

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 $450 \text{ kK} \cdot \text{m}^{-2}$ 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 $450 \text{ kK}\cdot\text{m}^{-2}$ und für die Samensorte Fasamo die Aussaatstärke mit $250 \text{ kK}\cdot\text{m}^{-2}$ 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 $250 \text{ kK}\cdot\text{m}^{-2}$ 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 (MEDIÁVILLA et al., 1998). Eine Erhöhung der N-Düngung von 60 auf $120 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ 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 $120 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ 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) betrug

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 **Temperatursummenbasis**. Dadurch können umweltbedingte Einflüsse 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 $0,01 \text{ cm}^3$ betrug. Die Annahme ist realistisch, da die Pflanzen zum Auflauftermin noch sehr dünne Stängel besaßen. Für die Darstellung der Volumenzuwachsrates 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 $0,0019-0,0038 \text{ cm}^3 \cdot \text{K}^{-1}$, 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 Probenentnahmeterrmin geliefert (Abb. 3.9, 1B, 2B, 3B).

Parallel zur Analyse der Stängelentwicklung und der Änderung von Strohseigenschaften 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 (KÖHLER 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 Probenahme 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 Probenentnahmeternin 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 Boniturskala 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 Boniturskala von MEDIAVILLA et al. (1998) lassen sich die erntenahe 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 Strohballens 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 Strohballens 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 Röstegrad und demzufolge allein auf die Wirkung der Maschinenteknik 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 Rosten 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 Boniturskala 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 Abspelbungen 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 Reinigungsstufe 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 Cottonisierungstufe (*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 Cottonisierungsstufe folgen sollte. Nach Prallaufschluss (*PA*) wurden gegenüber der Bearbeitung Brecherlinie (*BL*) Fasern mit höherer **Zugfestigkeit** ($L_0 = 2 \text{ mm}$) 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 Aufschlussstechnologien ergeben sich folgende Überlegungen: Im Gegensatz zu gebrochenem Material in der Brecherlinie (BL) ist in Faserpartien nach Prallaufschluss (PA) nur eine höhere Anzahl an Abspaltungen 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 ($L_0 = 2 \text{ mm}$) und des Schäbengehalts.