

Untersuchungen zur Sprossachsenmorphologie von Faserhanf (*Cannabis sativa* L.) in Abhängigkeit von Aussaatzeit und Aussaatmenge

T. Schäfer und B. Honermeier

Investigations about the morphology from stems of fibre hemp (*Cannabis sativa* L.) dependent on sowing date and seed density

1 Einleitung

Für die in den Sprossachsen der Hanfpflanze lokalisierten Bastfasern bestehen vielseitige Verwendungsmöglichkeiten. Traditionelle und neue Anwendungsbereiche zur Verarbeitung von Hanffasern sind in der Textilindustrie, im Baustoffsektor, in der Papierindustrie, in der Automobilindustrie sowie in der Herstellung von Geotextilien zu sehen (BÓCSA et al., 2000; SCHÄFER, 1998). Es ist bekannt, dass die Phänologie der Pflanze durch Maßnahmen wie Sortenwahl, N-Düngung, Aussaatzeit oder Aussaatmenge beein-

flusst werden kann (VAN DER WERF, 1994; HÖPPNER und MENGE-HARTMANN, 1995; VOGL und HEß, 1997; CAPPELLETTO et al. 2001). So bewirken höhere Aussaatmengen und dichtere Bestände eine Verringerung der Pflanzlänge und eine Abnahme des Sprossachsendurchmessers (HÖPPNER und MENGE-HARTMANN, 1994; SCHÄFER et al., 1999; LÉON und VON FRANCKEN-WELZ, 2000). Dieser Effekt kann wiederum zur Ausbildung einer feineren Faser in den Sprossachsen führen (VAN DER WERF, 1994; SCHÄFER et al., 1999; KRÜGER, 2000; LÉON und VON FRANCKEN-WELZ, 2000). Die histologischen Ursachen für

Summary

The aim of the present study was to examine the influence of sowing date and seed density to fibre cell morphology. There was a great influence of the seed density to the size of the different cell sections in the diameter of the stem while the sowing date did nearly not effect this parameters. Higher seed density lead to thinner stems and smaller sizes of the cell sections in the stem diameter. The lower seed density created in both years nearly always higher areas of primary fibre cells. The portion of the fibre cell lumina was influenced by seed density and sowing date. It was supposed that the fibre cells of the delayed sowing date are not as ripe as the other ones and so they show a bigger cell lumina in the dense stand.

Key words: Fibre hemp, *Cannabis sativa*, fibre cells, microscopy, measurement of fibre cells.

Zusammenfassung

Ziel der durchgeführten Untersuchungen war es, den Einfluss der Aussaatzeit und der Aussaatmenge auf die Morphologie der Bastfaserzellen zu ermitteln. Es konnte festgestellt werden, dass die Dicke der einzelnen Zellschichten im Querschnitt der Sprossachse durch die Aussaatzeit kaum, durch die Aussaatmenge jedoch sehr deutlich verändert wurde. Eine höhere Aussaatmenge führte zu dünneren Sprossachsendurchmessern und zu schmaleren Querschnittsschichten. Die verarbeitungstechnisch bedeutsamen Primärfaserzellen waren in beiden Versuchsjahren fast immer bei geringerer Aussaatmenge durch größere Flächen gekennzeichnet. Beim Zelllumenanteil kam es zu Wechselwirkungen zwischen Aussaatzeit und Aussaatmenge. Es wird davon ausgegangen, dass die Faserzellen bei verzögerter Aussaatzeit eine geringere physiologische Ausreife besitzen und deshalb im dichteren Bestand ein deutlich größeres Zelllumen aufweisen.

Schlagworte: Faserhanf, *Cannabis sativa*, Faserzellen, Mikroskopie, Faserzellvermessung.

diese Zusammenhänge sind bislang nicht vollständig geklärt. Das Ziel der durchgeführten Untersuchungen bestand deshalb darin zu klären, welchen Einfluss die Faktoren Aussaatzeit und Aussaatmenge auf die Morphologie der Sprossachsen beim Hanf besitzen.

2 Material und Methoden

2.1 Standortbeschreibung

Grundlage für die mikroskopischen Untersuchungen bildete ein Feldversuch, der in den Jahren 1998 und 1999 in Deutschland durchgeführt wurde. Der Standort Rauischholzhausen liegt ca. 30 km östlich von Marburg an der Lahn (Längengrad: 8 °52' Min. Ost, Breitengrad: 50 °45' Min. Nord, 220 m über NN). Der Boden ist durch die Bodenart Lößlehm und durch den Bodentyp Parabraunerde bei einer Ackerzahl von 66 zu kennzeichnen. Die Niederschlagssummen lagen in den beiden Versuchsjahren während der Ontogenese der Hanfpflanzen (Mai – September) bei 282,5 mm (1998) bzw. 323,6 mm (1999) und die mittleren Lufttemperaturen betragen in diesem Zeitraum 15,5 °C (1998) bzw. 16,3 °C (1999).

2.2 Versuchsbeschreibung und Probenahme

Der Feldversuch wurde als dreifaktorielle, randomisierte Blockanlage (3 Wiederholungen) mit den Prüffaktoren Aussaatzeit (optimal, 14 Tage verzögert), Aussaatmenge (100 und 300 Körner m⁻²) und Sorte (Fedora 19, Felina 34, beide monözisch) bei einer Parzellengröße von 20 m² angelegt. Die optimale Aussaatzeit war an diesem Standort in den beiden Versuchsjahren am 4.5.1998 bzw. am 23.4.1999. Der N-Düngungsaufwand betrug in allen Varianten 100 kg N ha⁻¹ nach Aufgang. Im Frühjahr wurde im Boden ein N_{min}-Vorrat (0–90 cm) von ca. 40 kg N ha⁻¹ gemessen. Die Probenahme für die Mikroskopie erfolgte unmittelbar vor der Ernte der Pflanzen, als 50 % der Samen sich im Stadium der Vollreife befanden. Die hier vorgestellten Untersuchungen wurden nur mit der Sorte Fedora 19 durchgeführt. Den einzelnen Parzellen wurden jeweils 3 habituell weibliche Pflanzen entnommen, deren Pflanzenlänge und Habitus dem Mittel des Pflanzenbestandes der Parzelle entsprachen. Hieraus ergab sich pro Versuchsjahr eine Gesamtprobenzahl von 36 Pflanzen.

2.3 Probenfixierung und Auswertung

Nach Vermessung der Wuchshöhe und des Durchmessers in der Mitte der Sprossachse wurden aus diesem Bereich torienstückartige Segmente von ca. 3 mm Stärke herausgeschnitten und wie bei MENGE-HARTMANN und HÖPPNER (1995) beschrieben nach KARNOVSKY (1965) fixiert, in einer ansteigenden Acetonreihe entwässert, nacheinander in drei verschiedene Aceton-Harz-Mischungen überführt, hier jeweils 5 Tage belassen und anschließend in ein Epoxidharz (Spurr, mittel) eingebettet. Nach mindestens einer Woche Nachhärtungszeit konnten die Querschnittsstückchen am Ultramikrotom (Fa. Reichert, UM 2) 1,5 µm dick geschnitten, unter dem Lichtmikroskop (Fa. Olympus, Provis AX 70) mit einer CCD Kamera (Sony, 3 CCD, Modell XC 003P, „Donpisha“) aufgenommen und mit einem angeschlossenen Bildverarbeitungsprogramm (analySIS, Fa. Soft Imaging Systems) vermessen werden. In Übersichtsmessungen wurde die Dicke der einzelnen Schichten im Querschnitt der Sprossachse (Epidermis, Primärfaser, Sekundärfaser, sekundäres Phloem, Xylem, Mark) an je 10 Stellen pro Schnitt vermessen. Danach wurden die Fläche der Primärfaserzellen, deren Lumenfläche sowie die Zellwanddicke an je 50 Zellen pro Schnitt ermittelt. Dies ergab pro Versuchsjahr und Messbereich bei den Übersichtsmessungen eine Messwertanzahl von 360 und bei den Detailmessungen eine von 1800. Die statistische Auswertung erfolgte mit dem Programm SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) Version 10. Da weder bei den Übersichtsmessungen noch bei den Detailvermessungen Normalverteilung (Kolmogorow-Smirnov-Test) und Varianzhomogenität vorlagen (Levené-Test), wurde nur eine Varianzanalyse durchgeführt, wenn die Signifikanzschwelle $p < 0,001$ war. Die Ergebnisse wurden ansonsten mit dem nichtparametrischen „Mann-Whitney-U-Test“ verrechnet.

3 Ergebnisse

3.1 Pflanzenmorphologie

Betrachtet man zunächst die gesamte Pflanze, dann ist ein deutlicher Jahreseffekt hinsichtlich der Ausprägung der Pflanzenlänge und des Sprossachsendurchmessers festzustellen (s. Abbildung 1). Im zweiten Versuchsjahr waren kräftigere Einzelpflanzen zu beobachten. Die Erhöhung der Aussaatmenge von 100 auf 300 Samen m⁻² bewirkte in beiden Versuchsjahren sowohl eine Reduzierung der Halmlänge als

auch eine Verringerung des Sprossachsenquerschnitts (vgl. Abbildung 1). Die Verzögerung der Aussaatzeit hatte dagegen keinen gesicherten Einfluss auf diese Pflanzenmerkmale.

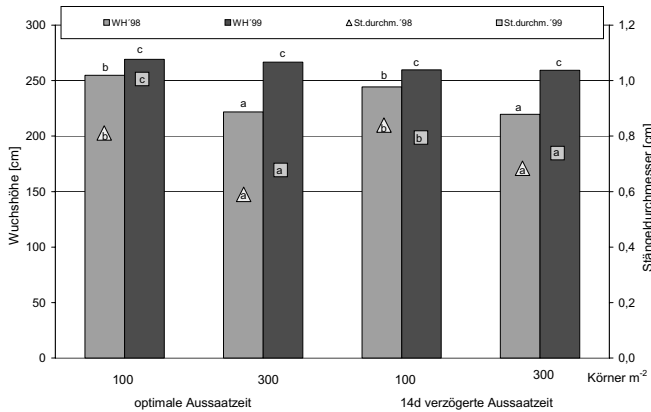


Abbildung 1: Länge und Durchmesser der Sprossachsen in Abhängigkeit von Aussaatzeit, Aussaatmenge und Jahr, Rauischholzhausen 1998–1999

Figure 1: Length and diameter of stems dependent on sowing date, seed density and year, Rauischholzhausen 1998–1999

3.2 Zellschichten im Sprossachsenquerschnitt

Mit Hilfe mikroskopischer Untersuchungen sollte im Anschluss an die Bestimmung phänologischer Kenngrößen geklärt werden, ob durch die Veränderung der Aussaatzeit und der Aussaatmenge auch eine Beeinflussung der Zellschichtdicken innerhalb des Sprossachsenquerschnittes gegeben ist. Diese Untersuchungen wurden nur im Jahr 1999 durchgeführt. Hierbei konnte festgestellt werden, dass die Dicke nahezu aller Zellschichten bei höherer Aussaatmenge geringer war. Die Aussaatzeit beeinflusste die Dicke der Zellschichten jedoch kaum (vgl. Abbildung 2). Für die einzelnen Zellschichten konnten folgende Ergebnisse beobachtet werden. Die Dicke der Epidermis wurde durch die höhere Aussaatmenge von 88,2 auf 72,8 µm deutlich reduziert (s. Abbildung 2). Demgegenüber war durch den Prüffaktor Aussaatzeit keine Beeinflussung der Schichtdicke der Epidermis festzustellen. Gleiches galt auch für die Primärfaserschicht. Sie verringerte sich ebenfalls bei höherer Aussaatmenge von 225,0 auf 166,0 µm (vgl. Abbildung 2). Auf dem sorptionsstarken Boden in Rauischholzhausen war die Schicht des sekundären Phloems bei den Pflanzen beider Aussaatzeiten aus dem dichteren Bestand schmäler (s. Abbildung 2). Sekundärfaserzellen waren nicht in allen Stängelsegmenten zu finden. Letztlich traten Sekundärfasern

aber in beiden Aussaatmengen in ähnlicher Größenordnung auf, so dass eine statistische Auswertung vorgenommen werden konnte. Es kam hierbei im dichteren Bestand zu einer Reduktion der Sekundärfaserschicht. Bei verzögerter Aussaatzeit konnte dieser Effekt nur in der Tendenz festgestellt werden. Der innere Bereich des Sprossachsenquerschnitts wurde in den Xylem- und den Markbereich untergliedert. Letzterer ist nicht bei allen Querschnitten vollständig erhalten geblieben, so dass die Größenaussagen hierzu noch genauerer Untersuchungen bedürfen. Beim Xylembereich kam es zu Wechselwirkungen zwischen Aussaatzeit und Aussaatmenge. Bei optimaler Aussaat war die Xylemschicht in der geringen Saatmenge am dicksten. Bei verzögerter Aussaat jedoch im dichteren Bestand. Mit einem Anteil von 27,7 % am Sprossradius bildete das Xylem die größte Schicht in der Sprossachse. Durch eine verzögerte Aussaat wurde der Anteil deutlich verringert. Der Markbereich fiel durch Erhöhung der Aussaatmenge deutlich geringer aus. Ein Einfluss der Aussaatzeit konnte nicht festgestellt werden (s. Abbildung 2).

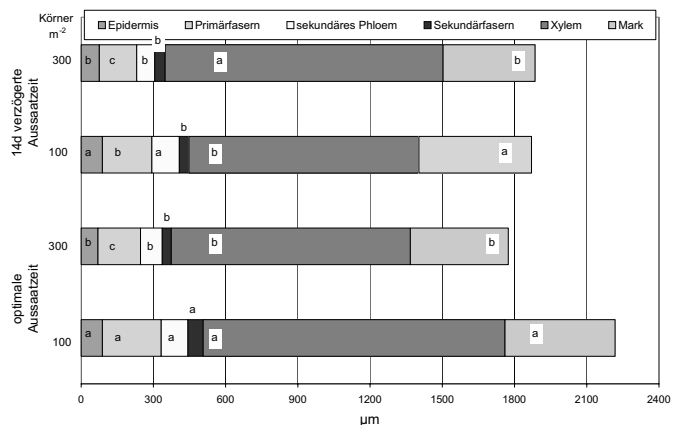


Abbildung 2: Schichtdicken im Querschnitt der Sprossachse in Abhängigkeit von Aussaatzeit und Aussaatmenge, Rauischholzhausen 1999

Figure 2: Size of single regions in the cross section of the stem diameter dependent on sowing date and seed density, Rauischholzhausen 1999

3.3 Fläche der Primärfaserzellen, des Zelllumens und Zellwanddicke

Die Primärfaserzellen besitzen für die Faserbildung und –ausbeute von Hanf eine große Bedeutung. Zur Kennzeichnung der Primärfaserstruktur wurden deshalb umfangreiche Messungen zur Zellfläche, zum Zelllumen und zur Zellwanddicke in Abhängigkeit von den jeweiligen Prüff-

faktoren durchgeführt. Es hat sich in den beiden Versuchsjahren gezeigt, dass sowohl die Aussaatzeit als auch die Aussaatmenge die Größe der Primärfaserzellfläche wie auch des Zelllumens beeinflussten (s. Abbildung 5). Die Jahreswitterung spielte ebenfalls eine Rolle bei der Größe der Zellflächen. Wie aus den Abbildungen 3 und 4 zu erkennen ist, traten bezüglich der Zellfläche und der Lumenfläche deutliche Wechselwirkungen zwischen den Versuchsjahren, den Aussaatzeiten und den Aussaatmengen auf.

So hatte im Jahr 1998 die Erhöhung der Aussaatmenge zur optimalen Aussaatzeit wesentlich kleinere Primärfaserzellen zur Folge. Bei verzögerter Aussaatzeit führte die Erhöhung der Aussaatmenge zu größeren Primärfaserzellen (s. Abbildungen 3 und 5). Im Jahr 1999 kam es sowohl bei optimaler wie auch bei verzögerter Aussaatzeit zu einer Verringerung der Zellfläche bei Erhöhung der Aussaatmenge. Dieser Effekt war bei verzögerter Aussaatzeit eindeutiger (s. Abbildung 4).

Die Lumenfläche der Primärfaserzellen war mit $199,7 \mu\text{m}^2$ im Jahr 1998 wesentlich größer als 1999 ($78,0 \mu\text{m}^2$). Die Wechselwirkungen zwischen den Prüffaktoren Aussaatzeit und Aussaatmenge traten in beiden Jahren auf. Bei optimaler Aussaatzeit wurde die Lumenfläche durch Erhöhung der Aussaatmenge reduziert, während in der verzögerten Aussaatzeit die Erhöhung der Aussaatmenge zu größeren Zelllumina führte. Weiterhin traten bei der verzögerten Aussaatzeit generell größere Zelllumina auf (s. Abbildung 3 und 4).

Der Anteil des Zelllumens an der gesamten Zellfläche war in den Versuchsjahren unterschiedlich. Eine Erhöhung der Aussaatmenge zur optimalen Aussaatzeit führte im Jahr 1998 zu einem geringeren Lumenanteil, während bei verzögerter Aussaatzeit der Lumenanteil im dichteren Bestand anstieg (s. Abbildung 3). Im Jahr 1999 wurden hingegen keine Wechselwirkungen zwischen Aussaatzeit und Aussaatmenge beobachtet. An beiden Aussaatterminen stellte sich heraus, dass eine Erhöhung der Aussaatmenge zu einem geringeren Lumenanteil führte (s. Abbildung 4). Mit 23,6 % war der Anteil des Zelllumens an der Primärfaserzellfläche im Jahr 1998 deutlich größer als im Jahr 1999 (13,6 %).

Die Zellwanddicke der Primärfasern wurde durch die Prüffaktoren Aussaatzeit, Aussaatmenge und Jahr beeinflusst. Darüber hinaus bestanden signifikante Wechselwirkungen zwischen diesen Prüffaktoren. Mit $6,9 \mu\text{m}$ (1998) und $7,8 \mu\text{m}$ (1999) lag die Dicke der Zellwand in beiden Versuchsjahren in ähnlicher Größenordnung. Im Jahr 1998 kam es bei termingerechter Aussaatzeit in den einzelnen

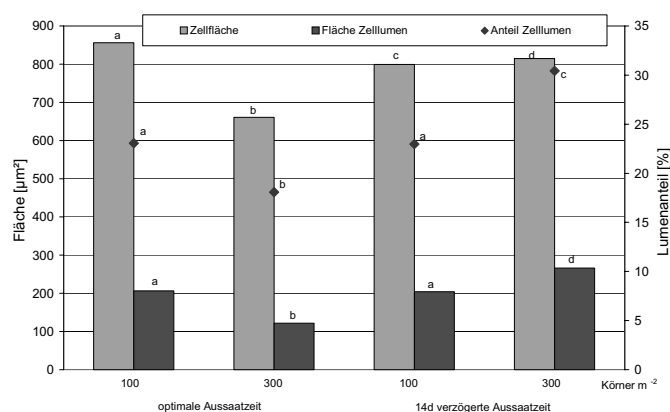


Abbildung 3: Fläche der Primärfaserzellen und des Lumens sowie Lumenanteil in Abhängigkeit von Aussaatzeit und Aussaatmenge; Rauischholzhausen 1998

Figure 3: Area of primary fibre cells and cell lumina as well as lumen portion dependent on sowing date and seed density, Rauischholzhausen 1998

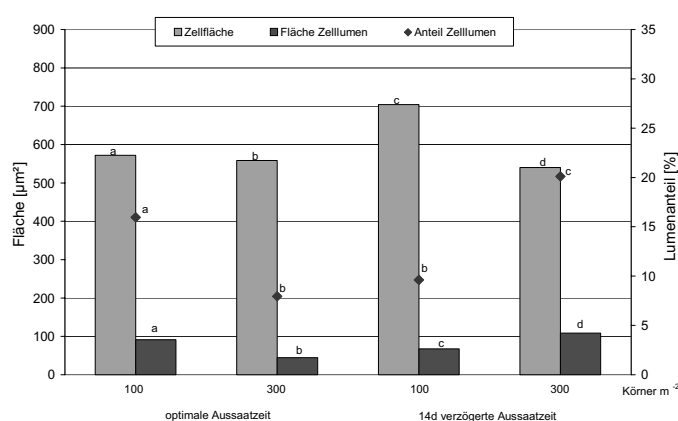


Abbildung 4: Fläche der Primärfaserzellen und des Lumens sowie Lumenanteil in Abhängigkeit von Aussaatzeit und Aussaatmenge, Rauischholzhausen 1999

Figure 4: Area of primary fibre cells and cell lumina as well as lumen portion dependent on sowing date and seed density, Rauischholzhausen 1999

Aussaatmengen zu keinen gravierenden Unterschieden in der Zellwanddicke, während bei verzögerter Aussaatzeit die Zellwand in der höheren Aussaatmenge deutlich schmäler wurde (s. Tabelle 1). Im Jahr 1999 wiederum konnte nur bei optimaler Aussaatzeit ein Aussaatmengeneffekt festgestellt werden. Hier kam es im dichteren Bestand zu einer dickeren Zellwand ($7,3$ bzw. $8,1 \mu\text{m}$). Mit $8,0$ und $7,9 \mu\text{m}$ war die Zellwand bei verzögerter Aussaatzeit in beiden Bestandesdichten fast gleich dick (s. Tabelle 1).

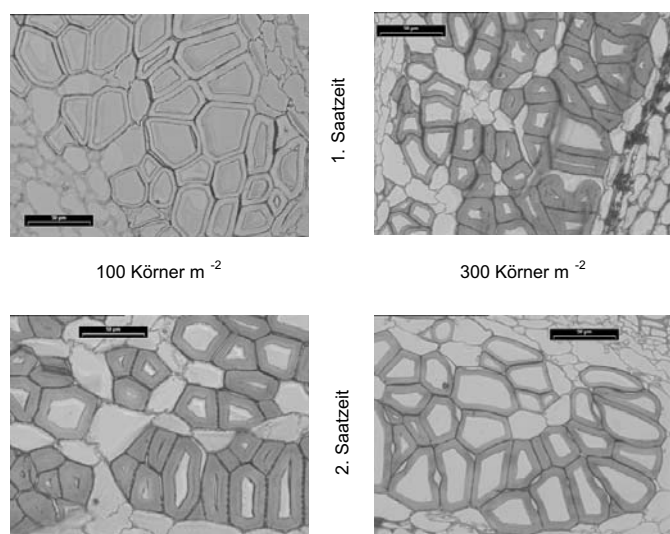


Abbildung 5: Primärfaserzellen in Abhängigkeit von Aussaatzeit und Aussaatmenge, Rauischholzhausen 1998

Figure 5: Primary fibre cells dependent on sowing date and seed density, Rauischholzhausen 1998

Tabelle 1: Zellwanddicken der Primärfasern von Hanf in Abhängigkeit von Aussaatzeit, Aussaatmenge und Jahr, Rauischholzhausen 1998 und 1999

Table 1: Size of the cell wall of primary fibres from hemp dependent on sowing date, seed density and year, Rauischholzhausen 1998 und 1999

Jahr	optimale SZ		14d verzögerte SZ	
	100 Körner m ⁻²	300 Körner m ⁻²	100 Körner m ⁻²	300 Körner m ⁻²
1998	7,17 µm	7,18 µm	7,15 µm	6,17 µm
1999	7,28 µm	8,09 µm	8,00 µm	7,89 µm
GD _{5%}	0,28	0,31	0,29	0,27

4 Diskussion

4.1 Pflanzenmorphologie

Im Jahr 1999 wurde eine kräftigere Einzelpflanzenentwicklung beobachtet, die auf den günstigeren Witterungsverlauf (höhere Niederschlagssumme) in diesem Jahr zurückgeführt wird. Diese Beobachtung bestätigt, dass Hanf zur Bildung der Sprossmasse eine gleichmäßige und hohe Wasserversorgung benötigt (AMADUCCI et al., 2002). Der Effekt, dass durch Erhöhung der Aussaatmenge eine Reduktion der Pflanzenlänge induziert werden kann, wurde auch von anderen Autoren beobachtet (VAN DER WERF, 1994; AMADUCCI et al. 2002). Als Ursache dafür wird die erhöhte intra-

spezifische Konkurrenz der Hanfpflanzen um die Wachstumsfaktoren Wasser, Licht und Nährstoffe angesehen. Die höhere Aussaatmenge bewirkte nicht nur eine Verminderung der Pflanzenlänge, sondern auch eine Reduzierung des Sprossachsendurchmessers. Ähnliche Effekte wurden von VAN DER WERF (1994) sowie von LÉON und VON FRANKENWELZ (2000) beobachtet. Ursache hierfür ist ebenfalls die intraspezifische Konkurrenz der Hanfpflanzen.

4.2 Schichtdicken im Sprossachsenquerschnitt

Die in der Literatur (HÖPPNER und MENGE-HARTMANN, 1998) angegebenen Schichtdicken von 175–190 µm für Primärfasern des Hanfes liegen z.T. deutlich unter den Werten, die in den eigenen Untersuchungen gefunden wurden. Es wird vermutet, dass der nährstoffreiche Standort verbunden mit der günstigen Niederschlagsverteilung in der Hauptwachstumsphase des Hanfes im Jahr 1999 diese Unterschiede verursachte. Die schmale Sekundärfaserschicht von 5–13 µm, die bei HÖPPNER und MENGE-HARTMANN (1998) festgestellt wurde, wurde in den eigenen Untersuchungen deutlich übertroffen. Die Schichtdicke des Holzes wird bei HÖPPNER und MENGE-HARTMANN (1998) mit 585 bzw. 660–675 µm angegeben und liegt damit wiederum deutlich unter den Messergebnissen der eigenen Untersuchungen (vgl. Abbildung 2). Da die Versuchsergebnisse der vorgenannten Autoren auf einem sandigen Standort erzielt wurden, bestimmen demnach Standort- und Jahreseinflüsse in entscheidendem Maße die Ausbildung der Schichten im Querschnitt der Hanfsprossachse.

Neben der Aussaatmenge hat auch die Sorte bzw. der Sortentyp einen Einfluss auf die Sprossachsenmorphologie. So beobachteten HÖPPNER und MENGE-HARTMANN (1998), dass die diözische und spät reifende Sorte Kompolti im Vergleich zur monözischen und früher reifenden Sorte Felina 34 nicht nur einen größeren Sprossachsendurchmesser, sondern auch stärkere Einzelschichtdicken ausbildet. Die in den eigenen Untersuchungen verwendete Sorte Fedora 19 ist in ihren Eigenschaften vergleichbar mit der Sorte Felina 34 (beides monözische, französische Sorten von ähnlicher Reifegruppe). Deshalb ist zu vermuten, dass Fedora 19 ähnliche Sprossachsendurchmesser und Einzelschichtdicken aufweist wie Felina 34.

Die Erhöhung der Aussaatmenge bewirkte generell eine Verminderung der Schichtdicken im Sprossachsenquerschnitt. Dieser Effekt stimmt mit den Ergebnissen von

MENGE-HARTMANN und HÖPPNER (1995) überein, bei denen sowohl die Primärfaserschicht als auch andere Zellschichten sich infolge höherer Aussaatmengen verringerten. Zellschichten, die nicht an der Faserbildung beteiligt sind, unterliegen einer geringeren Beeinflussung durch die Aussaatmenge als die Faserzellen. Diese Schlussfolgerung lässt sich aus den Untersuchungen von VAN DER WERF (1994) und MENGE-HARTMANN und HÖPPNER (1995) ableiten. In eigenen Untersuchungen konnte dagegen eine Abnahme der Xylemschicht infolge höherer Bestandesdichten festgestellt werden (s. Abbildung 2).

Betrachtet man die Anteile der einzelnen Schichten im Sprossradius, so kommt es z. T. zu einer Zunahme des Anteils der einzelnen Schichten im dichteren Bestand. Das bedeutet, dass die Pflanzen der höheren Aussaatmenge einen geringeren Hohlraum im Inneren der Sprossachse aufweisen und dass durch die höhere Anzahl an Pflanzen pro Fläche mehr Fasern erzeugt werden als bei geringerer Aussaatmenge.

Die Aussaatzeit beeinflusste die Dicke der Epidermis und der Primärfasern nicht, wohl aber die der im Querschnitt nach innen folgenden Zellschichten. Dabei kam es zu Wechselwirkungen zwischen Aussaatzeit und Aussaatmenge, die unterschiedliche Wirkungen auf die Dicke des sekundären Phloems, der Sekundärfasern und des Markbereiches hatten (s. Abbildung 2). Fast alle Zellschichten waren bei verzögerter Aussaatzeit schmaler und auch zu einem geringeren Anteil im Sprossquerschnitt vertreten, was auf einen größeren Hohlraum im Inneren der Sprossachse hindeutet. Dies ist insofern ungewöhnlich, als allgemein davon ausgegangen wird, dass die Sprossachse zunächst im Inneren gefüllt ist und erst mit zunehmendem Alter der Hohlraum entsteht und sich vergrößert (vgl. HERZOG, 1927).

4.3 Struktur der Primärfaserzellen

Zur Charakterisierung der Zellstruktur wurden in verschiedenen Untersuchungen die Durchmesser der Primärfasern (HÖPPNER und MENGE-HARTMANN, 1998; SANKARI, 2000; VON FRANCKEN-WELZ, 2003) oder Boniturwerte für die Faserfüllung verwendet (MENGE-HARTMANN und HÖPPNER, 1995). Da die Faserzellen runde, ovale wie auch polygonale Formen aufweisen können, ist die Nutzung des Zelldurchmessers zur Beschreibung der Primärfaserzellstruktur wenig geeignet. Die in den eigenen Untersuchungen ermittelten Zellflächen dürften demgegenüber ein objektiveres Bild über die Zellgröße geben.

In beiden Versuchsjahren konnte, mit Ausnahme der Spätsaat 1998, eine Verringerung der Fläche der Primärfaserzellen durch Zunahme der Aussaatmengen beobachtet werden (s. Abbildung 3 und 4). Die im Jahr 1999 gleichzeitig festgestellte Abnahme der Schichtdicken dürfte somit auf die Verringerung der Zellflächen zurückgeführt werden. Zwischen der Schichtdicke der Primärfasern und der Ausbildung der Fläche der Primärfaserzellen wird somit eine positive Korrelation vermutet. Die Struktur der Primärfaserzellen unterliegt in Abhängigkeit von Wachstumsbedingungen, Sortenwahl und agronomischen Maßnahmen einer hohen Variabilität. Versuche am Standort Braunschweig führten im Mittel der verwendeten Sorten zu einem Durchmesser der Primärfaserzellen von 20 bis 27 μm (HÖPPNER und MENGE-HARTMANN, 1998). Die N-Düngung zum Hanf hat bei den vorgenannten Autoren im Jahr 1998 die Spannweite der Zelldurchmesser von 22 bis 25 μm (ohne N) auf 16–30 μm (mit N) deutlich erhöht. In eigenen Versuchen auf Böden mit höherer Sorptionsfähigkeit und gleichmäßiger N-Versorgung lag der Zelldurchmesser mit 30–40 μm demgegenüber auf einem deutlich höheren Niveau mit vergleichsweise geringer Spannweite. Vermutlich bilden sich bei gesteigerter N-Versorgung größere Primärfaserzellen aus, was eigene Untersuchungen bestätigen. Hierbei spielt jedoch auch eine ausreichende Wasserversorgung eine Rolle (SCHÄFER, 2003). Auch in älteren Untersuchungen (FREUND, 1972) und neueren finnischen Untersuchungen (SANKARI, 2000) wurden bei den Primärfasern des Hanfes in der Stängelmittelnur Durchmesser von 18–25 μm bzw. 22,2–29,8 μm ermittelt, die den Ergebnissen von HÖPPNER und MENGE-HARTMANN (1998) nahe kommen. Auf der anderen Seite gibt es aber auch Literaturangaben, die eine Faserzellbreite von 540 μm angeben (LATZKE und HESSE, 1988), was die Größenvariation der Faserzellen sehr gut verdeutlicht. Da es sich hier nur um eine allgemeine Beschreibung der Hanffaser handelt, fehlt bei ihnen die Angabe aus welchem Teil der Sprossachse die Fasern entnommen wurden. Wie wichtig die Angabe zum Bereich ist aus dem die gemessenen Faserquerschnitte stammen, zeigen Messungen an der Basis der Sprossachse des Hanfes, die SANKARI (2000) durchgeführt hat. Hier betrug der Durchmesser der Primärfasern 50,7 μm und lag damit nahezu doppelt so hoch wie in der Mitte der Sprossachse.

Bei Lein, einer weiteren Bastfaserpflanze, werden z. T. ähnliche Distanzmaße für die Primärfaserzellen wie beim Hanf festgestellt. So gibt SANKARI (2000) einen Durchmesser der Primärfaserzellen von Öllein mit 16,5–33,7 μm und

von Faserlein mit 21–24 µm an. Die Füllung der Faserzellen sowie die Anordnung in dicht gepackten Faserbündeln erwiesen sich jedoch bei Öllein als deutlich geringer als bei Faserlein. Dies ist für die Qualität der Fasern im Textilsektor ungünstig, da eine gute Faserleinsorte dicht gepackte Faserbündel mit rundlichem oder länglichbandartigem Gesamtquerschnitt haben sollte. Solche Faserbündel sollten gleichmäßig über den Bastring verteilt sein (FREUND, 1972). Unterstellt man diese Forderung auch für den Hanf, dann sind im Ergebnis der eigenen Untersuchungen bei höheren Bestandesdichten zur optimalen Saatzeit tendenziell bessere Qualitäten der Hanffasern für den Textilsektor zu erwarten. In dieser Variante waren die Primärfaserzellen durch geringere Zellflächen und geringeren Lumenanteil gekennzeichnet, woraus sich feinere Fasern ergeben.

4.4 Variation des Lumenanteils

Bezüglich des Lumenanteils wurden Wechselwirkungen zwischen Aussaatzeit und Aussaatmenge festgestellt. Die Faserzellen der optimalen Aussaatzeit wiesen im dichten Bestand den geringsten Lumenanteil auf, was evtl. stabilere Fasern vermuten lässt. Ein entsprechender Zusammenhang wurde von SCHEER-TRIEBEL et al. (2000) für Faserlein beschrieben. Bei verzögerter Aussaatzeit hatten die Fasern im dichteren Bestand dagegen einen höheren Lumenanteil. MENGE-HARTMANN und HÖPPNER (1995) gaben in ihren Untersuchungen Boniturwerte für die Faserfüllung an. Bei der Sorte Felina 34, die in etwa mit der Sorte Fedora 19 dieser Untersuchungen vergleichbar ist, beobachteten sie in der höheren Bestandesdichte im Jahr 1992 besser gefüllte Primärfaserzellen. Im darauf folgenden Jahr konnten sie keine Unterschiede feststellen. Die Befunde dieser Autoren stimmen damit nur teilweise mit den eigenen Ergebnissen überein. Die im Allgemeinen schlechtere Faserfüllung bei verzögerter Aussaatzeit im dichteren Bestand könnte sich durch den geringeren Reifezustand der entsprechenden Pflanzen erklären lassen. Das Wachstum der Faserzellwände und die Faserfüllung der Zellen sind bei einer Spätsaat aufgrund der Entwicklungsverzögerung offenbar geringer ausgeprägt als bei optimaler Aussaat. Eventuell bieten diese Fasern aber eine bessere Grundlage zur Herstellung von Dämmmatten, da die Isolationswirkung aufgrund des größeren Lumens und damit des höheren Luftporenvolumens in der Matte besser sein könnte. Bei der Vorbereitung der Proben zum Semidünnschnitt hat sich außerdem gezeigt, dass die Varianten mit großem Zelllumen besser

vom Epoxidharz durchdrungen wurden, was in der Verwendung von Naturfaserverstärkten Polymeren vorteilhaft sein könnte.

4.5 Zellwanddicken

Die Vermutung, dass die Pflanzen mit dem geringsten Lumenanteil auch die dickste Zellwand aufwiesen, hat sich nicht bestätigt, da die Primärfaserzellflächen unterschiedlich ausgeprägt waren. Eindeutig ist jedoch die Jahresabhängigkeit hinsichtlich der Ausprägung der Zellwanddicke. Trockene Witterung während der Hauptwachstumszeit des Hanfes führt zu deutlich dünneren Zellwänden der insgesamt kleineren Faserzellen (vgl. Tabelle 1). Die vorgefundenen Werte für die Wanddicken decken sich sehr gut mit Ergebnissen von HÖPPNER und MENGE-HARTMANN (1998). Diese erwähnen Zellwanddicken von 6–7 µm bzw. 4–10 µm. PRUZ et al. (1998) nennen bei Primärfasern Zellwanddicken von 5–10 µm und weisen darauf hin, dass der Schichtaufbau und die Anordnung der Fibrillenbündel in der Zellwand von verschiedenen Faktoren wie z. B. Sorte, Entwicklungsstadium und Sprossachsenzone der Pflanze abhängig sind. Für Faserlein weisen sie genau die gleiche Zellwanddicke nach. Der Durchmesser der Einzelzelle ist jedoch geringer, so dass davon ausgegangen werden muss, dass die Fasern beim Lein besser gefüllt sind und ein geringeres Lumen aufweisen.

5 Fazit

Insgesamt kann festgestellt werden, dass die Morphologie der Faserzellen durch die Jahreswitterung, den Standort und die Aussaatmenge signifikant beeinflusst wird. Es ist zu vermuten, dass dies auch Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften der Hanffasern hat, was in weiteren Untersuchungen zu evaluieren wäre. Ebenso sollte geprüft werden, ob sich Faserzellen mit großem Zelllumen für die Herstellung von Verbundwerkstoffen oder Dämmmaterial eignen. Sollte sich dabei ein Zusammenhang zwischen der Faserzellgröße, der Lumengröße, dem Lumenanteil oder der Zellwanddicke und der Eignung der Faser als Dämmmaterial, Verbundwerkstoff o. ä. ergeben, so könnte mit einer mikroskopischen Schnellmethode die jeweilige Faserqualität bei Anlieferung des Materials geprüft werden.

Danksagung

An dieser Stelle möchten wir uns bei Herrn Dr. Koyro und Herrn Dr. Hardt von der Zentralen Biotechnischen Betriebseinheit (ZBB) der Universität Gießen für die Einweisung in die Fixierungs- und Einbettungstechnik von biologischem Material sowie die Herstellung von Semidünnschnitten bedanken.

Literatur

- AMADUCCI, ST., ERRANI, M., VENTURI, G. (2002): Plant Population Effects on Fibre Hemp Morphology and Production. *Journal of Industrial Hemp*, Vol. 7 (2), 33–60.
- BÓCSA, I., KARUS, M., LOHMEIER, D. (2000): Der Hanfanbau – Botanik, Sorten, Anbau und Ernte, Märkte und Produktlinien. Vollständig überarbeitete und ergänzte 2. Auflage. Landwirtschaftsverlag GmbH Münster-Hiltrup.
- CAPPELLETTO, P., BRIZZI, M., MONGARDINI, F., BARBERI, B., SANNIBALE, M., NENCI, G., POLI, M., CORSI, G., GRASSI, G., PASINI, P. (2001): Italy-grown hemp: yield, composition and cannabinoid content. *Industrial Crops and Products*, 13, 101–113.
- FREUND, H. (Hrsg., 1972): Handbuch der Mikroskopie in der Technik, Band VI, Mikroskopie der Textilfasern und Textilien, Teil 2, Mikroskopie der einzelnen Fasergruppen. Umschauverlag Breidenstein KG, Frankfurt am Main.
- HERZOG, R.O. (Hrsg.) (1927): Technologie der Textilfasern, V. Band, 2. Teil – Hanf und Hartfasern. bearbeitet von O. Heuser, P. König, O. Wagner, G.v. Frank, H. Oertel, Fr. Oertel; Verlag von Julius Springer, Berlin
- HÖPPNER, F., MENGE-HARTMANN, U. (1994): Anbauversuche zur Stickstoffdüngung und Bestandesdichte von Faserhanf. *Landbauforschung Völknerode*, 44. Jahrg., H. 4, 314–324.
- HÖPPNER, F., MENGE-HARTMANN, U. (1995): Cultivation Experiments with two fibre varieties. *Journal of International Hemp Association*, 2 (1), 18–22.
- HÖPPNER, F., MENGE-HARTMANN, U. (1998): Einfluss von Bodenbearbeitung und Stickstoffdüngung auf Wachstum und Ertrag von Faserhanf (*Cannabis sativa* L.). Mitteilung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften, Bd. 11, 42. Jahrestagung in Freising-Weihenstephan, 177–178.
- KARNOVSKY, M. J. (1965): A Formaldehyde-Glutaraldehyde Fixative of High Osmolality for Use in Electron Microscopy; *Journal of Cell Biology*, Vol. 27, 137A–138A.
- KRÜGER, K. (2000): Mehrjährige Untersuchungen zum Hanfanbau in Brandenburg. *Biorohstoff Hanf*, Wolfsburg 13.–16.9.2000, nova-Institut (Hrsg.), www.biorohstoff-hanf.de, 6 Seiten.
- LATZKE, HESSE (1988): Textile Fasern – Rasterelektronenmikroskopie der Chemie- und Naturfasern, Analysieren, Klassifizieren, Zitieren, Ordnen. Deutscher Fachverlag GmbH, Frankfurt am Main.
- LÉON, J., VON FRANCKEN-WELZ, H. (2000): Vergleichende Bewertung der Leistungspotentiale und Faserqualität verschiedener Faserpflanzen und Entwicklung von umweltverträglichen Anbauverfahren zur Produktion von qualitativ hochwertigen Industriefasern. Forschungsberichte der Rheinischen Friedrich Wilhelms Universität Bonn, Heft 82.
- MENGE-HARTMANN, U., HÖPPNER, F. (1995): Einfluss variierteter Anbaubedingungen auf die Faserausbildung zweier Faserhanfsorten. *Landbauforschung Völknerode*, 45. Jahrg., H. 4, 168–176.
- PRUZ, H.J., FINK, H.-P., GRAF, H. (1998): Zur Struktur cellosischer Naturfasern, Teil 1: Struktur von Bastfasern und deren Veränderungen infolge Beuche und Mercerisierung mittels Licht- und Elektronenmikroskopie. *Das Papier*, 6/1998, Band 52, 315–324, Zeitschrift für die Erzeugung von Holzstoff, Zellstoff, Papiermacher-Berufsgenossenschaft, Bingen, MSE Consulting.
- SANKARI, H. (2000): Stängel- und Fasererträge sowie Fasereigenschaften von in Finnland angebauten Hanf- und Flachs-Genotypen. 3. Internationales Symposium Biorohstoff Hanf & andere Faserpflanzen, 13.–16.9.2000 in Wolfsburg, nova-Institut (Hrsg.), www.biorohstoff-hanf.de.
- SCHÄFER, D. (1998): Einsatz und Potential naturfaserverstärkter Kunststoffe in der Automobilindustrie. Gülzower Fachgespräche, Nachwachsende Rohstoffe – Von der Forschung zum Markt, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.).
- SCHÄFER, T., HONERMEIER, B., YÜCE, S. (1999): Biomassestruktur und Fasererträge von Hanf (*Cannabis sativa* L.) in Abhängigkeit von Saatzeit, Bestandesdichte und Sorte. 6. Symposium der Deutsch-Türkischen Agrarforschung 27.9.–2.10.1999, Gießen, 159–164.
- SCHÄFER, T. (2003): Wirkung von Wachstumsfaktoren und pflanzenbaulichen Maßnahmen auf Biomasse- und Faserertrag sowie Faserqualität von Hanf (*Cannabis sativa* L.). Dissertation Justus Liebig Universität Gießen, Shaker Verlag, Aachen
- SCHEER-TRIEBEL, M.; HEYLAND, K.-U., LÉON, J. (2000): Einfluss des Erntetermins auf Morphologie, Ertrag und

- Qualität verschiedener Leingenotypen; Pflanzenbauwissenschaften, 4 (2), 91–102; Verlag Eugen Ulmer GmbH & Co., Stuttgart
- VAN DER WERF, H. (1994): Crop Physiology of Fibre Hemp (*Cannabis sativa* L.). Doctoral thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, The Netherlands.
- VOGL, CHR.R.; HEß, J. (1997): Die praktische Hanf Fibel – Informationsbroschüre für den Anbau von Hanf (*Cannabis sativa* L.) im Biologischen Landbau. 3. überarbeitete Auflage, Druckerei Spörk GmbH, Altenmarkt.
- VON FRANCKEN-WELZ, H. (2003): Vergleichende Bewertung der Ertragsfähigkeit und Faserqualität von Lein (*Linum usitatissimum* L.), Hanf (*Cannabis sativa* L.) und Fasernessel (*Urtica dioica* L.) zur Produktion hochwertiger Industriefasern. Shaker Verlag GmbH Aachen, Diss. Bonn, Institut für Pflanzenbau.

Anschrift der Verfasser

Dr. agr. Tanja Schäfer und **Prof. Dr. Bernd Honermeier**
Justus Liebig Universität Gießen, Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung I, Ludwigstraße 23, D-35390 Gießen, Deutschland;
E-Mail: tanja.schaefer@agrار.uni-giessen.de und bernd.honermeier@agrار.uni-giessen.de

Eingereicht am 10. Mai 2004

Angenommen am 18. Juli 2005