

2 Material und Methoden

2.1 Produktionslinien von Hanffasern

Die Untersuchungen zur Bestandesentwicklung und der entwicklungsbedingten Veränderung von Fasereigenschaften wurden an Hanf (*Cannabis sativa* L.), aus den Feldversuchen 2000-2002 am Standort Seehausen, durchgeführt. Die Wirkung von Strohmanagement, Röste und Faseraufschlusstechnologie auf die Fasereigenschaften wurde anhand von Versuchsmaterial aus Technikums- und Praxisproduktionslinie von Hanffasern untersucht. Die Technikumslinie basierte auf Material aus dem Feldversuch 2002 in Seehausen mit anschließendem Faseraufschluss mit einer Hammermühle (Institut für Agrartechnik Bornim e.V., ATB). Der Praxislinie schließt sich ein Praxisversuch 2003 in Zichtau (Altmark) an. Die Aufarbeitung des Versuchsmaterials erfolgte durch Faseraufschluss in einer Brecherlinie der Hanffaserrfabrik (HempFlax Deutschland GmbH).

2.1.1 Technikumslinie

Der Feldversuchsanbau wurde am **Standort** Seehausen durchgeführt (Lehr- und Versuchsstation der Landwirtschaftlichen Fakultät der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg). Seehausen liegt am nördlichen Stadtrand von Leipzig (51° 24' nördlicher Breite und 12° 25' östlicher Länge) in der Leipziger Tieflandsbucht. Die Charakteristika des Versuchsstandortes Seehausen sind in Tabelle 2.1 aufgeführt.

Tab. 2.1: Beschreibung des Versuchsstandortes Leipzig-Seehausen (ALTERMANN, 1992).

Standortcharakteristika	
Höhenlage	132 m über NN
Bodeart	sandiger Lehm
Bodenpunkte	58-61
Niederschlag (langjähriges Mittel)	552 mm (1961 – 1990)
Temperatur (langjähriges Mittel)	9,1°C (1961 – 1990)

Die Böden des Versuchsstandortes bauen sich aus den bodenbildenden Sedimenten Sandlöß und Geschiebemergel auf, die sich in der Körnung und im Kalkgehalt unterscheiden. Der Geschiebemergel ist bis etwa 1,50 m entkalkt und zu Geschiebelehm umgebildet. Dadurch sind Unterboden und Untergrund meistens inhomogen. Der Lehmkörper enthält Sandlinsen, Sandkeile und Sandbänder, die als natürliche Drainage fungieren.

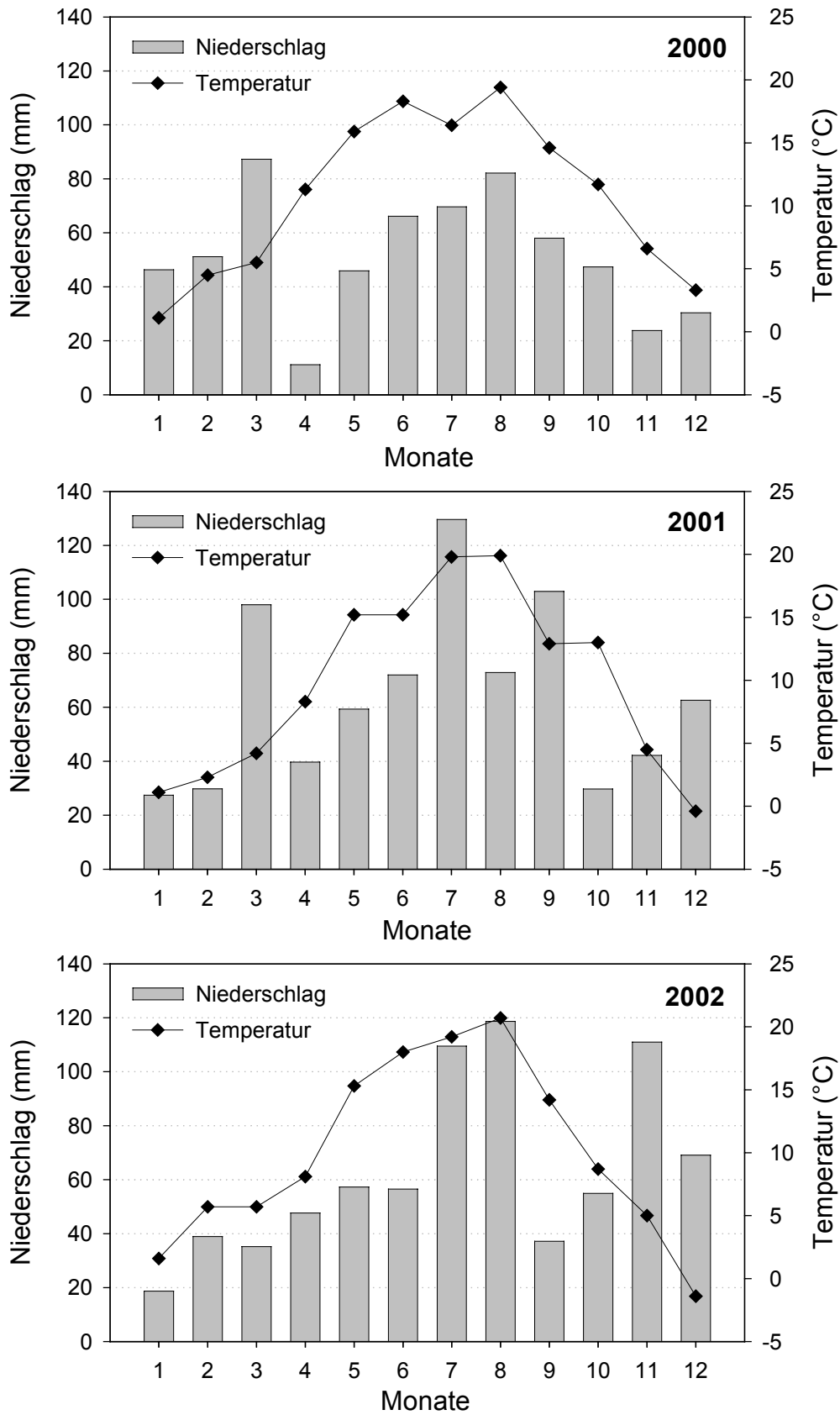


Abb. 2.1: Witterungsdaten am Standort Leipzig-Seehausen 2000-2002.

Die Witterung am Standort Seehausen ist durch das ostdeutsche Binnenlandklima geprägt. Die mittlere Tagestemperatur und die Summe der Niederschläge als Monatswerte in den Versuchsjahren 2000-2002 sind in Abbildung 3.1 aufgeführt. Die Niederschlagsverteilung zeigt deutliche Jahresunterschiede. Das Jahr 2000 mit einem Jahresniederschlag von 619 mm war trockener als die Jahre 2001 und 2002 mit Jahresniederschlägen von 766 und 755 mm. In allen drei Versuchsjahren lagen die Niederschläge höher als im langjährigen Durchschnitt.

Die **Feldversuchsanlage** (ca. 1,4 ha) am Standort Leipzig-Seehausen umfasste drei eingebettete Großparzellen mit je fünf Probenentnahmestellen. In jede Probenentnahmestelle wurde eine 2 x 2 m große Ernteparzelle integriert. Für den Versuch wurden drei **Hanfsorten**, nämlich die Faserhanfsorten USO 31 und Kompolti sowie die Samenhanfsorte Fasamo ausgewählt. Weitere Sortencharakteristika sind in Tabelle 2.2 dargestellt. Die **Aussaat** des Hanfs erfolgte als Drillsaat mit einer Parzellendrillmaschine in den abgetrockneten Boden. Die Bodentemperatur zur Aussaat war ca. 7°C. Grundsätzlich erfolgte die Aussaat in den Versuchsjahren in der dritten Aprildekade. Der Reihenabstand betrug 12 cm mit einer Ablagetiefe von 3 cm. Die Besonderheiten der Bestandesführung und andere agronomische Maßnahmen am Standort Leipzig-Seehausen sind in Tabelle 2.3 zusammengefasst.

Tab. 2.2: Herkunft, Geschlechtsverteilung, Reifetyp der angebauten Hanfsorten am Standort Leipzig-Seehausen in den Jahren 2000-2002.

Sorte	USO 31	Kompolti	Fasamo
Herkunft	Ukraine	Ungarn	Deutschland
Geschlechtsverteilung	einhäusig	zweihäusig	einhäusig
Reifetyp	früh	spät	früh
Bezeichnung	HA	HB	HC

Je Parzelle wurde die **Probenentnahme** mit fünf Wiederholungen durchgeführt. Die Beprobung erfolgte insgesamt an fünf Terminen (Tabelle 2.3). Um den Einfluss von Randeffekten auszuschließen, erfolgte die Probennahme randomisiert über die Versuchsparzelle, verteilt in Form von so genannten Probenmetern (PM), die die Pflanzen aus 1 m fortlaufender Saatreihe umfassen. Je Entnahmestelle und Termin wurden zwei Probenmeter entnommen. Für die Bestimmung der oberirdischen Biomasse erfolgte die Probenentnahme aus Ernteparzellen.

Tab. 2.3: Maßnahmen der Bestandesführung von Hanf in den Jahren 2000 - 2002 am Standort Leipzig-Seehausen
Kursiv - Termine der Probenentnahme für die Bestimmung der oberirdischen Biomasse.

Anbaujahr	2000			2001			2002		
Sorte	USO 31	Kompolti	Fasamo	USO 31	Kompolti	Fasamo	USO 31	Kompolti	Fasamo
Vorfrucht	Triticale			Wintergerste			Wintergerste		
Bodenbearbeitung	Pflügen, Saatbettbearbeitung mit Kreiselegge			Pflügen, Vorgrubbern, Saatbettbearbeitung mit Kreiselegge			Pflügen, Saatbettbearbeitung mit Kreiselegge		
Aussaattermin	25.04.2000			27.04.2001			24.04.2002		
Aussaatstärke, kK·m ⁻²	450	450	250	450	450	250	450	450	250
Aussattiefe, cm	3			3			3		
Reihenabstand, cm	12			12			12		
Auflauftermin	01.05.2000	01.05.2000	02.05.2000	03.05.2001	04.05.2001	05.05.2001	06.05.2002		
Grunddüngung, kg·ha ⁻¹	1600 CaO, Kalk, Herbst 1991 200 P ₂ O ₅ , Superphosphat 40, Herbst 1998 300 K ₂ O, 60er Kali, Herbst 1998			1600 CaO, Kalk, Herbst 1992 200 P ₂ O ₅ , Superphosphat 40, Herbst 1998 300 K ₂ O, 60er Kali, Herbst 1998			2000 CaO, Kalk, Herbst 1993 200 P ₂ O ₅ , Superphosphat 40, Frühjahr 1998 300 K ₂ O, 60er Kali, Frühjahr 1998		
Stalldüngung, dt·ha ⁻¹	500, Herbst 1994								
N _{min} +N-Düngung, kg·ha ⁻¹ Termin	50 + 70 KAS, 28.04.00			68 + 50 KAS, 09.05.01			69 + 51 KAS, 30.04.02		
Herbizidbehandlung	keine			keine			keine		
Insektizidbehandlung	keine			keine			keine		
Probenahmetermine (Tage nach Aussaat)	30.06.00 (66)	30.06.00 (66)	30.06.00 (66)	12.07.01 (76)	12.07.01 (76)	12.07.01 (76)	03.07.02 (70)	03.07.02 (70)	03.07.02 (70)
	20.07.00 (86)	20.07.00 (86)	20.07.00 (86)	02.08.01 (97)	02.08.01 (97)	02.08.01 (97)	25.07.02 (92)	25.07.02 (92)	25.07.02 (92)
	09.08.00 (106)	09.08.00 (106)	09.08.00 (106)	23.08.01 (118)	23.08.01 (118)	23.08.01 (118)	14.08.02 (112)	14.08.02 (112)	14.08.02 (112)
	06.09.00 (134)	06.09.00 (134)	06.09.00 (134)	12.09.01 (138)	12.09.01 (138)	12.09.01 (138)	04.09.02 (133)	04.09.02 (133)	04.09.02 (133)
	13.10.00 (171)	13.10.00 (171)	13.10.00 (171)	26.09.01 (152)	17.10.01 (173)	17.10.01 (173)	19.09.02 (148)	09.10.02 (168)	09.10.02 (168)

Die Ernte des Pflanzenmaterials von Probenmetern und Ernteparzellen erfolgte per Hand. Hierbei wurden Hanfpflanzen am Boden abgeschnitten, entsprechend markiert und zur späteren Analyse vom Feld gebracht. Eine maschinelle **Ernte** des Hanfbestandes der Versuchsanlage erfolgte mittels Stufenmäherwerk (zwei Stufen). Um den Einfluss von Randeffekten auszuschließen, wurde die Ernte getrennt nach Kernparzellen und Rand durchgeführt. Im Jahr 2002 verblieb das Stroh zur **Tauröste** im Schwad mit Wirrlage nach der Ernte auf dem Feld. Die Feldliegezeiten sind, Tabelle 2.4 zu entnehmen. Durch die Feldliegezeit wurden drei Röstestufen eingestellt (R1-R3). Das Strohmanagement im Feldversuchsanbau 2002 am Standort Seehausen umfasste das Schneiden des Hanfbestandes, das zeitweilige Wenden und die Bergung des Hanfstrohs. Zur **Bergung** wurde das Stroh in Rundballen gepresst.

Tab. 2.4: Röste von Hanfstroh aus dem Feldversuchsanbau 2002 in Seehausen.

Röststufe	Mähen des Bestandes, Beginn der Tauröste	Ballenpressen	Röstdauer, Tage	Faseraufschluss
R1	4.09.02	20.09.02	16	10.12.02
R2	4.09.02	10.10.02	36	10.12.02
R3	4.09.02	28.11.02	85	10.12.02

Der **Faseraufschluss** von Rundballen (3 Sorten, 3 Röststufen) aus dem Feldversuch 2002 in Seehausen wurde mit einer Aufschlussanlage mit Hammermühle (*PA = Prallaufschluss*) im Technikumsmaßstab (Institut für Agrartechnik Bornim e.V., ATB) durchgeführt. Hierbei ging das Hanfstroh in folgende Prozessstufen der Faseraufbereitung: a) Abscheiden von Blättern, Fruchtständen, Samen sowie Sand, Steinen und anderen Fremdkörpern, b) Dosieren und Überführen des Strohs in einen gleichmäßigen Massestrom, c) Vorschneiden des Strohs (180 mm), d) Faseraufschluss durch Prallaufschluss, e) Reinigen der Fasern in der 1. Stufe, f) Öffnen der Fasern, g) Reinigen der Fasern in der 2. Stufe, h) Öffnen der Fasern, i) Trennen von Kurzfasern und Schäben, j) Separieren der Kurzfasern, k) Abscheiden der Kurzfasern aus der Abluft, l) Staubabscheidung. Das gesamte Hanfstroh wurde mit einheitlicher Maschineneinstellung verarbeitet. Die wesentlichen Einstellungsparameter sind in Tabelle 2.5 dargestellt.

Tab. 2.5: Parameter der Maschineneinstellung bei dem Faseaufschluss im Technikumsmaßstab.

Maschineneinstellung	Parameter
Schnittlänge des Ballenauflösers, mm	300
Tischhöhe des Ballenauflösers, %	50
Theoretische Schnittlänge der Schneidmaschine, mm	180
Frequenz der Aufschlussmaschine, Hz	60
Sieblochung der Aufschlussmaschine, mm	40 x 6
Unterdruck am Faseraustritt der Aufschlussmaschine, mmWS	25
Frequenz des Schäbengebläses, Hz	50
Spaltweite des Rostes des Einspeisegerätes	4
Spaltweite der Roste des Stufenreinigers	3
Unterdruck der Schäbenabsaugung im Stufenreiniger, mmWS	30
Unterdruck nach Faserseparator, mmWS	110
Frequenz des Gebläses zur Kurzfaser,- Schäbentrennung, Hz	60
Unterdruck der Abluftabsaugung, mmWS	15

2.1.2 Praxislinie

Der Praxisanbau von Hanf erfolgte als Feldversuchsanbau am **Standort** Zichtau (Altmark) (52° 36' nördlicher Breite und 11° 18' östlicher Länge) auf Flächen der Erzeugergemeinschaft Qualitätshanf, Betriebsgemeinschaft von Blücher - Weber GbR. Die Charakteristika des Versuchsstandortes Zichtau sind in Tabelle 2.6 aufgeführt.

Tab. 2.6: Beschreibung des Versuchsstandortes Zichtau (Altmark).

Standortcharakteristika	
Höhenlage	50-60 m über NN
Bodeart	sandiger Lehm
Bodenpunkte	45-60
Niederschlag	563 mm
Jahresdurchschnittstemperatur	8,5°C

Die mittlere Tagestemperatur und die Summe der Niederschläge als Monatswerte im Versuchsjahr 2003 sind in Abbildung 2.2 aufgeführt. Die Witterungsdaten wurden vom Deutschen Wetterdienst (Keiserleistrasse 29/35, 63067 Offenbach) zur Verfügung gestellt.

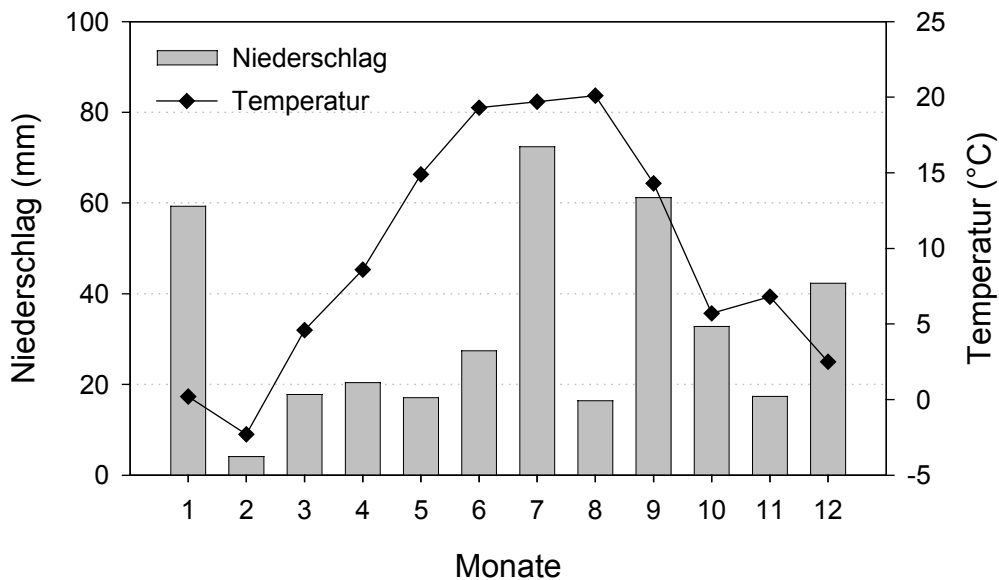


Abb. 2.2: Witterungsdaten des Standortes Zichtau (Altmark) 2003 (Auskunft des Deutschen Wetterdienstes).

Der **Versuchsanlage** 2003 (12,3 ha) am Standort Zichtau (Altmark) gliederte sich in zwölf eingebettete Großparzellen mit je drei Probenentnahmestellen. In jede Probenentnahmestelle wurde eine 1 x 2 m große Ernteparzelle integriert. Für den Versuch wurden vier **Hanfsorten**, nämlich USO 31, Fetora 17, Futura 75 und Epsilon 68 ausgewählt. Weitere Sortencharakteristika sind in Tabelle 2.7 dargestellt. Die **Aussaat** des Hanfs erfolgte als Drillsaat mit einer Drillmaschine für Getreide in den abgetrockneten Boden. Der Reihenabstand betrug, wie im Feldversuch am Standort Leipzig-Seehausen, 12 cm mit einer Ablagetiefe von ca. 3 cm. Die Besonderheiten der Bestandesführung und andere agronomische Maßnahmen sind in Tab. 2.8 zusammengefasst.

Tab. 2.7: Herkunft, Geschlechtsverteilung, Reifetyp der angebauten Hanfsorten am Standort Zichtau (Altmark) im Jahr 2003.

Sorte	USO 31	Fedora 17	Futura 75	Epsilon 68
Herkunft	Ukraine	Frankreich	Frankreich	Frankreich
Geschlechtsverteilung	einhäusig	einhäusig	einhäusig	zweihäusig
Reifetyp	früh	früh	spät	spät
Bezeichnung	S1	S2	S3	S4

Tab. 2.8: Maßnahmen der Bestandesführung von Hanf im Jahr 2003 in Zichtau (Altmark).

Anbaujahr	2003											
	USO 31			Fedora 17			Futura 75			Epsilon 68		
Variante	R1	R2	R3	R1	R2	R3	E1	E2	E3	E1	E2	E3
Vorfrucht	Winterweizen											
Bodenbearbeitung	pflügen, grubbern, anwalzen, einebnen und feingrubbern											
Aussaattermin	25.04.03	25.04.03	25.04.03	16.04.03	16.04.03	16.04.03	16.04.03	16.04.03	16.04.03	16.04.03	16.04.03	16.04.03
Aussaatstärke, kK·m ⁻²	300											
Aussaattiefe, cm	3											
Reihenabstand, cm	12											
Auflauftermin	20.05.03	20.05.03	20.05.03	20.05.03	20.05.03	20.05.03	20.05.03	20.05.03	20.05.03	20.05.03	20.05.03	20.05.03
Nährstoffversorgung, kg·ha ⁻¹	24 / 33 / 77											
Bodenvorrat N / P / K (0-60 cm Bodentiefe)	29.01.03											
Düngung, kg·ha ⁻¹												
17.05.03 N	86											
02.06.03 P	29											
K	57											
S	70											
Mg	22											
04.03.02 Ca	4000											
Hanfernte	31.07.03	31.07.03	31.07.03	31.07.03	31.07.03	31.07.03	31.07.03	31.08.03	30.09.03	31.07.03	31.08.03	30.09.03
Schwadwenden 1. Termin	08.08.03	20.08.03	20.08.03	08.08.03	20.08.03	20.08.03	20.08.03	06.10.03	06.10.03	20.08.03	06.10.03	06.10.03
2. Termin	13.08.03	16.09.03	16.09.03	13.08.03	16.09.03	16.09.03	16.09.03	15.10.03	27.10.03	16.09.03	15.10.03	27.10.03
3. Termin		17.09.03	06.10.03		17.09.03	06.10.03	17.09.03		03.11.03	17.09.03		03.11.03
4. Termin			15.10.03			15.10.03			10.11.03			10.11.03
5. Termin									11.11.03			11.11.03
Herbizidbehandlung	keine											
Insektizidbehandlung	keine											
Probenahmetermin	27.07.03	27.07.03	27.07.03	28.07.03	28.07.03	28.07.03	28.07.03	29.08.03	19/30.09.03	28.07.03	29.08.03	19.09.03

Je Parzelle wurde die **Probenentnahme** mit drei Wiederholungen durchgeführt. Die Beprobung erfolgte insgesamt an fünf in Tabelle 2.8 dargestellten Terminen. Die Probennahme erfolgte randomisiert über die Versuchsparzelle verteilt in Form von Probenmetern (PM). Je Entnahmestelle und Termin wurden zwei Probenmeter entnommen. Für die Bestimmung der oberirdischen Biomasse erfolgte die Probenentnahme aus Ernteparzellen. Die Ernte des Pflanzenmaterials von Probemetern und Ernteparzellen erfolgte per Hand. Hierbei wurden die Hanfpflanzen am Boden abgeschnitten, entsprechend markiert und zur Durchführung von Analysen vom Feld gebracht. Die maschinelle **Ernte** des Hanfbestandes der Praxisanlage erfolgte mittels Hanfernter im HempFlax-Verfahren (Schneiden und Häckseln). Die Ernte wurde getrennt nach Kernparzellen und Rand durchgeführt, so wurde der Einfluss von Randeffekten ausgeschlossen. In den Varianten S1 und S2 des Praxisversuches wurde ein mittlerer Erntetermin E2 gewählt. Die Varianten S3 und S4 wurden an drei in Tabelle 2.8 dargestellten Terminen geerntet (E1-E3).

Nach der Ernte verblieb das Stroh zur **Tauröste** im Schwad mit Wirrlage auf dem Feld. Die Feldliegezeiten, sind Tabelle 2.9 zu entnehmen. Durch die Feldliegezeit wurden drei Röststufen eingestellt (R1-R3). Zur **Bergung** wurde das Stroh in Quaderballen gepresst. Die Strohballen aus Randmaterial wurden in die weiteren Auswertungen nicht einbezogen.

Tab. 2.9: Röste von Hanfstroh aus dem Praxisanbau 2003 in Zichtau.

Röststufe	Mähen des Bestandes, Beginn der Tauröste	Ballenpressen	Röstdauer, Tage	Faseraufschluss
R1	31.07.03	13.08.03	13	18.12.03
R2	31.07.03	17.09.03	48	18.12.03
R3	31.07.03	15.10.03	76	18.12.03

Der **Faseraufschluss** des Strohs aus dem Praxisanbau 2003 in Zichtau wurde in der Hanffaserfabrik in Gardelegen (HempFlax Deutschland GmbH) auf einer LaRoche-Anlage mit Brecherwalzensystemen und einem Refiner mit zwei Cottonisierungsstufen durchgeführt. Die alleinige Verarbeitung in der *Brecherlinie* wird mit *BL*, die zusätzliche Behandlung in *Refiner und Cottonisierungsstufen* mit *BL+C* bezeichnet. Die Einkürzung für Fasern nach der Brecherlinie war auf eine Durchschnittslänge von 100 mm eingestellt.

Der Prozess des Faseraufschlusses in der Praxisproduktionslinie gliedert sich in folgenden Stufen: a) Auflösen der Strohballen, b) Abscheiden von Blättern, Fruchtständen, Samen sowie Sand, Steinen und anderen Fremdkörpern, c) Dosieren und Ausrichten des Strohs, d) Faseraufschluss durch Brecherlinie, e) Lockerung und Reinigung der Fasern, f) Reinigung und Ausrichtung der Fasern im Kardieragregat g) Fasereinkürzung, h) Zweistufige Verfeinerung (Cottonisierung) von Fasern, i) Pressen von Faserballen. Die Brecherlinie bestand aus 4 x 13 gegenläufigen Zahnwalzenpaaren aus Hartstahl. Der Anpressdruck zwischen Walzen wurde hydraulisch konstant gehalten. Die Umdrehungszahl der Walzen war so eingestellt, dass zwischen zwei benachbarten Walzenpaaren ein Verzug bestand. Ab der Verarbeitungsstufe d) wurden Kurzfasern, Staub und Schäben mit Abluft getrennt. Das gesamte Hanfstroh wurde mit einheitlicher Maschineneinstellung verarbeitet. Die Maschineneinstellungen wurden von dem Betreiber der Aufbereitungsanlage in Gardelegen HempFlax Deutschland GmbH nicht veröffentlicht.

2.2 Laboraufschluss von Hanffasern

Der *Laboraufschluss (LA)* der Hanffasern aus den Probemetern und aus den Kontrollvarianten zu Analysezwecken erfolgte mit Hilfe eines Laborflaxbrechers (BLFB Flaksy, Gebr. Bahmer Maschinenbau GmbH, Steinheim-Söhnstetten, D). Der Anpressdruck der vier gegenläufigen Walzenpaare wurde auf 0,1 bar eingestellt, die Isolierungsgeschwindigkeit betrug $13 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Die Umdrehungszahl der Walzen, die sich aus Drehfrequenz und Walzendurchmesser ergab, war so eingestellt, dass zwischen zwei benachbarten Walzenpaaren ein Verzug von 2,2 bis 3,5% bestand. Das Stroh wurde bei konstanten Klimabedingungen (23°C und 50% relative Luftfeuchtigkeit) voradaptiert und in 10 Durchläufen durch die vier Walzenpaare entholzt, wobei das Material vor der erneuten Zufuhr in der Längsachse jeweils um ca. 180° gedreht wurde, um ein gleichmäßiges Ausfallen von Schäben zu ermöglichen.

2.3 Messmethoden

2.3.1 Bestandesführung und Ertragsermittlung

Nach dem Auflaufen wurden die Pflanzen aus den Probemetern ausgezählt, dabei wurde die Bestandesdichte BD_A nach dem Auflaufen [Pflanzen·m⁻²] errechnet. Jeder Probemeter wurde dabei markiert.

$$BD_a = \frac{n_a}{l \cdot R} \quad (2.1)$$

n_a - Anzahl der Pflanzen aus laufenden Metern nach dem Auflaufen,
 l - Reihelänge [m], R - Reihenabstand [m]

Die Ermittlung der Bestandesdichte BD_E zur Ernte [Pflanzen·m⁻²] erfolgte durch Auszählen der Pflanzen aus markierten Probemetern und anschließender Umrechnung anhand des Reihenabstandes.

$$BD_e = \frac{n_e}{l \cdot R} \quad (2.2)$$

n_e - Anzahl der Pflanzen aus laufenden Metern zur Ernte,
 l - Reihelänge [m], R - Reihenabstand [m]

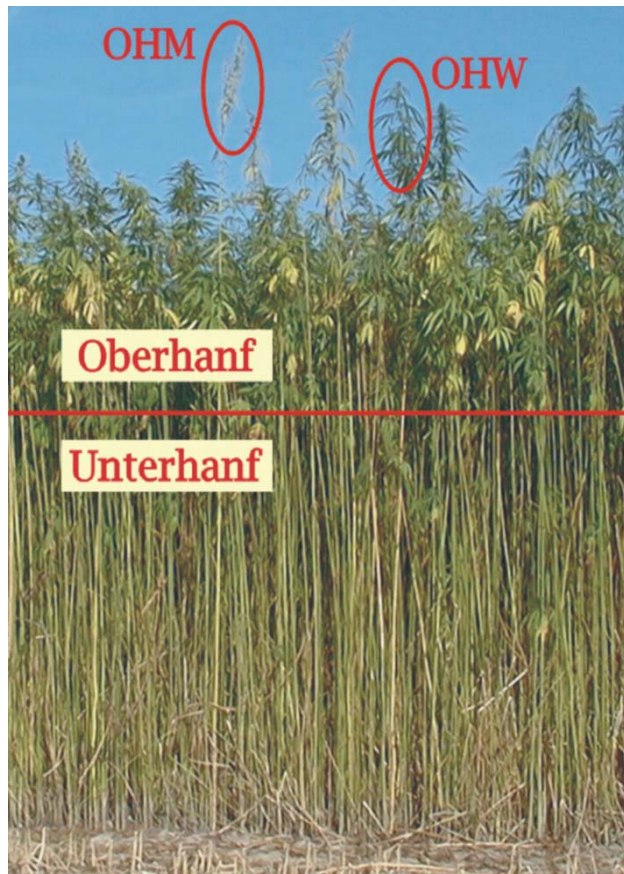
Pflanzenproben zur **Strohertragsermittlung** wurden per Hand aus Teilflächen von 2 x 2 m² geerntet und gewogen. Danach erfolgte die Probenentnahme zur Bestimmung der Trockenmasse.

Zur Bestimmung der **Trockenmasse** wurden die Strohproben von 100 - 150 g auf 20 - 30 cm Länge zerkleinert und in gelochten Plastiktüten gewogen. Alle Proben wurden bei 105°C bis zur Massenkonstanz (ca. 15 Stunden) im Trockenschrank getrocknet. Anschließend wurde das Material abgekühlt und erneut gewogen. Aus der Massendifferenz wurde der Trockenmasseanteil errechnet. Von der Gesamtmasse wurde jeweils die Masse der Plastiktüte (5 g) abgezogen.

2.3.2 Bonituren äußerer Merkmale von Hanfpflanzen

Die Probeentnahme zur Beschreibung des Entwicklungszustandes von Hanfpflanzen begann in einem späten vegetativen Stadium (bei ca. 10% der weiblichen Blüte) und reichte bis zur vollständigen Reife. Die Beprobung erfolgte als Pflanzenentnahme aus dem Bestand an definierten Stellen durch Handernte. Die Pflanzen wurden in Höhe der Bodenfläche abgeschnitten. Pflanzenproben für Bonituren äußerer Merkmale stammen je Probenentnahmestelle aus 2 x 1 m fortlaufender Saatreihe. Frisch entnommene Hanfpflanzen wurden

folgenden **Bestandesfraktionen** zugeordnet: Oberhanf (OH), Unterhanf (UH), männliche (M), habituell weibliche Pflanzen (weibliche Pflanzen bei einhäusiger und einhäusige Pflanzen bei zweihäusiger Sorte) (W) bzw. Pflanzen im vegetativen Zustand ohne erkennbare Geschlechtsdifferenzierung (X). Zum Oberhanf gehörten alle Pflanzen, die die Bestandesdecke bzw.



mindestens zwei Drittel der durchschnittlichen Bestandeshöhe erreichten. Die Länge der Unterhanfpflanzen betrug maximal zwei Drittel der durchschnittlichen Bestandeshöhe (Abb. 2.3). Bei den Bonituren zum Entwicklungszustand der Pflanzen wurden folgende äußere Merkmale bewertet: Länge des be- bzw. entblätterten Stängels (in %), Färbung des Stängels und vorhandener Blätter (Farbanteile von grün/gelbgrün, gelb, braun in %) und Entwicklungszustand der Blütenanlagen (die Anteile von Knospen, geöffneten, abgeblühten und samenreifen Blüten in %).

Abb. 2.3: Fraktionen des Hanfbestandes.

2.3.3 Morphometrische Messungen an der Hanfpflanze

Nach der Beschreibung des Entwicklungszustandes von Hanfpflanzen, wurden die Proben ca. drei Monate bei konstanten Klimabedingungen (23 °C und 50 % relative Luftfeuchtigkeit) gelagert. Für die Durchführung von morphometrischen Messungen an Hanfpflanzen wurden die Proben entblättert. Hierzu wurde Material aus den Probemetern 1 und 2 verwendet. Die Blatt- und Samenmasse wurde in der vorliegenden Arbeit nicht weiter untersucht. Abbildung 2.4 zeigt die gemessenen morphometrischen Parameter der Hanfpflanze: Stängeldurchmesser [cm] und Gesamtpflanzenlänge [cm]. Um die geometrische Form des Hanfstängels zu untersuchen, wurden Messungen der Stängeldicke mit Hilfe eines digitalen Messschiebers (Typ PM 200, HITEC Messtechnik GmbH, Leonberg, D) mit Genauigkeit 30 µm durchgeführt. Der Messpunkt des Stängeldurchmessers lag basal, maximal 5 cm von der

Schnittstelle entfernt (Abb. 2.4, 1). Jede Messung wurde zwei Mal durchgeführt. Die zweite Messung erfolgte senkrecht zur Ebene der ersten Messung (Abb. 2.4, 2). Das Ergebnis der ersten und zweiten Messung wurde arithmetisch gemittelt.

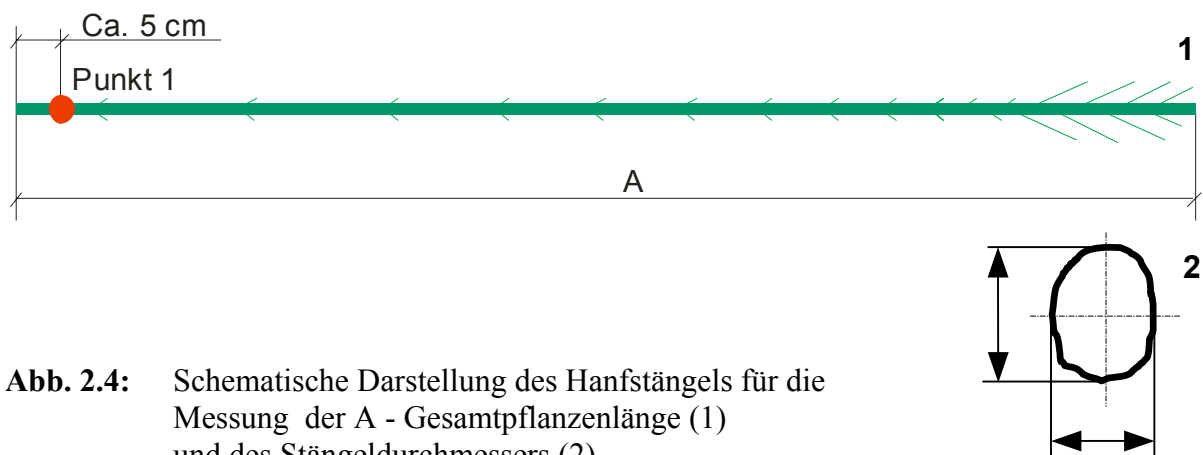


Abb. 2.4: Schematische Darstellung des Hanfstängels für die Messung der A - Gesamtpflanzenlänge (1) und des Stängeldurchmessers (2).

Als Indikator der Entwicklung der Hanfstängels wurde das **Stängelvolumen** (V) ausgewählt. Die Stängelvolumina wurden anhand von Messungen der Dicke des Stängels an der Basis (Punkt 1 s. Abb. 2.4, 1) und der Länge des vegetativen Stängelabschnittes unter Anwendung der Formel (2.3) ermittelt. Die Vorgehensweise der Bestimmung von V wurde von NAUMENKO (2000) beschrieben.

$$V = \frac{8}{15} \cdot \pi \cdot l \cdot r^2 \quad (2.3)$$

l - Gesamtlänge des Stängels,

r - Radius an der Basis der Stängel.

Die Kurvenschätzung für die Darstellung der Änderung des Stängelvolumens der Hanfpflanze im Entwicklungsverlauf erfolgte mit Hilfe der Gompertz-Funktion (Formel 2.4).

$$V = a \cdot \exp(-\exp(-(X-X_0)/b)) \quad (2.4)$$

V - Stängelvolumen, X - Temperatursumme,

X_0 , a , b – geschätzte Parameter

Es wurde angenommen, dass das Stängelvolumen des Hanfstängels zum Auflauftermin $0,01 \text{ cm}^3$ betrug. Für die Berechnung der Volumenzuwachsrates wurde die 1. Ableitung der Gompertz-Funktion V' berechnet.

$$V' = ((a/b) \cdot \exp((-X+X_0-\exp((-X+X_0)/b) \cdot b)/b)) \quad (2.5)$$

V' - Volumenzunahmerate, X - Temperatursumme, X_0 , a , b – geschätzte Parameter

Die Darstellung der Volumenzunahme und -zunahmerate wurde auf der Basis von **Temperatursummenskala** dargestellt, um die Jahres- und Umwelteinflüsse zu standardisieren. Die Temperatursumme ergibt sich, indem man von der durchschnittlichen Tagestemperatur 5°C abzieht und die positiven Einzelwerte für den Zeitraum von Aussaat bis Probenentnahme aufsummiert.

2.3.4 Stroheigenschaften und Bestimmung des Röstgrades

Der Faseranteil des Stängels und die Freilegbarkeit der Fasern wurden durch Wägung parallel zum bzw. nach dem Laboraufschluss (*LA*) von Hanffasern ermittelt. Der **Faseranteil** [%] wurde als prozentualer Anteil der Masse der isolierten Faserfraktion nach zehn Durchläufen durch Laborflachsbrecher an der Masse des Stängels berechnet. Für die Ermittlung der **Freilegbarkeit** [%] von Fasern wurde der prozentuale Anteil der Masse der aus dem Stängel isolierten Faserfraktion nach drei Durchläufen an der Masse der Faserfraktion nach zehn Durchläufen durch Laborflachsbrecher bestimmt.

Der **Röstgrad** wurde nach dem Bergen des Stroh, dem Ballenpressen und dem Transport unmittelbar vor der Faserisolierung mit Hilfe der in Tabelle 2.10 dargestellten Boniturtabelle (SCHURIG-KOCUREK, 2002) ermittelt. Dabei wurden die prozentualen Flächenanteile des Stroh, die einer Boniturnote zugeordnet werden können, bestimmt und ihrem Anteil entsprechend gemittelt.

Tab. 2.10: Boniturskala zur Feststellung des Röstgrades von Hanfstroh.

Merkmal	Röstgrad (Boniturnote)						
	1	2	3	4	5	6	7
Färbung der Epidermis	grün-hellgrün-gelb	gelb-gelbbraun	hellbraun-mittelbraun	braun	braun	nicht sichtbar	nicht sichtbar
Anteil und Färbung der Pilzkolonien an der Stängeloberfläche	0-5% hellgrau	5-50% hellgrau	60-70% hellgrau-mittelgrau	80-90% mittelgrau	>90% mittel-dunkelgrau	100% dunkelgrau-schwarz	100% dunkelgrau-schwarz
Färbung des Holzteils	hellgrün-hellbeige	hellbeige	hellbeige	hellbeige	beige	beige	nicht sichtbar
Anteil und Färbung der Pilzkolonien an der Holzoberfläche	nicht sichtbar	0-5% hell Silber	0-10% hell Silber	10-40% hell Silber	40-70% hellgrau-grau, rot	70-90% hellgrau-grau, rot	100% schwarz
Verbindung zwischen Rinde und Holz	Rinde manuell sehr schwer ablösbar	Rinde manuell schwer ablösbar	Rinde manuell schwer ablösbar	Rinde manuell leicht ablösbar	Rinde manuell leicht ablösbar, bis 20% selbstablösend	Rinde manuell leicht ablösbar, bis 20-60% selbstablösend	Rinde 60-100% selbstablösend

2.3.5 Physikalische Fasereigenschaften

Die Fasern wurden von Hand mit Hilfe einer Pinzette als erstes in der oberen Klemme der Einspannvorrichtung der Prüfmaschine fixiert (Abb. 2.5). Die **Dickenmessung** im Prüfbereich der Fasern wurde mittels eines zweiachsigen Lasermikrometers (ODAC 15 XY-J, Zumbach Electronic AG, Orpund, Schweiz,) durchgeführt. Der Lasermikrometer ist im Prüfstand integriert. Der Prüfbereich ist gleich der Einspannlänge (L_0). Die Faserdicke wurde nach dem Prinzip des Schattenwurfs gemessen. Die Messung erfolgte in zwei senkrecht zueinander stehenden Achsen. Bei der Dickenmessung wurden für die Einspannlänge von 2 mm (Gesamtlänge des Prüffilaments 55 mm) ca. 155 und für die Einspannlänge von 50 mm (Gesamtlänge des Prüffilaments 100 mm) ca. 1000 Einzelwerte aufgenommen. Die Einspannlänge wurde vor dem Zugversuch eingestellt und anschließend die untere Klemme geschlossen.

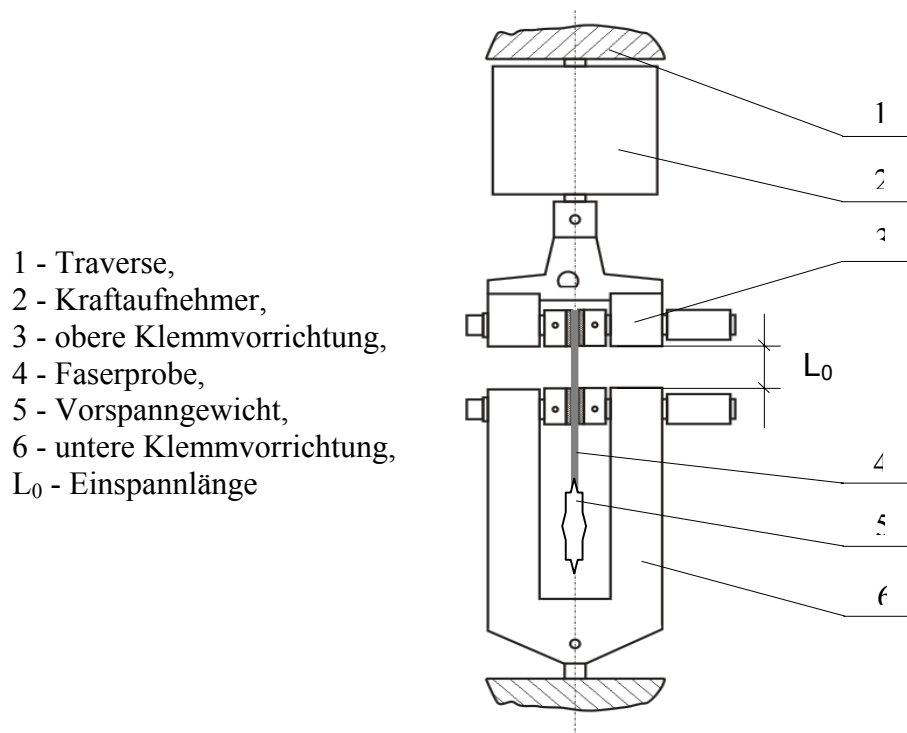


Abb. 2.5: Schematischer Aufbau der Einspannvorrichtung.

Der **Zugversuch** an Einzelfasern erfolgte an einem Universalprüfstand (Typ 1446, Zwick AG, Ulm, D). Die Steuerung der Prüfung, Datenaufnahme und -auswertung der Zugversuchsergebnisse erfolgte durch die Software testXpert V6.0 (Zwick AG, Ulm, D). Die Vorkraft betrug 0,05 N, die Prüfgeschwindigkeit $3 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ und die Bruchabschaltswelle lag bei einem Kraftabfall auf 80% von der Höchstzugkraft. Einspannlängen waren 2 und 50 mm. Für jede geprüfte Faser wurde ein Kraft-Längenänderungs-Diagramm aufgezeichnet.

Einige Fasern brachen in oder an den Kanten der Klemmen. Diese Proben wurden bei der Auswertung nicht berücksichtigt. Alle physikalischen Untersuchungen an isolierten Fasern fanden bei konstantem Raumklima (23°C, 50% rF) statt.

Die Faserlänge wurde durch das Zuschneiden der isolierten Fasern eingestellt. Einspannlänge (L_0) ist die freie Länge der eingespannten Probe, die zwischen den Klemmen gemessen wird. Die Dicke der Faser (d_F) wurde in beiden Messachsen arithmetisch und an allen Messpunkten im Prüfbereich (L_0) geometrisch gemittelt. Das geometrische Mittel wurde einem Kreisdurchmesser gleichgesetzt, dessen Fläche die Ausgangsquerschnittsfläche des Prüfobjektes darstellt. Aus der Faserdicke im Prüfbereich wird die Ausgangsquerschnittsfläche nach der Formel (2.4) berechnet. Die Ausgangsquerschnittsfläche bezeichnet den Zustand der Fasern vor der Prüfung.

$$A_0 = \frac{\pi \cdot d_F^2}{4} \quad (2.6)$$

A_0 - Ausgangsquerschnittsfläche [mm^2], d_F - Faserdicke [mm]

Die **Fasermasse** [g] wurde mit einer Feinwaage (BP210D, Sartorius, Göttingen, D) bestimmt. Der Parameter der **Feinheit** [tex] ergibt sich aus der Masse, welche auf die Länge bezogen wird (Formel 2.7). Die Bestimmung der Feinheit erfolgte rechnerisch (DIN 53816). Hierzu musste die Masse ermittelt und die Länge konstant gehalten werden.

$$[1 \text{ tex} = 1 \text{ g} \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}]$$

$$T_t = m \cdot l_0^{-1} \quad (2.7)$$

T_t - Faserfeinheit [tex], m - Fasermasse [g], l_0 - Faserlänge [m]

Die **Höchstzugkraft**, F_{\max} [N] ist die Maximale Kraft, die während eines Zugversuchs unter definierten Bedingungen bis zum Bruch der Messprobe gemessen wird (DIN 53816).

Höchstzugkraftdehnung, ϵ_H [%] ist Dehnung der Probe bei Anliegen der Höchstzugkraft.

$$\epsilon_H = (l_H - l_0) \cdot l_0^{-1} \cdot 100 \quad (2.8)$$

l_0 - Ausgangslänge der Faser, l_H - Länge der Faser bei Anliegen der Höchstzugkraft

Als **Dehnungsmodul**, $E_{40/60}$ [GPa] wird der Widerstand der Fasern gegenüber einer Längenänderung bezeichnet. Der Dehnungsmodul wird durch die Steigung der Zugkraft-

Längenänderungskurve im Intervall von 40 bis 60% der Höchstzugkraft quantifiziert (HEYLAND & KROMER, 1995).

$$E_{40/60} = (\sigma_{60} - \sigma_{40}) \cdot (\varepsilon_{60} - \varepsilon_{40}) \quad (2.9)$$

$\sigma_{40/60}$ - Spannung bei 40% bzw. 60% der Höchstzugkraft,

$\varepsilon_{40/60}$ - Dehnung bei 40% bzw. 60% der Höchstzugkraft

Die **Zugfestigkeit**, σ_H [MPa] wurde aus der Höchstzugkraft dividiert durch die Ausgangsquerschnittsfläche errechnet (HEYLAND & KROMER, 1995).

$$\sigma_H = F_{\max} \cdot A_F^{-1} \quad [\text{MPa} = \text{N} \cdot \text{mm}^{-2}] \quad (2.10)$$

σ_H - Zugfestigkeit, F_{\max} - Höchstzugkraft, T_t - Faserfeinheit

Die **feinheitsbezogene Höchstzugkraft**, R_H [$\text{cN} \cdot \text{tex}^{-1}$] wird errechnet, indem die Höchstzugkraft durch die Feinheit dividiert wird (DIN 53816).

$$R_H = F_{\max} \cdot T_t^{-1} \quad (2.11)$$

R_H - feinheitsbezogene Höchstzugkraft, F_{\max} - Höchstzugkraft, T_t - Faserfeinheit

2.4 Statistische Auswertung

Die Mittelwerte und Konfidenzintervalle bei der Darstellung der oberirdischen Biomasse in den Balkendiagrammen sind bei $\alpha = 0,05$ mit Statistica 6.0 für Windows (StatSoft Inc., Tulsa, USA) geschätzt worden. Stängelvolumen, Fasereigenschaften und deren Schwankungsbreiten werden grafisch als Boxplot dargestellt. Die untere Begrenzung der Klammer stellt das 10%-Perzentil, die Unter- bzw. Oberkante der Box das 25%- bzw. 75%-Perzentil, die obere Begrenzung der Klammer das 90%-Perzentil dar. Die Linie in der Box und die Zahlenangabe darüber ist der Median, der Buchstabe unterhalb der Box kennzeichnet die Gruppierung nach dem Tukey-Test. Mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnete Messwertverteilungen sind signifikant verschieden. Der Tukey-Test wurde mit Hilfe von SAS Systems für Windows 8.02 (SAS Institute Inc., Cary, USA), *proc GLM* mit $\alpha = 0,05$ durchgeführt. Aufgrund abweichender Normalverteilungen war eine Wertetransformation notwendig: Für die Parameter Ausgangsquerschnittsfläche, Feinheit, Zugfestigkeit, Dehnungsmodul wurden die Messwerte $x^{1/3}$, für Höchstzugkraftdehnung, Fasergehalt und Freilegbarkeit $\arcsin x$ transformiert. In ausgewählten Fällen (s. Tab. in Abb. des Abschnitts 3.3.1) wurde die statische Analyse durch Berechnung von Mediandifferenzen d_{MED} zwischen behandelter Variante (Serie 2) und Kontrolle (Serie 1) und deren Konfidenzintervalle [CI] mit $\alpha = 0,05$ mit Hilfe einer verteilungsunabhängigen Bootstrap-Analyse (Software:

2SAMPLE, frei verfügbar von Mudelsee, Universität Leipzig; <http://www.uni-leipzig.de/~meteo/MUDELSEE/>) durchgeführt. Der Analyse liegen 1999 Simulationen zugrunde. Schliesst das Konfidenzintervall Null ein, liegen identische Verteilungen vor. Signifikante Unterschiede sind hingegen bei Ausschluss von Null gegeben und werden mit * gekennzeichnet. Die Kurvenschätzung für die Darstellung der Dynamik der Stroh- und Fasereigenschaften im Entwicklungsverlauf erfolgte mit Hilfe des Polynoms der 2. Ordnung (SigmaPlot 2002 für Windows 8.0; SPSS Inc., Chicago, USA).