

***Girardinia diversifolia* (LINK) FRIIS (Urticaceae)**  
**– eine neue Faserpflanze –**  
**Untersuchungen zu den morphologischen und mechanischen**  
**Fasercharakteristika**

**Dissertation**

zur Erlangung des Doktorgrades  
des Fachbereiches Biologie  
der Universität Hamburg

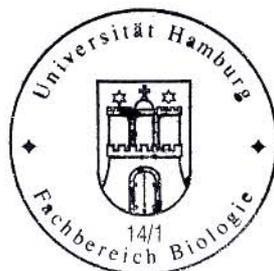
vorgelegt von  
**Annette Sethmann**  
aus Hamburg

Hamburg 2004

Genehmigt vom  
Fachbereich Biologie der  
Universität Hamburg  
auf Antrag von Frau Professor Dr. G. DREYLING  
Weitere Gutachter der Dissertation:  
Herr Professor Dr. R. LIEBEREI

Tag der Disputation: 19. November 2004

Hamburg, den 04. November 2004



Professor Dr. Arno Frühwald  
Dekan

*Alles, was die Natur selbst anordnet,  
ist zu irgendeiner Absicht gut*

IMMANUEL KANT

## **Veröffentlichung von Teilen dieser Dissertation**

SETHMANN, A., DREYLING, G., 2001: *Girardinia diversifolia* (LINK) FRIIS – Morphological and Anatomical Characteristics of a Fibre Plant. Journal of Applied Botany 75, 112 - 117

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Nutzung von <i>G. diversifolia</i> in Nepal .....</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Material und Methoden .....</b>	<b>9</b>
3.1	Pflanzenanzucht .....	9
3.2	Probenahme .....	11
3.3	Faserisolierungen .....	12
3.4	Mikroskopische Untersuchungen .....	15
3.4.1	Lichtmikroskopische Untersuchungen .....	15
3.4.2	Anfertigung von Stängelquerschnitten .....	15
3.4.3	Herstellung von Semidünnschnitten .....	16
3.4.4	Lichtmikroskopische Färbungen .....	17
3.4.5	Rasterelektronenmikroskopische Untersuchung .....	18
3.5	Faseranalysen .....	20
3.5.1	Morphologie der primären Phloemfasern (Primärfasern) .....	20
3.5.2	Faserlänge und Feinheit .....	20
3.5.3	Faserdickenmessung und Zugprüfung .....	21
3.5.4	Morphologie der sekundären Phloemfasern (Sekundärfasern) .....	24
3.6	Statistische Auswertung .....	24
<b>4</b>	<b>Ergebnisse .....</b>	<b>26</b>
4.1	Stängelanatomie .....	26
4.2	Fasermasse und Fasergehalt des Stängels .....	32

---

<b>4.3 Morphologie der primären Phloemfasern (Primärfasern)</b> .....	<b>35</b>
4.3.1 Isolierte Fasern - Längsansicht.....	35
4.3.1.1 Faserwindung .....	35
4.3.1.2 Faserspitzen.....	37
4.3.1.3 Protoplast und Zellwand .....	37
4.3.2 Fasern im Gewebeverband - Querschnitte .....	44
<b>4.4 Morphologie der sekundären Phloemfasern (Sekundärfasern)</b> .....	<b>46</b>
<b>4.5 Nutzungsrelevante Primärfaser-Charakteristika</b> .....	<b>48</b>
4.5.1 Faserlänge.....	48
4.5.2 Faserfeinheit .....	51
4.5.3 Faserdicke.....	53
4.5.4 Höchstzugkraft und Zugfestigkeit.....	56
4.5.5 Dehnungsmodul .....	57
4.5.6 Höchstzugkraftdehnung .....	57
4.5.7 Feinheitsbezogene Höchstzugkraft .....	59
<b>5 Diskussion</b> .....	<b>61</b>
<b>5.1 Nutzungsrelevante Aspekte der Stängelanatomie von <i>G. diversifolia</i></b> .....	<b>61</b>
<b>5.2 Fasermasse und Fasergehalt</b> .....	<b>64</b>
<b>5.3 Entstehung der morphologischen Fasercharakteristika</b> .....	<b>67</b>
5.3.1 Fasergestalt.....	67
5.3.2 Verschiebungen und Querstreifungen.....	68
5.3.3 Die Struktur der Sekundärwand .....	70
<b>5.4 Vergleichende Bewertung der Fasereigenschaften von <i>G. diversifolia</i></b> .....	<b>74</b>
5.4.1 Faserlänge, Faserfeinheit und Faserdicke .....	74
5.4.2 Mechanische Eigenschaften .....	80
<b>5.5 Ist eine Identifizierung der Fasern von <i>G. diversifolia</i> im Vergleich zu anderen Bastfasern möglich?</b> .....	<b>86</b>

---

<b>6 Zusammenfassung.....</b>	<b>87</b>
<b>Summary .....</b>	<b>90</b>
<b>7 Literaturverzeichnis.....</b>	<b>92</b>
<b>Glossar.....</b>	<b>102</b>
<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>104</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>107</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>108</b>
Danksagung.....	109
Wissenschaftlicher Werdegang.....	110

# 1 Einleitung

Die Faserpflanze *Girardinia diversifolia* (LINK) FRIIS wird als Wildpflanze in Nepal zur Herstellung von Textilien genutzt. Über die Eigenschaften der Fasern liegen bisher nur wenige veröffentlichte Untersuchungen vor, die ausschließlich am Standort Nepal vorgenommen worden sind und keine umfassende Fasercharakterisierung erlauben. Mit der vorliegenden Arbeit werden für eine Nutzung erforderliche grundlegende Faserkenntnisse von Pflanzen des Standortes nordöstliche Stadtgrenze Hamburg präsentiert. Ziel ist es, umfassende nutzungsrelevante Daten zu den Fasereigenschaften, besonders im Hinblick auf eine textile Nutzung, vorzustellen. Für eine Einschätzung der Faserqualität wird im Rahmen der Diskussion ein Vergleich mit den ökonomisch wichtigsten Bastfaserpflanzen (Flachs, Hanf, Ramie und Fasernessel) vorgenommen.

Die Untersuchung der Stängelanatomie gibt erste wichtige Informationen zur Fasermorphologie. Hieraus ergeben sich Konsequenzen für den Faseraufschluss als grundlegenden Schritt der Fasergewinnung.

Für die Konversion von Fasern in brauchbare Endprodukte werden Kenntnisse über die Fasercharakteristika benötigt, denn hierauf basieren die anzuwendenden Technologien. Dies beinhaltet charakteristische mikroskopische und morphometrische Merkmale der Fasern, sowie Daten zu ihren mechanischen Eigenschaften. Hierbei fand die Lage der Fasern bezüglich der Stängelhöhe besondere Berücksichtigung, da die Fasereigenschaften mit den verschiedenen Stängelabschnitten von der Basis bis zur Spitze variierten. Aus diesem Grund wurden die Fasern zur Analyse abschnittsweise aus den Stängeln isoliert.

Ergänzend wurde eine morphologisch-anatomische Beschreibung der Fasern von *G. diversifolia*, die einen Vergleich zu den bekannten Faserpflanzen erlaubt, vorgenommen. Die Beschreibung ist weiterhin Grundlage für das Erkennen von Schädigungen durch Mikroorganismen (Pilze, Bakterien), mechanischen (z. B. Abrasion), chemischen (z. B. Behandlung mit Laugen und Säuren) und physikalischen (z. B. Hitze) Einwirkungen während der Faserverarbeitung. Zudem beeinflusst die Oberflächenstruktur das Verhalten in jedem Stadium der Umwandlung des Rohmaterials in ein Endprodukt (RAHMAN, 1979).

Durch die starke Verbreitung der Regenerat- und Synthesefasern sowie die Nutzung von Baumwolle, ist die einstige Bedeutung von Stängelfasern (insbesondere Flachs) nicht mehr gegeben. Die zum Vergleich herangezogenen mikroskopischen Untersuchungen von Stängelfasern waren daher rar und häufig älteren Datums.

## Artbeschreibung

*Girardinia diversifolia* (LINK) FRIIS gehört wie die Faserpflanzen *U. dioica* L. (Fasernessel) und *Boehmeria nivea* (L.) GAUDICH. (Ramie) der Familie Urticaceae an. Unter der Artbezeichnung fasste FRIIS (1982) Arten zusammen, die durch Zwischenformen verbunden waren. Hauptverbreitungsgebiete sind Ost-Afrika, Indien, Himalaja und Südostasien.

Es handelt sich um ausdauernde krautige Pflanzen, die eine Länge von 1,5 – 3 m erreichen (SINGH und SHRESTHA, 1988). Die Stängel sind wenig verzweigt, und alle oberirdischen Oberflächen sind mit bis zu 9 mm langen Brennhaaren bedeckt (FRIIS, 1989a). Zusätzlich sind Borsten- und Drüsenhaare, sowie punktförmige Cystolithen vorhanden. Die Blätter sind alternierend, lang gestielt (3 – 15 cm) und variieren in der Form. Die Blattspreiten sind ungeteilt oder drei- bis siebenfach geteilt mit drei von der Basis ausgehenden stärkeren Blattnerven. Die Vielfalt der Blattformen tritt bereits an einer Pflanze auf und hat zur Bezeichnung polymorphe Art und zu zahlreichen Synonymen geführt (FRIIS, 1989a, 1982). Die Nebenblätter sind linear lanzettlich, fast bis zur Spitze verwachsen und fallen zur Blütezeit ab (FRIIS, 1989a).

Die Pflanzen sind monözisch oder diözisch. Ihre rispenartigen Infloreszenzen tragen eingeschlechtliche Blüten (FRIIS, 1989b). (Die in Hamburg kultivierten Pflanzen waren monözisch.) Die männlichen Infloreszenzen sind wenig verzweigt und erreichen eine Länge von bis zu 10 cm. Die kurz gestielten staminate Blüten ( $\varnothing$  ca. 1 mm) stehen in dichten Knäueln und enthalten vier bis fünf Tepalen, die gleiche Anzahl Staubblätter in superponierter Stellung und einen rudimentären Fruchtknoten. Die weiblichen Infloreszenzen sind stark verzweigt bis hin zu Dichasien und werden 10 bis 15 cm lang. Die pistillaten Blüten ( $\varnothing$  ca. 1,5 mm) sind ungestielt und besitzen drei verwachsene Tepalen und wenn vorhanden, ein rudimentäres viertes Tepalum. Die fadenförmige Narbe ragt aus der Blüte heraus. Die Frucht ist ein Nüsschen (FRIIS, 1982, 1989a, 1989b). Die Keimung erfolgt mit einer ausgeprägten Keimungsverzögerung (SETHMANN, 1998; HARNACK, 1999).

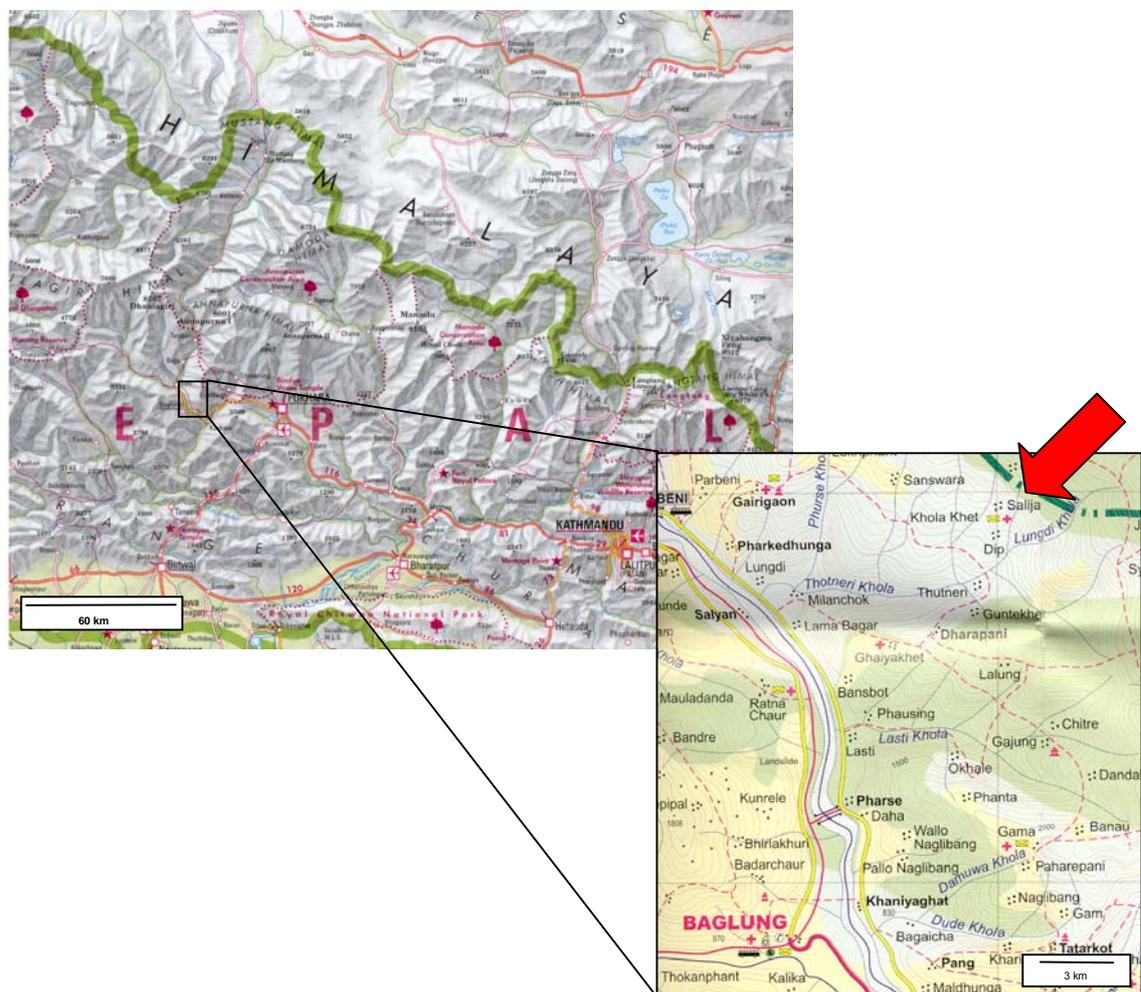
## 2 Nutzung von *G. diversifolia* in Nepal

In Nepal kommt *G. diversifolia* in subtropischen und gemäßigten Klimazonen des Himalaja in Höhenlagen von 1200 bis 3000 m in den Wäldern als Unterwuchs vor (feuchtere Habitate) und wird im östlichen Nepal „Allo“ und im westlichen Nepal „Puwa“ genannt (SINGH und SHRESTHA, 1987, 1988; SHRESTHA, 1996, 1999). Die Fasern werden traditionell von einigen ethnischen Gruppen zur Herstellung von Textilien genutzt. Junge Blätter können als Gemüse oder als Suppeneinlage gegessen werden. Außerdem finden die Blätter Verwendung als Viehfutter (DUNSMORE, 1985). Ein Dekokt der Blätter wirkt gegen Kopfschmerzen, Gelenkschmerzen und Fieber (MANANDHAR, 1989). Aus dem Absud des Kochens der Fasern zur Degummierung kann ein blauer Farbstoff unbekannter Zusammensetzung gewonnen werden. Der Holzteil der Stängel eignet sich zur Papierherstellung (DUNSMORE, 1993; SINGH und SHRESTHA, 1985). Die Nussfrüchtchen enthalten 10 – 12% Öl, das z. B. zur Seifenherstellung verwendet werden kann (MANANDHAR, 1989).

Die anwachsende Landbevölkerung in Nepal verarmt zunehmend. Das Leben findet am bzw. unter dem Existenzminimum statt. Die Anbauflächen für Nahrungsmittel sind in den Gebirgsregionen begrenzt, und es wurde daher nach alternativen Einkommensquellen gesucht, um der fortschreitenden Verarmung, der zunehmenden Abwanderung und Umweltzerstörung (Abholzung der Wälder) entgegen zu wirken. Seit 1980 wird über verschiedene Projekte versucht, *G. diversifolia* verstärkt zu nutzen (DUNSMORE, 2000). Im Rahmen eines das HMGN (His Majesty's Government of Nepal) – Entwicklungsprogramm unterstützenden Projektes Großbritanniens (KHARDEP = Koshi Hill Area Rural Development Programme, 1981 – 1986) wurden Anstrengungen unternommen, die Nutzung im östlichen Nepal (Bezirk Sankhuwasabha) durch Verbesserung von Fasergewinnung und Verarbeitung in kleinen Produktionsgemeinschaften (Cottage Industry – Allo Cloth Producers Club) zu intensivieren, die Qualität der Produkte zu verbessern, die Produktvielfalt zu erhöhen und einen Absatzmarkt im In- und Ausland zu schaffen (DUNSMORE, 1985; DUNSMORE, 2000). Weiterhin wurden erste Anbauversuche unternommen, um lange Wege zur Ernte zu vermeiden (DUNSMORE, 1998).

## Fasergewinnung

Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf die Fasernutzung in einem kleinen Dorf namens Saliza (Salija, West-Nepal). Das Dorf liegt ca. 200 km Luftlinie westlich von Kathmandu (Abb. 1). Um es zu erreichen, ist die Fahrt mit dem Bus bis zur Endstation Baglung erforderlich. Von dort sind es 1 – 2 Tage Fußmarsch bis zu dem in ca. 2000 m Höhe gelegenen Dorf Saliza. In der Nähe des Ortes befindet sich ein Mischwald (z.B. *Quercus* spp., *Castanopsis* spp.) mit Beständen von *G. diversifolia* als Unterwuchs (Abb. 2 A).



**Abb. 1:** Geographische Lage des Ortes der Fasergewinnung: Saliza (Salija)

Die Ernte findet von Oktober bis Dezember statt. Hierzu wurden die Stängel mit einem Messer an der Basis durchtrennt und Blätter und Brennhaare abgestreift. Stoff oder Blätter wurden zum Schutz der Hände verwendet. Das anschließende Dekortieren fand vor Ort statt. Die Stängel wurden einige Male geknickt, damit sich an einigen Stellen

der äußere Stängelbereich (Rinde<sup>1</sup>) mit den Fasern vom Holzteil löste. Hier wurde begonnen, die Rinde abzuziehen (Abb. 2 B). (In Ost-Nepal wird stattdessen mit den Zähnen ein Einschnitt in die Rinde gesetzt.) Die Streifen wurden parallel gelegt und zum Transport verknotet. Der Holzteil verblieb am Fundort.

Für die Degummierung wurde die Rinde einige Minuten in Wasser eingeweicht, in Holzasche gewendet (Abb. 2 C) und anschließend mindestens vier Stunden in Wasser gekocht (Abb. 2 D). Danach wurden die aufgeschlossenen Fasern mit einer Holzkeule geklopft und im Wasser ausgespült (Abb. 2 E), wobei sich Klopfen und Spülen mehrmals wiederholten. Aus Ton und Wasser wurde eine dickflüssige Suspension hergestellt, in die die aufgeschlossenen Fasern eingetaucht wurden. Hierdurch wurde die Trennung der Fasern voneinander und die Gleitfähigkeit für den Spinnvorgang verbessert. Alternativ wurden hierzu Reisspelzen verwendet (Abb. 2 F). Erstere Variante wird jedoch bevorzugt. Danach trockneten die Fasern in der Sonne. Ton oder Reisspelzen wurden anschließend mit einer Holzkeule ausgeklopft (Abb. 3 A) und die Faserbündel verstreckt (Abb. 3 B) und mit Hilfe von zwei Bambusstängelhälften parallelisiert (Abb. 3 C), um für den Spinnvorgang geordnete und gleichmäßige Faserbänder zu erhalten. Danach erfolgte entweder das Verspinnen mit einer Handspindel (Abb. 3 D) oder mit einem Spinnrad (Abb. 3 F), nachdem ein Vorgarn durch leichtes Aufdrehen der Fasern zu einem dünnen Strang erzeugt worden war (Abb. 3 E). Die hergestellten Garne werden zu Tragegurten, Bekleidungsstücken (Mantel, Weste) oder zu für den Verkauf an Touristen bestimmte Artikel verwebt oder verstrickt (Abb. 4).

---

<sup>1</sup> Im botanischen Sinne gehören Abschlussgewebe (Epidermis bzw. Periderm) und Phloem nicht der Rinde an



**Abb. 2:** Fasergewinnung in Saliza. (A) *G. diversifolia* als Unterwuchs im Laubmischwald, (B) Abziehen der Rinde vom Stängel, (C) wenden der eingeweichten Rinde in Holzasche, (D) Kochen der Rinde, (E) Ausspülen nach dem Kochen, (F) Vorbereitung für das Spinnen: Einlegen der Fasern in Ton (rechts) bzw. Reisspelzen (links) zur besseren Separierung.



**Abb. 3:** Fasergewinnung in Saliza - Fortsetzung. (A) Ausklopfen der Reisspelzen, (B) Verstrecken der Faserbündel, (C) Parallelisieren der Fasern, (D) Spinnen mit der Handspindel, (E) Herstellung eines Vorgarns, (F) Spinnen des Vorgarns mit dem Spinnrad.



**Abb. 4:** Mit Fasern von *G. diversifolia* in Nepal hergestellte Produkte. (A) Schal, (B) Taschen, (C) Kleid, (D) Weste, (E) Geldbörse, (F) Stifttasche; (A) und (C) Strickware, (B) Häkelware, (D - F) Webware.

## 3 Material und Methoden

### 3.1 Pflanzenanzucht

Die für die Untersuchung verwendeten Pflanzen wurden aus Saatgut gezogen, das in einem Wald in ca. 2000 m Höhe in der Nähe des Dorfes Mangtewa (Sankhuwasabha – nördlichster Bezirk der Koshi Hills, östliches Nepal) von Einheimischen gesammelt und im Januar 1998 nach Hamburg geschickt wurde. Die Pflanzen wurden im Januar 1999 zunächst im Gewächshaus (Lichtperiode 12 h bei 20 – 22°C, Dunkelperiode 12 h bei 14 – 16°C, Luftfeuchte 60 – 80%) angezogen und dann im Mai 1999 auf eine Fläche des Versuchsfeldes Wulfsdorf (10°12'01"E, 53°39'50"N) des Institutes für Angewandte Botanik der Universität Hamburg ausgepflanzt. Das Versuchsfeld liegt an der nordöstlichen Stadtgrenze Hamburgs in einer Höhenlage von 46 m über NN. Der Bodentyp ist eine Parabraunerde mit der Bodenwertzahl 35. Das Klima ist als gemäßigt mit maritimem Einfluss zu bezeichnen. Die Temperatur- und Niederschlagsdaten, sowie die relative Luftfeuchte für die Untersuchungsjahre 1999 – 2001 sind der Tab. 1 zu entnehmen. Im Herbst der Jahre 1999 – 2001 wurden jeweils die Bodenanalysedaten nach VDLUFA (1991) bestimmt (Tab. 2).

Für den Anbau der Pflanzen stand eine unbeschattete Fläche von 1 x 30 m zur Verfügung. Die Pflanzen wurden in einem Abstand von 50 cm in drei Reihen (Abstand 25 cm) gesetzt, wobei die Pflanzen der mittleren Reihe versetzt zu den beiden äußeren Reihen gepflanzt wurden, wodurch sie einen dichten Bestand bildeten. Die Pflanzen standen in den Jahren 1999 - 2001 von Mitte Juni bis Ende August unter Schattierfolie. Mit Beginn der Vegetationsperiode wurden bis Ende Juni 14-tägig die Beikräuter entfernt. Eine Düngergabe mit Nitrophoska (BASF, Ludwigshafen) erfolgte in der ersten Juniwoche (48 kg/ha N, 48 kg/ha P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 68 kg/ha K<sub>2</sub>O, 8 kg/ha MgO) und eine Zweite in der ersten Augustwoche (24 kg/ha N, 24 kg/ha P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 34 kg/ha K<sub>2</sub>O, 4 kg/ha MgO). Die Pflanzen hatten zum Zeitpunkt der Ernte einen kräftigen Habitus und erreichten Längen von bis zu 2,15 m. In Nepal gewachsene Pflanzen zeigten Längen von 1,5 m – 3 m (SINGH und SHRESTHA, 1988). Im November wurden die Pflanzen mit Stroh abgedeckt.

**Tab. 1:** Temperaturen, Niederschläge und Luftfeuchte in den Untersuchungsjahren 1999 – 2001, Messstation Ahrendsburg (Quelle: Deutsches Wetteramt)

Jahr/Monat	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
<b>1999</b>												
<b>Temperatur [°C]</b>												
Minimum	0,7	-1,4	2,1	4,3	6,7	8,9	12,8	12,3	12,3	6,1	1,9	0,9
Maximum	5,9	4,0	9,4	14,1	18,3	19,8	24,8	22,8	23,4	13,4	7,8	5,2
Mittelwert	3,4	1,4	5,4	8,8	12,9	14,5	18,9	17,1	16,9	9,2	4,7	3,1
<b>Niederschlag [mm]</b>	78,1	60,7	54,2	47,1	40,7	53,0	27,7	79,6	49,7	39,1	37,8	212,5
<b>Luftfeuchte [%]</b>	86	88	79	77	69	73	67	73	76	83	88	88
<b>2000</b>												
<b>Temperatur [°C]</b>												
Minimum	0,3	1,8	2,3	4,9	7,6	10,9	11,6	11,2	10,1	7,5	4,1	1,1
Maximum	5,0	7,4	7,8	15,3	20,4	10,6	19,6	22,0	17,6	14,8	9,3	5,5
Mittelwert	3,0	4,6	5,0	9,9	13,9	15,7	15,4	16,3	13,5	10,7	6,9	3,4
<b>Niederschlag [mm]</b>	67,8	96,3	104,8	27,2	43,8	65,7	57,5	88,5	71,5	47,5	33,0	61,8
<b>Luftfeuchte [%]</b>	85	82	84	74	67	71	77	78	85	83	86	88
<b>2001</b>												
<b>Temperatur [°C]</b>												
Minimum	-0,9	-1,5	-0,4	3,1	7,0	9,5	13,2	13,7	9,8	9,6	1,9	-2,0
Maximum	2,9	5,0	6,2	11,8	19,0	18,8	23,5	23,1	16,0	16,0	7,9	2,8
Mittelwert	1,2	1,7	2,7	7,1	13,1	14,0	18,4	17,8	12,4	12,5	4,9	0,6
<b>Niederschlag [mm]</b>	48,7	65,1	47,2	71,4	40,9	95,7	31,7	154,2	183,3	42,8	62,9	101,1
<b>Luftfeuchte [%]</b>	92	85	84	82	75	80	78	83	89	88	89	91

**Tab. 2:** Bodenanalysedaten (Institut für Angewandte Botanik, Abteilung für Kultur- und Versuchstechnik)

Chemischer Parameter	1999	2000	2001
NO <sub>3</sub> [kg/ha]	62	38	32
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> [mg/100 g]	21	18	24
K <sub>2</sub> O [mg/100 g]	40	25	23
MgO [mg/100 g]	12	7	11
pH Acetat	6,3	6,3	6,3
pH CaCl <sub>2</sub>	5,9	5,7	5,8

## 3.2 Probenahme

Anfang Oktober, kurz vor dem ersten Frost, wurden in den Jahren 1999 bis 2001 Pflanzenstängel zur Auswertung für die vorliegende Arbeit geerntet. Zu diesem Zeitpunkt befanden sich die Pflanzen im Zustand der Blüte. Die Pflanzenstängel wurden 10 cm über dem Boden mit einer Astschere durchtrennt, 5 cm der Sprossspitze abgeschnitten und die Blätter vom Stängel entfernt. Die Proben wurden trocken gelagert.

Die Auswahl der Pflanzen für die Bestimmung aller Parameter erfolgte mittels Randomisierung. Von den per Losverfahren bestimmten Pflanzen wurde jeweils ein Stängel mittlerer Länge entnommen.

Für die Bestimmung der Faserlänge und der Feinheit (Kap. 3.5.2) wurde aus dem Jahr 2001 von 5 genetisch verschiedenen gut entwickelten Feldpflanzen (Nr. 92, Nr. 94, Nr. 98, Nr. 101 und Nr. 129) ein Stängel entnommen und von jeweils 500 Fasern Länge und Feinheit bestimmt.

Zur Bestimmung der verschiedenen Parameter in Abhängigkeit zum jeweiligen Stängelabschnitt, wurden von luftgetrockneten Stängeln mit einem Handschuh die Brennhaare abgestreift, die Stängellänge gemessen und in 5 gleichlange Abschnitte unterteilt, wobei **1** den apikalen und **5** den basalen Abschnitt bezeichnet.

Die Fasermasse, Holzmasse und der Fasergehalt (Kap. 3.3, I) wurden anhand von  $n = 20$  für die Ernte 1999, von  $n = 14$  für 2000 und  $n = 13$  für 2001 ermittelt, wobei die Stängel von jeweils verschiedenen Pflanzen stammten. Die Anzahl der Pflanzen reduzierte sich durch Auswinterung.

Zur Messung der Faserdicke und für die Zugprüfung (Kap. 3.5.3) wurden 5 Individuen (Nr. 106, Nr. 107, Nr. 114, Nr. 118, Nr. 134) aus der Ernte 2000 verwendet. Die Fasern stammten aus jeweils einem Stängel mittlerer Länge pro Pflanze. Zur Bestimmung der Faserfeinheit und der Feinheitsbezogenen Höchstzugkraft ( $n = 20$ ) wurden die Stichproben Nr. 118 und Nr. 134 verwendet.

### 3.3 Faserisolierungen

#### Faserisolierung I

Für die Bestimmung von Fasermasse, Holzmasse und Fasergehalt erfolgte eine zweistufige Trocknung der Proben 24 h bei 60°C und anschließend 2 h bei 105°C. Dabei wurde eine Massekonstanz erreicht. Nach dem Abkühlen im Exsikkator wurden die Proben gewogen (Trockenmasse).

Hieran schloss sich ein einstündiges Kochen in Leitungswasser an, wozu die Stängelabschnitte jeweils in einen vollständig mit Wasser gefüllten 350 ml Erlenmeyerkolben gegeben und im Wasserbad gekocht wurden. Hierzu wurden die Stängelabschnitte nochmals zerteilt. Danach wurde der äußere Stängelbereich mit den Fasern abgezogen (Dekortikation) und das zurückbleibende Holz abgespült, getrocknet (s. o.) und gewogen (Holzmasse). Der faserhaltige Anteil wurde für die Bestimmung der Fasermasse mit einem Holzhammer geklopft, um das Gewebe aufzubrechen und dann in der 100fachen Volumenmenge der Trockenmasse des jeweiligen Abschnittes in 2% Natronlauge für 1 h gekocht (Degummierung). Als Mindestmenge für sehr kleine Proben wurden 150 ml verwendet. Anschließend folgte das Ausspritzen der Probe mit einem harten Wasserstrahl in einem Rahmensieb mit 0,425 mm Maschenweite, um die Fasern zu isolieren. Die Fasern wurden wie das Holz getrocknet und gewogen (Fasermasse) (verändert nach BREDEMANN, 1959 und DREYER, 1994). Anhand der Trockenmassen von Stängel und Fasern wurde der Fasergehalt [%] bezogen auf die Trockenmasse des jeweiligen Stängelabschnittes berechnet. Aus der Summe der Werte für die Abschnitte pro Stängel wurden Fasermasse [g] und Fasergehalt [%] pro Stängel bestimmt.

#### Faserisolierung II

Die Mitte der Stängellänge wurde markiert, das basale Stängelende in kochendes Leitungswasser getaucht und 1 h gekocht. Dann wurde von diesem Stängelteilabschnitt der äußere Stängelbereich (Rinde) vom Stängel abgezogen (Dekortikation) und dieser locker mit Kupferdraht ( $\varnothing$  0,5 mm) umwickelt. Nach der Abtrennung des übrig gebliebenen Holzteils wurde der nächste Stängelabschnitt gekocht und so fortgeföhren bis die gesamte Rinde in einem Stück vorlag. Der nun vorhandene Strang wurde in 5 kleinere Stränge aufgeteilt. Die Mitte der einzelnen Stränge wurde mit einem schwarzen

Zwirnsfaden (100% Polyamid) markiert und wiederum, aber jetzt in engen Windungen von ca. 5 mm, mit Kupferdraht umwickelt.

Die so vorbereitete Rinde wurde in einen 1 l Erlenmeyerkolben gegeben, der dann vollständig mit 2% Natronlauge (NaOH) aufgefüllt wurde. Anschließend erfolgte einstündiges Kochen im Wasserbad (Degummierung).

Nach dem Abgießen der Lauge, wurden die Bündel grob mit schwachem Wasserstrahl abgespült. Für die Isolierung der Fasern wurden die noch an den Fasern haftenden Gewebereste (Rindenparenchym, Phloembestandteile) entfernt, wobei darauf geachtet wurde, dass die natürliche Parallellage der Fasern erhalten blieb. Hierzu wurde der Draht stückweise aufgedreht, das Faserbündel fest mit den Fingern auf ein engmaschiges Sieb gepresst und ein kleiner Abschnitt mit zwei Fingern straff fixiert, mit einem intensiven Wasserstrahl in Faserrichtung ausgespült. An der markierten Mitte des Stängels musste dies in besonders kleinen Schritten passieren, damit keine Fasern verloren gingen. Der Zwirnsfaden wurde hierzu nicht gelöst. Der ausgespülte Bereich wurde in ein Wasserbad in eine flache Schale gegeben (Abb. 5).



**Abb. 5:** Aus dem Stängel isoliertes Faserbündel zur Faserentnahme.

Die Fasern wurden mit Hilfe einer Lupe bei 40facher Vergrößerung mit einer Pinzette isoliert und in Samt zum Trocknen eingelegt. Hierbei wurden sie von einer Stelle aus, so wie sie auftraten, entnommen bis das Bündel vollständig zerlegt war.

Die Fasern wurden mit der Lupe auf Unversehrtheit, einzelne anhaftende Faserzellen und Verunreinigungen geprüft. Besondere Beachtung fanden die Faserspitzen, da sie dazu neigten, sich umzubiegen und an die Faser zu legen.

### **Faserisolierung III**

Für die Faserdickenmessung und die Zugprüfung wurden luftgetrocknete Stängel entsprechend der Faserisolierung II vorbereitet und die Fasern isoliert, wobei die folgenden Modifikationen vorgenommen worden sind: Die aus einem Stängel hergestellten 5 gleichlangen Abschnitte (**1** bis **5**, **1** = apikaler Abschnitt, **3** = Stängelmitte, **5** = basaler Abschnitt) wurden in der Mitte markiert und 1h in Leitungswasser gekocht. Danach erfolgte ein möglichst schonendes Ablösen der Rinde, ohne sie zu knicken und eine Einteilung in kleine Bündel. Die Proben wurden nicht mit dem Holzhammer aufgebrochen, um eine mechanische Beschädigung zu vermeiden. Für die Berechnung der zu verwendenden Menge NaOH wurde an 4 Stängeln die Differenz der Masse der einzelnen Stängelabschnitte vom luftgetrockneten zum hochgetrockneten Zustand ermittelt. Die luftgetrockneten Proben waren durchschnittlich 6% schwerer als die hochgetrockneten Proben. Diese durchschnittlichen 6% wurden für die Verwendung der berechneten 2% NaOH-Menge (Trockenmasse x 100) abgezogen. Die weitere Isolierung erfolgte entsprechend der obigen Beschreibung für die Faserlänge und Feinheit von der markierten Mitte aus. Alle Fasern wurden bei 40facher Vergrößerung mittels einer Lupe auf anhaftende Fasern und Verunreinigungen überprüft.

### **Faserisolierung IV**

Zur Isolierung der Sekundärfasern aus dem Stängel wurde ein luftgetrockneter Abschnitt der Stängelbasis mit einer Länge von 15 mm ausgewählt. Eine Mazeration erfolgte, indem der Stängelabschnitt 24 h in ein Gemisch aus Ethanol und Essigsäure (3:1) gelegt und anschließend der äußere Stängelbereich vom Holzteil gelöst wurde. Der äußere Stängelbereich mit den enthaltenden Sekundär- und Primärfasern wurde zur weiteren Mazeration für 48 h in 3% Schwefelsäure bei 50° in den Trockenschrank gegeben (nach BRAUNE et al., 1991).

Ein kleiner Bereich des so vorbereiteten Gewebes wurde für die Isolierung der Fasern abgetrennt und mit der Präpariernadel nochmals in kleine Teilstücke separiert. Anschließend erfolgte für 10 min eine Simultanfärbung mit Astrablau und Safranin O (s. Kap. 3.4.4).

Nach dem Auswaschen des Farbstoffes waren die Sekundärfasern deutlich rot gefärbt und konnten mit Hilfe einer Lupe, Präpariernadeln und Pinzette von den blaugefärbten Primärfasern isoliert werden.

## **3.4 Mikroskopische Untersuchungen**

### **3.4.1 Lichtmikroskopische Untersuchungen**

Die mikroskopischen Untersuchungen (Durchlicht- und Polarisationsmikroskopie) erfolgten mit dem Mikroskop BH-2 (Olympus, Hamburg). Zeichnungen von mikroskopischen Präparaten wurden mit einem Zeichentubus erstellt. Für die fotografische Dokumentation wurden die Aufsetzkamera OM-2 (Olympus, Hamburg) und die Digitalkamera Colour View 12 (Olympus, Hamburg) verwendet.

### **3.4.2 Anfertigung von Stängelquerschnitten**

Für die Untersuchung der Stängelanatomie wurden Stängelabschnitte von Gewächshauspflanzen und Feldpflanzen verwendet. Die Querschnitte wurden jeweils aus dem mittleren Zentimeter eines Stängelfünftels entnommen. Das obere Stängelfünftel entsprach der Stängelspitze und das untere Fünftel der Basis.

Zusätzlich wurden zum Vergleich der Untersuchungsergebnisse drei Proben aus der Stängelmittle und der Stängelbasis von einem natürlichen Standort in Nepal (konserviert in 40% Ethanol) herangezogen.

Mit einem Mikrotom (Vibratom 1000, Polysciences Europe GmbH, Eppelheim) wurden in einer Schnittstärke von 50  $\mu\text{m}$  von frischem und von in 40% Ethanol konserviertem Stängelmaterial Querschnitte angefertigt, gefärbt und in Glycerin eingebettet.

Anhand der Stängelquerschnitte wurden außer der Stängelanatomie auch Faserquerschnitte untersucht.

Für vergleichende Untersuchungen standen verschiedene Ramie-Stängelproben (*Boehmeria nivea* (L.) GAUDICH.) zur Verfügung:

- in 40% Ethanol konservierte Stängelproben, entnommen vom Betriebsgelände der Ramie Seiler AG (Emmendingen)
- getrocknetes Stängelmateriale der Universität Hohenheim (Stuttgart), zur Verfügung gestellt von den Anbauflächen (2001). Dieses Material wurde vor dem Schneiden eine Woche in 40% Ethanol gelagert.

### 3.4.3 Herstellung von Semidünnschnitten

Für die Herstellung von Semidünnschnitten wurde in Ethanol (40%) fixiertes Stängelmateriale verwendet. Die Entwässerung erfolgte zunächst über 2mal 30 min. in 70% und anschließend 2mal 30 min. in 100% Ethanol. Danach wurde zunächst 1 h und dann über Nacht in LR White Medium infiltriert. Das Material wurde anschließend zur Herstellung von Querschnitten in mit Einbettungsmittel gefüllte Gelatinekapseln überführt und verblieb zur Polymerisation 24 h bei 60°C im Trockenschrank.

Zum Schneiden der Proben wurden Glasmesser aus Glasstreifen von 6 mm Stärke (Plano, Wetzlar) geschnitten (Knifemaker Typ 7801 A, LKB, Stockholm, Schweden). Das Schneiden der Querschnitte erfolgte in einer Schnittstärke von 1 µm am Ultramikrotom (Ultracut, Leica, Wien, Österreich). Die Schnitte wurden mit Hilfe eines an das Glas geklebten Metallstreifens in einem Wasserreservoir aufgefangen, auf einen Objektträger in einen Tropfen Wasser überführt, mit Hilfe einer Wärmeplatte (50 C°) 24 h getrocknet und anschließend für die Lichtmikroskopie gefärbt (Toluidinblaufärbung, s. Kap. 3.4.4).

Zur Herstellung von Faserlängsschnitten wurden isolierte und luftgetrocknete Fasern auf eine Länge von ca. 4 mm zugeschnitten, zweimal für 30 min in 100% Ethanol entwässert und dann zunächst für 1 h und anschließend über Nacht in LR White Medium infiltriert. Es wurde wie oben beschrieben fortgeföhren. Eine Färbung erfolgte für 30 min in Kongorot (s. Kap. 3.4.4).

### 3.4.4 Lichtmikroskopische Färbungen

Eine Übersicht der für die lichtmikroskopischen Untersuchungen verwendeten Färbungen gibt Tab. 3.

**Tab. 3:** Übersicht der verwendeten Färbungen für die Lichtmikroskopie

Reagens	Verwendung	Objekte
Simultanfärbung mit Astrablau und Safranin O	Zellwandfärbung, Lignifizierung rot, Cellulose blau	Stängelquerschnitte Selektion von Sekundärfasern
Kongorot	Zellwandfärbung, Cellulose rot	isolierte Fasern / Faserlängsschnitte / Faserspitzen
Toluidinblau O	Tanninfärbung, Tannin grün	Semidünnschnitte von Stängelquerschnitten
Cuoxam	Quellung der Zellwand	isolierte Fasern
Chlorzinkjod	Quellung der Zellwand	Faserquerschnitte

#### Simultanfärbung mit Astrablau und Safranin

Es wurden 0,5% Astrablau (m/v, C.I. 48048, Merck, Darmstadt) in 0,5% Essigsäure und 0,5% Safranin O (m/v, C.I. 50240, Merck, Darmstadt,) in Aqua dest. gelöst. Die Färbung der Stängelquerschnitte erfolgte mit einem Gemisch (5:1) für 45 s. Die Schnitte wurden anschließend gewaschen, direkt fotografiert oder auf einem Objektträger in Glycerin konserviert.

#### Toluidinblaufärbung

Semidünnschnitte von Stängelquerschnitten wurden mit 0,05% Toluidinblau O (m/v, C.I. 520040, Merck, Darmstadt) in Aqua dest. gefärbt. Zunächst wurden die Schnitte 10 s mit NaOCl (12% in Aqua dest.) vorbehandelt, gewaschen, dann 10 min mit Toluidinblau O gefärbt und nochmals gewaschen (GUTMANN, 1995).

#### Faserfärbung mit Kongorot

Zur Kontrastierung der Faserstrukturen wurde eine Färbung der isolierten Fasern mit 0,5% Kongorot (m/v, Merck, Darmstadt) in 0,5% Natronlauge (HOCK, 1942) vorgenommen. Ein kurzes Faserstück wurde für 10 min in Färbelösung gegeben, gewaschen,

in einen Tropfen Aqua dest. auf den Objektträger plaziert und ein Deckgläschen aufgelegt. Für die Konservierung wurde Glycerin verwendet.

Bei den Faserlängsschnitten (Semidünnschnitte, Kap. 3.4.3) erfolgte die Färbung für 30 min nach dem Schneiden.

Die Kongorot-Färbung wurde für morphologische Untersuchungen der primären und sekundären Phloemfasern verwendet.

#### **Faserquellung mit Cuoxam (SCHWEIZERS Reagens)**

Für Quellungsversuche an Fasern wurde Cuoxam  $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4](\text{OH})_2$  (Kupferhydroxid-Ammoniak) angefertigt: Es wurden 50 ml einer wässrigen  $0,2 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$  Kupfersulfat ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5 \text{ H}_2\text{O}$ )-Lösung hergestellt und anschließend mit 8 ml 10% NaOH versetzt. Nach dem Auffüllen mit  $\text{H}_2\text{O}$  auf 100 ml und Durchmischung wurde der sich bildende Niederschlag von Kupferhydroxid abgetrennt und nochmals mit Wasser versetzt. Danach erfolgte die Filtrierung des sich erneut bildenden Niederschlages. Abschließend wurde der Niederschlag mit 25% Ammoniak in Lösung gebracht (verändert nach BUKATSCH und GLÖCKNER, 1977).

Für die Quellungsversuche wurden kurze chemisch aufgeschlossene Faserstücke (primäre und sekundäre Phloemfasern) auf einen Objektträger in einen Tropfen Wasser gegeben und mit einem Deckgläschen abgedeckt. Ein Tropfen Cuoxam-Reagens wurde seitlich an den Deckglasrand gegeben und mit einem Filterpapier von der gegenüberliegenden Seite durchgesogen. Die Quellung wurde mikroskopisch beobachtet.

#### **Quellung mit Chlorzinkjod**

Als weitere Substanz zur Faserquellung wurde Chlorzinkjod (Merck, Darmstadt) entsprechend Cuoxam verwendet.

#### **3.4.5 Rasterelektronenmikroskopische Untersuchung**

Zur Anfertigung von Aufsichten auf Faserquerschnitte wurden in Objekthalter jeweils 4 Löcher gebohrt ( $\varnothing 1 \text{ mm}$ ). Mit Hilfe einer Fadenschlinge wurden Faserbündel, die nach Methode Faserisolierung I gewonnen wurden, in die Löcher eingezogen und mit einer Rasierklinge auf gleiche Länge eingekürzt (ORTH, 1971).

Für Faserlängsaufsichten wurden isolierte Fasern (Faserisolierung III) auf mit Leit-Tabs (Plano, Wetzlar) versehene Objekthalter geklebt.

Da die Faserpräparate sich als sehr empfindlich bei der Untersuchung im Elektronenstrahl erwiesen, und es bei höheren Vergrößerungen schnell zur Bildung von Artefakten kam, erfolgte zusätzlich zum Vergleich eine „Kritische-Punkt-Trocknung“ (s. u.). Diese Präparate waren jedoch nicht stabiler als ausschließlich luftgetrocknetes Material.

Alle Präparate wurden zur Erhöhung der Leitfähigkeit mit dem Sputter Coater (Planetengetriebe) (SCD 050, BAL-TEC, Witten) mit einer feinen Goldschicht überzogen.

Für vergleichende Untersuchungen wurde eine Probe Ramie-Kammgarn verwendet (Herkunft China, vorbehandelt zum Verspinnen, Verfahren unbekannt, zur Verfügung gestellt von der Ramie Seiler AG, Emmendingen).

Die Sekundärwände von Primär- und Sekundärfasern wurden anhand von Querschnitten der Stängelbasis untersucht. Hierzu wurden mit dem Mikrotom (Vibratom 1000, Poly-science Europe GmbH, Eppelheim) Querschnitte in einer Schnittstärke von 500 µm von in 40% Ethanol konserviertem Stängelmateriale angefertigt. Die Schnitte wurden zweimal 15 min in FAA (5 ml Formaldehyd (37%), 56 ml Ethanol (96%), 5 ml Essigsäure (96%), 34 ml Aqua dest.) gewaschen und anschließend mit FDA (Formaldehyd-dimethyl-acetal) 20 h bei Raumtemperatur dehydratisiert. Es folgte die „Kritische-Punkt-Trocknung“ (CPD 030, BAL-TEC, Witten). Nach der Fixierung mit Holzleim (Ponal, Henkel, Düsseldorf) auf Objekthalter, wurden die Präparate mit dem Sputter Coater (Planetengetriebe) (SCD 050, BAL-TEC, Witten) mit einer feinen Goldschicht überzogen.

Die Untersuchungen wurden mit dem Rasterelektronenmikroskop XL 20 (Philips, Hamburg) bei einer Arbeitsspannung von 8 - 10 kV durchgeführt.

## 3.5 Faseranalysen

### 3.5.1 Morphologie der primären Phloemfasern (Primärfasern)

Für die morphologischen Untersuchungen der Primärfaser wurden Fasern entsprechend Faserisolierung II und III (Kap. 3.3) isoliert.

Von 50 Primärfasern wurden die Spitzen abgetrennt und die verschiedenen Formen gezeichnet.

Für die Bestimmung der Drehrichtung der Faserwindungen wurden beide Enden von Fasern aus den verschiedenen Stängelabschnitten mit einem schmalen Streifen selbstklebendes Papier versehen. An einem Streifen wurde die Faser aufgehängt und mit einem Pinsel befeuchtet. Die Drehrichtung wurde mit Hilfe des zweiten Papierstreifens während der Befeuchtung und dem anschließenden Lufttrocknen am freien Faserende beobachtet.

Die mikroskopische Untersuchung der Spiralstreifung erforderte die Isolierung der Faserwand aus der bandförmigen Faser. Es wurden luftgetrocknete Faserabschnitte aus der unteren Stängelhälfte verwendet. Die Faser wurde in zwei Hälften gespalten, indem mit Hilfe einer Lupe und einer Rasierklinge ein Längsschnitt durchgeführt wurde, wobei der Schnitt durch den maximalen Durchmesser des Faserquerschnitts verlief.

### 3.5.2 Faserlänge und Feinheit

Die Längenmessung der isolierten Fasern wurde in einer Klimakammer bei konstanten Bedingungen (23°C, 50% Luftfeuchte) durchgeführt, nachdem die Fasern dort zur Akklimatisierung über Nacht gelagert waren. Für die Längenmessung wurde eine Messleiste angefertigt, die aus einem Streifen schwarzer Heftpappe mit aufgeklebtem Millimeterpapier bestand. Diese wurde plan auf dem Messtisch fixiert. Mit Latexhandschuhen wurde die Faser auf die Messleiste gelegt, die Faserspitze am Nullpunkt der Messleiste mit dem Zeigefinger fixiert, mit der freien Hand parallel zur Messleiste ausgerichtet und die Länge abgelesen. Faserlängen < 10 mm wurden nicht vermessen, da der Fehler bei einer makroskopischen Messung zu groß wäre. An die Längenmessung schloss sich die Bestimmung der Fasermasse (Waage: Sartorius Micro M 3P, Göttingen) bei identischem Raumklima an. Die Werte wurden auf zwei Dezimalstellen [mg] gerundet.

Für alle Fasern  $< 0,005$  mg wurde der Wert  $0,001$  mg festgelegt. Anhand der gewonnenen Werte wurde die Faserfeinheit als Quotient aus der Masse und der Länge einer Faser (Tab. 4) berechnet. Die Einheit tex (SI-Einheit = Système International d'Unités) ist die Masse eines 1000 m langen Filamentes.

### 3.5.3 Faserdickenmessung und Zugprüfung

Die Durchführung der Zugprüfung erfolgte unter konstanten Klimabedingungen ( $23^{\circ}\text{C}$ , 50% Luftfeuchte) am Zugprüfstand (Universalprüfstand 1146, Zwick, Ulm) des Institutes für Acker- und Pflanzenbau der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg. Die Faserdicken der Primärfasern wurden im Zusammenhang mit einer Zugprüfung bestimmt. Der Dickenmessung schloss sich direkt die Zugprüfung an. Die Fasern hatten eine Mindestlänge von 90 mm zur Einfädung in die Faserführung der Einspannvorrichtungen. An die Fasern wurde vor der Messung als Vorspannkraft eine Masse von 1 g gehängt. Vor jeder Zugprüfung erfolgte die Messung der Faserdicke über die Einspannlänge von 50 mm (Abstand zwischen den Messungen  $70\ \mu\text{m}$ ) mit einem zweidimensionalen Lasermikrometer (ODAC 15XY-J, Zumbach Electronics, Orpund, Schweiz). Hierbei projizierten zwei zueinander rechtwinklig positionierte Messstrahlen den Schatten der Faser auf einen Sensor. Der Faser anhaftende Partikel verursachten einen mehrfachen Schattenwurf, der als Fehlermeldung registriert wurde. Eine Fehlerrate  $< 20\%$  wurde akzeptiert. Es wurden pro Stängelabschnitt 20 Faserproben gemessen. Für die Stängelspitzenbereiche konnte diese Probenzahl nicht eingehalten werden, da dort die erforderliche Faserlänge von 90 mm nicht immer erreicht wurde.

Zur Auswertung wurden standardmäßig die beiden Faserdickenwerte (X, Y) des Lasermikrometers für eine Messung gemittelt und dann in erster Näherung eine Kreisfläche auf der Grundlage der gemittelten Dicken-Werte als Ausgangsquerschnittsfläche berechnet.

Für die einzelnen Fasern von *G. diversifolia* erfolgte aufgrund ihrer bandförmigen Gestalt zur näherungsweise Bestimmung der Querschnittsfläche die Berechnung der Ellipsenfläche ( $A_{\text{Ellipse}} = a \cdot b \cdot \pi$ ; a, b = Halbachsen) anhand von 22 pro Faser ausgelesenen X-Y-Werte-Paaren, die die Halbachsen der Ellipse repräsentierten. Die Werte der großen Halbachse wurden für die Faserdicke ausgewertet (Kap. 4.5.3).

An die Faserdickenmessung schloss sich die Zugprüfung mit folgenden Einstellungen an: Einspannlänge 50 mm, Klemmen mit Degussit-Belag, Klemmendruck 5 bar, Vorkraft 0,05 N, Prüfgeschwindigkeit 3mm/min (Geschwindigkeit der auseinander weichen Klemmen). Die Messwerte während des Zugversuches wurden aufgezeichnet und verrechnet (Prüfprogramm testXpert V6.0, Zwick, Ulm). Bei der Zugprüfung kam es zu Klemmbrüchen, die an dem Zerreißen der Faser im Bereich der Klemmen erkennbar waren. Diese Fasern wurden von der Auswertung ausgeschlossen. Im Rahmen der Zugprüfung wurden die folgenden Parameter bestimmt bzw. berechnet (Tab. 4):

Die **Höchstzugkraft** als die maximal aufgewendete Kraft bis zum Faserbruch ( $n = 20$ ).

Die **Zugfestigkeit** (MPa) wurde durch Division von Höchstzugkraft [N] durch die für jede Faser ermittelte Ausgangsquerschnittsfläche [mm<sup>2</sup>] berechnet.

Zur weiteren Auswertung der Zugprüfung wurde eine Kraft-Längenänderungskurve aufgezeichnet. Hieraus konnten Dehnungsmodul und Höchstzugkraftdehnung ermittelt werden.

Der **Dehnungsmodul** [GPa] errechnet sich aus der Steigung der Kraft-Längenänderungs-Kurve (Spannungs-Dehnungs-Kurve) und wird als Widerstand der Faser gegen die Längenänderung bezeichnet. Wird die Höchstzugkraft in einem Diagramm gegen die Dehnung der Faser aufgetragen, ergibt sich der Dehnungsmodul aus der Steigung der Kurve zwischen 40% und 60% der Höchstzugkraft.

Die **Höchstzugkraftdehnung**  $\epsilon_H$  (%) gibt an, um wieviel Prozent, gemessen an der Ausgangslänge ( $l_0$ ), sich die Faser bei Erreichen der Höchstzugkraft gedehnt hat.

Die **Feinheitsbezogene Höchstzugkraft** [cN/tex] berechnet sich aus der Höchstzugkraft dividiert durch die Feinheit.

Die Höchstzugkraft wurde im Rahmen der Zugprüfung gemessen. Die Faserfeinheit wurde für Fasern der Stängelabschnitte der Pflanzen Nr. 118 und 134 mittels Wägung (Kap. 3.5.2) bestimmt und die Feinheitsfestigkeit aus den Mittelwerten von Höchstzugkraft und Feinheit für die jeweiligen Stängelabschnitte berechnet.

**Tab. 4:** Übersicht der bestimmten Parameter (Prüfgrößen) mit Kurzbeschreibung (nach RENNEBAUM et al. (1999), verändert)

Prüfgröße	Kurzbeschreibung	Formelzeichen	Maßeinheit
Fasermasse Holzmasse	aus dem jeweiligen Stängelabschnitt isolierter und gewogener Faser-, Holzanteil	$m_F$ $m_H$	mg
Fasergehalt	prozentualer Anteil der Masse der aus dem jeweiligen Stängelabschnitt isolierten Fasern an der Masse des Stängelabschnittes	$FG = m_F \cdot 100 / (m_F + m_H)$	%
Länge	manuelle Einzelfasermessung	$l$	mm
Feinheit	längenbezogene Masse, Einzelfaserbestimmung	$T_t = m \cdot l_0^{-1}$	1 tex = 1g · 1000 m <sup>-1</sup> (1 dtex = 0,1 tex)
Faserdurchmesser	aus zweiachsiger Faserdickenmessung berechneter mittlerer Durchmesser im Prüfbereich	$d$	µm
Ausgangsquerschnittsfläche	aus zweiachsiger Faserdickenmessung berechnete äquivalente, mittlere Kreisfläche im Prüfbereich	$A_0 = \pi/4 \cdot d^2$	mm <sup>2</sup>
Höchstzugkraft	maximale Kraft, die bis zum Bruch der Probe gemessen wird	$F_{max}$	N
Zugfestigkeit	Höchstzugkraft bezogen auf die Ausgangsquerschnittsfläche	$\sigma_H = F_{max} \cdot A_0^{-1}$	MPa = N·mm <sup>-2</sup>

Prüfgröße	Kurzbeschreibung	Formelzeichen	Maßeinheit
Dehnungsmodul	Widerstand der Probe gegen Längenänderung, (= Anstieg der Kraft-Längenänderungs-Kurve zwischen 40 und 60% der Zugfestigkeit)	$E_{40/60} = (\sigma_{60} - \sigma_{40}) \cdot (\varepsilon_{60} - \varepsilon_{40})^{-1}$	GPa
Höchstzugkraftdehnung	Dehnung der Probe bei Anliegen der Höchstzugkraft	$\varepsilon_H = (l_H - l_0) \cdot l_0^{-1} \cdot 100$ $l_0 =$ Ausgangslänge, $l_H =$ Länge bei Anliegen der Höchstzugkraft	%
Feinheitsbezogene Höchstzugkraft	Höchstzugkraft bezogen auf die Feinheit	$R_H = F_{\max} \cdot T_t^{-1}$	cN·tex <sup>-1</sup>

### 3.5.4 Morphologie der sekundären Phloemfasern (Sekundärfasern)

Die isolierten und gefärbten Sekundärfasern wurden mit der Kamera Color View 12 (Olympus, Hamburg), gekoppelt an ein Lichtmikroskop (BH 2, Olympus, Hamburg), fotografiert. Mit der Software AnalySIS 3.1 (Soft Imaging System, Münster) wurde die Länge der Fasern und die maximale Breite von 50 Sekundärfasern bestimmt. Von typischen Faserspitzen wurden mit einem Zeichentubus Zeichnungen angefertigt.

Zusätzlich erfolgten mit den isolierten Fasern Quellungsversuche mit Chlorzinkjod und Kupferhydroxid-Ammoniak (Cuoxam).

Der Aufbau der Sekundärwand wurde mittels Rasterelektronenmikroskopie untersucht (Kap. 3.4.5).

## 3.6 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung erfolgte mit SPSS 8.0. Der Berechnung von Mittelwerten (arithmetisch) und Konfidenzintervallen lagen normalverteilte Stichproben (Kolmogorov-Smirnov-Test) zugrunde.

Die Daten der Fasermasse und Fasergehalte wurden zur Untersuchung signifikanter Unterschiede zwischen den Stängelabschnitten (1 – 5) und den drei Erntejahren einer multivariaten Varianzanalyse unterzogen. Die nicht normalverteilten Daten der Fasermasse wurden zur besseren Annäherung an die Normalverteilung transformiert (Wurzeltransformation). Da die Varianzen inhomogen waren, wurde als Post-Hoc-Test der Games-Howell-Test durchgeführt (JANSSEN und LAATZ, 1999). Für die Fasergehalte (normalverteilte Daten, homogene Varianzen) wurde der Student-Newman-Keuls-Test verwendet.

Zur Überprüfung von signifikanten Unterschieden zwischen Mittelwerten der verschiedenen Stängelabschnitte bezüglich Faserdicke, Höchstzugkraft und Zugfestigkeit wurde eine einfaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) durchgeführt. Hierzu wurden die Messwerte der Faserdicke und der Höchstzugkraft transformiert (Wurzeltransformation). Als Post-Hoc-Test wurde der Student-Newman-Keuls-Test verwendet. Da bei der Höchstzugkraft für die Probe III (Nr. 114) keine homogenen Varianzen erreicht werden konnten, wurde hier wiederum der Games-Howell-Test genutzt.

Die Häufigkeitsverteilungen der Faserlängen und Faserfeinheiten zeigten signifikante Abweichungen von der Normalverteilung. Hier wurden Unterschiede der Verteilungen mittels Bootstrap Konfidenzintervallen auf Signifikanz überprüft (ALKIO et al, 2003). Es handelt sich um einen robusten Test bei Unterschieden in der Verteilungsform.

Zur Darstellung des Zusammenhangs zwischen Faserlänge und Fasermasse wurde für 5 Stichproben eine Regressionskurve geschätzt. Hierzu wurden Masseklassen der Größe 0,01 mg gebildet und die Faserlängen für jede Klasse gemittelt. Bei Häufigkeiten  $< 3$  wurden die Faserlängen direkt verwendet. Die erste Klasse (0,001 mg) umfasste alle Fasern mit einer Masse  $\leq 0,001$  mg.

Der Zusammenhang von Faserlänge und Feinheit wurde mit Hilfe der Schätzung von Grenzfunktionen dargestellt (ALKIO et al., 2003). Hierzu wurden Faserlängensklassen von 60 mm gebildet, jeweils der Median berechnet und Ausreißer ( $\text{Median} \pm 1,5 \cdot (3. \text{Quartil} - 1. \text{Quartil})$ ) ausgeschlossen. Anhand der berechneten Minima und Maxima für jede Klasse wurden die Grenzfunktionen geschätzt.

Als Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha$  wurde für alle statistischen Schätzungen 0,05 festgelegt.

## 4 Ergebnisse

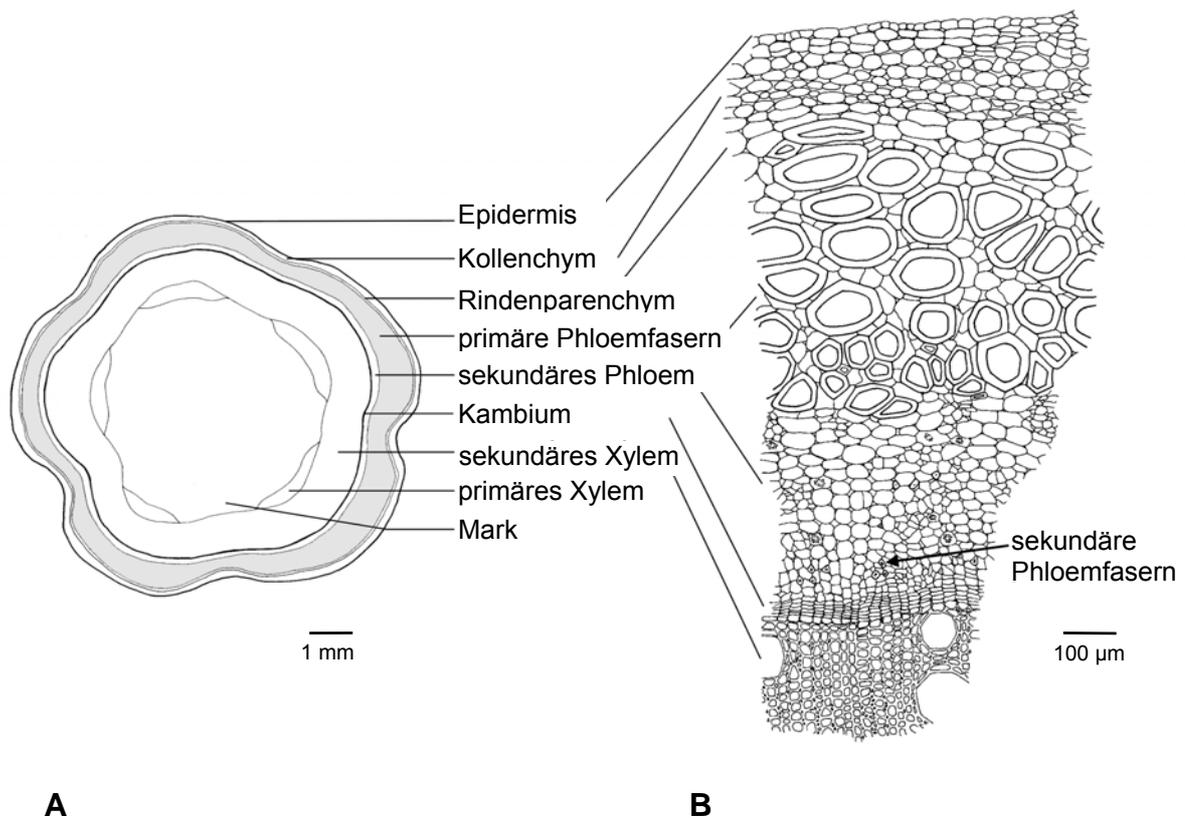
### 4.1 Stängelanatomie

Die Stängel von *G. diversifolia* zeigten im Querschnitt außen 5 rundliche Wölbungen, die durch Furchen voneinander getrennt waren (Abb. 6 A). Mit zunehmendem sekundären Dickenwachstum nahm im Zuge einer Dilatation die Tiefe dieser Furchen und die Ausprägung der Wölbungen ab. Hierdurch bekam der Stängelumriss zur Basis hin eine gleichförmigere, runde Gestalt. Die Anordnung der verschiedenen Gewebe im Stängelquerschnitt zeigt die Abb. 6 A, B: In einem jungen Stängel stellte das Abschlussgewebe die Epidermis dar. Sie wurde mit zunehmendem Alter des Stängels durch ein Periderm ersetzt, das am Stängel außen durch helle längliche kleine Flecken, die Lentizellen, erkennbar war. Unter dem Periderm bzw. der Epidermis lagen einige Zellschichten von Kollenchym mit darunter liegendem Rindenparenchym, dessen Vakuolen häufig Anthocyane enthielten. Weiter nach innen folgte der für die Nutzung der Pflanze wichtige breite Ring mit einzelnen primären Phloemfasern (Primärfasern), die meist völlig durch Parenchymzellen voneinander isoliert waren, im Einzelfall aber auch aneinander grenzen konnten. Die Faserzellen variierten in der Größe, zeigten eine rundliche bis polygone Form und besaßen im Verhältnis zum großen Zelllumen dünne Sekundärwände (Abb. 7 A). Einige Zelllumina der Faserzellen enthielten Tannin, das in frischen Schnitten als brauner, das Lumen vollständig ausfüllender Zellinhalt (Abb. 7 D) zu erkennen war. Diese tanningefüllten Faserzellen kamen in allen Stängelabschnitten von der Basis bis zur Spitze vor. Im mit Toluidinblau gefärbten Semidünnschnitt erschien ihr Inhalt blaugrün (Abb. 7 E). In jüngeren Stängelabschnitten waren die Fasern von weiteren Zellen des primären Phloems (Siebröhren und Geleitzellen) umgeben.

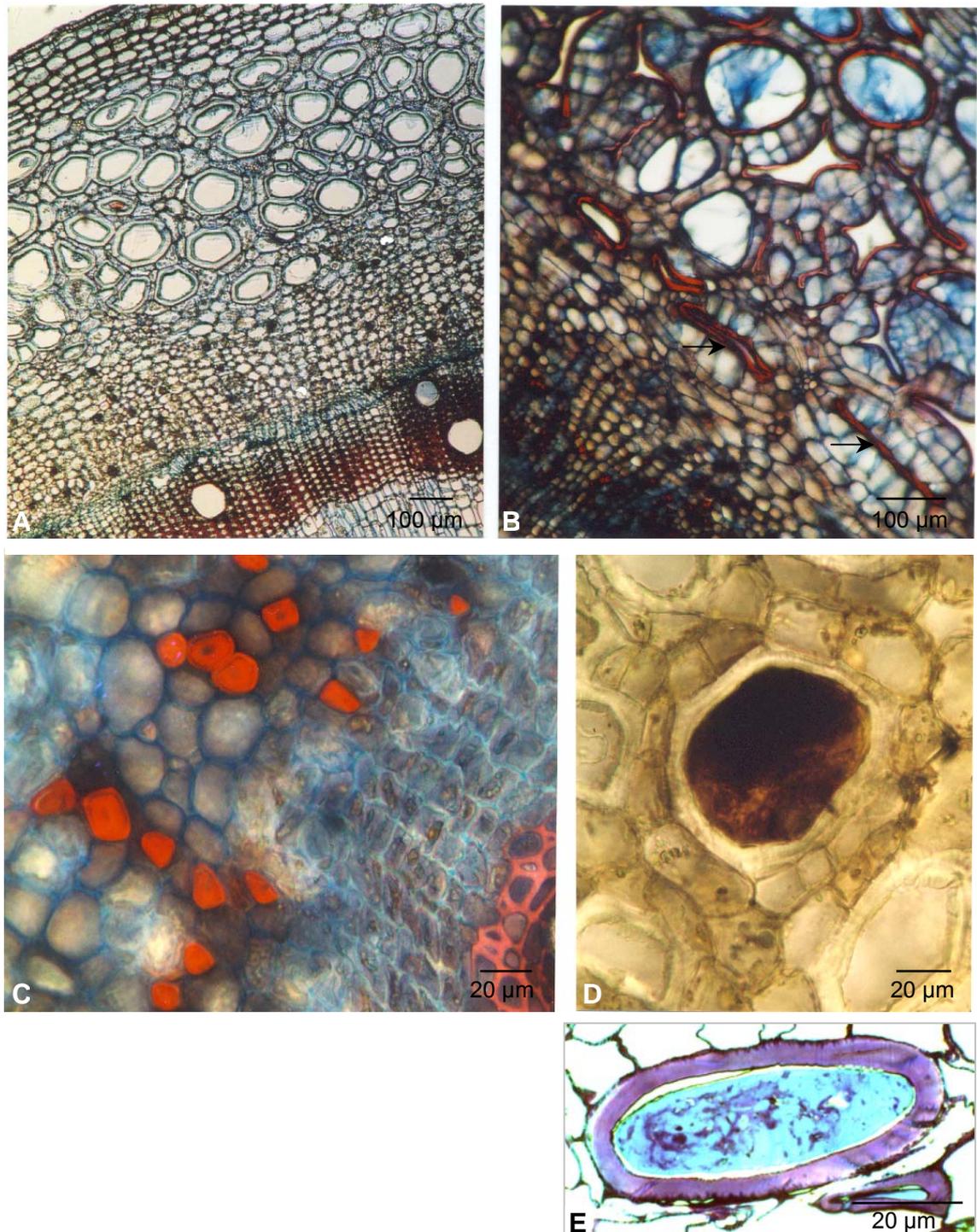
In älteren Stängelabschnitten, die sekundäres Dickenwachstum zeigten, folgte auf diese Schicht das sekundäre Phloem mit Siebröhren, Geleitzellen, Phloemparenchym und kleinen, meist drei- bis viereckigen oder polygonalen sekundären Phloemfasern (Sekundärfasern) (Abb. 6 B, Abb. 7 C). Letztere zeigten kleine bis punktförmige Zelllumina und wurden ebenso durch das Kambium gebildet wie das gesamte sekundäre Phloem. In der Stängelmittle war die Anzahl der sekundären Phloemfasern gering,

während sie in älteren Abschnitten zur Basis hin in kleinen Gruppen von zwei bis vier Zellen vorkamen.

An das sekundäre Phloem schloß sich nach innen das Kambium und das sekundäre Xylem an, welches sich aus alternierenden Bändern von lignifiziertem und parenchymatischem Gewebe zusammensetzte. Auch hier traten Anthocyane enthaltende Zellen auf, die besonders zahlreich in den den Stängelinnenraum vollständig ausfüllenden parenchymatischen Markzellen waren. Calciumoxalat-Drusen waren im Mark, im sekundären Phloem, im Parenchym der Rinde und zwischen den Primärfasern zu beobachten. An der Stängelbasis traten die Primärfasern in geringerer Anzahl auf als im mittleren Stängelabschnitt und waren, verursacht durch den über das sekundäre Dickenwachstum entstehenden Druck in radialer Richtung, zum Teil kollabiert (Abb. 7 B). Sie waren hier im Unterschied zu höheren Stängelabschnitten (Abb. 7 A) teilweise lignifiziert, wie die Färbung mit Safranin zeigte. Eine Lignifizierung war auch bei den Sekundärfasern des unteren Stängelabschnittes nachweisbar (Abb. 7 C).



**Abb. 6:** (A) Schema eines Stängelquerschnittes und (B) Zeichnung eines Stängelquerschnittsegmentes von *G. diversifolia*. Darstellung der Anordnung der verschiedenen Gewebe. Querschnitt aus der Mitte des unteren zweiten Stängelfünftels (50 µm Schnittdicke, konserviertes Gewächshausmaterial, 40% Ethanol), erstellt mit Hilfe eines Zeichentubus.



**Abb. 7:** Stängelquerschnittausschnitte von *G. diversifolia* : (A) Faserzellen mit großen Lumina, (B) kollabierte Faserzellen an der Stängelbasis (→), (C) Sekundärfasern (rot), (D, E) mit Tannin gefüllte Faserzellen. Die Querschnitte ((A – D) 50  $\mu\text{m}$  Schnittdicke, (E) 1  $\mu\text{m}$  Semidünnschnitt) wurden jeweils aus der Mitte eines Stängelfünftels entnommen: (A) zweites unteres Stängelfünftel, (B, C, D, E) Stängelbasis. (A – C) Astrablau und Safranin – Simultanfärbung, (D) ungefärbt und (E) Toluidinblaufärbung, Tannin grünblau. (A – D) Gewächshauspflanzen, frisch geschnitten, (E) Probe aus Nepal.

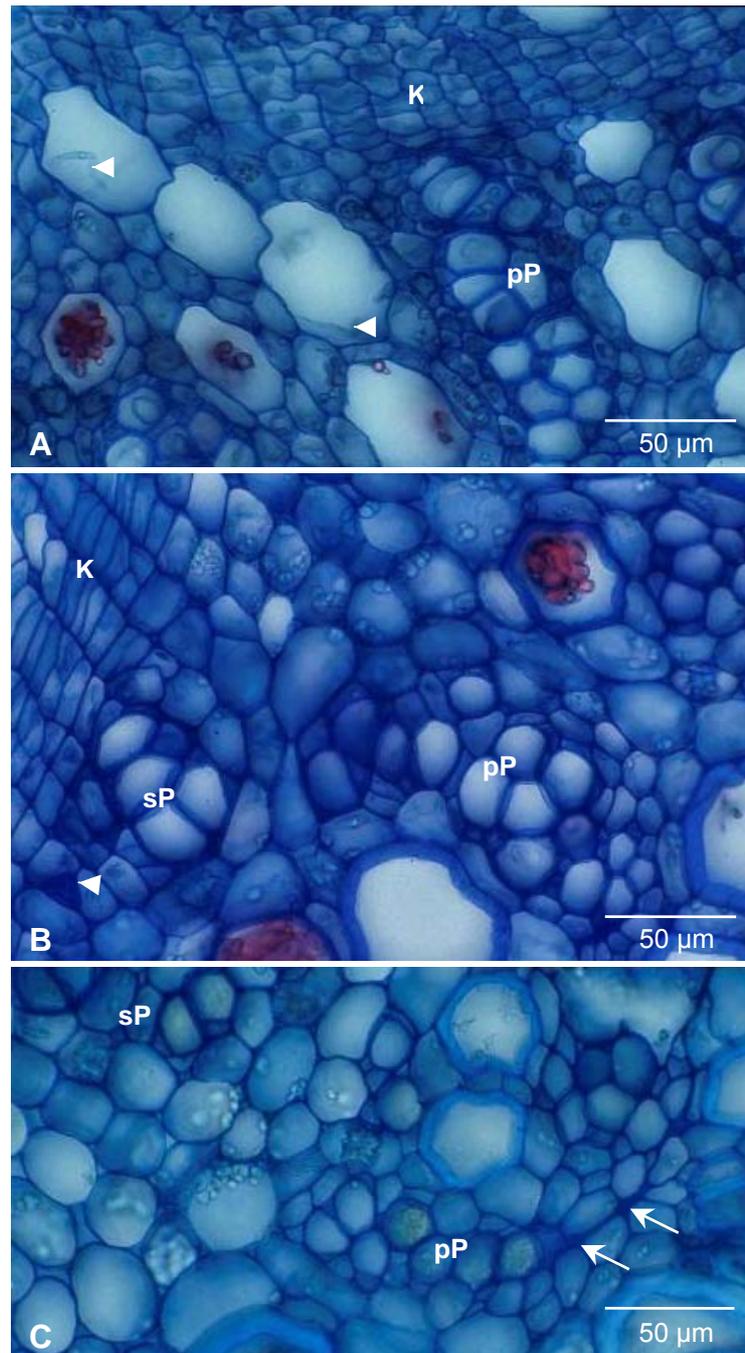
Die nutzbaren Fasern von *G. diversifolia* sind primäre Phloemfasern. In Höhe des oberen Stängelfünftels befanden sich die Faserzellen benachbart zum Kambium, umgeben von anderen Zellen des primären Phloems (Abb. 8 A). Die Sekundärwand war nur schwach entwickelt. Sie löste sich beim Schneiden ab, und so lag sie im Lumen der Zelle vor. Einige Faserzellen enthielten Tannin. Sekundärfasern waren noch nicht ausgebildet. Die Abb. 8 B zeigt die ersten durch das Kambium gebildeten Sekundärfasern und übrige Anteile des sekundären Phloems. Die Primärfasern hatten eine noch dünne Sekundärwand und befanden sich in einem größeren Abstand zum Kambium. In Abb. 8 C ist die Lage des primären Phloems zwischen den Primärfasern erkennbar. Die Zellen des primären Phloems obliterierten und waren in älteren Stängelabschnitten nicht mehr vorhanden. Die Primärfasern lagen dann direkt zwischen sekundärem Phloem und dem Parenchym der primären Rinde.

#### **Vergleich mit *Boehmeria nivea* (L.) GAUDICH. (Ramie)**

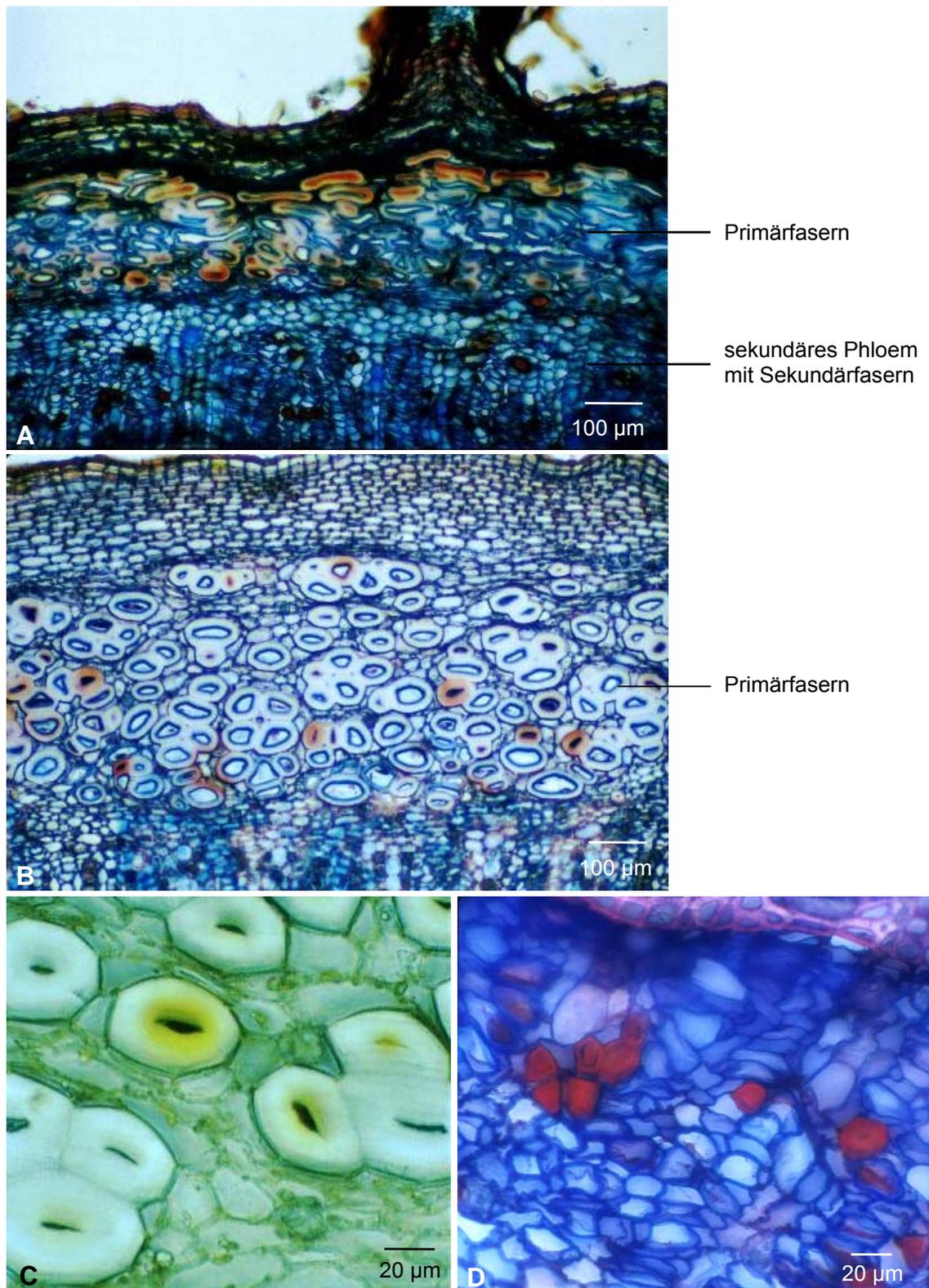
Zum Vergleich wurden zwei Stängelproben von *Boehmeria nivea* (L.) GAUDICH. (Ramie) im Querschnitt mikroskopiert (Abb. 9).

Querschnitte in Höhe der Stängelbasis von Ramie zeigten einen ähnlichen Gewebeaufbau wie bei *G. diversifolia* (Abb. 9 A, B). Die Primärfasern lagen zwischen Rindenparenchym und sekundärem Phloem. Sie kamen überwiegend als Einzelzellen vor, grenzten aber häufiger aneinander an, so dass sich kleine Zellgruppen von bis zu sechs Faserzellen bildeten (Abb. 9 C). Die Zelllumina waren im Verhältnis zur gesamten Faserzelle meistens groß. Ihre Größe variierte aber stark. Die Probe aus Emmendingen beispielsweise zeigte auch dickwandige Zellen mit kleinen Lumina (Abb. 9 C). Es wurden in beiden Proben mit Tanninen gefüllte Faserzellen gefunden. Gleichfalls war eine teilweise Lignifizierung der basalen Primärfasern feststellbar.

Die Sekundärfasern lagen ebenso einzeln oder in kleinen Gruppen im Querschnitt angeordnet vor und waren hinsichtlich ihrer Durchmesser und Lignifizierung mit *G. diversifolia* vergleichbar (Abb. 9 D).



**Abb. 8:** Primäre Phloemfasern von *G. diversifolia* in Stängelquerschnitten verschiedener Stängelabschnitte. (A) Querschnitt aus dem oberen (Stängelspitze), (B) dem zweiten und (C) dem mittleren Stängelfünftel. (A) Die Sekundärwand der großlumigen Faserzellen hat sich beim Schneiden abgelöst und liegt im Lumen (◄). (B) Sekundäres Phloem mit Sekundärfasern (◄). (C) Obliteration (→) des primären Phloems. Die Querschnitte (50 µm Schnittdicke) wurden jeweils aus der Mitte eines Stängelfünftels entnommen. Astrablau und Safranin – Simultanfärbung von konserviertem Gewächshausmaterial (40% Ethanol), K = Kambium, pP = primäres Phloem, sP = sekundäres Phloem.



**Abb. 9:** Stängelquerschnitte der Stängelbasis von Ramie (*Boehmeria nivea* (L.) GAUDICH.). (A) Großlumige und teilweise lignifizierte Primärfaserzellen und Sekundärfasern, (B) kleine Gruppen von Primärfasern und einzelne Fasern, (C) englumige Faserzellen z.T. mit Tannin gefüllt, (D) lignifizierte Sekundärfasern. Die Querschnitte haben eine Schnittdicke von 50 µm. (A, B, D) Astrablau – Safranin – Simultanfärbung und (C) ungefärbt. (A, D) Luftgetrocknete Stängelproben aus Hohenheim, daher die Zellen mehr zusammengedrängt; (B, C) konservierte Proben (40% Ethanol) aus Emmendingen.

## 4.2 Fasermasse und Fasergehalt des Stängels

Die Bestimmung der Fasermasse zeigte deutlich signifikante Unterschiede zwischen den verschiedenen Stängelabschnitten (**1** – **5**) (Abb. 10 A). In der Stängelspitze (**1**) war die Fasermasse am geringsten und nahm zur Stängelbasis (**5**) kontinuierlich zu. Von diesem Befund wurden geringfügige Abweichungen im Jahr 1999 bei 4 von 20 und im Jahr 2000 bei 2 von 14 Pflanzen gefunden, indem hier die Fasermasse im Stängelabschnitt **4** höher als im Abschnitt **5** war. Für alle anderen Abschnitte war ausnahmslos eine Zunahme der Fasermasse von der Stängelspitze bis zur Basis feststellbar. Die Differenzen der Fasermasse benachbarter Stängelabschnitte waren von Abschnitt **1** bis **4** deutlich signifikant verschieden. Bei den beiden unteren Abschnitten **4** und **5** war kein signifikanter Unterschied nachweisbar.

Die Fasermasse betrug im Abschnitt **1** im Mittel 0,03 g (95% Konfidenzintervall 0,02 g - 0,04 g), im Abschnitt **2** 0,12 g (0,10 g - 0,15 g), im Abschnitt **3** 0,25 g (0,22 g - 0,29 g), im Abschnitt **4** 0,38 g (0,34 g - 0,43 g) und im Abschnitt **5** 0,44 g (0,39 g - 0,48 g) (Abb. 10 A).

Die multifaktorielle Varianzanalyse zeigte, dass zusätzlich zum Stängelabschnitt ein signifikanter Einfluss des Erntejahres auf die Fasermasse gegeben war. Die Fasermasse pro Stängel betrug im Mittel im Jahr 1999 1,24 g (0,71 g – 1,77 g), im Jahr 2000 0,70 g (0,51 g – 0,90 g) und im Jahr 2001 2,01 g (1,64 g – 2,46 g).

Der prozentuale Fasergehalt bezogen auf die Trockenmasse des jeweiligen Stängelabschnittes stieg im Stängelverlauf von der Basis bis zur Stängelmitte an und erreichte hier die höchsten Werte (Abb. 10 B). In der Stängelspitze (**1**) war der Fasergehalt am geringsten. Von Abschnitt **3** zu **4** waren Unterschiede statistisch nicht signifikant. Zur Basis **5** nahm der Fasergehalt ab und sank auf ein Niveau, dass zwischen den Abschnitten **2** und **3** lag. Die Fasergehalte des Abschnittes **2** waren deutlich höher als in der Stängelspitze (**1**).

Der Fasergehalt betrug im Abschnitt **1** im Mittel 2,1% (1,7% - 2,6%), im Abschnitt **2** 4,4% (4,0% - 4,9%), im Abschnitt **3** 5,9% (5,5% - 6,4%), im Abschnitt **4** 6,3% (5,9% - 6,8%) und im Abschnitt **5** 5,1% (4,7% - 5,6%) (Abb. 10 B).

Ein Jahreseinfluss war für die Fasergehalte statistisch nicht feststellbar. Die Fasergehalte pro Stängel ergaben im Mittel 1999 4,6% (3,8% - 5,5%), im Jahr 2000 4,7% (4,0% - 5,4%) und im Jahr 2001 5,1% (4,4% - 5,9%). Die Minima - Maxima betragen 2,5% - 7,0% (1999), 3,1% - 7,0% (2000) und 3,4% - 7,0% (2001).

Fasermasse [g] und Fasergehalt [%] zeigten übereinstimmend die geringsten Werte in der Stängelspitze.

Der Anteil der Fasergehalte der einzelnen Stängelabschnitte am Gesamtfasergehalt des Stängels ergab für Abschnitt **5** einen Anteil von 37,3% (35,3% - 39,0%) und für Abschnitt **4** 31,8% (29,2% - 34,2%) (Abb. 10 C). Damit bildeten diese beiden Stängelabschnitte einen Faseranteil von 69,1%. Die Stängelabschnitte **3** und **2** hatten mit 21,1% (15,5% - 24,3%) und 10,0% (5,9% - 13,9%) gemeinsam einen Anteil von 31,1% am Stängelfasergehalt. Der Fasergehalt der Spitzen zeigte mit 2,4% (1,8% - 6,5%) den geringsten Anteil (Abb. 10 C).

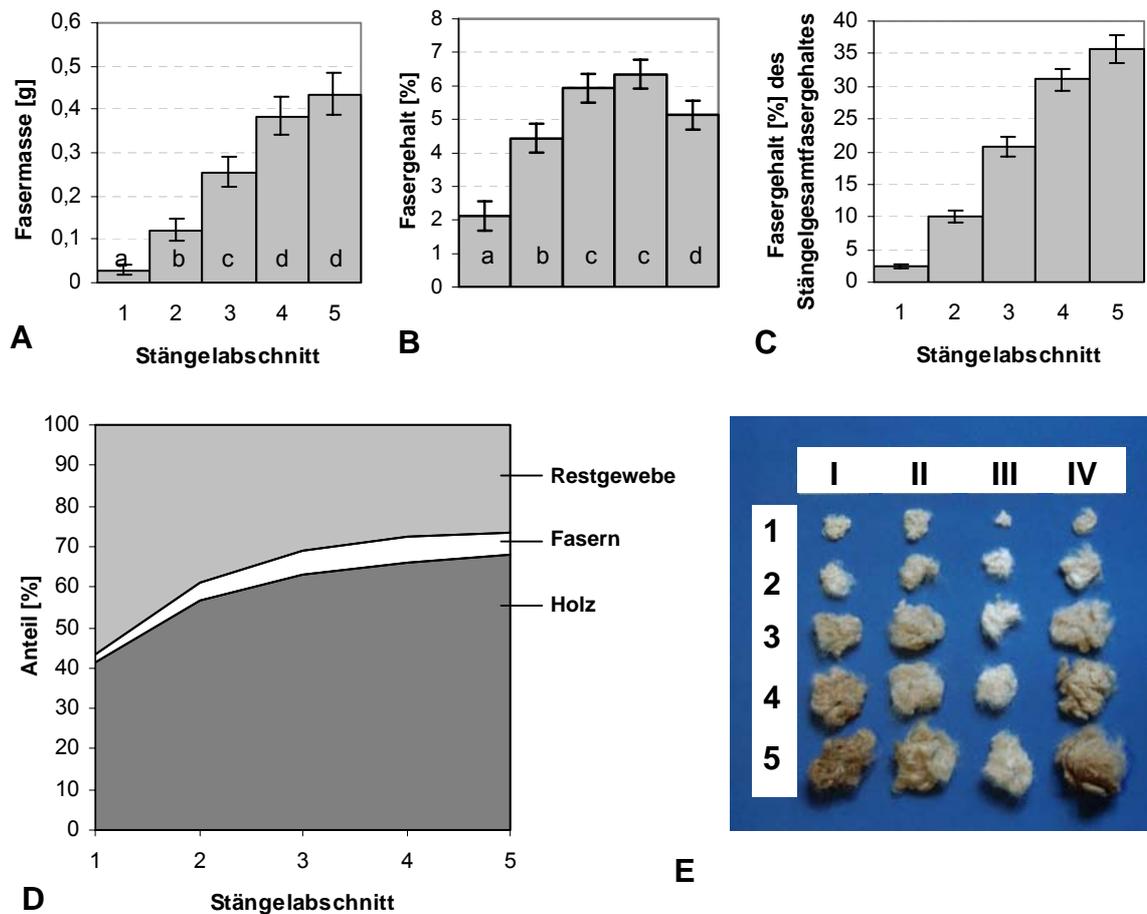
Der Faseranteil der Stängel war in der Stängelmittle am höchsten und nahm zur Stängelbasis geringfügig, zur Spitze stärker ab (Abb. 10 B, D).

Der Holzanteil der Stängel nahm von der Stängelbasis (**5**) zur Stängelspitze (**1**) ab (Abb. 10 D). Das Holz bildete mit Ausnahme des oberen Stängelfünftels (**1**) den größten Teil des Stängels.

Der Holzanteil betrug im Abschnitt **1** im Mittel 41,5% (39,6% - 43,3%), im Abschnitt **2** 56,7% (55,3% - 58,1%), im Abschnitt **3** 62,9% (61,6% - 64,2%), im Abschnitt **4** 66,2% (65,1% - 67,4%) und im Abschnitt **5** 68,2% (67,0% - 69,3%) (Abb. 10 D).

Der Restgewebeanteil war in der Stängelspitze **1** mit im Mittel 56,4% (54,4% - 58,4%) besonders hoch, nahm dann zur Stängelmittle in den Abschnitten **2**, **3** und **4** mit 38,9% (37,3% - 40,4%), 31,2% (29,9% - 32,5%) und 27,4% (26,3% - 28,5%) ab und blieb in der Stängelbasis **5** mit 26,7% (25,7% - 27,6%) annähernd konstant (Abb. 10 D).

Im Zusammenhang mit der Faserisolierung konnte festgestellt werden, dass die Fasern im Stängelverlauf in ihrer Farbe variierten (Abb. 10 E). Die Farbe veränderte sich von einem Weiß oder leichter bräunlicher Tönung der Stängelspitzenfasern zu einem Mittel- bis Dunkelbraun in der Stängelbasis.



**Abb. 10:** (A) Fasermasse und (B) Fasergehalt, (C) Anteil des Fasergehaltes einzelner Stängelabschnitte am Gesamtfasergehalt des Stängels, (D) Faser-, Holz-, und Restgewebeanteil<sup>2</sup> (Mittelwerte) der verschiedenen Stängelabschnitte (1 – 5) und (E) Färbungen isolierter Fasern von vier Pflanzen der Stängelabschnitte 1 – 5 (I = Nr. 102, II = Nr. 107, III = Nr. 118, IV = Nr. 134) (Ernte 2001). (A - E) Probenahme Anfang Oktober (mittels Randomisierung und Auswahl eines Stängels mittlerer Länge), Entnahme 10 cm über der Bodenoberfläche und Entfernung der oberen 5 cm der Sprossspitze. Teilung des Stängels in 5 gleichlange Abschnitte und Bestimmung der Trockenmasse. 1 h kochen in Leitungswasser und Abziehen des äußeren Stängelbereiches (Rinde) (Dekortikation). Trocknung des Holzteiles und Massebestimmung. Kochen der Rinde in NaOH (2%, 1h) und Ausspritzen der Fasern (Degummierung), Trocknung und Massebestimmung (Faserisolierung I). (D) Masse des Restgewebes ergibt sich rechnerisch aus der Differenz von Faser- und Holzmasse zur Stängelmasse. (A - D) Proben der Jahre 1999 (n = 20), 2000 (n = 14) und 2001 (n = 13). (A - C) Mittelwerte mit Konfidenzintervallen (vertikale Linien), (A, B) multifaktorielle Varianzanalyse  $\alpha = (0,05)$ , gleiche Buchstaben kennzeichnen identische Messwertverteilungen, (A) zeigte Jahresabhängigkeit (nicht dargestellt); 1 = Stängelspitze, 5 = Stängelbasis.

<sup>2</sup> Restgewebe umfasst das Gewebe ohne Fasern und Holz (Xylem): Mark, Kambium, sekundäres Phloem, Rindenparenchym und Abschlussgewebe (Periderm bzw. Epidermis)

### 4.3 Morphologie der primären Phloemfasern (Primärfasern)

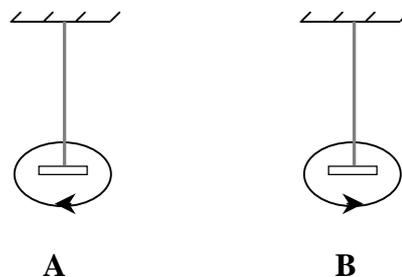
#### 4.3.1 Isolierte Fasern - Längsansicht

Die Primärfasern zeigten im Stängelquerschnitt eine rundliche bis polygonale Form. Nach der Faserextraktion hatten die Fasern sowohl im trockenen als auch im nassen Zustand durch das weitgehende Kollabieren des Lumens Bänderform. In Querschnitten getrockneter Fasern wurde dies sichtbar, indem sie deutlich abgeflacht und ellipsen- bis nierenförmig erschienen (Abb. 12 A). Die Faserdurchmesser der Fasern, auch eines Stängelabschnittes, waren sehr unterschiedlich.

##### 4.3.1.1 Faserwindung

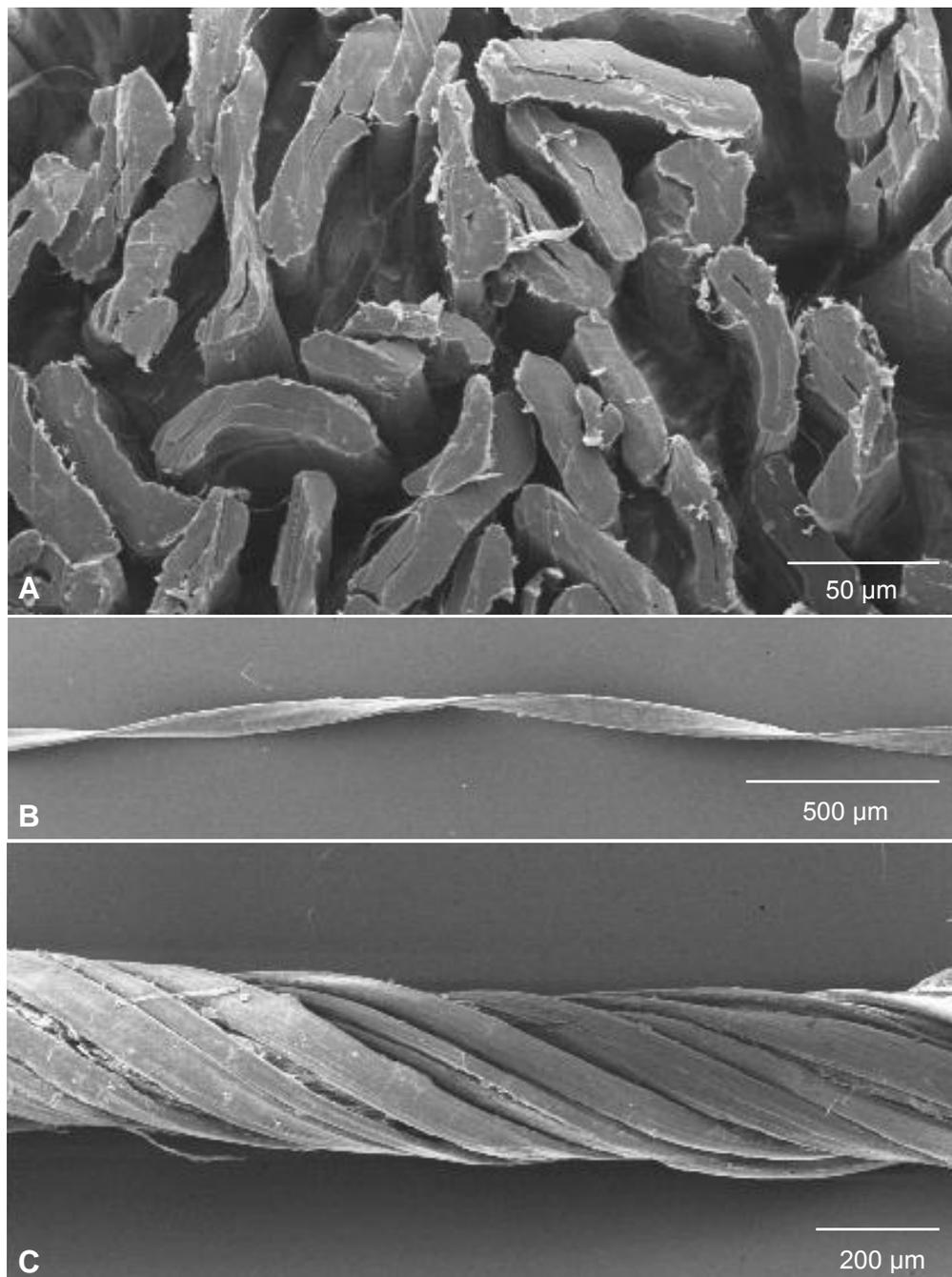
Getrocknete Fasern wiesen zusätzlich zur Bänderform Windungen auf, indem sie um ihre Längsachse gedreht waren (Abb. 12 B). Die allgemeine Bezeichnung der Drehrichtungen von Fasern weicht bei den verschiedenen Autoren voneinander ab, wobei linksdrehend (SONNTAG, 1911) gleichbedeutend ist mit rechtsläufiger Drehung (REIMERS, 1922) und rechtsdrehend nach SONNTAG (1911) die linksläufige Drehung nach REIMERS (1922) bezeichnet (Abb. 11 A, B).

Die Untersuchungen an *G. diversifolia* ergaben, dass sich mit dem Anfeuchten die Windungen der Fasern strecken, indem die Fasern sich nach links um die eigene Achse drehen (linksdrehend) bzw. eine rechtsläufige Drehung durchführen (Abb. 11 A). Beim erneuten Trocknen drehen sich die Fasern zurück nach rechts bzw. vollziehen eine linksläufige Drehung, die den Ausgangszustand der Faser wiederherstellt (Abb. 11 B).



**Abb. 11:** Schematische Definition der Drehrichtung. (A) Linksdrehend nach SONNTAG (1911), rechtsläufige Drehung (mit dem Uhrzeigersinn) nach REIMERS (1922), (B) rechtsdrehend nach SONNTAG (1911), linksläufige Drehung (entgegengesetzt dem Uhrzeigersinn) nach REIMERS (1922).

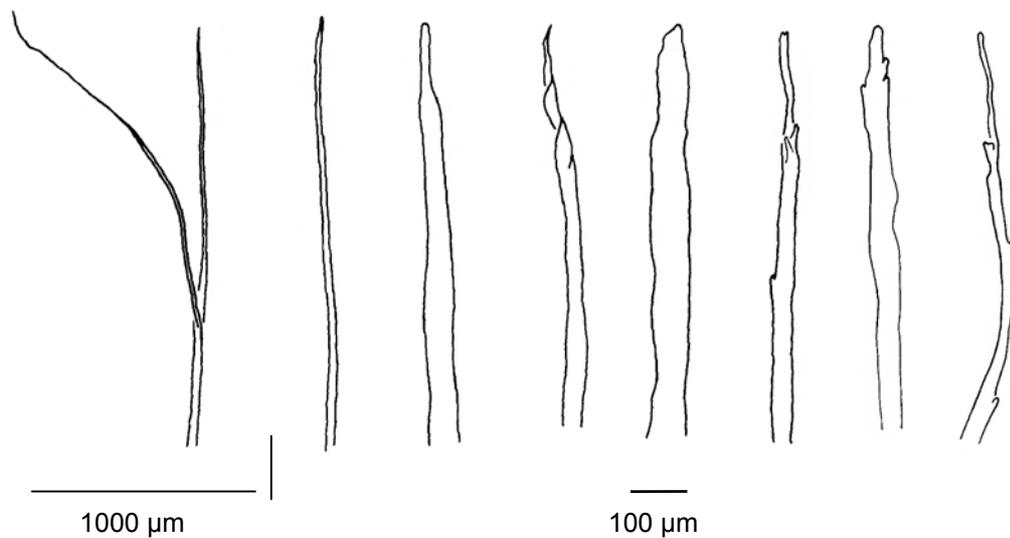
Während die Faserwindungen bei allen aus dem Stängel entnommenen Fasern festgestellt wurden, waren sie in einer handgesponnenen Garnprobe aus Nepal, also einer verarbeiteten Form der Fasern, durch das Verdrillen im Spinnprozess nicht mehr erkennbar (Abb. 12 C).



**Abb. 12:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der Fasern von *G. diversifolia*. (A) Querschnitte von Fasern der Stängelbasis, (B) Faserwindungen (rechts gedreht) einer Faser und (C) handgesponnene Garnprobe aus Nepal. (A) Fasern der Stängelbasis, Faserisolierung I, (B) Fasern der Stängelbasis, Faserisolierung III.

#### 4.3.1.2 Faserspitzen

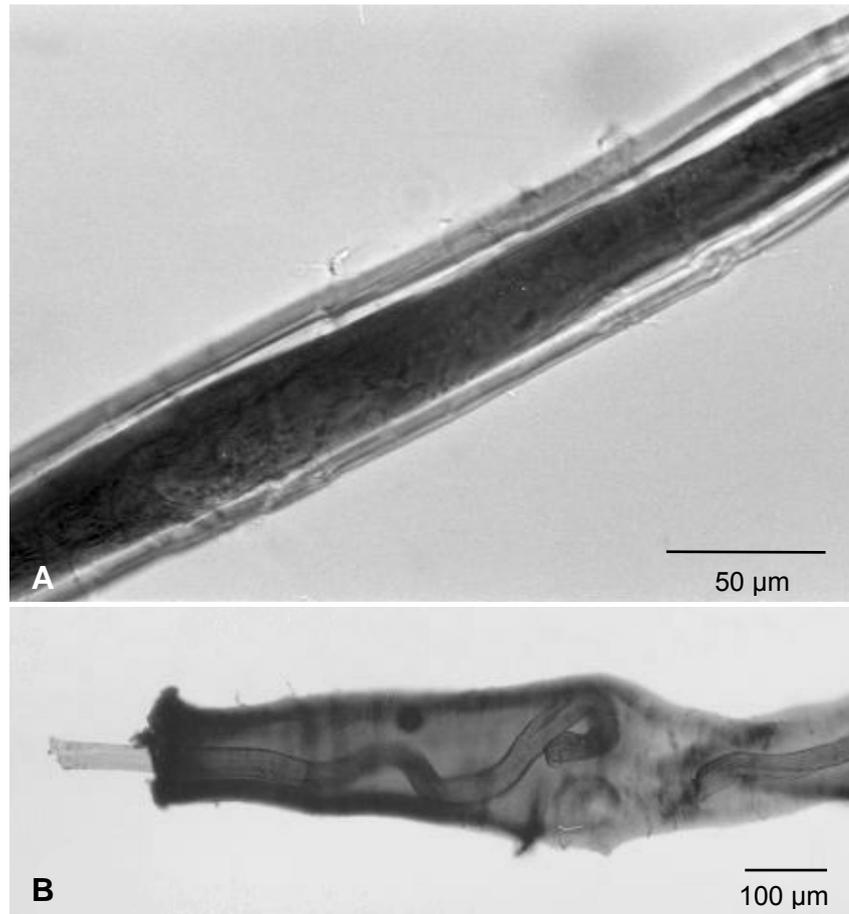
Die Form der Spitzen war sehr unterschiedlich gestaltet (Abb. 13). Sie waren zu einer langen, sehr dünnen haarförmig auslaufenden Spitze ausgezogen oder die Enden waren stumpf, glatt oder mit Ausbuchtungen versehen. Auch eine korkenzieherartig gedrehte Spitze wurde gefunden. Wiederholt wurden kleine Verzweigungen an den Spitzen festgestellt oder gabelig geteilte Enden von mehreren Zentimetern Länge.



**Abb. 13:** Formen der Primärfaserspitzen von *G. diversifolia*; mit dem Zeichentubus erstellte Zeichnung.

#### 4.3.1.3 Protoplast und Zellwand

Das Lumen der isolierten Faserzellen war zum Teil mit Inhalt (Tannin) gefüllt, wie es schon an Stängelquerschnitten (Abb. 7 D) beobachtet wurde (Abb. 14 A). Dieser Inhalt ließ sich durch fortschreitende Behandlung mit Quellungsmittel (Chlorzinkjod, Cuoxam) isolieren. Zu Beginn der Behandlung quoll die Faserzelle auf und verkürzte sich in Längsrichtung. Hierdurch trat der Protoplast der Zelle heraus (Abb. 14 B).



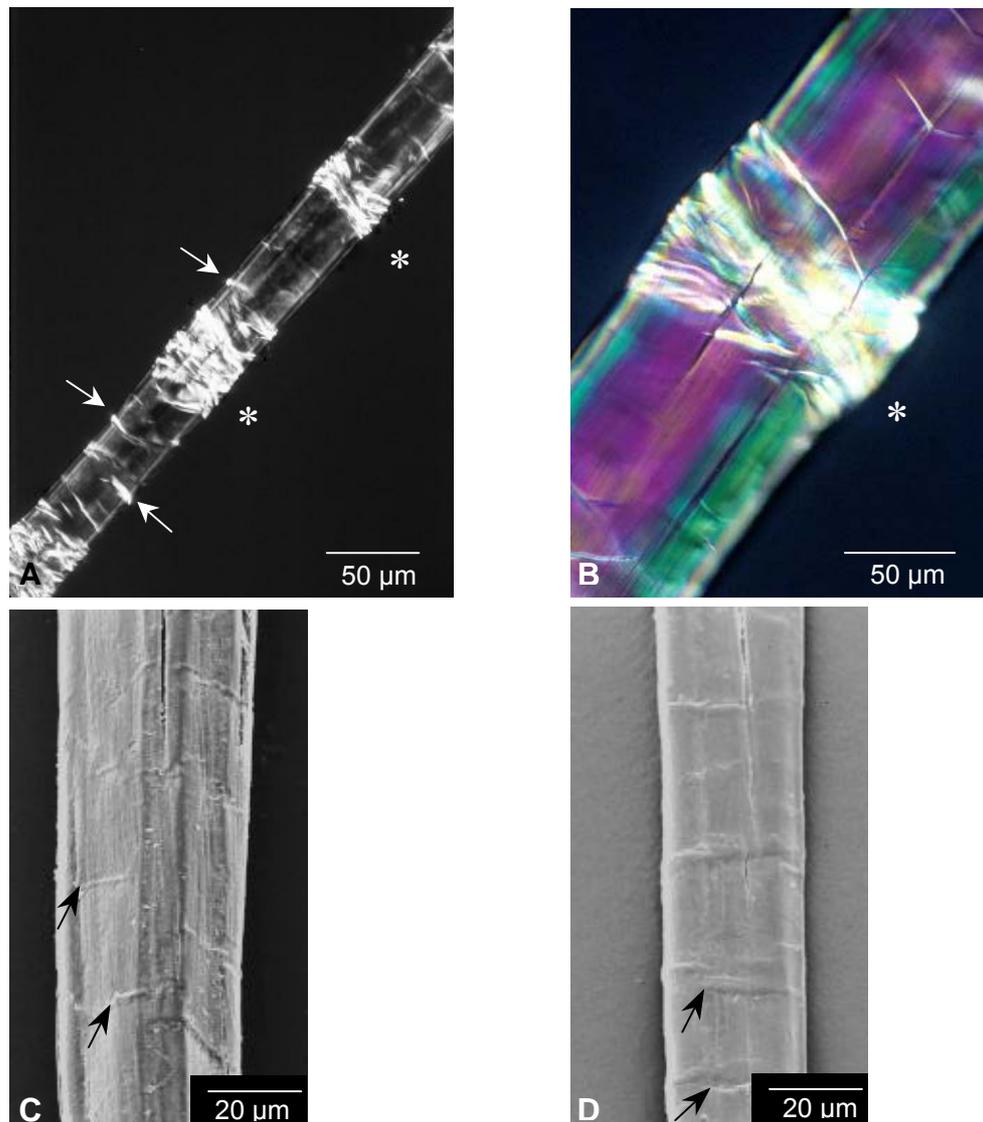
**Abb. 14:** Mit Tannin gefüllte Protoplasten von *G. diversifolia*. (A) Faser-Längsansicht und (B) Faserquellung mit Chlorzinkjod. Die Faserwand quillt und verkürzt sich in Längsrichtung. Hierdurch tritt der tanningefüllte Protoplast (→) aus der Faserzelle heraus. Fasern der Stängelbasis, Faserisolierung I.

Die Faseroberfläche zeigte sich makroskopisch glatt und glänzend. Mikroskopisch waren Unebenheiten der Faseroberfläche zu erkennen (Abb. 15 A - C). Es waren zur Faserachse zahlreiche senkrecht verlaufende Querstreifen vorhanden, die sich meist nicht über die ganze Faserbreite erstreckten. Hierbei handelte es sich um Veränderungen der Faseroberfläche, die aus kleineren Wölbungen und oberflächlichen Fissuren bestanden. Zusätzlich waren Faserstauchungen – Verschiebungen oder Dislokationen – zu erkennen, die als auffällige Verdickungen in Erscheinung traten und sich in größeren Abständen als die Querstreifungen zeigten. Diese Strukturveränderungen waren nach einer mechanischen Behandlung der Fasern (s. Faserisolierung II) besonders zahlreich.

In der Literatur gibt es keine einheitliche Verwendung und Unterscheidung der Begriffe Verschiebungen und Querstreifung. ILVESSALO-PFÄFFLIN (1995, anhand von Abbildungen) bezeichnet kräftigere Unterbrechungen der Struktur, die mit einer Verbreiterung an dieser Stelle einhergehen, als Verschiebungen (engl. dislocations) und schwächere

Unterbrechungen, die im Wesentlichen mikroskopisch durch feine Linien zu erkennen sind, als Querstreifung (engl. crossmarkings). In diesem Sinne wurden diese Begriffe in der vorliegenden Arbeit verwendet. Darüber hinaus traten auch Längsrisse in der Faserstruktur auf, die parallel zur Fibrillenstruktur verliefen (Abb. 15 C).

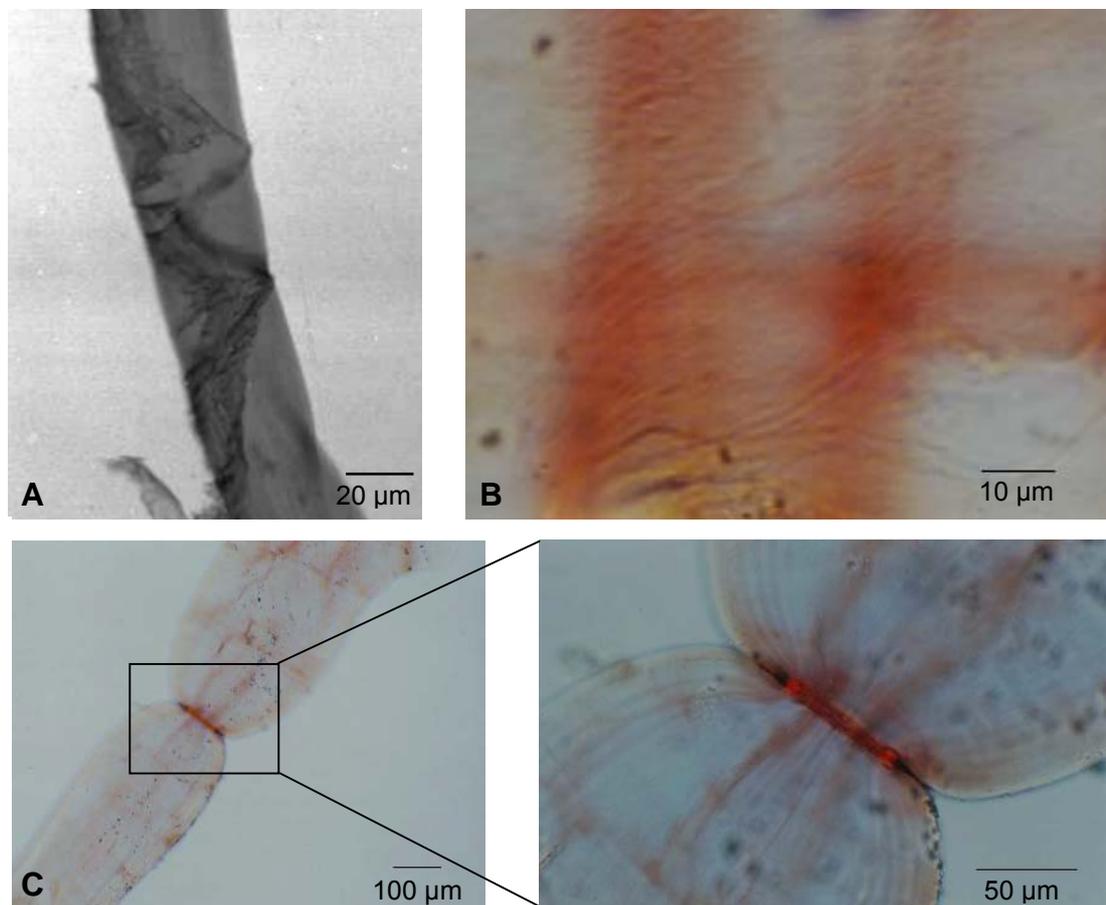
Der Vergleich der Fasern von *G. diversifolia* und *B. nivea* mit Hilfe von rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen zeigte, dass die Fasern zusätzlich zur identischen Bänderform eine ähnliche Oberflächenstruktur hatten. Bei beiden Fasern waren Verschiebungen, Querstreifungen und Längsrisse festzustellen (Abb. 15 C, D).



**Abb. 15:** Querstreifungen (→) und Verschiebungen (\*) an Fasern von (A – C) *G. diversifolia* und (D) Ramie (*B. nivea*). (A und C) Fasern aus der Stängelmitte, (B) Faser der Stängelbasis, (D) Faser einer Kammgarnprobe. (A und B) Faserisolierung II, (C) Faserisolierung III, (D) Faserisolierung unbekannt. (A, B) Polarisationsmikroskopische und (C, D) rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen.

Die Faserwand baute sich aus strukturell verschiedenen Schichten auf, der Primärwand und der Sekundärwand, wobei Letztere wiederum untergliedert war.

Die **Primärwand** war sehr dünn und lichtmikroskopisch in der Faserlängsansicht erst mit Hilfe von Quellschubstoffen zu erkennen. Unter Verwendung von Cuoxam kam es durch die Quellung zu einer schnellen, starken Verkürzung und Verbreiterung der Faser. Die Primärwand zeigte sich ohne eine gerichtete Streifung in Form von Resten auf der Sekundärwand (Abb. 16 A, B) oder indem sie durch eine tonnenförmige Aufquellung der Sekundärwand zu einem gürtelförmigen Ring zusammen geschoben wurde (Abb. 16 C).



**Abb. 16:** Primärwand von Fasern (*G. diversifolia*) unter Quellung mit Cuoxam. (A) Abgelöste Primärwandreste außen aufliegend (Schwarzweiß-Foto), (B) Primärwandaufsicht, (C) tonnenförmige Aufquellung der Faser mit gürtelförmiger Einschnürung durch die Primärwand. Färbung von Fasern der Stängelmittle mit Kongorot und anschließende Quellung in Cuoxam. (A) Faser der Stängelmittle und (B, C) der Stängelbasis, (A – C) Faserisolierung III.

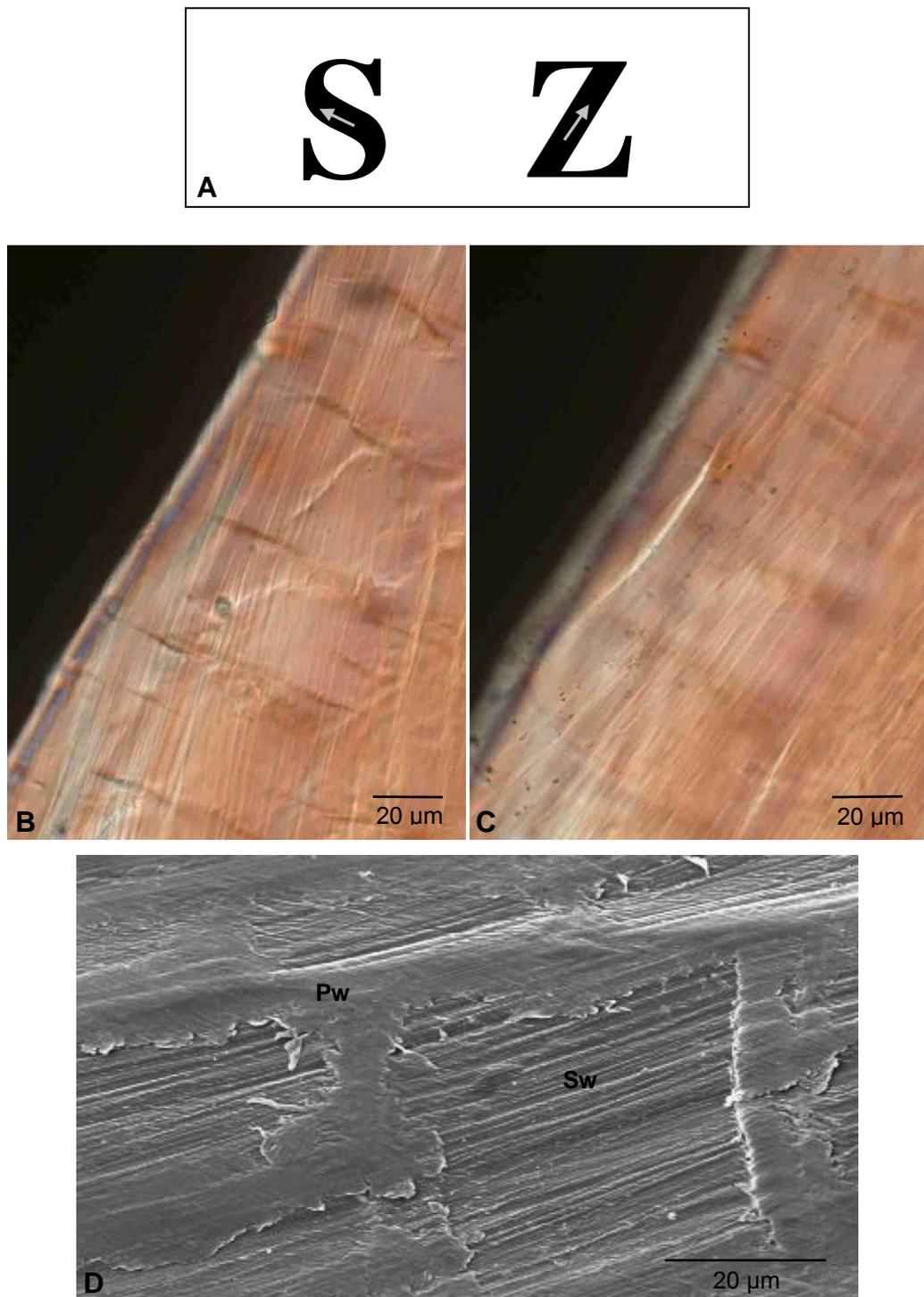
Im ungequollenen Zustand der Faser war mikroskopisch in der Faseraufsicht die **Sekundärwand** sichtbar. Sie zeigte sich in Form einer fibrillären Struktur (Abb. 17 D), die nicht parallel, sondern leicht schräg zur Faserlängsachse verlief. Diese für Stängel Fasern bekannte Struktur wird als Spiraltextrur (Spiralstreifung) bezeichnet, da sie um die Faserachse herum spiralförmig verläuft. Hierbei wird zwischen S- und Z-Form bezüglich der Verlaufsrichtung unterschieden (Abb. 17 A).

Die mikroskopisch sichtbare Faseroberfläche entsprach der äußeren Schicht der Sekundärwand ( $S_1$ ) und zeigte bei *G. diversifolia* eine Spiraltextrur in der S-Form (Abb. 17 B). Durch Senken des Tubus wurde bei gequollenen Fasern eine darunter liegende Sekundärwandschicht ( $S_2$ ), die entgegengesetzt in Z-Form gestreift war, sichtbar (Abb. 17 C).

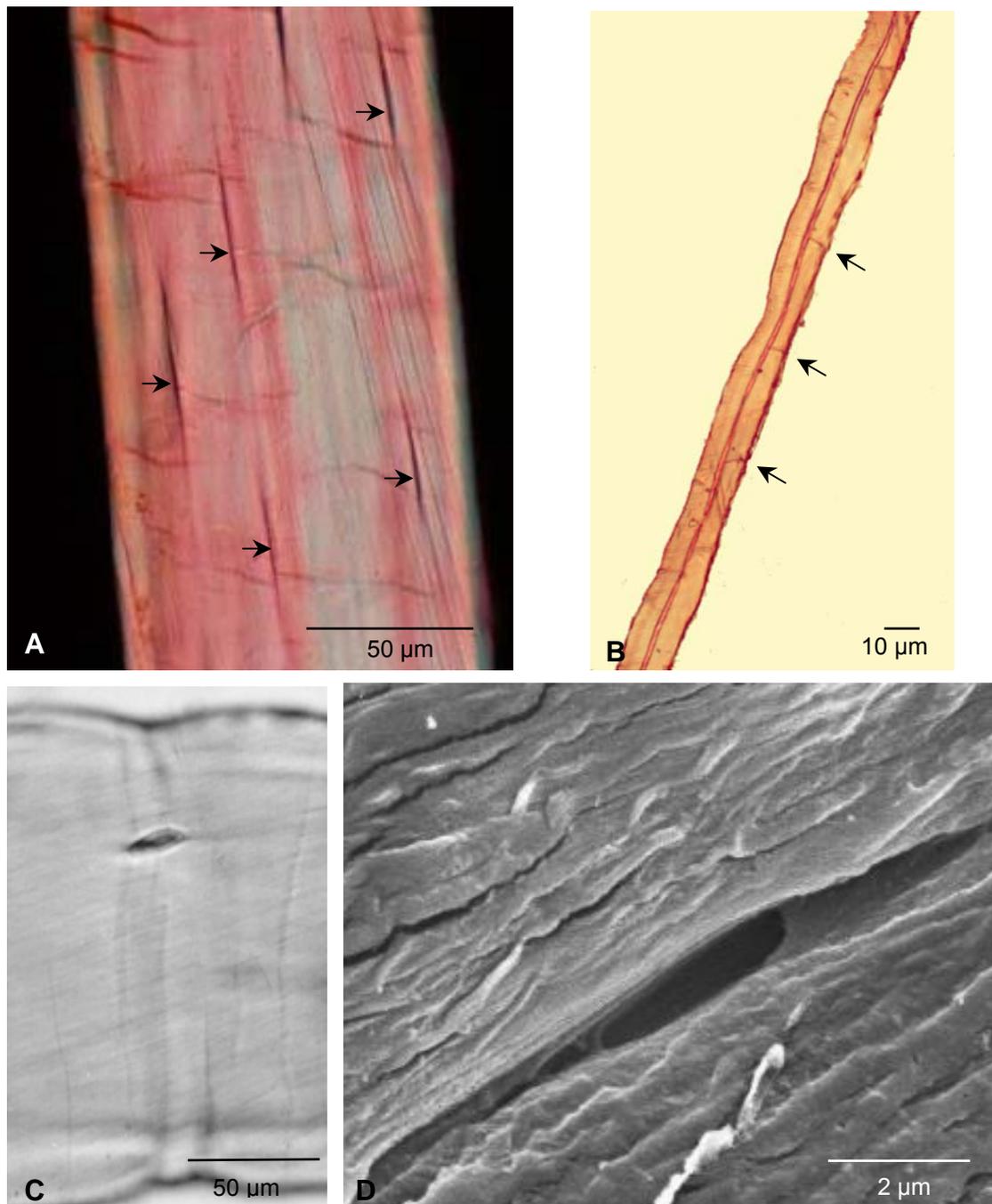
Zwischen der Drehungsrichtung der Fasern und der Spiralstruktur bestand ein Zusammenhang. Die Torsion erfolgte, entsprechend der Spiraltextrur in S-Form der äußeren Sekundärwandschicht, bei Anfeuchtung nach links (rechtsläufig), indem sich die Neigung der Spiraltextrur zunehmend reduzierte. Im Wasserbad zeigten die Fasern daher keine Windungen. Beim Trocknen wurde der Ausgangszustand wieder hergestellt, indem die Drehung nach rechts (linksläufig) erfolgte.

An der Faseroberfläche zeichneten sich kleine schlitzförmige Strukturen ab, die in Richtung der Spiraltextrur verliefen (Abb. 18 A). Es handelte sich um Tüpfel. Der ovale Tüpfelkanal mündete in eine schlitzförmige Öffnung. Bei Behandlung mit Cuoxam erweiterte sich die Öffnung des Tüpfelkanals durch Quellung und wurde an der Oberfläche deutlicher sichtbar (Abb. 18 C). Die Einsenkung der Öffnung gibt auch die rasterlektronenmikroskopische Aufnahme eines Tüpfels wieder (Abb. 18 D).

Im Stängelquerschnitt waren Tüpfel häufig zu finden. Der Tüpfelkanal durchzog die Sekundärwand und war unverzweigt. Es handelte sich um einfache Tüpfel. Die die beiden benachbarten Zellen trennende Schließhaut bildete die Mittellamelle mit den beiden Primärwänden. Im Faserlängsschnitt zeigte sich, dass die Tüpfelkanäle entweder senkrecht oder mit leichter Neigung zur Faserlängsachse verliefen (Abb. 18 B).



**Abb. 17:** Sekundärwandstruktur in der Faseraufsicht (*G. diversifolia*). (A) Bezeichnung der Spiraltextrur entsprechend des Verlaufs der dem Betrachter zugewandten Seite des aufrecht stehenden Objektes. Mittelteile der Buchstaben S und Z maßgebend: S-Form und Z-Form. (B) Spiraltextrur in S-Form und (C) in Z-Form, (D) fibrilläre Struktur (S-Form) wird durch die teilweise Entfernung der Primärwand erkennbar. (B, C) Kongorotfärbung und Quellung in Cuoxam. Struktur wird beim Durchfokussieren der Faserwand mit dem Polarisationsmikroskop sichtbar. (D) Rasterelektronen-mikroskopische Aufnahme einer Faser mit beschädigter Oberfläche. (B – D) Fasern der Stängelbasis, Faserisolierung III, Pw = Primärwand, Sw = Sekundärwand.



**Abb. 18:** Tüpfel der Primärfasern von *G. diversifolia*. (A) Die Lage der Tüpfel (→) in der Faseraufsicht. Verlauf entsprechend der Spiraltextrur, (B) Faserlängsschnitt, Tüpfelkanäle (→) senkrecht bis leicht geneigt zur Oberfläche, (C) Tüpfel nach Quellung in Cuoxam, (D) rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines Tüpfels. (A - D) Fasern der Stängelbasis, Faserisolierung III.

### 4.3.2 Fasern im Gewebeverband - Querschnitte

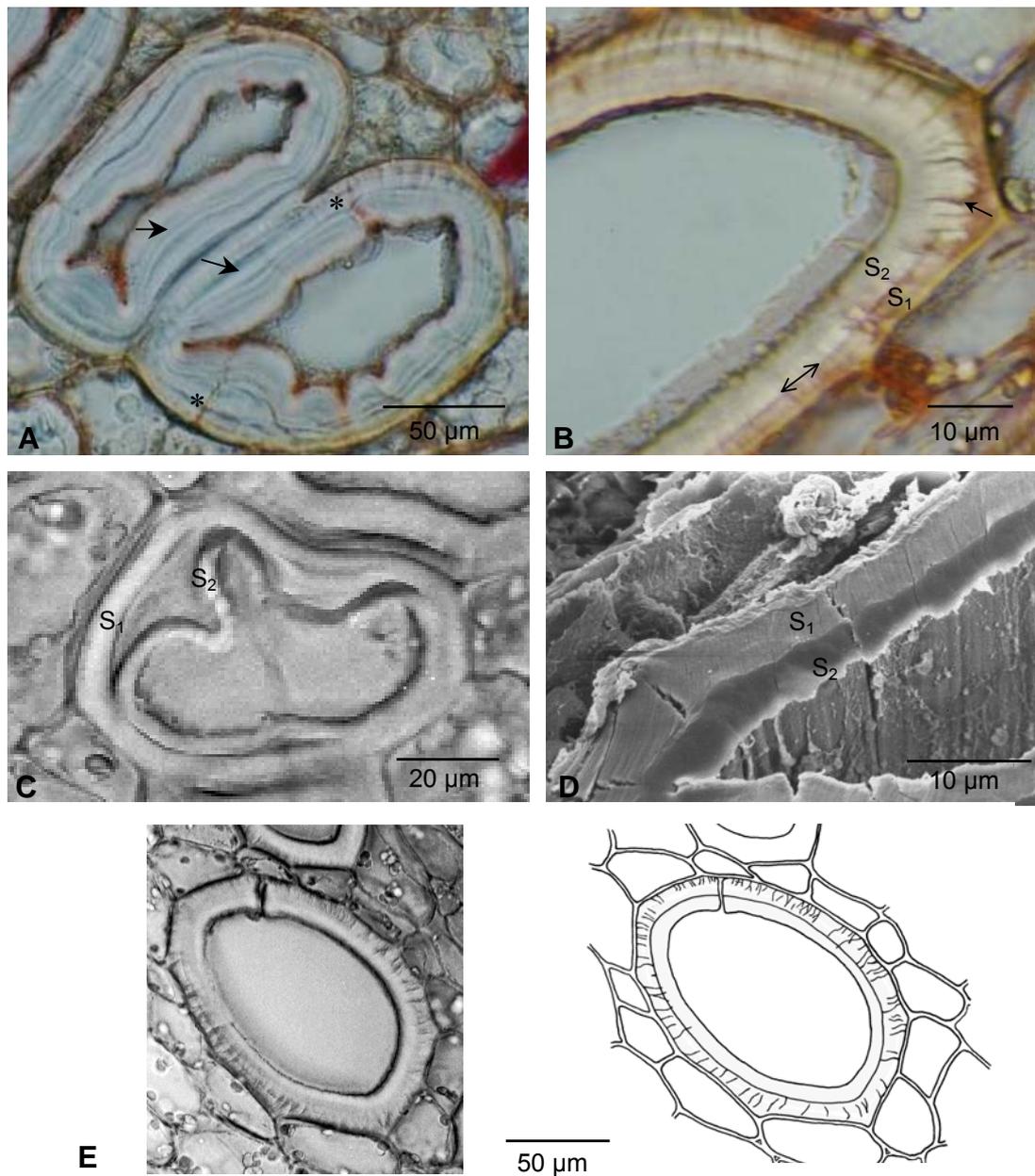
Bei der mikroskopischen Untersuchung eines Stängelquerschnittes waren die Faserzellen anhand der verstärkten Sekundärwand und großer Lumina, im Vergleich zu den anderen Zellen des Phloems und der Rinde, zu identifizieren. Die Tüpfelkanäle wurden als Aussparung der Sekundärwand sichtbar (Abb. 19 A, E).

In Faserquerschnitten von Fasern der Stängelbasis ließ sich die Faserwand zunächst deutlich in zwei Bereiche untergliedern: Den äußeren sehr dünnen Bereich bildeten Mittellamelle und Primärwand. Eine Abgrenzung zwischen beiden war lichtmikroskopisch nicht möglich. Hierauf folgte nach innen die sehr dicke Sekundärwand (bis 20  $\mu\text{m}$ ), die im unteren Stängelabschnitt besonders stark ausgeprägt war. Durch Quellung in Cuoxam wurde ein lamellarer Aufbau erkennbar. (Abb. 19 A).

Die Sekundärwand war in Querschnitten deutlich in zwei Schichten geteilt, wobei die innere Sekundärwandschicht ( $S_2$ ) homogener als die äußere Schicht ( $S_1$ ) erschien. Häufig kam es bei der Herstellung von Querschnitten zu einer teilweisen Ablösung dieser Schichten voneinander (Abb. 19 C). In der Stängelspitze war die Sekundärwand dünn (bis 4  $\mu\text{m}$ ) und bestand nur aus einer Schicht.

In Stängelquerschnitten der Stängelbasis war bei starker Vergrößerung und in gefärbten Schnitten schon bei mittlerer Vergrößerung zu erkennen, dass die inhomogene Struktur der äußeren Wandschicht durch zahlreiche, in radiale Richtung verlaufende Strukturen zustande kam (Abb. 19 B, E). Diese radialen Strukturen verliefen in unregelmäßigen Linien und unterschiedlichen Winkeln nach innen in Richtung der Schichtgrenze. Hier endeten sie überwiegend und in wenigen Fällen reichten sie ein kleines Stück in die innere Schicht hinein. Beim Fokussieren auf tiefergelegene Schichten wichen die radialen Strukturen in entgegengesetzter Richtung des Uhrzeigersinnes zur Seite. In Querschnitten aus oberen Stängelabschnitten waren die radialen Strukturen der Sekundärwand nicht immer erkennbar.

Die Herstellung von Semidünnschnitten von Stängelquerschnitten erbrachte mit der verwendeten Methode keine zusätzlichen Erkenntnisse, sondern die Zellwände erschienen vollständig homogen. Die typische Zweiteilung war hier nicht erkennbar (Abb. 5 E).

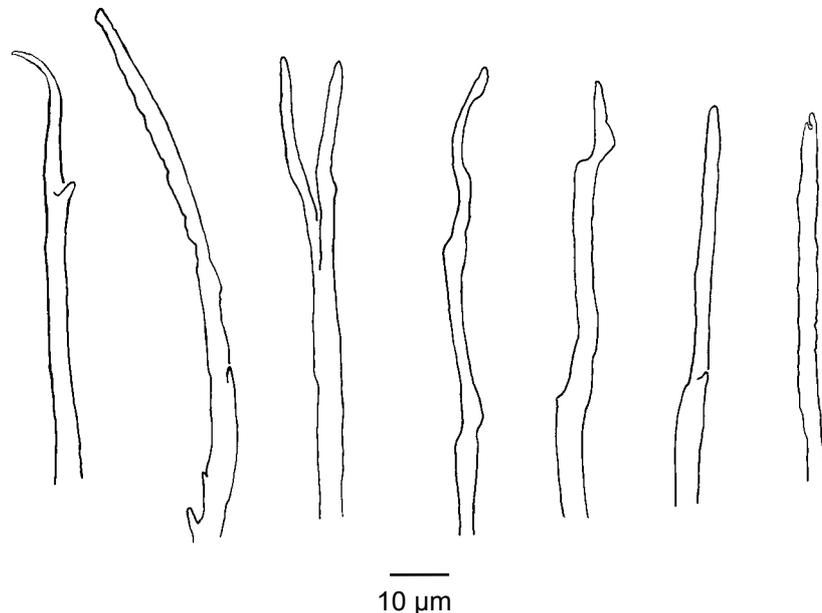


**Abb. 19:** Sekundärwandstruktur der Fasern von *G. diversifolia* im Querschnitt. (A) Lamellenstruktur (→) der Sekundärwand mit Tüpfel (\*), (B) Sekundärwandschichtung mit deutlicher Schichtgrenze ( $\leftrightarrow$ ) und radialen Strukturen (→), (C) Ablösung der inneren Sekundärwand, (D) unterschiedliche Schichtenstruktur: innere Sekundärwand homogener als die äußere, (E) mikroskopische Aufnahme und Zeichnung einer Faserzelle. (A,B) Querschnitt, Färbung mit Kongorot und anschließende Quellung in Cuoxam; (D) Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der zwei Sekundärwandschichten; (C, E) Kongorotfärbung, Schwarzweiß-Aufnahme. (S<sub>1</sub>) Äußere Sekundärwandschicht, (S<sub>2</sub>) innere Sekundärwandschicht, (\*) Tüpfel.

#### 4.4 Morphologie der sekundären Phloemfasern (Sekundärfasern)

Die Oberfläche der Sekundärfasern zeigte sich bei mikroskopischer Betrachtung strukturlos und homogen. Die Behandlung mit Cuoxam, einem starken Quellungsmittel, bewirkte nur eine sehr geringe Quellung, und führte nicht zu lichtmikroskopisch sichtbaren Veränderungen der Oberfläche. Diese verminderte Quellfähigkeit und die deutliche Rotfärbung der gesamten Fasern und ihrer Querschnitte bei der durchgeführten Simultanfärbung mit Astrablau und Safranin, zeigten eine Lignifizierung an.

Die Sekundärfasern wiesen die für Fasern typische große Länge im Verhältnis zum Durchmesser auf. Der Faserdurchmesser war immer zur Mitte hin am größten, selten jedoch genau in der Fasermittte. Die Sekundärfasern endeten zu beiden Seiten mit mehr oder weniger stark abnehmendem Durchmesser in einer Spitze, deren Form vielgestaltig war (Abb. 20). Die Enden waren sehr spitz, stumpf oder wiesen eine Gabelung mit zwei Spitzen auf. Die Spitzenumrisse verliefen sehr gerade und eben oder zeigten Ungleichmäßigkeiten durch Ausbuchtungen und kleine seitliche Verzweigungen.

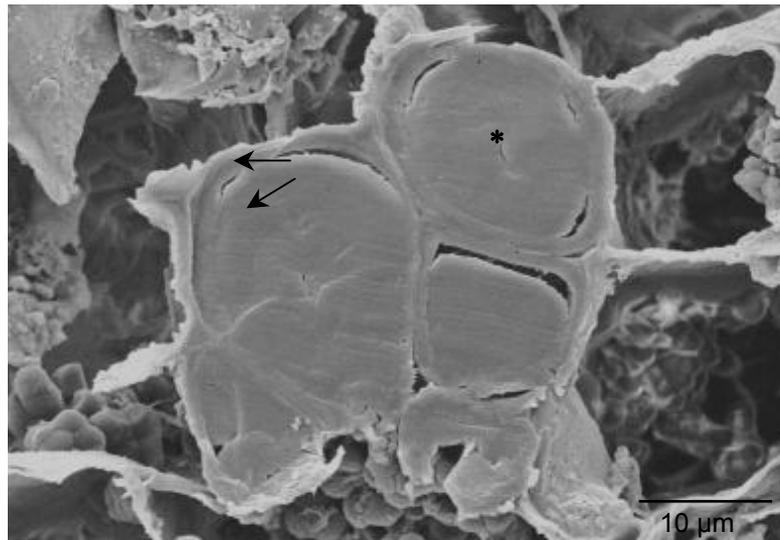


**Abb. 20:** Vielgestaltigkeit der Sekundärfaserspitzen, mit dem Zeichentubus erstellte Zeichnung.

Im Stängelquerschnitt erschienen die Sekundärfasern drei- bis viereckig, polygonal, einzeln oder bildeten kleine Gruppen. Bei der Faserisolierung wurde deutlich, dass die Sekundärfasern in der Regel in kleinen Gruppen vorkamen, wobei sie in der Länge stark

versetzt aneinander lagen. Hierdurch erschien im Querschnitt die Anzahl der Fasern, die eine Gruppe bildeten, niedriger als es tatsächlich gegeben war.

Die Sekundärwand zeigte sich mikroskopisch bei fast vollständig gefülltem Lumen der Zellen zweischichtig (Abb. 21). Junge Zellen lagen dicht am Kambium und waren außer an ihrer Lage daran zu erkennen, dass das Lumen im Verhältnis zu älteren Zellen recht groß war.



**Abb. 21:** Querschnitt der Sekundärfasern von *G. diversifolia*. Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von Sekundärfasern der Stängelbasis mit zweischichtiger Sekundärwand (→) und vollständig gefülltem Lumen (\*).

Die Messungen von 50 isolierten Sekundärfasern (Tab. 5) ergaben eine durchschnittliche Länge von 2,52 mm (2,36 mm – 2,69 mm). Die kürzeste Faser hatte eine Länge von 1,13 mm, die Längste war 4,08 mm lang.

Für den Faserdurchmesser ergab sich ein Mittelwert von 25 µm (24 µm - 26 µm). Der Maximalwert betrug 35 µm, der Minimumwert 19 µm. Zwischen Länge und Durchmesser war keine Korrelation nachweisbar.

**Tab. 5:** Mikroskopische Messergebnisse der Länge und des Durchmessers von Sekundärfasern,  $\bar{x}$  = Mittelwert, K = Konfidenzintervall, Min = kürzeste Faser, Max = längste Faser, n = 50

	Länge [mm]	Durchmesser [ $\mu\text{m}$ ]
<b>Min</b>	1,13	19
<b>Max</b>	4,08	35
$\bar{x}$	2,52	25
<b>K</b>	2,36-2,69	24-26

## 4.5 Nutzungsrelevante Primärfaser-Charakteristika

### 4.5.1 Faserlänge

Der Vergleich der Faserlängenverteilungen (Abb. 22) zeigte folgende Charakteristika:

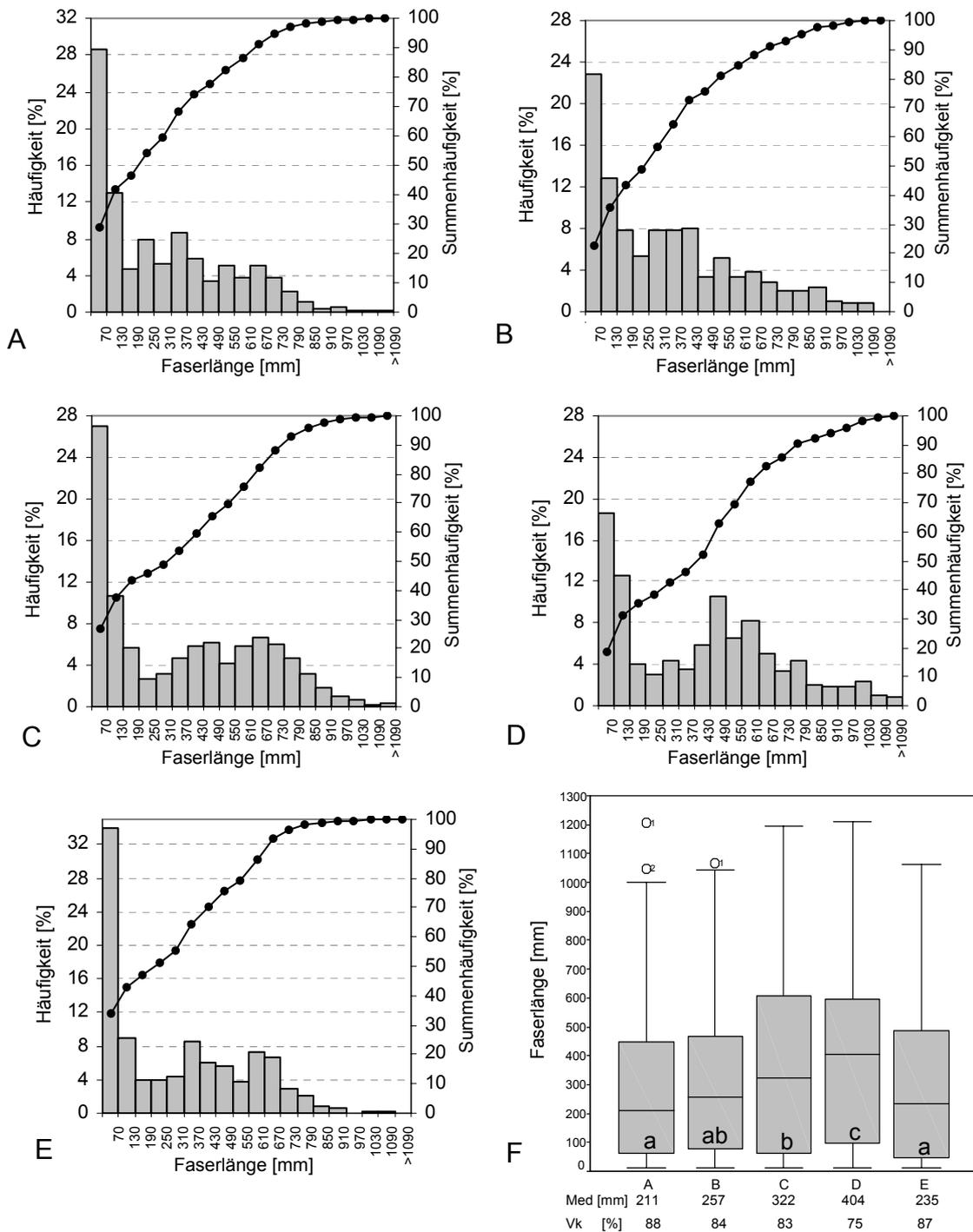
- Die Variabilität der Faserlänge war sehr groß (Variationskoeffizient 75% – 88%, Abb. 22 F).
- Die Häufigkeiten der Faserlängen stellten rechtsschiefe Verteilungen dar. 1. und 3. Quartil (bzw. kleinster und größter Messwert) hatten verschieden große Abstände zum Median (Abb. 22 F).
- Die größten Klassenhäufigkeiten waren im Bereich der kürzeren Fasern bis 130 mm (Abb. 22 A - D) bzw. bis 70 mm (Abb. 22 E) vorhanden. Dies gab auch der steile Verlauf der Summenhäufigkeitskurve in diesem Bereich wieder.
- Im mittleren Bereich waren die Häufigkeiten deutlich niedriger als zu Beginn der Verteilung.
- Zu den extrem langen Fasern hin waren die Klassen nicht besetzt oder zeigten sehr geringe Häufigkeiten. Hier verlief die Summenhäufigkeitskurve besonders flach und hatte fast die 100% erreicht. Es wurden maximale Faserlängen von 1061 mm, 1067 mm, 1196 mm, 1205 mm und 1212 mm festgestellt.

Aus dem Boxplot (Abb. 22 F) wurde die Verschiedenheit der Mediane (211 - 404 mm) deutlich. Die ersten 25% der Messwerte (1. Quartil) befanden sich im kurzen Längenbereich. Im Gegensatz dazu war der Abstand zwischen 75% und 100% (3. – 4. Quartil) sehr groß. Hier streuten die Werte sehr stark. Probe A, B und E ähnelten sich stark in der Faserlängenverteilung (Abb. 22 F). Die mittleren 50% der Werte (1. – 3. Quartil) lagen in einem vergleichbar engen Bereich, während bei den Proben C und D eine größere Streuung gegeben war.

Der Kurzfaserteil ( $\leq 40$  mm) betrug 12,8% (A), 9,8% (B), 14,8% (C), 10,2% (D) und 21,2% (E). Der Faseranteil von 41 - 80 mm lag mit 19,4%, 16,6%, 14,4%, 10,6% und 15,0% für alle untersuchten Pflanzen unter 20% (Tab. 6).

**Tab. 6:** Prozentuale Faserlängenanteile der Faserproben A – E (Nr. 92, Nr. 94, Nr. 98, Nr. 101, Nr. 129)

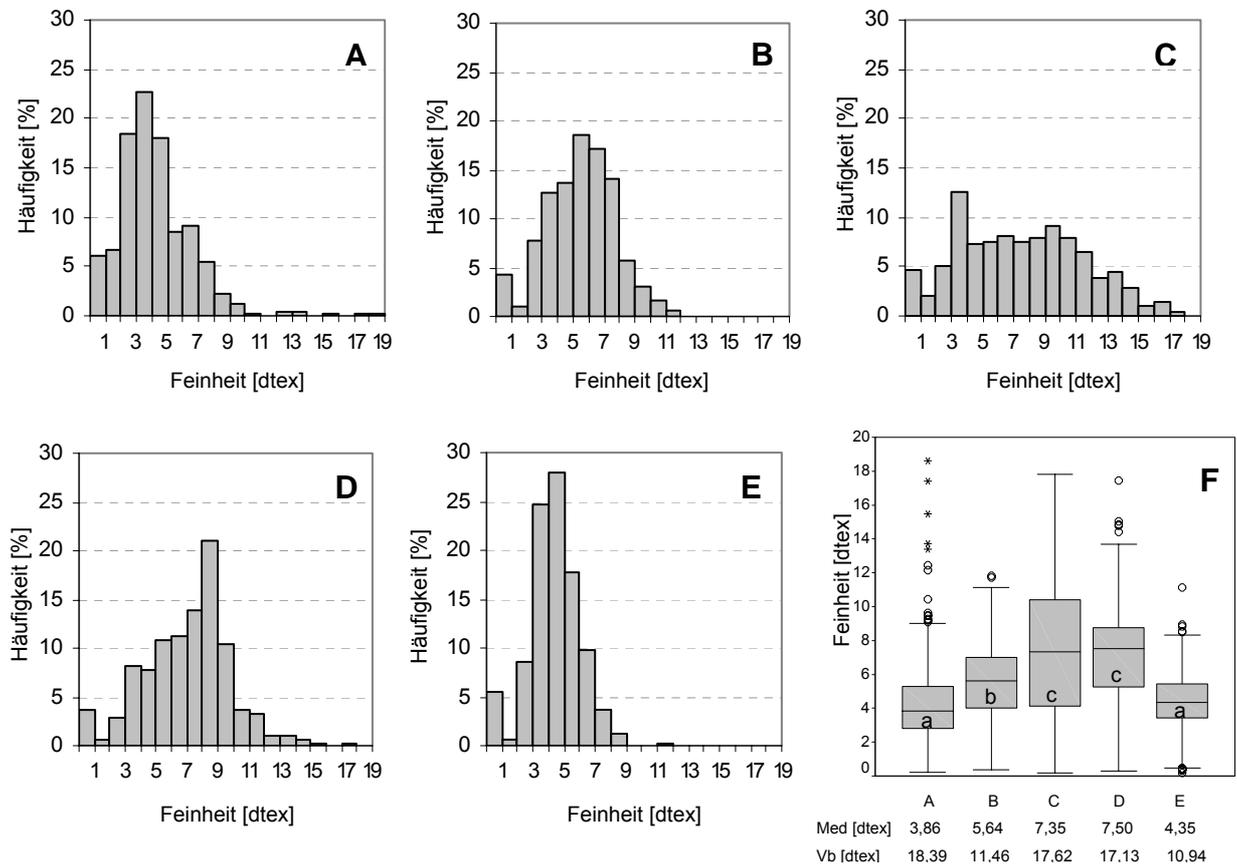
Länge [mm]	A	B	C	D	E
10 - 15	1,0	0,8	1,0	0,4	1,6
16 - 25	4,2	3,0	4,2	3,8	7,8
26 - 40	7,6	6,0	9,6	6,0	11,8
41 - 80	19,4	16,6	14,4	10,6	15,0



**Abb. 22:** (A - E) Histogramme der Faserlängenhäufigkeitsverteilung mit Kurve der Summenhäufigkeit von fünf Proben (A = Nr. 92, B = Nr. 94, C = Nr. 98, D = Nr. 101, E = Nr.129) (Abzisse mit Klassengrenzen) und (F) Box- und Whiskerplot der Faserlängen mit Darstellung des Medians (Med, Linie in der Box), der Variationsbreite (untere und obere Querlinie), des 1. und 3. Quartils (untere und obere Boxgrenze), Box = Interquartilabstand: mittlere 50% der Fälle; Vk = Variationskoeffizient. Probenahme Anfang Oktober 2001 (mittels Randomisierung und Auswahl eines Stängels mittlerer Länge), Entnahme 10 cm über der Bodenoberfläche und Entfernung der oberen 5 cm der Sprossspitze. Markierung der Stängelmitte, Dekortikation (1h Kochen in Leitungswasser, Abziehen der Rinde mit den Fasern) und Degummierung (1h Kochen in 2% NaOH). Faserentnahme im Wasserbad von der Stängelmitte ausgehend (Faserisolierung II). Makroskopische Längenmessung erfolgte bei konstanten Klimabedingungen (23°C, 50% Luftfeuchte), n = 500. (F) O = Ausreißerwerte (mehr als 1,5 und weniger als 3 Boxlängen vom oberen Boxrand entfernt), gleiche Buchstaben in der Box kennzeichnen identische Messwertverteilungen (Bootstrap,  $\alpha = 0,05$ ).

### 4.5.2 Faserfeinheit

Die Faserfeinheit, der Quotient aus Masse und Länge einer Faser, zeigte die größten Häufigkeiten zur Mitte der Häufigkeitsverteilung hin (Abb. 23). Zu den geringen und besonders zu den größeren Feinheiten erfolgte eine Abnahme der Häufigkeiten.



**Abb. 23:** (A - E) Histogramme der Faserfeinheitsverteilung von fünf Proben (A = Nr. 92, B = Nr. 94, C = Nr. 98, D = Nr. 101, E = Nr.129) (Abzisse mit Klassengrenzen) und (F) Box- und Whiskerplot der Faserfeinheit mit Darstellung des Medians (Med) und der Variationsbreite (Vb) (Erklärung s. Beschriftung Abb. 22, Proben mit Abb. 22 identisch). Direkt nach der Längenmessung wurde die Masse jeder Faser bestimmt. Die Feinheit ergab sich rechnerisch aus Masse und Länge (Quotient). (F) ○ = Ausreißerwerte (mehr als 1,5 und weniger als 3 Boxlängen vom oberen Boxrand entfernt), \* = Extremwerte (mehr als drei Boxlängen vom oberen Boxrand entfernt), gleiche Buchstaben in der Box kennzeichnen identische Messwertverteilungen (Bootstrap,  $\alpha = 0,05$ ).

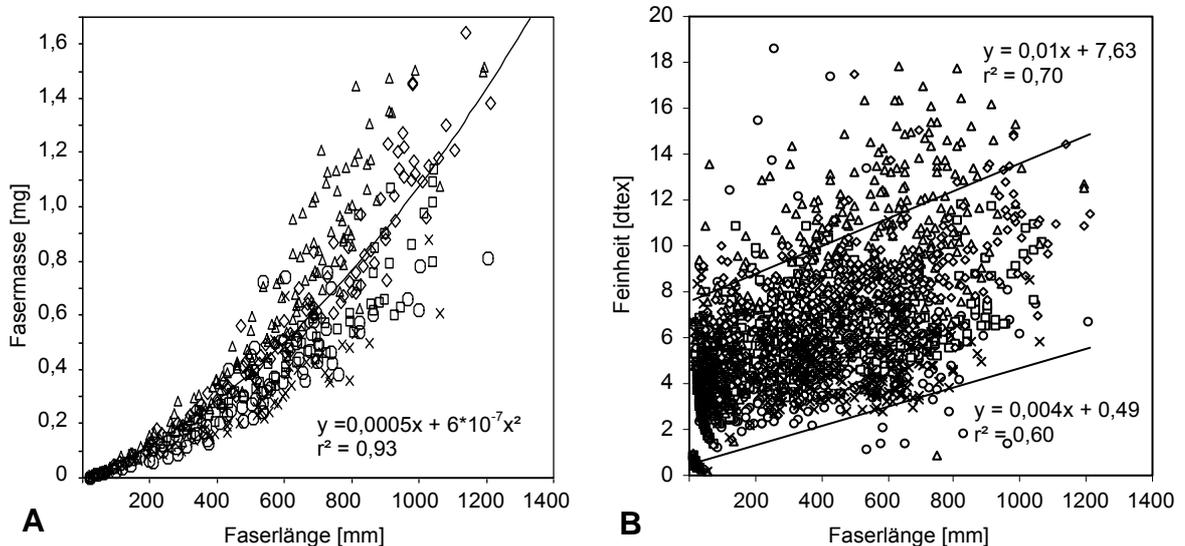
Die Variationsbreite (Vb) der Feinheiten war bei den Stichproben A (18,4 dtex), C (17,6 dtex) und D (17,1 dtex) groß. Hier traten Extremwerte (Ausreißer) mit großen Feinheiten auf. Bei Probe A entstand diese Variationsbreite durch eine geringe Anzahl von Werten (Abb. 23 F).

Bei den Proben B und E lagen die Feinheiten in einem engen Bereich (11,5 dtex und 10,9 dtex). Hier fehlten die extrem hohen Feinheitswerte und die Variationsbreite war deutlich geringer als bei den erstgenannten Stichproben (Abb. 23 F).

Die Probe C (Abb. 23 C) zeigte als Besonderheit eine gleichmäßigere Verteilung der Häufigkeiten. Es wurden in einer Klasse maximal 6,8% der gesamten Häufigkeit erreicht. Die mittleren 50% der Werte waren weit gestreut (1. und 3. Quartil). Bei den anderen Stichproben wurden maximale Häufigkeiten von 12,2% (A), 10,4% (B), 12,0% (D) und 15,0% (E) festgestellt. Die Häufigkeiten variierten stärker und der Interquartilabstand war geringer. Die mittleren 50% der Werte (1. – 3. Quartil) lagen bei A zwischen 2,8 dtex – 5,3 dtex, bei B zwischen 4 dtex – 7 dtex, bei C zwischen 4,1 dtex – 10,4 dtex, bei D zwischen 5,3 dtex – 8,8 dtex und bei E zwischen 3,5 dtex – 5,4 dtex.

Die Mediane (A - E) betragen 3,86 dtex, 5,64 dtex, 7,35 dtex, 7,50 dtex und 4,35 dtex. Die Mittelwerte (4,22 dtex, 5,51 dtex, 7,52 dtex, 7,04 dtex und 4,39 dtex) unterschieden sich geringfügig von den Medianen.

Der Zusammenhang von Faserlänge und Fasermasse ließ sich nach der durchgeführten Schätzung der am besten angepassten Regressionskurve durch eine Potenzfunktion darstellen (Abb. 24 A). Die Fasermasse stieg mit zunehmender Faserlänge stärker an als die Länge. Bei kurzen Fasern war der Zuwachs an Masse geringer.

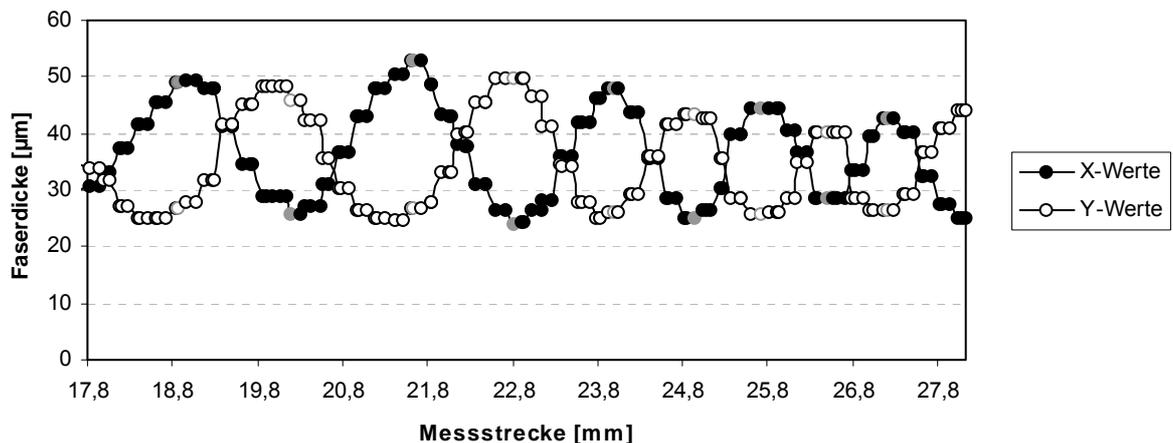


**Abb. 24:** Zusammenhang zwischen (A) Faserlänge und Fasermasse und (B) Faserlänge und Feinheit. (A) Regressionskurve, Fasermasse in der Klassengröße von 0,01 mg, Faserlängen als Mittelwerte bzw. Einzeldaten bei Häufigkeiten < 3, (B) geschätzte Grenzfunktionen anhand der Minima und Maxima der Feinheiten bei Längenklassen von 60 mm. (A, B) Mit Abb. 22 und Abb. 23 identische Stichproben (○ = Nr. 92, □ = Nr. 94, △ = Nr. 98, ◇ = Nr. 101, × = Nr. 129), n = 2500.

Die Variabilität der Feinheit innerhalb einer Faserlänge war groß (Abb. 24 B). Auf der Basis der geschätzten Grenzfunktionen ergaben sich für eine Faserlänge von 100 mm, 500 mm und 1000 mm Feinheiten von 0,89 dtex – 8,83 dtex, 2,49 dtex – 12,63 dtex und 4,49 dtex – 17,63 dtex. Der Anstieg der Masse mit der Faserlänge zeigte sich indirekt durch mit der Länge zunehmende Feinheitswerte.

### 4.5.3 Faserdicke

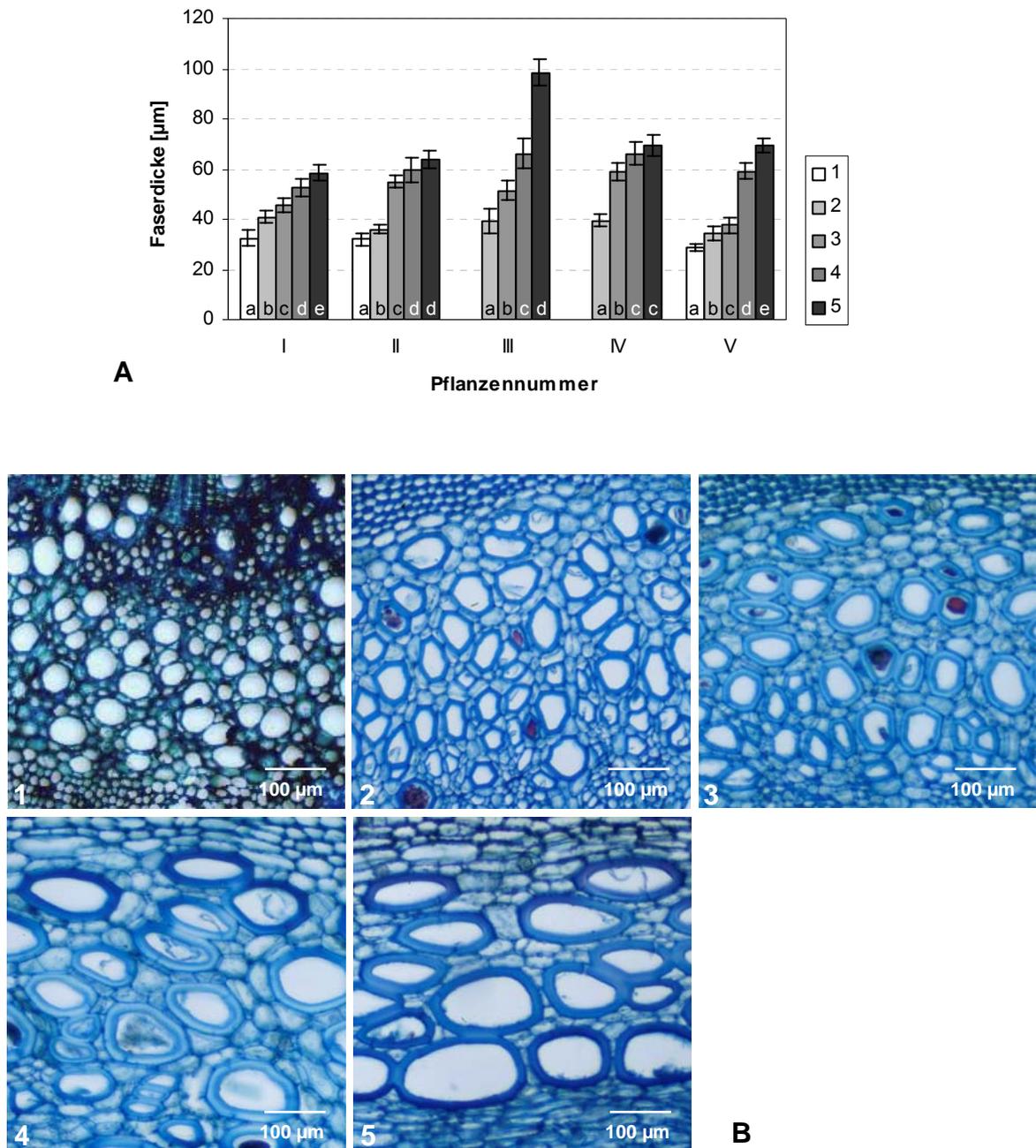
Aufgrund der bandförmigen Fasergestalt wurde für den Querschnitt die Fläche einer Ellipse verwendet. Die graphische Darstellung der Lasermikrometerwerte zeigte, dass ein Maximum der X-Werte (große Ellipsenachse) einem Minimum der Y-Werte (kleine Ellipsenachse) gegenüber lag (Abb. 25). Ebenso war ein maximaler Y-Wert mit einem minimalen X-Wert gepaart. Die Maxima wurden für die Bestimmung der Faserdicke verwendet. Lag ein Maximum nicht ganz genau einem Minimum gegenüber, wurde der maximale Abstand zwischen X- und Y-Werten innerhalb des Intervalls zwischen zwei Schnittpunkten der X- und Y-Werte gewählt. Am gegenläufigen Wechsel der Position der Minima und Maxima der Lasermikrometerwerte wurden die Windungen der Faser um ihre Achse graphisch deutlich.



**Abb. 25:** Graphische Darstellung der Lasermikrometerwerte. Anhand der X- und Y- Werte für ein sich gegenüber liegendes Minimum – Maximum – Paar (22 pro Faser) wurde die Ellipsenfläche (Minimum = kleine Halbachse, Maximum = große Halbachse, graue Symbole) der Fasern berechnet. Die Werte der großen Halbachse (Maxima) wurden gemittelt und ergaben die mittlere Faserdicke. Lag ein Maximum nicht ganz genau einem Minimum gegenüber, wurde der maximale Abstand zwischen X- und Y-Werten innerhalb des Intervalls zwischen zwei Schnittpunkten der X- und Y-Werte gewählt.

Die Faserdicken nahmen im Stängelverlauf von der Stängelbasis (**5**) bis zur Stängelspitze (**1**) ab, wobei Unterschiede zwischen Fasern der Abschnitte **4** und **5** nicht immer statistisch signifikant waren (Abb. 26 A). Die Spanne der Mittelwerte der Faserdicken für die verschiedenen Stängelabschnitte zeigt Tab. 7.

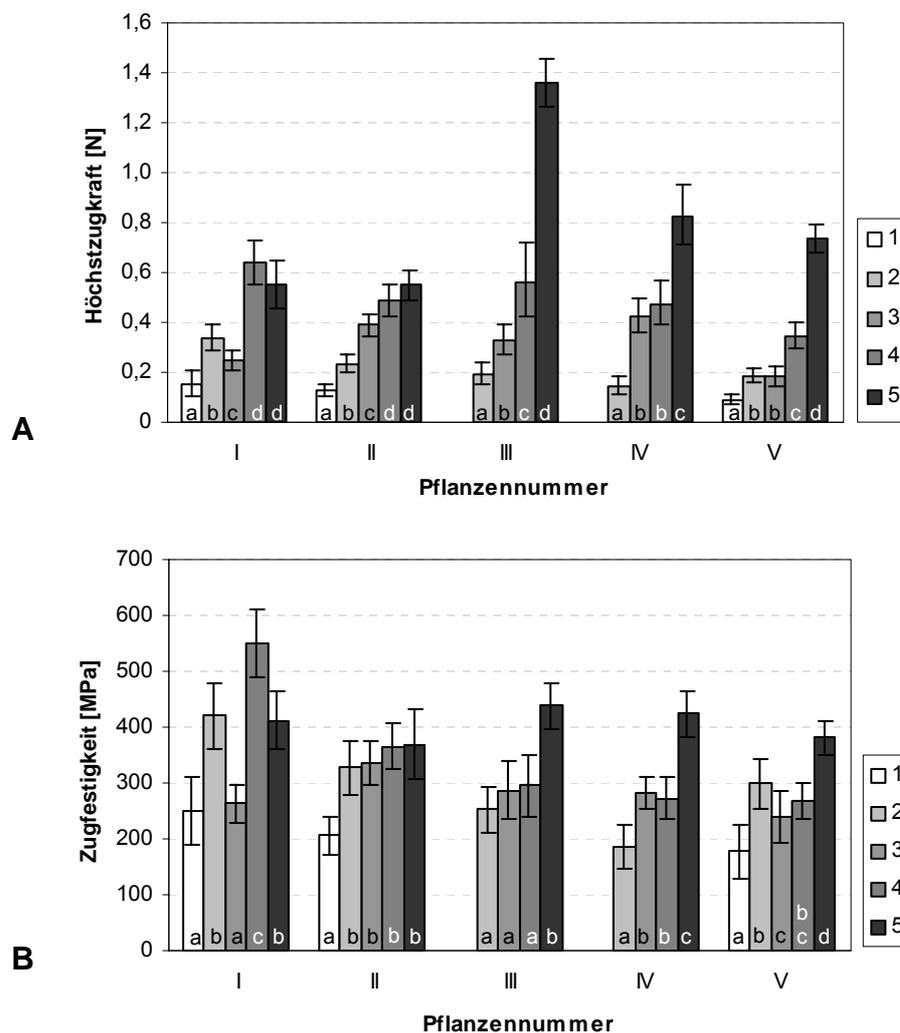
Die Zunahme der Faserdicken gaben auch Ausschnitte von Stängelquerschnitten wieder (Abb. 26 B). Hier wurde deutlich, dass im Gewebeverband eines Querschnittes das Lumen groß war. Die Fasern wirkten eher rundlich. Mit der Extraktion und der Trocknung kollabierte das Lumen, und es entstand die Bandform der Fasern.



**Abb. 26:** (A) Faserdicken der verschiedenen Stängelabschnitte (1 – 5) von fünf Pflanzenstängeln (I = Nr. 106, II = Nr. 107, III = Nr. 114, IV = Nr. 118, V = Nr. 134) und (B) Ausschnitte von Querschnitten der Mitte der Stängelabschnitte (1 – 5) eines Pflanzenstängels. (A, B) Probenahme Anfang Oktober 2000 (mittels Randomisierung und Auswahl eines Stängels mittlerer Länge) von 1999 ausgesetzten Pflanzen. Entnahme 10 cm über der Bodenoberfläche und Entfernung der oberen 5 cm der Sprossspitze. (A) Die Stängel wurden in 5 gleichlange Abschnitte unterteilt, dekortiert (1h Kochen in Leitungswasser, schonendes Abziehen der Rinde mit den Fasern) und degummiert (1h Kochen in 2% NaOH). Faserentnahme im Wasserbad von der Mitte ausgehend (Faserisolierung III). Die Dickenmessung erfolgte über eine Länge von 50 mm unter konstanten Klimabedingungen (23°C, 50% Luftfeuchte) am Zugprüfstand mit einem zweidimensionalen Lasermikrometer. Die Maxima und Minima (22 Werte pro Faser) zur Berechnung der Ellipsenfläche wurden graphisch bestimmt (Abb. 25). Die Werte der großen Halbachse wurden für die Faserdicke ausgewertet. Mittelwerte mit Konfidenzintervallen (vertikale Linien),  $n = 20$ , gleiche Buchstaben kennzeichnen identische Messwertverteilungen (ANOVA,  $\alpha = 0,05$ ). Bei III und IV keine Werte für den Abschnitt 1. (B) Astrablau-Safranin Simultanfärbung; 1 = Stängelspitze, 5 = Stängelbasis.

#### 4.5.4 Höchstzugkraft und Zugfestigkeit

Die Höchstzugkraft nahm wie die Faserdicke von der Basis ausgehend ab (Abb. 27 A). Somit nahm mit der Faserdicke die Stabilität gegen Zug zu. Abweichungen traten bei Probe I auf, indem hier bei Fasern des Stängelabschnittes **2** höhere Werte als bei Abschnitt **3** festgestellt wurden. Signifikante Unterschiede waren nicht zwischen allen Stängelabschnitten gegeben (I und II **4** und **5**, IV **3** und **4**, V **2** und **3**). Die Spanne der Mittelwerte der Höchstzugkraft für die Stängelabschnitte sind in Tab. 7 aufgeführt.



**Abb. 27:** (A) Höchstzugkraft und (B) Zugfestigkeit der Fasern der verschiedenen Stängelabschnitte (1 – 5) von fünf Pflanzenstängeln (I = Nr. 106, II = Nr. 107, III = Nr. 114, IV = Nr. 118, V = Nr. 134). (A, B) Probenahme und Faserisolierung s. Abb. 26. Die Zugprüfung erfolgte am Zugprüfstand im Anschluss an die Dickenmessung (konstante Klimabedingungen, 23°C, 50% Luftfeuchte, Einspannlänge 50 mm). Zur Berechnung der Zugfestigkeit wurde die Ellipsenquerschnittsfläche (Abb. 25) herangezogen. Mittelwerte mit Konfidenzintervallen (vertikale Linien),  $n = 20$  (134-1  $n = 13$ ), gleiche Buchstaben kennzeichnen identische Messwertverteilungen (ANOVA,  $\alpha = 0,05$ ). Bei Probe III und IV keine Werte für den Abschnitt 1; 1 = Stängelspitze, 5 = Stängelbasis.

Die Zugfestigkeit stellt das Verhältnis der Höchstzugkraft zur Querschnittsfläche (Ellipsenfläche) der Faser dar. Die Unterschiede der Zugfestigkeit in den verschiedenen Stängelabschnitten waren nicht so ausgeprägt wie es bei anderen Faserparametern der Fall war (Abb. 27 B). Die Zugfestigkeit der Fasern der Stängelspitze (**1**) war am geringsten, jedoch bei Probe I nicht signifikant verschieden vom Abschnitt **3**. Im mittleren Stängelbereich (**2 – 4**) lagen die Werte bei drei Pflanzenstängeln (II, III, V) so dicht beieinander, dass statistisch kein Unterschied nachweisbar war. Die Fasern der Stängelbasis hatten, im Vergleich zu den übrigen Stängelabschnitten, bei vier von fünf untersuchten Pflanzen die höchsten Werte. Die Spanne der Mittelwerte der Zugfestigkeit für die verschiedenen Stängelabschnitte zeigt Tab. 7.

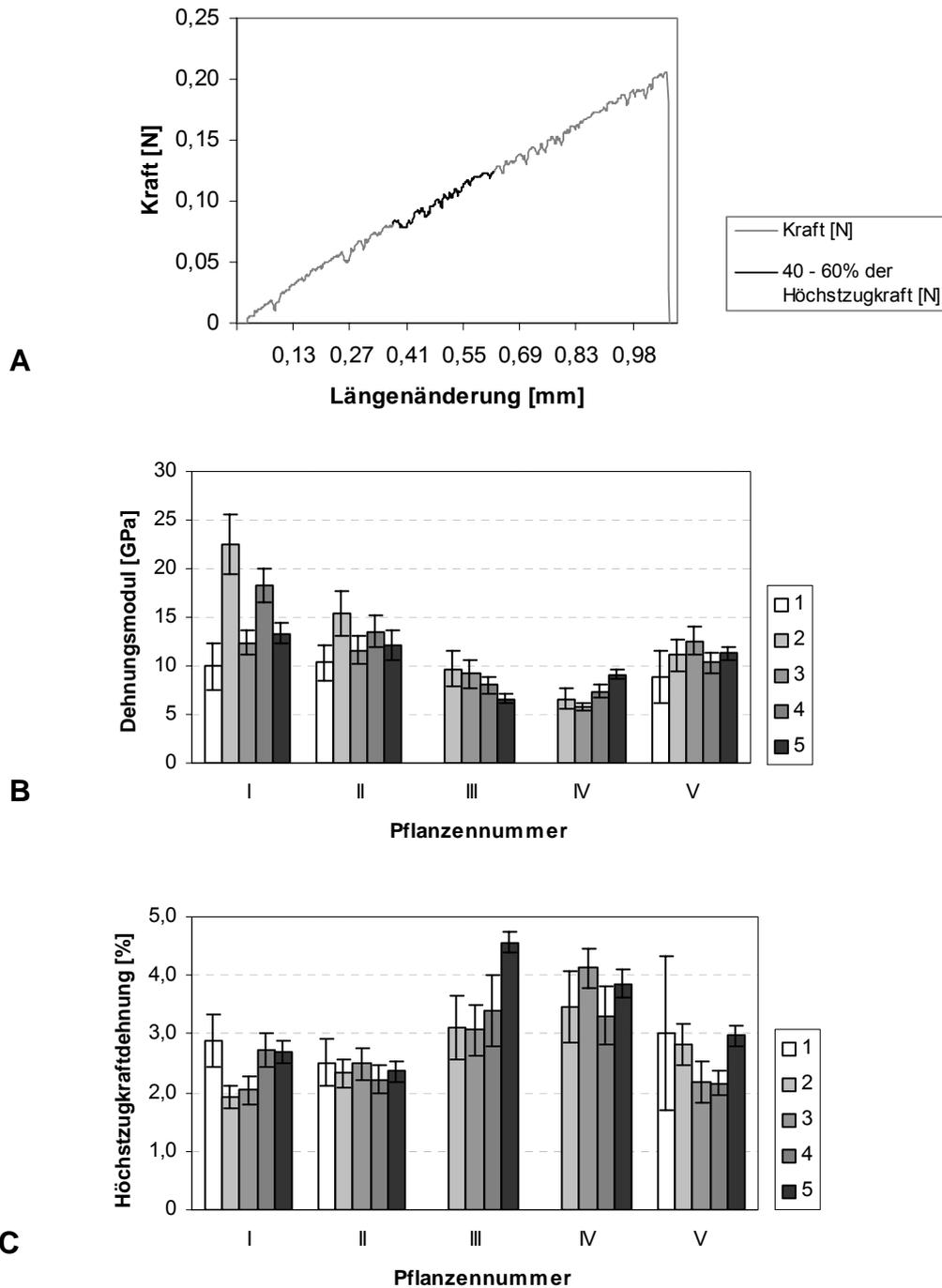
#### **4.5.5 Dehnungsmodul**

Für die Bestimmung des Dehnungsmoduls wird aus der Kraft-Längenänderungs-Kurve der lineare Bereich zwischen 40% und 60% der Höchstzugkraft verwendet. Auch bei den vorliegenden bandförmigen und gedrehten Fasern verlief der zur Berechnung der Steigung erforderliche Kurvenabschnitt linear (Abb. 28 A).

Der Dehnungsmodul kennzeichnet den Widerstand der Faser gegen die Längenänderung. Es wurde deutlich, dass häufig keine signifikanten Unterschiede zu benachbarten Stängelabschnitten auftraten (Abb. 28 B). Die Fasern der Stängelspitze (**1**) der Proben I, II und V zeigten die geringsten Werte und damit die höchste Dehnfähigkeit. Es wurden jedoch keine signifikanten Unterschiede zu allen anderen Stängelabschnitten festgestellt. Die Fasern der übrigen Stängelabschnitte verhielten sich ungleichmäßig. Die Spanne der fünf Mittelwerte des Dehnungsmoduls sind in Tab. 7 aufgeführt.

#### **4.5.6 Höchstzugkraftdehnung**

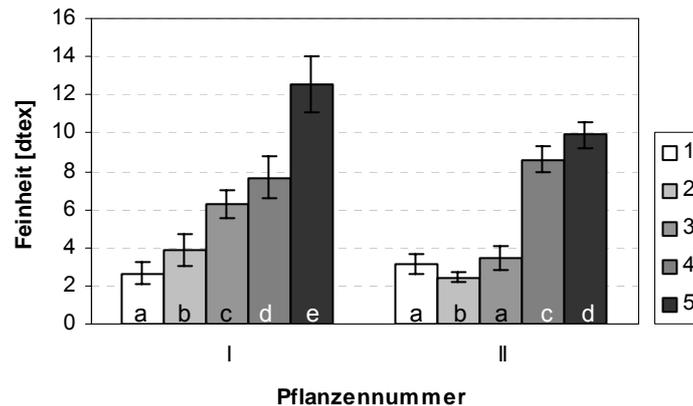
Die Höchstzugkraftdehnung gibt die erreichte Längenänderung [%] in Bezug zur Ausgangslänge der Faser an. Sie war in den Stängelabschnitten nicht signifikant verschieden (z. B. Probe II) bzw. war heterogen (Abb. 28 C). Die Spanne der fünf Mittelwerte für die verschiedenen Stängelabschnitte sind in Tab. 7 zusammenfassend dargestellt.



**Abb. 28:** (A) Kraft-Längenänderungs-Kurve zur Darstellung des Dehnungsmoduls anhand der gemessenen Werte einer Faser (Stängelabschnitt 3), (B) Dehnungsmodul und (C) Höchstzugkraftdehnung der Fasern der verschiedenen Stängelabschnitte (1 – 5) von 5 Pflanzenstängeln (I = Nr. 106, II = Nr. 107, III = Nr. 114, IV = Nr. 118, V = Nr. 134). (B) Der Dehnungsmodul wurde aus dem Anstieg der Kraft-Längenänderungskurve zwischen 40 und 60% der Höchstzugkraft (A) berechnet. Probenahme und Faserisolierung s. Abb. 26. Werte ermittelt im Rahmen der Zugprüfung (unter konstanten Klimabedingungen, 23°C, 50% Luftfeuchte, Einspannlänge 50 mm). Mittelwerte mit Konfidenzintervallen (vertikale Linien,  $\alpha = 0,05$ ), n (I-1) = 8, n (I-2), (I-3), (I-4) = 19, n (I-5) = 20, n (II-1) = 11, n (II-2) = 17, n (II-3), (II-4), (II-5) = 20, n (III-2) = 16, n (III-3), (III-4) = 19, n (III-5) = 20, n (IV-2) = 13, n (IV-3), (IV-4), (IV-5) = 20, n (V-1) = 4, n (V-2) = 19, n (V-3) = 18, n (V-4), (V-5) = 20. Bei Probe III und IV keine Werte für den Stängelabschnitt 1; 1 = Stängelspitze, 5 = Stängelbasis.

#### 4.5.7 Feinheitsbezogene Höchstzugkraft

Die Bestimmung der Faserfeinheit der beiden Proben I und II zeigte eine Zunahme der Feinheitswerte von der Stängelspitze zur Stängelbasis (Abb. 29). Benachbarte Stängelabschnitte wiesen nicht immer signifikante Unterschiede auf. Die Spanne der fünf Mittelwerte für die verschiedenen Stängelabschnitte zeigt Tab. 7.



**Abb. 29:** Faserfeinheit in den verschiedenen Stängelabschnitten (1 – 5) anhand von zwei Pflanzenstängeln (I = Nr. 118, II = Nr. 134). Die Berechnung erfolgte anhand der gravimetrisch bestimmten Masse pro Faser bezogen auf die Faserlänge (konstante Klimabedingungen, 23°C, 50% Luftfeuchte). Methode Faserisolierung III (s. Abb. 26), Mittelwerte mit Konfidenzintervallen (vertikale Linien),  $n = 20$ , gleiche Buchstaben kennzeichnen identische Messwertverteilungen (ANOVA,  $\alpha = 0,05$ ); 1 = Stängelspitze, 5 = Stängelbasis.

Die Feinheitsbezogene Höchstzugkraft wurde mit Hilfe der vorliegenden Werte für Feinheit und Höchstzugkraft berechnet und ist in Tab. 7 für die verschiedenen Stängelabschnitte wiedergegeben. Die Fasern der Stängelspitze (1) ergaben die geringsten Feinheitsbezogenen Höchstzugkräfte, während die Werte der übrigen Stängelabschnitte innerhalb eines Stängelabschnittes unterschiedlich waren.

**Tab. 7:** Faserdicke und im Rahmen der Zugprüfung gewonnene Daten für die verschiedenen Stängelabschnitte (1 – 5). Spanne der Mittelwerte aus 5 Proben (Abschnitt 2 – 5) bzw. 3 Proben (Abschnitt 1). Feinheit und Feinheitsbezogene Höchstzugkraft 2 Proben (Abschnitt 1 eine Probe), 1 = Stängelspitze, 5 = Stängelbasis

	Stängelabschnitt				
	1	2	3	4	5
Faserdicke [ $\mu\text{m}$ ]	29 – 32	34 – 41	38 – 59	53 – 66	58 – 98
Höchstzugkraft [N]	0,09 – 0,15	0,15 – 0,33	0,18 – 0,42	0,35 – 0,65	0,55 – 1,36
Zugfestigkeit [MPa]	178 – 251	185 – 420	239 – 336	268 – 550	369 – 438
Dehnungsmodul [GPa]	8,9 – 10,3	6,6 – 22,5	5,8 – 12,5	7,4 – 18,3	6,6 – 13,4
Höchstzugkraftdehnung [%]	2,5 – 3,0	1,9 – 3,5	2,0 – 4,1	2,2 – 3,4	2,4 – 4,6
Feinheit [dtex]	2,7 – 3,1	2,4 – 3,8	3,5 – 6,2	7,7 – 8,6	9,9 – 12,5
Feinheitsbezogene Höchstzugkraft [cN/tex]	29	39, 78	53, 69	41, 63	61, 74

## 5 Diskussion

Die vorliegenden Untersuchungen ermöglichen eine erste Einschätzung zur Nutzung der Fasern von *G. diversifolia*. Stichproben wurden über das Verfahren der Randomisierung ausgewählt. Zusätzlich zur festgestellten hohen Variabilität der Merkmale innerhalb eines Stängels, ist von Variabilität zwischen Stängeln einer Pflanze, zwischen mehreren genetisch identischen Pflanzen, sowie innerhalb einer Population auszugehen. Für die Untersuchungen wurden wenige Stichproben mit einer umfangreichen Erfassung der Faserqualitäten verwendet. Dies wurde der Alternative, viele Stichproben hinsichtlich weniger Merkmale zu untersuchen, vorgezogen. Weiterhin sind die Ergebnisse von einem Standort mit den dortigen Umweltbedingungen gewonnen worden.

Zur Bestimmung der Fasermasse wurden 20 Pflanzen herangezogen. Ihre Zahl reduzierte sich durch den ersten Winter im Freiland auf 14 und nach einem weiteren Winter auf 13.

Die auf dem Versuchsfeld angebauten Pflanzen trieben mit Mitte Mai bis Anfang Juni spät aus. Die Vegetationsperiode endete Anfang Oktober und war damit kürzer als bei nepalesischen Pflanzen (April – November). Ob dies die untersuchten Faserparameter beeinflusst hat und für Differenzen zu den Literaturdaten verantwortlich ist, kann nicht beurteilt werden.

### 5.1 Nutzungsrelevante Aspekte der Stängelanatomie von *G. diversifolia*

Kenntnisse über die Stängelanatomie haben neben ihrer allgemeinen botanischen Relevanz Bedeutung besonders darin, dass sie erste für eine kommerzielle Fasernutzung wichtige Informationen geben.

Die Primärfasern von *G. diversifolia* befinden sich wie die Fasern anderer Bastfaserpflanzen (z. B. Ramie und Flachs) im äußeren Bereich des Stängels (Kap. 4.1 Abb. 6 A). Besonders hinsichtlich der Fasergewinnung ist die Information über die Anordnung der Faserzellen bedeutend. Bei *G. diversifolia* liegen die Fasern, wie bei den beiden anderen als Faserpflanzen genutzten Urticaceae-Arten *Urtica dioica* L. (Fasernessel) und *Boehmeria nivea* (L.) GAUDICH. (Ramie), einzeln vor (Elementarfasern) und

nicht in Faserbündeln wie bei Flachs (*Linum usitatissimum* L.), Hanf (*Cannabis sativa* L.) und Jute (*Corchorus capsularis* L. und *C. olitorius* L.).

*G. diversifolia* zeigte einen ähnlichen Gewebeaufbau des Stängels wie Ramie. Die Faserzellen von *G. diversifolia* waren großlumig. Die Größe des Faserzelllumens stellte sich bei Ramie anhand von eigenen Stichproben (Kap. 4.1 Abb. 9 A - C) und der Literatur sehr unterschiedlich dar (SCHMIDT, 1921; RICHTER, 1928; LUNIAK 1949; HERZOG, 1955; BALLY, 1957; TOBLER, 1957; MAITI, 1973; RAY, 1975; CATLING und GRAYSON, 1998). Es kamen sowohl dünnwandige und weitleumige als auch dickwandige und englumige Faserzellen vor. Eine Ursache hierfür ist, dass Faserzellparameter von den Wachstumsbedingungen (Standort, Düngung) abhängig sind. So bewirkte nach TOBLER (1957) eine Überversorgung mit Stickstoff eine Zunahme der Faserzellquerschnitte bei gleichzeitiger Abnahme der Wanddicke, während Kalium zu einer Zunahme der Faserzellenanzahl führte ohne die Zellwanddicke zu beeinträchtigen. Zusätzlich können Sortenunterschiede an der Ausbildung der Faserzellen deutlich werden (KUNDU und SEN, 1960). Die von *G. diversifolia* untersuchten Stängelquerschnitte von Gewächshauspflanzen (Kap. 4.1 Abb. 6 B, Abb. 7 A), Feldpflanzen (Kap. 4.5.3 Abb. 26 B) und in Nepal am natürlichen Standort gewachsenen Pflanzen zeigten eine vergleichbare Lumen-Zellwand-Relation und nie ein stark eingegengtes Lumen, so dass davon ausgegangen werden kann, dass die untersuchten Faserquerschnitte mit großen Lumina typisch für die Art sind, wenn auch hier die Zellwanddicke durch äußere Einflüsse variieren kann.

Ein großes Lumen gibt den relativ dicken Fasern eine geringe Masse und damit eine geringe Dichte. Hierdurch bieten sie ein hohes Potential als Verstärkungsfasern für technische Zwecke (HANSELKA, 1998). Die großen Lumina haben bekleidungsphysiologische Relevanz, indem sie Wasser flüssig oder dampfförmig schnell aufnehmen und abgeben können.

Mit zunehmendem Stängelalter einer Pflanze setzt die Lignifizierung der Fasern, beginnend an der Stängelbasis, ein wie es auch bei *G. diversifolia* feststellbar war (Kap. 4.1 Abb. 7 B). Es handelt sich dabei um einen natürlichen Prozess, der bei typischer Weise nicht lignifizierten Fasern (z. B. Ramiefasern) mit zunehmender Stängelreife auftritt und wegen der nicht gewünschten damit verbundenen Fasereigenschaften als Überreife bezeichnet wird (KIRBY, 1963; JARMAN et al., 1978). Auch SHRESTHA (1998) merkte an,

dass die Qualität der Fasern von *G. diversifolia* mit dem Fortschreiten der generativen Phase abnahm. JARMAN et al. (1978) und ANGELINI et al. (2000) wiesen auf die Wahl des richtigen Zeitpunktes für die Stängelernte bei Ramie hin, da es mit zunehmender Lignifizierung auch schwieriger wurde, die Fasern zu gewinnen.

Inkrustation mit Lignin erhöht die mechanische Festigkeit und die Zellwand wird star-  
rer. Die Fähigkeit zur Feuchtigkeitsaufnahme und die Dehnbarkeit nehmen ab (BATRA,  
1985; BRETT und WALDRON, 1990). Hierdurch werden die Fasern für den textilen Be-  
reich hinsichtlich Verarbeitung (z. B. abnehmende Flexibilität und veränderte Fär-  
bungseigenschaften) und den Eigenschaften des textilen Gewebes, mit insbesondere den  
bekleidungsphysiologischen Funktionen (z. B. Feuchtigkeitsaufnahme und -durch-  
lässigkeit), ungünstig verändert. In geringem Maße mindert Lignifizierung den Wert für  
die Textilindustrie nicht, weil sie die Festigkeit erhöht (KEIJZER und METZ, 1992).

Im Stängel von *G. diversifolia* und *B. nivea* wurden mit dem sekundären Dickenwachs-  
tum Sekundärfasern gebildet. Sie waren nur in geringer Zahl vorhanden und daher für  
die Nutzung nicht von Bedeutung. Hanf und Jute dagegen bilden einen großen Anteil an  
Sekundärfasern, die in Bündeln auftreten. Bei Jute werden sie als technische Fasern  
isoliert und stellen den Hauptanteil der genutzten Fasern dar, während sie bei Hanf als  
Werg anfallen und von geringem Wert sind bzw. die Verarbeitung stören.

Für *G. diversifolia* gilt wie für *B. nivea* aufgrund der einzelnen Anordnung der Fasern  
im Stängel (Kap. 4.1 Abb. 6 B), dass sie vor ihrer Verarbeitung zu textilen Endproduk-  
ten degummiert werden müssen. Hierbei werden die Faserzellen durch mikrobiellen,  
enzymatischen oder chemischen Aufschluss aus dem Zellverband gelöst und Verunrei-  
nigungen (Gumsubstanzen) entfernt. Faserbündel, wie sie bei Flachs und Hanf vor-  
kommen, sind über einen mechanischen Aufschluss nach einer Röste weitgehend iso-  
lierbar. Eine Röste ist für Elementarfasern nicht sinnvoll. Versuche mit Ramie zeigten,  
dass das Gewebe in Einzelfasern zerfiel und sich mit anderen Gewebeteilen mischte  
(LUNIAK, 1949).

## 5.2 Fasermasse und Fasergehalt

Die untersuchten Stängel von *G. diversifolia* zeigten eine Abnahme der Fasermasse von der Basis zur Spitze (Kap. 4.2 Abb. 10 A). Dies stimmt mit den Untersuchungen von HERZOG (1898) an Flachs und von RABÉCHAULT (1951) an Ramie überein. BREDEMANN (1940a) kam bei Stängeln von Fasernesseln (*U. dioica*), die in fünf gleiche Abschnitte geteilt und dann als Mischproben aus 20 Stängeln ausgewertet wurden, gleichfalls zu dem Ergebnis der Fasermasseabnahme von der Basis bis zur Spitze.

Die Fasermasse wurde für die Stängelabschnitte gravimetrisch ermittelt. Sie wurde durch die Parameter Faseranzahl, Faserdurchmesser und Faserwandstärke beeinflusst. Wie die Untersuchungen zeigten, nahmen Faserdicke und Sekundärwanddicke von der Stängelbasis zur Stängelspitze ab (Kap. 4.5.3 Abb. 26). Die Faseranzahl wurde nicht bestimmt. Sie ist bei Bastfaserpflanzen an der Stängelbasis geringer als in der Stängelmitte (TAMMES, 1907; RABÉCHAULT, 1951; SCHEER-TRIEBEL et al., 1997), führte jedoch nicht zu geringeren Massen als in darüber liegenden Abschnitten.

Die unterschiedliche Faseranzahl wird mit der Periodizität des Vegetationskegels erklärt, die zu einer unterschiedlichen Ausprägung der Faserzellen führt (TAMMES, 1907; ULLRICH, 1950). Diese Erscheinung wird bei Pflanzen mit besonders langen Fasern, wie bei *G. diversifolia*, dadurch überlagert, dass Faserspitzen durch Interpositionswachstum in die benachbarten Stängelabschnitte ober- und unterhalb ihres Bildungsortes einwachsen.

Der prozentuale Fasergehalt zeigte in den vorliegenden Untersuchungen für *G. diversifolia* ein Maximum im dritten und vierten Fünftel des Stängels (von der Stängelspitze ausgehend) (Kap. 4.2 Abb. 10 B). RABÉCHAULT (1951) erzielte für Ramiestängel vergleichbare Ergebnisse. Hier wurde ebenso der höchste Fasergehalt in der Stängelmitte mit einer starken Abnahme zur Spitze und einem noch relativ hohen Fasergehalt in der Stängelbasis festgestellt. Zu demselben Ergebnis kamen KRAIS und BLITZ (1922) bei der Untersuchung von Hanf und einer Einteilung des Stängels in drei Abschnitte. BREDEMANN (1940b) bestätigte diese Ergebnisse für Hanf, kam aber für die Fasernessel zu einer anderen Faserverteilung, wobei hier eine Einteilung des Stängels in 5 Abschnitte gegeben war (BREDEMANN, 1940a). Der Fasergehalt stieg hier von der Basis bis zur Spitze an. ILLIES (1947) hingegen stellte im Rahmen von Untersuchungen an der

Fasernessel die höchsten Fasergehalte etwas unterhalb und in der Stängelmitte und eine Abnahme zur Stängelspitze fest. Dies entspricht den Ergebnissen für *G. diversifolia*.

Für Flachs beschrieb HERZOG (1898) den höchsten Fasergehalt etwas unterhalb der Stängelmitte. Dagegen ergab die Untersuchung von SCHEER-TRIEBEL et al. (1997), anhand der bildanalytischen Auswertung von Stängelquerschnitten dreier Abschnitte von Flachsstängeln, einen Anstieg des Fasergehaltes von der Basis bis zur Spitze.

Die der Literatur zu entnehmenden Untersuchungsergebnisse bezüglich des Fasergehaltes sind für Flachs und die Fasernessel widersprüchlich. Insbesondere für Ramie, die Fasernessel und Flachs wurde eine Übereinstimmung erwartet, da bei diesen Pflanzen die Primärfasern genutzt werden und Sekundärfasern nicht vorhanden (Flachs) oder in ihrer Anzahl bedeutungslos sind (Ramie, Fasernessel und *G. diversifolia*). Primärfasern werden im Vegetationskegel angelegt und sind vor der Bildung sekundärer Gewebe vollständig differenziert. Die übereinstimmenden Ergebnisse des höchsten Fasergehaltes in der Stängelmitte bei Hanf zeigen, dass die Anlage der Primärfasern bezüglich ihrer Masse relativ zum Stängel, unabhängig vom Sekundärfaseranteil, vergleichbar erfolgte.

Die auf dem Versuchsfeld kultivierten Pflanzen wurden während der Blüte geerntet. Zur Fruchtreife kamen sie hier durch einsetzende Fröste nicht. In Nepal erfolgt die Ernte mit beginnender Blüte bis zur Zeit der Fruchtreife (SHRESTHA, 1998). Die Ernte vor der Fruchtreife hat vermutlich keine bedeutenden Ertragsseinbußen zur Folge, denn SCHEER-TRIEBEL et al. (1997) stellten für 11 Flachssorten fest, dass der Faserertrag und der Fasergehalt mit dem Abschluss der vegetativen Phase fixiert sind. Zu demselben Ergebnis kam BREDEMANN (1940c) hinsichtlich des Fasergehaltes von Fasernesseln und verzeichnete lediglich einen geringen Zuwachs der Fasermasse mit zunehmender Dauer der Blühphase. Bei den hier zum Vergleich herangezogenen Bastfasern (Ramie, Flachs, Hanf, Fasernessel) handelt es sich um primäre Phloemfasern, deren Bildung und Entwicklung vergleichbar erfolgt. Es ist davon auszugehen, dass der Entwicklung ebenso übereinstimmende physiologische Regulationsprozesse zugrunde liegen. Zusätzlich sind für den Erntezeitpunkt Qualitätsverluste durch zunehmende Lignifizierung zu berücksichtigen. Daher empfiehlt RABÉCHAULT (1951) die Ernte von Ramie zum Zeitpunkt der Blüte.

Übereinstimmend mit RABÉCHAULT (1951) (Ramie) und MEDIAVILLA et al. (2001) (Hanf) ist der Abschnitt der Stängelspitze für die Ernte aufgrund geringer Fasergehalte und Unreife unbedeutend, während die mittlere Stängelpartie besonders wertvoll ist.

Beim Vergleich der folgenden Literaturdaten ist zu berücksichtigen, dass die Methoden des (chemischen) Aufschlusses nicht immer vollständig beschrieben wurden, so dass ein Vergleich nur bedingt möglich ist.

Der prozentuale Fasergehalt der untersuchten Stängel von *G. diversifolia* war mit durchschnittlich 4,6% – 5,1% im Vergleich zu den züchterisch bearbeiteten Faserpflanzen Flachs (10% – 25%, BATRA, 1985) und Fasernessel (12% – 16%, DREYLING, 2002) gering, überstieg aber die Fasergehalte der kommerziell genutzten Ramie, denn hierfür wurden Fasergehalte von 1% – 3,5% (LUNIAK, 1949), 2,8% - 4,7% bei verschiedenen japanischen Varietäten (DEMPSEY, 1975) und von 1% – 1,5% (BATRA, 1985) angegeben. Durch Selektion aus den der Arbeit zugrunde liegenden Pflanzen (aus Saatgut von Wildpflanzen gezogen) wurde bei *G. diversifolia* bisher maximal ein Fasergehalt von 7% erreicht.

Untersuchungen von nepalesischen Wildpflanzen der Art *G. diversifolia* wiesen Fasergehalte von durchschnittlich 7,83% (SINGH und SHRESTHA, 1988), 7,05% bzw. 10,57% (SINGH und SHRESTHA, 1989) und 8,48% (4,17% – 12,96%) (SHRESTHA, 1994) nach. SINGH und SHRESTHA (1988) gaben einen maximalen Fasergehalt von 13,18% (Minimum 3,49%) an. Diese Werte sind durchgängig höher als die Ergebnisse der im nördlichen Hamburg gewachsenen Pflanzen. Dies kann in den abweichenden Wachstumsbedingungen begründet sein. Grundsätzlich ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Faseraufschlussmethoden voneinander abweichen bzw. sie nur in groben Zügen dargestellt und unvollständig nachvollziehbar sind. Sicher ist der Anbau in Deutschland noch zu optimieren. Höhere Fasergehalte sind durch eine noch zu erarbeitende, verbesserte Anbaumethodik (z. B. Reihenabstand, Wasser- und Düngbedarf) erreichbar.

## 5.3 Entstehung der morphologischen Fasercharakteristika

### 5.3.1 Fasergestalt

Primäre Phloemfasern werden vom Prokambium initiiert, bevor sich die Sprossachse gestreckt hat. Sie erreichen durch symplastisches Wachstum mit den sie umgebenden Zellen, sowie lokales und Interpositionswachstum der Faserspitzen, beträchtliche Längen. Beim symplastischen Wachstum wachsen benachbarte Zellen gemeinsam, ohne dass sich die aneinander angrenzenden Zellwände voneinander trennen (PRIESTLEY, 1930). Das Interpositionswachstum beinhaltet, dass die lokal wachsenden Zellspitzen durch Spaltung der Mittellamelle zwischen benachbarte Zellen dringen (intrusives Wachstum) und mit ihnen verwachsen (SCHOCH-BODMER und HUBER, 1945). Anschließend ist weiteres symplastisches Wachstum möglich. Mit der Apposition von Sekundärwand endet das symplastische und das Weitenwachstum (ESAU, 1969). Es findet ausschließlich eine Zunahme der Länge durch Wachstum der Spitzen statt. Sekundäre Phloemfasern entstehen in Pflanzenteilen, die ihr Streckungswachstum beendet haben und erhalten ihre Länge ausschließlich durch Spitzenwachstum. Hierdurch erklärt sich ihre im Vergleich zu den Primärfasern geringe Länge.

Primär- und Sekundärfasern von *G. diversifolia* zeigten einen Formenreichtum der Spitzen (Kap. 4.3.1.2 Abb. 13, Kap. 4.4 Abb. 20). Ihrer Bildung liegen dieselben Wachstumsvorgänge, wie oben beschrieben, zugrunde. CATLING und GRAYSON (1998) stellten in Abbildungen (Tafel 3 – 10) die Faserspitzen von acht verschiedenen Faserpflanzen dar. Auch hier wird die Vielgestaltigkeit von Faserenden innerhalb einer Art deutlich. Die für *G. diversifolia* festgestellten Spitzenbildungen konnten hier wiedergefunden werden. Lediglich die korkenzieherartige Form ist nicht enthalten. Sie wurde bei den Untersuchungen nur einmal gefunden und scheint eine Abnormität zu sein. Eine Verletzung der Spitze während der Präparation kann weitgehend ausgeschlossen werden, da sie vollständig erhalten war und mikroskopisch keine Dehnungsspuren oder andere Schäden erkennbar waren.

Es ist grundsätzlich davon auszugehen, dass die Form der Faserspitzen durch den Kontakt zum umliegenden Gewebe geprägt wird. Hierzu gibt es zwei sich nicht gegenseitig ausschließende Erklärungen:

Nach SCHOCH-BODMER und HUBER (1951, 1952) entstehen die verschiedenen Formen der Faserenden durch das Spitzenwachstum (Interpositionswachstum) von Fasern. Die wachsende Spitze spaltet zunächst die Mittellamelle benachbarter Zellen und wächst ein. Hierbei stößt sie auf eine andere Faserzelle. Die Faserzellen hemmen sich im weiteren Wachstum und beeinflussen hierdurch die Form ihrer Enden. Die Fasergabelung entsteht beispielsweise, indem die primäre Faserspitze gehemmt wird und dadurch seitlich sekundäre Spitzen auswachsen (SCHOCH-BODMER und HUBER, 1945, 1949). Entsprechend verläuft die Ausbildung von seitlichen Auswüchsen und Verformungen der Faserenden. Es handelt sich somit bei den verschieden ausgeprägten Formen um Hemmungserscheinungen bei Spitzenwachstum. Faserenden, die in eine Streckungszone des Stängels einwachsen, erfahren ein zusätzliches passives Streckungswachstum (SCHOCH-BODMER und HUBER, 1951).

KUNDU (1942) führte als Erklärung zur Entstehung der Faserenden aus, dass die Fasern während des Wachstums in den Interzellularraum eindringen und hier durch das sie umgebende Gewebe eine Kompression erfahren, die zu Abdrücken auf den Fasern führt. Dies zeigt sich durch Unregelmäßigkeiten der Faseroberflächen. Durch Teilung und Streckung der angrenzenden Parenchymzellen werden die Faserspitzen zu Verzweigungen und gabelförmigen Enden ausgezogen.

### 5.3.2 Verschiebungen und Querstreifungen

Ebenso wie verschieden ausgebildete Faserspitzen, sind auch Verschiebungen und Querstreifungen der Fasern typisch für Stängelfaserpflanzen (HERZOG, 1955). CATLING und GRAYSON (1998)<sup>3</sup> wiesen sie gleichfalls bei Blattfasern nach.

Bei Verschiebungen und Querstreifungen handelt es sich um Veränderungen der Faserstruktur. Sie sind erkennbar an Umwandlungen der Faseroberfläche, die die Längsorientierung der Cellulose-Fibrillen durch ihren veränderten Verlauf stören. Sie entstehen als

---

<sup>3</sup> CATLING und GRAYSON bezeichnen als Querstreifen die Strukturen auf den Fasern, die angrenzendes Parenchym hinterläßt

Folge von Stauchungen in die Faserlängsachse, die die Cellulose-Fibrillen gegeneinander verschieben. Es sind Auflockerungen der Textur, wobei die Mikrofibrillen-Bündel dem Druck nachgeben, indem sie radial S-förmig ausbiegen. Bei Holzfasern kommen sie ebenso vor, sind aber aufgrund der Lignifizierung nicht so zahlreich wie bei Bastfasern. Bei Letzteren entstehen Verschiebungen zusätzlich durch mechanische Belastungen während der Isolierung und Verarbeitung (FREY-WYSSLING<sup>4</sup>, 1934, 1953).

In der vorliegenden Arbeit wurden bei mikroskopischer Betrachtung auffällige Verdickungen der Faser (Kap. 4.3.1.3 Abb. 15 A, B) als Verschiebungen identifiziert, während Querstreifungen schwächere zur Achse der Faser senkrecht oder schräg verlaufende Linien (Kap. 4.3.1.3 Abb. 15 A, C, D) darstellen (ILVESSALO-PFÄFFLIN<sup>5</sup>, 1995). In der Literatur wird häufig nicht zwischen beiden Formen unterschieden. Ein Grund hierfür ist, dass es sich bei Querstreifungen zum Teil ebenso um Verschiebungen kleineren Ausmaßes handelt. Zusätzlich beinhalten sie oberflächliche Fissuren (Risse), die OSBORNE (1935a, 1935b) bei verschiedenen Fasern (Ramie, Flachs und Jute) nachwies.

NETTELNSTROTH (1968) beschrieb die Verschiebungen als erhabene bandförmige Verwerfungen der Fibrillen, die in Textilien eine bevorzugte Knick- bzw. Bruchstelle und zusätzlich eine chemikalienempfindliche Schwachstelle darstellen. KHALILI et al. (2002)<sup>6</sup> bestätigten diese Ergebnisse mit Zugversuchen und zeigten, dass diese Bereiche während eines enzymatischen Aufschlusses bevorzugt von Cellulasen attackiert wurden. Auch DOLMETSCH (1970)<sup>7</sup> erwähnte, dass an diesen Strukturstörungen Abbaureaktionen aller Art bevorzugt stattfinden können.

Verschiebungen und Querstreifungen sind somit in mechanischer und chemischer Hinsicht strukturelle Schwachstellen der Faser. Sie sind von Bedeutung für die Fasernutzung, da sie die Zugfestigkeit herabsetzen. Bei der Fasergewinnung und Verarbeitung ist zu berücksichtigen, dass zusätzliche Faserschädigungen entstehen können.

---

<sup>4</sup> FREY-WYSSLING verwendet zur Unterscheidung die Bezeichnungen Verschiebungen und Verschiebungslinien

<sup>5</sup> ILVESSALO-PFÄFFLIN: Verschiebungen = dislocations, Querstreifungen = crossmarkings

<sup>6</sup> KHALILI et al. sprechen von Faserknoten. Gemeint sind, nach den Abbildungen zu urteilen, Verschiebungen und Querstreifungen

<sup>7</sup> DOLMETSCH unterscheidet zwischen Verschiebungen und Querspalten, -streifen

### 5.3.3 Die Struktur der Sekundärwand

Die pflanzliche Zelle erhält durch ihre Zellwand Form und Festigkeit (Exoskelett). Die Gerüstsubstanz ist das  $\beta$ -1,4-Glucan Cellulose. Dieses langkettige lineare Polymer bildet in der Vielzahl in einer überlappenden Parallelanordnung hochgeordnete kristalline Aggregate, welche als Mikrofibrillen bezeichnet werden. Letztere sind in Schichten (Lamellen) in eine Zellwandmatrix mit den Hauptbestandteilen Hemicellulose, Pektin und Proteine eingebettet. Die regelmäßige Parallelanordnung der Polymerketten in den Mikrofibrillen gestaltet diese extrem reißfest (KLEINIG und SITTE, 1999; ALBERTS et al., 1997).

Die Faserzelle ist eine spezialisierte Zelle, die sich dadurch auszeichnet, dass zusätzlich zur Primärwand (Streuungstextur der Mikrofibrillen) durch Apposition eine vielschichtige Sekundärwand gebildet wird, die der Zellwand besonders durch ihre Paralleltextrur zusätzliche Festigkeit gibt und zur Verengung des Zelllumens führt. Die Sekundärwand enthält Bereiche, in denen die Mikrofibrillen kristallin (geordnet) und amorph (wenig geordnet) vorliegen (HAUDEK und VITI, 1980). Sie ist für die zur Nutzung der Faserzellen relevanten Eigenschaften verantwortlich.

Bei mikroskopischen Beschreibungen von Bastfasern findet in der Literatur stets die Spiraltextrur (Spiralstreifung) der Sekundärwandschichtungen Beachtung. Sie ist mikroskopisch in der Faseraufsicht erkennbar und entsteht durch Bündel von Mikrofibrillen (ROELOFSEN, 1959). Die Fasern von *G. diversifolia* zeigten Windungen um die Längsachse, die sich mit der Trocknung bildeten und mit dem Anfeuchten streckten (Kap. 4.3.1.1 Abb. 12 B). Die Drehungsrichtung der Fasern einer Art ist genetisch festgelegt und stimmt innerhalb einer Familie für alle Arten überein (KLEINIG und SITTE, 1999; NEWMAN und RIDDELL, 1954). *G. diversifolia* als Urticaceae zeigte dieselben Drehungseigenschaften wie Fasern der Familienmitglieder *B. nivea* und *U. dioica* (Tab. 8). Die Drehrichtung einer Faser ergibt sich aus ihrer Faserstruktur. Hierbei wirken mehrere Komponenten zusammen: die Form der Spiraltextrur, die Dicke der Schicht mit dieser Textur und die Steilheit der Mikrofibrillenbündel (ROELOFSEN, 1959).

Bei den Fasern von *G. diversifolia* wurden in der Faseraufsicht anhand der unterschiedlichen Spiraltextrur (Kap. 4.3.1.3 Abb. 17 B, C) und im Querschnitt anhand zweier verschiedener Strukturen (Kap. 4.3.2 Abb. 19 B, D) und der Ablösung dieser voneinander

(Kap. 4.3.2 Abb. 19 C) zwei Sekundärwandschichten identifiziert. Die mikroskopisch ohne Quellung in der Faseraufsicht sichtbare obere Sekundärwandschicht wurde als erste Schicht ( $S_1$ ) und die Untere als zweite Schicht ( $S_2$ ) bezeichnet.

Im trockenen Zustand befanden sich die Fasern in der S-Form der Spiraltextrur und dies entspricht der Textur der  $S_1$ . Somit ist diese Sekundärwandschicht für die Faserwindung im trockenen Zustand verantwortlich. Auch die jüngsten Fasern der oberen Stängelregion zeigten bereits die typischen Windungen. Die Sekundärwände sind hier nur schwach ausgebildet, und es ist nur eine Schicht erkennbar (Kap. 4.1 Abb. 8 A). Da die Sekundärwand ihre Dicke durch die von Innen stattfindende Apposition von Lamellen erhält, fehlt die  $S_2$ , und nur die  $S_1$  kann ihre Wirkung für die Windungen entfalten.

Die in Querschnitten feststellbaren zwei Sekundärwandschichten wurden ebenso von LUNIAK (1949) an Ramie und von REIMERS (1921a) an Urticaceae (*Urtica dioica*, *U. cannabina*, *Laportea canadensis*, *Boehmeria nivea*, *Parietaria officinalis*) festgestellt, wobei REIMERS jeder Schicht eine Streifung zuordnete. Würde für *G. diversifolia* in gleicher Weise verfahren werden, wäre der äußeren, im Querschnitt stärker strukturierten Schicht, die S-förmige Spiraltextrur zuzuordnen und der homogenen inneren Schicht die Z-Form.

Als Nachweis der Spiraltextrur interpretierte KRABBE (1887) im Querschnitt radial orientierte Linien in den Sekundärwandschichten. Sie sollen die Grenzflächen der Spiralbänder in einer Schicht darstellen. Beim Fokussieren in tiefere Ebenen erweckten sie den Eindruck einer seitlichen Bewegung und zwar bei einer rechtsläufigen Spirale (S-Form) nach links und bei einer linksläufigen Spirale nach rechts, so dass es erschien, als drehe sich die Faserzelle „wie ein Rädchen im Kreise“. Bei Schichten mit verschiedener Textur bewegten sie sich entgegengesetzt innerhalb einer Faserzelle. Der Anschein einer Bewegung der radialen Linien entstand durch die schräg in tiefere Zellwandebenen verlaufende Spiraltextrur. Bei *G. diversifolia* konnte dies nur in der  $S_1$  (rechtsläufige Spirale) beobachtet werden (Kap. 4.3.2 Abb. 19 E). Allerdings verliefen die Linien weder parallel noch in gleichmäßigem Abstand. Sie waren unregelmäßig angeordnet und setzten sich zum Teil bis in die  $S_2$  fort wie bereits auch REIMERS (1922) von *U. dioica* berichtete, so dass es sich hier um Fissuren anderer Ursache (z. B. Gewebespannungen und Verformungen mit dem sekundären Dickenwachstum) handeln könnte, die sich evtl. bevorzugt in Richtung der Spiraltextrur ausbilden. Unterstützt wird dies dadurch,

dass keine Fortsetzung der radialen Linien in tiefere Ebenen in entgegengesetzte Richtung für die Z-Form gefunden wurde.

Den unregelmäßigen Verlauf, den die Linien zeigen können, erklärte KRABBE (1887) mit dem Aufbau der Zellwand aus Lamellen, wobei jede Lamelle eine verschieden ausgeprägte Spiraltextur bilden kann. Waren keine Grenzflächen zwischen Lamellen erkennbar, bedeutete es, dass keine Unterschiede in der Steilheit vorhanden waren. KRABBE (1887) vermutete, dass es sich hier um Auswirkungen von Druck handelt oder aber die Spiralstrukturen in jeder Lamelle an etwas anderer Stelle entstehen, so dass sich „beliebig geformte Linien“ ergeben können. Werden diese Ausführungen berücksichtigt, so kann anhand der bei den untersuchten Fasern in der  $S_1$  sehr unterschiedlich verlaufenden radiale Linien nicht ausgeschlossen werden, dass sich auch die Z-Form in dieser Sekundärwandschicht verbirgt.

KRABBE (1887) begründete das Auftreten von konturlosen inneren und somit jüngeren Schichten damit, dass die Spiralstreifung hier noch nicht differenziert ist. Bei den untersuchten Querschnitten von *G. diversifolia* handelte es sich um ausgereifte Fasern mit dicken Zellwänden, so dass eine fehlende Differenzierung unwahrscheinlich ist. Sie kann jedoch nicht völlig negiert werden, da bisher keine andere Erklärung (evtl. unterschiedliche chemische Zusammensetzung) für die unterschiedliche Struktur der Schichten gegeben werden kann.

ROELOFSEN (1951) stellte im Gegensatz zu allen vorherigen Untersuchungen bei Flachs, Hanf und Ramie drei Schichten mit Spiralstruktur fest, wobei die äußere stets eine Z-Form besaß (Tab. 8). Es wird als unwahrscheinlich bezeichnet, dass es hier Artunterschiede gibt (ROELOFSEN, 1959) und weiter wird argumentiert, dass die äußere Streifung im Fall von Flachs und Ramie sehr dünn, daher leicht zu übersehen ist und keine Bedeutung für die Drehungsrichtung der Fasern hat. Es bleibt offen, ob es sich um eine dünne  $S_1$  oder um eine innere Schicht der Primärwand handelt (ROELOFSEN, 1951). Ein Abgleich der Ergebnisse der Faseraufsicht mit Faserquerschnitten wurde nicht durchgeführt. MAITI (1973) bestätigte die Dreiteilung der Sekundärwand anhand von Quellungsversuchen mit Stängelquerschnitten von Ramie, stellte aber abweichend eine breite  $S_1$  und  $S_2$  und eine dünne  $S_3$  fest. In der Faseraufsicht gelang es mit den vorliegenden Untersuchungen nur zwei Spiralstreifungen, identisch mit dem Ergebnis von ROELOFSEN (1951), nachzuweisen.

**Tab. 8:** Ergebnisse verschiedener Untersuchungen der Spiraltextrur und Drehrichtungen ( $S_1$  = äußere Sekundärwandschicht,  $S_2$  = innere Sekundärwandschicht), S = S-Form, Z = Z-Form der Spiraltextrur, axial = parallel zur Faserlängsachse, Benennung der Drehrichtung nach SONNTAG (1911), Ra = RAHMAN 1978, Re = REIMERS 1922, Sch = SCHMIDT 1921, So = SONNTAG 1911, \* = vorliegender Arbeit entnommen

Autor	<i>Corchorus capsularis</i> L.		<i>Cannabis sativa</i> L.		<i>Linum usitatissimum</i> L.		<i>Boehmeria nivea</i> (L.) GAUDICH.		<i>Urtica dioica</i> L.		<i>Girardinia diversifolia</i> (LINK) FRIIS	
	$S_1$	$S_2$	$S_1$	$S_2$	$S_1$	$S_2$	$S_1$	$S_2$	$S_1$	$S_2$	$S_1$	$S_2$
SONNTAG (1909)			S	Z	S	Z	S	Z				
SONNTAG (1911)			Z	S	S	Z	S	Z				
REIMERS (1921b, c)			Z	Z	S	Z	S	Z				
REIMERS (1922)			Z	Z	S	Z	S	S				
NODDER (1922)			Z	S	Z	S						
HERZOG (1926)			Z	S	S	Z						
HERZOG (1927)									S	Z		
HOCK (1942)			Z	axial	Z	S	Z	S				
ROLLINS (1945)							Z	S				
ROELOFSEN (1951)			Z	S	Z	Z	S	?				
MAITI (1973)							Z	S				
*											S	Z
<b>Drehung beim Anfeuchten</b>	rechtsdrehend <sup>Ra, So</sup>		rechtsdrehend <sup>Re</sup>		linksdrehend <sup>Re, So</sup>		linksdrehend <sup>Ra, Sch, Re</sup>		linksdrehend <sup>Re, So</sup>		linksdrehend*	
<b>Drehung beim Trocknen</b>	linksdrehend <sup>Ra, So</sup>		linksdrehend <sup>Re</sup>		rechtsdrehend <sup>Re, So</sup>		rechtsdrehend <sup>Ra, Sch, Re</sup>		rechtsdrehend <sup>Re, So</sup>		rechtsdrehend*	

Nach PRESTON (1974) unterscheiden sich Phloemfasern in der Struktur nicht wesentlich von Holzfasern und Tracheiden. Zu Letzteren wurden umfangreiche Untersuchungen durchgeführt. Sie zeigten, dass der Aufbau der Tracheidensekundärwand sehr viel komplizierter ist als die vorher angenommene Dreischichtung. So gliedert sich die  $S_1$  in zwei Schichten mit entgegengesetzter Richtung der Mikrofibrillenbündel. Innerhalb der  $S_2$  variiert die Steilheit, während die  $S_3$  wieder zwei in der Richtung entgegengesetzte Schichten der Mikrofibrillen beinhaltet. Außerdem kann die  $S_3$  fehlen oder nur schwach entwickelt sein (PRESTON, 1974).

Das Vorhandensein einer dritten dünnen Sekundärwandschicht unterhalb der Primärwand kann für die Fasern von *G. diversifolia* nicht ausgeschlossen werden. Die Unterscheidung der Spiraltextrur der Sekundärwandschichtungen ist lichtmikroskopisch unzureichend möglich. Zur Aufklärung der Sekundärwandstruktur sind transmissionselektronenmikroskopische Untersuchungen zweckmäßig, da dies die Untersuchung der Lage der Mikrofibrillen in kleinen Schichten erlaubt. Vermutlich ist der Aufbau ähnlich

komplex und vielschichtig, wie es die Untersuchungen an Tracheiden bereits gezeigt haben.

#### **5.4 Vergleichende Bewertung der Fasereigenschaften von *G. diversifolia***

Naturfasern zeigen generell eine hohe Variabilität ihrer Fasereigenschaften (MORTON und HEARLE, 1993). Diese ist innerhalb eines Pflanzenstängels und bereits innerhalb eines Stängelabschnittes feststellbar. Wie RENNEBAUM et al. (2002) an Faserbündeln von *Linum* zeigten, ist die Variabilität in hohem Maße umweltbedingt.

Die Probenahme von Fasern erfolgt in der Regel nicht, wie in der vorliegenden Arbeit, aus einem definierten Stängelabschnitt oder einem Stängel, sondern aus der geernteten Rohware. Hierdurch ist die Variabilität zusätzlich erhöht und zeigt sich in den Literaturdaten (Tab. 10, Tab. 11). Daher sollten kleine Stichproben nur aus definierten Stängelabschnitten entnommen werden. Dies gilt nach SCHEER-TRIEBEL et al. (1997) ebenso für die Untersuchung von Faserbündeln (*L. usitatissimum*). Ist die Herkunft der Fasern hinsichtlich des Stängelabschnittes nicht bekannt, sind große Stichproben-umfänge notwendig, um die Variabilität zu erfassen.

Die physikalischen Eigenschaften von Fasern sind von der Luftfeuchte und der Temperatur abhängig und verändern sich mit diesen nach relativ kurzer Zeit. Dies gilt in besonders starkem Maße für die Luftfeuchte, da Pflanzenfasern stark hygroskopisch sind. So nimmt beispielsweise bei den Cellulosefasern die Festigkeit mit der Feuchtigkeit zu, während sie bei Wolle (Keratinfaser) abnimmt (HAUDEK und VITI, 1980; LATZKE und HESSE, 1974). Die Prüfbedingungen werden häufig im Zusammenhang mit veröffentlichten Daten nicht oder nur unvollständig genannt oder weichen voneinander ab, so dass Daten nur bedingt vergleichbar sind.

##### **5.4.1 Faserlänge, Faserfeinheit und Faserdicke**

Die Faserlänge ist ein wichtiges wertbestimmendes Merkmal für die Fasernutzung. Messungen an Einzelfasern sind ein aufwendiges Verfahren, stellen aber die sicherste Charakterisierung dar, wenn sie in ausreichend großer Anzahl durchgeführt wurden (KOHLER und WEDLER, 1996). Hierbei ist die durchschnittliche Faserlänge allein von geringem Wert, wenn nicht zusätzliche Angaben zur Faserlängenverteilung gegeben werden.

Die Faserlängenverteilung ist entscheidend für den Verlauf der textilen Verarbeitung und hat Einfluss auf die Qualität von Kammzügen und Garnen. Von ihr hängt die Vorbereitung für das Spinnen (Streckwerkeinstellung), die Garndicke und die Garnqualität (Garnfehler, Häufigkeit des Auftretens von Noppen) ab. Weiterhin nimmt sie Einfluss auf Maschineneinstellungen und weitere Verarbeitungsdaten (z. B. Nutzeffekt in der Kämmerei) (GRIGNET, 1979).

Es gibt relativ wenige Untersuchungen zu den Längen und der Häufigkeitsverteilung von Fasern innerhalb eines Stängels. In der Regel stammen die untersuchten Proben aus für kommerzielle Zwecke gelieferter Rohware oder aus verschiedenen Stadien der Faserverarbeitung (z. B. Kammzüge). Eine Vergleichbarkeit der Daten ist daher nur bedingt gegeben. Dennoch stellte sich beim Literaturvergleich heraus, dass eine rechtschiefe Verteilung der Faserlängenhäufigkeiten für Pflanzenfasern typisch ist. Sie wurde bereits von TAMMES (1907) bei Flachs, von KUHN (1920) bei Flachs, Hanf und Faser-nessel und von LUNIAK (1949) bei Ramie festgestellt. CATLING und GRAYSON (1998) beobachteten sie bei allen von Ihnen untersuchten Faserpflanzen (auch bei Blattfasern) unterschiedlich stark ausgeprägt. Somit ist der Anteil von sehr langen Fasern immer gering, und die größten Häufigkeiten liegen bei kürzeren Fasern. Ein spinntechnologisch hochwertiges Garn kann hergestellt werden, wenn die Faserlängenverteilung im mittleren Bereich gleichmäßig ist (SCHENEK et al., 1993). Bei *G. diversifolia* ist dies nicht gegeben (Kap. 4.5.1 Abb. 22). Durch Einkürzung der Fasern, wie es auch bei Ramie üblich ist, kann eine gleichmäßigere Verteilung erreicht werden. Der Anteil an sehr kurzen Fasern (10 bis 15 mm) ist mit bis zu 1,6% gering. Nach SCHENEK (2001) entspricht dieser Längenbereich noch den Mindestanforderungen für Textilfasern.

Trotz der bekannten Schiefe der Faserlängenverteilungen ist es in der Literatur nach wie vor üblich den arithmetischen Mittelwert zu berechnen und die Extremwerte anzugeben. Hierfür ist eine symmetrische Verteilung Voraussetzung, um das Material zu charakterisieren. Werden trotz der Widersinnigkeit die arithmetischen Mittel für die untersuchten Proben bestimmt, so betragen sie für *G. diversifolia* 281, 312, 350, 393 und 284 mm und sind somit im Mittel kürzer als in Nepal von verschiedenen Autoren untersuchte Proben (Tab. 10). Die Mediane liegen mit 211, 257, 322, 404 und 235 mm, bis auf eine Ausnahme, erheblich niedriger (Kap. 4.5.1 Abb. 22). Bei *G. diversifolia* wurden die Fasern mit geringst möglichen Verlusten aus dem Stängel isoliert. Zum Vergleich können nur Proben aus traditionell gewonnenen Fasern herangezogen werden (Tab. 10).

Beim Vergleich der Werte ist sofort auffällig, dass der Anteil der kurzen Fasern bei den nepalesischen Fasern nicht erfasst wurde, da keine Faser unter 58 mm gefunden wurde. (Ursache hierfür können Verluste bei der Degummierung oder eine zu kleine Stichprobe sein.)

SHRESTHA (1994) maß eine Faser mit einer Länge von 1300,1 mm. Somit ist *G. diversifolia* die Pflanze mit den bisher längsten gemessenen Elementarfasern.

Es entspricht der Erfahrung, dass große natürliche Objekte meist auch eine größere Variabilität von Merkmalsausprägungen zeigen. Dies wird an der großen Variationsbreite in den Faserlängen besonders deutlich. MORTON und HEARLE (1993) gaben für Baumwolle einen biologisch verursachten Variationskoeffizienten von 40% und für Wolle von 50% – 60% an. Bei den vorliegenden Stichproben betrug er durch die extremen Faserlängen 75% – 88% (Kap. 4.5.1 Abb. 22).

Die Sekundärfasern von *G. diversifolia* (Kap 4.4) mit einer durchschnittlichen Länge von 2,52 mm (2,36 – 2,69 mm) und einem Durchmesser von 25 µm (24 µm – 26 µm) ähneln mit ihren Maßen weitgehend Sekundärfasern anderer Stängelfaserpflanzen (Tab. 9). Eine Ausnahme stellen die Angaben für Sekundärfasern von Ramie dar, denn sie stimmen zwar im Durchmesser überein, sind jedoch mit durchschnittlich 15,5 mm um das 6fache länger.

Bei Jute stellen die Sekundärfasern einen Anteil von 90% des Gesamtfasergehaltes dar und liegen in eng gebündelten großen Gruppen und zu langen Strängen vereint vor. Sie werden im Verband als technische Fasern genutzt (STOUT, 1985). Die Sekundärfasern des Hanfes fallen bei der Verarbeitung als Werg an und können einer Nutzung im Kurzfaserbereich zugeführt werden. Sekundärfasern sind in der Regel stärker lignifiziert (KUNDU und PRESTON, 1940) wie es auch bei *G. diversifolia* festgestellt wurde. Ihre Anordnung in sehr kleinen Gruppen und in geringer Anzahl ergeben genauso wie bei Ramie keine technisch nutzbaren Faserstränge.

**Tab. 9:** Länge und Durchmesser von Sekundärfasern, Angaben verschiedener Autoren, Mittelwerte und Extremwerte ( )

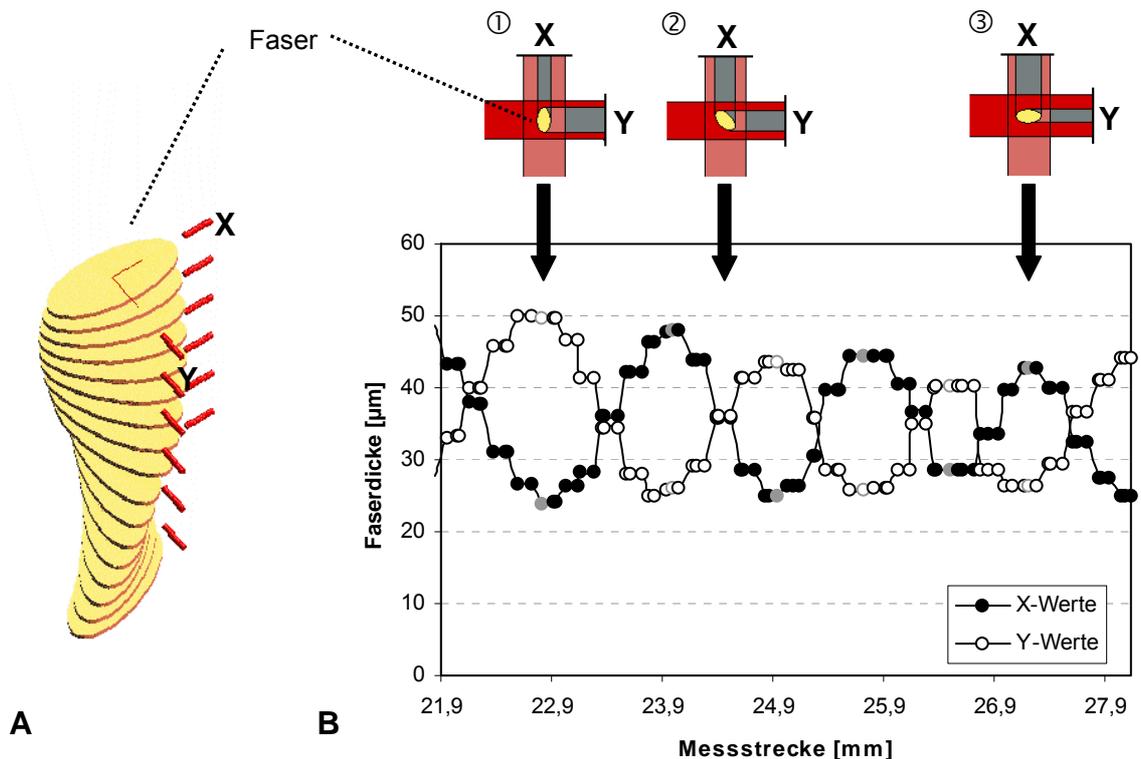
Spezies	Länge [mm]	Durchmesser [ $\mu\text{m}$ ]
<b><i>Boehmeria nivea</i> (L.) GAUDICH.</b> KUNDU und SEN (1960)	15,5 (10–22)	25 (16–35)
<b><i>Cannabis sativa</i> L.</b> KUNDU (1942)	2,18	16,56
<b><i>Corchorus</i> sp.</b> HÖHNEL (1905) OSBORNE (1935b)	2,0 (1,5–5) 2,4	22,5 (20–25) 10
<b><i>Corchorus capsularis</i> L.</b> CATLING und GRAYSON (1998)	2,17 (1,85–2,49)	18 (9,46–26,32)
<b><i>Corchorus olitorius</i> L.</b> CATLING und GRAYSON (1998) KHAN ET AL. (1968) KUNDU (1942) TURNER (1949)	2,04 (1,65–2,93) 4,1 (1,47–3,16) 2,5 (1–6)	20 (9,3–32,6)   (12–18)

Die Untersuchung der Feinheiten der Primärfasern hat Unterschiede in der Verteilung der Werte gezeigt (Kap. 4.5.2 Abb. 23). Ob es sich hierbei um für den jeweiligen Genotypus typische Verteilungen handelt, war nicht Zielsetzung dieser Arbeit und kann anhand einer Stichprobe nicht entschieden werden. Geringe Variationsbreite und niedrige Feinheitswerte entsprechen mehr den in der Textilverarbeitung gewünschten Anforderungen, da die Feinheit die Ausspinnngrenze und die Gleichmäßigkeit der Garne bestimmt (HERZOG, 1989).

Das Ergebnis der stärkeren Zunahme der Fasermasse mit der Faserlänge ist mit einer Dickenzunahme und einem geringeren Anteil von Faserspitzen erklärbar (Kap. 4.5.2 Abb. 24).

Die Primärfasern von *G. diversifolia* verlaufen durch ihre außergewöhnliche Länge durch mehrere Stängelabschnitte. Daher handelte es sich bei den untersuchten Fasern eines Stängelabschnittes um ein Gemisch von verschiedenen Faserzellenbereichen von der dünn auslaufenden Spitze bis zur Fasermitte. Dennoch waren Unterschiede der Faserdicken und Feinheiten zwischen den Stängelabschnitten nachweisbar. Die in einigen Fällen auftretenden nicht signifikanten Unterschiede zwischen benachbarten Stängelabschnitten erklären sich durch aus verschiedenen Faserzellbereichen zusammengesetzte Stichproben. Aus der Stängelspitze konnten nicht für alle Proben ausreichend lange Fasern für die Dickenmessung isoliert werden, da sich hier die jüngsten, unreifen Fasern befanden, deren Längenwachstum nicht weit fortgeschritten war.

Bei großlumigen Pflanzenfasern wie Fasernessel, Ramie und auch bei der wirtschaftlich wichtigsten Pflanzenfaser Baumwolle (Samenhaare) ist allgemein nach der Faserisolierung festzustellen, dass die Lumina kollabieren und ihre Querschnitte eher elliptisch werden (LATZKE, 1988). Daher erfolgte die Berechnung der Faserdicke statt mit der standardmäßigen und im allgemeinen üblichen Methode die beiden auf den zueinander senkrecht stehenden Achsen liegenden Durchmesser zu mitteln, über die maximale Faserdicke und als Querschnitt wurde eine Ellipsenfläche berechnet (Kap. 4.5.3 Abb. 25). Die Maxima entsprechen mehr der Bänderform der Elementarfasern. Zusätzlich waren die Fasern um ihre Längsachse gewunden (Kap. 4.3.1.1 Abb. 12 B). Die Abb. 30 zeigt ein Fasermodell von *G. diversifolia* (A) und die Messanordnung für die Bestimmung der Faserdicke und der Querschnittsfläche (B). Graphisch wurden Schwankungen der Faserdicke deutlich (Abb. 30 B). Zwischen zwei Maxima (X- und Y-Wert) verlief ein Viertel der Faserwindung und zwischen zwei Maxima der X-Werte (oder Y-Werte) befand sich eine halbe Windung. Der Schnittpunkt von X- und Y-Werten entsprach der Faserstellung, wenn X- und Y-Werte gleich waren (Abb. 30 B).



**Abb. 30:** (A) Fasermodell mit Darstellung der Faserwindung und Stellung der Laser (X, Y) während der Dickenmessung sowie (B) graphische Darstellung der Lasermikrometerwerte (X-, Y-Werte) mit Position des Faserquerschnittes in den Messstrahlen (①,②,③). Maxima und Minima der Faserdicke (①,③, graue Messwerte) wurden zur Berechnung der Querschnittsfläche (Ellipse) verwendet, → auf den der Faserstellung entsprechenden Bereich des Diagrammsweisend.

Die durch die Maxima bestimmten Faserdicken lagen über den durch das Prüfprogramm berechneten Durchmesserwerten, wobei die Differenz mit der Faserdicke zunahm. Ebenso wurde die Differenz zwischen beiden Flächenberechnungen größer, wobei die Ellipsenfläche kleiner als die Kreisfläche war. Hierdurch ergaben sich bei der Berechnung der Zugfestigkeit bei größeren Faserdicken höhere Werte.

Es handelte sich um ein zeitlich sehr aufwendiges Verfahren, da die Maxima aus den Werten ausgelesen wurden. Die Unterschiede beider Methoden stiegen mit der Faserdicke. Daher wurden sie bei *G. diversifolia* zur Stängelbasis hin größer. Bei feineren Fasern wie Baumwolle (Faserdicke 20 – 30  $\mu\text{m}$ ; BATRA, 1985) wären die Differenzen sehr gering und rechtfertigen den Aufwand für die Bestimmung der Faserdicken nicht.

Die bei Stängeln von *G. diversifolia* festgestellte Abnahme der Faserdicke von der Stängelbasis bis zur Spitze (Kap. 4.5.3 Abb. 26) ist eine Eigenschaft, die von TAMMES (1907) und SCHEER-TRIEBEL et al. (1997) bei Flachs, von MENZEL (1937) für die Primärfasern des Hanfes und von ULLRICH (1950) für Fasern von *Asclepias* beschrieben worden ist. Es handelt sich hierbei um ein prinzipielles Phänomen bei Primärfasern von Faserpflanzen.

Werden die Mittelwerte der Faserdicke der mittleren Stängelabschnitte **3** (38  $\mu\text{m}$  - 59  $\mu\text{m}$ ) der vorliegenden Untersuchung mit den Mittelwerten aus der Literatur (Tab. 10) verglichen, dann sind Erstere deutlich niedriger als die Literaturwerte.

Geringe Werte wie die Minima von 6,66  $\mu\text{m}$  und 10  $\mu\text{m}$  (SINGH u. SHRESTHA, 1984) und hohe Werte wie die Maxima von 126,66 bis 342,5  $\mu\text{m}$  (Tab. 10) wurden in der vorliegenden Untersuchung (Minimum 24,57  $\mu\text{m}$ , Nr. 134 Abschnitt 1; Maximum 117,66  $\mu\text{m}$ , Nr. 114 Abschnitt 5) nicht gefunden. Dies ist erklärbar, indem in der vorliegenden Untersuchung die Faserdicke über eine Länge von 50 mm bestimmt wurde. Bei den Literaturwerten handelt es sich vermutlich um Einzelmessungen. Hierdurch können sich bei einer Messung im mittleren Bereich einer Faser hohe und an den Faserspitzen besonders niedrige Werte ergeben. Der extrem hohe Wert von 342,5  $\mu\text{m}$  (CANNING und GREEN, 1986) weicht völlig von den anderen Literaturwerten ab. Da in dieser Stichprobe auch der Mittelwert sehr hoch ist, wird es sich um eine extreme Stichprobe gehandelt haben, oder es wurde ein anderes Messverfahren verwendet (Angaben fehlen).

**Tab. 10:** Literaturwerte der Faserlänge und Faserdicke (*G. diversifolia*), Angaben verschiedener Autoren, Mittelwerte und Extremwerte ( ), \*(Stichprobenumfang 50)

	Faserlänge [mm]	Faserdicke [ $\mu\text{m}$ ]
SINGH U. SHRESTHA (1984*, 1989)	354,66 (146 - 733)	73,46 (10,00 - 136,66)
SINGH U. SHRESTHA (1984*, 1989)	287,20 (106 - 525)	67,06 (6,66 - 126,66)
CANNING U. GREEN (1986)	324,00 (85 - 536)	163,00 (35,00 - 342,50)
SINGH U. SHRESTHA (1988)	350,00	70,00
SHRESTHA (1994)	363,39 (58 - 873)	96,15 (54,55 - 154,55)
SHRESTHA (1994)	482,60 (63 - 1301)	97,73 (54,55 - 172,73)
SHRESTHA (1996)	350,00	73,00

Der Vergleich mit den Elementarfaseren anderer Bastfaserpflanzen ergibt, dass die Feinheit mit Ramie vergleichbar und die Faserdicke analog oder etwas höher ist (Tab. 11).

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen bestehende Unterschiede zwischen den einzelnen Pflanzen von *G. diversifolia*. Repräsentiert jede Pflanze einen Genotyp, wäre eine Selektion hinsichtlich der Faserdicke und Feinheit möglich und lohnenswert. Zusätzlich können die Stängel in verschiedenen Partien mit unterschiedlichen Faserdurchmessern und Feinheiten geerntet und verarbeitet werden. Die unterschiedlichen Stängelabschnitte sind mit verschiedener natürlicher Faserfärbung gekoppelt (4.2 Abb. 10). Das obere Stängeldrittel ergibt helle und dünne Fasern und das untere Stängeldrittel dunkle und gröbere Fasern. Das mittlere Stängeldrittel enthält gefärbte Fasern, die in der Farbe und Dicke zwischen dem unteren und oberen Stängeldrittel liegen. Es entspricht aufgrund von zusätzlich vorhandenen günstigen mechanischen Eigenschaften der erwünschten Qualität zur textilen Verarbeitung.

#### 5.4.2 Mechanische Eigenschaften

Faserzellen zeichnen sich durch stark entwickelte Sekundärwände aus, die neben den anderen Zellwandschichten die physikalischen Eigenschaften dieser spezialisierten Zellen bestimmen und eine mechanische Beanspruchung erlauben, wie sie für textile und technische Zwecke erforderlich ist.

Dem Pflanzenstängel ermöglichen Fasern durch ihre Randlage neben Stand- und Zugfestigkeit die erforderliche Flexibilität, um den Umweltbedingungen (besonders Wind, Gravitation) durch Biegefestigkeit standzuhalten. Durch Biegung erfährt jede Faserzelle, wie auch der gesamte Stängel, an einer Seite Dehnung, an der gegenüberliegenden Seite Stauchung und in der Mitte Scherung (VOGEL, 2000). Bedingt dadurch, dass die Fasern unterhalb der primären Rinde in mehreren Schichten vorliegen und jeweils durch Parenchymzellen beziehungsweise Mittellamellen voneinander getrennt sind, setzt sich ein Riss einer äußeren Faser nicht nach innen fort wie es bei einem einzigen massiven Körper der Fall wäre. Große Faserzelllumina, wie sie bei *G. diversifolia* vorhanden sind, reduzieren die Zugfestigkeit, führen aber zu hoher Biege- und Torsionssteifigkeit, die im Zusammenhang mit der für Bastfasern typischen geringen Dichte besonders für technische Zwecke in Leichtbauteilen genutzt werden kann (BLEDZKI und GASSAN, 1996; HANSELKA, 1998).

Für den Vergleich von mechanischen Eigenschaften von Fasern muss die Einspannlänge der untersuchten Fasern identisch sein, da mit zunehmender Länge die Anzahl möglicher Schwachstellen (z. B. Verschiebungen) zu- und die Höchstzugkraft abnimmt (BOBETH, 1993). Außerdem können nur Werte von Elementarfasern miteinander verglichen werden, da bei großen Einspannlängen bei Faserbündeln Brüche nicht nur direkt durch die Zellwand verlaufen, sondern die Zellen an den Mittellamellen getrennt werden. Bei Faserbündeln wird also der Verbund getestet (RENNEBAUM et al., 2002; KOHLER und WEDLER, 1996).

Die Angaben in der Literatur zu den mechanischen Eigenschaften der Fasern von *G. diversifolia* sind spärlich. Als mittlere Höchstzugkraft geben SINGH und SHRESTHA (1984) 0,66 N (67,78 g), Minimum bei 0,29 N (30 g), Maximum 1,29 N (131 g) (n = 50) (durch Anhängen von Gewichten von 1 g ermittelt) und SINGH und SHRESTHA (1988) 0,79 N (80 g) bei 30 mm Prüflänge an. Angaben zu weiteren mechanischen Parametern fehlen.

In der vorliegenden Untersuchung wurde eine Abnahme der Höchstzugkraft von der Stängelbasis bis zur Stängelspitze festgestellt (Kap. 4.5.4 Abb. 27 A). Es wurden Mittelwerte von 0,09 bis 1,36 N bestimmt (Tab. 7). Die in der Literatur vorgestellten Mittelwerte (s. o.) wurden nur im Abschnitt der Stängelbasis erreicht. Die übrigen Abschnitte zeigten geringere Werte.

Eine Zunahme der Höchstzugkraft steht im Zusammenhang mit der Zunahme der Faserdicke. Vergleichbar wird die mechanische Festigkeit von verschiedenen Fasern durch den Bezug auf ihre Querschnittsfläche (Zugfestigkeit, Kap. 4.5.4 Abb. 27 B) bzw. Masse (Feinheitsbezogene Höchstzugkraft, Kap. 4.5.7). Hier waren die Fasern der Stängelspitzen aufgrund der wenig entwickelten Sekundärwände am schwächsten, während die Fasern der Stängelbasis durch beginnende Lignifizierung bei drei von fünf Stichproben die höchsten Zugfestigkeitswerte verzeichneten. Die mittleren Stängelabschnitte zeigten sich in vier von fünf Proben nicht signifikant verschieden voneinander (Kap. 4.5.4 Abb. 27 B). Eine generelle Zunahme der Zugfestigkeit mit der Faserdicke ist daher nicht anzunehmen.

Bei der hier gewählten Einspannlänge von 50 mm betrug die Zugfestigkeit der Fasern von *G. diversifolia* im Mittel 178 MPa – 550 MPa. Ein Vergleich mit in der Literatur enthaltenen Angaben für andere Arten zeigte, dass sie damit gering war (Tab. 11). Nur für *U. dioica* liegen ähnliche Ergebnisse bei identischen Prüfbedingungen vor. Für die übrigen Arten fehlen Angaben zu den Prüfbedingungen inklusive Einspannlängen und ermöglichen daher nur eine grobe Orientierung.

Die Feinheitsbezogene Höchstzugkraft (Feinheitsfestigkeit) der Fasern von *G. diversifolia* ähnelt den der Literatur zu entnehmenden Werten für Fasern von Ramie, Flachs und Hanf, obwohl die Prüfbedingungen unbekannt sind (Tab. 11). Hierbei ist einerseits zu berücksichtigen, dass den Ergebnissen der Feinheitsbezogene Höchstzugkraft für die erforderliche Bestimmung der Feinheit nicht die identischen Fasern wie für die Messung der Höchstzugkraft zugrunde lagen, sondern andere Fasern desselben Stängelabschnittes. Andererseits können sich die geringen Zugfestigkeiten daraus ergeben haben, dass die im Verhältnis zu anderen Bastfaserarten großen Lumina der Fasern von *G. diversifolia* in die Querschnittsfläche mit eingingen und hierdurch im vorliegenden Fall deutliche Abweichungen entstanden, wenn sie mit stärker gefüllten Fasern anderer Arten verglichen werden. Dagegen bezieht sich die Feinheitsbezogene Höchstzugkraft auf die Masse und ist daher für einen Vergleich besser geeignet.

Für die mechanischen Eigenschaften von Fasern ist die Spiraltextrur der Cellulosemikrofibrillen von Bedeutung. In den Mikrofibrillen gewährleisten die in kristalliner Anordnung parallel orientierten Celluloseketten die Zugfestigkeit, während die Spiraltextrur zusätzlich Elastizität ermöglicht, wobei mit der Steilheit der Spiralstreifung die

Zugfestigkeit zu und die Dehnfähigkeit abnimmt (KLEINIG und SITTE, 1999; FREY-WYSSLING, 1976). Weiterhin beeinflusst der hier nicht untersuchte Polymerisationsgrad der Cellulose die physikalischen Eigenschaften, wobei eine geringe Dehnfähigkeit auf einen hohen Polymerisationsgrad mit geringen Anteilen an amorphen Faserbereichen hinweist (HAUDEK und VITI, 1980).

Die Fasern von *G. diversifolia* befinden sich mit 2,4% - 3,7% Höchstzugkraftdehnung im für Bastfasern charakteristisch niedrigen Bereich (Tab. 11). Lediglich Baumwolle als pflanzliche Faser (Samenhaare) zeigte mit 6 – 10% (BOBETH, 1993) bessere Dehnungseigenschaften. Eine gewisse Dehnfähigkeit ist für die Faserverarbeitung (z. B. Führung und Lenkung auf Strecken) und für das Endprodukt (z. B. Sitz von Bekleidung) wesentlich. Nach SCHENEK (2001) beträgt die erforderliche Mindestdehnung für Textilfasern 2% – 4%.

Der Dehnungsmodul (Elastizitätsmodul, E-Modul) erreichte bei *G. diversifolia* mit 5,8 GPa – 22,5 GPa im Vergleich zu anderen Bastfaserpflanzen hohe Werte (Tab. 11). Auch hier ist wie bei der Zugfestigkeit eine Übereinstimmung mit *U. dioica* (identische Prüfbedingungen) mit 23 GPa festzustellen. Daher kann ein Zusammenhang mit den Prüfbedingungen vermutet werden. Der Dehnungsmodul bezeichnet den Widerstand gegen eine Dehnung und ist ein wichtiger Faserkennwert, um irreversible Dehnungen bei der Verarbeitung zu vermeiden.

In den verschiedenen Stängelabschnitten war für die Parameter Faserdicke, Feinheit, Höchstzugkraft und Zugfestigkeit eine Abnahme der Werte von der Stängelbasis zur Stängelspitze feststellbar. Der Abschnitt der Stängelspitze zeigte hier im Hinblick auf eine Nutzung die geringste und der mittlere Stängelabschnitt die höchste Qualität.

Die Festigkeit von Garnen hängt von der Länge und Oberfläche der Überlappungszone der Fasern und der Garndrehung (Pressungsstärke) ab (KUHN, 1920). Je länger die Fasern, desto feiner und gleichmäßiger das Garn (MORTON und HEARLE, 1993). Daher erreichen lange Fasern die höchste Wertschöpfung, indem sie zu Kammgarnen versponnen (Kammgarnspinnverfahren) werden und dann im Bekleidungssektor einsetzbar sind. Hier findet auch Ramie Verwendung, wobei eine gleichmäßige Länge durch das Einkürzen der Fasern vor der Verarbeitung erreicht wird (BOBETH, 1993). Entsprechend wäre auch für die Fasern von *G. diversifolia* das Einkürzen der Fasern notwendig und danach die Verarbeitung zu Kammgarnen möglich.

Der das Spinnen erschwerende und zu Garnfehlern führende Anteil sehr kurzer Fasern (< 15 mm) (MÜLLER, 1990), ist mit bis zu 1,6% gering, wobei Fasern < 10 mm nicht erfasst wurden. Aufgrund der mit Ramie vergleichbaren glatten Faseroberfläche und den relativ großen Faserdurchmessern ist wie bei Ramie die Verarbeitung zu Mischgarnen sinnvoll, um nicht zu dicke und harte Garne zu erhalten (RÜEGG und COLIJN, 1994; KALITA, 1996; MUKHERJEE, 1998a; AHMED et al., 2002). Es wurden bereits Produkte mit Fasern von *G. diversifolia* als Gemisch mit Wolle, Baumwolle, Seide und Polyacryl hergestellt (DUNSMORE, 1987). Zur Verarbeitung der Rohware ist die für Ramie verwendete Technologie einsetzbar (PANDAY, 1998).

Da Ramiefasern sich besonders gut als Verstärkungskomponente eines Bioverbundes (HANSELKA, 1998) und zur Verstärkung verschiedener technischer Artikel wie z. B. Geotextilien (RÜEGG und COLIJN, 1994) eignen, kann aufgrund der vergleichbaren Ergebnisse davon ausgegangen werden, dass auch die Fasern von *G. diversifolia* für diesen Zweck verwendbar sind.

Der Wert einer Faser wird durch viele physikalische Eigenschaften bestimmt. Einige hiervon wurden in der vorliegenden Arbeit unter den gegebenen Anbaubedingungen bestimmt. Zur qualitativen Faserbeurteilung wurden weitere Bastfaserpflanzen vergleichend herangezogen. Hierbei stellte sich heraus, dass für einen Vergleich unbedingt gleiche Prüfbedingungen zu fordern sind. Es wären international eingeführte Richtlinien für eine Qualitätskontrolle sinnvoll.

Zur Prüfung von Elementarfasern wäre aufgrund der geringeren mittleren Längen von Flachs, Hanf und Fasernessel (Tab. 11) eine Einspannlänge von 25 mm geeignet. Auch Baumwolle könnte auf diese Weise geprüft werden, da ihre mittlere Länge nach BOBETH (1993) 20 – 30 mm beträgt. Zusätzlich zu identischen Klimabedingungen (z. B. 23°C, 50% Luftfeuchte) sollten ebenso alle weiteren Prüfbedingungen übereinstimmen, wobei insbesondere die Prüfgeschwindigkeit (z. B. 3 mm/min) zu nennen ist.

Nur bei gleichen Prüfverfahren sind veränderte Qualitäten zu erfassen, die die Industrie im Textil- und Nichttextilbereich vor Probleme stellt.

**Tab. 11:** Faserparameter von geprüften Elementarfaseren verschiedener Autoren: Ba = BATRA (1985), B = BOBETH (1993), C = CATLING und GRAYSON (1998), D = DREYLING (unveröffentlicht, Prüfbedingungen identisch mit Fasern von *G. diversifolia*, 14 geprüfte Fasern aus 2 Stängeln), Ha = HANSELKA (1998), H = HERZOG (1927), Ma = MAITI (1970), Mu = MUKHERJEE (1998b), P = PANDAY (1998), Re = REIMERS (1919), R = RÜEGG und COLIJN (1994), Mittelwerte und Extremwerte ( ); \* = vorliegender Arbeit entnommen: Mediane (Faserlänge und Feinheit) bzw. Mittelwerte der Stängelabschnitte 1 – 5, jeweils 5 Proben, Feinheitsbezogene Höchstzugkraft 2 Proben

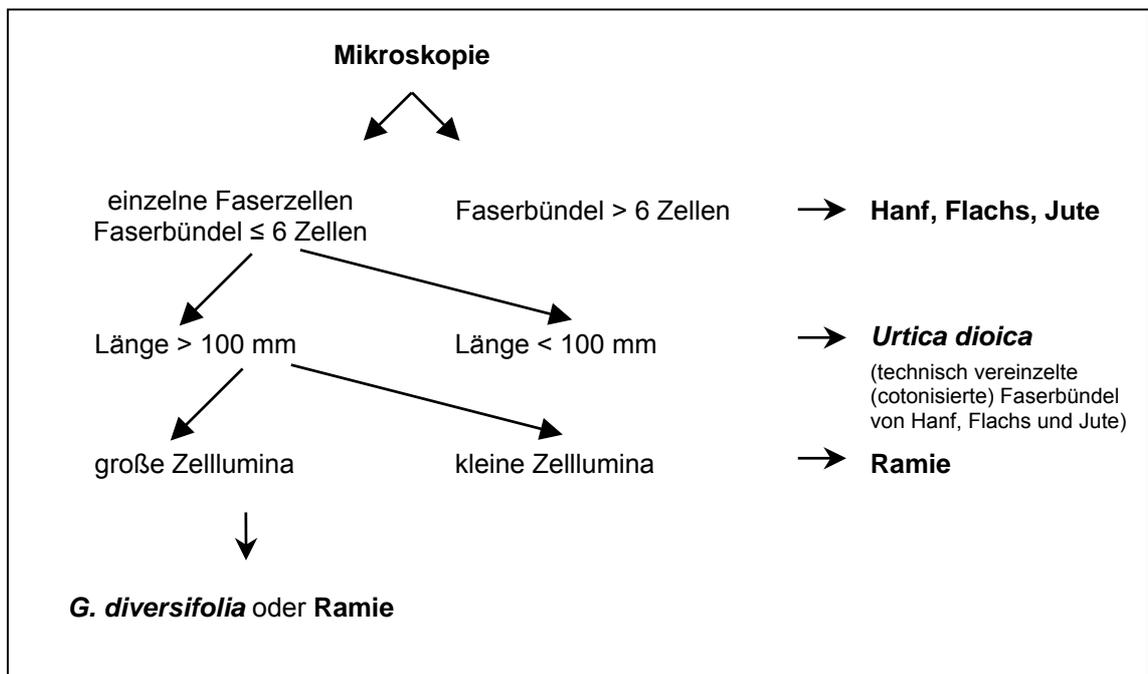
	Faserlänge [mm]		Faserdicke [µm]		Feinheit [dtex]
<i>Linum ussitatissimum</i> L.	25 - 30 7,9 27	(4 - 66) <sup>B</sup> (1,6 - 24,0) <sup>C</sup> (9 - 70) <sup>Ma</sup>	20 - 25 <sup>B</sup> 19 23 <sup>Ma</sup>	(11,7 - 32,0) <sup>C</sup>	2,1 - 3 <sup>Ba</sup>
<i>Cannabis sativa</i> L.	15 - 25 85	(5 - 55) <sup>B</sup> 1 - 34) <sup>C</sup>	22 <sup>B</sup> 30	(16,3 - 67,1) <sup>C</sup>	2,5 - 4,2 <sup>R</sup>
<i>Corchorus</i> sp.	2 - 3	(0,6 - 5,3) <sup>C</sup> (1 - 5) <sup>B</sup> 0,5 - 6,5 <sup>Ma</sup>	18 - 20 <sup>B</sup> 18 20 10 - 18 <sup>Ma</sup>	(9,6 - 26,3) <sup>C</sup> (9,3 - 32,6) <sup>C</sup>	2 - 3 <sup>Ha</sup> 2 <sup>R</sup>
<i>Boehmeria nivea</i> (L.) GAUDICH.	120 - 150 39,5 48 - 290 <sup>Ma</sup> 20 - 250 <sup>Mu</sup> 150 - 300 <sup>P</sup>	(60 - 250) <sup>B</sup> (40 - 250) <sup>Ba</sup> (13,0 - 82,7) <sup>C</sup>	50 <sup>B</sup> 31 50 - 100 <sup>Ma</sup> 15 - 80 <sup>P</sup>	(16 - 126) <sup>Ba</sup> (12,2 - 65,9) <sup>C</sup>	4 - 8 <sup>Mu</sup> 4,5 - 7 <sup>P</sup> 4,4 - 8,5 <sup>R</sup>
<i>Urtica dioica</i> L.	30 46,3	(2 - 87) <sup>H</sup> (22 - 82) <sup>Re</sup>	40 43 <sup>D</sup> 36	(12 - 126,3) <sup>H</sup> (21 - 67) <sup>Re</sup>	
<i>Girardinia diversifolia</i> (LINK) FRIIS	211 - 404	(10 - 1212)*	29 - 98*		3,9 - 7,5*

	Feinheitsbezogene Höchstzugkraft [cN/tex]	Zugfestigkeit [MPa]	Höchstzugkraft- dehnung [%]	Dehnungsmodul [GPa]
<i>Linum ussitatissimum</i> L.	52 - 60 <sup>B</sup> 44 - 54 <sup>P</sup> 30 - 55 <sup>R</sup>	770 - 890 <sup>B</sup>	3 - 4 <sup>B</sup> 1,8 - 4 <sup>R</sup>	8 - 10 <sup>Ha</sup>
<i>Cannabis sativa</i> L.	53 - 62 <sup>B</sup> ~ 29 <sup>R</sup>	780 - 910 <sup>B</sup>	3 - 4 <sup>B</sup> 1,8 <sup>R</sup>	- -
<i>Corchorus</i> sp.	30 - 40 <sup>B</sup> 29 - 49 <sup>Mu</sup> 23 <sup>R</sup>	435 - 580 <sup>B</sup>	1,3 <sup>B</sup> 1 - 2 <sup>Mu</sup> 1,3 <sup>R</sup>	5,0 - 7,0 <sup>B</sup> 5,0 <sup>Ha</sup>
<i>Boehmeria nivea</i> (L.) GAUDICH.	50 - 70 <sup>B</sup> 39 - 64 <sup>Mu</sup> 44 - 64 <sup>P</sup> 50 - 70 <sup>R</sup>	760 - 1060 <sup>B</sup>	2,4 <sup>B</sup> 3 - 4 <sup>Mu</sup> 3,5 - 4,5 <sup>P</sup> 2,4 <sup>R</sup>	5,0 - 7,0 <sup>B, Ha</sup> - -
<i>Urtica dioica</i> L.		424 <sup>D</sup>	1,8 <sup>D</sup>	23 <sup>D</sup>
<i>Girardinia diversifolia</i> (LINK) FRIIS	29 - 74*	178 - 550*	1,9 - 4,6*	5,8 - 22,5*

### 5.5 Ist eine Identifizierung der Fasern von *G. diversifolia* im Vergleich zu anderen Bastfasern möglich?

Die schnellste Möglichkeit zur ersten Unterscheidung der Bastfasern ist die Bestimmung der Drehrichtung. Sie ist nur für Einzelfasern einsetzbar und für Fasern wie Hanf, Flachs und Jute, die meistens in Faserbündeln in der Rohware vorliegen, nicht anwendbar. Daher ist die Mikroskopie die beste Methode, um Fasern identifizieren bzw. unterscheiden zu können (LANGENHOVE und BRUGGEMAN, 1992). Als ungeeignete Merkmale zu diesem Zweck haben sich Faserspitzen, Verschiebungen und Querstreifungen erwiesen. Geeignete Kriterien sind das Vorliegen als Elementarfaser oder als Faserbündel, die Faserlänge, die Faserdicke und die Größe des Zelllumens. Die Abb. 31 zeigt ein Schema zur mikroskopischen Identifizierung der Fasern von *G. diversifolia*. Die Unterscheidung von Hanf, Flachs, Jute und *U. dioica* ist möglich, während es von Ramie nur gelingt, wenn das Zelllumen der Ramiefasern klein ist.



**Abb. 31:** Schema zur mikroskopischen Identifizierung von *G. diversifolia*. Die Unterscheidung von Ramie ist nur möglich, wenn die Zelllumina von Ramie klein sind.

## 6 Zusammenfassung

Die Faserpflanze *Girardinia diversifolia* (LINK) FRIIS (Urticaceae) wird in Nepal zur Herstellung von Textilien genutzt. Bisher liegen keine systematischen Studien zur Stängelanatomie und den morphologischen und mechanischen Fasercharakteristika dieser Pflanze vor. Dieses ist Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

Die Pflanzen wurden aus nepalesischem Saatgut gezogen und im Freiland auf einem Versuchsfeld an der nordöstlichen Stadtgrenze Hamburgs (10°12'01"E, 53°39'50"N) kultiviert. Sie erreichten eine Länge von bis zu 2,15 m.

Für die lichtmikroskopische Untersuchung der Stängelanatomie wurden Stängel in fünf gleichlange Abschnitte (1 – 5) geteilt. Aus der Mitte der Abschnitte wurde ein Zentimeter zur Anfertigung von Querschnitten entnommen. Die Fasermorphologie wurde anhand von Stängelquerschnitten und isolierten Fasern erarbeitet. Ebenso wurden Faserlänge, Feinheit und die mechanischen Eigenschaften anhand von aus dem Stängel isolierten Fasern bestimmt. Die Methoden der Faserisolierung (I – IV) unterschieden sich durch eine zusätzliche mechanische Bearbeitung nach dem chemischen Aufschluss und Trocknung bis zur Massekonstanz bei Faserwirrlage (I: Fasermasse), eine im Wasserbad durchgeführte Einzelentnahme der Fasern mit Bewahrung der Parallellage der Fasern (II: Fasermorphologie, Faserlänge, Feinheit; III: Faserdicke, mechanische Eigenschaften) und eine Stängelmazeration (IV: Sekundärfasermorphologie). Für die Methoden I und III wurden gleichlange Stängelabschnitte, für Methode II der gesamte Stängel und für Methode IV ein Stängelbasisabschnitt verwendet. Die Faserdickenmessung (mit zweidimensionalem Lasermikrometer) und die zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften durchgeführte Zugprüfung erfolgten über eine Einspannlänge von 50 mm.

Die primären Phloemfasern (Primärfasern) lagen als Elementarfasern im Stängelquerschnitt vor und zeigten bei älteren Stängeln teilweise eine Lignifizierung an der Stängelbasis. Isolierte Fasern waren bandförmig mit der für Urticaceae charakteristischen Drehrichtung der Faserwindungen (beim Anfeuchten linksdrehend, beim Trocknen rechtsdrehend). Die makroskopisch glatte Faseroberfläche wies mikroskopisch die für Bastfasern typische Spiraltexur mit Verschiebungen und Querstreifungen auf.

Die licht- und rasterelektronenmikroskopische Untersuchung der Sekundärwand zeigte zwei verschiedene Schichten. Primäre und sekundäre Phloemfasern wiesen eine Vielgestaltigkeit der Faserspitzen auf, wie sie auch bei anderen Bastfaserpflanzen bekannt ist. Die sekundären Phloemfasern (Sekundärfasern) sind aufgrund ihrer geringen Anzahl und einer mittleren Länge von 2,5 mm für eine Nutzung unbedeutend.

Bei den morphometrischen und mechanischen Fasereigenschaften wurde eine große Variabilität deutlich. Die Daten der Längenmessung waren rechtsschief verteilt mit den größten Häufigkeiten im Bereich der kürzeren Fasern. Mit Längenmaxima von bis zu 1212 mm und Medianen von 211 mm - 404 mm waren die Fasern außergewöhnlich lang. Die Faserfeinheit zeigte die größten Häufigkeiten zur Mitte der Verteilung hin. Die Variationsbreite der Faserfeinheit war mit 10,94 dtex – 18,39 dtex unterschiedlich groß. Die Mediane betragen 3,86 dtex - 7,50 dtex.

Für die Parameter Fasermasse, Faserdicke und Höchstzugkraft wurden signifikante Unterschiede zwischen den Abschnitten eines Stängels festgestellt. Sie nahmen von der Stängelspitze zur Stängelbasis zu. Die Mittelwerte der Faserdicke von Fasern der Stängelspitze (**1**), der Stängelmittle (**3**) und der Stängelbasis (**5**) betragen 29 – 32/38 – 59/58 – 98  $\mu\text{m}$  (**1/3/5**). Die Zugfestigkeit mit im Mittel 178 – 251/239 – 336/369 – 438 MPa (**1/3/5**) zeigte die geringsten Werte in der Stängelspitze (**1**) und die höchsten in der Stängelbasis (**5**). Zwischen den mittleren Stängelabschnitten (**2 – 4**) wurden keine signifikanten Unterschiede nachgewiesen. Die Feinheitsbezogene Höchstzugkraft mit Mittelwerten von 29/53, 69/61, 74 cN/tex (**1/3/5**) zeigte Unterschiede nur durch geringere Werte in der Stängelspitze (**1**). Dehnungsmodul und Höchstzugkraftdehnung mit im Mittel 8,9 – 10,3/5,8 – 12,5/6,6 – 13,4 GPa (**1/3/5**) und 2,5 – 3,0/2,0 – 4,1/2,4 – 4,6% (**1/3/5**) wiesen keine generellen Differenzen zwischen den Stängelabschnitten auf. Die Fasergehalte waren in der Stängelmittle (**3**) und im darunter liegenden Abschnitt (**4**) mit Mittelwerten von 5,9/6,3% (**3/4**) am höchsten. Sie betragen im Untersuchungszeitraum 1999 – 2001 pro Stängel im Mittel 4,6% - 5,1%. Damit sind sie Fasergehalte dieser Wildpflanze deutlich geringer als es bei gezüchteten Faserpflanzen (z. B. Fasernessel 12 - 16%) der Fall ist.

Die Untersuchung der morphologischen und mechanischen Fasercharakteristika ergab, dass sich die Fasern von *G. diversifolia* hinsichtlich ihrer Eigenschaften in das Spektrum anderer genutzter Bastfaserpflanzen einordnen. Besonders zahlreich waren die

Übereinstimmungen mit Ramie (*Boehmeria nivea* (L.) GAUDICH.). Aufgrund des Vorliegens der Fasern als Einzelzellen, im Gegensatz zu Faserbündeln (z. B. Flachs) und der Faserlänge, sind sie besonders für die Herstellung von Textilien geeignet. Hierzu kann die für Ramie verwendete Technologie (chemischer Faseraufschluss, Einkürzung der Fasern, Kammgarnspinnverfahren, Herstellung von Mischgarnen) eingesetzt werden.

Weiterhin sind die großlumigen Elementarfasern von *G. diversifolia* durch ihre geringe Masse (Dichte) ebenso als nachwachsender Rohstoff in Verbundwerkstoffen für technische Anwendungen geeignet.

## Summary

In Nepal, the fibre plant *Girardinia diversifolia* (LINK) FRIIS (Urticaceae) is used to produce textiles. Until present, no systematic study exists, dealing with the stem anatomy or the morphological and mechanical fibre characteristics of this plant. The presented thesis will refer to this matter.

All plants were grown from Nepalese seed. They were cultivated in the field in the northeast of Hamburg (10°12'01"E, 53°39'50"N) and grew up to 2,15 m of height.

For the investigation of stem anatomy by light microscopy, the stems were divided into five segments (**1 – 5**) equal in length. From the middle part of each segment, one centimetre was taken for examining transverse sections. The fibre morphology was examined by transverse sections of the stem and by isolating fibres. Length, fineness and mechanical properties were also studied by isolated fibres. Methods of fibre isolation (I – IV) differed in additional mechanical treatment after chemical degumming, drying until mass weight was constant, and fibres were tangled (I: fibre mass), taking single fibres out of a waterbath for maintaining the fibres in a parallel pattern (II: fibre morphology, fibre length, fineness; III: fibre thickness, mechanical properties) and maceration of the stem (IV: morphology of secondary phloem fibres). In case of methods I and III the stem segments of equal length were used, in case of method II the entire stem only, and for method IV the base segment of the stem was taken. Fibre thickness measurement (by a two-dimensional laser micrometer) and tensile tests for estimation of the mechanical properties were carried out at a grip distance of 50 mm.

The primary phloem fibres (primary fibres) appeared as single cells which could be seen in a transverse section of the stem. In older stems the fibres were partly lignified at the base. Isolated fibres were ribbon like with a twist direction of the fibre convolution (left moistening twist and right drying twist), a typical feature within Urticaceae. The microscopic even surface displayed the characteristic spiral structure of bast fibres with dislocations and crossmarkings. By investigation with light- and scanning electron microscopy two layers of secondary wall were visible. Primary and secondary phloem fibres showed a lot of different shaped fibre tips which are known to be characteristic for other bast fibre plants. Secondary phloem fibres (secondary fibres) are negligible concerning utilisation due to their scarceness and because the mean value of length was 2,5 mm.

Morphometrical and mechanical properties were highly variable. Data of length measurement were distributed right-skewed with the highest frequency of shorter fibres. The fibres were extraordinary long with a maximum length of 1212 mm and medians of 211 to 404 mm. Fineness showed the highest frequency towards the middle of the data distribution. The variability ranged between 10,94 dtex and 18,39 dtex, corresponding medians were 3,86 dtex to 7,50 dtex.

Regarding the parameters of fibre mass, fibre thickness and the maximum load, significant differences within the segments of the stem were found. They increased from the tip to the base of the stem. Mean values for the thickness of the tip (1), middle (3), and base (5) of the stem were 29 to 32/38 to 59/58 to 98  $\mu\text{m}$  (1/3/5). Tensile strength amounted to mean values of 178 to 251/239 to 336/369 to 438 MPa (1/3/5) with the lowest values at the tip (1) and the highest values at the base (5) of the stem. Within the middle segments (2 – 4) no significant differences were measured. Specific tensile load with mean values of 29/53, 69/61, 74 cN/tex (1/3/5) exhibited differences only by low values for the tip of the stem (1). In general the modulus of elasticity in tension with mean values of 8,9 to 10,3/5,8 to 12,5/6,6 to 13,4 GPa (1/3/5) and the strain at maximum load with 2,5 to 3,0/2,0 to 4,1/2,4 to 4,6% (1/3/5) did not show any differences between segments of the stem. The fibre content at the middle (3) of the stem and at the segment underneath (4) had the highest mean values 5,9/6,3% (3/4). Mean values per stem, determined from 1999 to 2001 amounted to 4,6% - 5,1%. Therefore the fibre content of this wild plant is low in comparison to fibre plants which have been bred (e.g. fibre nettle 12 – 16%).

Investigation of morphological and qualitative characteristics proved that fibres of *G. diversifolia* fit into the spectrum of other bast fibre plants being used. Correspondence to ramie (*Boehmeria nivea* (L.) GAUDICH.) were particularly numerous. Due to the fact that fibre cells occur as single cells in contrast to fibre bundles (e.g. flax), and because of their length, they are especially suitable for the production of textiles. Therefore the technology which is linked with the use of ramie (chemical degumming, shortening of fibres, worsted yarn spinning, manufacture of blended yarns) can also be applied for fibres of *G. diversifolia*.

The ultimate fibres with their large lumina and thus low mass density can be used as renewable raw material in composites for technical applications as well.

## 7 Literaturverzeichnis

- AHMED, M., CHATTOPADHYAYA, A. K. CHAPHEKAR, GAIKWAD, R. S., 2002: Processing of cotton-ramie blends on short staple spinning system. *Journal of the Textile Association* **63**, 155-159
- ALBERTS, B., BRAY, D., LEWIS, J., RAFF, M., ROBERTS, K., WATSON, J. D., 1997: *Molekularbiologie der Zelle*. 3. Aufl., Weinheim: VCH
- ALKIO, M., SCHUBERT, A., DIEPENBROCK, W., GRIMM, E., 2003: Effect of source-sink ratio on seed set and filling in sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Plant, Cell and Environment* **26**, 1609-1619
- ANGELINI, L. G., LAZZARI, A., LEVITA, G., FONTANELLI, D., BOZZI, C., 2000: Ramie (*Boehmeria nivea* (L.) Gaud.) and Spanish Broom (*Spartium junceum* L.) fibres for composite materials: agronomical aspects, morphology and mechanical properties. *Industrial Crops and Products* **11**, 145-161
- BALLY, W., 1957: Die Bedeutung der Ramiefaser. *CIBA-Rundschau* **132**, 1-31
- BATRA, S. K., 1985: Other long vegetable fibers. In: LEWIN, M., PEARCE, E. M. (Hrsg.), *handbook of fiber science and technology 4, fiber chemistry*, New York: M. Dekker, 727-807
- BLEDZKI, A. K., GASSAN, J., 1996: Natürliche Verstärkungsfasern für Kunststoffe. *Spektrum der Wissenschaft* **2**, 96-100
- BOBETH, W. (Hrsg.), 1993: *Textile Faserstoffe*. Berlin: Springer
- BRAUNE, W., LEMAN, A., TAUBERT, H., 1991: *Pflanzenanatomisches Praktikum I*. 6. Aufl., Jena: Fischer
- BREDEMANN, G., 1940a: Fasergehalt und Faserausbeute bei Fasernesseln in verschiedener Stengelhöhe. *Faserforschung* **14**, 148-155
- BREDEMANN, G., 1940b: Fasergehalt und Faserausbeute beim Hanf in verschiedener Stengelhöhe. *Der Forschungsdienst* **10**, 57-67
- BREDEMANN, G., 1940c: Fasergehalt und Faserausbeute der Fasernesseln bei verschiedener Erntezeit. *Faserforschung* **14**, 193-206

- BREDEMANN, G., 1959: Die Große Brennessel *Urtica dioica* L.. Berlin: Akademie-Verlag
- BRETT, C. T., WALDRON, K., 1990: Physiology and biochemistry of plant cell walls. In: BLACK, M., CHAPMAN, J. (Hrsg.), Topics in plant physiology 2, London: Unwin Hyman, 194 S.
- BUKATSCH, F., GLÖCKNER, W. (Hrsg.), 1977: Experimentelle Schulchemie. Organische Chemie 2. Köln: Aulis
- CANNING, A. J., GREEN, J. H. S., 1986: Nepalese 'allo' (*Girardinia*): improved processing and dyeing. Tropical Science **26**, 79-82
- CATLING, D., GRAYSON, J., 1998: Identification of vegetable fibres. London: Archetype
- DEMPSEY, J. M., 1975: Fiber crops. Gainesville: Univ.-Press of Florida
- DOLMETSCH, H., 1970: Gesetzmäßige physikalische Veränderungen der Fibrillarstruktur in Spinnfasern aus Cellulose und synthetischen Polymeren. Melliand Textilberichte **51**, 182-190
- DREYER, J., 1994: Inkulturnahme und qualitative Sortendifferenzierung ausgewählter Klone der Zuchtfasernessel *Urtica dioica* L. unter besonderer Beachtung des Fasergehaltes. Hamburg, Universität, Fachbereich Biologie, Diplomarbeit
- DREYLING, G., 2002: Naturtextilien aus Nessel – innovative Technologie- und Produktionsentwicklung für die Textilindustrie. Projektbericht Teilprojekt AZ 11818 (Deutsche Bundesstiftung Umwelt), Universität Hamburg
- DUNSMORE, J. R., 1987: KHARDEP – rural development in the hills of Nepal. Surbiton: Land Resources Development Centre
- DUNSMORE, J. R., 1998: Microenterprise development: traditional skills and the reduction of poverty in highland Nepal. Himalayan Research Bulletin **18**, 22-27
- DUNSMORE, J. R., 2000: Identification of potential opportunity for income generation through himalayan nettle, allo. Preliminary draft report by the collaborative consultant. Hill Agriculture Research Project (HARP PP – 48/99)
- DUNSMORE, S., 1985: The nettle in Nepal. A cottage industry. Surbiton: Land Resources Development Centre

- DUNSMORE, S., 1993: Nepalese textiles. London: British Museum Press
- ESAU, K., 1969: Pflanzenanatomie. Stuttgart: Gustav Fischer
- FREY-WYSSLING, A., 1934: Über die Verschiebungsfiguren zellulosischer Zellwände. Zeitschrift für wissenschaftliche Mikroskopie und mikroskopische Technik **51**, 29-36
- FREY-WYSSLING, A., 1953: Über den Feinbau der Stauchlinien in überbeanspruchtem Holz. Holz als Roh- und Werkstoff **11**, 283-288
- FREY-WYSSLING, A., 1976: The plant cell-wall. In: LINSBAUER, K., (Begr.), Handbuch der Pflanzenanatomie 3 (4), 2. Aufl., Berlin: Bornträger
- FRIIS, I., 1982: A synopsis of *Girardinia* (Urticaceae). In: Kew Bulletin 36, 143-157, London: Her Majesty's stationery office,
- FRIIS, I., 1989a: Urticaceae. In: POLHILL, R. M. (Hrsg.). Flora of tropical East Africa, Rotterdam: Balkema, 65 S.
- FRIIS, I., 1989b: Urticaceae. In: HEDBERG, I., EDWARDS, S. (Hrsg.). Flora of Ethiopia 3, Addis Abeba: National Herbarium, 302-326
- GRIGNET, J., 1979: Die Messung der Faserlänge - Bedeutung und Anwendung. Melliand-Textilberichte **6**, 119-122
- GUTMANN, M., 1995: Improved staining procedures for photographic documentation of phenolic deposits in semithin sections of plant tissue. Journal of Microscopy **179**, 227-281
- HANSELKA, H., 1998: Faserverbundwerkstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen für den ökologischen Leichtbau. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik **29**, 300-311
- HARNACK, S., 1999: Untersuchungen zur Keimung von Saatgut der Faserpflanze *Girardinia diversifolia* (LINK) FRIIS (Urticaceae). Universität Hamburg, Fachbereich Biologie, Examensarbeit
- HAUDEK, H.-W., VITI, E., 1980: Textilfasern. Wien-Perchtoldsdorf: Bondi
- HERZOG, A., 1898: Beiträge zur Kenntnis der Flachsfaser. Oesterreichische Chemiker-Zeitung **10**, 310-312
- HERZOG, A., 1926: Die Unterscheidung der Flachs- und Hanfpflanze. Berlin: Springer

- HERZOG, A., 1927: Eigenschaften der Fasern und Garne aus Brennesseln. *Melliand Textilberichte* **8**, 37-38, 146-147, 233-237
- HERZOG, A., 1955: *Mikrophotographischer Atlas der technisch wichtigen Pflanzenfasern. Text- und Atlasteil.* Berlin: Akademie-Verlag
- HERZOG, W., 1989: Objektive Qualitätsprüfung von Flachs. *Melliand Textilberichte* **70**, 7 – 11
- HOCK, C. W., 1942: Microscopic structure of flax and related fibers. *Journal of Research of the National Bureau of Standards / US Department of Commerce* **29**, 41-50
- HÖHNEL, F. v., 1905: *Die Mikroskopie der technisch verwendeten Faserstoffe.* 2. Aufl., Wien: Hartleben
- ILLIES, Z. M., 1947: Untersuchungen über die Auslesemöglichkeit faserreicher Kreuzungsnachkommen auf mikroskopischem Wege bei züchterischen Arbeiten. Universität Hamburg, Fachbereich Biologie, Dissertation
- ILVESSALO-PFÄFFLIN, M. - S., 1995: *Fiber atlas.* Berlin: Springer
- JANSSEN, J., LAATZ, W., 1999: *Statistische Datenanalyse mit SPSS für Windows.* 3. Aufl., Berlin: Springer
- JARMAN, C. G., CANNING, A. J. und MYKOLUK, S., 1978: Cultivation, extraction and processing of ramie fibre: a review. *Tropical Science* **20**, 91-116
- KALITA, B., 1996: Ramie-blended yarns. *Indian Textile Journal* **107**, 50-51
- KEIJZER, P., METZ, P. L. J., 1992: Breeding of flax for fibre production in western Europe. In: SHARMA, H. S. S., SUMERE, C. F. (Hrsg.), 1992, *the biology and processing of flax*, Belfast: M. Publication, 33-66
- KHALILI, S., AKIN, D. E., PETTERSON, B., HENRIKSSON, G., 2002: Fibernodes in flax and other bast fibers. *Angewandte Botanik* **76**, 133-138
- KHAN, A. H., KHAN, K. A., HASHMI, P. M., 1968: Studies in length of individual fibre cells of jute, flax, cotton and some other vegetable fibres under different treatments. *Pakistan Journal of Science* **20**, 149-155
- KIRBY, R. H., 1963: *Vegetable fibres.* London: Leonard Hill Books

- KLEINIG, H., SITTE, P. (Begr.), 1999: Zellbiologie. 4. Aufl., Stuttgart: Fischer
- KOHLER, R., WEDLER, M., 1996: Anwendungen von Naturfasern in technischen Bereichen. *Mittex* **103**, 7-10
- KRABBE, G., 1887: Ein Beitrag zur Kenntnis der Structur und des Wachstums vegetabilischer Zellhäute. *Pringsh. Jahrb. wiss. Botanik* **18**, 346-361
- KRAIS, P., BLITZ, K., 1922: Ausbeutebestimmungsversuche an Hanfpflanzen. *Textile Forschung* **4**, 16-20
- KUHN, F. W., 1920: Stapel. *Melliand Textilberichte* **1**, 14, 37-38, 59-60, 85-87, 109-110, 133-134, 155-156, 179-181, 197-199, 226-228, 251-253, 273-276
- KUNDU, B. C., 1942: The anatomy of two indian fibre plants, *Cannabis* and *Corchorus* with special reference to fibre distribution and development. *Journal of the Indian Botanical Society* **21**, 93-128
- KUNDU, B. C., PRESTON, R. D., 1940: The fine structure of phloem fibres, I. Untreated and swollen hemp. *Proceedings of the Royal Society of London, Series B*, **128**, 214-231
- KUNDU, B. C., SEN, S., 1960: Origin and development of fibres in ramie (*Boehmeria nivea* Gaud.). *Proceedings of the National Institute of Sciences of India* **26 B**, 190-198
- LANGENHOVE, L. v., BRUGGEMAN, J. P., 1992: Methods of fibre analysis. In: SHARMA, H. S. S., SUMERE, C. F. (Hrsg.), 1992, the biology and processing of flax, Belfast: M. Publication, 311-327
- LATZKE, P. M., 1988: Textile Fasern: Rasterelektronenmikroskopie der Chemie- und Naturfasern. Frankfurt a. Main: Dt. Fachverlag
- LATZKE, P. M., HESSE, R., 1974: Textilien. Untersuchen - Prüfen - Auswerten. Berlin: Schiele & Schön
- LUNIAK, B., 1949: Ramie. Zürich: Leemann
- MAITI, R. K., 1970: Fibre microscopy for the study of performance of fibre crops in the different fields of research. *Bulletin of the Botanical Society of Bengal* **24**, 37-44

- MAITI, R. K., 1973: Fibre microscopy of ramie (*Boehmeria nivea* Gaud.) with special reference to its response to histo-chemical reactions and microscopic determination of kindred fibre. *Bulletin of the Botanical Society of Bengal* **27**, 59-64
- MANANDHAR, N. P., 1989: Useful wild plants of Nepal. Stuttgart: Franz Steiner
- MEDIAVILLA, V., LEUPIN, M., KELLER, A., 2001: Influence of the growth stage of industrial hemp on the yields formation in relation to certain fibre quality traits. *Industrial Crops and Products* **13**, 49-56
- MENZEL, A., 1937: Beiträge zur Kenntnis von Bau und Entwicklung der Hanfpflanze *Cannabis sativa* L. mit besonderer Berücksichtigung der Faser. *Faserforschung* **13**, 1-14
- MORTON, W. E., HEARLE, J. W. S., 1993: Physical properties of textile fibres. 3. Aufl., Manchester: Textile Institute
- MUKHERJEE, P. K., 1998a: Ramie holds cast potential. *Indian Textile Journal* **108**, 42-44
- MUKHERJEE, P. K., 1998b: Ramie – king of natural fibres. *Asian Textile Journal* **7**, 38-41
- MÜLLER, M., 1990: Anwendung und Interpretation von Langstapel-Messdaten in der Praxis. *International Textile Bulletin* **4**, 48-57
- NETTELNSTROTH, K., 1968: Zur Morphologie der Leinenfaser. *Melliand Textilberichte* **49**, 565-572
- NEWMAN, S. B., RIDDELL, H. F., 1954: The drying twist in plant fibres. *Textile Research Journal* **24**, 113-117
- NODDER, C. R., 1922: A study on flax and kindred fibers. I. Some observations on the behaviour and structure of textile fibres, with an account of convenient method of distinguishing flax from hemp. *The Journal of the Textile Institute. Proceedings* **13**, 161-171
- ORTH, H., 1971: Raster-Elektronenmikroskopie in der Textilforschung. In: FREUND, H. (Hrsg.), *Handbuch der Mikroskopie in der Technik* 6 (1): Mikroskopie der Textilfasern und Textilien, Frankfurt a. M.: Umschau, 419-441

- OSBORNE, G., 1935a: Micro-analysis of textile fibres. II. Observations on the structure of ramie. *Textile Research Journal* **5**, 75-91
- OSBORNE, G., 1935b: Micro-analysis of textile fibres. IV. Observations on the structure of flax, manila and jute. *Textile Research Journal* **5**, 351-369, 431-459
- PANDAY, S. N., 1998: The versatile ramie. *Indian Textile Journal* **108**, 12-18
- PRESTON, R. D., 1974: *The physical biology of plant cell walls*. London: Chapman and Hall
- PRIESTLEY, J. H., 1930: Studies in the physiology of cambial activity II. The concept of sliding growth. *The Phytologist* **29**, 6-141
- RABÉCHAULT, H., 1951: *La Ramie – Étude morphologique et taxonomique en vue de la sélection*. Ph.D. Thesis, Montpellier
- RAHMAN, M. M. M., 1978: A study by scanning electron microscopy of the progressive delignification of jute fibres. *Journal of the Textile Institute* **9**, 287-293
- RAHMAN, M. M. M., 1979: Morphology of the fibres of jute, flax and hemp as seen under a scanning electron microscope. *Indian J. Agric. Sci.* **49**, 483-487
- RAY, P. K., 1975: The surface topology of ramie fibre: Observations by scanning electron microscopy. *Journal of the Textile Institute* **66**, 401-406
- REIMERS, H., 1919: Anatomie einheimischer Faserpflanzen. IV. Nessel. *Mitteilungen des Deutschen Forschungsinstituts für Textilstoffe* **37**, 71-77
- REIMERS, H., 1921a: Über die innere Struktur der Bastfasern. *Angewandte Botanik* **3**, 65-71
- REIMERS, H., 1921b: Über die innere Struktur der Bastfasern. *Textilberichte* **19**, 367-368, 381-383
- REIMERS, H., 1921c: Über die innere Struktur der Bastfasern. Nachtrag. *Textilberichte* **22**, 420
- REIMERS, H., 1922: Die Verschiedenheiten im strukturellen Aufbau der Bastfasern in ihrer Bedeutung für die technische Warenkunde. *Mitteilungen des Deutschen Forschungsinstituts für Textilstoffe* **40**, 109-287

- RENNEBAUM, H., GRIMM, E., DIEPENBROCK, 1999: Genotypische und umweltbedingte Variabilität der Faserleistung und -qualität von Ölleintypen im Hinblick auf die Nutzung von Öl und Kurzfaser. Projektbericht Gemeinschaft zur Förderung der privaten deutschen Pflanzenzüchtung, ÖE 96/95 NR (94 NR130-F-A), Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
- RENNEBAUM, H., GRIMM, E., WARNSTORFF, K., DIEPENBROCK, W., 2002: Fibre quality of linseed (*Linum usitatissimum* L.) and the assessment of genotype for use of fibres as a by-product. *Industrial Crops and Products* **16**, 201-215
- RICHTER, O., 1928: Anatomie und Mikrochemie der Textil- und Papierfasern aus dem Pflanzenreiche. In: GRAFE, V. (Hrsg.), *Grafes Handbuch der organischen Warenkunde* 2 (2), Stuttgart: Poeschel, 136 S.
- ROELOFSEN, P. A., 1951: Contradictory data on spiral structures in the secondary cell wall of fibers of flax, hemp, and ramie. *Textile Research Journal* **21**, 412-418
- ROELOFSEN, P. A., 1959: The plant cell-wall. In: LINSBAUER, K., (Begr.), *Handbuch der Pflanzenanatomie* 3 (4), Berlin: Bornträger, 335 S.
- ROLLINS, M. L., 1945: Applications of nitrogen dioxide treatment to the microscopy of fiber cell wall structure. *Textile Research Journal* **15**, 65-77
- RÜEGG, J., COLIJN, J., 1994: Ramie - Hochleistungsfaser aus der Natur. *Textilveredlung* **29**, 9-13
- SCHEER-TRIEBEL, M., KRAUME, S., FRANKEN, S., 1997: Entwicklung und Abreife von Lein im Hinblick auf die Wahl des Erntetermins. *VDI/MEG Kolloquium Agrartechnik* **22**, 44-66
- SCHENEK, A., NEBEL, K., TUBACH, M., BLUM, A., HINKEL, I., UNGERER, P., GOTH, B., 1993: Einsatzmöglichkeiten von dampfaufgeschlossenen Flachsfasern in der Spinnerei. *Melliand Textilberichte* **6**, 465-474
- SCHENEK, A., 2001: *Naturfaser-Lexikon*. Frankfurt a. M.: Deutscher Fachverlag
- SCHMIDT, G., 1921: Beiträge zur Kenntnis der Ramiefaser unter besonderer Berücksichtigung ihrer mikroskopischen Diagnostik und ihrer Aufschliessung. Universität Hamburg, Fachbereich Biologie, Dissertation

- SCHOCH-BODMER, H., HUBER, P., 1945: Das Spitzenwachstum der Bastfasern bei *Linum perenne* L.. *Experientia* **1**, 327-328
- SCHOCH-BODMER, H., HUBER, P., 1949: Über Flächenwachstum, insbesondere über Fasergabelungen. *Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich* **94**, 188-193
- SCHOCH-BODMER, H., HUBER, P., 1951: Das Spitzenwachstum der Bastfasern bei *Linum usitatissimum* und *Linum perenne*. *Berichte der Schweizerischen Botanischen Gesellschaft* **61**, 377-404
- SCHOCH-BODMER, H., HUBER, P., 1952: Local apical growth and forking in secondary fibres. *Proceedings of the Leeds Philosophical and Literary Society / Scientific Section* **6**, 25-32
- SETHMANN, A., 1998: Beiträge zur morphologischen und anatomischen Untersuchung extensiv genutzter Faserpflanzen aus der Familie der Urticaceae. Universität Hamburg, Fachbereich Biologie, Diplomarbeit
- SHRESTHA, R., 1994: Nettle fibre exploitation in the Makalu-Barun conservation area. Report 22. Department of National Parks and Wildlife Conservation, Nepal
- SHRESTHA, R., 1996: Study on himalayan nettle fibre exploitation in the western Nepal. Research Center for Applied Science and Technology, Tribhuvan University, Kathmandu, Nepal
- SHRESTHA, R., 1998: A study on prospects of the himalayan nettle & yarsagumba. Research Center for Applied Science and Technology, Tribhuvan University, Kathmandu, Nepal
- SHRESTHA, R., 1999: Studies on the himalayan nettle (*Girardinia diversifolia*) in Nepal. A sabbatical leave report. Research Center for Applied Science and Technology, Tribhuvan University, Kathmandu, Nepal
- SINGH, S. C., SHRESTHA, R., 1984: Investigation on under-exploited plant fibres of Nepal. Research Centre for Applied Science and Technology, Tribhuvan University, Kathmandu, Nepal
- SINGH, S. C., SHRESTHA, R., 1985: A study of the himalayan nettle. Research Center for Applied Science and Technology, Tribhuvan University, Kathmandu, Nepal

- SINGH, S. C., SHRESTHA, R., 1987: Extraction and chemical analysis of himalayan nettle fibre. *Research and Industry* **32**, 259-262
- SINGH, S. C., SHRESTHA, R., 1988: *Girardinia diversifolia* (Urticaceae), a non-conventional fiber resource in Nepal. *Economic Botany* **42**, 445-447
- SINGH, S. C., SHRESTHA, R., 1989: Observations on ecodemes in *Girardinia diversifolia* (LINK FRIIS, (Urticaceae) in Nepal. *Pakistan Journal of Botany* **21**, 185-190
- SONNTAG, P., 1909: Die duktilen Pflanzenfasern, der Bau ihrer mechanischen Zellen und die etwaigen Ursachen der Duktilität. *Flora oder Allgemeine Botanische Zeitung* **99**, 203-259
- SONNTAG, P., 1911: Die Torsionserscheinungen der Pflanzenfasern beim Anfeuchten und die mikroskopische Unterscheidung von Hanf und Flachs. *Jahresbericht der Vereinigung für Angewandte Botanik* **9**, 140-163
- STOUT, H. P., 1985: Jute and kenaf. In: LEWIN, M., PEARCE, E. M. (Hrsg.), *handbook of fiber science and technology 4, fiber chemistry*, New York: M. Dekker, 702-726
- TAMMES, T., 1907: *Der Flachsstengel*. Haarlem: Loosjes
- TOBLER, F., 1957: Die mechanischen Elemente und das mechanische System. In: LINSBAUER, K., (Begr.), *Handbuch der Pflanzenanatomie 4 (6)*, 2. Aufl., Berlin: Bornträger, 60 S.
- TURNER, A. J., 1949: The structure of the textile fibers - the long vegetable fibres. *Proceedings of the Journal of the Textile Institute* **40**, 972-984
- ULLRICH, J., 1950: Zur Morphologie und Entwicklungsgeschichte der Fasern von *Asclepias* und *Apogynum*. *Berichte der Deutschen Botanischen Gesellschaft* **43**, 100-109
- VDLUFA, 1991: *Methodenbuch Band I. Die Untersuchung von Böden*. 4. Aufl., Darmstadt: VDLUFA-Verlag
- VOGEL, S., 2000: *Von Grashalmen und Hochhäusern*. Weinheim: WILEY-VCH

## Glossar

**Bastfasern:** Stängelfasern (Weichfasern, im Gegensatz zu Blattfasern = Hartfasern), z. B. Flachs, Hanf, Ramie

**Bekleidungsphysiologische Eigenschaften:** Feuchtigkeitsaufnahme, Luftdurchlässigkeit, Wärmeleitfähigkeit, Hauerträglichkeit usw.

**Bioverbund:** Matrix und Fasern bestehen aus nachwachsenden Rohstoffen und sind kompostierbar

**Cotonisierung:** Zerlegen der Faserbündel in Einzelfasern („Verbaumwollung“)

**Degummierung:** Lösen der Faserzellen aus dem Zellverband und Entfernung der Verunreinigungen (Gumsubstanzen) an den Fasern (durch mikrobiellen, enzymatischen oder chemischen Aufschluss)

**Dekortikation, Dekortieren:** Entholzung des Stängels und Isolierung des die Fasern enthaltenden äußeren Stängelbereiches

**Elementarfasern:** aus **einer** Faserzelle bestehend, im Gegensatz zu Faserbündeln

**Kammgarn:** Garn, das nach dem Kammgarnspinnverfahren hergestellt wird. Es ist glatt und gleichmäßig, weist eine geringe Haarigkeit (wenig kurze Fasern) auf und wird vorwiegend als Zwirn in der Oberbekleidung (Anzüge, Hosen, gleichmäßige Gesticke, Jersey-Pullover usw.) eingesetzt

**Kammgarnspinnverfahren:** Spinnverfahren für lange Fasern. Erzeugt hochwertige, gleichmäßige und fein ausgesponnen Garne. Durch Kämmen werden kurze Fasern und Verunreinigungen ausgesondert. Es entsteht der Kammzug, der zu Kammgarnten versponnen (Ringspinnmaschinen) wird

**Primärfasern:** Kurzform für primäre Phloemfasern, Fasern des primären Phloems

**Ramie:** *Boehmeria nivea* (L.) GAUDICH., Bezeichnung für die Pflanze und ihre Fasern

**Rinde:** Füllgewebe zwischen Leitbündelkranz und Epidermis. Die Fasern werden oft als Teil der Rinde gesehen, weil das Phloem hier zum Zeitpunkt der Faserernte nicht mehr erkennbar (obliteriert) ist. Botanisch korrekt gehören die Fasern zum primären Phloem

**Sekundärfasern:** Kurzform für sekundäre Phloemfasern, Fasern des vom Kambium gebildeten sekundären Phloems

**Strecken, Verstrecken:** Ausstrecken und Längsorientierung der textilen Spinnfasern zur Erreichung der maximalen Faserlänge für das Spinnen

**Technische Fasern:** Über die Mittellamellen zu einem Faserbündel zusammengefasste Elementarfasern, Bastfaserbündel (Stängelfasern), z. B. Flachs, Hanf und Jute

**Werg:** Kurzfaserabfälle, die zum Teil verwertbar sind

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abb. 1:</b> Geographische Lage des Ortes der Fasergewinnung: Saliza.....	4
<b>Abb. 2:</b> Fasergewinnung in Saliza.....	6
<b>Abb. 3:</b> Fasergewinnung in Saliza - Fortsetzung.....	7
<b>Abb. 4:</b> Mit Fasern von <i>G. diversifolia</i> in Nepal hergestellte Produkte .....	8
<b>Abb. 5:</b> Aus dem Stängel isoliertes Faserbündel zur Faserentnahme.....	13
<b>Abb. 6:</b> (A) Schema eines Stängelquerschnittes und (B) Zeichnung eines Stängelquerschnittsegmentes von <i>G. diversifolia</i> .....	27
<b>Abb. 7:</b> Stängelquerschnittausschnitte von <i>G. diversifolia</i> : (A) Faserzellen mit großen Lumina, (B) kollabierte Faserzellen an der Stängelbasis, (C) Sekundärfasern, (D, E) mit Tannin gefüllte Faserzellen.....	28
<b>Abb. 8:</b> Primäre Phloemfasern von <i>G. diversifolia</i> in Stängelquerschnitten verschiedener Stängelabschnitte. (A) Querschnitt aus dem oberen (Stängelspitze), (B) dem zweiten und (C) dem mittleren Stängelfünftel .....	30
<b>Abb. 9:</b> Stängelquerschnitte der Stängelbasis von Ramie ( <i>Boehmeria nivea</i> (L.) GAUDICH.). (A) Großlumige und teilweise lignifizierte Primärfaserzellen und Sekundärfasern, (B) kleine Gruppen von Primärfasern und einzelne Fasern, (C) englumige Faserzellen, (D) lignifizierte Sekundärfasern .....	31
<b>Abb. 10:</b> (A) Fasermasse und (B) Fasergehalt, (C) Anteil des Fasergehaltes einzelner Stängelabschnitte am Gesamtfasergehalt des Stängels, (D) Faser-, Holz-, und Restgewebeanteil der verschiedenen Stängelabschnitte (1 – 5) und (E) Färbungen isolierter Fasern .....	34
<b>Abb. 11:</b> Schematische Definition der Drehrichtung .....	35
<b>Abb. 12:</b> Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der Fasern von <i>G. diversifolia</i> . (A) Querschnitte von Fasern der Stängelbasis, (B) Faserwindungen (rechts gedreht) einer Faser und (C) handgesponnene Garnprobe aus Nepal.....	36
<b>Abb. 13:</b> Formen der Primärfaserspitzen von <i>G. diversifolia</i> .....	37

<b>Abb. 14:</b> Mit Tannin gefüllte Protoplasten von <i>G. diversifolia</i> . (A) Faser-Längsansicht und (B) Faserquellung mit Chlorzinkjod.....	38
<b>Abb. 15:</b> Querstreifungen und Verschiebungen an Fasern von (A – C) <i>G. diversifolia</i> und (D) Ramie ( <i>B. nivea</i> .....	39
<b>Abb. 16:</b> Primärwand von Fasern ( <i>G. diversifolia</i> ) unter Quellung mit Cuoxam. (A) Abgelöste Primärwandreste, (B) Primärwandaufsicht, (C) tonnenförmige Aufquellung der Faser mit gürtelförmiger Einschnürung durch die Primärwand.....	40
<b>Abb. 17:</b> Sekundärwandstruktur in der Faseraufsicht ( <i>G. diversifolia</i> ). (A) Bezeichnung der Spiraltextrur. (B) Spiraltextrur in S-Form und (C) in Z-Form, (D) fibrilläre Struktur .....	42
<b>Abb. 18:</b> Tüpfel der Primärfasern von <i>G. diversifolia</i> . (A) Die Lage der Tüpfel in der Faseraufsicht, (B) Faserlängsschnitt, (C) Tüpfel nach Quellung in Cuoxam, (D) rasterelektronenmikroskopische Aufnahme .....	43
<b>Abb. 19:</b> Sekundärwandstruktur der Fasern von <i>G. diversifolia</i> im Querschnitt. (A) Lamellenstruktur der Sekundärwand mit Tüpfel, (B) Sekundärwandschichtung mit deutlicher Schichtgrenze und radialen Strukturen (C) Ablösung der inneren Sekundärwand, (D) unterschiedliche Schichtenstruktur, (E) mikroskopische Aufnahme und Zeichnung einer Faserzelle .....	45
<b>Abb. 20:</b> Vielgestaltigkeit der Sekundärfaserspitzen.....	46
<b>Abb. 21:</b> Querschnitt der Sekundärfasern von <i>G. diversifolia</i> .....	47
<b>Abb. 22:</b> (A - E) Histogramme der Faserlängenhäufigkeitsverteilung mit Kurve der Summenhäufigkeit und (F) Box- und Whiskerplot der Faserlängen.....	50
<b>Abb. 23:</b> (A - E) Histogramme der Faserfeinheitsverteilung Proben und (F) Box- und Whiskerplot der Faserfeinheit.....	51
<b>Abb. 24:</b> Zusammenhang zwischen (A) Faserlänge und Fasermasse und (B) Faserlänge und Feinheit.....	52
<b>Abb. 25:</b> Graphische Darstellung der Lasermikrometerwerte.....	53

---

<b>Abb. 26:</b> (A) Faserdicken der verschiedenen Stängelabschnitte (1 – 5) und (B) Ausschnitte von Querschnitten der Mitte der Stängelabschnitte (1 – 5) .....	55
<b>Abb. 27:</b> (A) Höchstzugkraft und (B) Zugfestigkeit der Fasern der verschiedenen Stängelabschnitte (1 – 5) .....	56
<b>Abb. 28:</b> (A) Kraft-Längenänderungs-Kurve zur Darstellung des Dehnungsmoduls, (B) Dehnungsmodul und (C) Höchstzugkraftdehnung der Fasern der verschiedenen Stängelabschnitte (1 – 5).....	58
<b>Abb. 29:</b> Faserfeinheit in den verschiedenen Stängelabschnitten (1 – 5).....	59
<b>Abb. 30:</b> (A) Fasermodell mit Darstellung der Faserwindung und Stellung der Laser während der Dickenmessung sowie (B) graphische Darstellung der Lasermikrometerwerte mit Position des Faserquerschnittes in den Messstrahlen .....	78
<b>Abb. 31:</b> Schema zur mikroskopischen Identifizierung von <i>G. diversifolia</i> .....	86

## Tabellenverzeichnis

<b>Tab. 1:</b> Temperaturen, Niederschläge und Luftfeuchte in den Untersuchungsjahren 1999 - 2001 .....	10
<b>Tab. 2:</b> Bodenanalysedaten .....	10
<b>Tab. 3:</b> Übersicht der verwendeten Färbungen für die Lichtmikroskopie .....	17
<b>Tab. 4:</b> Übersicht der bestimmten Parameter mit Kurzbeschreibung .....	23
<b>Tab. 5:</b> Mikroskopische Messergebnisse der Länge und des Durchmessers von Sekundärfasern.....	48
<b>Tab. 6:</b> Prozentuale Faserlängenanteile.....	49
<b>Tab. 7:</b> Faserdicke und im Rahmen der Zugprüfung gewonnene Daten für die verschiedenen Stängelabschnitte (1 – 5).....	60
<b>Tab. 8:</b> Ergebnisse verschiedener Untersuchungen der Spiraltextrur und Drehrichtungen .....	73
<b>Tab. 9:</b> Länge und Durchmesser von Sekundärfasern.....	77
<b>Tab. 10:</b> Literaturwerte der Faserlänge und Faserdicke ( <i>G. diversifolia</i> ) .....	80
<b>Tab. 11:</b> Faserparameter von geprüften Elementarfasern verschiedener Autoren .....	85

## Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung	NaOH	Natronlauge
$A_{\text{Ellipse}}$	Fläche einer Ellipse	$\text{NO}_3$	Nitrat
Aqua dest.	destilliertes Wasser	Nr.	Nummer
Begr.	Begründer	pH	negativer dekadischer Logarithmus der Was- serstoffionenkonzen- tration
bzw.	beziehungsweise		
ca.	circa		
$\text{CaCl}_2$	Calciumchlorid	$\text{P}_2\text{O}_5$	Phosphorpentoxid
cm	Zentimeter ( $10^{-2}$ Meter)	S.	Seiten
dtex	Dezitetex ( $10^{-1}$ tex)	s	Sekunden
cN	Centinewton ( $10^{-2}$ Newton)	s.	siehe
° ' "E	östliche Länge	s. o.	siehe oben
e.g.	( <i>exempli gratia</i> ) zum Beispiel (englisch)	s. u.	siehe unten
GPa	Gigapascal ( $10^9$ Pascal)	Tab.	Tabelle
h	Stunden	usw.	und so weiter
Hrsg.	Herausgeber	Vb	Variationsbreite
Kap.	Kapitel	Vk	Variationskoeffizient
$\text{K}_2\text{O}$	Kaliumoxid	$\bar{x}$	Mittelwert
kV	Kilovolt ( $10^3$ Volt)	z. B.	zum Beispiel
l	Liter	z.T.	zum Teil
m	Meter		
Med	Median		
mg	Milligramm ( $10^{-3}$ Meter)		
MgO	Magnesiumoxid		
mm	Millimeter		
MPa	Megapascal ( $10^6$ Pascal)		
m/v	Masse pro Volumen		
n	Stichprobenumfang		
N	Newton		
° ' "N	nördliche Breite		

## Danksagung

Frau Prof. Dr. Gisela Dreyling danke ich ganz herzlich für die interessante Themenstellung. Ihre freundliche Unterstützung und die Diskussionen, besonders in der Endphase, waren sehr hilfreich.

Herrn Prof. Dr. Reinhard Lieberei bin ich für die Erstellung von Gutachten und für wertvolle Hinweise dankbar, die diese Arbeit mitgetragen haben.

Danken möchte ich der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg für die großzügig gewährte Unterstützung durch die Nutzung des Zugprüfstandes. Herrn Dr. Eckhard Grimm sei für die freundliche Aufnahme in die Arbeitsgruppe gedankt. Viele anregende Diskussionen, und besonders die zahlreichen kritischen Anmerkungen, haben zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Den Mitgliedern seiner Arbeitsgruppe habe ich es zu verdanken, dass ich mich dort stets sehr wohl gefühlt habe. Herrn Heinz Rennebaum danke ich für die Vermittlung von Know-how rund um die Zugprüfung.

Für tatkräftige und kompetente Unterstützung danke ich Frau Claudia Mählmann, Frau Diana Siegl, Frau Karen Dehn und Herrn Detlef Böhm. Hilfe zur Bildanalyse habe ich durch Frau Allmuth Andres und Frau Jutta Krüger erfahren. Weiterhin danke ich Herrn Peter Meißner stellvertretend für die Mitarbeiter des Versuchsfeldes.

Meinem Kollegen Herrn Agoes Mardiono Jacobeb danke ich für seine Freundlichkeit und Hilfsbereitschaft.

Frau Dr. Heidrun Wurm und Frau Ulrike Hermes bin ich für die Unterstützung bei der Literaturbeschaffung dankbar.

Dr. Christian Hennig danke ich für die statistische Beratung.

Frau Ang Diku Sherpa und Herr Lekha Bahadur Chhetri haben mich in Nepal in einer schwierigen politischen Situation sicher zu den Pflanzen geführt. Ihre Umsicht, die Weitergabe ihrer Erfahrungen, ihr Wissen und ihre Toleranz haben meinen Aufenthalt wesentlich geprägt. Die Frauen von Saliza haben mir ihre Gastfreundschaft entgegengebracht und geduldig ihr Können vorgeführt. Dhanyabaad!

Frau Susi Dunsmore bin ich für die Versorgung mit Informationen und Literatur über *G. diversifolia* dankbar.

Dem Graduiertenkolleg der Universität Hamburg danke ich für ein zweijähriges Stipendium und der Hansisches Universitätsstiftung für die finanzielle Unterstützung des Forschungsaufenthaltes in Nepal.

Ein Dankeschön an Frau Ulrike Meyer und Herrn Werner Hinsch für Ihren Beitrag.

Mein besonderer Dank gilt Jürgen Hinsch.

## Wissenschaftlicher Werdegang

Im Wintersemester 1991 begann ich das Studium der Biologie an der Universität Hamburg. Als Hauptfach wählte ich Angewandte Botanik mit dem Schwerpunkt Nutzpflanzenbiologie. Nach Beendigung der Diplomarbeit im Juni 1998 (Beiträge zur morphologischen und anatomischen Untersuchung extensiv genutzter Faserpflanzen aus der Familie der Urticaceae) begann ich im Oktober 1998 mit den Arbeiten für die Dissertation. Diese wurden von Oktober 1999 bis September 2001 durch ein Stipendium des Graduiertenkollegs der Universität Hamburg gefördert.

Im November 2000 konnte ich während eines Forschungsaufenthaltes in Nepal, die von mir im Rahmen der Dissertation untersuchte Art *Girardinia diversifolia* (LINK) FRIIS am natürlichen Standort vor dem soziokulturellen und ökonomischen Hintergrund ihrer Nutzung kennen lernen. Das dort Erfahrene bleibt mir unvergesslich und hat mich viele kleine und große Dinge anders sehen lassen.

Von April 2003 bis Dezember 2003 war ich für die Dauer eines Projektes wissenschaftliche Mitarbeiterin der Firma PPM (Pilot Pflanzenöltechnologie Magdeburg e.V.). In Kooperation mit der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg wurde an der Entwicklung eines Verfahrens zum Thema „Verbundwerkstoffe auf der Basis fein aufgeschlossener Naturfasern“ gearbeitet. Eine intensive und spannende Zeit, die mir die Erfahrung der Effektivität guter Zusammenarbeit in einem interdisziplinären Team ermöglicht hat.