elektronisches dokument
ULB Sachsen-Anhalt

Institut für Acker- und Pflanzenbau
(Direktor: Prof. Dr. Wulf Diepenbrock)
der
Landwirtschaftlichen Fakultät
(Dekan: Prof. Dr.-Ing. Peter Pickel)
der
Martin-Luther-Universität
Halle-Wittenberg

Physikalische Fasereigenschaften von Hanf (*Cannabis sativa* L.) in Abhängigkeit von Bestandesentwicklung, Strohmanagement, Röste und Faseraufschluss

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
doctor agriculturarum (Dr. agr.)

vorgelegt von
M.Agr.Sc.
Viktor Naumenko

geb. am 30.11.1973
in Sdwyshka, Ukraine

Gutachter: Prof. Dr. W. Diepenbrock
Prof. Dr. O. Christen
Prof. Dr. B. Honermeier

Verteidigung am: 20.02.2006

Halle/Saale 2006

urn:nbn:de:gbv:3-000009924
[http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=nbn%3Ade%3Agbv%3A3-000009924]

Inhaltsverzeichnis

Seite

Abkürzungsverzeichnis III

Abbildungsverzeichnis IV

Tabellenverzeichnis VIII

1 Einleitung 1

2 Material und Methoden 4

2.1 Produktionslinien von Hanffasern 4

2.1.1 Technikumslinie 4

2.1.2 Praxislinie 9

2.2 Laboraufschluss von Fasern 13

2.3 Messmethoden 14

2.3.1 Bestandesführung und Ertragsermittlung 14

2.3.2 Bonituren äußerer Merkmale von Hanfpflanzen 14

2.3.3 Morphometrische Messungen an der Hanfpflanze 15

2.3.4 Stroheigenschaften und Bestimmung des Röstgrades 17

2.3.5 Physikalische Fasereigenschaften 18

2.4 Statistische Auswertung 20

3 Ergebnisse 22

3.1 Bestandesentwicklung und Veränderung von Fasereigenschaften 22

3.1.1 Reduzierung der Bestandesdichte 22

3.1.2 Oberirdische Biomasse und Heterogenität des Hanfbestandes 22

3.1.3 Wachstum und Änderung von äußeren Merkmalen der Hanfpflanze 24

3.1.4 Veränderung von Stroheigenschaften im Entwicklungsverlauf 32

3.1.5 Veränderung von Fasereigenschaften im Entwicklungsverlauf 35

3.2 Veränderung der Fasereigenschaften durch Strohmanagement 42

3.3 Wirkung von Röste und Faserisolierungstechnologie auf Fasereigenschaften 44

3.3.1 Technikumslinie 44

3.3.1.1 Röstgrad von Hanfstroh 44

Seite

3.3.1.2 Fasereigenschaften 45
3.3.2 Praxislinie 61
3.3.2.1 Röstgrad von Hanfstroh 61
3.3.2.2 Fasereigenschaften 62

4 Diskussion 68

4.1 Optimaler Erntetermin 68
4.2 Einfluss des Strohmanagements auf die Fasereigenschaften 76
4.3 Wirkung von Röste auf Fasereigenschaften 78
4.4 Wirkung der Aufschlusstechnologien auf die Fasereigenschaften 81
4.5 Schlussfolgerungen 84

5 Zusammenfassung 85
Summary 87

6 Literaturverzeichnis 88

Abkürzungsverzeichnis

A_0	Ausgangsquerschnittsfläche
B	Brecherlinie
BD	Bestandesdichte
BtMG	Betäubungsmittelgesetzes
C	Cottonisierung
°C	Grad Celsius
cm	Zentimeter
DIN	Deutsches Institut für Normung
d_F	Faserdicke
dt	Dezitone
E	Ernte
ε_H	Höchstzugkraftdehnung
et al.	Et allii (und andere)
F_{max}	Höchstzugkraft
GPa	Gigapascal
h	Stunden
ha	Hektar
Hrsg.	Herausgeber
Hz	Herz
K	Kelvin
Kap.	Kapitel
KD	Keimdichte
kg	Kilogramm
LA	Laboraufschluss
kK	keimfähige Körner
L_0	Einspannlänge
m	Meter
mg	Milligramm
min	Minute
mm	Millimeter
MPa	Megapascal
n	Stichprobenumfang
N	Stickstoff
OH	Oberhanf
P	Phosphor
PA	Prallaufschluss
Pfl.	Pflanzen
PM	Probemeter
R	Röste
R^2	Bestimmtheitsmaß
rF	relative Luftfeuchte
RG	Röstgrad
S	Sorte
THC	Tetrahydrocannabinol
UH	Unterhanf
V	Stängelvolumen
σ_H	Zugfestigkeit

Abbildungsverzeichnis

Seite

Abb. 2.1: Witterungsdaten am Standort Leipzig-Seehausen 2000-2002……..... 5

Abb. 2.2: Witterungsdaten des Standortes Zichtau (Altmarkt) 2003……..... 10

Abb. 2.3: Fraktionen des Hanfbestandes.……..... 15

Abb. 2.4: Schematische Darstellung des Hanfstängels für die Messung der Gesamtpflanzenlänge und des Stängeldurchmessers.……..... 16

Abb. 2.5: Schematischer Aufbau der Einspannvorrichtung.……..... 18

Abb. 3.1: Oberirdische Biomasse der Bestandesfraktionen habituell weiblicher, männlicher, vegetativer Oberhanfpflanzen und Unterhanfpflanzen……..... 23

Abb. 3.2: Stängelentwicklung von Hanf (A - cv. USO 31und B - cv. Fasamo) im Feldversuch Leipzig-Seehausen 2000……..... 26

Abb. 3.3: Stängelentwicklung von Hanf (A - cv. USO 31und B - cv. Fasamo) im Feldversuch Leipzig-Seehausen 2001……..……..... 27

Abb. 3.4: Stängelentwicklung von Hanf (A - cv. USO 31und B - cv. Fasamo) im Feldversuch Leipzig-Seehausen 2002……..... 28

Abb. 3.5: Stängelentwicklung von Hanf (cv. Kompolti) im Feldversuch Leipzig-Seehausen 2000…….…..... 29

Abb. 3.6: Stängelentwicklung von Hanf (cv. Kompolti) im Feldversuch Leipzig-Seehausen 2001……..... 30

Abb. 3.7: Stängelentwicklung von Hanf (cv. Kompolti) im Feldversuch Leipzig-Seehausen 2002…….……..... 31

Abb. 3.8: Isolierbarer Faseranteil in habituell weiblichen Oberhanfpflanzen cv. USO 31 und Kompolti in Abhängigkeit von der Entwicklung der Hanfpflanze aus dem Feldversuch Leipzig-Seehausen 2000-2002……..... 33

Abb. 3.9: Freilegbarkeit der Fasern aus habituell weiblichen Oberhanfpflanzen in Abhängigkeit von der Entwicklung der Hanfpflanze aus dem Feldversuch Leipzig-Seehausen 2000-2002……..... 34

Abb. 3.10: Feinheit isolierter Fasern von habituell weiblichen Oberhanfpflanzen in Abhängigkeit von der Entwicklung der Hanfpflanze……..... 36

Abb. 3.11: Zugfestigkeit isolierter Fasern von habituell weiblichen Oberhanfpflanzen in Abhängigkeit von der Entwicklung der Hanfpflanze (L_0 = 2 mm)……..... 37

Abb. 3.12: Zugfestigkeit isolierter Fasern von habituell weiblichen Oberhanfpflanzen in Abhängigkeit von der Entwicklung der Hanfpflanze (L_0 = 50 mm)…….....38

Abb. 3.13: Dehnungsmodul isolierter Fasern von habituell weiblichen Oberhanfpflanzen in Abhängigkeit von der Entwicklung der Hanfpflanze…….….....39

Abb. 3.14: Höchstzugkraftdehnung isolierter Fasern von habituell weiblichen Oberhanfpflanzen in Abhängigkeit von der Entwicklung der Hanfpflanze…. 40

Abb. 3.15: Feinheit und Ausgangsquerschnittsfläche von Hanffasern in Abhängigkeit vom Strohmanagement im Praxisanbau Zichtau 2003….....42

Abb. 3.16: Zugfestigkeit von Hanffasern in Abhängigkeit vom Strohmanagement im Praxisanbau Zichtau 2003……..... 43

Abb. 3.17: Feinheitsbezogene Höchstzugkraft von Hanffasern in Abhängigkeit vom Strohmanagement im Praxisanbau Zichtau 2003……..... 43

Abb. 3.18: Dehnungsmodul und Höchstzugkraftdehnung von Hanffasern in Abhängigkeit vom Strohmanagement im Praxisanbau Zichtau 2003……..... 44

Abb. 3.19: Länge von Hanffasern in Abhängigkeit von Röstgrad und Faseraufschluss……..... 45

Abb. 3.20: Feinheit von Hanffasern (cv. USO 31) in Abhängigkeit von Röstgrad und Faseraufschluss im Feldversuch Leipzig-Seehausen 2002…….....47

Abb. 3.21: Feinheit von Hanffasern (cv. Kompolti) in Abhängigkeit von Röstgrad und Faseraufschluss im Feldversuch Leipzig-Seehausen 2002…….....48

Abb. 3.22: Feinheit von Hanffasern (cv. Fasamo) in Abhängigkeit von Röstgrad und Faseraufschluss im Feldversuch Leipzig-Seehausen 2002……....48

Abb. 3.23: Ausgangsquerschnittsfläche von Hanffasern (cv. USO 31) in Abhängigkeit von Röstgrad und Faseraufschluss im Feldversuch Leipzig-Seehausen 2002……..... 49

Abb. 3.24: Ausgangsquerschnittsfläche von Hanffasern (cv. Kompolti) in Abhängigkeit von Röstgrad und Faseraufschluss im Feldversuch Leipzig-Seehausen 2002…….....50

Abb. 3.25: Ausgangsquerschnittsfläche von Hanffasern (cv. Fasamo) in Abhängigkeit von Röstgrad und Faseraufschluss im Feldversuch Leipzig-Seehausen 2002……..... 50

Abb. 3.26: Zugfestigkeit von Hanffasern (cv. USO 31) in Abhängigkeit von Röstgrad und Aufschluss im Feldversuch Leipzig-Seehausen 2002…….....52

Abb. 3.27: Zugfestigkeit von Hanffasern (cv. Kompolti) in Abhängigkeit von Röstgrad und Aufschluss im Feldversuch Leipzig-Seehausen 2002……..... 53

Abb. 3.28: Zugfestigkeit von Hanffasern (cv. Fasamo) in Abhängigkeit von Röstgrad und Aufschluss im Feldversuch Leipzig-Seehausen 2002…..... 54

Abb. 3.29: Feinheitsbezogene Höchstzugkraft von Hanffasern (cv. Uso 31) in Abhängigkeit von Röstgrad und Aufschluss im Feldversuch Leipzig-Seehausen 2002……..... 55

Abb. 3.30: Feinheitsbezogene Höchstzugkraft von Hanffasern (cv. Kompolti) in Abhängigkeit von Röstgrad und Aufschluss im Feldversuch Leipzig-Seehausen 2002……..... 56

Abb. 3.31: Feinheitsbezogene Höchstzugkraft von Hanffasern (cv. Fasamo) in Abhängigkeit von Röstgrad und Aufschluss aus Feldversuch Leipzig-Seehausen 2002…….…….... 57

Abb. 3.32: Dehnungsmodul von Hanffasern (cv. USO 31) in Abhängigkeit von Röstgrad und Aufschluss aus Feldversuch Leipzig-Seehausen 2002……..... 58

Abb. 3.33: Dehnungsmodul von Hanffasern (cv. Kompolti) in Abhängigkeit von Röstgrad und Aufschluss aus Feldversuch Leipzig-Seehausen 2002……..... 58

Abb. 3.34: Dehnungsmodul von Hanffasern (cv. Fasamo) in Abhängigkeit von Röstgrad und Aufschluss aus Feldversuch Leipzig-Seehausen 2002……..... 59

Abb. 3.35: Höchstzugkraftdehnung von Hanffasern (cv. USO 31) in Abhängigkeit von Röstgrad und Aufschluss aus Feldversuch Leipzig-Seehausen 2002…..... 59

Abb. 3.36: Höchstzugkraftdehnung von Hanffasern (cv. Kompolti) in Abhängigkeit von Röstgrad und Aufschluss aus Feldversuch Leipzig-Seehausen 2002…….…..... 60

Abb. 3.37: Höchstzugkraftdehnung von Hanffasern (cv. Fasamo) in Abhängigkeit von Röstgrad und Aufschluss aus Feldversuch Leipzig-Seehausen 2002…..…..... 60

Abb. 3.38: Länge von Hanffasern in Abhängigkeit von Röstgrad und Faseraufschluss aus Praxisproduktionslinie……..... 62

Abb. 3.39: Feinheit von Hanffasern in Abhängigkeit von Röstgrad und Faseraufschluss aus Praxisproduktionslinie…….....63

Abb. 3.40: Ausgangsquerschnittsfläche von Hanffasern in Abhängigkeit von Röstgrad und Faseraufschluss aus Praxisproduktionslinie……..... 64

Abb. 3.41: Zugfestigkeit von Hanffasern und Faseraufschluss aus Praxisproduktionslinie…….....65

Abb. 3.42: Zugfestigkeit von Hanffasern in Abhängigkeit von Röstgrad und Faseraufschluss aus Praxisproduktionslinie…….....65

Abb. 3.43: Feinheitsbezogene Höchstzugkraft von Hanffasern in Abhängigkeit von Röstgrad und Faseraufschluss aus Praxisproduktionslinie……..... 66

Abb. 3.44: Feinheitsbezogene Höchstzugkraft von Hanffasern in Abhängigkeit von Röstgrad und Faseraufschluss aus Praxisproduktionslinie……..... 66

Abb. 3.45: Dehnungsmodul von Hanffasern in Abhängigkeit von Röstgrad und Faseraufschluss aus Praxisproduktionslinie…….....67

Abb. 3.46: Höchstzugkraftdehnung von Hanffasern in Abhängigkeit von Röstgrad und Faseraufschluss aus Praxisproduktionslinie……..... 67

Tabellenverzeichnis

Seite

Tab. 2.1: Beschreibung des Versuchsstandortes Leipzig-Seehausen……..... 4

Tab. 2.2: Herkunft, Geschlechtsverteilung, Reifetyp der angebauten Hanfsorten am Standort Leipzig-Seehausen in den Jahren 2000-2002…….…….....6

Tab. 2.3: Maßnahmen der Bestandesführung von Hanf in den Jahren 2000 - 2002 am Standort Leipzig-Seehausen……..... 7

Tab. 2.4: Röste von Hanfstroh aus dem Feldversuchsanbau 2002 in Seehausen. …..... 8

Tab. 2.5: Parameter der Maschineneinstellung bei dem Faseaufschluss im Technikumsmaßstab…….…….....9

Tab. 2.6: Beschreibung des Versuchsstandortes Zichtau (Altmark)……..... 9

Tab. 2.7: Herkunft, Geschlechtsverteilung, Reifetyp der angebauten Hanfsorten am Standort Zichtau (Altmark) im Jahr 2003……... 10

Tab. 2.8: Maßnahmen der Bestandesführung von Hanf im Jahr 2003 in Zichtau (Altmark)…….…….....11

Tab. 2.9: Röste von Hanfstroh aus dem Praxisanbau 2003 in Zichtau.……..... 12

Tab. 2.10: Bonitурskala zur Feststellung des Röstgrades von Hanfstroh.……..... 17

Tab. 3.1: Bestandesdichten von Hanf nach Auflaufen und zur Ernte im Feldversuch Leipzig-Seehausen 2000-2002……...…….....22

Tab. 3.2: Bonituren äußerer Merkmale von Hanfpflanzen bei Unterschreiten einer Stängelvolumenzunahme von 5% im Feldversuch Leipzig-Seehausen 2000 - 2002……..... 32

Tab. 3.3: Veränderung von Fasereigenschaften in Abhängigkeit von der Entwicklung der Hanfpflanze im Feldversuch Leipzig-Seehausen 2000 - 2002…….…….....41

Tab. 3.4: Röstgrad von Hanfstroh bei drei Hanfsorten……...…….....44

Tab. 3.5: Länge, Verzweigungen und Schäbengehalt von Hanffasern in Abhängigkeit von Röstgrad und Faseraufschluss im Feldversuch Leipzig-Seehausen 2002……..…….....46

Tab. 3.6: Röstgrad von Hanfstroh bei vier Hanfsorten……...…….....61

Tab. 3.7: Länge, Verzweigungen und Schäbengehalt von Hanffasern in Abhängigkeit von Röstgrad und Faseraufschluss im Feldversuch Zichtau 2003……..……..... 63

1 Einleitung

Hanf (*Cannabis sativa* L.) ist eine alte, vielfältig nutzbare Kulturpflanze, deren Fasern bereits vor 8000 Jahren Verwendung in Asien fanden (HERRER, 1994). Die Haupteinsatzgebiete von Hanffasern waren in der Vergangenheit die Textil- und Seilherstellung sowie die Verwendung als Papierrohstoff. Die Samen dienten als Nahrung und zur Gewinnung von Öl (BÓCSA und KARUS, 1997). Mit der Einführung synthetischer Fasern Anfang des 20. Jahrhunderts ging der Anbau von Hanf stark zurück (DRUBIG, 1995). In der Bundesrepublik Deutschland wurde 1982 der Hanfanbau mit der Änderung des Betäubungsmittelgesetzes (BtMG) verboten. 1996 kam es zur Wiederzulassung des Anbaus unter bestimmten Voraussetzungen: Der Anbau von Hanf ist nur in landwirtschaftlichen Betrieben erlaubt. Zum Anbau in der EU dürfen nur zugelassene Sorten mit einem maximalen THC-Gehalt von 0,3% in der oberirdischen Biomasse (seit 2002: < 0,2%) kommen. Da die Hanffasern zahlreiche Vorteile besitzen, erschließen sich neue Einsatzmöglichkeiten im technischen Bereich (KNOTHE, 1997). Aufgrund geringer Dichte sind Masseeinsparungen in Hanffaser-Compositen gegenüber Glasfaserprodukten in einer Größenordnung von 20-30% möglich. Dabei besitzen Hanffasern hohe Zugfestigkeiten (vergleichbar mit denen der Glassfasern) und Steifigkeiten sowie eine geringe Abrasivität. Die Produktion von Hanffasern ermöglicht eine Energiebindung durch Photosynthese (Schonung fossiler Rohstoffe, Verminderung von CO_2-Emission). Die Fasern sind bei der Entsorgung umweltschonend und verursachen keine Gesundheitsgefährdung. Als Ersatz von Glasfasern werden Hanffasern in faserverstärkten Kunststoffen zunehmend verwendet.

Trotz wirtschaftlichen Interesses erfolgt die Erschließung neuer Absatzmärkte nur sehr langsam. Die Herstellung von Hanffaserprodukten mit hinreichender Wertschöpfung setzt voraus, dass die zur Verarbeitung kommenden Faserpartien in produktrelevanten Parametern reproduzierbare Eigenschaften besitzen. Über deren Abhängigkeit von technologischen Schritten der Pflanzenproduktion und Erstverarbeitung ist wenig bekannt. Gegenwärtige werkstoffliche Anwendungen stützen sich auf kaum spezifizierte Rohware für Produkte geringer bis mittlerer mechanischer Leistung. Eine umfangreichere Hanffasernutzung ist zu erwarten, wenn es gelingt, spezifizierte Qualitäten zu erzeugen und deren Eigenschaften gezielt in Werkstoffe zu übertragen.

Die Naturfaserforschung weist, beginnend mit der endgültigen Verdrängung von Hanf und Lein vom Markt in den fünfziger Jahren, erhebliche Lücken auf. 1997 wurde eine Studie

erarbeitet (HANF, 1997), die in einer umfassenden Analyse den Kenntnisstand zu Anbau, Ernte, Aufbereitung und Verwendung von Hanf zusammenfasst. Nur wenige jüngere Arbeiten setzen sich mit dem Zusammenhang zwischen Rohstoffproduktion und Fasereigenschaften auseinander. Die Anwendung von existierenden Methoden der Untersuchung von Fasereigenschaften ist nicht standardisiert, wodurch in einer Reihe von Fällen Daten aus unterschiedlichen Studien nicht oder nur bedingt vergleichbar sind (TUBACH und NEBEL, 1996). SANKARI (2000) untersuchte die Variabilität der Fasereigenschaften in Abhängigkeit von der Herkunft und der Sorte. Nach der Prüfung des Fasergehalts, der Zugfestigkeit sowie Dehnbarkeit wurde eine Nutzung von monözischen Hanfsorten unter Langtagsbedingungen empfohlen. Von SCHEER-TRIEBEL und LÉON (2000) wurden Qualitätsmerkmale der Hanffaser mit der Qualität anderer Natur- und Glasfasern verglichen. Es wurde festgestellt, dass der Hanf relativ zugfeste und steife Fasern liefert. Das bestätigten auch die Versuche von VON FRANCKEN-WELZ (2003) bei dem Vergleich der Fasereigenschaften von Hanf, Lein und Nessel. SCHÄFER und HONERMEIER (2005) untersuchten die Wirkung von Aussaattermin und -stärke auf die Morphologie von Hanffasern. Es wurde nachgewiesen, dass eine Erhöhung der Aussaatstärke eine Verdickung der Faserzellwand und entsprechend eine Erhöhung der Zugfestigkeit von Fasern verursachen kann. THYGESEN und HOFFMEYER (2005) entwickelten eine Methode zur quantitativen Erfassung von Verdickungen in den Faserzellwänden auf Basis von Polarisationsmikroskopie und Bildanalyse. Dieses Merkmal hat bisher keine Rolle bei der Beurteilung der Qualität von Hanffasern gespielt. Die Kenntnis von Ursachen für Qualitätsdifferenzen in Faserpartien ist eine wichtige Voraussetzung für die Definition von Zuchtzielen und die Optimierung des Anbaus zur Produktion qualitativ hochwertiger Fasern (LÉON und VON FRANKEN-WELZ, 2000). Bisher gibt es keine zusammenhängenden Untersuchungen, die die Wirkung unterschiedlicher Faktoren der Faserproduktion auf deren physikalische Eigenschaften zeigen.

Ziel der vorliegenden Studie ist es, den Einfluss von wesentlichen Produktionsschritten auf die physikalischen Fasereigenschaften zu untersuchen. Der bisher für Hanf als üblich angesehene Erntetermin definiert sich über die Reife der Samen (50%) (HENNINK, 1997). Detaillierte Untersuchungen zur Reife der Fasern liegen abgesehen von Studien zur Bildung der Primärfasern (KELLER et al., 2001) nicht vor. Gleiches gilt für die Nacherntebehandlung des Hanfstrohs auf dem Feld. Der Schwad wird einer Tauröste unterzogen, bei der es durch mikrobiellen Abbau zur Lockerung des Stängelgewebes und damit verbunden zu einer leichteren mechanischen Faserextraktion kommt. Üblicherweise werden Maschinen

eingesetzt, die eine bisher unbeachtete Belastung an Stroh und Fasern verursachen können. Schließlich ist offen, wie mechanische Isolierungsverfahren Fasereigenschaften verändern. Hierbei sind drei prinzipielle Technologien (Prallaufschluss, Brecheraufschluss, Cottonisierung) zu untersuchen.

Daher werden in der vorliegenden Studie folgende Teilaspekte näher analysiert:

1. *Erfassung der Faserreife.* Aus Untersuchungen zur Bestandesentwicklung und festgestellter entwicklungsbedingter Veränderungen von Fasereigenschaften soll anhand von leicht erkennbaren äußeren Merkmalen ein Erntezeitpunkt zur Fasernutzung festgelegt werden.
2. *Einfluss des Strohmanagements auf die Fasereigenschaften.* Hierbei soll die Wirkung der Maschinentechnik zur Ernte und in der Nacherntephase (Mähen, Häckseln, Schwadwenden, Ballenpressen) mit und ohne Röste auf die Qualität von Fasern geprüft werden.
3. *Wirkung von Röste auf Fasereigenschaften.* Fasermerkmale werden nach Erreichen unterschiedlicher Röststadien unter praxisnahen Bedingungen untersucht.
4. *Wirkung von Aufschlusstechnologien auf die Fasereigenschaften.* Hierbei wird die Wirkung mechanischer Faserextraktion aus dem Hanfstroh mittels Prall- und Brecheraufschluss sowie des Öffnens von Faserbündeln in Cottonisierungsstufen auf die physikalischen Fasereigenschaften untersucht.

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 Hanffaserfabrik (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 Dränage fungieren.

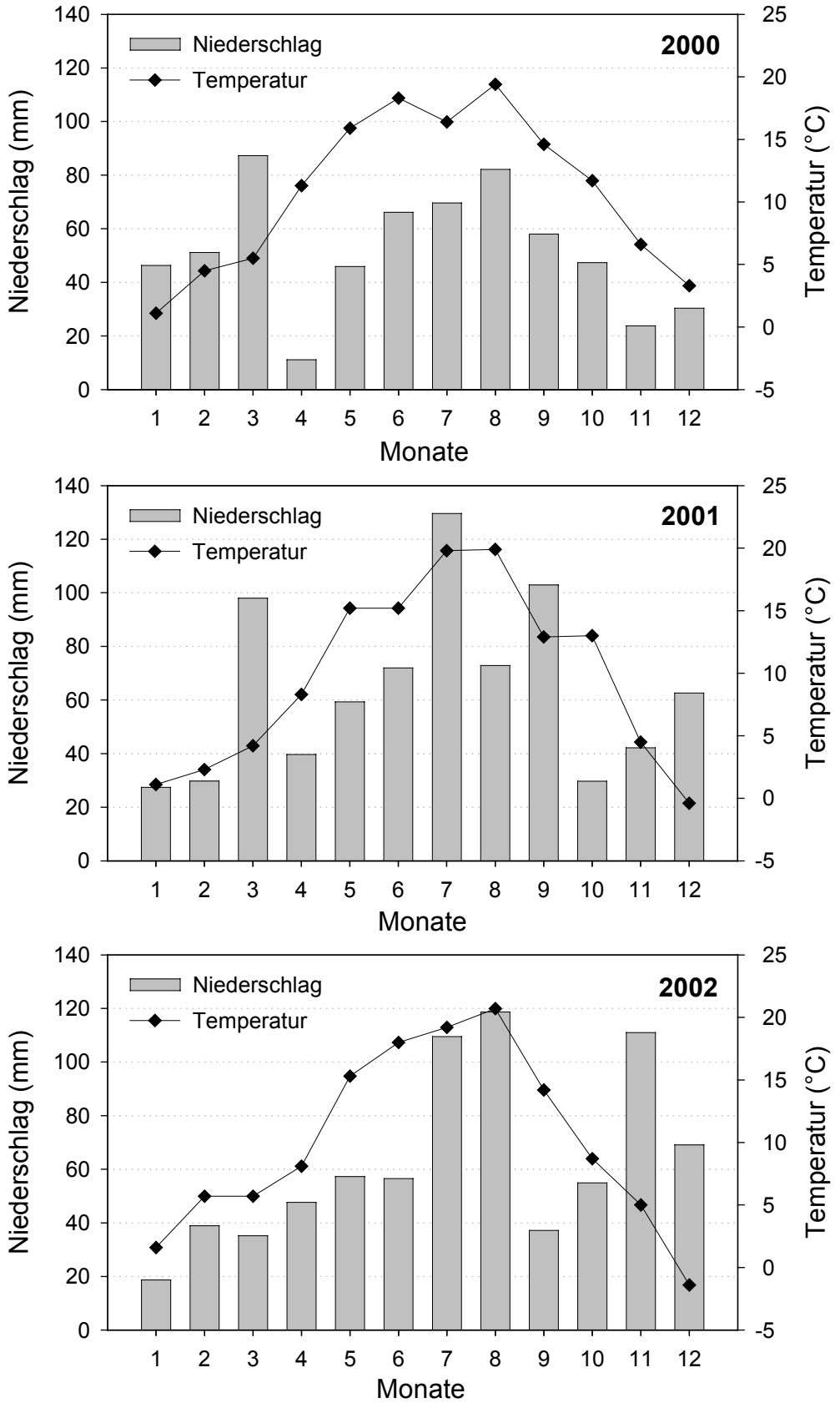


Abb. 2.1: Witterungsdaten am Standort Leipzig-Seehausen 2000-2002.

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
Aussaattiefe, 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_2O_5, Superphosphat 40, Herbst 1998 300 K_2O, 60er Kali, Herbst 1998			1600 CaO, Kalk, Herbst 1992 200 P_2O_5, Superphosphat 40, Herbst 1998 300 K_2O, 60er Kali, Herbst 1998			2000 CaO, Kalk, Herbst 1993 200 P_2O_5, Superphosphat 40, Frühjahr 1998 300 K_2O, 60er Kali, Frühjahr 1998		
Stalldung, 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 Stufenmähwerk (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.

Röst-stufe	Mähen des Bestandes, Beginn der Tauröste	Ballen-pressen	Röstdauer, Tage	Faser-aufschluss
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.

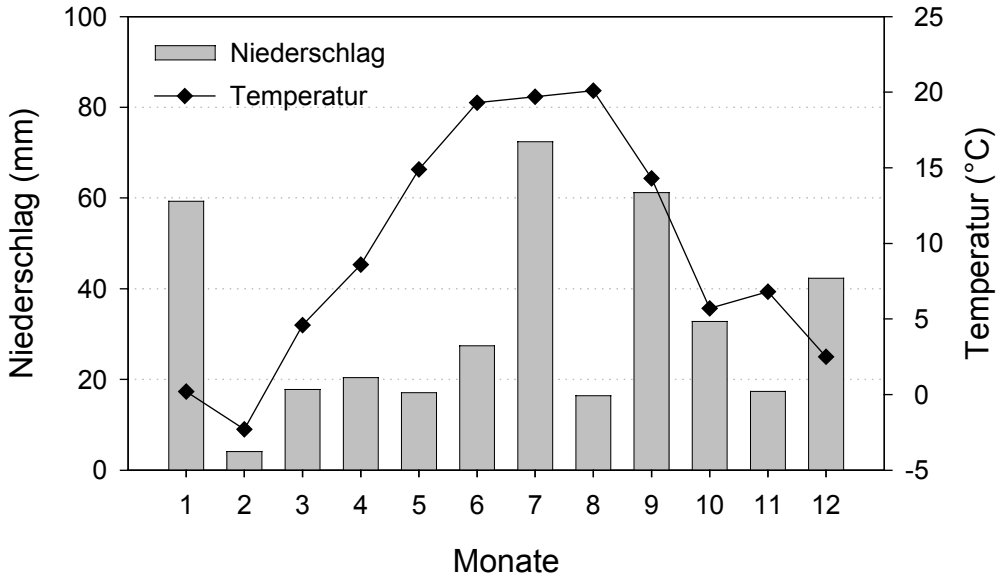


Abb. 2.2: Witterungsdaten des Standortes Zichtau (Altmarkt) 2003 (Auskunft des Deutschen Wetterdienstes).

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											
Sorte	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} Bodenvorrat N / P / K (0-60 cm Boodentiefe)	24 / 33 / 77 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.

Röst-stufe	Mähen des Bestandes, Beginn der Tauröste	Ballen-pressen	Röstdauer, Tage	Faser-aufschluss
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 $m \cdot min^{-1}$. 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.

$$BD_a = \frac{n_a}{l \cdot R} \tag{2.1}$$

n_a - Anzahl der Pflanzen aus laufenden Metern nach dem Auflaufen,

l - Reihenlänge [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.

$$BD_e = \frac{n_e}{l \cdot R} \tag{2.2}$$

n_e - Anzahl der Pflanzen aus laufenden Metern zur Ernte,

l - Reihenlänge [m], R - Reihenabstand [m]

Pflanzenproben zur **Strohertrag**sermittlung wurden per Hand aus Teilflächen von 2 x 2 m^2 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 Proben-entnahmestelle 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 %).

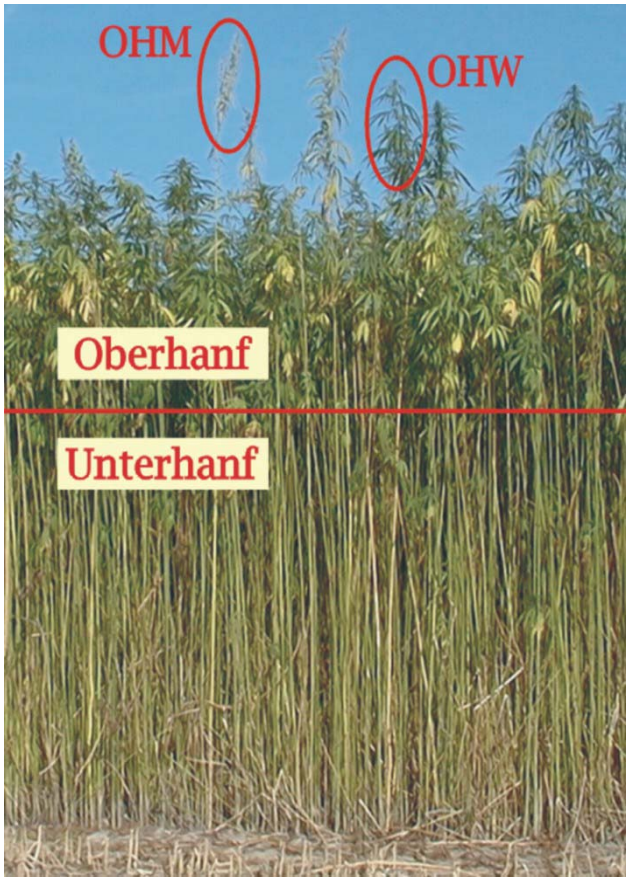


Abb. 2.3: Fraktionen des Hanfbestandes.

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.

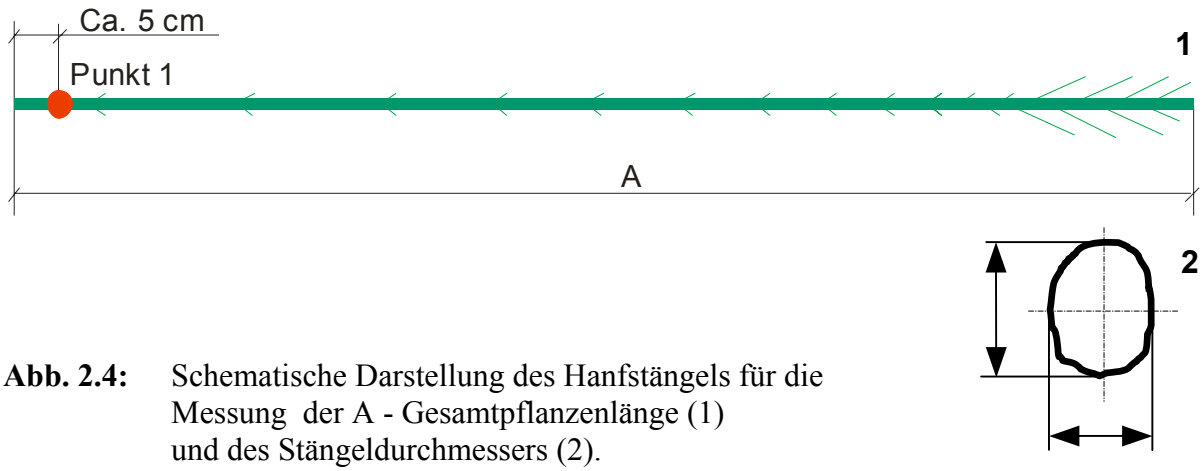


Abb. 2.4: Schematische Darstellung des Hanfstängels für die Messung der A - Gesamtpflanzenlänge (1) und des Stängeldurchmessers (2).

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.

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

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).

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

V - Stängelvolumen, X - Temperatursumme,

X_0, a, b – geschätzte Parameter

Es wurde angenommen, dass das Stängelvolumen des Hanfstängels zum Auflauftermin 0,01 cm^3 betrug. Für die Berechnung der Volumenzuwachsrate 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 Strohs, 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 Strohs, 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% hellsilber	0-10% hellsilber	10-40% hellsilber	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 Dickemessung 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.

1 - Traverse,
2 - Kraftaufnehmer,
3 - obere Klemmvorrichtung,
4 - Faserprobe,
5 - Vorspanngewicht,
6 - untere Klemmvorrichtung,
L_0 - Einspannlänge

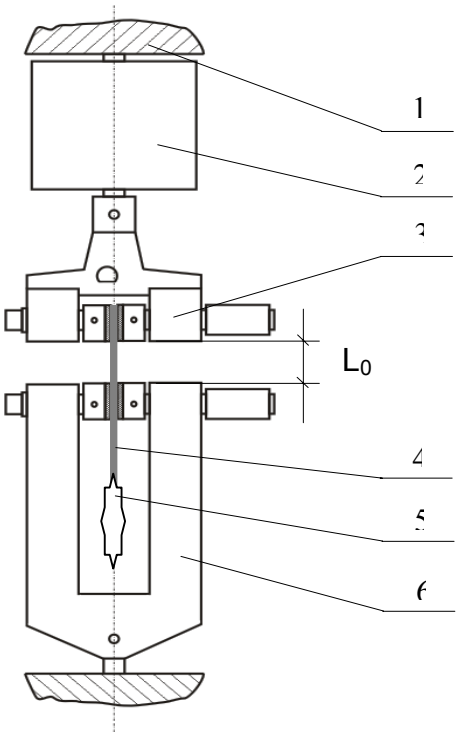


Abb. 2.5: Schematischer Aufbau der Einspannvorrichtung.

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 $mm \cdot min^{-1}$ und die Bruchabschaltschwelle 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 Ausgangsquerschnitts-fläche nach der Formel (2.4) berechnet. Die Ausgangsquerschnittsfläche bezeichnet den Zustand der Fasern vor der Prüfung.

$$A_0 = \frac{\pi \cdot d_F^{\,2}}{4} \tag{2.6}$$

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

Die **Fasermasse** [g] wurde mit einer Feinwaage (BP210D, Sartorius, Götingen, 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.

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

$$T_t = m \cdot l_o^{-1} \tag{2.7}$$

T_t - Faserfeinheit [tex], m - Fasermasse [g], l_o - 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.

$$\varepsilon_H = (l_H - l_0) \cdot l_0^{-1} \cdot 100 \tag{2.8}$$

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).

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

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

Die **feinheitsbezogene Höchstzugkraft**, R_H [$cN \cdot tex^{-1}$] 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 Konfidenzinterwalle 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).

3 Ergebnisse

3.1 Bestandesentwicklung und Veränderung von Fasereigenschaften

Die folgenden Daten beziehen sich auf den Versuchsanbau der Hanfsorten USO 31, Kompolti und Fasamo am Standort Leipzig-Seehausen 2000-2002.

3.1.1 Reduzierung der Bestandesdichte

In den durchgeführten Feldversuchen konnte eine Selbstausdünnung des Pflanzenbestandes während der Vegetationsperiode beobachtet werden. Die einzelnen Daten sind in Tabelle 3.1 dargestellt. Auffällig war zunächst eine starke Jahresabhängigkeit der Pflanzenverluste, die im Jahr 2001 bei USO 31 und Kompolti sowie im Jahr 2002 bei Kompolti am deutlichsten ausgeprägt war. Die relativ niedrige Aussaatmenge von 250 kK·m^{-2} der Samen- und Faserhanfsorte Fasamo bewirkte eine Reduzierung der Bestandesdichte (auf 90% in den Jahren 2001-2002 und auf nur 99% im Jahr 2000). Ein Einfluss der Versuchsanlage und ihrer Varianten in der Reduzierung der Bestandesdichte konnte nicht festgestellt werden.

Tab. 3.1: Bestandesdichten von Hanf (cv. USO 31, cv. Kompolti und cv. Fasamo) nach Auflaufen und zur Ernte im Feldversuch Leipzig-Seehausen 2000-2002.

Jahr	Sorte	Saatdichte (kK·m^{-2})	BD_a Bestandesdichte nach Auflaufen (Pflanzen·m^{-2})	BD_e Bestandesdichte zur Ernte (Pflanzen·m^{-2})	Verhältnis BD_a/BD_e (%)
2000	USO 31	450	172,5	168	97,4
	Kompolti	450	303,8	255	83,9
	Fasamo	250	121,7	121	99,4
2001	USO 31	450	323,8	247	76,3
	Kompolti	450	322,9	258	79,9
	Fasamo	250	242,9	216	88,9
2002	USO 31	450	224,2	183	81,6
	Kompolti	450	434,6	218	50,2
	Fasamo	250	128,8	114	88,5

3.1.2 Oberirdische Biomasse und Heterogenität des Hanfbestandes

In der oberirdischen Biomasse zeigten die untersuchten Sorten signifikante Unterschiede. Die höchsten Erträge wies die Faserhanfsorte Kompolti auf (Abb. 3.1).

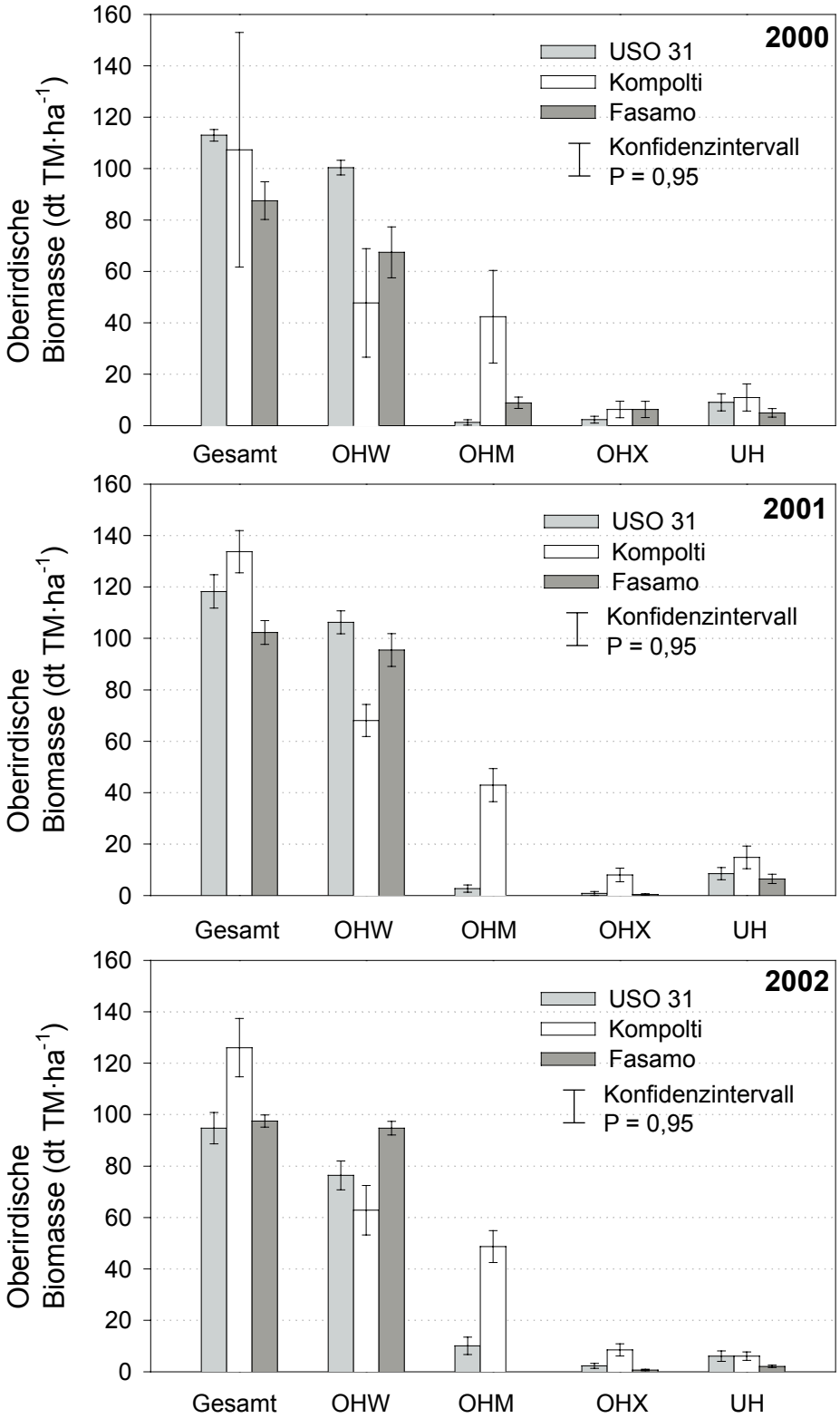


Abb. 3.1: Oberirdische Biomasse der Bestandesfraktionen habituell weiblicher (OHW), männlicher (OHM), vegetativer (OHX) Oberhanfpflanzen und Unterhanfpflanzen (UH) der Sorten USO 31, Kompolti und Fasamo (Standort Leipzig-Seehausen, Anbaujahre 2000-2002).

Die graphische Darstellung der oberirdischen Biomasse zeigt auch eine deutliche Jahresabhängigkeit. Die Trockenmasseerträge, welche auf Trockenmassebasis berechnet wurden, lagen im Jahr 2000 für USO 31 bei 11,3 $t \cdot ha^{-1}$, für Kompolti bei 10,7 $t \cdot ha^{-1}$ und für Fasamo bei 8,8 $t \cdot ha^{-1}$. Sie stiegen im Jahr 2001 auf 11,8, 13,4 und 10,2 $t \cdot ha^{-1}$ an und gingen im Jahr 2002 auf 9,5, 12,6 und 9,8 $t \cdot ha^{-1}$. Die Probennahme, zur Bestimmung der oberirdischen Biomasse, wurde zu den in Tabelle 2.3 genannten Terminen durchgeführt.

Die graphische Darstellung der oberirdischen Biomasseverteilung (Abb. 3.1) macht die Heterogenität des Hanfbestandes deutlich erkennbar. Die Oberhanffraktion wurde überwiegend aus habituell weiblichen Pflanzen gebildet. Zum Beispiel betrug die Fraktion der Pflanzen mit weiblichem Habitus des Bestandes von USO 31 im Jahr 2000 88,8%, im Jahr 2001 89,9% und im Jahr 2002 80,6% an der gesamten oberirdischen Biomasse. Im Vergleich dazu zeigte der Bestand der zweihäusigen Sorte Kompolti eine andere Zusammensetzung. Der Anteil männlicher Pflanzen war deutlich erhöht (32,1-39,4%) und der Anteil weiblichen Pflanzen war entsprechend niedriger (44,5-50,9%). Die Fraktionen von Unterhanfpflanzen (UH) und vegetativer Oberhanfpflanzen (OHX) lagen bei etwa 11%. Von einem geringen Prozentsatz Unterhanf abgesehen, setzten sich die Bestände der Samen- und Faserhanfsorte Fasamo in den Versuchsjahren nahezu ausschließlich aus einhäusigen Pflanzen zusammen (bis ca. 97% im Jahr 2002).

3.1.3 Wachstum und Änderung von äußeren Merkmalen der Hanfpflanze

Die Ergebnisse des Wachstums sind für die Hauptfraktionen des Hanfbestandes (einhäusige OH-Pflanzen der Sorten USO 31, Fasamo und weibliche und männliche Pflanzen der Sorte Kompolti) dargestellt. Die Diagramme (Abb. 3.2-3.7, 1) stellen die Änderung des Stängelvolumens (Regressionsschätzung mit Hilfe der Gompertz-Funktion) und der Volumenzunahmerate (1. Ableitung der Gompertz-Funktion) dar. Zur Darstellung der Bestandesdynamik wurde als physiologische Zeitskala die Temperatursumme gewählt. Die Temperatursummenberechnung basierte auf einer Basistemperatur von 5°C. Die Beobachtungen des Pflanzenwachstums begannen mit Auflaufen des Hanfbestandes. In einem späten vegetativen Stadium (ca. 70 Tage nach der Aussaat, Temperatursummen 780-821 K) bis zur Pflanzenreife (ca. 170 Tage nach der Aussaat, Temperatursummen ca. 1900 K) wurden die Pflanzen genauer untersucht (Abb. 3.2-3.7, 1). Das Vegetationsende wurde durch Volumenzunahmerate definiert, an der Stängelvolumen keinen weiteren quantitativen

Änderung unterliegt und die Volumenzunahmerate 5% des Maximums (0,0019-0,0038 $cm^3 \cdot K^1$ s. Abb. 3.2-3.7) unterschreitet.

Die Volumenzunahme bei USO 31 und Fasamo kam zwischen der zweiten und der vierten Probenentnahme zum Erliegen. USO 31 und Fasamo erreichten dieses Stadium im Jahr 2000 bei Temperatursummen 1510 - 1540 K (Abb. 3.2, 1). Im Jahr 2001 verschob sich das Stadium und lag bei USO 31 und Fasamo schon bei Temperatursummen von 1390 - 1270 K (Abb. 3.3, 1). Im Jahr 2002 wurden die Unterschiede zwischen USO 31 und Fasamo deutlicher: das Ende der Volumenzunahme bei USO 31 lag hier bei einer Temperatursumme von 1340 K (ca. dritte Probenentnahme), bei Kompolti von 1690 K (ca. vierte Probenentnahme). Bei der Darstellung der Entwicklung von Stängelvolumina lässt sich die spätreifende Hanfsorte Kompolti leicht erkennen. Bei Temperatursummen von 1610 - 1670 K (vierte Probenentnahme) erreichten die weiblichen OH-Pflanzen der Sorte Kompolti das Wachstumsende (Abb. 3.5-3.6, A1). Im Jahr 2002 konnte das Ende der Volumenzunahmekurve nicht erfasst werden (Abb. 3.7, A1). Die Volumenzunahme bei männlichen OH-Pflanzen der Sorte Kompolti kam früher zum Erliegen als bei den weiblichen mit Temperatursummen von 1570 K im Jahr 2000, 1520 K im Jahr 2001 und 1690 K im Jahr 2002 (Abb. 3.5-3.7 B1).

Für die Hauptfraktionen der untersuchten Hanfsorten wurde parallel die Veränderung des Blattbesatzes (Abb. 3.2-3.7, 2) und der Stängelfärbung (Abb. 3.2-3.7, 3) sowie der Entwicklungszustand der Blüten (Abb. 3.2-3.7, 4) dargestellt. Die vertikale Linie in den Abbildungen kennzeichnet das Entwicklungsstadium, bei dem die Volumenzunahmerate unter 5% fällt. Die Hanfpflanzen verlieren im Laufe ihrer Entwicklung kontinuierlich Blätter. Dieses Merkmal zeigt insbesondere in den frühen Stadien deutlich erkennbare Abstufungen. An den drei ersten Probennahmeterminen (ca. 70-120 Tagen nach der Aussaat) stieg beispielsweise bei der Sorte USO 31 der Anteil des entblätterten Stängels von ca. 65% über 75% auf 85% an. Ähnliche Tendenzen wurden auch bei Kompolti und Fasamo festgestellt. In späteren Entwicklungsstadien (3.-5. Termin der Probenentnahme) waren die Veränderungen schwächer und bewegten sich nur noch in einer Größenordnung um 10%. Männliche OH-Pflanzen von Kompolti haben die Blattmasse über dem gesamten Versuchszeitraum intensiv verloren und waren am 5. Probenentnahmetermin bereits zu 100% entblättert (Abb. 3.5-3.7, B2). Die Volumenzunahme des Stängels kam zum Erliegen (< 5%), wenn ein Blattverlust von mindestens 80% an den Pflanzen zu verzeichnen war.

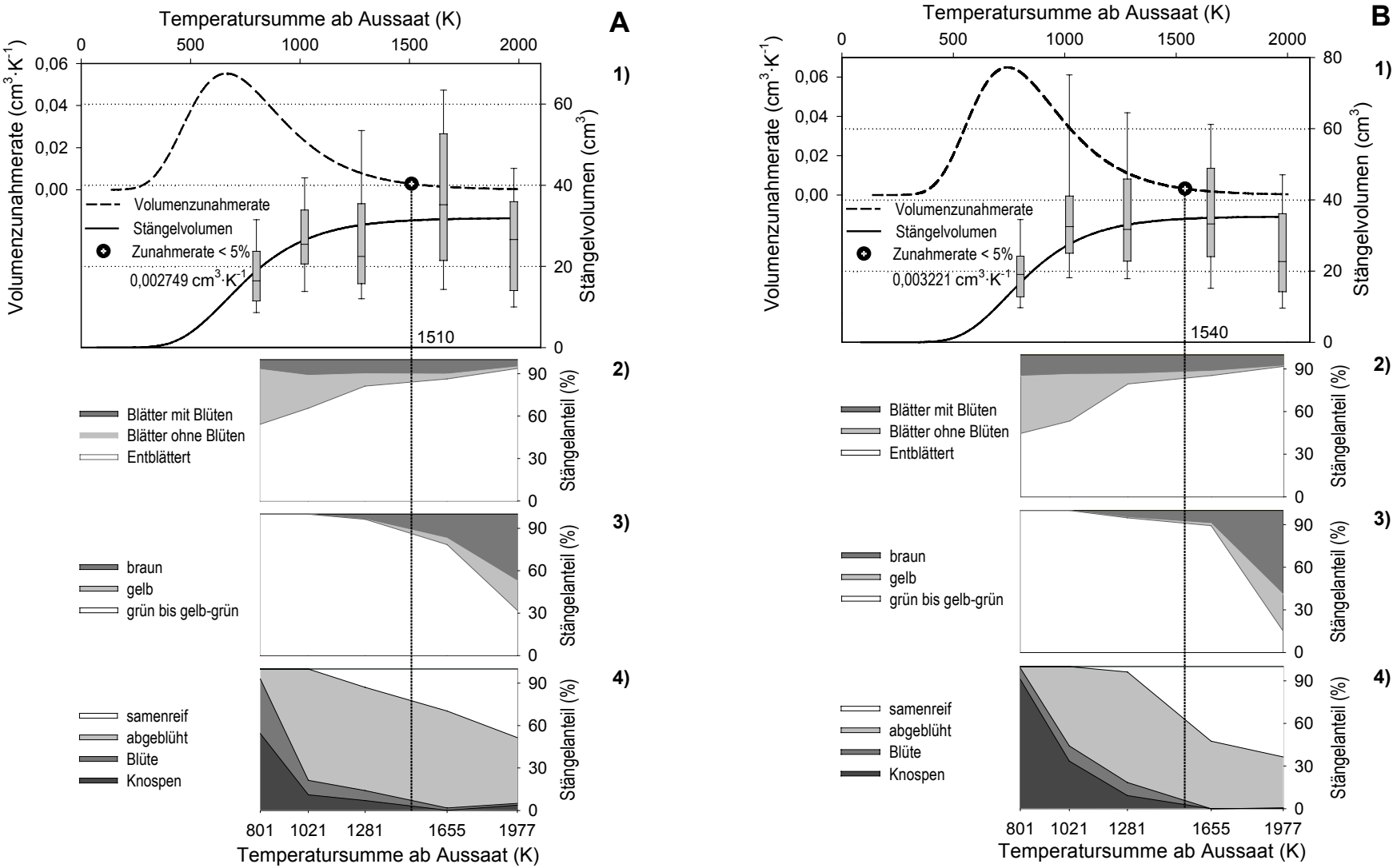


Abb. 3.2: Stängelentwicklung von Hanf (A - cv. USO 31und B - cv. Fasamo) im Feldversuch Leipzig-Seehausen 2000.
(1) Änderung von Stängelvolumen und Zuwachsrate des Stängelvolumens; Bonituren an Oberhanfpflanzen mit weiblichem Habitus: Stängelentblätterung (2), Stängelfärbung (3), Blütenentwicklung (4); vertikale Linie kennzeichnet das Stadium, bei dem die Volumenzunahmerate unter 5% fällt.

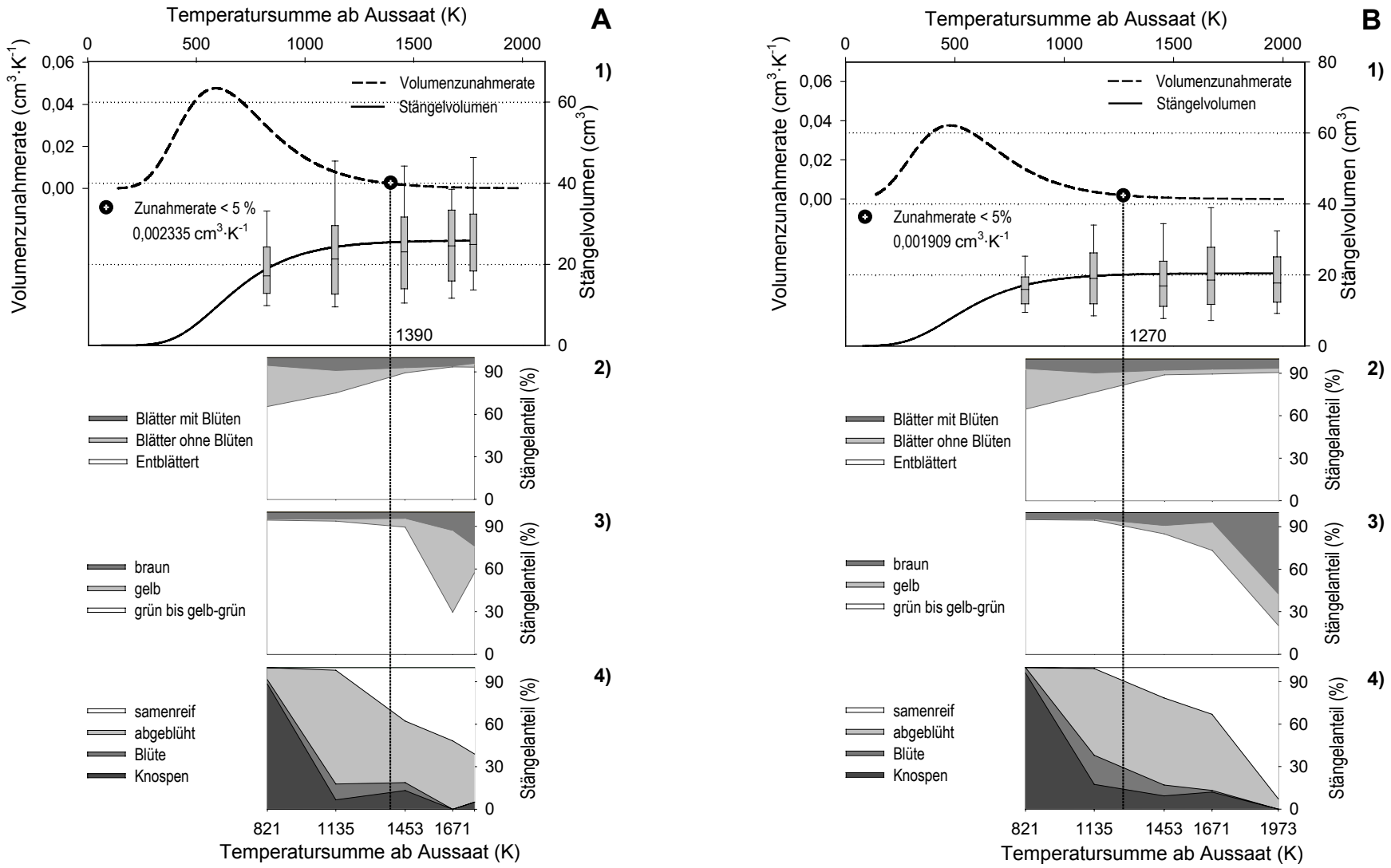


Abb. 3.3: Stängelentwicklung von Hanf (A - cv. USO 31und B - cv. Fasamo) im Feldversuch Leipzig-Seehausen 2001. Bonituren an Oberhanfpflanzen mit weiblichem Habitus; weitere Erklärung siehe Abb. 3.2.

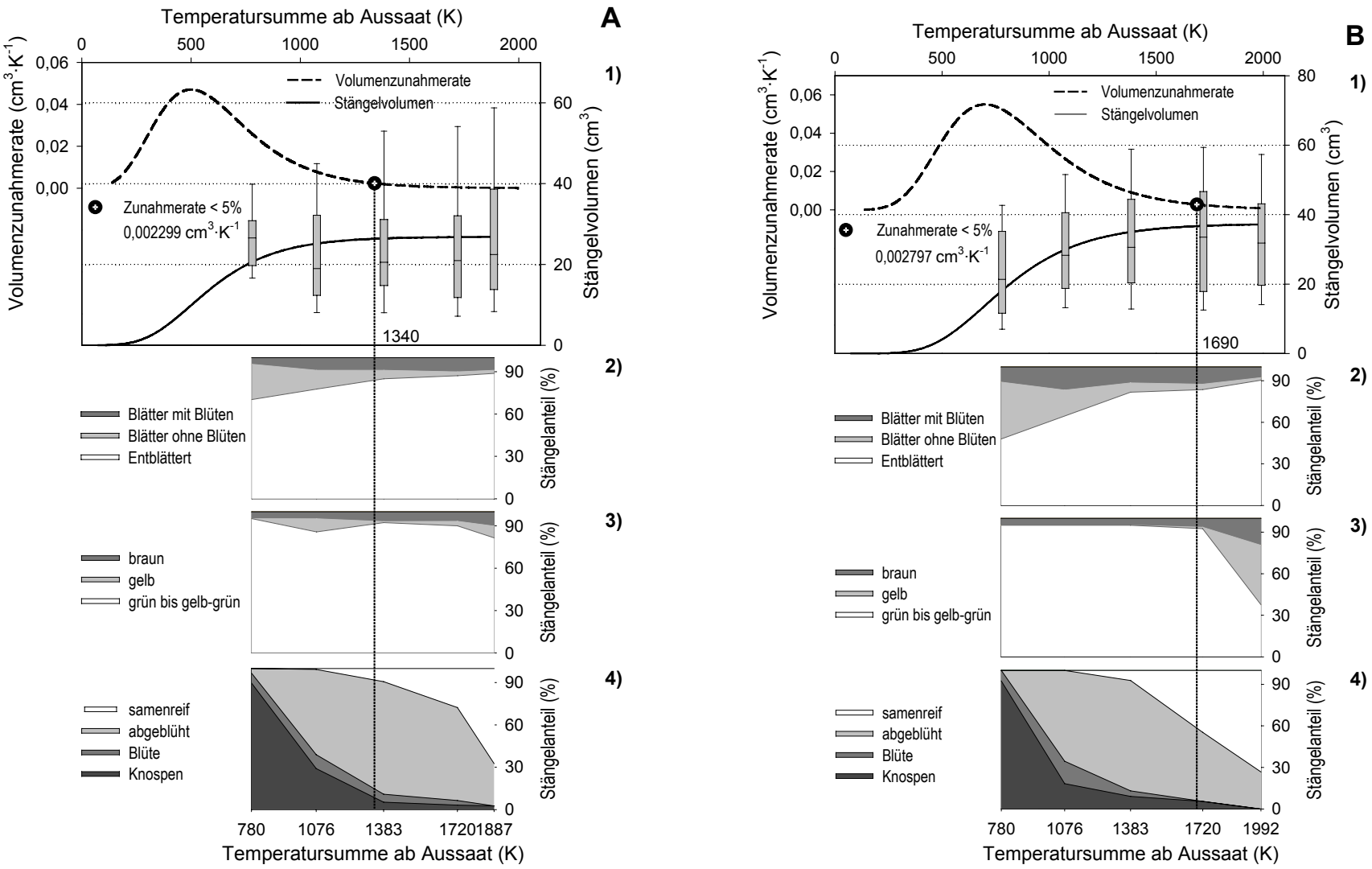


Abb. 3.4: Stängelentwicklung von Hanf (A - cv. USO 31und B - cv. Fasamo) im Feldversuch Leipzig-Seehausen 2002. Bonituren an Oberhanfpflanzen mit weiblichem Habitus; weitere Erklärung siehe Abb. 3.2.

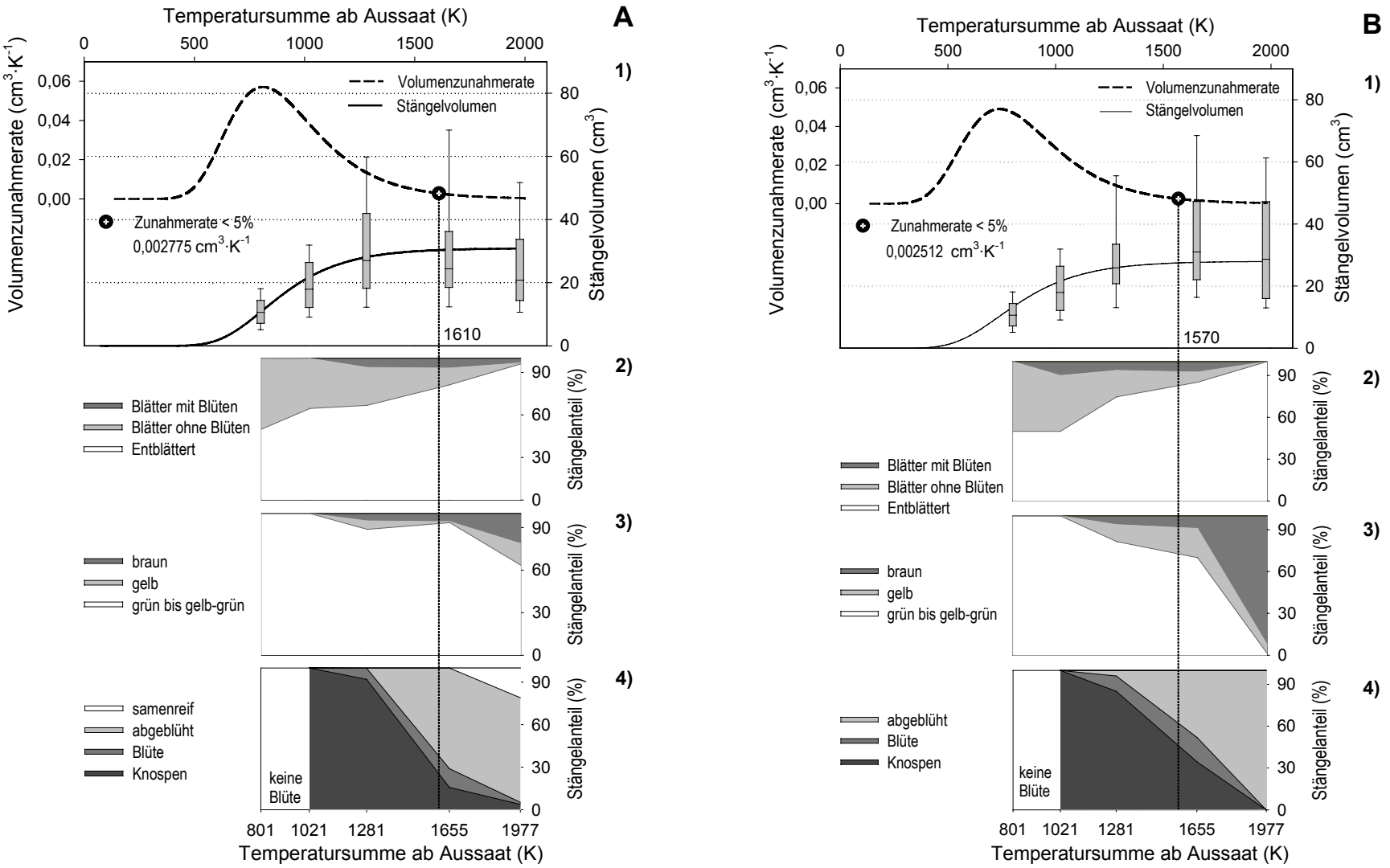


Abb. 3.5: Stängelentwicklung von Hanf (cv. Kompolti) im Feldversuch Leipzig-Seehausen 2000.
Bonituren an weiblichen (A) und männlichen (B) Oberhanfpflanzen; weitere Erklärung siehe Abb. 3.2.

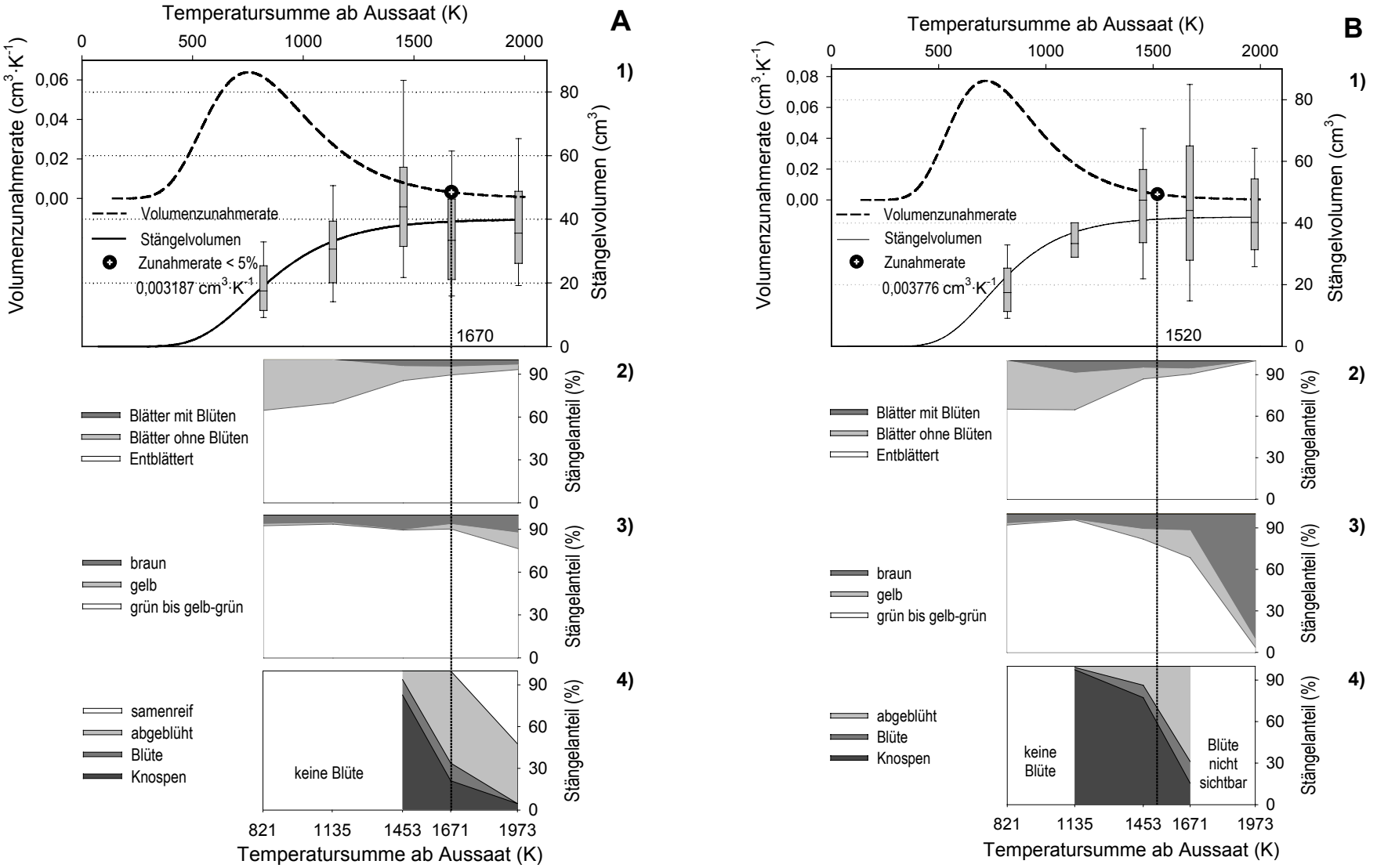


Abb. 3.6: Stängelentwicklung von Hanf (cv. Kompolti) im Feldversuch Leipzig-Seehausen 2001.
Bonituren an weiblichen (A) und männlichen (B) Oberhanfpflanzen; weitere Erklärung siehe Abb. 3.2.

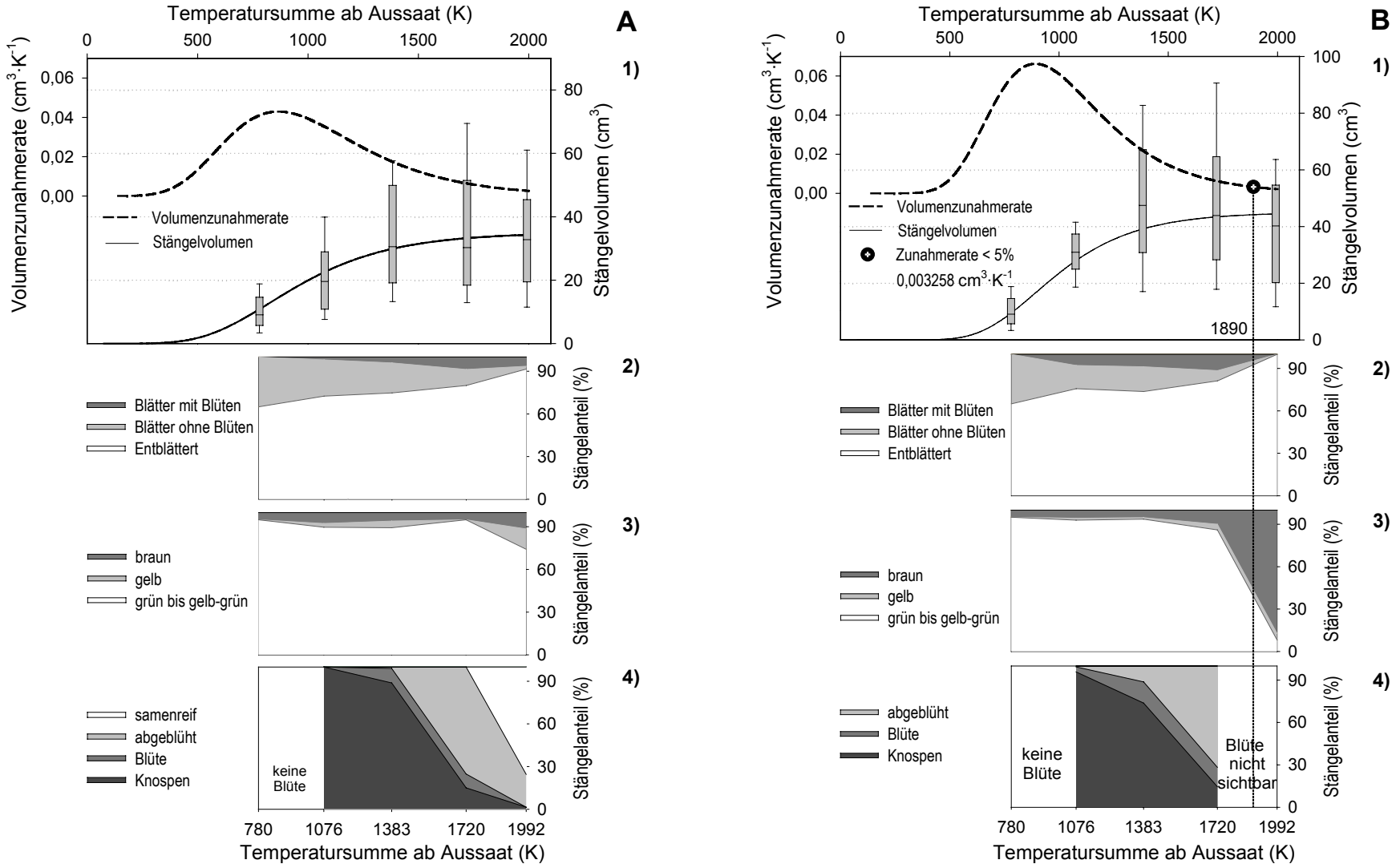


Abb. 3.7: Stängelentwicklung von Hanf (cv. Kompolti) im Feldversuch Leipzig-Seehausen 2002.
Bonituren an weiblichen (A) und männlichen (B) Oberhanfpflanzen; weitere Erklärung siehe Abb. 3.2.

Bezogen auf die drei Farbklassen (grün bis gelbgrün; gelb; braun), zeigen die vorliegenden Daten (Abb. 3.2-3.7, 3) deutliche Veränderungen erst in späten Entwicklungsstadien (>130 Tage nach der Aussaat). Die Hanfstängel waren zum Ende der Stängelvolumenzunahme (< 5%) noch überwiegend grün bzw. gelbgrün: USO 31 zu 85-91%, Kompolti zu 90-93% und Fasamo zu 90-92% (Tab. 3.2). Unmittelbar danach setzten mit unterschiedlicher Intensität Verfärbungen zu gelb und braun ein (Abb. 3.2-3.7, 3). Die männlichen Pflanzen der Sorte Kompolti hatten in den Jahren 2000 und 2001 noch überwiegend grüne bis gelbgrüne Stängelfärbung (72 bzw. 88%). Im Jahr 2002 hingegen waren die Stängel der männlichen Pflanzen zum gleichen Zeitpunkt überwiegend braun (61%).

Tab. 3.2: Bonituren äußerer Merkmale von Hanfpflanzen (cv. USO 31, cv. Kompolti und cv. Fasamo) bei Unterschreiten einer Stängelvolumenzunahme von 5% im Feldversuch Leipzig-Seehausen 2000 - 2002 (* Kriterium nicht erreicht).

	USO 31			Kompolti						Fasamo		
	2000	2001	2002	2000		2001		2002		2000	2001	2002
Boniturmerkmal	OHW	OHW	OHW	OHW	OHM	OHW	OHM	OHW	OHM	OHW	OHW	OHW
Stängelanteil entblättert (%)	84	87	84	80	83	89	87	*	91	84	82	83
Stängelanteil grün/gelbgrün (%)	85	91	91	93	72	90	88	*	39	91	90	92
Blüten samenreif (%)	22	70	8	0	-	0	-	*	-	37	9	42

Die Anteile von Knospen, Blüten und reifenden Samen variierten erheblich. Die Samenreife von USO 31 betrug im Jahr 2000 zum Ende des Stängelvolumenzuwachses 22%, 2001 70% und 2002 lediglich 8%. Bei Kompolti wurde die Samenreife zum Zeitpunkt des Wachstumsendes nicht erreicht. Zum gleichen Zeitpunkt waren bei Fasamo 37%, 9% und 50% in den Jahren 2000, 2001 und 2002 samenreif.

3.1.4 Veränderung von Stroheigenschaften im Entwicklungsverlauf

Die Stroheigenschaften und deren Abhängigkeit von der Entwicklung der Pflanze wurden für zwei Faserhanfsorten USO 31 (einhäusige Pflanzen mit weiblichem Habitus) und Kompolti (weibliche Pflanzen) in drei Anbaujahren 2000 - 2002 dargestellt (Abb. 3.8-3.9). Die Regressionsanalyse zur Beschreibung der Dynamik der Stroheigenschaften erfolgte mit Hilfe eines Polynoms der 2. Ordnung.

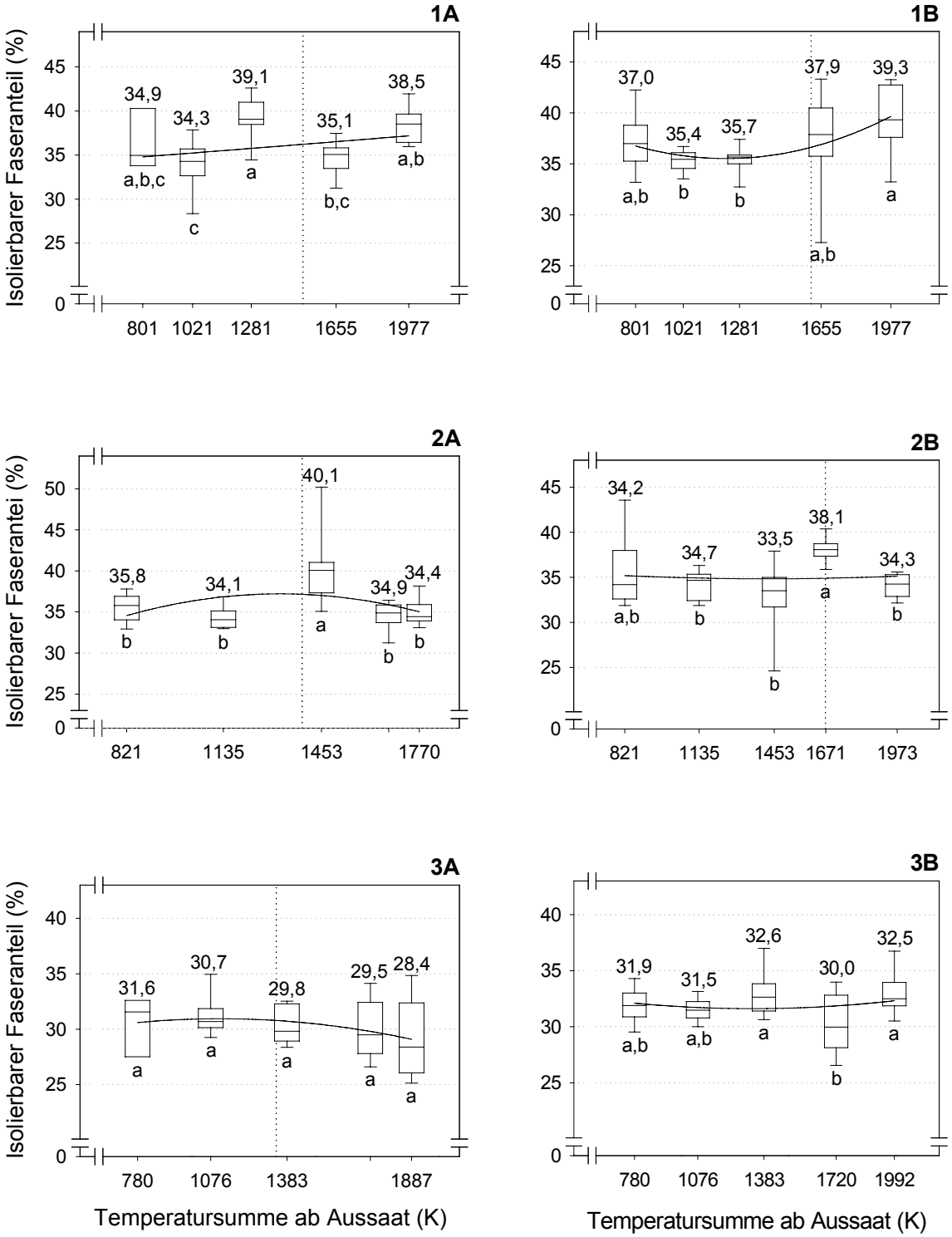


Abb. 3.8: Isolierbarer Faseranteil in habituell weiblichen Oberhanfpflanzen cv. USO 31 und Kompolti in Abhängigkeit von der Entwicklung der Hanfpflanze aus dem Feldversuch Leipzig-Seehausen 2000-2002 (A - cv. USO 31, B - cv. Kompolti; 1, 2 und 3 - Anbaujahre 2000, 2001 und 2002). Grundlage der Funktionen in den Abbildungen ist die Regressionsanalyse mit einem Polynom der 2. Ordnung (R^2 = 0,15-0,61). Die vertikale Linie kennzeichnet das Stadium, bei dem die Volumenzunahmerate unter 5% fällt.

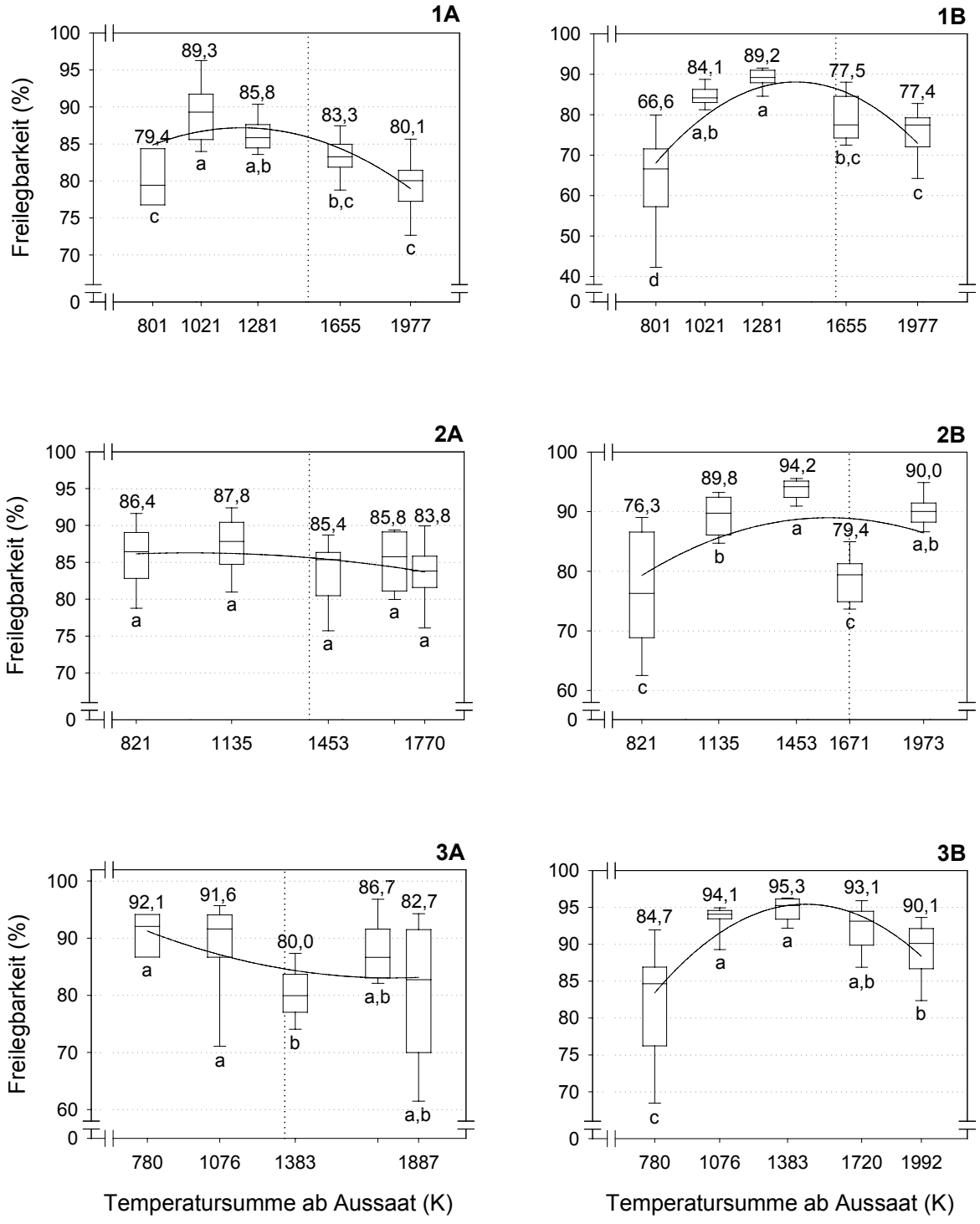


Abb. 3.9: Freilegbarkeit der Fasern aus habituell weiblichen Oberhanfpflanzen in Abhängigkeit von der Entwicklung der Hanfpflanze aus dem Feldversuch Leipzig-Seehausen 2000-2002 (A - cv. USO 31, B - cv. Kompolti; 1, 2 und 3 - Anbaujahre 2000, 2001 und 2002). Grundlage der Funktionen in den Abbildungen ist die Regressionsanalyse mit einem Polynom der 2. Ordnung (R^2 = 0,36-0,62). Die vertikale Linie kennzeichnet das Stadium, bei dem die Volumenzunahmerate unter 5% fällt.

Der **Faseranteil**, welcher sich aus der Faserfraktion nach Laboraufschluss berechnete, war im Beobachtungszeitraum durchgehend unverändert (Abb. 3.8). Sofern es Abweichungen davon gab (z.B. 3. Probenentnahmetermin bei USO 31 im Jahr 2001, s. Abb. 3.8 2A), betraf es Faserproben, die in der Endstufe der Laborisolierung noch starke Schäbenverunreinigungen aufwiesen. Die Ergebnisse geben keinen Hinweis darauf, dass im Beobachtungszeitraum eine Veränderung des Fasergehaltes eintrat.

Die **Freilegbarkeit** der Fasern der Sorte USO 31 (A) aus der ersten und fünften Probenentnahme unterscheidet sich nicht sehr deutlich (Abb. 3.9). Im Jahr 2001 wurde bei USO 31 kein signifikanter Unterschied im Vergleich der Freilegbarkeit festgestellt (Abb. 3.9 2A). Die zweite und dritte Probenentnahme im Jahr 2000 und nur die dritte Probenentnahme im Jahr 2002 lieferten Strohvarianten mit statistisch gesicherten Abweichungen in der Freilegbarkeit der Fasern (Abb. 3.9 1A und 3A). Auffälligerweise lagen die höchsten Werte der Freilegbarkeit der Sorte Kompolti zum dritten Probenentnahmetermin (Abb. 3.9 1-3B).

3.1.5 Veränderung von Fasereigenschaften im Entwicklungsverlauf

Die physikalischen Fasermerkmale und deren Abhängigkeit von der Entwicklung der Hanfpflanze wurden für zwei Faserhanfsorten USO 31 (einhäusige Pflanzen mit weiblichem Habitus) und Kompolti (weibliche Pflanzen) in drei Anbaujahren 2000 - 2002 dargestellt (Abb. 3.10-3.13). Die Kurvenschätzung für die Darstellung der Änderung von Fasereigenschaften im Entwicklungsverlauf erfolgte auf der Basis des Polynoms 2. Ordnung.

Die Werte der **Feinheit** der isolierten Fasern von Oberhanf der Sorte USO 31 lagen im Jahr 2000 generell höher (14,7 und 13,1 tex bei 4. und 5. Probenentnahme) als in den Jahren 2001 und 2002 (Abb. 3.10). Auffälligerweise lagen zum dritten Probenentnahmetermin die höchsten Feinheitswerte vor, d.h. die gröbsten Fasern in zwei von drei Fällen bei USO 31 und Kompolti. Abweichungen traten bei USO 31 im Jahr 2000 und bei Kompolti im Jahr 2002 auf. Diese Unterschiede waren allerdings nicht statistisch signifikant. Die Faserfeinheit der untersuchten Hanfsorten aus der ersten und fünften Probenentnahme unterscheidet sich nicht sehr deutlich. Eine Ausnahme bildet USO 31. Diese Sorte hat im Jahr 2001 zur ersten Probenentnahme signifikant feinere Fasern geliefert. Im Jahr 2002 blieb die Feinheit während der Pflanzenentwicklung praktisch unverändert (6-7 tex).

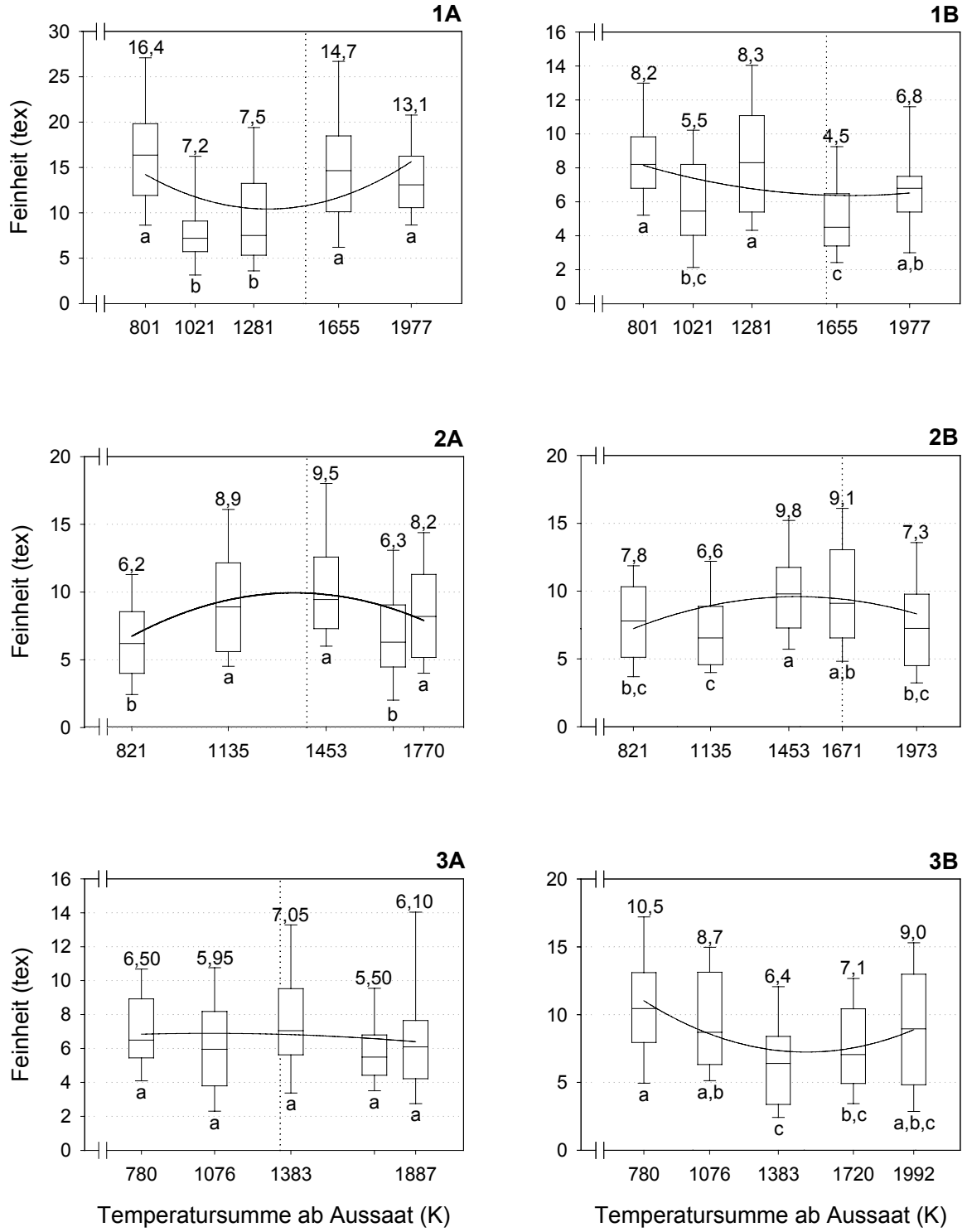


Abb. 3.10: Feinheit isolierter Fasern von habituell weiblichen Oberhanfpflanzen in Abhängigkeit von der Entwicklung der Hanfpflanze (A - cv. USO 31, B - cv. Kompolti; 1, 2 und 3 - Anbaujahre 2000, 2001 und 2002 im Feldversuch Leipzig-Seehausen; Faserlänge = 100 mm, n = 40). Grundlage der Funktionen in den Abbildungen ist die Regressionsanalyse mit einem Polynom der 2 (R^2 = 0,10-0,62). Ordnung. Die vertikale Linie kennzeichnet das Stadium, bei dem die Volumenzunahmerate unter 5% fällt.

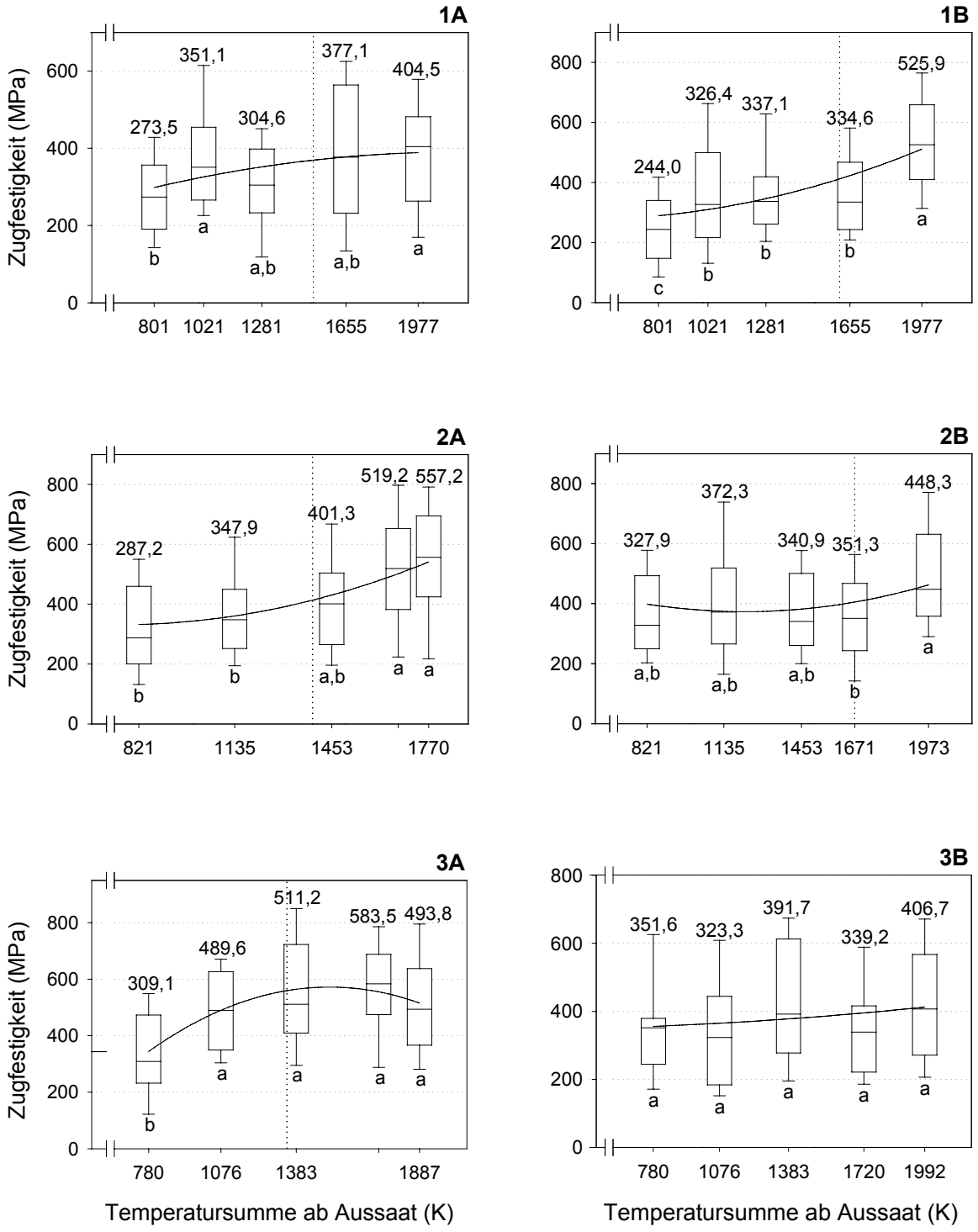


Abb. 3.11: Zugfestigkeit isolierter Fasern von habituell weiblichen Oberhanfpflanzen in Abhängigkeit von der Entwicklung der Hanfpflanze (L_0 = 2 mm, n = 40, cv. USO 31 und Kompolti, Feldversuch Leipzig-Seehausen 2000-2002; weitere Erklärung siehe Abb. 3.10).

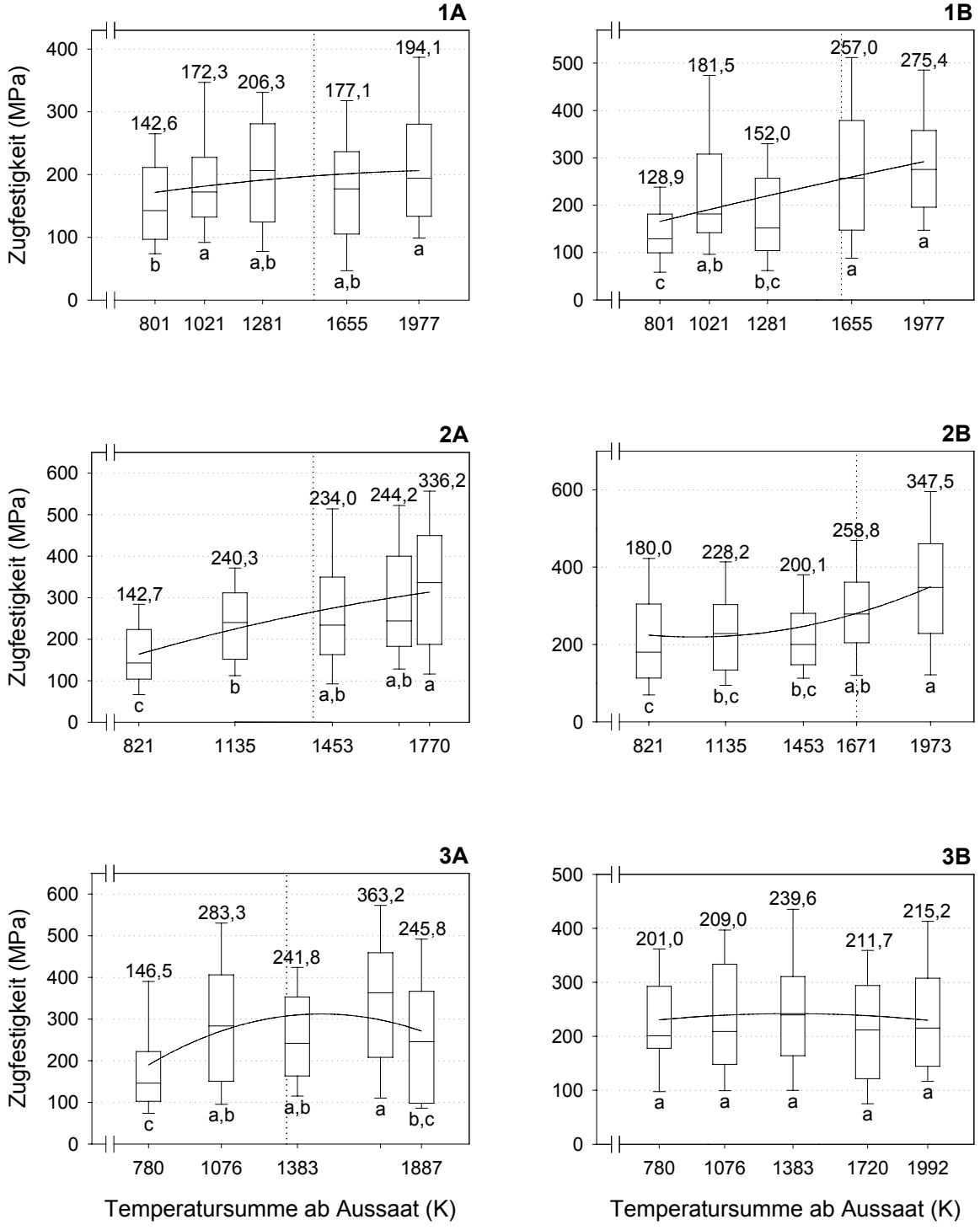


Abb. 3.12: Zugfestigkeit isolierter Fasern von habituell weiblichen Oberhanfpflanzen in Abhängigkeit von der Entwicklung der Hanfpflanze (L_0 = 50 mm, n = 40, cv. USO 31 und Kompolti, Feldversuch Leipzig-Seehausen 2000-2002; weitere Erklärung siehe Abb. 3.10).

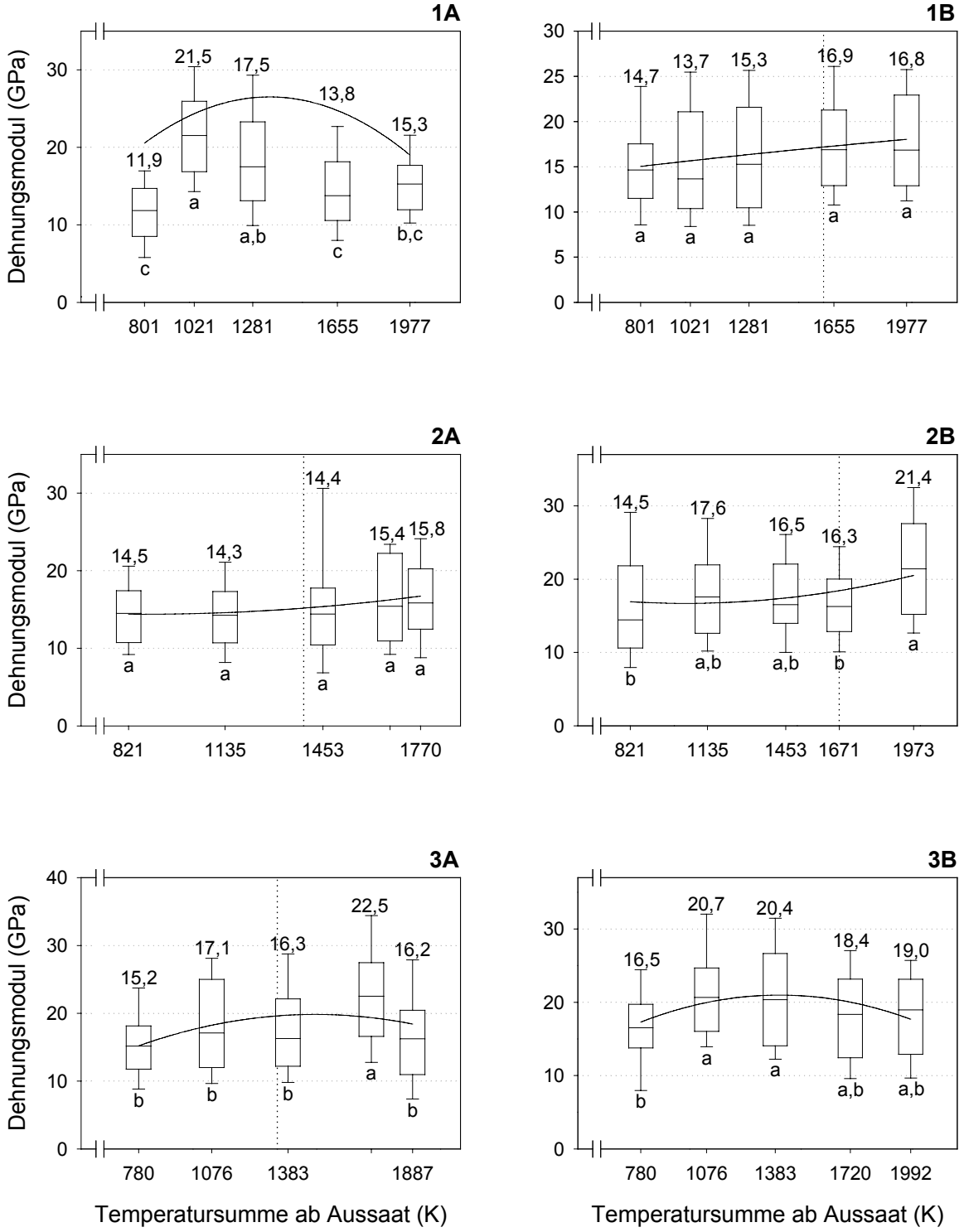


Abb. 3.13: Dehnungsmodul isolierter Fasern von habituell weiblichen Oberhanfpflanzen in Abhängigkeit von der Entwicklung der Hanfpflanze (L_0 = 50 mm, n = 40, cv. USO 31 und Kompolti, Feldversuch Leipzig-Seehausen 2000-2002; weitere Erklärung siehe Abb. 3.10).

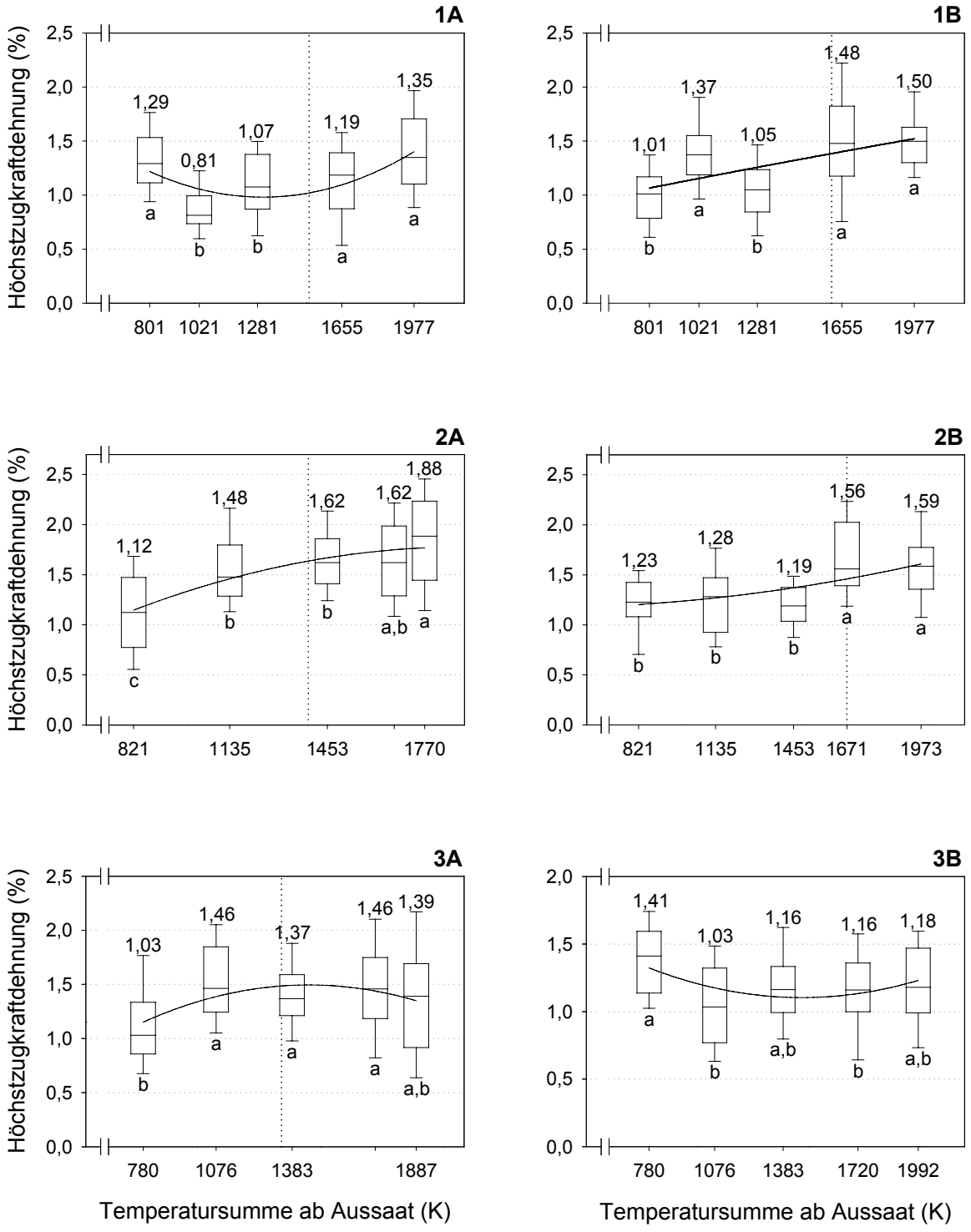


Abb. 3.14: Höchstzugkraftdehnung isolierter Fasern von habituell weiblichen Oberhanfpflanzen in Abhängigkeit von der Entwicklung der Hanfpflanze (L_0 = 50 mm, n = 40, cv. USO 31 und Kompolti, Feldversuch Leipzig-Seehausen 2000-2002; weitere Erklärung siehe Abb. 3.10).

Bei der Darstellung der **Zugfestigkeit** bei beiden Prüflängen (L_0 = 2 mm und 50 mm) wurde in vier von sechs Einzelversuchen ein signifikanter Anstieg zwischen den Werten der ersten und letzten Probenentnahme festgestellt (Abb. 3.11-3.12). In einem Fall (USO 31 im Jahr 2002) wurde ein Maximum identifiziert (Abb. 3.11). Die Werte der Zugfestigkeit bei der Prüflänge L_0 = 2 mm sind deutlich höher als bei der langen Prüflänge L_0 = 50 mm.

Die Werte der **Dehnungsmoduli** bei USO 31 im Jahr 2001 und bei Kompolti im Jahr 2000 blieben im Entwicklungsverlauf nahezu unverändert (Abb. 3.13). Leichte Unterschiede, die in anderen Fällen festgestellt wurden, sind nicht signifikant und lassen sich nicht systematisch zuordnen.

Bei der Darstellung der **Höchstzugkraftdehnung** (Abb. 3.14) konnte keine systematische Abhängigkeit beobachtet werden. Auch wurde kein konsistenter Zusammenhang zu den Entwicklungsstadien der Hanfpflanze festgestellt.

Tab. 3.3: Veränderung von Fasereigenschaften in Abhängigkeit von der Entwicklung der Hanfpflanze (cv. USO 31 und cv. Kompolti) im Feldversuch Leipzig-Seehausen 2000 - 2002. Die Tendenzen (*a* = ansteigend, *b* = abfallend, *c* = gleich bleibend, *d* = ansteigend und abfallend mit Maximum, *e* = abfallend und ansteigend mit Minimum) wurden aus Tukey-Gruppierungen der Ergebnisse und Kurvenanpassung auf der Basis des Polynoms 2. Ordnung in Abb. 3.10-3.14 ermittelt.

Fasereigenschaft	USO 31			Kompolti		
	2000	2001	2002	2000	2001	2002
Feinheit	*e*	*d*	*c*	*e*	*d*	*e*
Zugfestigkeit (L_0 = 2 mm)	*a*	*a*	*a*	*a*	*a*	*c*
Zugfestigkeit (L_0 = 50 mm)	*a*	*a*	*d*	*a*	*a*	*c*
Dehnungsmodul	*d*	*c*	*d*	*c*	*a*	*a*
Höchstzugkraftdehnung	*e*	*a*	*d*	*a*	*a*	*c*

Tabelle 3.3 fasst die Ergebnisse der Prüfung von physikalischen Fasereigenschaften (cv. USO 31 und cv. Kompolti) in Abhängigkeit von der Entwicklung der Hanfpflanze zusammen. Die Veränderungen von Fasereigenschaften wurden mit entsprechenden Buchstaben gekennzeichnet. Die Einzelergebnisse zeigen, dass der Parameter Zugfestigkeit eine schlüssige Tendenz aufweist. Bei beiden Prüflängen (L_0 = 2 mm und 50 mm) wurde ein Anstieg der Zugfestigkeit zwischen der ersten und letzten Probenentnahme festgestellt. Für alle anderen geprüften Parameter wie Feinheit, Dehnungsmodul und Höchstzugkraftdehnung konnte kein konsistenter Zusammenhang zum Entwicklungsstadium festgestellt werden.

3.2 Veränderung der Fasereigenschaften durch Strohmanagement

Die folgenden Daten beziehen sich auf den Praxisversuchsanbau der Hanfsorten USO 31, Fedora 17, Futura 75 und Epsilon 68 am Standort Zichtau (Altmark) 2003.

In den Abbildungen 3.15 - 3.18 werden die physikalischen Eigenschaften von Fasern der Kontrolle (Fasern aus mit dem Hand geschnittenen Pflanzen nach Trocknung ohne Röste) und Feldvariante (ohne Röste: S1R1, S2R1; mit Röste: S3E2, S4E2) dargestellt. Die Ergebnisse der Ermittlung des Röstgrades sind in Tab. 3.5 (Kap. 3.3.2) aufgeführt. Der Faseraufschluss erfolgte für die Kontrolle und Feldvarianten im Labormaßstab (s. Kap. 2.2). Der Vergleich der **Feinheit** und **Ausgangsquerschnittsfläche** zeigt bei der Sorten S1 und S2 bei unterem Röstegrad R1 keine signifikanten Unterschiede. Durch das Strohmanagement wurden die Fasern der Hanfsorten S3 und S4 bei dem mittleren Erntetermin E2 in Kombination mit mittlerem Röstgrad feiner als die der Kontrollvariante (Abb. 3.15 2). Der Vergleich der Ausgangsquerschnittsfläche und Feinheit der Kontroll- und Feldvariante bei dem mittleren Erntetermin liegen Sortenunterschiede vor. In der Kontrollvariante lieferte die Hanfsorte S4 signifikant gröbere Fasern als S3.

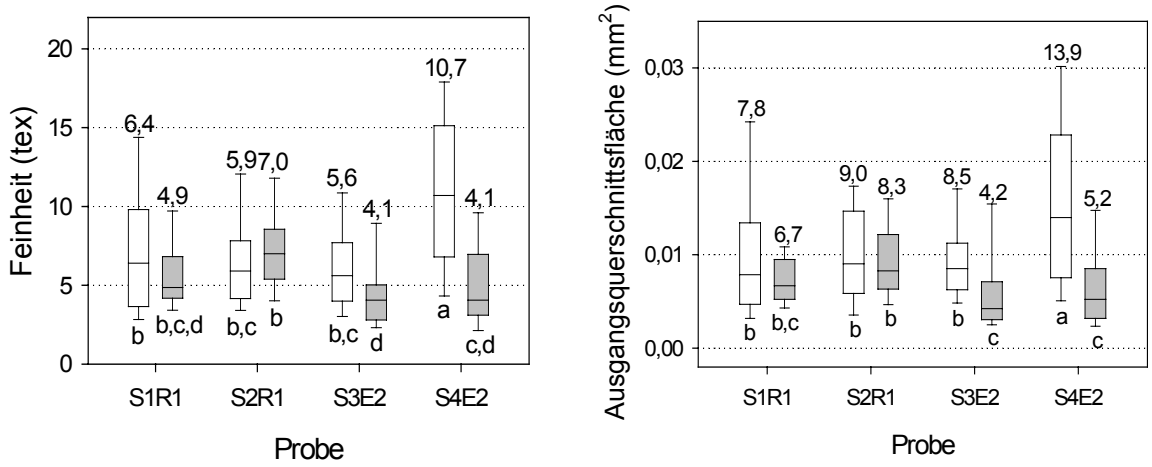


Abb. 3.15: Feinheit und Ausgangsquerschnittsfläche von Hanffasern (cv. USO 31 - S1, cv. Fedora 17 - S2, cv. Futura 75 - S3, cv. Epsilon 68 - S4) in Abhängigkeit vom Strohmanagement im Praxisanbau Zichtau 2003. Kontrolle - weiß, Strohmanagement - grau; R1 - schwacher Röstgrad (s. Tab. 3.4); E2 - mittlerer Erntetermin in Kombination mit mittlerem Röstgrad (s. Tab. 2.8). (n = 40, Faserlänge = 100 mm)

Vereinzelt wurden weitere signifikante Veränderungen gegenüber den Kontrollproben, z.B. erhöhte **Zugfestigkeiten** bei S1 (L_0 = 2 mm) bzw. S2 (L_0 = 50 mm), gemessen (Abb. 3.15). Diese Effekte waren jedoch nicht in den jeweiligen Parallelproben gleicher Behandlung feststellbar. Des Weiteren verringerten sich durch das Strohmanagement die Werte der

feinheitsbezogenen Höchstzugkraft (L_0 = 50 mm; Abb. 3.17, 2) in den Faserproben von S3 und S4, nicht jedoch bei S1 und S2.

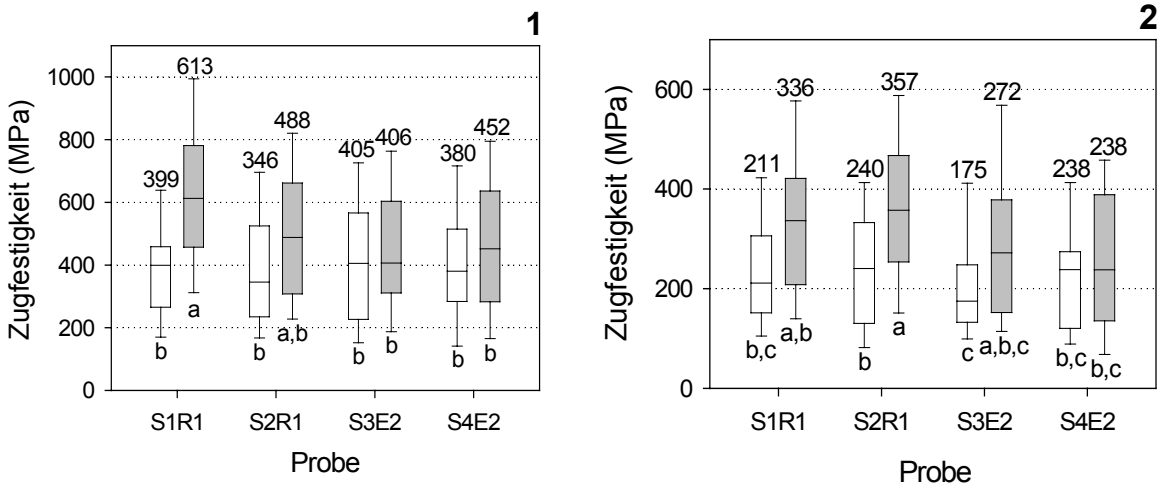


Abb. 3.16: Zugfestigkeit von Hanffasern (cv. USO 31 - S1, cv. Fedora17 - S2, cv. Futura 75 - S3, cv. Epsilon 68 - S4) in Abhängigkeit vom Strohmanagement im Praxisanbau Zichtau 2003. Kontrolle - weiß, Strohmanagement - grau; 1 - L_0 = 2 mm, 2 - L_0 = 50 mm, weitere Erläuterungen siehe Abb. 3.15.

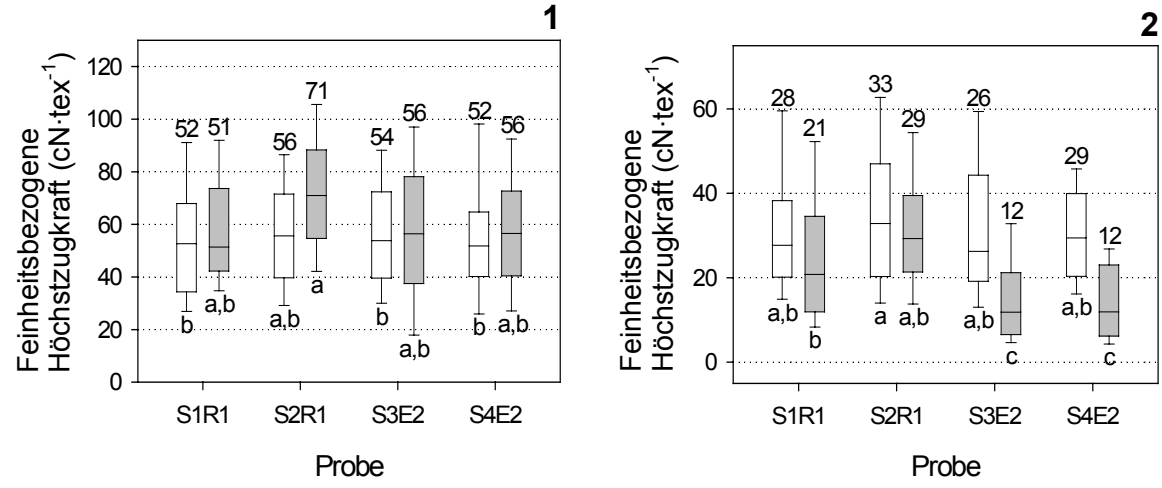


Abb. 3.17: Feinheitsbezogene Höchstzugkraft von Hanffasern (cv. USO 31 - S1, cv. Fedora17 - S2, cv. Futura 75 - S3, cv. Epsilon 68 - S4) in Abhängigkeit vom Strohmanagement im Praxisanbau Zichtau 2003. Kontrolle - weiß, Strohmanagement - grau; 1- L_0 = 2 mm, 2 - L_0 = 50 mm, weitere Erläuterungen siehe Abb. 3.15.

Die Werte für das **Dehnungsmodul** bei allen Kontroll- und Feldvarianten zeigten keine statistisch gesicherten Unterschiede (Abb. 3.18 1). Bei der Darstellung der **Höchstzugkraftdehnung** wurde dagegen eine allgemeine Tendenz beobachtet (Abb. 3.18 2):

In allen geprüften Varianten des Strohmanagements wurden signifikant höhere Werte der Höchstzugkraftdehnung gegenüber der Kontrolle festgestellt.

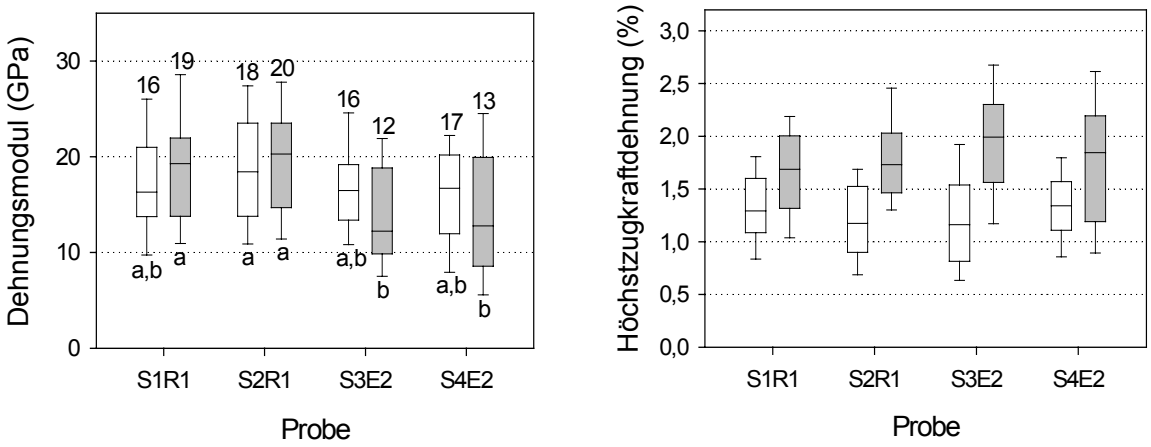


Abb. 3.18: Dehnungsmodul und Höchstzugkraftdehnung von Hanffasern (cv. USO 31 - S1, cv. Fedora17 - S2, cv. Futura 75 - S3, cv. Epsilon 68 - S4) in Abhängigkeit vom Strohmanagement im Praxisanbau Zichtau 2003. Kontrolle - weiß, Strohmanagement - grau, (n = 40, L_0 = 50 mm).

3.3 Wirkung von Röste und Faserisolierungstechnologie auf Fasereigenschaften

3.3.1 Technikumslinie

3.3.1.1 Röstgrad von Hanfstroh

Die Bonitur des Röstgrades ergab bei allen drei Sorten eine deutliche Abstufung. In Tabelle 3.4 sind die Mittelwerte der Bestimmung des Röstgrades mit den Angaben zur Variabilität dargestellt. Das Stroh aller untersuchten Sorten und Röststufen war ungleichmäßig geröstet, was auch typisch für den Praxisanbau ist. Die höchste Variabilität hinsichtlich des Röstgrades zeigte die Sorte Fasamo in der ersten und zweiten Röststufe.

Tab. 3.4: Röstgrad von Hanfstroh bei drei Hanfsorten im Feldversuch Seehausen 2002.

Röststufe	Röstgrad (Boniturnote)		
	HA	HB	HC
1	**1,74** ± 0,2	**1,06** ± 0,02	**1,43** ± 0,18
2	**3,75** ± 0,05	**3,17** ± 0,07	**3,23** ± 0,12
3	**6,83** ± 0,02	**6,78** ± 0,03	**6,84** ± 0,04

Sorten: HA = USO 31, HB = Kompolti, HC = Fasamo

Die Boniturnoten der ersten Röststufe bei den drei untersuchten Hanfsorten lagen zwischen eins und zwei. Es handelt sich hierbei um grün bis gelbbraunes Stroh, das äußerlich auf

maximal 50% der Oberfläche einen Besatz mit hellgrauen Pilzkolonien zeigte (Tab. 2.10). Das Stroh der Sorte USO 31 war stärker geröstet als das Stroh von Kompolti und Fasamo. Die Röstgrade von Stroh der zweiten Röststufe der drei Sorten lagen zwischen drei und vier. Der Besatz mit Pilzkolonien war hell- bis mittelgrau gefärbt und auf 60-90% der Stängeloberfläche nachgewiesen. Röstgrade von Stroh der dritten Röststufe lagen zwischen sechs und sieben. Die Epidermis war weitgehend mit dunkelgrauen bis schwarzen Belägen bedeckt. Die Rinde löste sich vom Holzteil teilweise ab. Der Holzanteil war zu 80-100% dunkel verfärbt. Bei der dritten Röststufe wurden keine deutlichen Variantenunterschiede festgestellt.

3.3.1.2 Fasereigenschaften

Die Faserlänge in den verschiedenen Faseraufschlussverfahren (*PA* und *BL*) war technisch vorgegeben. In beiden Fällen hat die Voreinstellung zu Faserlängenverteilungen mit einem typischen Schwerpunkt um 93-115 mm geführt. Eine Ausnahme bildete die Sorte HC bei niedrigem Röstgrad R1 (Abb. 3.19 3). Es zeigte sich generell, dass bei hohem Röstgrad (R3) die Faserlängen unabhängig von der Schnittlängeneinstellung zurückgingen. Aus der Boxplotdarstellung wird der Unterschied anhand der Medianwerte und der Verteilung von Faserlängen deutlich. Im Vergleich der Faseraufschlussverfahren *PA* und *BL* (Sorte HA) wurden keine signifikanten Unterschiede festgestellt.

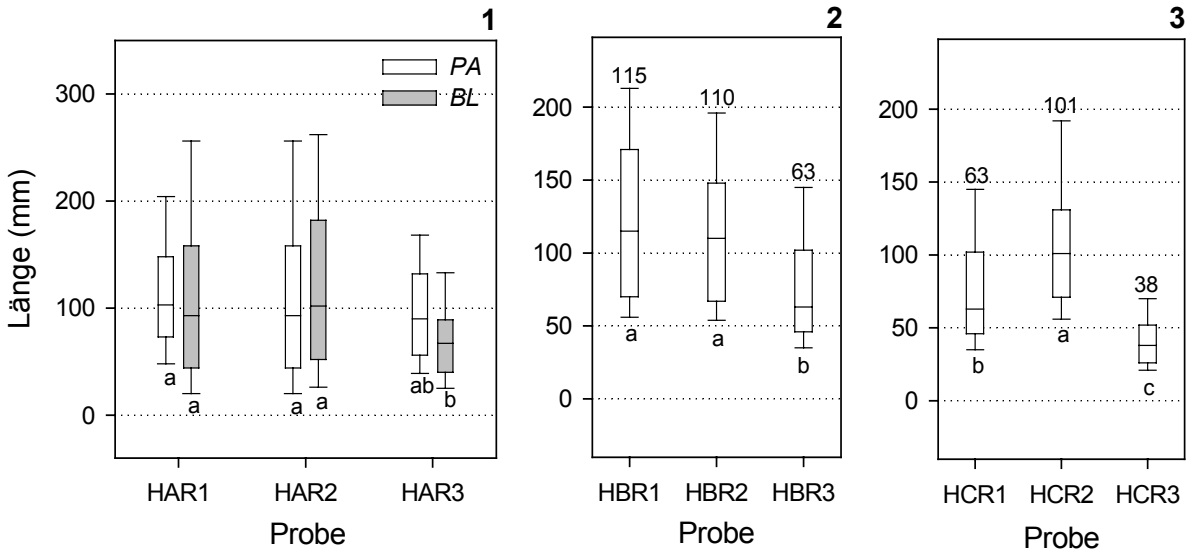


Abb. 3.19: Länge von Hanffasern (1 - cv. USO 31 - HA, 2 - cv. Kompolti - HB, 3 - cv. Fasamo - HC) in Abhängigkeit von Röstgrad R1-R3 (s. Tab. 3.4) und Faseraufschluss: Prallaufschluss - PA, Brecherlinie - BL im Feldversuch Leipzig-Seehausen 2002 (n = 99).

Tab. 3.5: Länge, Verzweigungen und Schäbengehalt von Hanffasern (1 - cv. USO 31 - HA, 2 - cv. Kompolti - HB, 3 - cv. Fasamo - HC) in Abhängigkeit von Röstgrad R1-R3 (s. Tab. 3.4) und Faseraufschluss: Prallaufschluss - PA, Brecherlinie - BL im Feldversuch Leipzig-Seehausen 2002. Längenmessung, Verzweigungsbonitur (n = 99) und Schäbenentnahme (n = 3).

Probe	Aufschluss	Faserlänge (mm)	Anzahl der Verzweigungen erster Ordnung				Anzahl der Verzweigungen zweiter Ordnung		Schäbengehalt
			<10mm	10-50mm	50-100mm	>100mm	<10mm	>10mm	(Masse-%)
HAR1	*PA*	112,6	13,8	2,5	0,2	0,1	7,3	0,7	2,8
HAR1	*BL*	112,8	9,2	1,8	0,2	0,1	3,1	0,4	8,1
HAR2	*PA*	128,4	20,7	3,6	0,3	0	11,5	0,7	1,4
HAR2	*BL*	126,8	10,5	2,3	0,3	0,1	4,7	0,9	8
HAR3	*PA*	98,8	16,4	2,3	0,1	0	7,6	0,3	0,2
HAR3	*BL*	71,2	8,6	2,1	0,1	0	3,9	0,3	1,4
HBR1	*PA*	126,3	17,1	3,4	0,4	0	9,9	0,9	1,9
HBR2	*PA*	117,5	16,5	2,3	0,4	0	9,4	0,5	1,3
HBR3	*PA*	76,7	9	1,4	0,2	0	5,4	0,4	0,8
HCR1	*PA*	103,5	8,2	1,9	0,4	0,1	4,6	0,4	0,7
HCR2	*PA*	110,5	9,7	1,2	0,4	0	3,4	0,6	0,7
HCR3	*PA*	41,5	7,8	1	0,1	0	4,9	0,1	1,3

Sämtliche Fasern wiesen Abspleißungen auf, wobei es sich in der Regel, d.h. zu 80-90%, um sehr kurze Verzweigungen handelte (<10 mm; Tab. 3.5). Längere Teilfilamente wurden nur mit einer Häufigkeit von 10-20% festgestellt. Die durchschnittliche Zahl der Verzweigungen war sehr stark von der Produktionsvariante abhängig: Die geringste Zahl wurde in den Varianten (HCR1-R3PA) gemessen. Bei starker Röste (R3) ging die Zahl der Verzweigungen zurück, wie in den Varianten HB und HC festgestellt war. Demgegenüber wies HA in der mittleren Röststufe (R2) die höchste Zahl an Verzeigungen auf. Ein Vergleich zwischen den Aufschlussverfahren *PA* und *BL* zeigte, dass letztere weniger verzweigte Fasern lieferte. Der Schäbengehalt (Tab. 3.7) sank mit zunehmendem Röstgrad; eine Ausnahme bildete die Variante HC, bei der mit 0,7 Masse-% (HCR1, HCR2) bzw. 1,3 Masse-% (HCR3) bereits niedrige Werte erreicht wurden. Es wurde festgestellt, dass Faserpartien mit Bearbeitung in der Brecherlinie (*BL)* im Gegensatz zum Prallaufschluss (*PA)* einen höheren Besatz mit Schäben aufwiesen.

Die **Feinheit** der Fasern nahm grundsätzlich mit steigendem Röstgrad ab (Abb. 3.20-3.22). Die geringsten Feinheiten wurden in der Röstvariante R3 erzielt, wobei insbesondere in allen großtechnischen Isolierungsverfahren (*PA, BL*) eine zunehmende Verfeinerung der Hanffasern mit ansteigendem Röstgrad festzustellen war. Zum Vergleich der Faseaufschlusstechnologien wurde festgestellt, dass die Fasern der Röstvarianten R1 und R2 aus dem Laboraufschluss (*LA*) signifikant feiner sind. Im Vergleich zum Prallaufschluss (*PA*) lieferte die Brecherlinie (*BL*) signifikant gröbere Fasern mit einer hohen Variabilität (Abb. 3.20 für cv. USO 31). Zwischen den Ergebnissen der Bootstrap-Analyse und des Tukey-Tests wurden keine Differenzen festgestellt. Die Fasern (cv. Fasamo) der Röstvariante R3 (Röstgrad 6,8) aus dem Prallaufschluss waren vergleichsmäßig kurz (Medianwert = 38 mm, s. Abb. 3.19 3). Deshalb war hier die Bestimmung der Feinheit nur bei einer Faserlänge von 40 mm möglich.

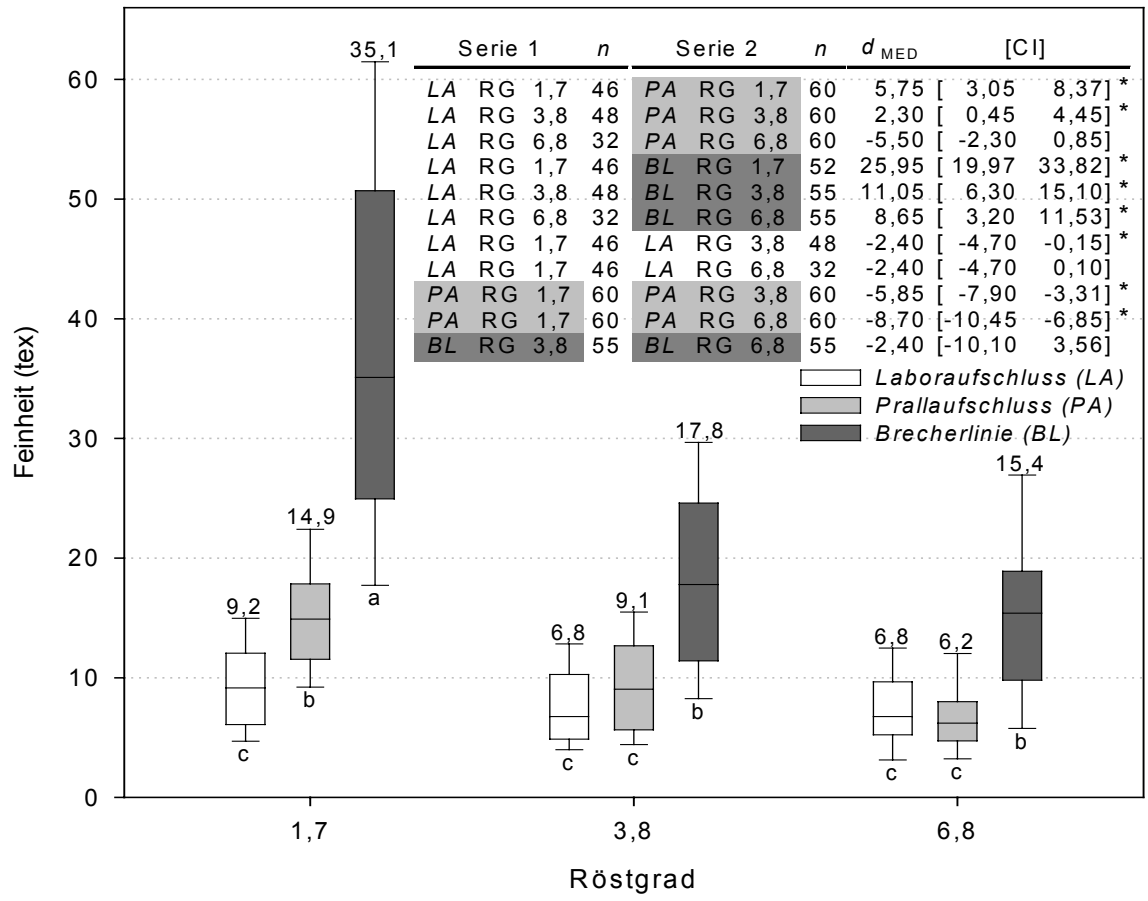


Abb. 3.20: Feinheit von Hanffasern (cv. USO 31) in Abhängigkeit von Röstgrad und Faseraufschluss im Feldversuch Leipzig-Seehausen 2002 (Faserlänge = 100 mm). Integrierte Tabelle präsentiert verteilungsunabhängige Bootstrap-Analyse (s. Kap. 2.4), signifikante Unterschiede wurden mit * gekennzeichnet.

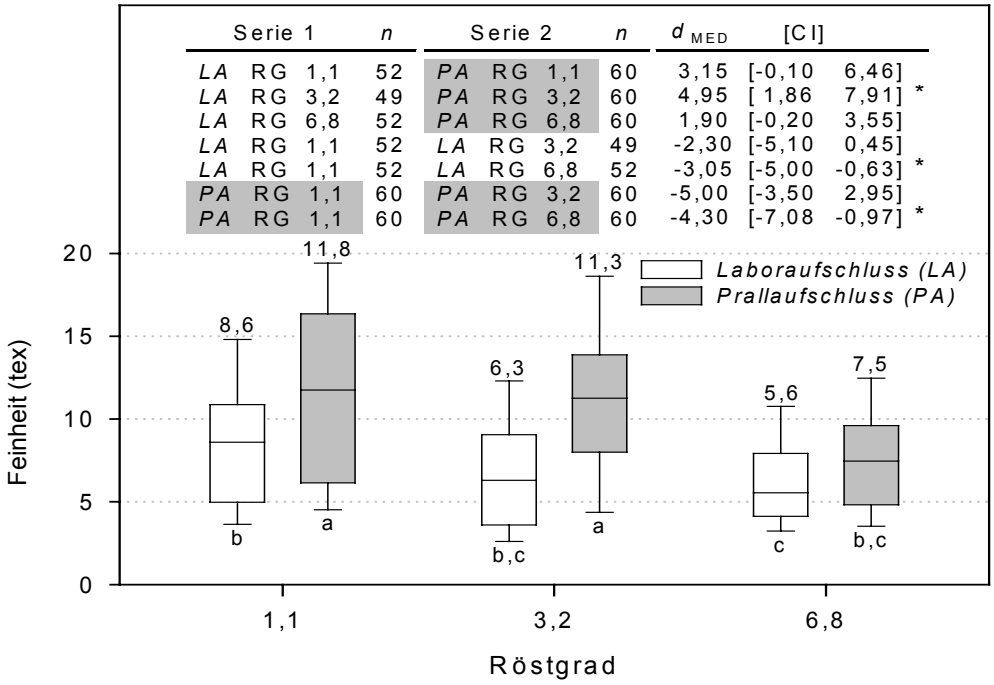


Abb. 3.21: Feinheit von Hanffasern (cv. Kompolti) in Abhängigkeit von Röstgrad und Faseraufschluss im Feldversuch Leipzig-Seehausen 2002 (Faserlänge = 100 mm); weitere Erklärung siehe Abb. 3.20.

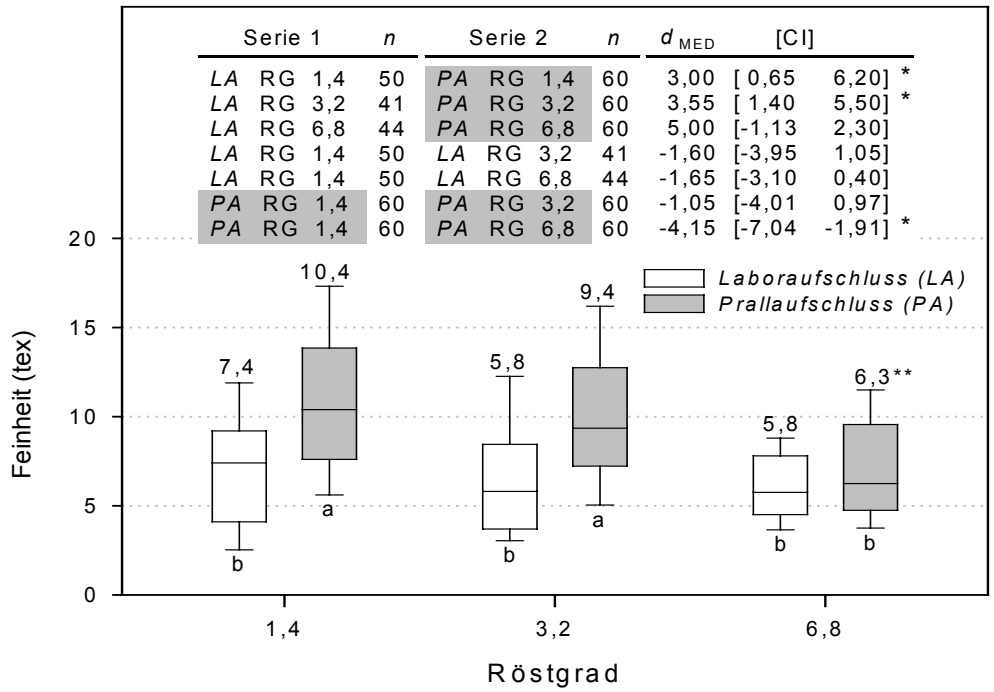


Abb. 3.22: Feinheit von Hanffasern (cv. Fasamo) in Abhängigkeit von Röstgrad und Faseraufschluss im Feldversuch Leipzig-Seehausen 2002 (Faserlänge = 100 mm); weitere Erklärung siehe Abb. 3.20.
****** Bei *PA* Röstgrad 6,8 die Bestimmung der Feinheit erfolgte bei Faserlänge = 40 mm.

Die Werte der **Ausgangsquerschnittsfläche** der Fasern zeigten die gleichen Abstufungen wie die Werte der Feinheit. Es kommt generell zu einer Abnahme des Faserquerschnitts mit fortgeschrittener Röste. Die geringsten Werte der Querschnittsfläche der Fasern wurden bei den drei untersuchten Hanfsorten in der Röstvariante R3 beobachtet (Abb. 3.23-3.25). Die Unterschiede waren insbesondere in allen großtechnischen Isolierungsverfahren (*PA, BL*) deutlich. Im Laboraufschluss (*LA*) blieben die Werte der Querschnittsfläche fast unverändert. Eine Ausnahme hierbei bildete die Sorte Fasamo (Abb. 3.25), deren Fasern signifikant geringere Ausgangsquerschnittsflächen in der Röstvariante R3 hatten. Die zusätzliche Bootstrap-Analyse bestätigte bei der Prüfung der Ausgangsquerschnittsfläche die statistischen Verteilungen nach dem Tukey-Test.

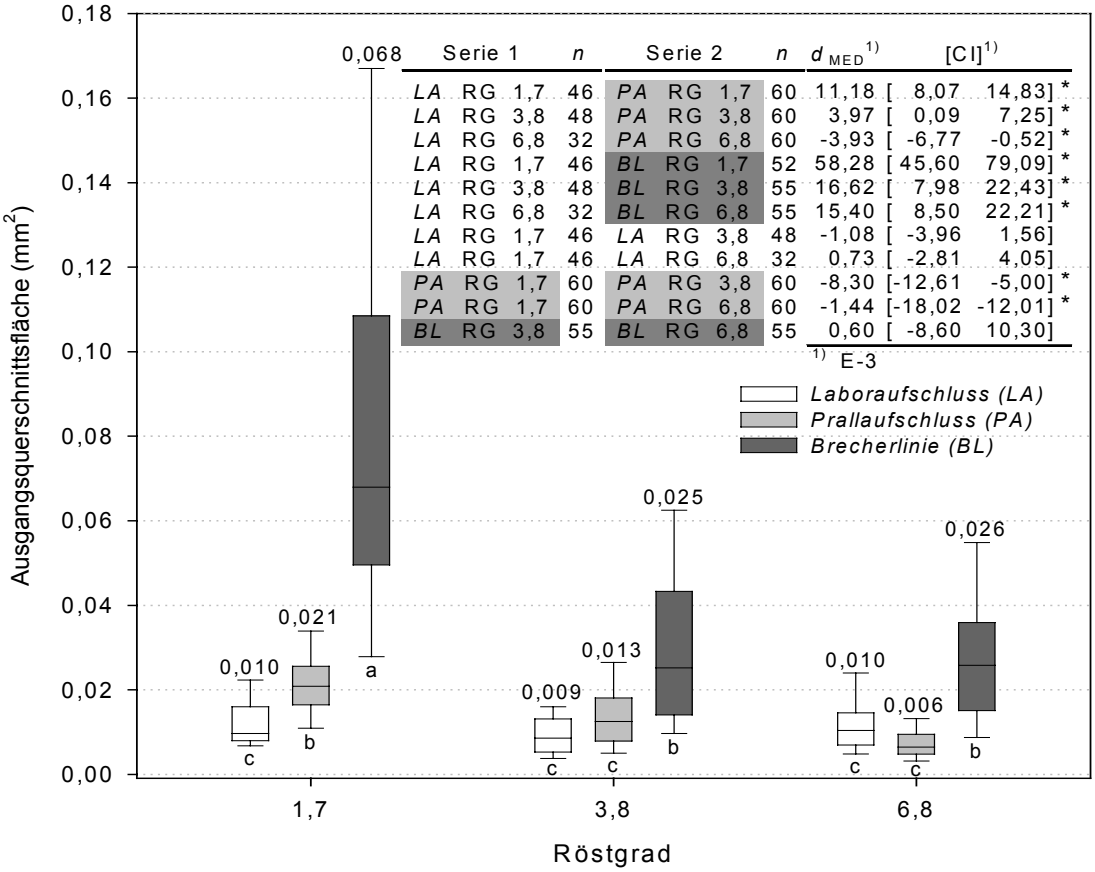


Abb. 3.23: Ausgangsquerschnittsfläche von Hanffasern (cv. USO 31) in Abhängigkeit von Röstgrad und Faseraufschluss im Feldversuch Leipzig-Seehausen 2002 (L_0 = 50 mm); weitere Erklärung siehe Abb. 3.20.

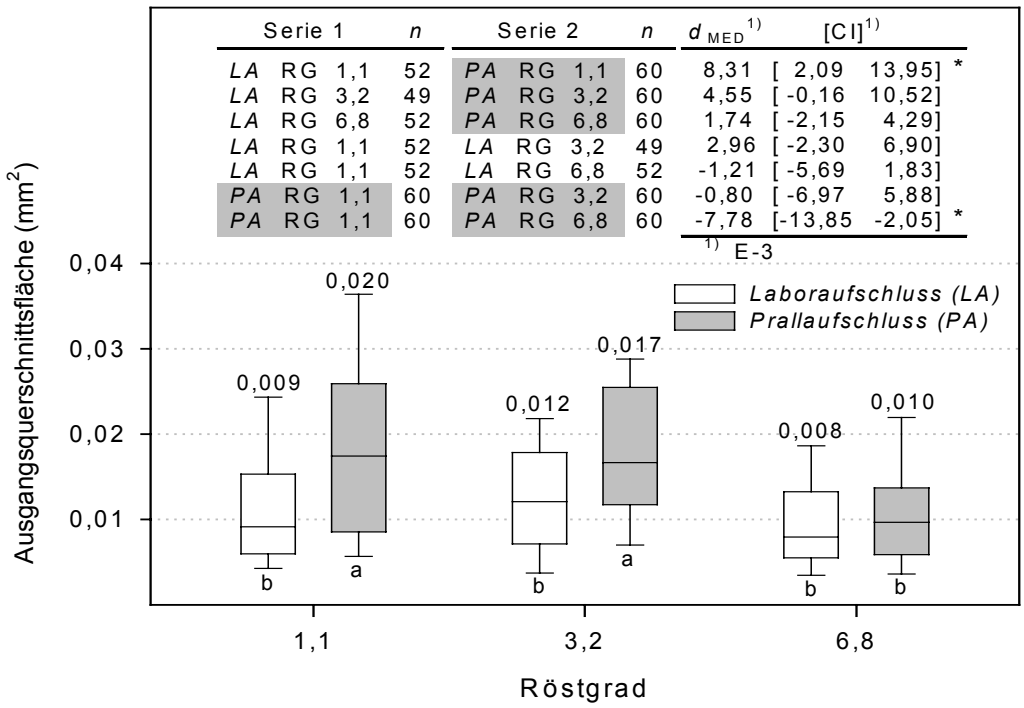


Abb. 3.24: Ausgangsquerschnittsfläche von Hanffasern (cv. Kompolti) in Abhängigkeit von Röstgrad und Faseraufschluss im Feldversuch Leipzig-Seehausen 2002 (L_0 = 50 mm); weitere Erklärung siehe Abb. 3.20.

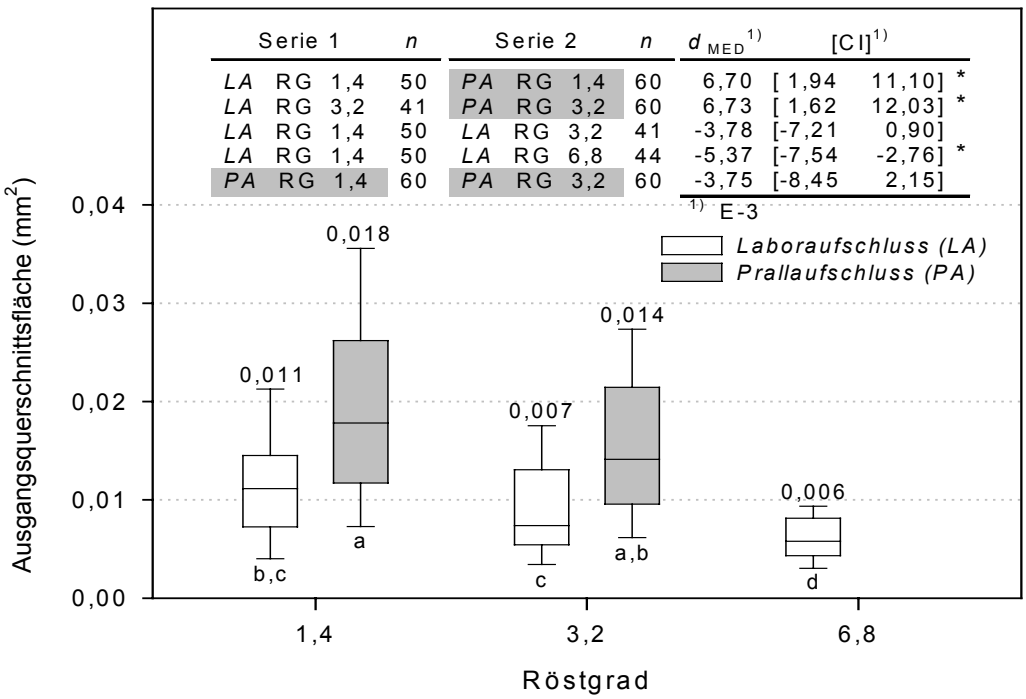


Abb. 3.25: Ausgangsquerschnittsfläche von Hanffasern (cv. Fasamo) in Abhängigkeit von Röstgrad und Faseraufschluss im Feldversuch Leipzig-Seehausen 2002 (L_0 = 50 mm); weitere Erklärung siehe Abb. 3.20.

Die **Zugfestigkeit** der Fasern (L_0 = 2 mm) ging generell mit steigendem Röstgrad zurück (Abb. 3.26-3.28 1). Eine Ausnahme bildeten die Fasern der Hanfsorte Kompolti aus dem Prallaufschluss (Abb. 3.27 1). Nach Prallaufschluss *PA* wurden gegenüber der Brecherlinie *BL* Fasern mit höheren Zugfestigkeiten festgestellt (Abb. 3.26 1). Der Einfluss des steigenden Röstgrades auf die Zugfestigkeit wurde auch bei langer Einspannlänge (L_0 = 50 mm) bestätigt (Abb. 3.26-3.28 2). Die Zugfestigkeitswerte der Fasern aus unterschiedlichen Aufschlusstechnologien *PA* und *BL* zeigten nur bei stark gerösteten Faservarianten (R3) statistisch nachweisbare Unterschiede (Abb. 3.26 2).

Für die **feinheitsbezogene Höchstzugkraft** (L_0 = 2 mm) der Sorten USO 31 und Kompolti zeigte der Tukey-Test zwischen den unterschiedlichen Röstgraden keine deutlichen Unterschiede. Die zusätzliche verteilungsunabhängige Bootstrap-Analyse (integrierte Tabellen der Abb. 3.29-3.30 1) wies eine signifikante Senkung der feinheitsbezogenen Höchstzugkraft bei den Faservarianten mit Röstgrad 6,8 nach. Bei den Fasern der Sorte Fasamo aus dem Prallaufschluss *PA* wurde ein statistisch gesicherter Rückgang der feinheitsbezogenen Höchstzugkraft bei dem Röstgrad 6,8 festgestellt (Abb. 3.31 1). Bei der Kontrollvariante (Laboraufschluss *LA*) wurde diese Tendenz nicht bestätigt. Die feinheitsbezogene Höchstzugkraft (L_0 = 50 mm) so wie die Zugfestigkeit (L_0 = 50 mm) gingen generell mit steigendem Röstgrad zurück (Abb. 3.29-3.31 2). Zwischen Fasern aus unterschiedlichen Faseraufschlusstechnologien *PA* und *BL* wurden keine nachweisbaren Unterschiede gefunden. Die Prüfung der Fasern (cv. Fasamo) der Röstvariante R3 (Röstgrad 6,8) aus dem Prallaufschluss im Zugversuch mit L_0 = 50 mm war nicht möglich, da die hierfür notwendigen Filamentlängen (100 mm) aufgrund einer starken Einkürzung (Abb. 3.19 3) nicht zur Verfügung standen.

Der **Dehnungsmodul** der Fasern ging mit starker Röste (R3) ebenfalls zurück (Abb. 3.32 und 3.33). Lediglich in den Faservarianten der Sorte Fasamo aus dem Prallaufschluss *PA* wurde eine solche Veränderung nicht nachgewiesen (Abb. 3.34). Ein Vergleich der Dehnungsmoduli von Fasern der Sorte USO 31 aus unterschiedlichen Aufschlusstechnologien zeigte signifikant geringere Werte bei R1 und R3 nach der Brecherlinie *BL* als bei den Vergleichsvarianten *LA* und *PA* (Abb. 3.32). Zwischen den Ergebnissen der Bootstrap-Analyse und des Tukey-Tests wurden keine Differenzen festgestellt.

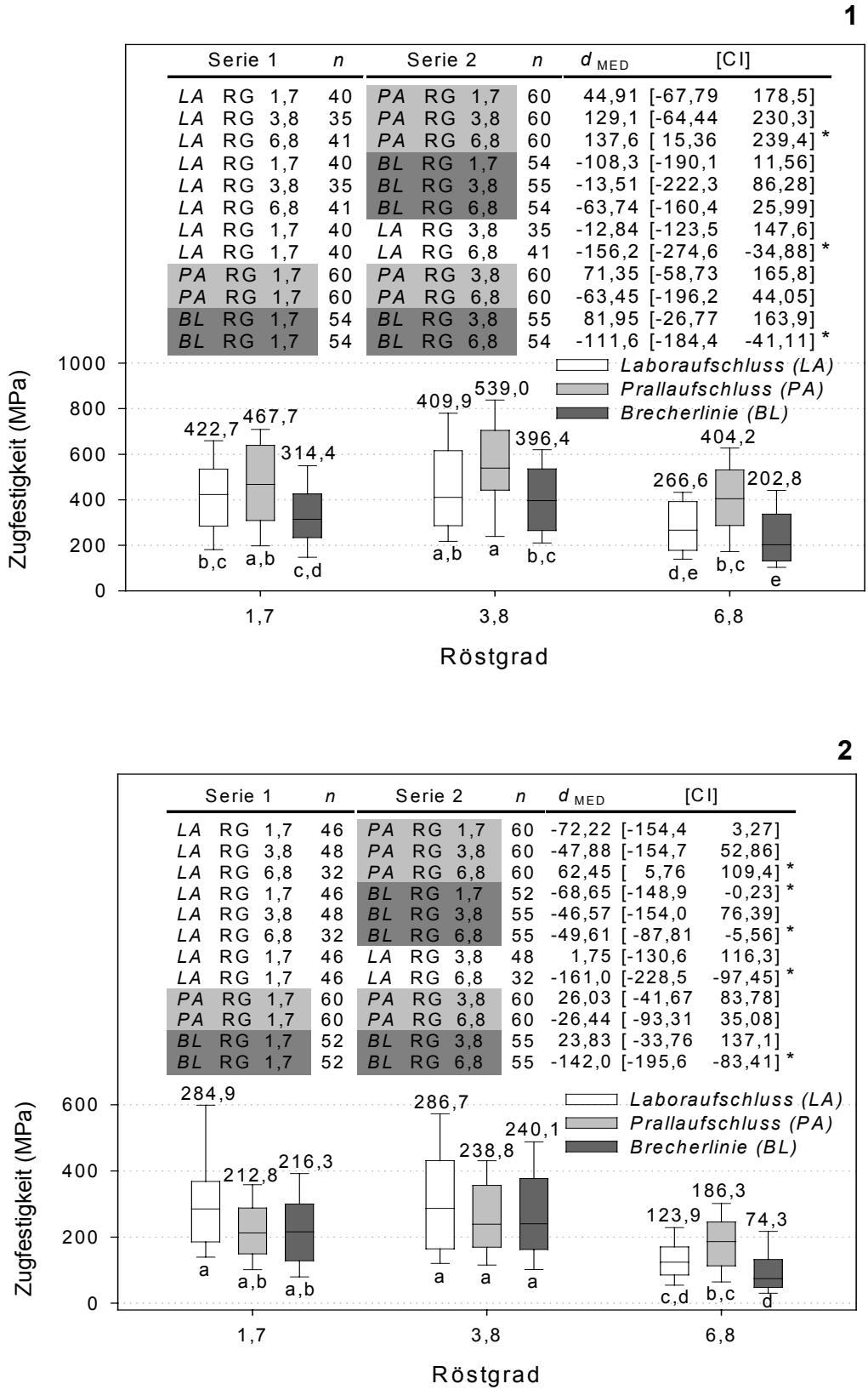


Abb. 3.26: Zugfestigkeit von Hanffasern (cv. USO 31) in Abhängigkeit von Röstgrad und Aufschluss im Feldversuch Leipzig-Seehausen 2002
(1 - L_0 = 2 mm, 2 - L_0 = 50 mm); weitere Erklärung siehe Abb. 3.20.

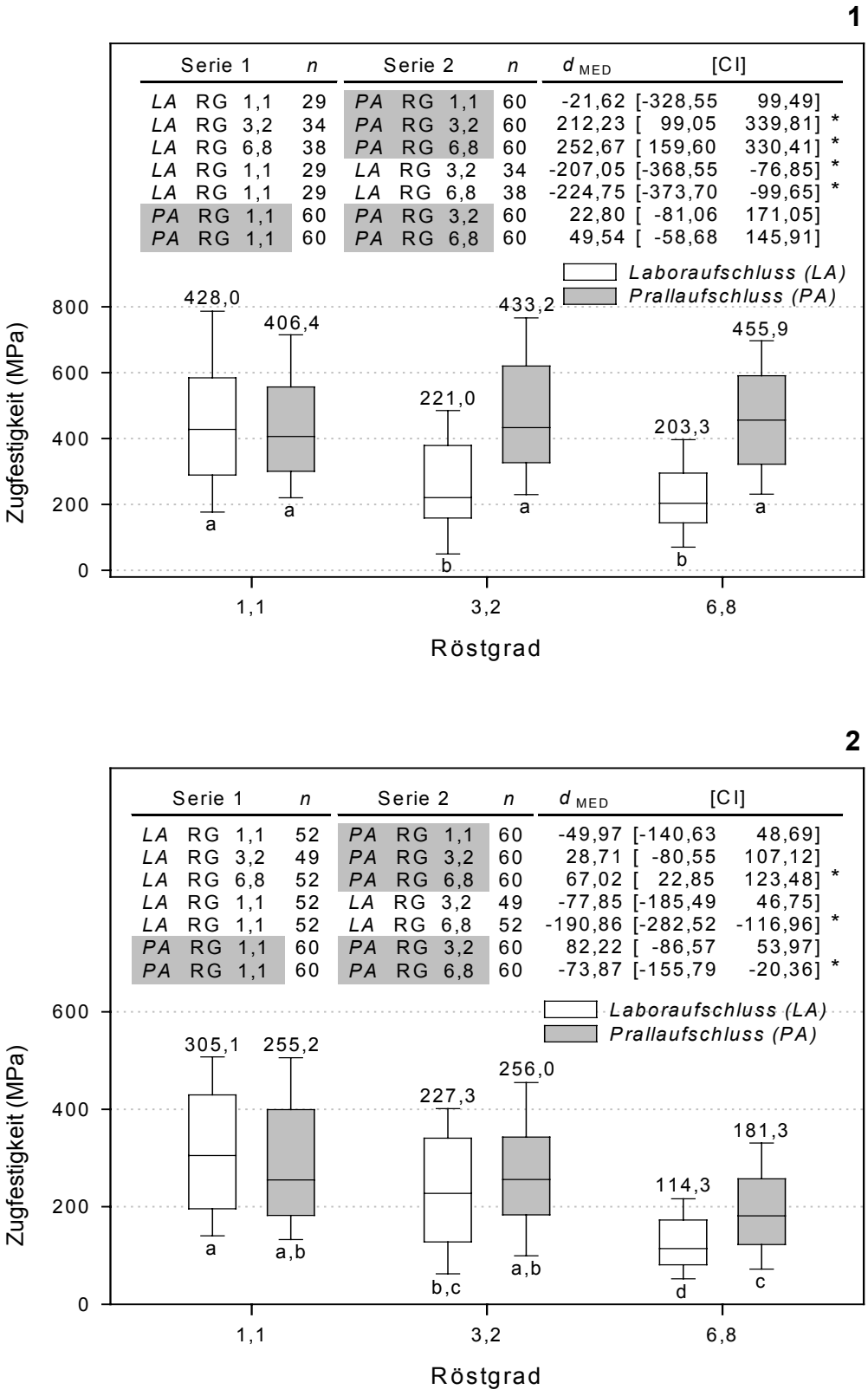


Abb. 3.27: Zugfestigkeit von Hanffasern (cv. Kompolti) in Abhängigkeit von Röstgrad und Aufschluss im Feldversuch Leipzig-Seehausen 2002
(1 - L_0 = 2 mm, 2 - L_0 = 50 mm); weitere Erklärung siehe Abb. 3.20.

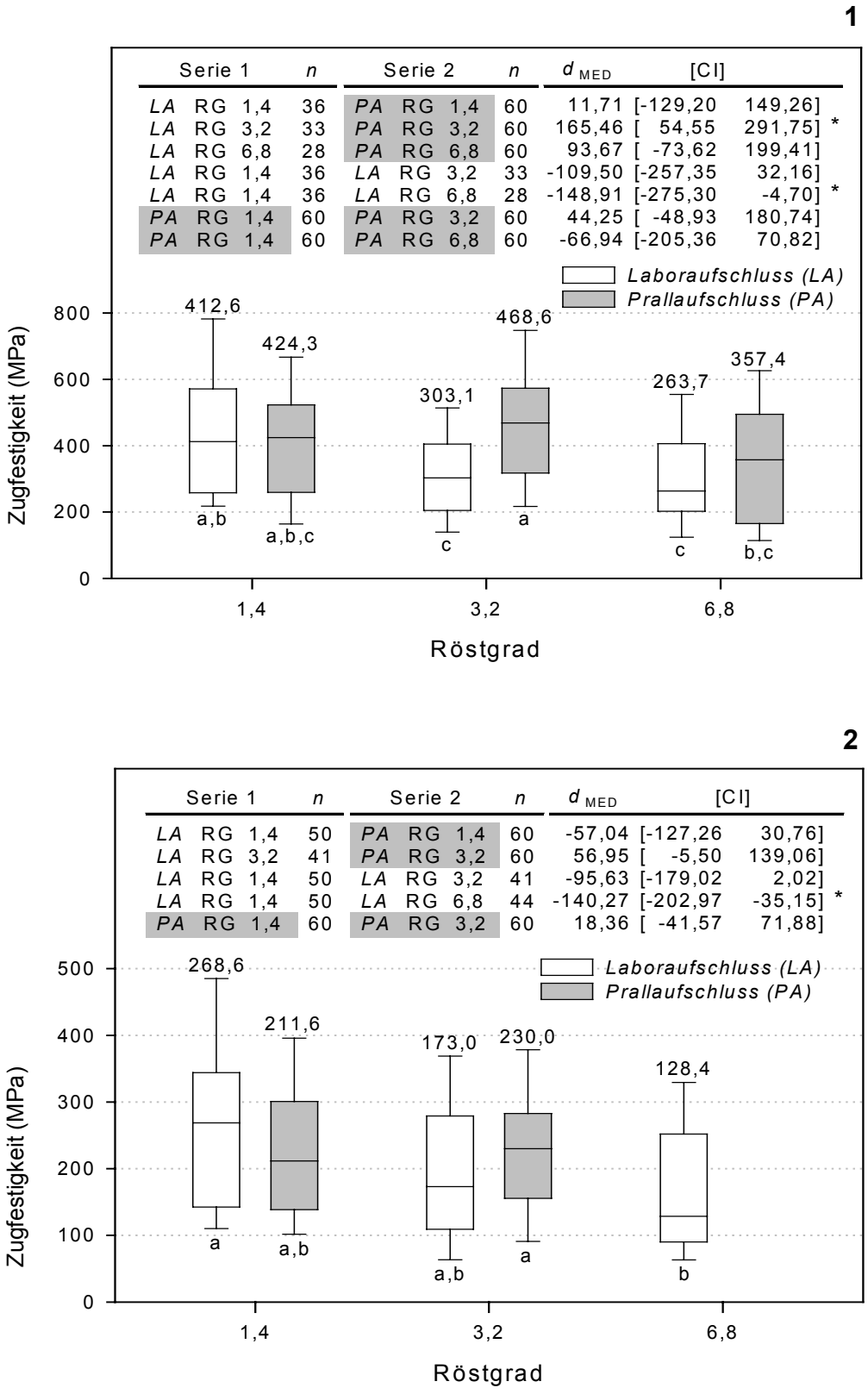
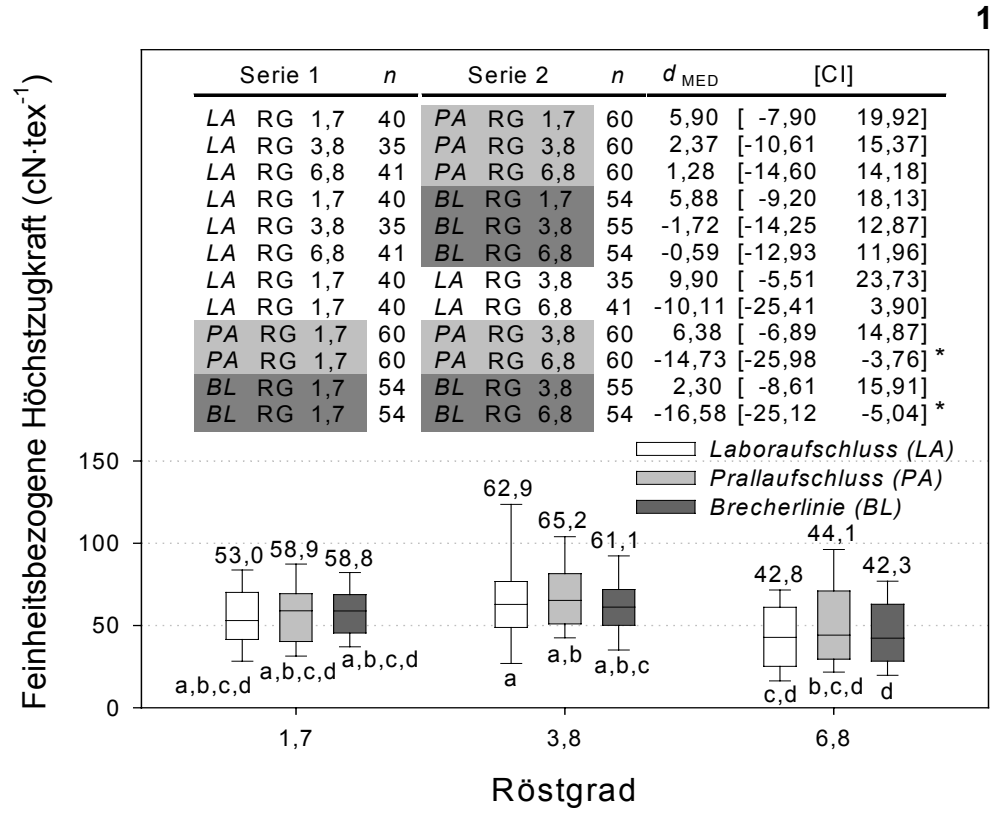


Abb. 3.28: Zugfestigkeit von Hanffasern (cv. Fasamo) in Abhängigkeit von Röstgrad und Aufschluss im Feldversuch Leipzig-Seehausen 2002
(1 - L_0 = 2 mm, 2 - L_0 = 50 mm); weitere Erklärung siehe Abb. 3.20.



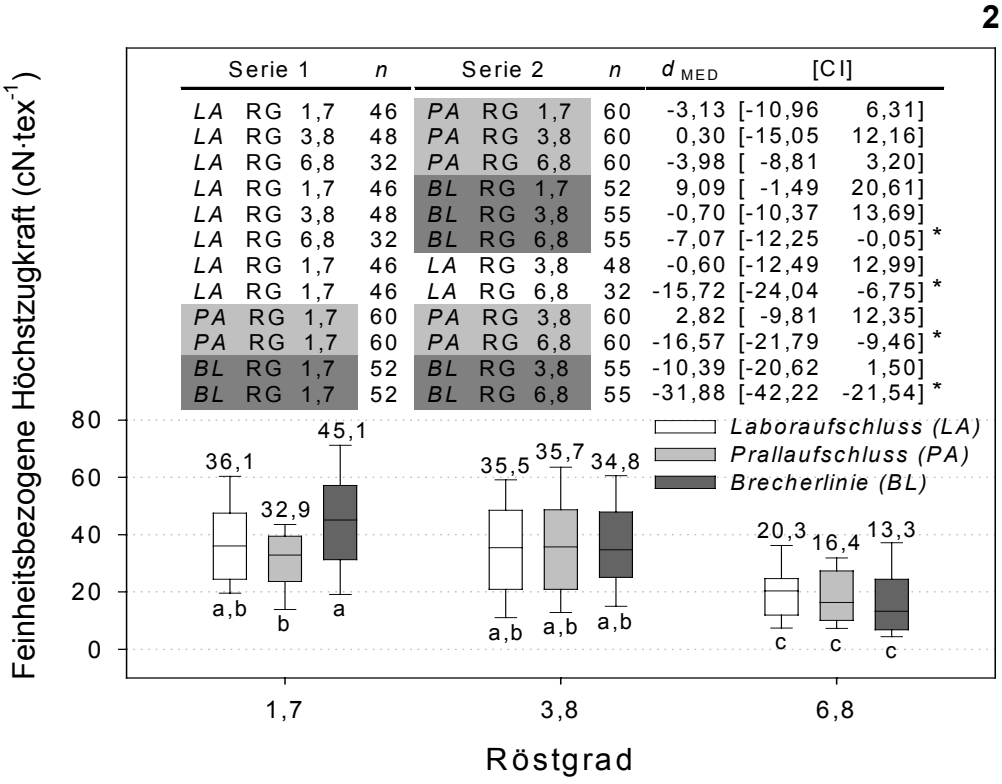


Abb. 3.29: Feinheitsbezogene Höchstzugkraft von Hanffasern (cv. Uso 31) in Abhängigkeit von Röstgrad und Aufschluss im Feldversuch Leipzig-Seehausen 2002 (1 - L_0 = 2 mm, 2 - L_0 = 50 mm); weitere Erklärung siehe Abb. 3.20.

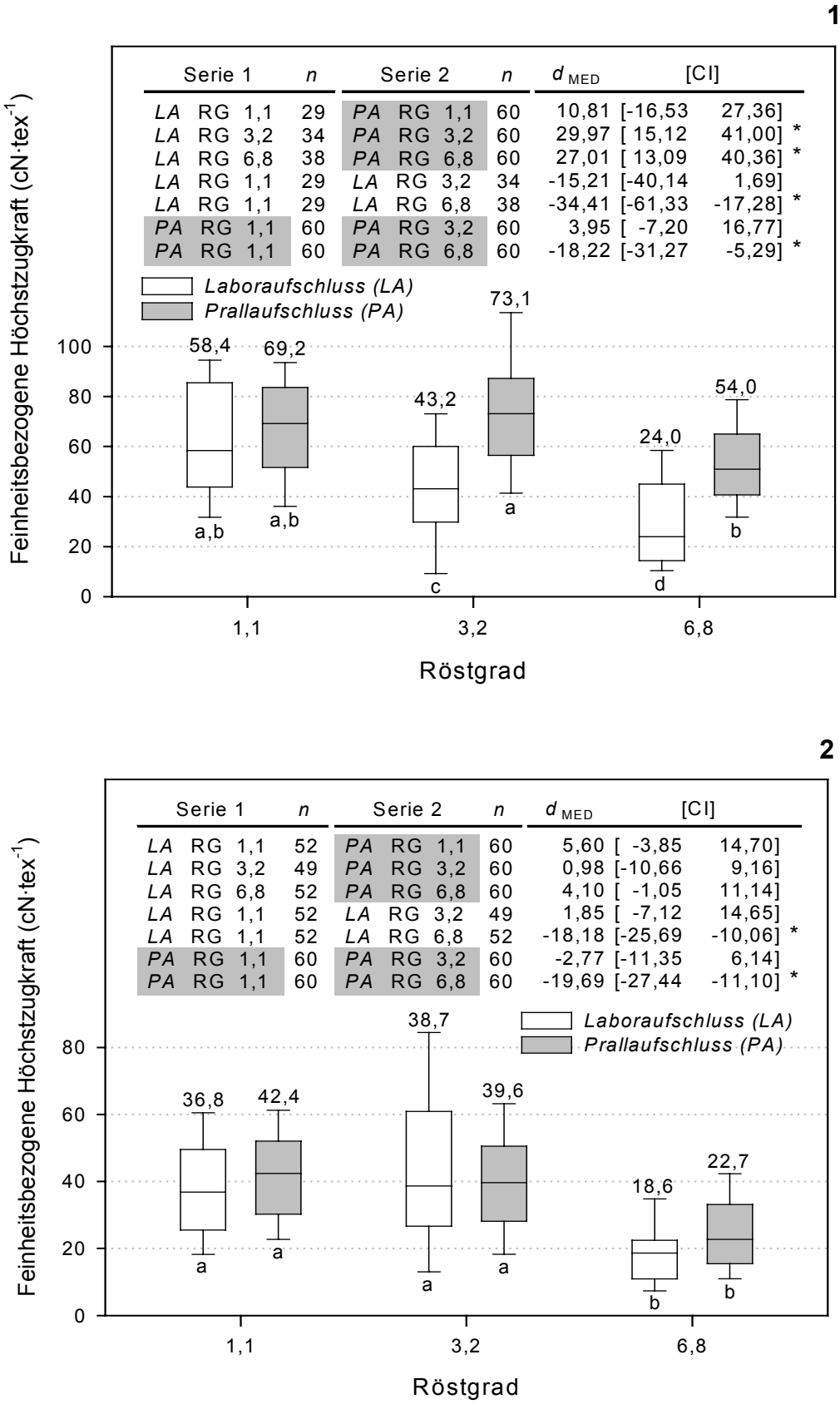


Abb. 3.30: Feinheitsbezogene Höchstzugkraft von Hanffasern (cv. Kompolti) in Abhängigkeit von Röstgrad und Aufschluss im Feldversuch Leipzig-Seehausen 2002 (1 - L_0 = 2 mm, 2 - L_0 = 50 mm); weitere Erklärung siehe Abb. 3.20.

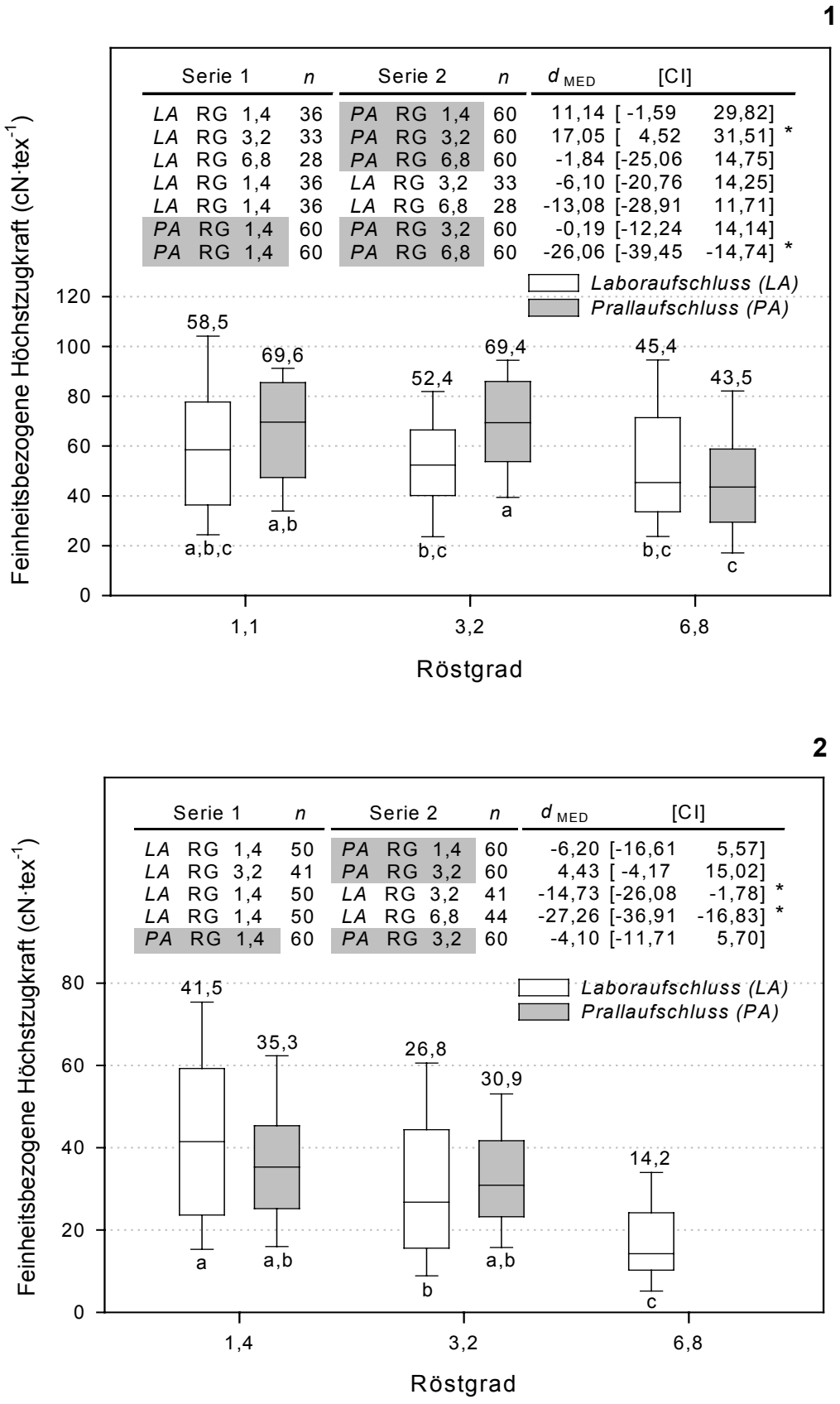


Abb. 3.31: Feinheitsbezogene Höchstzugkraft von Hanffasern (cv. Fasamo) in Abhängigkeit von Röstgrad und Aufschluss aus Feldversuch Leipzig-Seehausen 2002 (1 - L_0 = 2 mm, 2 - L_0 = 50 mm); weitere Erklärung siehe Abb. 3.20.

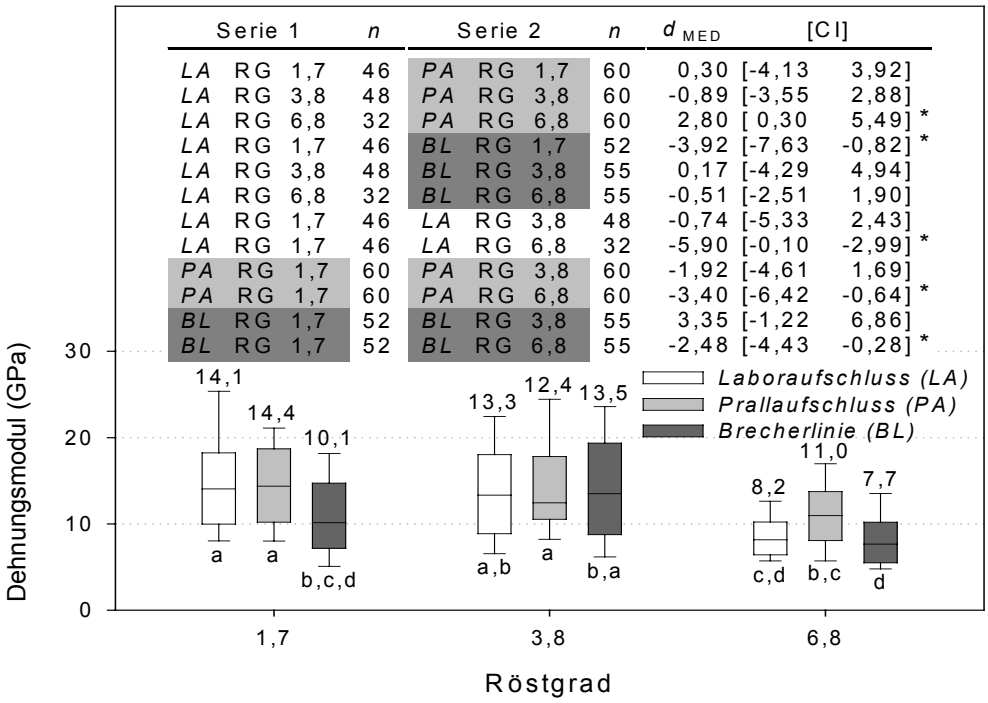


Abb. 3.32: Dehnungsmodul von Hanffasern (cv. USO 31) in Abhängigkeit von Röstgrad und Aufschluss aus Feldversuch Leipzig-Seehausen 2002 (L_0 = 50 mm); weitere Erklärung siehe Abb. 3.20.

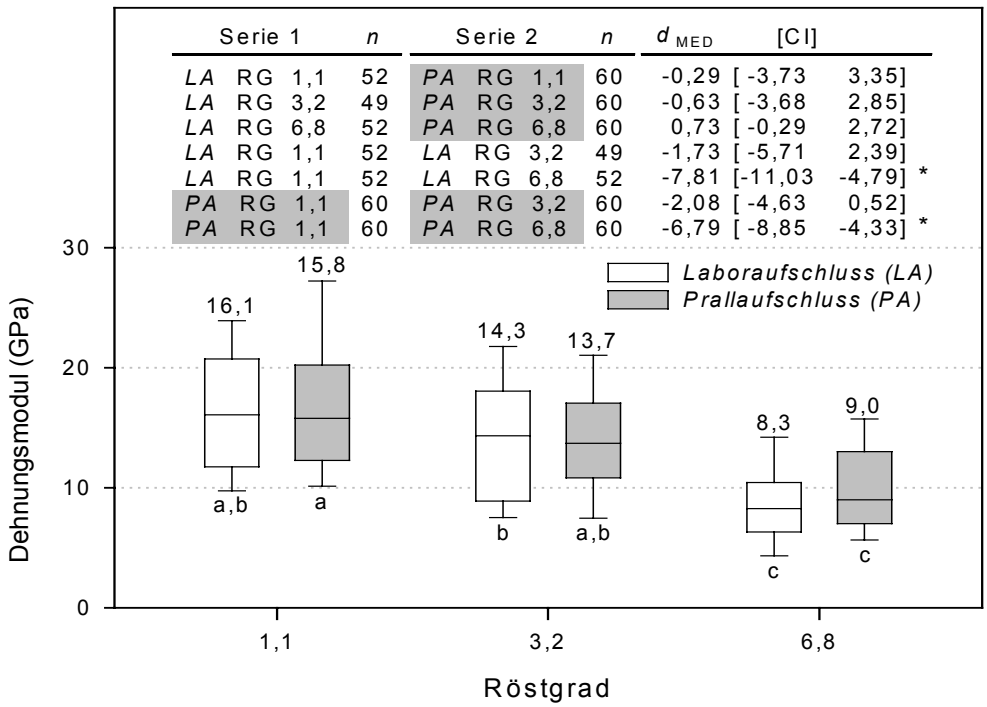


Abb. 3.33: Dehnungsmodul von Hanffasern (cv. Kompolti) in Abhängigkeit von Röstgrad und Aufschluss aus Feldversuch Leipzig-Seehausen 2002 (L_0 = 50 mm) weitere Erklärung siehe Abb. 3.20.

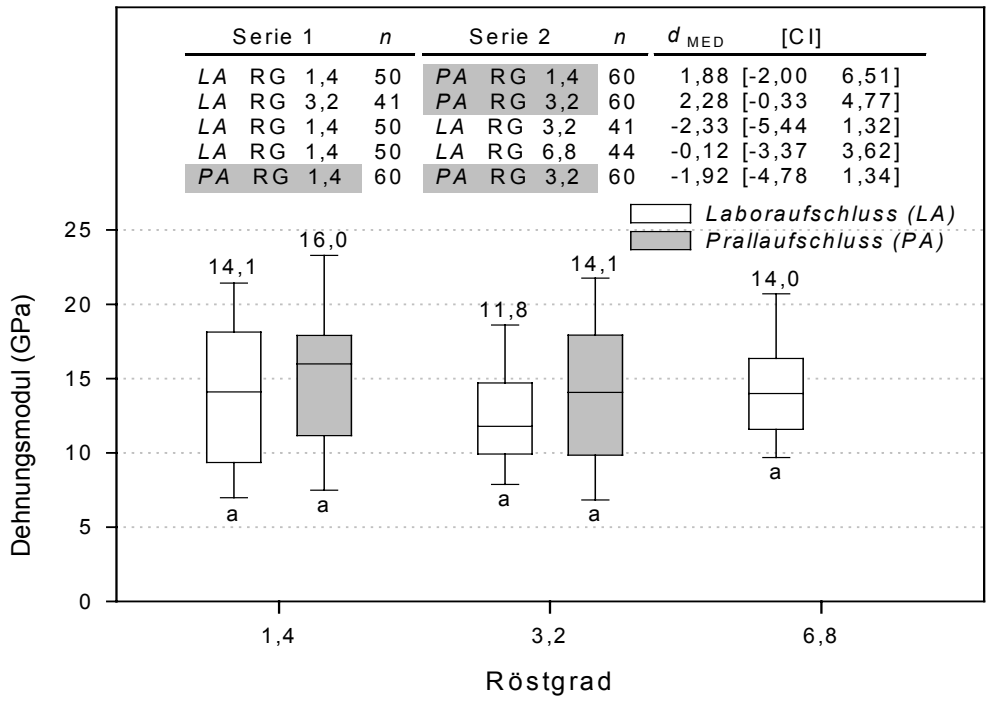


Abb. 3.34: Dehnungsmodul von Hanffasern (cv. Fasamo) in Abhängigkeit von Röstgrad und Aufschluss aus Feldversuch Leipzig-Seehausen 2002 (L_0 = 50 mm); weitere Erklärung siehe Abb. 3.20.

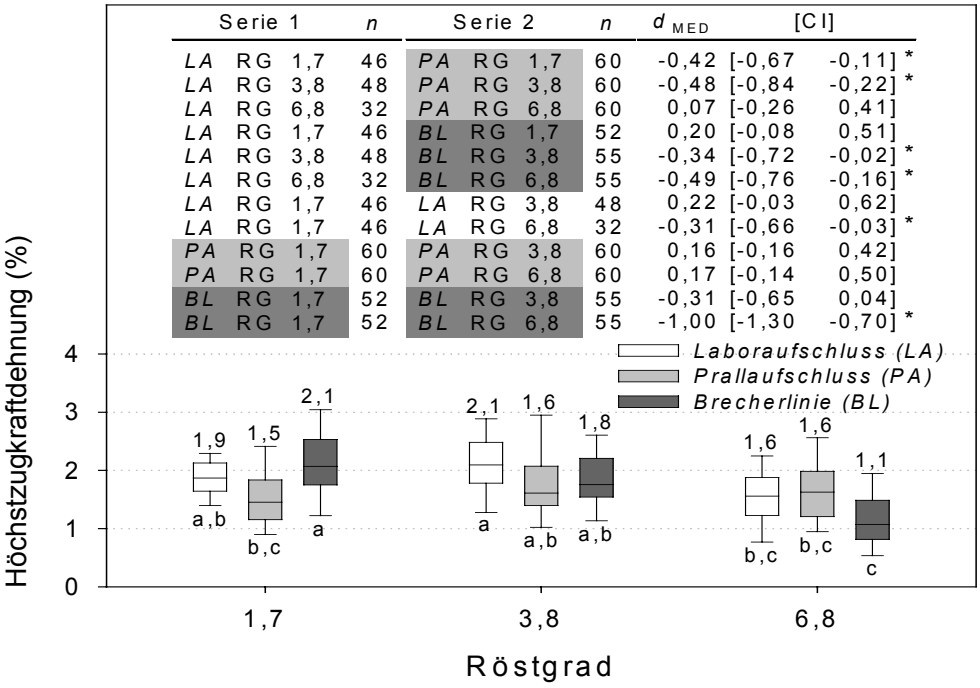


Abb. 3.35: Höchstzugkraftdehnung von Hanffasern (cv. USO 31) in Abhängigkeit von Röstgrad und Aufschluss aus Feldversuch Leipzig-Seehausen 2002 (L_0 = 50 mm); weitere Erklärung siehe Abb. 3.20.

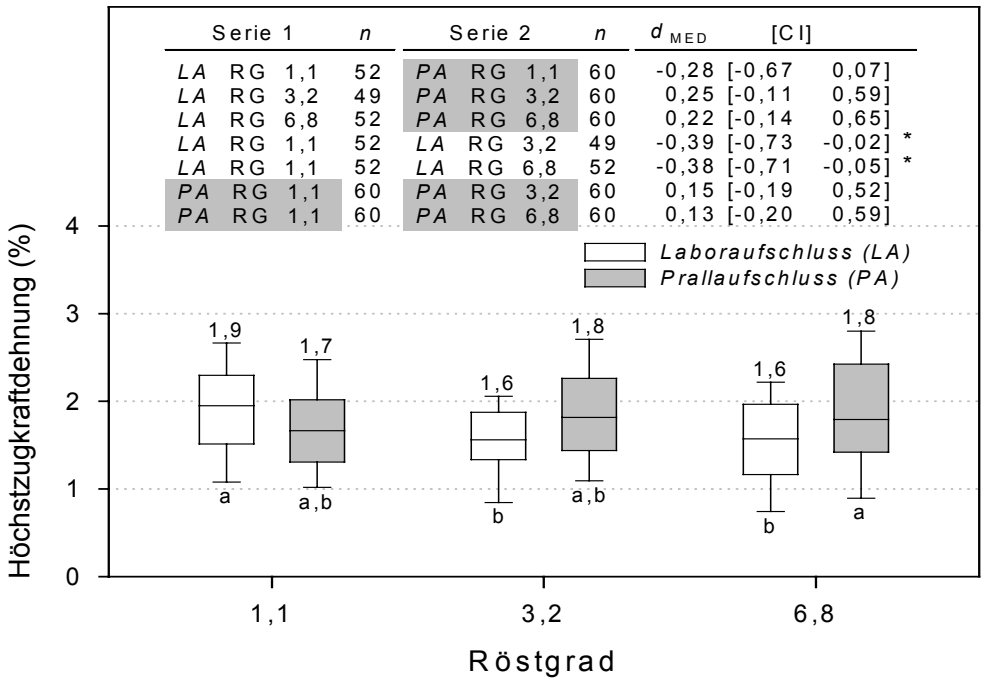


Abb. 3.36: Höchstzugkraftdehnung von Hanffasern (cv. Kompolti) in Abhängigkeit von Röstgrad und Aufschluss aus Feldversuch Leipzig-Seehausen 2002 (L_0 = 50 mm); weitere Erklärung siehe Abb. 3.20.

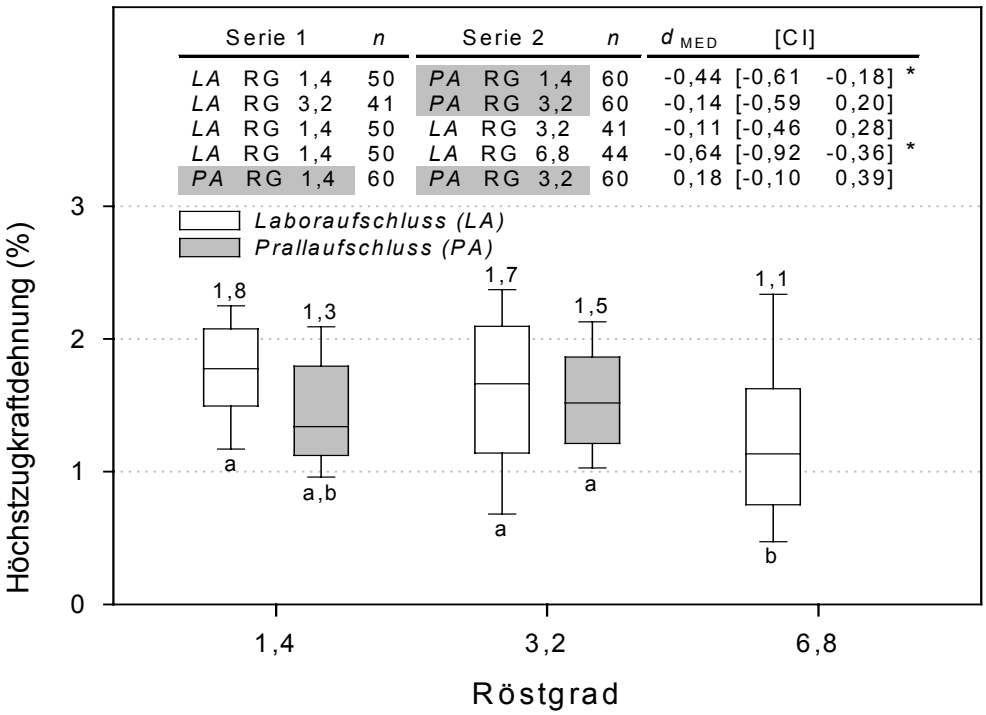


Abb. 3.37: Höchstzugkraftdehnung von Hanffasern (cv. Fasamo) in Abhängigkeit von Röstgrad und Aufschluss aus Feldversuch Leipzig-Seehausen 2002 (L_0 = 50 mm); weitere Erklärung siehe Abb. 3.20.

Die **Höchstzugkraftdehnung** war in der Mehrzahl der Versuchsvarianten unabhängig von Röstgrad und Faserisolierungstechnologie (Abb. 3.35-3.37). In Einzelfällen wurden verringerte Dehnbarkeiten bei hohem Röstgrad (R3) festgestellt. Dies gilt für Fasern von USO 31 nach der Brecherlinie BL sowie für Fasern von Kompolti und Fasamo nach dem Laboraufschluss.

3.3.2 Praxislinie

3.3.2.1 Röstgrad von Hanfstroh

Das Stroh bei allen untersuchten Hanfsorten und Röststufen der Praxisproduktionslinie war ungleichmäßig geröstet. Die Bonitur des Röstgrades erfolgte anteilmäßig und ergab bei den untersuchten Sorten eine deutliche Abstufung (Tab. 3.6). Die höchste Variabilität bei der Ermittlung des Röstgrades zeigte die Sorte USO 31 in der dritten Röststufe.

Tab. 3.6: Röstgrad von Hanfstroh bei vier Hanfsorten am Standort Zichtau 2003.

	Röstgrad (Boniturnote)			
Röststufe	S1	S2	S3	S4
1	**1,1** ± 0,1	**1,2** ± 0,1		
2	**4,3** ± 0,3	**4,1** ± 0,2	**3,9** ± 0,3	**4,2** ± 0,2
3	**6,2** ± 0,7	**5,6** ± 0,3		

Sorten: S1 = USO 31, S2 = Fedora 17, S3 = Futura 75, S4 = Ipsilon 68

Die Röstgrade von Stroh der Röststufe R1 der Sorten S1 und S2 lagen zwischen eins und zwei, was grün bis gelbbraunes Stroh kennzeichnet, dass äußerlich auf maximal 50% der Oberfläche einen Besatz mit hellgrauen Pilzkolonien zeigt (Tab. 2.10). Bei dem Vergleich der Röstgrade R1 wurden keine deutlichen Variantenunterschiede festgestellt. Die Röstgrade von Stroh der Röststufe R2 bei vier Sorten lagen bei ca. 4. Die Strohproben hatten mittelbraune bis braune Färbung der Epidermis. Der Besatz mit Pilzkolonien war hell- bis mittelgrau gefärbt und auf 60-90% der Stängeloberfläche verteilt. Bei der Röststufe R2 sind die Unterschiede zwischen den Varianten stärker. Die Röstgrade von Stroh der Röststufe R3 lagen bei ca. sechs. Die Epidermis war zu über 90% mit dunkelgrauen Belägen überzogen. Der Holzanteil war zu 70-80% dunkel verfärbt. Bei der Röststufe R3 wurden leichte Unterschiede zwischen den untersuchten Strohvarianten festgestellt. Das Stroh der Sorte S1 war etwas stärker geröstet als das Stroh der Sorte S2, die Unterschiede sind nicht signifikant.

3.3.2.2 Fasereigenschaften

Die **Faserlänge** in den Faseraufschlussverfahren der Praxisproduktionslinie (*BL* und *BL+C*) wurde technisch vorgegeben (Kap. 2.1.2). Die Voreinstellung hat zu Längenverteilungen mit einem typischen Schwerpunkt um 101 - 118 mm bei den Fasern der Sorte S1 und um 88 - 159 mm bei den Fasern der Sorte S2 nach der Brecherlinie (*BL)* geführt (Abb. 3.37). Die Fasern nach der Brecherlinie mit Verfeinerung *BL+C* waren signifikant kürzer (71 - 84 mm bei der Sorte S1 und 55 - 117 mm bei der Sorte S2). Die Fasern der Versuchsvariante S2R3 (*BL* und *BL+C*) hatten signifikant höhere Faserlängen (Abb. 3.37 2).

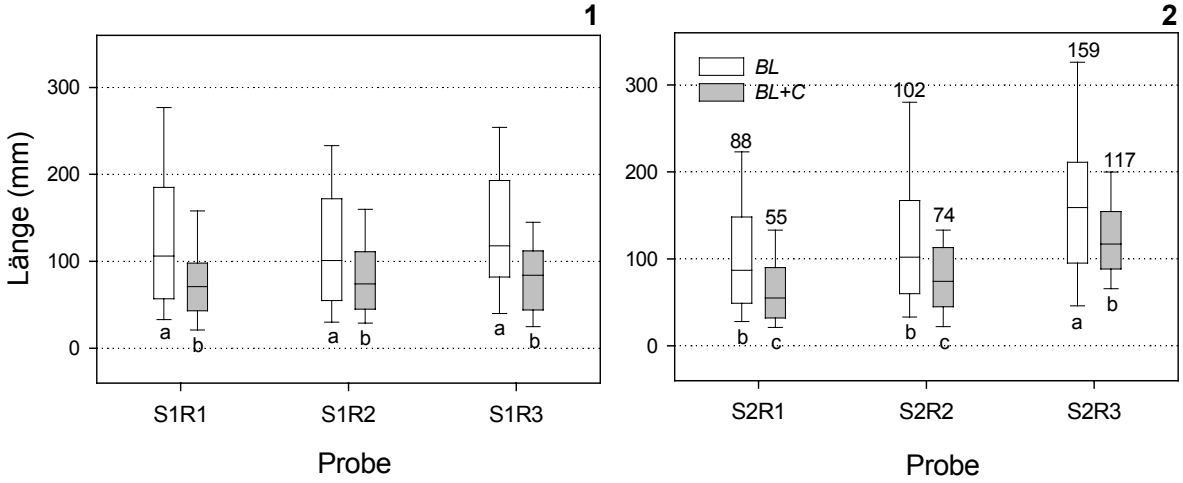


Abb. 3.38: Länge von Hanffasern (1 - cv. USO 31 - S1 und 2 - cv. Fedora 17 - S2) in Abhängigkeit von Röstgrad R1-R3 (s. Tab. 3.6) und Faseraufschluss: Brecherlinie - *BL,* Brecherlinie und Cottonisierung - *BL+C*, aus Praxisproduktionslinie (Versuchsjahr 2003, n = 99).

Die in Tabelle 3.7 aufgeführten Faserlängen zeigten für die einzelnen Faserpartien differenzierte Mittelwerte, die zu den in Abbildung 3.38 als Boxplot dargestellten Messwertverteilungen gehören: Durch Röste kam es in der Variante (S2R3) zu signifikant höheren Faserlängen. Durch Cottonisierung (*BL+C*) verringerten sich die Faserlängen. Die durchschnittliche Zahl kurzer wie auch langer Verzweigungen der Fasern stieg mit zunehmender Röste an. Durch Cottonisierung ging die Zahl der Abspleißungen generell zurück, insbesondere lange Teilfilamente (> 100 mm) verschwanden gänzlich. Der Schäbengehalt (Tab. 3.7) betrug in der Mehrzahl der mittels Brecherlinie mit und ohne Cottonisierung bearbeiteten Faserpartien weniger als 2 Masse-%. In den Varianten (*BL+C*) waren im Vergleich zu *BL* sowohl sinkende, gleich bleibende als auch ansteigende Schäbengehalte festgestellt, allerdings mit Werten überwiegend im Bereich 1-2 Masse-% auf niedrigem Niveau.

Tab. 3.7: Länge, Verzweigungen und Schäbengehalt von Hanffasern (S1 - cv. USO 31, S2 - cv. Fedora 19) in Abhängigkeit von Röstgrad R1-R3 (s. Tab. 3.6) und Faseraufschluss: Brecherlinie - BL, Brecherlinie und Cottonisierung - BL+C im Feldversuch Zichtau 2003. Längenmessung, Verzweigungsbonitur (n = 99) und Schäbenentnahme (n = 3).

Probe	Verarbeitung	Faserlänge	Anzahl der Verzweigungen erster Ordnung				Anzahl der Verzweigungen zweiter Odnung		Schäbengehalt
		(mm)	<10mm	10-50mm	50-100mm	>100mm	<10mm	>10mm	(Masse-%)
S1R1	*BL*	129,4	10,2	1,5	0,2	0,1	3,9	0,4	1,4
	BL + C	78,6	6,7	1,5	0,1	0	2,7	0,3	1,6
S1R2	*BL*	119,8	8,8	1,4	0,2	0,1	4,1	0,2	0,6
	BL + C	84,8	8,2	1,6	0,1	0	3	0,5	1,1
S1R3	*BL*	144	9,6	2,6	0,4	0,1	5,1	0,8	1,1
	BL + C	83,8	8	1,6	0,2	0	3	0,3	1,2
S2R1	*BL*	108,9	9,7	1,8	0,2	0,1	4,8	0,8	1,3
	BL + C	68,1	7,5	1,7	0,1	0	3,1	0,3	1,6
S2R2	*BL*	125,4	10,1	2,9	0,3	0,1	6,1	1,1	1,6
	BL + C	78	8,8	1,2	0,1	0	3,1	0,1	1,1
S2R3	*BL*	167,7	20	2,9	0,3	0,1	7,7	0,6	0,8
	BL + C	126,7	10,9	3,15	0,4	0	5,1	0,6	0,8

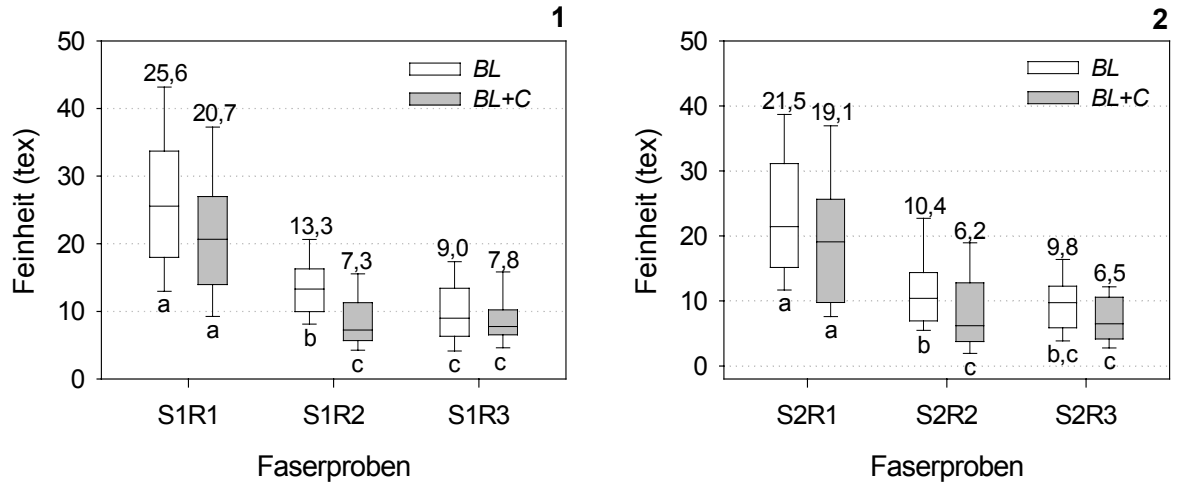


Abb. 3.39: Feinheit von Hanffasern (1 - cv. USO 31 - S1 und 2 - cv. Fedora 17 - S2) in Abhängigkeit von Röstgrad R1-R3 (s. Tab. 3.5) und Faseraufschluss: Brecherlinie - *BL,* Brecherlinie und Cottonisierung - *BL+C*, aus Praxisproduktionslinie (Versuchsjahr 2003, Faserlänge = 100 mm, n = 40).

Unter den Bedingungen der Praxisproduktionslinie konnte eine Wirkung der Röste auf die Faser**feinheit** nachgewiesen werden. Mit zunehmendem Röstgrad kam es zur Verfeinerung der Fasern (Abb. 3.39). In einigen Fällen, oft mit mittlerem Röstgrad (R2) gekoppelt, konnte durch Cottonisierung *BL+C* gegenüber der ausschließlichen Bearbeitung in der Brecherlinie *BL* eine zusätzliche Verfeinerung erreicht werden (Varianten S1R2 und S2R2). Zwischen den Hanfsorten S1 und S2 wurde kein deutlicher Unterschied festgestellt. Die Darstellung der **Ausgangsquerschnittsfläche** der Fasern spiegelte die gleichen Zusammenhänge wie bei der Faserfeinheit wider (Abb. 3.40).

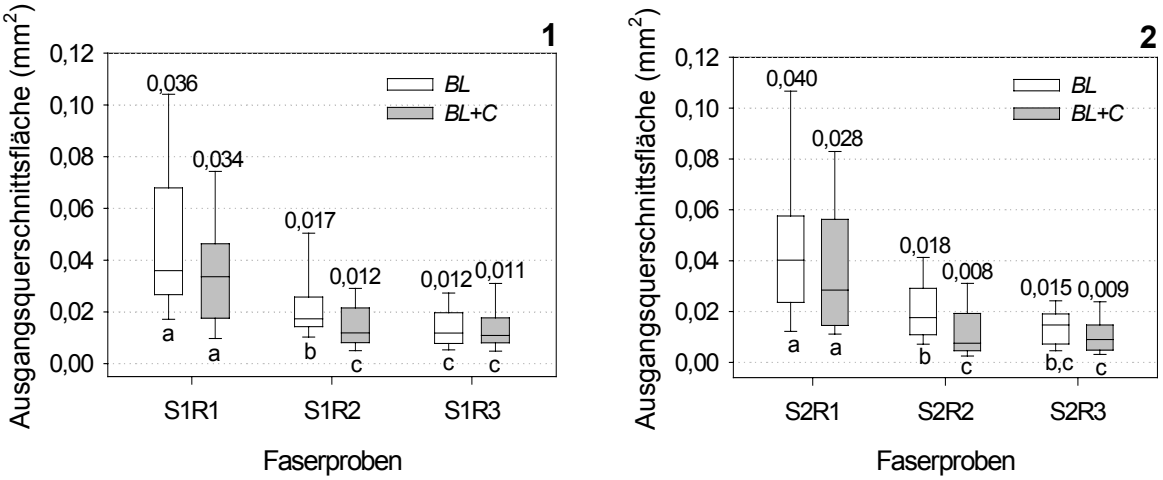


Abb. 3.40: Ausgangsquerschnittsfläche von Hanffasern (1 - cv. USO 31 - S1 und 2 - cv. Fedora 17 - S2) in Abhängigkeit von Röstgrad R1-R3 (s. Tab. 3.5) und Faseraufschluss: Brecherlinie - *BL,* Brecherlinie und Cottonisierung - *BL+C*, aus Praxisproduktionslinie Zichtau 2003 (L_0 = 50 mm, n = 40).

Die gemessenen **Zugfestigkeit**en (L_0 = 2 mm) der Faserproben nach der Brecherlinie *BL* unterschieden sich in Folge unterschiedlicher Röste nicht deutlich (Abb. 3.41-3.42 1). Der zusätzliche Aufschluss durch Cottonisierung *BL+C* wirkte sich positiv auf die Zugfestigkeit der Fasern aus. Es wurden erhöhte Werte der Zugfestigkeit bei Faserproben mittlerer Röstestufe R2 festgestellt. Die Werte der Zugfestigkeit (L_0 = 50 mm) der Fasern der Sorte S2 zeigten die gleiche Tendenz wie die Werte der Zugfestigkeit kurzer Einspannlänge L_0 = 2 mm (Abb. 3.42 2). Bei der Darstellung der Zugfestigkeit (L_0 = 50 mm) der Fasern der Sorte S1 nach der Brecherlinie *BL* wurde eine signifikante Steigerung bei erhöhter Röststufe R3 festgestellt. Die Zugfestigkeiten der Fasern nach dem Aufschluss durch Cottonisierung *BL+C* unterschieden sich nicht signifikant (Abb. 3.41 2). Bei dem Vergleich von Zugfestigkeiten der Fasern aus unterschiedlicher Aufschlusstechnologien *BL* und *BL+C* wurden keine eindeutigen Tendenzen gefunden.

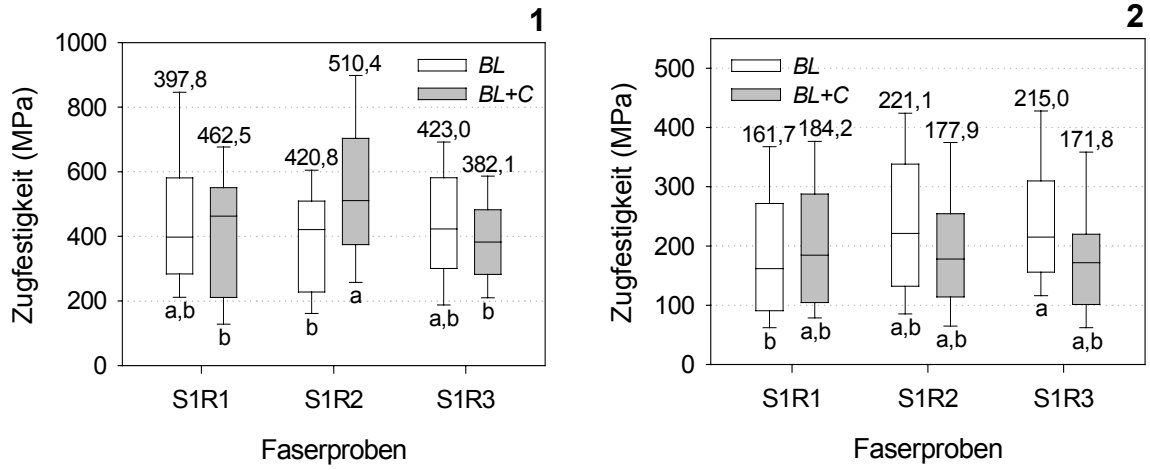


Abb. 3.41: Zugfestigkeit von Hanffasern (cv. USO 31 - S1) in Abhängigkeit von Röstgrad R1-R3 (s. Tab. 3.5) und Faseraufschluss: Brecherlinie - *BL,* Brecherlinie und Cottonisierung - *BL+C*, aus Praxisproduktionslinie Zichtau 2003 (1 - L_0 = 2 mm und 2 - L_0 = 50 mm, n = 40).

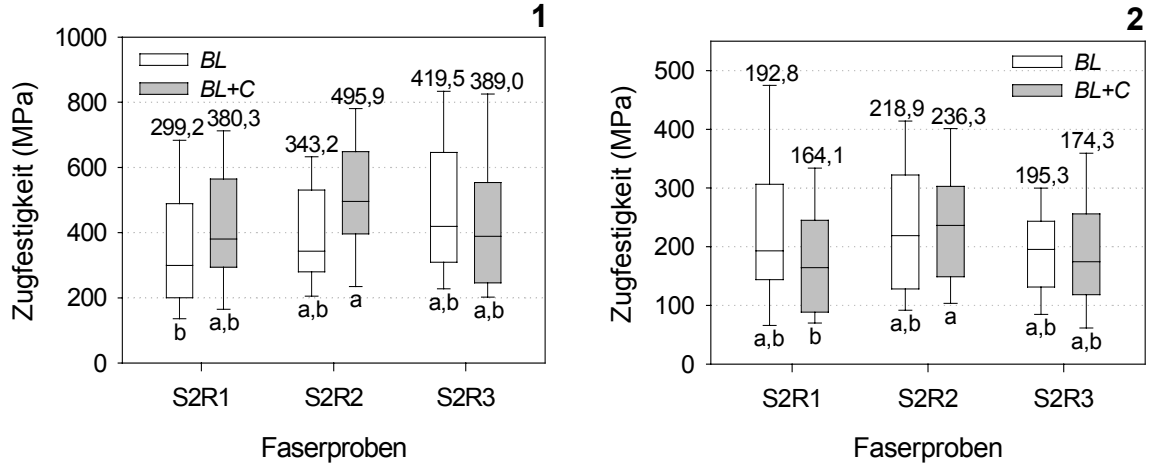


Abb. 3.42: Zugfestigkeit von Hanffasern (cv. Fedora 17 - S2) in Abhängigkeit von Röstgrad R1-R3 (s. Tab. 3.5) und Faseraufschluss: Brecherlinie - *BL,* Brecherlinie und Cottonisierung - *BL+C*, aus Praxisproduktionslinie Zichtau 2003 (1 - L_0 = 2 mm und 2 - L_0 = 50 mm, n = 40).

Die **feinheitsbezogenen Höchstzugkräfte** (L_0 = 2 und 50 mm) der Fasern aus unterschiedlich gerösteten Strohvarianten der Sorten S1 und S2 zeigten keine statistisch nachweisbaren Unterschiede. Der zusätzliche Aufschluss durch Cottonisierung *BL+C* hatte keine Auswirkung auf die feinheitsbezogene Höchstzugkraft (Abb. 3.41-3.42).

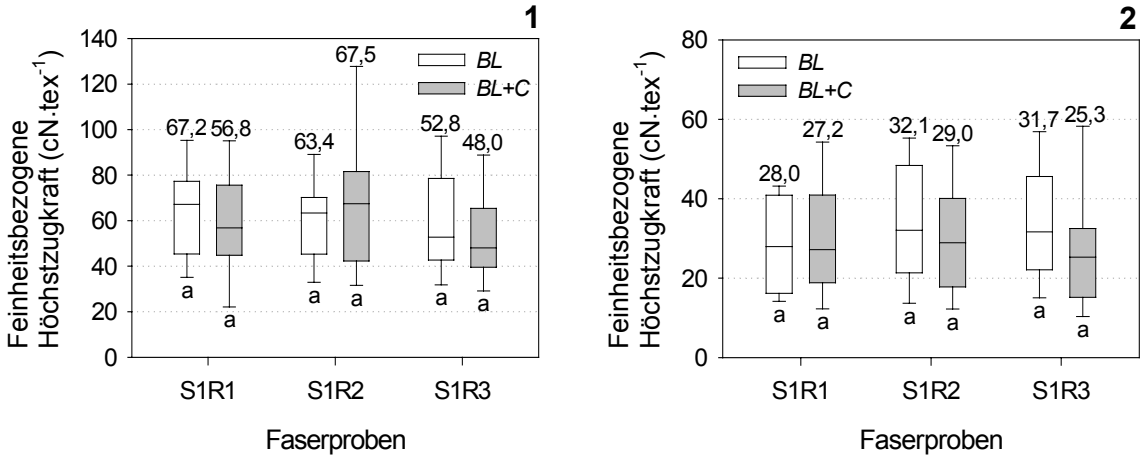


Abb. 3.43: Feinheitsbezogene Höchstzugkraft von Hanffasern (cv. USO 31 -S1) in Abhängigkeit von Röstgrad R1-R3 (s. Tab. 3.5) und Faseraufschluss: Brecherlinie - *BL,* Brecherlinie und Cottonisierung - *BL+C*, aus Praxisproduktionslinie Zichtau 2003 (1 - L_0 = 2 mm und 2 - L_0 = 50 mm, n = 40).

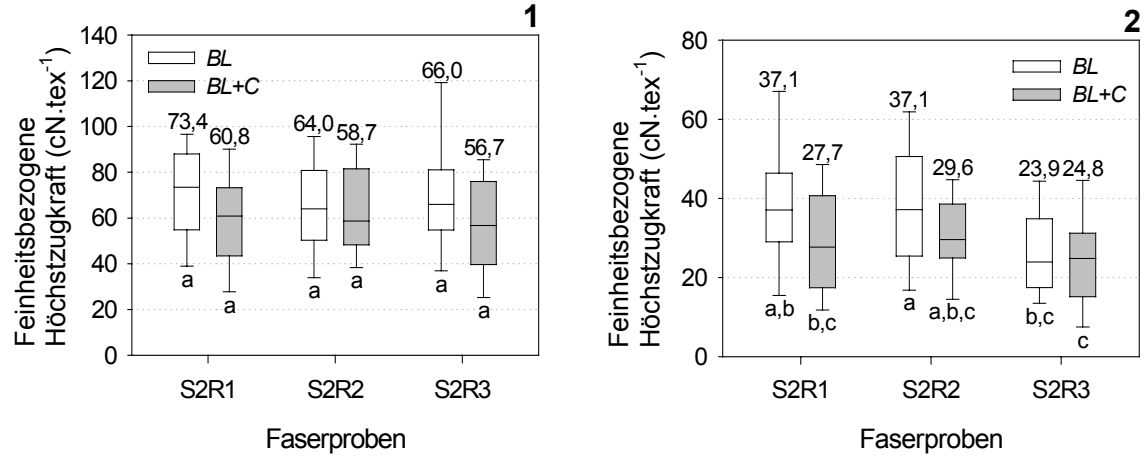


Abb. 3.44: Feinheitsbezogene Höchstzugkraft von Hanffasern (cv. Fedora 17 - S2) in Abhängigkeit von Röstgrad R1-R3 (s. Tab. 3.5) und Faseraufschluss: Brecherlinie - *BL,* Brecherlinie und Cottonisierung - *BL+C*, aus Praxisproduktionslinie Zichtau 2003 (1 - L_0 = 2 mm und 2 - L_0 = 50 mm, n = 40).

Die Auswertung der Prüfgröße **Dehnungsmodul** der Fasern der Hanfsorten S1 und S2 bei unterschiedlichen Röststufen R1-R2 zeigte keine statistisch gesicherten Unterschiede. Auch die zusätzliche Cottonisierung BL+C änderte die Werte der Dehnungsmoduli nicht (Abb. 3.45). Die **Höchstzugkraftdehnung** stieg bei Fasern der Sorte S1 nach der Brecherlinie *BL* mit dem Röstgrad an (Abb. 3.46 1). Bei den Fasern der Sorte S2 wurde keine signifikante Änderung der Höchstzugkraftdehnung festgestellt (Abb. 3.46 2). Nach

Bearbeitung in den Cottonisierungstufen *BL+C* wurden gegenüber der alleinigen Bearbeitung in der Brecherlinie *BL* (Faservarianten S1R2, S1R3) in Einzelfällen sinkende Werte festgestellt.

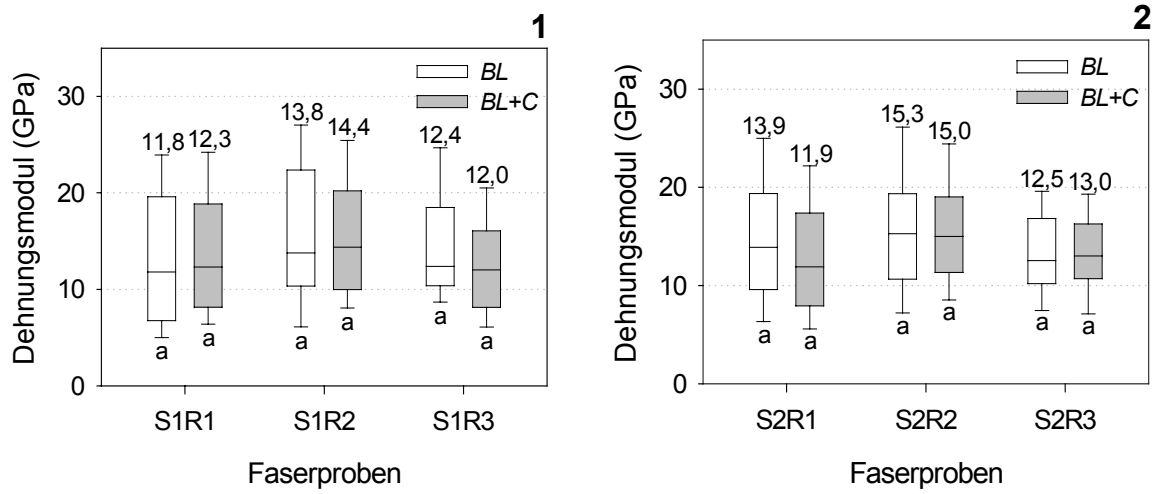


Abb. 3.45: Dehnungsmodul von Hanffasern (1 - cv. USO 31 - S1 und 2 - cv. Fedora 17 - S2) in Abhängigkeit von Röstgrad R1-R3 (s. Tab. 3.5) und Faseraufschluss: Brecherlinie - *BL,* Brecherlinie und Cottonisierung - *BL+C*, aus Praxisproduktionslinie Zichtau 2003 (L_0 = 50 mm, n = 40).

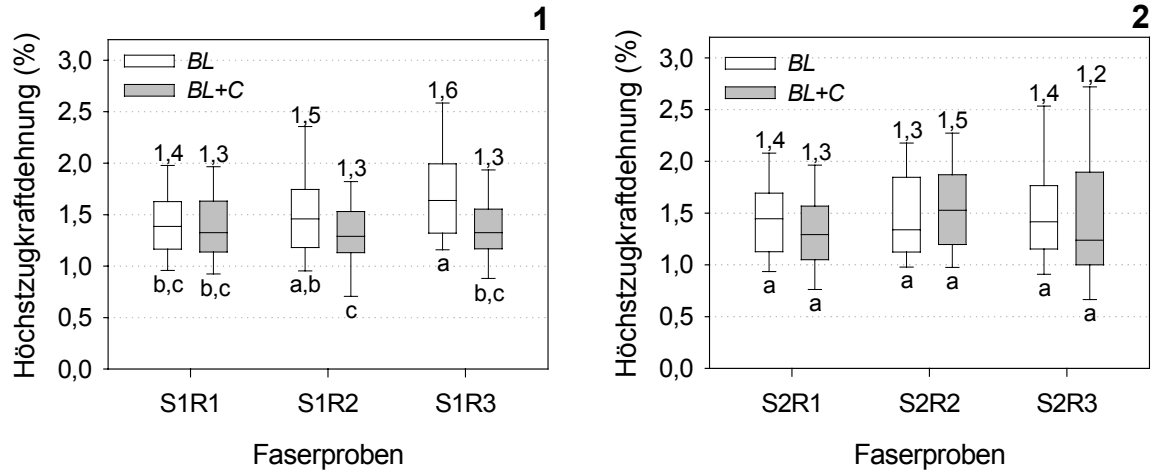


Abb. 3.46: Höchstzugkraftdehnung von Hanffasern (1 - cv. USO 31 - S1 und 2 - cv. Fedora 17 - S2) in Abhängigkeit von Röstgrad R1-R3 (s. Tab. 3.5) und Faseraufschluss: Brecherlinie - *BL,* Brecherlinie und Cottonisierung - *BL+C*, aus Praxisproduktionslinie Zichtau 2003 (L_0 = 50 mm, n = 40).

4 Diskussion

Die Diskussion konzentriert sich auf folgende Punkte: Bestimmung des optimalen Erntetermins von Hanf zur Faserverwertung; Einfluss des Strohmanagements, der Röste und der Aufschlusstechnologie auf physikalische Fasereigenschaften.

4.1 Optimaler Erntetermin

Um Veränderungen in der Faserqualität im Entwicklungsverlauf der Hanfpflanze verfolgen zu können, war es im Rahmen der vorliegenden Arbeit notwendig, pflanzenbauliche Faktoren im Feldversuchsanbau und die Einstellungen der Faseraufbereitung soweit wie möglich konstant zu halten. Nach Literaturangaben ist der Einfluss des **Standortes** auf die Biomasse- und den Faserertrag sowie auf die Faserqualität von Hanf nachgewiesen (SCHEER-TRIEBEL und LÉON, 2000; SCHÄFER, 2003). So wurden die Feldversuche zur vergleichenden Bewertung auf den benachbarten Schlägen der Versuchstation Leipzig-Seehausen so angelegt, dass sowohl Bodenverhältnisse als auch Fruchtfolge- und Vorfruchtbedingungen vergleichbar sind. Die **Feldversuchsanlage** war ca. 1,4 ha groß und umfasste drei eingebettete Großparzellen. Dies ermöglichte den Einsatz von praxisüblicher Erntetechnik. Die Randeffekte in Hanfbeständen sind charakterisiert durch großen Pflanzenwuchs. Bereits das äußere Erscheinungsbild der Randpflanzen unterscheidet sich von dem der Pflanzen im Bestand. Deshalb erfolgte die Probennahme an fünf vollständig eingebetteten Probenentnahmestellen. Die Entfernungen zwischen den Probenentnahmestellen waren zufällig. Sie lagen jedoch, wegen des Maschineneinsatzes, hintereinander.

HÖPPNER und MENGE-HARTMANN (1994) haben festgestellt, dass eine ausreichende Wasserversorgung bei Hanf zur Realisierung einer hohen Biomassebildung entscheidend ist. Auch DIEPENBROCK et al. (1999) berichten, dass eine ausreichende **Wasserversorgung**, möglichst > 700 mm Jahresniederschlag, erwünscht ist. Die Niederschlagsverteilung für den Standort Leipzig-Seehausen zeigt deutliche Jahresunterschiede im Zeitraum 2000-2002 (s. Abb 2.1). Das erste Versuchsjahr 2000 war mit einem Jahresniederschlag von 619 mm trockener als die Jahre 2001 und 2002 mit Jahresniederschlägen von 766 und 755 mm. So sind **Jahresunterschiede** in den Untersuchungsergebnissen u.a. auf eine unterschiedliche Wasserversorgung zurückzuführen.

Für den Anbau von Hanf zur Fasergewinnung in Mitteleuropa steht ein umfangreiches, gut beschriebenes Sortenspektrum zur Verfügung (MEIJER, 1995; MEDIAVILLA, 1999). MÜNZER

(1999) findet größere Differenzen zwischen den **Sorten** als zwischen den geprüften Orten und Jahren. Die phänologische Entwicklung wird von der Herkunft bestimmt: Akzessionen der nördlichen Breiten blühen und reifen früher. Für effektive Anbausysteme in Mittel- und Nordeuropa sind Stängel- bzw. Fasertypen; für südliche Regionen Samen- bzw. Öltypen geeignet (MEIJER und KEIZER,1994). Monözische Sorten haben gegenüber den diözischen den Vorteil, dass sie gleichmäßiger abreifen, einfacher mechanisch zu ernten sind und eine bessere Faserqualität erbringen (SANKARI, 2000). Da sie aber vermutlich wegen Inzuchtsdepression oft niedrige Erträge aufweisen (DIEPENBROCK et al., 1999), wird auch auf diözische Formen zurückgegriffen. Für die Untersuchung des Entwicklungszustandes der Hanfpflanze zur Ernte und der entwicklungsbedingten Veränderung von Fasereigenschaften wurden drei repräsentative Sorten (cv. USO 31, cv. Kompolti und cv. Fasamo) unterschiedlicher Herkunft, Geschlechterverteilung und Reifetyp ausgewählt. Detaillierte Sortencharakteristika sind in Tabelle 2.2 dargestellt.

Nach DIEPENBROCK et al. (1999) soll die Saattiefe auf Mineralböden 3 bis 4 cm und die Reihenabstände 10 bis 15 cm betragen. Um die Aussaat mit einer Getreidedrillmaschine zu ermöglichen, betrug die **Saattiefe** 3 cm und der **Reihenabstand** 12 cm. Weitere Besonderheiten der Bestandesführung und der agronomischen Maßnahmen am Standort Leipzig-Seehausen sind Tabelle 2.3 zu entnehmen.

Die **Hanfaussaat** kann zwischen Ende April und Ende Mai erfolgen (MASTEL et al., 1998). Bei später Aussaat steigt das Ernterisiko. HEUSER (1927) empfiehlt eine Aussaat von Hanf in Deutschland im Zeitraum von Mitte bis Ende April. Entsprechend erfolgte die Aussaat in den eigenen Feldversuchen, grundsätzlich in der dritten Aprildekade (s. Tab. 2.3).

MENGE-HARTMANN und HÖPPNER (1995) untersuchten, wie verschiedene **Aussaatstärken** bei einem konstanten Reihenabstand von 12,5 cm auf den Fasergehalt des Stängels von Faserhanfsorten wirken können. Für die Etablierung eines guten Hanfbestandes unter Praxisbedingungen werden die Aussaatstärken 450 $kK \cdot m^{-2}$ empfohlen. Hohe Bestandesdichten führen aber auch bei intraspezifischer Konkurrenz zur Stagnation des Wachstums von Einzelpflanzen, die sich als Unterhanffraktion zeigen. Deren Individuen bleiben klein und erreichen nach Bestandesschluss nicht mehr die Bestandeshöhe oder sterben sogar später ganz ab (VAN DER WERF et al., 1995). Unterhanffraktionen sind einerseits nicht erwünscht, da sie die Inhomogenität von Beständen vergrößern. Andererseits wird durch hohe

Bestandesdichten die Ausbildung schlanker Stängel und faserführender Rindenschichten gefördert (VAN DER WERF et al., 1995). Außerdem sind die Faserzellwände stärker verdickt (SCHÄFER und HONERMEIER, 2005) und die Faserbündel können höhere Zugfestigkeiten aufweisen (VON FRANCKEN-WELZ, 2003). Für die Faserhanfsorten USO 31 und Kompolti wurde die Aussaatstärke mit 450 $kK \cdot m^{-2}$ und für die Samensorte Fasamo die Aussaatstärke mit 250 $kK \cdot m^{-2}$ optimiert.

Die Etablierung der Bestandesstruktur bei hohen Bestandesdichten ist mit einer **Selbstregulation** verbunden (VAN DER WERF et al., 1995). Die Ausdünnungseffekte sind stark umweltabhängig (CROMACK, 1998). Das bestätigen auch die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit. Eine starke Jahresabhängigkeit der Pflanzenverluste zeigte sich bei USO 31 im Jahr 2001 und bei Kompolti im Jahr 2002 (Tab. 3.1). Die niedrige Aussaatmenge von 250 $kK \cdot m^{-2}$ der Samenhanfsorte Fasamo bewirkte eine geringe Reduzierung der Bestandesdichte (auf 90% in den Jahren 2001-2002 und auf nur 99% im Jahr 2000).

Für die Produktion von Hanffasern ist eine ausreichende **Stickstoffversorgung** notwendig (MEDIAVILLA et al., 1998). Eine Erhöhung der N-Düngung von 60 auf 120 $kg \cdot ha^{-1}$ war in den Untersuchungen von RÖHRICHT et al. (1997) ertragswirksam. Bei Überversorgung kommt es zu inhomogenen Beständen (VAN DER WERF und VAN DER BERG, 1995) und zu einer mangelhaften Ausbildung der Fasern (MAŃKOWSKI, 2003; HESSLER, 1947). Für den Standort Leipzig-Seehausen wurde eine Gesamtversorgung von 120 $kg \cdot ha^{-1}$ N ausgewählt. Die als Düngung zu verabreichenden Mengen wurden durch N_{min}-Analyse des Bodens bestimmt. Die Anwendung von **Pflanzenschutzmitteln** am Standort Leipzig-Seehausen war in dem Zeitraum 2000-2002 nicht notwendig.

Die Oberhanffraktion der Sorte USO 31 wurde überwiegend aus einhäusigen, d.h. habituell weiblichen (OHW), Pflanzen gebildet (im Jahr 2000 88,8%, im Jahr 2001 89,9% und im Jahr 2002 80,6%). Der Bestand der zweihäusigen Sorte Kompolti zeigte eine andere Zusammensetzung mit deutlich erhöhtem Anteil der männlichen (OHM) Pflanzen (32,1-39,4%) und dem entsprechend niedrigem Anteil der weiblichen (OHW) Pflanzen (44,5-50,9% s. Abb. 3.1). Die Bestände der Samenhanfsorte Fasamo setzten sich in den drei Versuchsjahren nahezu ausschließlich (> 95%) aus einhäusigen Pflanzen zusammen. Diese Sorte wies damit im vorliegenden Versuchsanbau die höchste Bestandeshomogenität auf. Die Fraktionen von Unterhanfpflanzen (UH) und vegetativen Oberhanfpflanzen (OHX) betrugen

weniger als 11% (Abb. 3.1). Der Vergleich der **Bestandesfraktionierung** zur Ernte auf der Basis der oberirdischen Biomasse hat ergeben, dass der optimale Erntezeitpunkt nur für die bestandesbildenden Fraktionen festgelegt wird.

Für die Ermittlung des Erntetermins bei Hanf zur Fasernutzung wurden wichtige **Ertragskomponenten** und Qualitätseigenschaften analysiert. Es wurde untersucht, wie sich der Stängel- bzw. Strohertrag (ohne Blatt- und Blütenbestandteil), die Stroheigenschaften und die physikalischen Fasereigenschaften verändern.

Das Pflanzenmaterial zur Untersuchung der Entwicklung des Hanfstängels wurde aus dem Bestand in erntenahen Stadien (Anfang Juli bis Ende Oktober) an fünf Terminen (s. Tab. 2.3) entnommen. Eine frühere Probenentnahme war nicht notwendig, da der Zuwachs des Bestandes in früheren Entwicklungsstadien noch sehr hoch war. Nach der Ernte wurden die Pflanzen nach den Fraktionen OHW, OHM, OHX und UH sortiert (s. Kap. 2.3.2) und entblättert. Danach folgte die Trocknung und Lagerung bei konstanten Klimabedingungen (23°C und 50% rF). Unter diesen Bedingungen wird ein gleichmäßiger Feuchtegehalt eingestellt, so dass die Volumenänderungen zwischen den Ernteterminen allein wachstumsbedingt waren. Die Messungen des Zuwachses erfolgten an Einzelpflanzen, so dass die Variation im Bestand erfasst werden konnte. Die Messungen an der Hanfpflanze beschränkten sich auf Stängellänge und -dicke (s. Abb. 2.4). Für die Berechnungen des Stängelvolumens wird eine Methode verwendet, die im Rahmen einer Vorstudie entwickelt worden war (NAUMENKO, 2000). Die Verfahrensweise ist einfach (zwei Messungen), sensitiv (Erfassung von Einzelpflanzenvariabilität) und frei von Wägefehlern (anhaftende Blatt-, Blütenreste und Verunreinigungen spielen keine Rolle).

Nach der Empfehlung von VAN DER WERF et al. (1995) erfolgte die Darstellung der Bestandesdynamik der Hanfpflanze (Änderung des Stängelvolumens und der Volumenzunahmerate) auf **Temperatursummen**basis. Dadurch können umweltbedingte Einflusse den zeitlichen Ablauf zwischen den Beobachtungsjahren ausgeschlossen werden.

Für die Darstellung der Änderung des Stängelvolumens wurde eine Regression mit Hilfe der Gompertz-Funktion (Formel 2.4, Kap. 2.3.3) geschätzt. Dabei wurde zugrunde gelegt, dass das Stängelvolumen des Hanfstängels zum Auflauftermin 0,01 cm^3 betrug. Die Annahme ist realistisch, da die Pflanzen zum Auflauftermin noch sehr dünne Stängel besaßen. Für die Darstellung der Volumenzuwachsrate wurde die 1. Ableitung der Gompertz-Funktion

gebildet. Das Vegetationsende wurde durch den Zeitpunkt definiert, an dem das Stängelvolumen keiner weiteren quantitativen Änderung unterliegt und die Volumenzunahmerate 5% des Maximums unterschreitet. Dies entspricht 0,0019-0,0038 $cm^3 \cdot K^{-1}$, was in der Praxis vernachlässigt werden kann. Die Volumenzunahme bei USO 31 und Fasamo kam zwischen der zweiten und der vierten Probenentnahme zum Erliegen (im Jahr 2000 bei Temperatursummen von 1510 - 1540 K, im Jahr 2001 bei 1390 - 1270 K und im Jahr 2002 bei 1340 - 1690 K s. Abb. 3.2-3.4, 1). Die Entwicklung von Stängelvolumina unterscheidet sich nicht stark zwischen USO 31 und Fasamo. Die beiden Sorten sind frühreifend. Auch die spätreifende Hanfsorte Kompolti kann man anhand der vorliegenden Ergebnisse leicht charakterisieren. In jedem Versuchsjahr reiften die weiblichen (OHW) Pflanzen von Kompolti später als die einhäusigen Pflanzen von USO 31 und Fasamo (Abb. 3.5-3.7, A1). Im Jahr 2002 konnte das Ende der Volumenzunahmekurve nicht erfasst werden (Abb. 3.7, A1). Die Literaturangaben von DIEPENBROCK et al. (1999) und MEDIAVILLA et al. (1998) zeigen ebenfalls, dass die männlichen Pflanzen früher reifen.

Parallel zur Analyse der Stängelentwicklung erfolgte die Beobachtung von **Stroheigenschaften** (isolierbarer Faseranteil und Freilegbarkeit) der Sorten USO 31 und Kompolti. Um einen gleichbleibenden Einfluss der Aufschlusstechnologie bei der Ermittlung von Stroh- und Fasereigenschaften im Entwicklungsverlauf der Hanfpflanze zu garantieren, erfolgte die Isolierung der Fasern mit Hilfe einer standardisierten Labormaschine (s. Kap. 2.2). Der auf der Basis der Faserfraktion nach dem Laboraufschluss (*LA*) berechnete **Faseranteil** war im Beobachtungszeitraum nahezu unverändert (Abb. 3.8). Sofern es Abweichungen davon gab, betraf es Messwerte mit einem Methodenfehler. Die Reinheit der Faserfraktionen der untersuchten Varianten war nicht gleich und hing offensichtlich von dem Zustand der Strohprobe ab. Eine Aussage, über die Veränderung des Fasergehalts im Beobachtungszeitraum, kann anhand der Daten nicht getroffen werden. Die Daten gaben keinen Hinweis, dass im Beobachtungszeitraum eine Veränderung des Fasergehalts eintrat. Man muss davon ausgehen, dass schon zur ersten Probenentnahme alle extrahierbaren Fasern vollständig ausgebildet vorlagen. Die Werte der berechneten **Freilegbarkeit** der Fasern waren sortenabhängig. Die Freilegbarkeit der Fasern von USO 31 blieb im beobachteten Zeitraum nahezu unverändert (Abb. 3.9, 1A, 2A, 3A). Bei der Darstellung der Freilegbarkeit der Fasern der Sorte Kompolti wurde eine Optimumskurve beobachtet. Die höchsten Werte der Freilegbarkeit, d.h. Fasern die sich vergleichsweise leichter isolieren lassen, hat der dritte Probenentnahmetermin geliefert (Abb. 3.9, 1B, 2B, 3B).

Parallel zur Analyse der Stängelentwicklung und der Änderung von Stroheigenschaften erfolgte die Beobachtung von physikalischen **Fasereigenschaften** (Feinheit, Ausgangsquerschnittsfläche, Zugfestigkeit, feinheitsbezogene Höchstzugkraft, Dehnungsmodul und Höchstzugkraftdehnung). Naturfasern zeigen generell eine hohe Variabilität ihrer Fasereigenschaften (MORTON und HEARLE, 1993). Bei Nessel nach SETHMANN (2005) und bei Lein nach SCHEER-TRIEBEL et al. (1997) sind diese sogar innerhalb eines Pflanzenstängels feststellbar. In der vorliegenden Arbeit erfolgte die Probenentnahme von Hanffasern als Mischprobe und nicht aus definierten Stängelabschnitten. Hierdurch kann die Variabilität auch bei Hanf zusätzlich erhöht sein (FAUST, 2001). Um die Variabilität der untersuchten Fasereigenschaften repräsentativ zu erfassen, waren Stichprobenumfänge von $n > 40$ notwendig.

Die physikalischen Fasereigenschaften von Hanffasern sind von der Luftfeuchte und Temperatur abhängig und verändern sich nach relativ kurzer Zeit. Dies gilt in besonders starkem Maße für die Luftfeuchte (HOYER, 1999), da die Bastfasern stark hygroskopisch sind. Die Prüfbedingungen werden häufig im Zusammenhang mit veröffentlichten Daten nicht oder unvollständig genannt oder weichen voneinander ab, so dass Daten nur bedingt vergleichbar sind. Alle physikalischen Untersuchungen an isolierten Fasern, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit präsentiert werden, fanden bei konstantem Raumklima (23°C, 50% rF) und bei zwei Einspannlängen statt.

Die Angaben von KNOTHE (1997) zeigen die Abnahme der Zugfestigkeit von Hanffasern mit zunehmender Einspannlänge. Als Begründung wird eine zunehmende Anzahl von Störstellen im Prüfbereich der Fasern angesehen. In der vorliegenden Arbeit ist für die Prüfung der Belastbarkeit des gesamten Zellwandverbandes eine Einspannlänge 2 mm ausgewählt worden. Tests bei langer Einspannlänge (50 mm) führen bevorzugt zum Bruch entlang der Mittellamellen. Hierbei wird die Haftung der Faserzellen untereinander geprüft. Die Länge der Einzelfasern im Bündel schwankt zwischen 5 und 50 mm (DIEPENBROCK et al., 1999).

Die **Feinheit** beschreibt die längenbezogene Masse der Fasern. Geringe Werte der Feinheit kennzeichnen feinere und höhere Werte gröbere Fasern. Nach DRIELIG und HARIG (2000) ist Faserfeinheit ein wichtiges Qualitätsmerkmal für die technische und textile Verwendung. Feinere Fasern führen zu einer höheren Garnfestigkeit und beeinflussen das Verschleißverhalten und die Formbeständigkeit von Textilien positiv (BECKMANN, 1998). In

Bezug auf die Masse besitzen feine Fasern eine große Oberfläche und haben dadurch eine bessere Matrixhaftung in Verbundwerkstoffen (BLEDZKI et al., 1999). Die **Zugfestigkeit** bezeichnet die querschnittsbezogene Höchstzugkraft und ist neben Feinheit ein weiteres wichtiges Qualitätsmerkmal für die technische Verwendung von Hanffasern. Das gilt besonders für Produkte, bei denen die Fasern krafttragende Funktion haben. Der **Dehnungsmodul** wurde nur für die Prüflänge 50 mm erfasst, um statistische Messfehler zu minimieren, die auf eine Bewegung der Faser innerhalb der Klemmen zurückzuführen sind (KOHLER et al., 1996). Der Dehnungsmodul gibt Auskunft über die elastische und plastische Dehnbarkeit der Fasern. Nach BECKMANN (1998) muss für technische Textilien und Dämmstoffe eine ausreichende Steifigkeit, wie sie für Bastfasern typisch ist, vorhanden sein.

Die vorliegenden Untersuchungen zeigen, dass nur der Parameter Zugfestigkeit eine schlüssige Tendenz aufwies. Bei beiden Prüflängen (L_0 = 2 mm und 50 mm) wurde in den meisten Einzelversuchen ein signifikanter Anstieg zwischen den Werten der ersten und letzten Probennahme festgestellt (Abb. 3.11-3.12, Tab. 3.3). Die Ursachen des in einem Fall beobachteten Rückgangs der Zugfestigkeit (L_0 = 50 mm) zu einem späten Erntetermin (Abb. 3.12 3 A) sind unbekannt. Der Endwert liegt jedoch nicht unter jenem zu Beginn des Beobachtungszeitraums. Für alle anderen geprüften Parameter wie Feinheit (Abb. 3.10), Dehnungsmodul (Abb. 3.13) und Höchstzugkraftdehnung (Abb. 3.14) konnte kein konsistenter Zusammenhang zum Entwicklungsstadium der Hanfpflanze festgestellt werden. Auch in einer Praxisstudie von SCHULZ & RÖHRICHT (2001) an zwei Standorten über zwei Jahre wurden nach dem Zeitpunkt maximalen Rindenertrags noch ansteigende Zugfestigkeitswerte nachgewiesen.

Aus der Prüfung der physikalischen Fasereigenschaften und deren Abhängigkeit von der Entwicklung der Hanfpflanzen ergibt sich die Schlussfolgerung, dass die Zugfestigkeit als Qualitätskriterium vom Erntetermin abhängig ist. Die Werte der Zugfestigkeit steigen in der Regel bis zum letzten Probenentnahmetermin an. Wenn bei der Faserverwertung höchste Zugfestigkeiten nachgefragt werden, sollte die Ernte des Bestandes möglichst spät erfolgen. Generell besteht die Gefahr, dass der späte Schnitt mit einer Standröste verbunden sein kann, wobei Veränderungen eintreten, wie sie unten (Kap. 4.3) diskutiert werden.

Für die Festlegung des optimalen Erntetermins ist es notwendig, erntenahe Entwicklungsstadien des Hanfbestandes anhand von leicht erkennbaren äußeren Merkmalen der Hanfpflanze zu beschreiben. MEDIAVILLA et al. (1998) erarbeiteten eine kodierte Bonitурskala zur Kennzeichnung von Entwicklungsstadien. Vegetative Stadien werden durch die Anzahl der Blätter (gegenständige Blattpaare), generative durch Blütenmerkmale gekennzeichnet. Erntenahe Stadien liegen nach MEDIAVILLA et al. (1998) in der zweiten Entwicklungsphase. Detaillierte Untersuchung von MEDIAVILLA et al. (2001) an der Sorte Kompolti haben folgende zeitliche Abfolge von Prozessen im Reifestadium gezeigt: Nach 216 DOY (Tage des Jahres) sind sämtliche primären Phloemfasern angelegt. Das Stadium entspricht dem Code 2000 (MEDIAVILLA et al., 1998). Zu Beginn der Blüte nach 225 DOY (Code 2200) kommt es zum Abschluss der Zellwandverdickung (Faserfüllung). Der Stängel- und Rindenertrag erreichen ein Maximum nach 246 DOY. Dies entspricht bei männlichen Pflanzen dem Stadium 2103, d.h. 95% der Blüten sind geöffnet oder verwelkt. Weibliche Pflanzen befinden sich im Stadium 2202, d.h. Brakteen sind zu 50% ausgebildet. Mit der Bonitурskala von MEDIAVILLA et al. (1998) lassen sich die erntenahen Stadien nur anhand der Entwicklung des Blütenstandes ermitteln. Auch BÓCSA et al. (2000) schlagen die Entwicklung des Blütenstandes als Erkennungsmerkmal des Erntetermins bei Hanf vor. Der Erntezeitpunkt bei Faserhanf zur Faserreife ist dann erreicht, wenn mehr als die Hälfte der männlichen Blüten zu welken und die Früchte zu reifen beginnen (HÖPPNER & MENGE-HARTMANN, 1994).

Die Beobachtungen der Bestandesdynamik zeigen, dass die Entwicklung des Blütestandes umweltabhängig und sortenspezifisch ist. Die Samenreife von USO 31 betrug im Jahr 2000 zum Ende des Stängelvolumenzuwachses 22%, 2001 70% und 2002 lediglich 8% und bei Fasamo entsprechend 37%, 9% und 50%. Bei Kompolti wurde die Samenreife zum Zeitpunkt des Wachstumsendes nicht erreicht. Außerdem lassen sich nur spätere Entwicklungsstadien des Bestandes mit diesem Merkmal leicht beschreiben (Abb. 3.2-3.7, 4).
Die Hanfpflanzen verlieren kontinuierlich Blätter im Laufe ihrer Entwicklung. Dies wird aus Entwicklungsbonituren ersichtlich (Abb. 3.2-3.7, 2), wobei dieses Merkmal insbesondere in den frühen Stadien sichere Abstufungen liefert. In späteren Entwicklungsstadien wurden die zunehmenden Änderungen anhand der Stängelverfärbung festgestellt (Abb. 3.2-3.7, 3).

Aus den vorliegenden Ergebnissen ergeben sich zur Festlegung eines geeigneten Erntetermins folgende Überlegungen: Die anhand der Volumenzunahme feststellbare Entwicklung des Hanfstängels und des extrahierbaren Faseranteils ist spätestens nach einer Entblätterung der

Pflanzen im Bestand von mehr als 80% abgeschlossen. Durch den Blattverlust wird offensichtlich die Grenze einer zur Biomassebildung notwendigen Photosyntheseleistung unterschritten. Zuwachs für das Ernteprodukt Faser ist nur noch durch Allokation von Assimilaten denkbar; sofern sie tatsächlich stattfindet, wird sie aber anhand des isolierbaren Faseranteils nicht erkennbar. Es schließen sich, durch Verfärbung der Stängel angezeigt, Seneszenzprozesse an. Im Hinblick auf die Biomassebildung als Grundlage für das Ernteprodukt Faser scheint die Entwicklung abgeschlossen und kann anhand der genannten äußeren Merkmale, die nach den vorliegenden Analysen sortenunabhängig sind, leicht identifiziert werden. Das in der Anbaupraxis bisher häufig herangezogene Merkmal Anteil reifer Samen (50%) ist offensichtlich sorten- und jahresbedingt variabel, und daher wenig geeignet als Indikator für den möglichen Beginn einer Faserernte. Fasereigenschaften verändern sich nur im Fall der Zugfestigkeit weitgehend stetig; tendenziell ist von ansteigenden Werten mit zunehmendem Alter der Bestände auszugehen.

Im Kontrast zur gegenwärtigen Praxis kann der Beginn einer Hanfernte zur ausschließlichen Faserverwertung erfolgen, wenn keine erkennbare Volumenzunahme des Stängels mehr erfolgt. Die Entblätterung an der Einzelpflanze im Bestand hat mindestens 70-80% erreicht und Verfärbungen des Stängels können zunehmend einsetzen. Der anfängliche Grün- bzw. Gelbgrün-Anteil des Stängels von 80-90% nimmt in der Folge ab. In der Praxis erfordert der Maschineneinsatz einen längeren Erntezeitraum. Dies ist unter dem Gesichtspunkt der Fasereigenschaften unproblematisch. Mit Ausnahme der Zugfestigkeit verändern sich Fasereigenschaften nicht konsistent in Abhängigkeit vom Entwicklungszustand in zeitlicher Nähe des empfohlenen Erntetermins. Das Ende einer Hanfernte ist sortenabhängig und wird durch den Erntemaschineneinsatz in der Praxis begrenzt.

4.2 Einfluss des Strohmanagements auf die Fasereigenschaften

Das Strohmanagement auf dem Feld beginnt mit dem Maschineneinsatz zum Schneiden des Hanfbestandes. Sofern für einen reibungslosen Faseraufschluss notwendig (z.B. in der Verarbeitung in Brecherlinie) werden die Hanfstängel eingekürzt (HempFlax-Verfahren). Danach folgt mehrfaches Schwadwenden zur Röste bzw. Trocknung und anschließend das Pressen des Strohs in Ballen. Durch den Maschineneinsatz werden die Hanfstängel mechanisch belastet. Davon können auch die im Stängel lokalisierten Fasern betroffen sein. Systematische Studien zum Einfluss des Strohmanagements auf die physikalischen

Fasereigenschaften von Hanf und anderen Bastfaserpflanzen liegen nicht vor. Im dargestellten Versuch wurden die Stängel im HempFlax-Verfahren geschnitten und eingekürzt. Das Schwadwenden und Pressen des Strohs in Ballen erfolgte an den in Tabelle 2.8 aufgeführten Terminen. Um die mögliche Änderung physikalischer Fasereigenschaften identifizieren zu können, wurden für die Kontrolle Fasern von Hand geschnittenen Pflanzen nach Trocknung des Strohs untersucht und mit denen der verschiedenen Feldvarianten ohne Röste (S1R1, S2R1) und mit Röste (S3E2, S4E2) verglichen. Der Faseraufschluss der Kontrolle und Feldvarianten erfolgte mit Hilfe einer Labormaschine (s. Kap. 2.2). Damit war die Wirkung unterschiedlicher Faseraufschlusstechnologien auf die physikalischen Fasereigenschaften ausgeschlossen.

Die durchgeführten Analysen zeigen, dass alle Feldvarianten des Strohmanagements eine erhöhte Höchstzugkraftdehnung im Vergleich zu Kontrolle aufweisen (Abb. 3.18). Diese Feststellung gilt für die Varianten mit und ohne Röste. Weiterhin wurde festgestellt, dass die Fasern aus Feldvarianten nach dem Strohmanagement mit Röste feiner waren und niedrigere Werte in der Ausgangsquerschnittsfläche zeigten (Abb. 3.15). Auch die feinheitsbezogene Höchstzugkraft (L_0 = 50 mm; Abb. 3.17 2) in den Proben mit Röste war niedriger. Hier ist allerdings wahrscheinlich, dass nicht nur der Maschineneinsatz, sondern auch die Röste einen Beitrag zur Änderung der Feinheit und feinheitsbezogenen Höchstzugkraft geleistet hat. Vereinzelt wurden auch weitere signifikante Veränderungen gegenüber den Kontrollvarianten gemessen. Diese Effekte waren jedoch nicht in den jeweiligen Parallelproben gleicher Behandlung feststellbar.

In Folge des Strohmanagements auf dem Feld kommt es zu Veränderungen von Fasereigenschaften. Die in allen geprüften Varianten erhöhte Höchstzugkraftdehnung ist offensichtlich unabhängig vom Röstgrad und demzufolge allein auf die Wirkung der Maschinentechnik zurückzuführen. Im Gegensatz dazu, kommt es in allen Fällen, bei denen eine Röste stattfand, zu verringerten Feinheiten und Ausgangsquerschnittsflächen der Fasern. Hier ist offensichtlich, dass die Änderungen nicht allein durch den Maschineneinsatz auf dem Feld entstanden sind, sondern auch die Röste mitgewirkt hat (s. Kap. 4.3). Die Röste führt zum Abbau von Pektinlamellen, was sich offensichtlich auch als verringerte feinheitsbezogene Höchstzugkraft bei langer Einspannlänge (L_0 = 50 mm) zeigt. Dieser Unterschied ist zwischen den Proben mit Röste und ohne Röste nachweisbar.

4.3 Wirkung von Röste auf Fasereigenschaften

Unter Röste versteht man mikrobiologische Prozesse, bei denen Lignin und Pektin abgebaut werden. Damit lassen sich Holzanteile des Stängels besser von den Fasern trennen. Außerdem lassen sich die Bastfaserbündel besser zerfasern. Die biologischen Aufschlussprozesse lassen sich generell in aerobe und anaerobe Rösten einteilen (RUSCHMANN, 1923). Daraus ergibt sich, dass bei der Wasserröste Bakterien und bei der Tauröste überwiegend Pilze als Separationsorganismen wirksam sind.

Die **Wasserröste** verlangt ein vollständiges Bedecken des Pflanzenmaterials mit Wasser. Unter solchen Bedingungen entwickeln sich anaerobe Bakterien, die RUSCHMANN (1923) als spezifische Röstebakterien bezeichnet. Als wichtigste Organismen wären hier der *Bacillus amylobacter*, das *Plectridium friebes* sowie das *Clostridium behrens* zu nennen. Allgemeine Inkubationsbedingungen, wie Temperatur und Sauerstoff, bestimmen den biologischen Etablierungsprozess der Bakterien. Die Röstebakterien nutzen als primäre Kohlenstoffquelle das Pektin der Mittellamelle und der Primärwand. Die Wasserröste ist homogener als die Tauröste. MORRISON et al. (2000) zeigten, dass wassergerösteter Flachs feinere Faseranteile besitzt und höhere Zugkräfte aufweist. Die Röstdauer lässt sich hierbei auf wenige Tage (4-6 d) verkürzen. Durch die Wasserröste kommt es zu einer Verfärbung der Fasern (RUSCHMANN, 1923). Die Entsorgung des Röstwassers und hohe Aufwandskosten stehen einer Nutzung dieses Verfahrens entgegen (DIEPENBROCK et al., 1999).

Aus ökonomischen und ökologischen Gründen wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit die in der modernen Praxis übliche **Tauröste** ausgewählt. Nach der Ernte verbleibt das Hanfstroh auf dem Feld. Es wird durch nächtlich und morgendlich gebildetes Kondenswasser sowie durch Niederschläge befeuchtet. Nach RUSCHMANN (1923) führt dies zu einer Quellung des Stängelgewebes. Durch die Trocknung und den Abbau von Chlorophyll, sowie den Befall des Stängels durch Mikroorganismen, ändert sich die Verfärbung der Stängeloberfläche. Bei der Tauröste etablieren sich Pilze auf dem Stängel. Zu den speziellen Röstpilzen gehören *Rhizomucor, Fusarium* und *Alternaria*-Arten (HENDRIKSSON et al., 1999). Aus der Literatur sind nur wenige Untersuchungen bekannt, die die Änderung von physikalischen Fasereigenschaften im Verlauf der Tauröste beschreiben. Die Untersuchungen von HOBSON et al. (2001) zeigen, dass die mechanische Stabilität von Fasern bei starker Röste beeinträchtigt werden kann. Anhand einer kleinräumigen Parallelablage von Hanfstroh in einschichtigem Schwad konnte von SCHURIG-KOCUREK et al. (2003) nachgewiesen werden,

dass die Röste die Fasereigenschaften von Hanf verändert und der Röstgrad anhand äußerer Merkmale sicher identifiziert werden kann. Bei stark gerösteten Strohvarianten beobachten SCHURIG-KOCUREK et al. (2003) eine Verringerung der Feinheit. Unter Praxisbedingungen auf dem Feld kommt es zu einer Wirrlage des Strohs im Schwad. Je nach Position und mikroklimatischen Bedingungen erfolgt eine ungleiche Besiedelung mit Röstpilzen, die durch mehrfaches Wenden des Schwads ausgeglichen werden soll. Die Röstorganismen wirken auch im gepressten Strohballen nach, was erwartungsgemäß über einen Zeitraum von mehreren Wochen zu einer Homogenisierung im Röstgrad führen kann. Untersuchungen zu physikalischen Fasereigenschaften von Hanf in Abhängigkeit des Rösteverlaufs unter den Praxisbedingungen sind aus Literatur darüber hinaus nicht bekannt.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden durch das Strohmanagement auf dem Feld Abstufungen im Röstgrad eingestellt, die folgender Einteilung entsprechen: R1 - keine sichtbare oder sehr schwache Besiedelung mit Röstpilzen, R2 - mittlere Röste, die nach bisherigem Kenntnisstand eine optimale Zugfestigkeit verursachen sollte (SCHURIG-KOCUREK et al., 2003), R3 - starke Röste, schwarzes Stroh mit sich selbst ablösender Rinde (Überröstung).

Das Stroh des Feldversuches wurde durch Probennahme aus dem Ballen unmittelbar vor dem Aufschluss bonitiert. Für die Bestimmung des Röstgrades wurde auf eine visuelle, leicht handhabbare und gut reproduzierbare Röstgradbonitur zurückgegriffen (Tab. 2.10) (SCHURIG-KOCUREK et al., 2003). Dabei war es notwendig, die einer Stufe der Bonitурskala entsprechenden Massenanteile des Strohs zu ermitteln und mehrfache Bestimmungen durchzuführen, wodurch sich gemittelte Werte des Röstgrades ergeben (Tab. 3.4 und 3.6).

Die Darstellung des Röstgrades für die Strohvarianten des Feldversuches in Leipzig-Seehausen (Tab. 3.4) und des Praxisversuches in Zichtau (Altmark) (Tab. 3.6) zeigt, dass die geplante Variation der Abstufungen im Röstgrad erfolgreich war. Es ist gelungen, unter den Bedingungen des Praxisanbaus die Abstufung zwischen Röststufen R1-R2-R3 in der Größe von etwa zwei Boniturnoten konstant zu halten.

In der Literatur werden außer Feinheit und Ausgangsquerschnittsfläche meist nur die wichtigsten mechanischen Fasereigenschaften (Zugfestigkeit, Dehnungsmodul, Höchstzugkraftdehnung) präsentiert (HOBSON et al., 2001; SCHURIG-KOCUREK et al., 2003). In

der vorliegenden Studie wird auch der Faserlänge und -reinheit (Schäbengehalt) Beachtung geschenkt. Die Faserlänge ist ein wichtiges und wertbestimmendes Merkmal für die Fasernutzung. Die Messungen an Einzelfasern waren sehr aufwendig, stellen aber die sicherste Fasercharakterisierung dar. Die Verteilung der Faserlänge ist entscheidend für den Verlauf der textilen Verarbeitung und die Maschineneinstellungen (GRIGNET, 1979).

Bei höherem Röstgrad wurde eine signifikant höhere Einkürzung von Fasern festgestellt (Abb. 3.19). Eine Ausnahme hierfür bildete die Sorte S2 im Praxisversuch (Abb. 3.38, 2). Es wurde festgestellt, dass die Röste die Zahl an Abspleißungen und den Gehalt an Schäben vermindert (Tab. 3.5 und 3.7). Beispielweise ist dies ein wichtiges Kriterium für die Ringspinnerei, wohingegen bei der Produktion von Formpressteilen diesem Merkmal keine Bedeutung beigemessen wird (KESSLER et al., 1996). **Ausgangsquerschnittfläche** und **Feinheit** sinken im Rösteverlauf (Abb. 3.39-3.40 und 3.20-3.25). Insofern wäre ein hoher Röstgrad erwünscht. Dabei wurde aber ein Verlust an **Zugfestigkeit** (Abb. 3.26-3.28) und **Steifigkeit** (Abb. 3.32-3.34) beobachtet. Diese Veränderungen der Zugfestigkeit und Steifigkeit sind indirekte Hinweise auf strukturelle Veränderungen, die einen beginnenden Abbau von Zellwandkomponenten signalisieren, insbesondere solcher, die für die mechanische Stabilität verantwortlich sind. Der Zusammensetzung des Faserbündels entsprechend ist anzunehmen, dass Pektinabbau in Mittellamellen vorrangig durch abnehmende Zugfestigkeit bei L_0 = 50 mm, Pektin- und Zelluloseabbau durch sinkende Zugfestigkeit bei L_0 = 2 mm angezeigt wird. Darüber hinaus sind Fasern aus stark geröstetem Stroh dunkel verfärbt. Die Witterung in der Nacherntephase stellt ein erhebliches Risiko dar. Die vor der Bergung des Strohs notwendige Trocknung (Feuchtegehalt < 18 %) ist bei langen Feldliegezeiten oft nicht mehr durchführbar.

Die durch Röste bedingte Verfeinerung von Hanffasern ist offensichtlich ein wirksamer Effekt, der auch unter den Bedingungen des Praxisanbaus trotz zu erwartender höherer Variabilität gegenüber Feldversuchs- oder Einzelpflanzen-Untersuchungen deutlich nachweisbar ist. Die Veränderungen mechanischer Fasereigenschaften, z.B. abnehmende Zugfestigkeit (Abb. 3.41-3.42) und Steifigkeit (Abb. 3.45) lassen sich jedoch nicht nachweisen. Hierbei ist zu vermuten, dass die Gesamtvariabilität des Fasermaterials die durch Röste ausgelösten Veränderungen überlagert.

Vorhandene Erkenntnisse über die Wirkung von Röste auf physikalische Fasereigenschaften vervollständigten die Versuche von SCHURIG-KOCUREK et al. (2003) und ermöglichen den Einsatz der Rösteskala auch unter Bedingungen des Praxisanbaus von Hanf.

Widersprüchlich ist der Befund, dass durch Röste die Zahl der Abspleißungen in einem Fall (Faservariante HA, Röststufe R3 s. Tab. 3.5) zugenommen hat. Zwischen den Partien der höchsten Röststufe im Feldversuchsanbau Seehausen und dem Praxisanbau in Zichtau besteht insofern ein Unterschied, als dass im ersten Fall das Stroh wegen erheblicher Feuchte und nachträglicher Trocknung von Hand geborgen wurden und das Ballenpressen entfiel. Der Frage, inwiefern dieser produktionstechnische Unterschied Auswirkungen auf die Eigenschaften der gewonnenen Fasern hatte, wurde nicht nachgegangen.

4.4 Wirkung der Aufschlusstechnologien auf die Fasereigenschaften

Zur Untersuchung der Wirkung unterschiedlicher Aufschlussverfahren auf physikalische Fasereigenschaften wurden Faserpartien nach Prallaufschluss (*PA*) und nach Durchgang durch die Brecherlinie mit und ohne Verfeinerung (*BL* und *BL+C*) miteinander verglichen. Die Aufschlusstechnologien *PA* und *BL* unterscheiden sich im Arbeitsprinzip, wie im Folgenden erläutert wird:

Zur Vorbereitung des Strohs zur Faserisolierung im **Prallaufschlussverfahren** erfolgte das Abscheiden von Blättern, Fruchtständen, Samen sowie von Sand, Steinen und anderen Fremdkörpern. Danach folgte eine Stroheinkürzung an einer Schneidevorrichtung nach dem Guillotine-Prinzip mit einer eingestellten Schnittlänge von 180 mm. Die Strohmasse wurde dosiert und in einem gleichmäßigen Massestrom zum Faseraufschluss durch Prallaufschluss transportiert. Mit Hilfe der rotierenden Werkzeuge wurden die Fasern von Schäben mechanisch getrennt. Nach einer Reinigungstufe erfolgte die Trennung von Restschäben und Kurzfasern. Die wesentlichen Einstellungsparameter sind in Tabelle 2.5 dargestellt.

Vor der **Brecherlinie** wurde das Stroh gereinigt aber nicht eingekürzt. Das Reinigungs-, Faseraufbereitungs-, und Verfeinerungssystem basiert auf folgenden mechanischen Arbeitsprinzipien: Das Stroh durchläuft eine Brecherlinie (*BL*) mit 4 x 13 sich gegenläufig drehenden Zahnwalzenpaaren aus Hartstahl. Die Abscheidung von Schäben erfolgt mittels bewegter Siebe. Ein Kardieraggregat sorgt am Ende der Brecherlinie für eine weitere

Reinigung der Faserfraktion. Eine Schneidevorrichtung mit rotierenden Messern, deren Umlauf auf eine Schnittlänge von 100 mm eingestellt war, dient der Fasereinkürzung.

Ein Refiner und zwei Cottonisierungsstufen (*C*) sorgen für einen weiteren mechanischen Aufschluss der Fasern. Dabei werden die Fasern mit Hilfe einer Feinöffnerwalze mit Nadelleisten weiter bearbeitet.

Durch die Bearbeitungsintensität wächst die Häufigkeit von Störstellen bei Fasern. Im Prallaufschluss (*PA*) verursachen es die rotierenden Arbeitswerkzeuge und in der Brecherlinie (*BL*) die Zahnwalzenpaare. Erwartungsgemäß beeinflusst auch die zusätzliche Cottonisierungstuffe (*C*) die physikalischen Fasereigenschaften, da die Verfeinerung der Fasern rein mechanisch abläuft. Die Literatur liefert bis jetzt keine vergleichbaren Untersuchungen über die Wirkung von Aufschlusstechnologien auf physikalische Fasereigenschaften.

Die **Faserlängen** wurden sowohl im Prallaufschlussverfahren als auch an der Brecherlinie durch Schneidwerkzeuge technisch vorgegeben. Ein detaillierter Vergleich zeigt jedoch, dass generell bei hohem Röstgrad die Faserlängen unabhängig von der Schnittlängeneinstellung zurückgehen (s. Abb. 3.19 und Tab. 3.5). Die zusätzliche Cottonisierung (*BL*+*C*) bringt eine Verringerung von Faserlängen. Positiv in dem Fall ist der Rückgang der Variabilität von Faserlängen (Abb. 3.39), d.h. die Faserproben sind homogener. Die Brecherlinie (*BL*) liefert weniger **verzweigte Fasern** als die Prallaufschlussanlage (*PA*) (Tab. 3.5). Auffällig ist, dass die Faserpartien nach Bearbeitung in der Brecherlinie im Gegensatz zum Prallaufschluss stets einen höheren Besatz mit Schäben aufwiesen. Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass **Schäbengehalte** von 8 Masse-% für die Brecherlinie untypisch sind.

Vergleichsweise grobe Fasern mit einer hohen Variabilität liefert die Brecherlinie (*BL*). In Analogie zur **Feinheit** (Abb. 3.20) spiegelt die Messgröße **Ausgangsquerschnittsfläche** (Abb. 3.23) gleiche Abstufungen zwischen den Faserpartien wieder. Durch Cottonisierung (*BL*+*C*) gegenüber der ausschließlichen Bearbeitung in der Brecherlinie (*BL*) wurde eine zusätzliche Verfeinerung erreicht (Abb. 3.39). Das bedeutet, dass zur Produktion von feineren Fasern durch eine Brecherlinie eine zusätzliche Cottonisierungsstuffe folgen sollte. Nach Prallaufschluss (*PA*) wurden gegenüber der Bearbeitung Brecherlinie (*BL*) Fasern mit höherer **Zugfestigkeit** (L_0 = 2 mm) festgestellt (Abb. 3.26). Die rotierenden Arbeitswerkzeuge des

Prallaufschlusses haben keine negative Wirkung auf die Zugfestigkeit. Der zusätzliche Aufschluss durch Cottonisierung (*BL+C*) wirkt sich vereinzelt positiv auf die Zugfestigkeit der Fasern aus (Abb. 3.41, 3.42). Eine mögliche Erklärung dafür ist die weitere Verfeinerung und die Änderung der Ausgangsquerschnittsfläche, die bei der Berechnung der Zugfestigkeit mitwirkt. Der **Dehnungsmodul** der Fasern aus der Brecherlinie ist niedriger gegenüber den Vergleichsvarianten des Prallaufschlusses (Abb. 3.32) Folglich sind die Fasern aus Brecherlinie elastischer, was der Dehnungsmodul als Widerstand gegen die Längenänderung andeutet.

Aus dem Vergleich der untersuchten Aufschlusstechnologien ergeben sich folgende Überlegungen: Im Gegensatz zu gebrochenem Material in der Brecherlinie (*BL*) ist in Faserpartien nach Prallaufschluss (*PA*) nur eine höhere Anzahl an Abspleißungen als möglicherweise qualitätsmindernde Eigenschaft festzustellen. Dies muss allerdings im Zusammenhang mit der nachfolgenden Faserverwertung beurteilt werden; z.B. könnte das Vlieslegen durch verzweigte Fasern begünstigt werden.

Die vergleichende Verarbeitung in der Brecherlinie führte zu einer Reihe von ungünstigen Fasermerkmalen: hoher Schäbengehalt, grobe Fasern mit hoher Variabilität, geringere Zugfestigkeiten (L_0 = 2 mm) und teilweiser Verlust an Steifigkeit. Eine hieraus abzuleitende schlechtere Bewertung der Brecherlinie (*BL*) gegenüber dem Prallaufschluss (*PA*) sollte aber nicht ohne weiteres vorgenommen werden. Es ist anzumerken, dass die oben genannten Verarbeitungsschritte nicht ohne Einfluss auf die Faserqualität geblieben sind. Dies geht auch aus dem Vergleich mit den nachfolgenden Verarbeitungsvarianten hervor, bei denen die Brecherlinie (*BL*) nicht grundsätzlich Fasern minderwertigerer Qualität hervorbringt.

Es muss auch darauf hingewiesen werden, dass die Strohvarianten für die Brecherlinie (*BL*) in Quaderballen und für den Prallaufschluss (*PA*) in Rundballen gepresst waren. Die Quaderballen wurden vor der *BL* vollautomatisch aufgelöst. Bei dem *PA* erfolgte aus technischen Gründen eine untypische Auflösung von Rundballen. Die Ballen wurden per Hand aufgelöst und dosiert. Möglicherweise konnte dies auch die Fasereigenschaften beeinflussen. Die Frage wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht weiter untersucht.

4.5 Schlussfolgerungen

Aus den vorstehenden Untersuchungen lassen sich zusammenfassend folgende Schlussfolgerungen ziehen:

1. Die Faserreife ist erreicht, wenn das Wachstum der Hanfstängel zum Erliegen kommt. In nachfolgenden Stadien kann es noch zu einem Anstieg der Zugfestigkeit kommen.

2. Die erhöhte Höchstzugkraftdehnung zeigt durch den Maschineneinsatz infolge des Strohmanagements auf dem Feld (Mähen, Häckseln, Schwadwenden, Ballenpressen) veränderte Fasereigenschaften an.

3. Mit fortschreitender Röste von Hanfstroh kommt es zu sinkenden Feinheiten der Fasern. Höchste Zugfestigkeit wird in der Regel bei geringem und mittlerem Röstgrad erreicht. Abstufungen der Zugfestigkeit können unter Praxisbedingungen aufgrund erhöhter Variabilität verloren gehen.

4. Bei der Bewertung der untersuchten Faseraufschlusstechnologien ergibt sich folgende Reihenfolge: Brecherlinie mit anschließender Cottonisierung (*BL+C*), Prallaufschluss (*PA*), und Brecherlinie (*BL*). Diese Reihenfolge entstand anhand der Analyse der Feinheit, Zugfestigkeit (L_0 = 2 mm) und des Schäbengehalts.

5 Zusammenfassung

Bastfasern aus Hanf (*Cannabis sativa* L.) besitzen eine Reihe vorteilhafter Eigenschaften (geringe Dichte, hohe Zugfestigkeit und Steifigkeit), die eine zunehmende Nutzung als Verstärkungskomponente in Kunststoffen erlauben. Allerdings wurde die Variabilität von Fasereigenschaften in Rohstoffpartien und deren Ursachen noch nicht hinreichend untersucht. Ziel der vorliegenden Arbeit war es deshalb, den Einfluss wesentlicher Produktionsschritte (Erntetermin, Strohmanagement, Röste, Faseraufschluss) auf die physikalischen Fasereigenschaften zu untersuchen.

Das Probenmaterial für die Untersuchungen stammte aus Feldversuchen am Standort Leipzig-Seehausen (51° 24´ nördlicher Breite und 12° 25´ östlicher Länge) der Anbaujahre 2000-2002 (cv. USO 31, cv. Kompolti, cv. Fasamo) und Zichtau (52° 36´ nördlicher Breite und 11° 18´ östlicher Länge) im Anbaujahr 2003 (cv. USO 31, cv. Fedora 17, cv. Futura 75, cv. Epsilon 68). Das Wachstum des Hanfbestandes wurde anhand der Änderung des Stängelvolumens bei konstantem Feuchtegehalt dargestellt. Mit Hilfe einer Bonitурskala wurden unterschiedliche Röststadien des Strohs identifiziert. Der Faseraufschluss erfolgte in einem Prallaufschluss bzw. in einer Brecherlinie mit und ohne anschließendes Öffnen der Faserbündel (Cottonisierung). Die Prüfung der physikalischen Fasereigenschaften wurde mittels Zugversuchs vorgenommen.

Die Faserreife ist mit Einstellen des Stängelwachstums erreicht. In diesem Stadium sind die Pflanzen im Bestand zu mindestens 80-90 % entblättert. Nachfolgend setzen Verfärbungen des Stängels ein, die von anfänglichen Grün- bzw. Gelbgrün-Anteilen zu gelb und braun übergehen. Mit Ausnahme weiter ansteigender Zugfestigkeiten verändern sich die Fasereigenschaften in Abhängigkeit vom Entwicklungszustand in Nähe des als Erntetermin empfohlenen Zeitpunktes nicht konsistent.

Beim Strohmanagement auf dem Feld wurde für alle geprüften Varianten mit Maschineneinsatz (Mähen, Häckseln, Schwadwenden, Ballenpressen) erhöhte Höchstzugkraftdehnungen der Fasern gemessen. Diese lassen auf Veränderungen in der Faserstruktur schließen.

Mit ansteigendem Röstgrad wird eine signifikante Fasereinkürzung festgestellt. Durch fortschreitende Röste des Hanfstrohs kommt es zu sinkenden Feinheiten der Fasern. Höchste Zugfestigkeit wird in der Regel bei geringem und mittlerem Röstgrad erreicht. Abstufungen der Zugfestigkeit können unter Praxisbedingungen aufgrund erhöhter Variabilität verloren gehen.

Bei der Bewertung der untersuchten Faseraufschlusstechnologien ergibt sich folgende Rangfolge: 1. Brecherlinie mit Cottonisierung, 2. Prallaufschluss, 3. Brecherlinie. Hohe Qualität entspricht minimal verzweigten, schäbenreinen Faseranteilen, hohen Zugfestigkeiten und Steifigkeiten sowie niedrigen Feinheiten und Höchstzugkraftdehnungen.

Die Untersuchungen zeigen, dass in der landwirtschaftlichen Produktionskette einschließlich der Erstverarbeitung gezielt auf die Faserqualität Einfluss genommen werden kann.

Summary

Bast fibres of hemp (*Cannabis sativa* L.) show some advantageous properties (low density, high tensile strength and stiffness) which make them suitable for fibre reinforced composites. Nevertheless, the origin of variability in fibre characteristics is uncertain. Therefore, the present study evaluates the effect of the agricultural technology (harvest date, post harvest straw management on the field, retting, fibre extraction) on the physical characteristics of hemp fibres.

Plant material was obtained from two field trials, both located in central Germany, one at Leipzig-Seehausen (51° 24 min north, 12° 25 min east; cv. USO 31, cv. Kompolti, cv. Fasamo) in 2000-2002 and another at Zichtau (52° 36´ min north, 11° 18´ min east; cv. USO 31, cv. Fedora 17, cv. Futura 75, cv. Epsilon 68) in 2003. The growth of hemp was quantified on basis of stem volume at constant moisture content. The degree of retting was identified with the help of a rating scheme. Different methods (hammer milling, breaking and cottonizing) were applied for decortication and fibre refining. Fibre characteristics were derived from tensile test.

Ripening of fibres is completed with stem growth. In this stage, recommended for the harvest, hemp canopies are defoliated by 80-90%. In the subsequent period stem colour may change from green or yellowish-green to yellow and brown. Further, the tensile strength may increase whereas other fibre characteristics were changing inconsistently. The field machinery for harvesting, chopping, swathing, baling effects fibre structure as indicated by increased elongation at maximum load. Length of the fibre specimen decreases with an increase in the degree of retting. Furthermore, strong retting yields fibres of low fineness, whereas optimum tensile strength corresponds to low or medium degree of retting. However, under conditions of practice difference in tensile strength may disappear due to an increased variability of fibre characteristics.

The evaluation of decortication technologies shows the following ranking: 1. breaking roller in combination with cottonizing devices, 2. hammer mill, 3. breaking rollers; whereas high quality of fibre batches corresponds to a low branching, shive content, high tensile strength and stiffness, low fineness and elongation at maximum load. The investigations demonstrate that steps of hemp cultivation and fibre extraction are sensitive in affecting the quality of the fibre commodity.

6 Literaturverzeichnis

ALTERMANN, M. (1992) Kennzeichnung der natürlichen Standortbedingungen der Versuchstation Seehausen: Kongreß- u. Tag.-Ber. Univ. Halle-Wittenberg, Halle/S. **6**, S. 42-60.

ANONYM (1996) Hanf - ein alter und neuer nachwachsender Rohstoff in Deutschland. Loch, Lothar; NPZ Hans Georg Lembke KG, Hohenlieth; Holtsee (Hrsg.).

BECKMANN, A. (1998) Methoden zur Messung physikalischer Eigenschaften von Industriefaser - Lein (Flachs) und damit verstärkten Kunststoffen. Dissertation. RWTH Achen.

BERGER, J. (1969) The World´s Major Fiber Crops - their Cultivation and Manuring. Centre d'etude de l'azote 6 Zürich.

BLEDZKI, A.-K., GASSAN, J. (1999) Composites reinforced with cellulose based fibres. Progress in Polymer Science **24**, 221-274.

BÓCSA, I., KARUS, M. (1997) Der Hanfanbau - Botanik, Sorten, Anbau und Ernte. C.F. Müller Verlag; Hüthig GmbH, Heidelberg.

BÓCSA, I., KARUS, M., LOHMEYER, D. (2000) Der Hanfanbau - Botanik, Sorten, Anbau und Ernte, Märkte und Produktlinien. Landwirtschaftsverlag Münster-Hiltrup.

BRUCE, D.M., HOBSON, R.N., WHITE, R.P., HOBSON, J. (2001) Stripping of leaves and flower heads to improve the harvesting of fibre hemp. Journal of Agricultural Engineering Research **78**, 43-50.

BRUCE, D.M., HOBSON, R.N., HAMER, P.J.C., WHITE, R.P. (2005) Drying of hemp for long fibre production. Biosystems Engineering **91**, 45-59.

CATLING, D. M. (1982) Identification of vegetable fibres. Chapman and Hall Ltd. London, 18-23.

CLARKE, R., PATE, D.W. (1994) Medical Marihuana. Journal of the International Hemp Association **1**, 9.

CROMACK, H.T.H. (1998) The effect of cultivar and seed density on the production and fibre content of *Cannabis sativa* in southern England. Industrial Crops and Products **7**, 205-210.

CHEN, Y., GRATTON, J.L., LUI, J. (2004) Power requirements of hemp cutting and conditioning. Biosystems Engineering **87**, 417-424.

DIN 53816 (1976) Einfacher Zugversuch an einzelnen Fasern. Bueth Verlag GmbH, Berlin und Köln.

DIEPENBROCK, W., FISCHBECK, G., HEYLAND, K.-U., KNAUER, N. (1999) Hanf (*Cannabis sativa* L.). In: Spezieller Pflanzenbau. 3. Aufl., Ulmer Verlag, Stuttgart, 297-302.

DRIELIG, A., HARIG, H. (2000) Methoden zur reproduzierbaren Feinheitsbestimmung an Bastfasern. Tagungsband Narossa, 1-12.

DRUBIG, R. (1995) Kurze Geschichte und Verbreitung der Hanfpflanze. Teilstudie in Hanf - von der Ver (Fair)nutzung einer Pflanze. BUKO Agrar Koordination und Institut für angewandte Kulturforschung (Hrsg.). Schmetterling Verlag Stuttgart, 7-9.

FAUST, S. (2003) Analyse der Variabilität von Fasermerkmalen in Hanfbeständen. Diplomarbeit. Martin-Luther-Universität Halle Wittenberg.

FINZE, J. (2002) Entwicklung qualitätsbestimmender Merkmale bei Öllein (*Linum usitatissimum* L.) zur Doppelnutzung von Öl und Fasern. Diplomarbeit. Martin-Luther-Universität Halle Wittenberg.

FRANKE, W. (1989) Nutzpflanzenkunde. 4. Aufl., Stuttgart, New York: Georg Thieme Verlag.

GRIGNET, J. (1979) Die Messung der Faserlänge - Bedeutung und Anwendung. Melliand-Textilberichte **6**, 119-122.

HANF, C.-H., Hrsg. (1997) Wissenschaftliche Untersuchung zum Thema "Anbau, Ernte und Aufbereitung sowie Verwendung von Hanf". Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe, Band 7. Landwirtschaftsverlag GmbH Münster.

HENDRIKSSON, G., AKIN, D. E., SLOMSCZYNSKY, D., ERIKSSON, K. E. L. (1999) Production of higly efficient enzymes for flax retting by *Rhizimucor pusillus*. Journal of Biotechnology **68**, 115-123.

HENNINK, S. (1997) EU regulations on hemp cultivation. Journal of the International Hemp Association **4**, 38-39.

HEUSER, O. (1927) Hanf und Hartfaser. Julius Springer Verlag, Berlin, 156.

HERER, J. (1994) Die Wiederentdeckung der Nutzpflanze Hanf, Cannabis, Marihuana. 23. Auflage, Zweitausendeins, Frankfurt/Main.

HESSLER, L.E. (1947) The effect of fertilizers on the chemical composition and quality of dew-retted hemp fibre. Journal of the American Society of Agronomy **39**, 812-816.

HEYLAND, K.-U., KROMER, K.-H. (1995) Methodenbuch Industriefaser Lein. Arbeiten aus dem Institut für Landtechnik der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Heft **18**.

HOBSON, R.N., HEPWORTH, D.G., BRUCE, D.M. (2001) Quality of fibre separated from unretted hemp stems by decortication. Journal of Agricultural Engineering Research **78**, 153-158.

HOFFMAN, W. (1970) Hanf (*Cannabis Sativa* L.). In: Hoffman, W., Mudra, A., und Plarre, W.: Lehrbuch der Züchtung landwirtschaftlicher Kulturpflanzen. Bd. **2**. Berlin und Hamburg, 415-430.

HÖPPNER, F., MENGE-HARTMANN, U. (1994) Anbauversuche zur Stickstoffdüngung und Bestandesdichte von Faserhanf. Landbauforschung Völkenrode **44**, 314-324.

HÖPPNER, F., MENGE-HARTMANN, U. (1995) Einfluß variierter Anbaubedingungen auf die Faserausbildung zweier Faserhanfsorten. Landbauforschung Völkenrode **45**, 168-176.

HÖPPNER, F., MENGE-HARTMANN, U. (1997) Pflanzenbauliche and qualitative Aspekte zur Nutzung von Faserhanf (*Cannabis sativa* L.). Schriftenreihe des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Reihe A: Angewandte Wissenschaften; 5. Symposium Nachwachsende Rohstoffe - Perspektiven für die Chemie, 167-172.

HOYER, C. (1999) Vergleich von Faserisolierungsmethoden am Beispiel von Öllein (*Linum usitatissimum* L.). Diplomarbeit, Landwirtschaftliche Fakultät, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.

KELLER, A., LEUPIN, M., MEDIAVILLA, V., WINTERMANTEL, E. (2001) Influence of the growth stage of industrial hemp on chemical and physical properties of the fibres. Industrial Crops and Products **13**, 35-48.

KESSLER, R. W., TUBACH, M., NEBEL, K. (1996) Technologie der Hanfverarbeitung und die Bedeutung der Produktqualität für die Hanfverwertung. Schriftreihe Nachwachsende Rohstoffe **7**, 301-492.

KNOTHE, J. (1997) Herstellung und Eignung von naturfaserverstärkten Kunststoffbauteilen für die Automobilindustrie. VDI/MEG Kolloquium Agrartechnik: Erzeugung, Aufarbeitung und Verarbeitung von Naturfasern für nichttextile Zwecke, Bonn, 136-144.

KOHLER, R., WEDLER, M., (1996) Anwendung von Naturfasern in technischen Bereichen. Technische Textilien **3**, 7-10.

LÉON, J., VON FRANKEN-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**.

MAŃKOWSKI, J. (2003) The effect of some agronomic factors on the amount and quality of homomorphic fibre. Fibres and Textiles in Eastern Europe **11**, 20-25.

MASTEL, K., STOLZENBURG, K., SEITH, B. (1998) Untersuchungen zu pflanzenbaulichen, erntetechnischen und ökonomischen Fragen des Anbaus von Faser- und Körnerhanf. Landesanstalt für Pflanzenbau Forchheim, Heft **7**.

MEDIAVILLA, V., BASSETTI, P., LEUPIN, M. (1999) Agronomic characteristics of some hemp genotypes. Journal of the International Hemp Association **6**, 47-53.

MEDIAVILLA, V., BASSETTI, P., KONERMANN, M., SCHMID-SLEMBROUCK, I. (1998) Optimierung der Stickstoffdüngung und Saatmenge im Hanfanbau. Agrarforschung **5**, 241-244.

MEDIAVILLA, V., JONQUERA, M., SCHMID-SLEMBROUCK, I., SOLDATI, A. (1998) Decimal code for growth stages of hemp (*Cannabis sativa* L.). Journal of the International Hemp Association **5**, 68-74.

MEDIAVILLA, V., LEUPIN, M., KELLER, A. (2001) Influence of the growth stage of industrial hemp on the yield formation in relation to certain fibre quality traits. Industrial Crops and Products **13**, 49-56.

MEIJER, E.P.M. de (1995) Fibre hemp cultivars: A survey of origin, ancestry, availability and brief agronomic characteristics. Journal of the International Hemp Association **2**, 66-73.

MEIJER, E.P.M DE, KEIZER, L.C.P (1994) Variation of *Cannabis* for phenological development and stem elongation in relation to stem production. Field Crop Research **38**, 37-46.

MEIJER, W.J.M., VAN DER WERF, H.M.G., MATHIJSSEN, E.W.J.M., VAN DEN BRINK, P.W.M. (1995) Contraints to dry matter production in fibre hemp (*Cannabis sativa* L.). European Journal of Agronomy **4**, 109-117.

MENGE-HARTMANN, U., HÖPPNER, F. (1995) Einfluss variierter Anbaubedingungen auf die Faserausbildung zweier Faserhanfsorten. Institut für Pflanzenbau, Landbauvorschung Völkenrode, 45. Jahrg., **4**, 168-176.

MORRISON, W. H., ARCHIBALD, D. D., SHARMA, H. S. S., AKIN, D. E. (2000) Chemical and physical characterization of water and dew retted flax fibers. Industrial Crops and Products **12**, 39-46.

MORTON, W. E., HEARLE, J. W. S. (1993) Physical properties of textile fibres. 3. Aufl., Manchester: Textile Institute.

MÜNZER, W. (1999) Zusammenfassende Ergebnisse aus Forschungsvorhaben mit ausgewählten Rohstoffpflanzen. 7. Symposium: Im Kreislauf der Natur - Naturstoffe für moderne Gesellschaft. CARMEN e.V., **6**, 95-113.

NAUMENKO, V. (2000) Qualitätsmanagement in der Hanfaserproduktion. Masterarbeit. 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 genotypes for use of fibre as a by-product. Industrial Crops and Products **16**, 201-215.

RÖHRICHT, C., SCHULZ, J., REXROTH, E. (1997) Einfluss anbautechnischer Maßnahmen auf Ausbeute und Qualität der Fasern von Faserlein (*Linum usitatissimum* L.) und Hanf (*Cannabis sativa* L.). VDI/MEG Kolloquium Agrartechnik: Erzeugung, Aufbereitung und Verarbeitung von Naturfasern für nichttextile Zwecke, Bonn, 166-182.

RUSCHMANN, G. (1923) Grundlagen der Röste. S.Hirzel Verlag Leipzig, 9-173.

SANKARI, H.S. (2000) Comparison of bast fibre yield and mechanical fibre properties of hemp (*Cannabis sativa* L.) cultivars. Industrial Crops and Products **11**, 73-84.

SCHÄFER, T. (2003) Wirkung von Wachstumsfaktoren und pflanzenbaulichen Maßnahmen auf Biomasse- und Faserertrag sowie Faserqualität von Hanf (*Cannabis sativa* L.). Diss. Univ. Gießen, Shaker Verlag Aachen.

SCHÄFER, T., HONERMEIER, B. (2005) Effect of sowing date and plant density on the cell morphology of hemp (*Cannabis sativa* L.). Industrial Crops and Products (im Druck).

SCHEER-TRIEBEL, M., LÉON, J. (2000) Industriefaser - Qualitätsbeschreibung und pflanzenbauliche Beeinflussungsmöglichkeiten bei Faserpflanzen: ein Literaturreview. Pflanzenbauwissenschaften **4**, 26-41.

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.

SCHULZ, J., RÖHRICHT, C. (2001) Hanfmahd zur richtigen Zeit. Bauernzeitung **39**, 20-21.

SCHURIG-KOCUREK, D., RENNEBAUM, H., GRIMM, E., DIEPENBROCK, W. (2003) Einfluss der Röste auf die Fasereigenschaften von Hanf (*Cannabis sativa* L.). 2. Symposium Öl- und Faserpflanzen Jena 2002. UFOP-Schriften **20**, 311-314.

SCHUSTER, W. (1992) Ölpflanzen in Europa. DLG-Verlag-GmbH, Frankfurt am Main.

SETHMANN, A. (2005) *Girardinia diversifolia* (LINK) FRIIS (Urticaceae) - eine neue Faserpflanze - Untersuchungen zu den morphologischen und mechanischen Fasercharakteristika. Dissertation. Universität Hamburg.

STRUIK, P.C., AMADUCCI, S., BULLARD, M.J., STUTTERHEIM, N.C., VENTURI, G., CROMACK, H.T.H. (2000) Agronomy of fibre hemp (*Cannabis sativa* L.) in Europe. Industrial Crops and Products **11**, 107-118.

THYGESEN, L.G., HOFFMEYER, P. (2005) Image analysis for the quantification of dislocations in hemp fibres. Industrial Crops and Products **21**, 173-184.

TUBACH, M., NEBEL, K. (1997) Technologie der Hanfverarbeitung und die Bedeutung der Produktqualität für die Hanfverwertung. In: Wissenschaftliche Untersuchungen zum Thema „Anbau, Ernte und Aufbereitung sowie Verwendung von Hanf“, Teil 2, Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe Band 7. Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster.

TUBACH, M., NEBEL, K. (1996) Technologie der Hanfverarbeitung und die Bedeutung der Produktqualität für die Hanfverwertung. 301-492.

VAN DER WERF, H.M.G., HAASKEN, H.J., WIJLHUIZEN, M. (1994) The effect of daylength on yield and quality of fibre hemp (*Cannabis sativa* L.). European Journal of Agronomy **3**, 117-123.

VAN DER WERF, H.M.G., VAN DER BERG, W. (1995) Nitrogen fertilization and sex expression affect size and variability of fibre hemp (*Cannabis sativa* L.). Oecologia **103**, 462-470.

VAN DER WERF, H.M.G., VAN GELL, W.C.A., VAN GILS, L.J.C., HAVERKORT, A.J. (1995) Nitrogen fertilization and row width affect self-thinning and productivity of fibre hemp (*Cannabis sativa* L.). Field Crops Research **42**, 27-37.

VAN DER WERF, H.M.G., BROUWER, K., WIJLHUIZEN, M., WITHAGEN, J.C.M. (1995) The effect von temperature on leaf appearance and canopy establishment in fibre hemp (*Cannabis sativa* L.). Annals of Applied Biology **126**, 551-561.

VAN DER WERF, H.M.G. (1997) The effect of plant density on light interception in hemp (*Cannabis sativa* L.). Journal of the International Hemp Association **4**, 8-13.

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. Diss. Univ. Bonn, Shaker Verlag Aachen.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Dissertation:
„Physikalische Fasereigenschaften von Hanf (*Cannabis sativa* L.) in Abhängigkeit von Bestandesentwicklung, Strohmanagement, Röste und Faseraufschluss“ selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Halle/Saale, den 19.12.2005 Viktor Naumenko

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name:	Viktor Naumenko
Geburtsdatum:	30.11.1973
Geburtsort:	Sdwyshka, Ukraine
Staatsangehörigkeit:	Ukraine
Familienstand:	Verheiratet, 2 Kinder

Schulausbildung

1981 - 1991	Mittelschule Nr. 3, Shitomir, Ukraine

Berufsausbildung

1991 - 1996	Studium der Agrartechnik und Ingenieurwissenschaften an der Staatlichen Agrarökologischen Akademie der Ukraine, Shitomir Abschluss: Ingenieur-Mechaniker
1998 - 2000	Aufbaustudium „Standort- und umweltgerechte Landwirtschaft in den Transformationsländern“ an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg Abschluss: M.agr.Sc.
seit Juni 2001	Promotionsstudium an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

Berufstätigkeit

1996 - 1997	Wissenschaftlicher Mitarbeiter Fachbereich „Technische Service der Agrartechnik“ an der Staatlichen Agrarökologischen Akademie der Ukraine, Shitomir
2000 - 2001	Ingenieur-Mechaniker Keramikfabrik „Panacer SA“ Vacamonte, Panama
2001 - 2005	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Acker und Pflanzenbau der landwirtschaftlichen Fakultät der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg