenn er sich dagegen wendet, daß in der Zellwand individuelle Kristallite „streu“n. Es ist klar, daß in einer Tangentialebene zur Zelle die geordneten Gitterbereiche nicht beliebige Stellungen einnehmen können, da sie alle seitlich miteinander verwachsen sind^{31a)}. Aber in einer nächstfolgenden Ebene kann die Orientierungsrichtung dann wechseln. Mit dem Polarisationsmikroskop kann man nicht entscheiden, ob die Streuung in einer Ebene oder in der Tiefe, auf verschiedenen sich folgenden Ebenen mit wechselnder Haupttrichtung, erfolgt. Das letztere ist wahrscheinlicher. Daß solche Überkreuzungen von submikroskopischen Schichten vorkommen, ist am Beispiel der Algenzellwände von Chaetomorpha gezeigt worden²⁹⁾.

2. Primäre Zellwand.

Alle Zellwände sind von der vom meristematischen Flächenwachstum herrührenden Primär-

wand umkleidet, die wesentlich andere Eigenschaften besitzt als die für die Zellulose-, Papier- und Textilindustrie so wichtigen Sekundärwände.

Röhren-Textur. Nach dem polarisationsoptischen Befunde verlaufen die Micellarstränge in den Primärwänden nicht in der Längsrichtung anisodiametrischer Zellen, sondern quer zur Zellachse. Außerdem sind sie untereinander nicht parallelisiert, sondern sie müssen, nach der Doppelbrechung auf dem Längsschnitt durch die Zelle zu schließen, in ihrer Richtung um die optisch feststellbare Haupttrichtung schwanken oder streuen. Dieser Wandfeinbau ist als *Röhrenstruktur* bezeichnet worden³²⁾; da die einzelnen Micellarstränge untereinander anastomosieren, sagt man heute vielleicht besser *Röhren-Textur*. PRESTON³¹⁾ glaubt dagegen, daß in den Primärwänden eine Schrauben-Textur vorliege. Dann müßten solche Zellwände im Polarisationsmikroskop bei Aufsicht theoretisch nicht richtig auslösen. Dieser Effekt ist aber bei der außerordentlich schwachen Doppelbrechung der jungen Primärwände, die leicht übersehen wird³³⁾, schwer nachzuweisen. Es gibt jedoch andere Gründe, die gegen die Auffassung von PRESTON sprechen. Besäßen die Primärhäute Schraubenaufbau, so käme ihnen eine Parallel-Textur zu. Sie müßten daher parallel zur Schraubenrichtung leicht aufspalten, bei mechanischer Beanspruchung Verschiebungslinien zeigen usw. Von all den für Parallel-Texturen bekannten Effekten beobachtet man bei den Primärhäuten jedoch nichts. Ferner müßte man bei der Kugelquellung ausgewachsener Fasern ein schiefes Aufreißen der Primärhäute erwarten, was wiederum nicht eintritt. Außerdem gibt Sisson^{34a)} ausdrücklich an, daß in den Primärwänden röntgenologisch keine Ordnung der Zellulose nachgewiesen werden kann. Ich glaube daher, daß in den Primärhäuten keine Parallel-Textur vorhanden ist.

Wie bereits erwähnt, läßt sich dagegen die Ablehnung der „Streuung“ geordneter Gitterbereiche in einer Tangentialebene eher verteidigen. Dann müssen aber die verschiedenen Richtungen in dicht aufeinanderfolgenden Ebenen vertreten sein (vgl. Fig. 13). Daß solche gekreuzte Systeme in der Primärwand der Baumwolle auftreten, haben ANDERSON und KERR wahrscheinlich gemacht⁴⁾. Wenn man daher die Bezeichnung „Streuung“ fallen lassen will, so muß man sagen, daß in der Primärwand gekreuzte Systeme von submikroskopischer Lamellendicke vorkommen. Falls die Lamellen dünner sind als Wellenlängen des Lichtes, so kommt es für die optische Betrachtung aufs selbe heraus, ob Streuung oder Kreuzsysteme vorliegen; denn das Polarisationsmikroskop erlaubt nurmehr die Ermittlung von statistischen Mittelwerten, wenn die Dimensionen der Untersuchungsobjekte unter die Wellenlänge des Lichtes sinken. Es liegt daher keine Veranlassung vor,

³¹⁾ R. D. PRESTON, Proc. roy. Soc. London **125**, B 372 (1938).

^{31a)} Vgl. hierzu das Prinzip der „Ordnung in kleinen Bereichen“ von O. KRATKY, Z. Papier, Pappe usw. **56**, 149 (1938).

³²⁾ A. FREY, Z. Mikrosk. **47**, 1 (1930).

³³⁾ HESS, TROGUS u. WERGIN, Planta (Berl.) **25**, 432 (1936).

das Bild von Fig. 13 über den submikroskopischen Feinbau der Röhren-Textur abzuändern: Es liegt ein zusammenhängendes Micellargerüst aus sehr feinen Zellulosefäden vor mit statistisch vorwiegender Querorientierung und verhältnismäßig großen intermicellaren Maschen.

Chemismus. HESS und Mitarbeiter glaubten das Vorkommen von Zellulose in der Primärwand ausschließen zu müssen, als sie röntgenometrisch die Gegenwart von wachsartigen Stoffen feststellen konnten³³⁾. Ihr Befund erklärt, die seit langem

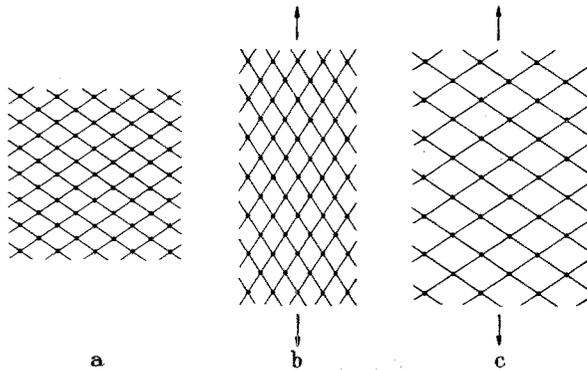


Fig. 13. Schema der Röhrentextur primärer Zellwände. a) vor der Zellstreckung (= Haftpunkte), b) künstlich gedehnt, c) nach vorübergehender Lösung der Haftpunkte natürlich gedehnt.

bekannte Tatsache, daß die jungen Primärwände sich mikrochemisch anders verhalten als die später entstehenden Sekundärwände. Später mußten sie ihre Ansicht jedoch wieder fallenlassen, und zu der von uns vertretenen Anschauung zurückkehren^{33a)}, daß in den wachsenden Primärwänden eine zellulose Grundlage vorhanden sei. Es ist ihnen nämlich gelungen, nach geeigneten Extraktionen³⁴⁾, in Bestätigung früherer Versuche von Sisson^{34a)}, die Zellulose in den Primärwänden wachsender Baumwollhaare nachzuweisen. Es werden dabei offenbar Substanzen aus den Maschen des Micellargerüsts entfernt, worauf ein Zusammentreten der feinen Zellulosefäden zu etwas größeren, röntgenometrisch nachweisbaren Zellulosesträngen stattfindet.

Streckungswachstum. Ein großes Rätsel bildet das ungeheure Flächenwachstum der Primärwand bei dem außergewöhnlichen Streckungswachstum der Meristemzellen. Sehr auffallend ist dieses Wachstum bei den Filamenten der Gräser³⁵⁾, wo die Epidermiszellen in wenigen Stunden eine 6fache Längenzunahme erfahren, oder gar bei den

Baumwollhaaren, die in 18 Tagen von etwa 50 μ Länge auf 28 mm heranwachsen⁴⁾, also eine 500- bis 600fache Verlängerung durchmachen. Trotzdem erscheint die Röhren-Textur der Primärwände nach Abschluß dieses gewaltigen Streckungswachstums erhalten^{36, 37)}. Wenn Fig. 13a die submikroskopische Röhren-Textur schematisch wiedergibt, so würde man doch wohl bei so starker Streckung eine Umorientierung wie in Fig. 13b erwarten. Dies ist jedoch nicht der Fall, sondern die submikroskopischen Micellarstränge weichen durch annähernde Parallelverschiebung auseinander (Fig. 13c). Wir haben dies so gedeutet, daß sog. „Haftpunkte“ im Micellargerüst, wo die Micellarstränge gegenseitig aneinanderhaften, beim Streckungswachstum gelöst werden. Dadurch verliert die Zellwand einen Teil ihrer Elastizität und wird viel plastischer. Nach Abschluß des Streckungswachstums geht diese Plastizität durch Verhärtung der Haftpunkte wieder verloren. Falls sich der Turgordruck an diesem außergewöhnlichen Streckungswachstum beteiligt, so ist leicht zu verstehen, daß die Querorientierung der Zellulosegerüststränge während dieses Vorganges erhalten bleibt. In einer unter Druck stehenden Röhre ist nämlich der Querschnitt in der Wandung doppelt so groß als der Längszug³⁸⁾, weshalb geborstene Röhren von Wasserleitungen u. dgl. nie Querrisse, sondern stets Längsrisse aufweisen.

3. Schlußfolgerung und Zusammenfassung.

1. In einer Zellwandschicht können die Zellulosestränge des Micellargerüsts untereinander annähernd parallel verlaufen (*Parallel-Textur*) oder sie können verschiedene Richtungen einnehmen (*submikroskopisch gekreuzte Systeme oder Streuung*).

2. Zellwandschichten mit Parallel-Textur lassen sich in Fibrillen spalten und in dermatosomenartige Teilchen zerlegen; ferner weisen sie meistens Verschiebungslinien auf. Zellwandschichten ohne Parallel-Textur zeigen all diese Erscheinungen nicht. Diese Merkmale dürfen daher nicht dazu verwendet werden, um ein allgemeines Bild vom Feinbau der Zellwände zu entwerfen. Denn Sonder-eigenschaften sind zur Aufstellung umfassender Theorien nicht geeignet.

3. Allgemeine Zellwandeigenschaften, die allen Zellwänden zukommen, sind dagegen: Festigkeitsanisotropie, Quellungsanisotropie, Eigendoppelbrechung, Formdoppelbrechung, Dichroismus, Lockerstruktur usw. Vollgültige Anschauungen über den Zellwandfeinbau müssen deshalb aus diesen Eigenschaften abgeleitet werden. Die Anschauung, daß dem Feinbau der Zellwände ein kohärentes Micellargerüst zugrunde liege, vermag all diese allgemeinen Membraneigenschaften befriedigend zu erklären.

^{33a)} A. FREY-WYSSLING, Die Stoffausscheidung der höheren Pflanzen. Berlin 1935.

³⁴⁾ HESS, KIESSIG, WERGIN u. ENGEL, Ber. dtsch. chem. Ges. 72, 642 (1939).

^{34a)} W. A. SISSON, Contr. Boyce Thompson Inst. 8, 397 (1937); 9, 243 (1938) — Chronica Botanica 5, 344 (1939).

³⁵⁾ H. SCHOCH-BODMER, Verh. schweiz. naturf. Ges. 1937, 150 — Planta (Berl.) 30, 168 (1939).

³⁶⁾ FREY-WYSSLING u. SCHOCH-BODMER, Planta (Berl.) 28, 257 (1938).

³⁷⁾ W. WERGIN, Naturwiss. 25, 830 (1937).

³⁸⁾ E. S. CASTLE, J. cellul. a. comp. Physiol. 10, 113 (1937).

4. Ähnlich wie die Zellen die Grundbausteine der Organismen und ihrer Gewebe bilden, so muß man die organischen Riesenmoleküle als die Grundbausteine der Zellen und ihrer Bestandteile betrachten. Sie vergesellschaften sich miteinander zu zusammenhängenden Systemen, welche die be-

sonderen Eigenschaften der Zellbestandteile im allgemeinen und der Zellwände im besonderen besser verständlich machen, als wenn man diesen Kolloiden korpuskular disperse Teilchen zuschreibt, die individualisiert und unabhängig voneinander kein organisches Ganzes zu bilden vermögen.

Maximilian Toepler zum 70. Geburtstag.

Professor Dr. MAXIMILIAN TOEPLER vollendet am 25. Juni 1940 sein 70. Lebensjahr. Wir freuen uns, daß er seinen Geburtstag in Gesundheit und geistiger Frische begehen kann, und nehmen gerne Gelegenheit, ihm zugleich im Namen aller Fachgenossen die herzlichsten Glückwünsche darzubringen. TOEPLERS Arbeiten, denen die Physik viel verdankt, lassen seine originelle schöpferische Begabung klar erkennen. Mit innerer Freude greift er physikalische Probleme auf und löst sie mit großem Geschick. TOEPLERS Veröffentlichungen enthalten wichtige Beiträge zu den mannigfaltigen Gasentladungserscheinungen (TOEPLER-PEEKESche Formel für Anfangsspannungen, TOEPLERS Gesetze des Funkenwiderstandes, Deutung der Blitze). Ihm gelang weiter die erste Photographie der Ultraschallwellen nach AUGUST TOEPLERS Schlierenmethode; diese Methode hat be-

kanntlich in der Ultraschallforschung eine außerordentliche Bedeutung erlangt. Auch auf dem Gebiet der Meteorologie hat TOEPLER eine Reihe von interessanten Abhandlungen veröffentlicht; ich erwähne die Konstruktion eines fast trägheitsfreien Luftdruckvariometers, mit dem er die erste Registrierung der HELMHOLTZschen Windwogen vornahm. TOEPLER hat sich auch lebhaft für rein technische Fragen interessiert und 27 Jahre im Prüffeld der Fabrik für Hochspannungsisolatoren in Hermsdorf mit großem Erfolge mitgearbeitet. Sehr schöne Untersuchungen, die in den Mitteilungen der Hermsdorf-Schomburg Isolatoren Gesellschaft veröffentlicht sind, entstammen dieser Zeit. Lauterer Charakter und schlichtes sympathisches Wesen kennzeichnen die Persönlichkeit TOEPLERS. Möge es ihm vergönnt sein, noch viele Jahre im Dienst der deutschen Forschung zu wirken! H. FALKENHAGEN.

Mitteilungen aus der Kernphysik.

Das neue 1,5 Meter-Zyklotron in Berkeley (Calif.).

In einem früheren Bericht [Naturwiss. 25, 479 (1937)] wurden bereits einmal die Fortschritte im Zyklotronbau dargelegt und auch das Prinzip kurz erläutert. Das damals beschriebene Zyklotron ist inzwischen von LAWRENCE und seinen Mitarbeitern weiter verbessert worden. Es arbeitet jetzt mit einem

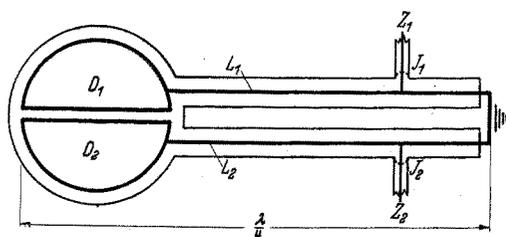


Fig. 1. Schematische Darstellung des Schwingungssystems der Beschleunigungselektroden (D -Elektroden) im Zyklotron. Das Magnetfeld ist senkrecht zur Papierebene gerichtet. Die Ionen kreisen um den Mittelpunkt der D -Elektroden (D_1, D_2).

Kammerdurchmesser von 75 cm und einer Feldstärke von 15 500 Gauss. Die Resonanzbedingung des Zyklotrons erfordert bei dieser Feldstärke einen Sender mit einer Wellenlänge von 25,5 m. Die Energie des austretenden Deuteronenstrahls beträgt dann 8,5 eMV (Elektronen-Megavolt), die Energie der doppelt ionisierten α -Strahlen 17 eMV. Der Deuteronenstrom konnte im Dauerbetrieb auf 100 μ A (Mikroampere) gesteigert werden, so daß im Brennfleck des Zyklotrons eine Energie von rund 1 kW zu vernichten ist. Ex-

perimentelle und theoretische Untersuchungen über die Fokussierung des Ionenstrahls im Zyklotron von R. R. WILSON [Physic. Rev. 53, 408 (1938)] haben zu wichtigen Erkenntnissen für die Konstruktion des Beschleunigungssystems geführt. Seitlich eingeführte Sonden [R. R. WILSON und M. D. KAMEN, Physic. Rev. 54, 1031 (1938)] haben weiter die Möglichkeit gegeben, den größten Teil früher unausgenützter Ionenströme von 400–500 μ A zur Herstellung von langlebigen radioaktiven Substanzen heranzuziehen. Es handelt sich hierbei um kreisende Ionenströme, die von dem elektrischen Ablenkungsfeld nicht erfaßt werden und so den eigentlichen Brennfleck in der Bestrahlungskammer nicht erreichen.

Von der großen Leistungsfähigkeit eines modernen Zyklotrons geben folgende Zahlen eine Vorstellung: Der oben erwähnte Deuteronenstrom von 100 μ A entspricht $6,3 \cdot 10^{14}$ Teilchen pro sec. Um die gleiche Zahl von α -Strahlen mit natürlich radioaktiven Quellen zu erzeugen, würde man eine Menge von rund 20 kg Radium benötigen. Bei einer ganztägigen Bestrahlung von Phosphor mit Deuteronen kann z. B. auf den oben erwähnten Sonden ein Präparat von 10 mCurie Radiophosphor ($^{32}_{15}P$) erzeugt werden. Diese Präparatstärke ist bereits vollkommen ausreichend für therapeutische Zwecke, Dieser radioaktive Phosphor ist in der geringen bestrahlten Menge von 40 mg inaktivem Phosphor ($^{31}_{15}P$) enthalten, so daß sich eine Konzentration von 1 mCurie $^{32}_{15}P$ auf 4 mg aktiven Phosphor erreichen läßt. Da die Halbwertszeit von $^{32}_{15}P$ 14 Tage beträgt, so lassen sich mit längerer Bestrahlung sowohl wesentlich stärkere Aktivitäten als auch höhere Konzentrationen erzielen.

Nun ist im Laufe des vergangenen Jahres das neue Zyklotron von LAWRENCE und seinen Mitarbeitern