

Institut für Landtechnik
der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

**Einfluss der Grünentholzung und der Ammoniumdepotdüngung
auf den Ertrag und die Qualität von Faserhanf**

I n a u g u r a l – D i s s e r t a t i o n

zur

Erlangung des Grades

Doktor der Agrarwissenschaften
(Dr. agr.)

der

Hohen Landwirtschaftlichen Fakultät

der

Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität

zu Bonn

vorgelegt am 23. April 2009

von

Olaf Roller
aus Wincheringen

Referent: Prof. Dr.-Ing. Peter Schulze Lammers

Korreferent: Prof. Dr. Heinrich W. Scherer

Tag der mündlichen Prüfung: 03. Juli 2009

Diese Dissertation ist auf dem Hochschulschriftenserver der ULB Bonn unter
http://hss.ulb.uni-bonn.de/diss_online elektronisch publiziert.

Copyright 2009

Im Selbstverlag: Olaf Roller
Institut für Landtechnik
Systemtechnik in der Pflanzenproduktion
Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität

Alle Rechte, auch die der Übersetzung und des Nachdrucks, sowie jede Art der
photomechanischen Wiedergabe, auch auszugsweise, bleiben vorbehalten.

Abstract

Influence of decortication in fresh conditions and depot based ammonium nutrition on yield and quality of fibre hemp

The primary objective of the present thesis was to improve the economy of fibre hemp cultivation. This approach is based on transferring the first processing stage to the farm; this processing comprises primarily the decortication of the fibre hemp with a field chopper. The secondary objective was to improve the quality and yield of fibre hemp by use of the CULTAN (**C**ontrolled **U**ptake **L**ong **T**erm **A**mmonium **N**utrition) fertilisation; both a plot with the same amount of nitrogen as nitrate and an unfertilised plot served as controls.

In the first experiment from 2003 to 2005 in the southwest of Germany, harvesting and processing techniques were investigated, including a comparison between a) chopping freshly harvested hemp in the field, b) drying under natural field conditions with subsequent factory processing and c) the influence of dry matter content and date of harvest on the mechanical load of the hemp fibres.

Both physical parameters examined, the breaking elongation and the Young's Modulus of the isolated hemp fibre, were not influenced by the load intensity. However, significant differences could be seen between the usual dry disintegration and the field chopper method. As a third physical parameter, maximum tensile load of the isolated fibre, ranged between 50 and 60 % of the ones treated with the dry disintegration method. Neither the harvest date nor pre-drying the harvested plants significantly influenced the quality.

In a secondary experiment, trial plots comprised a control plot without nitrogen fertilisation, a standard plot with calcium ammonium nitrate and a CULTAN plot with the same amount of nitrogen applied ammonia solution.

Both location and climate had a greater influence on quality and yield of fibre hemp than the fertilisation and type of fertilisation like CULTAN or nitrate indicating that the cheaper fertilisation method is a means to improve the economy of hemp cultivation.

The result of the present work shows that CULTAN fertilisation is practicable with fibre hemp. The transfer of the first processing step to the field depends on the final use of the hemp fibres.

Kurzfassung

Einfluss der Grünentholzung und der Ammoniumdepotdüngung auf den Ertrag und die Qualität von Faserhanf

Die vorliegende Forschungsarbeit entstand aus der Motivation heraus, die Wertschöpfung des Faserhanfanbaus zu verbessern. Ansatzpunkte waren zum einen, die erste industrielle Verarbeitungsstufe in Form der Grünentholzung mittels Feldhäcksler in den landwirtschaftlichen Betrieb zu verlagern. Zum anderen sollte durch die „CULTAN“-Düngung (**C**ontrolled **U**ptake **L**ong **T**erm **A**mmonium **N**utrition) der Ertrag und die Qualität der Fasern verbessert werden.

Untersucht wurden in den Jahren 2003 bis 2005 in Südwest-Deutschland verschiedene Häckselintensitäten im Vergleich zum Trockenaufschluss mittels einer Laborentholzungsmaschine, der Einfluss des Trockensubstanzgehaltes sowie der Schnittzeitpunkt bei der mechanischen Belastung des Pflanzenmaterials.

Die Bruchdehnung und der E-Modul der Hanffasern wurden durch die Belastungsintensität nicht beeinflusst. Es traten signifikante Unterschiede zwischen Häckselvariante und herkömmlichem Trockenaufschluss auf. Die Werte der feinheitbezogenen Höchstzugkraft lagen im Bereich von 50 % bis 60 % von denen des Trockenaufschlusses. Ein späterer Schnittzeitpunkt hatte keinen Einfluss auf die Qualität des Häckselmaterials. Auch das Antrocknen des zu häckselnden Materials bewirkte keine Qualitätsverbesserung.

Bei dem Düngeversuch handelte es sich um eine Kontrollvariante ohne Düngung, eine Variante in Form von Kalkammonsalpeter und als „CULTAN“ in Form von Ammoniaklösung.

Durch die Anwendung des „CULTAN“-Düngeverfahrens wurden keine statistisch abgesicherten Unterschiede bezüglich Ertrag und Qualität nachgewiesen. Die Witterung hatte einen stärkeren Einfluss auf den Ertrag und die Qualität als die durchgeführten Düngungsmaßnahmen. Auch wenn keine Effekte durch die „CULTAN“-Düngung auf den Ertrag und die Qualität der Hanfpflanzen erzielt wurde, ist durch die „CULTAN“-Düngung unter Umständen eine kostengünstigere Düngung möglich

Als Ergebnis der Forschungsarbeit bleibt festzuhalten, dass eine „CULTAN“-Düngung praktikabel ist. Die Verlagerung des ersten Verarbeitungsschrittes auf das Feld ist vom Verwendungszweck des Erntegutes abhängig.

Danksagung

... „Ein anderer Teil schließlich fiel auf guten Boden und brachte Frucht, teils hundertfach, teils sechzigfach, teils dreißigfach.“ ...

(Matthäus 13:8)

Bis die vorliegende Arbeit Frucht bringen konnte, bedurfte es so mancher fleißiger Menschen, Kollegen und Freunden, die mit Rat und Tat zur Seite standen. Diesen Menschen gilt an dieser Stelle mein herzlicher und aufrichtiger Dank.

Mein ganz besonderer Dank gebührt Herrn Prof. Dr.-Ing. P. Schulze Lammers. Durch ihn bekam ich die Gelegenheit, das mir anvertraute Thema zu bearbeiten und gleichzeitig die Möglichkeit, mich am Institut für Landtechnik in allen Bereichen einzubringen. Durch die mir übertragenen Verantwortungen bewies er mir stets sein Vertrauen. Dieses Vertrauen untermauerte er durch seine menschliche Art und die Möglichkeit, mich innerhalb der Versuche frei zu entfalten, indem er die Grenzen sehr weit setzte. Seine stets ansprechbare, geduldige aber auch besonnene und geradlinige Art sowie der Umgang mit mir und meinen Kolleginnen und Kollegen erzeugte eine angenehme Arbeitsatmosphäre.

Herrn Prof. Dr. H. Scherer danke ich für die Übernahme des Korreferates und die Unterstützung bei den Düngungsversuchen in der Vegetationsanlage des Instituts für Pflanzenernährung.

Ohne die Unterstützung der Kolleginnen und Kollegen am Institut für Landtechnik wäre die Durchführung dieser Promotion nicht möglich gewesen. An erster Stelle danke ich hierfür Herrn Peter Dürkop, dem emsigen und guten Geist des Hauses und ebenso der Werkstatt unter Leitung von Herrn Anton Berg und seinen Mitarbeitern Wilfried Berchthold und Walter Petriwski nebst den Auszubildenden. Auch gilt es allen anderen im Haus zu danken, die mich in irgendeiner Weise unterstützt haben, die ich aber nicht alle namentlich nennen kann. Zwei weitere liebe Menschen aus dem Institut, die mich auf freundschaftlicher und beruflicher Basis stets unterstützten und mir besonders am Herzen liegen, möchte ich an dieser Stelle jedoch noch erwähnen. Diese sind Jiří Vondříčka und Monika Förster.

Ein weiteres Dankeschön möchte ich der Lehr- und Forschungsstation Dikopshof unter der Leitung von Herrn Dr. Hubert Hüging und Bernd Bünten sagen. Dort fand ich auch über meine Promotion hinaus immer kompetente und flexible Hilfe bei allen Versuchen, die ich dort innerhalb meiner Tätigkeit als Außenversuchsleiter durchgeführt habe.

Auch außerhalb der Universität fand ich in vielerlei Hinsicht Unterstützung. Hierbei möchte ich Susanne Bierschenk hervorheben, die mit viel Geduld jeden Satz dieser Dissertation unter die Lupe nahm und so manchen Formulierungen den letzten Schliff gab.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	I
Kurzfassung	II
Danksagung	III
Inhaltsverzeichnis	V
Verzeichnis der Abkürzungen und Symbole	VIII
Verzeichnis der Tabellen	IX
Verzeichnis der Abbildungen	XI
1 Einleitung und Zielsetzung	1
2 Stand des Wissens	3
2.1 Wirtschaftliche Aspekte des Bastfaseranbaus.....	4
2.2 Botanik des Hanfes.....	6
2.2.1 Herkunft und Morphologie.....	6
2.2.2 Stängelaufbau.....	8
2.3 Produktion.....	9
2.3.1 Standort.....	9
2.3.2 Aussaat.....	11
2.3.3 Düngung.....	12
2.3.4 Pflanzenschutz.....	18
2.3.5 Ernte.....	18
2.3.5.1 Mehrebenenschnitt.....	20
2.3.5.2 Gutstromeinkürzung.....	22
2.3.5.3 Hanfdrusch.....	23
2.3.5.4 Hanfvollernter.....	24
2.3.5.5 Weitere Verfahrensschritte.....	24
2.3.6 Faseraufbereitung.....	25
2.3.7 Qualitätseigenschaften der Hanfernteprodukte.....	26

3	Material und Methoden	27
3.1	Grünentholzung.....	27
3.2	„CULTAN“-Düngungsversuche.....	35
3.3	Ertragsuntersuchungen.....	39
3.4	Qualitätsuntersuchungen.....	40
3.4.1	Feuchtegehalt des Hanfstrohs.....	41
3.4.2	Röstgrad des Hanfstrohs.....	41
3.4.3	Fasergehalt des Hanfstrohs.....	42
3.4.4	Vorversuche zur Bestimmung der Freilegbarkeit von Hanffasern.....	45
3.4.5	Feinheit der Fasern, Faserbündel.....	45
3.4.6	Festigkeit der Faserbündel.....	47
3.5	Datenerfassung mit Verarbeitung und statistische Auswerteverfahren.....	54
4	Ergebnisse	56
4.1	Grünentholzung.....	56
4.1.1	Einfluss der Häcksellänge auf die Faserqualität.....	56
4.1.2	Einfluss des Abstandes zwischen Gegenschneide und Häckseltrommel und der Wirkung des Corncrackers auf die Faserqualität.....	61
4.1.3	Einfluss des Schnittzeitpunktes auf die Faserqualität.....	64
4.1.4	Einfluss des Trockensubstanzgehaltes des Pflanzenmaterials beim Häckselaufschluss auf die Fasereigenschaften.....	67
4.2	„CULTAN“-Versuche.....	71
4.2.1	Ausdünnungseffekt.....	72
4.2.2	Wuchsentwicklung.....	75
4.2.3	Strohtrockenmasseertrag des Hanfstrohs.....	79
4.2.4	Fasergehalt und –ertrag des Hanfstrohs.....	81
4.2.5	Schäbenertrag.....	83
4.2.6	Einfluss der Düngung auf die Qualität der Fasern.....	84

5 Diskussion	90
5.1 Grünentholzung.....	90
5.1.1 Einfluss der Häcksellänge auf die Faserqualität.....	91
5.1.2 Einfluss des Abstandes zwischen Gegenschneide und Häckseltrommel und der Wirkung des Corncrackers auf die Faserqualität	94
5.1.3 Einfluss des Schnittzeitpunktes auf die Faserqualität.....	95
5.1.4 Einfluss des Trockensubstanzgehaltes des Pflanzenmaterials beim Häckselaufschluss auf die Fasereigenschaften.....	96
5.2 „CULTAN“-Versuche.....	97
5.2.1 Ausdünnungseffekt.....	97
5.2.2 Wuchsentwicklung.....	99
5.2.3 Trockenmasseertrag des Hanfstrohs	100
5.2.4 Fasergehalt und –ertrag des Hanfstrohs.....	101
5.2.5 Schäbenertrag.....	102
5.2.6 Einfluss der Düngung auf die Qualität der Fasern.....	102
6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	105
7 Literaturverzeichnis	107

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

ATB	Leibniz-Institutes für Agrartechnik Bornim e. V.
BLE	Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung
°C	Grad Celsius
CO(NH₂)₂	Harnstoff
CULTAN	Controlled Uptake Long Term Ammonium Nutrition
dt	Dezitonne
ha	Hektar
KAS	Kalkammonsalpeter
kK	Keimfähige Körner
min	Minute
Mio.	Millionen
N	Stichprobenumfang
N	Stickstoff
NH₄⁺	Ammonium
NO₃⁻	Nitrat
NRW	Nordrhein-Westfalen
S108	reduzierte Saatstärke mit 108 kK m⁻¹
S216	praxisübliche Saatstärke mit 216 kK m⁻¹
THC	Tetrahydrocannabinol
TM	Trockenmasse
≤	kleiner gleich
%	Prozent

Tabellenverzeichnis

Nr.	Überschrift	Seite
2.1	Im Fahrzeugbau 2004 verwendete Naturfasermassen, nach RUDOLPH 2006 und KARUS/ORTMANN/VOGT 2004	6
2.2	Durchschnittlicher Nährstoffbedarf von Hanf in kg je t Trockenmasse	13
3.1	Technische Daten der Laborentholzungsmaschine „Flaksy“	43
3.2	Spezifikationen der Probenhalter der Materialprüfmaschine zur Testung von Naturfaserbündeln	50
3.3	Spezifikationen Materialprüfmaschine zur Zugprüfung von Naturfaserbündeln	52
4.1	Ergebnisse der Varianzanalyse der Faserbruchdehnung	57
4.2	Ergebnisse der Varianzanalyse des E-Moduls	57
4.3	Ergebnisse der Varianzanalyse der feinheitsbezogenen Höchstzugkraft	58
4.4	Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalyse der Häckselversuche	61
4.5	Mittelwerte der Faserbruchdehnung, des E-Moduls und der feinheitsbezogenen Höchstzugkraft den frühen und späten Erntetermin; Signifikanzniveau 0,05	65
4.6	Ergebnisse der Varianzanalyse der Qualitätsparameter in Abhängigkeit des Trockensubstanzgehaltes des zu häckselnden Pflanzenmaterials	68
4.7	Monatsbezogene Niederschlags- und Temperatursummen in der Vegetationszeit des Hanfes auf der Lehr- und Forschungsstation Dikopshof von 2003 bis 2005	71
4.8	Nitrat- und Ammoniumstickstoffgehalte in kg ha ⁻¹ im Boden der Versuchsfläche zu Beginn der Vegetationsperiode des Hanfes auf der Lehr- und Forschungsstation Dikopshof von 2003 bis 2005	72
4.9	Ausdünnungsraten in Bezug auf den aufgelaufenen Bestand	72
4.10	Homogene Untergruppen des Tukey-HSD-Tests zur Ausdünnung 2003 als Mittelwerte in %	73
4.11	Homogene Untergruppen des Tukey-HSD-Tests zur Ausdünnung 2004 als Mittelwerte in %	73
4.12	Homogene Untergruppen des Tukey-HSD-Tests zur Ausdünnung 2005 als Mittelwerte in %	74
4.13	Mittelwerte der Stängeldurchmesser in der Mitte des Stängels	76
4.14	Ergebnis der einfaktoriellen ANOVA der Faserbruchdehnung in % bei den „CULTAN“-Düngungsversuchen	85

Nr.	Überschrift	Seite
4.15	Ergebnis der einfaktoriellen ANOVA des E-Moduls in GPa bei den „CULTAN“-Düngungsversuchen	87
4.16	Ergebnis der einfaktoriellen ANOVA der feinheitsbezogenen Höchstzugkraft in cN tex^{-1} bei den „CULTAN“-Düngungsversuchen	88

Abbildungsverzeichnis

Nr.	Bezeichnung	Seite
2.1	Schematischer Querschnitt des Stängels einer Bastfaserpflanze	8
2.2	Wurzelbild einer mit überwiegend NO_3^- versorgten Maispflanzen	15
2.3	Wurzelbild NH_4^+ versorgter Pflanzen	16
2.4	Mehrebenenschnittsystem Messerbalken mit 2 Schnittebenen	20
2.5	Mehrebenenschnittsystem Blücher 4	21
2.6	Gutstromeinkürzung bei Hanf mittels System Hempcut	23
3.1	Reihenunabhängiger Erntevorsatz für Feldhäcksler, der für die Hanfernte eingesetzt wurde	29
3.2	Feldhäckslermessertrommel mit 12 Doppelmessern; hier mit Austausch von Messern mit „Blindmessern“	29
3.3	Häckselgut bei mittlerer Häcksellängeneinstellung und geschlossener Gegenschneide	31
3.4	Häckselgut bei geöffneter Gegenschneide	31
3.5	Hanfswaden Speyer 2004	32
3.6	Manuelle Zuführung des Hanfes in den Häcksler	32
3.7	Probenhäcksler des Instituts für Landtechnik Bonn; Zuführseite	33
3.8	Probenhäcksler des Instituts für Landtechnik Bonn Seitenansicht der Häckseltrommel mit Auffangbehälter	34
3.9	Versuchsanlage des „CULTAN“-Düngungsversuches auf der Lehr- und Forschungsstation Dikopshof, Parzellengröße 10,5 m ²	36
3.10	Beschreibung der Zwischenräume zwischen den Nettoparzellen	35
3.11	Gerät zur Formung der Vertiefungen für die Platzierung der Ammoniaklösung	37
3.12	Drenchpistole zur Applizierung der Ammoniaklösung	38
3.13	Applikation der Ammonium-Depots nach Auflauf der Hanfpflanzen	38
3.14	Frontansicht des Flachsbrechers	42
3.15	Draufsicht Flachsbrecher	43
3.16	Kraft-Längenänderungs-Diagramm; idealisierter Kurvenverlauf für ein Hanffaserbündel mit Angabe der zugehörigen Längenänderung	49
3.17	Zugprüfungseinrichtung für Faserbündelmessung	50
3.18	Laserdiameter zur Querschnittsmessung der Faserbündel	51
4.1	Verteilung der Messwerte für die Faserbruchdehnung in Abhängigkeit von der Häcksellänge als Boxplots	59
4.2	Verteilung der Messwerte für die feinheitsbezogene Höchstzugkraft in Abhängigkeit von der Häcksellänge als Boxplots	60

Nr.	Bezeichnung	Seite
4.3	Verteilung der Messwerte für den E-Modul in Abhängigkeit von der Häcksellänge als Boxplots	60
4.4	Verteilung der Messwerte der Faserbruchdehnung in Abhängigkeit von der Bearbeitungsintensität als Boxplots	62
4.5	Verteilung der Messwerte des E-Moduls in Abhängigkeit von der Bearbeitungsintensität als Boxplots	63
4.6	Verteilung der Messwerte der feinheitsbezogenen Höchstzugkraft in Abhängigkeit von der Bearbeitungsintensität als Boxplots	64
4.7	Verteilung der Messwerte der Faserbruchdehnung in Abhängigkeit vom Erntezeitpunkt	66
4.8	Verteilung der Messwerte des E-Moduls in Abhängigkeit vom Erntezeitpunkt	66
4.9	Verteilung der Messwerte der feinheitsbezogenen Höchstzugkraft in Abhängigkeit vom Erntezeitpunkt	67
4.10	Verteilung der Messwerte der Faserbruchdehnung in Abhängigkeit des Feuchtegehaltes des zu häckselnden Pflanzenmaterials als Boxplots	68
4.11	Verteilung der Messwerte des E-Moduls in Abhängigkeit des Trockensubstanzgehaltes des zu häckselnden Pflanzenmaterials	69
4.12	Verteilung der Messwerte der feinheitsbezogenen Höchstzugkraft in Abhängigkeit des Trockensubstanzgehaltes des zu häckselnden Pflanzenmaterials	70
4.13	Ausdünnungseffekte bei den Düngungsversuchen 2003 bis 2005 als Boxplots	75
4.14	Verteilung der Messwerte für die Wuchshöhen im Versuchsjahr 2003 als Boxplots	76
4.15	Verteilung der Messwerte für die Wuchshöhen im Versuchsjahr 2004 als Boxplots	78
4.16	Verteilung der Messwerte für die Wuchshöhen im Versuchsjahr 2005 als Boxplots	79
4.17	Trockenmasseertrag von Hanfstroh in den Düngungsversuchen mit reduzierter und praxisüblicher Saatstärke	80
4.18	Fasergehalt des Hanfstrohs in den Düngerversuchen	81
4.19	Faserertrag in den Düngungsversuchen	82
4.20	Schäbenertrag in den Düngungsversuchen	84
4.21	Verteilung der Messwerte der Faserbruchdehnung in Abhängigkeit von der Düngungsart als Boxplots	86
4.22	Verteilung der Messwerte des E-Moduls in Abhängigkeit von der Düngung als Boxplots	87
4.23	Verteilung der Messwerte der feinheitsbezogenen Höchstzugkraft in Abhängigkeit von der Düngung als Boxplots	89

1 Einleitung und Zielsetzung

In Zeiten knapper werdender fossiler Energie kommt den so genannten Nachwachsenden Rohstoffen nicht nur im Bereich der direkten Energieerzeugung eine immer größere Bedeutung zu, sondern auch im Bereich der Einsparung von fossilen Rohstoffen.

Bei den *Nachwachsenden Rohstoffen* ist es im Hinblick auf die Ressourcenschonung wichtig, so wenig fossile Energie wie möglich bei der Produktion zu verwenden. Seit der Wiederzulassung des Anbaus der Faserpflanze Hanf ist diese wieder stärker in den Focus der deutschen Anbauer gerückt. Hanf ist hinsichtlich seiner Zusammensetzung und vielfältigen Einsatzzwecke eine hervorragende Pflanze. Der Anbau von Faserhanf ist aus ökologischer Sicht positiv zu bewerten, weil Hanf gegenüber anderen Kulturpflanzen einen deutlich verminderten Stickstoff-Bedarf aufweist, den Boden unkrautfrei hinterlässt und der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln nicht nötig ist (DIEPENBROCK ET AL. 1999). Da die Hanfpflanze den meisten Schädlingen wie Bakterien, Pilzen, Viren, Nematoden und Insekten aus eigener Kraft überdurchschnittlich gut widerstehen kann, ist der Einsatz weiterer chemischer Stoffe nicht notwendig.

Auch für die ökologische Landwirtschaft ist der Hanf eine sehr geeignete Pflanze, da er organischen Dünger gut und bis kurz vor seiner Reife verwertet und kein Pflanzenschutzmitteleinsatz notwendig ist. Er ist eine gute Pionierpflanze nach dem Umbruch von Ödland (HÜTTL 2001). In diesem Zusammenhang sind sowohl der N-Entzug aus dem Boden in Wasserschutzgebieten als auch das CO₂-Fixierungsvermögen aus ökologischen Gründen ein wichtiger Bewertungsmaßstab, in dem die starke ökologische Anpassungsfähigkeit dieser Kulturpflanze zum Ausdruck kommt.

Weiterhin bietet Hanf eine vielfältige Palette an Produkten an, die in den verschiedensten Bereichen eingesetzt werden können. Das reicht von ölhaltigen Körnern über Fasern bis hin zu Holzteilchen. Als eine Auswahl an Anwendungsbeispielen können faserverstärkte Verbundwerkstoffe sowie Dämmstoffe aus den Fasern oder den Holzteilchen genannt werden. In diesen Bereichen müssen die Naturstoffe mit aus fossilen Rohstoffen erzeugten Materialien konkurrieren, welche den Vorteil einer recht gleich bleibenden und definierten Qualität aufweisen. In Mitteleuropa ist der Anbau von Naturfasern nur wettbewerbsfähig, wenn die Anbauverfahren optimiert werden und dabei gleichzeitig hochwertiges Fasermaterial produziert wird.

In Versuchen zur Qualitätsbildung von einheimischen Faserpflanzen wurde festgestellt, dass die Saatstärke und die Stickstoffdüngermenge eine untergeordnete Rolle spielen

(LÉON ET AL. 2004). Ziel dieser Arbeit ist es, neue Möglichkeiten aufzuzeigen, den Hanfanbau so rentabel wie möglich zu machen. Dabei sollen zwei Ansätze verfolgt werden: einerseits eine Ertragssteigerung bei erhöhter Qualität durch ein anderes Stickstoffdüngungsverfahren und andererseits eine Kostenreduktion bei der Ernte bzw. eine weitere Wertschöpfung durch die Verlagerung der ersten Verarbeitungsstufe des Pflanzenaufschlusses in den landwirtschaftlichen Bereich.

Als Stickstoffdüngungsverfahren kam die so genannte „CULTAN-Düngung“ (**C**ontrolled **U**ptake **L**ong **T**erm **A**mmonium **N**utrition) zur Anwendung. Hierbei wird ein ammoniumdominanter Stickstoffdünger eingesetzt, der es notwendig macht, dass die Pflanze zur Stickstoffaufnahme zuerst Assimilate durch die faserhaltige Rindenschicht (Phloem) zu den Wurzeln transportiert, um dann den gebundenen Stickstoff wiederum durch das Phloem zu den Blättern zu schicken. Hieraus soll ein verstärktes Phloem hervorgehen und damit einhergehend ein erhöhter Faserertrag in Verbindung mit der Beeinflussung der Faserqualität.

Der Anspruch, Schäben vorzugsweise vor Ort zu produzieren, ergibt sich aus der derzeit hohen Nachfrage in der Trittschalldämmstoffindustrie und ihrer geringen Transportwürdigkeit aufgrund des sehr niedrigen Volumengewichtes. Dies kann durch die Ernte des Hanfes mit einem handelsüblichen Feldhäcksler geschehen, bei dem lediglich die Anzahl der Messer stark reduziert wird. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Fasern bei der Bearbeitung in frischem Zustand stark leiden (PALLESEN 1996; MARTENS & MÜSSIG 2000; STOLZENBURG 2000; GUSOVIVUS 2002). Daraus ergibt sich die Aufgabenstellung, die Qualitätseinbußen der Fasern durch eine Bearbeitung des frischen Stängels zu untersuchen und zugleich die Eignung der Schäben im Bezug auf die gewünschte Form und Größe zu überprüfen.

2 Stand des Wissens

Wie in der Einleitung schon erwähnt wurde, ist allgemein bekannt, dass fossile Rohstoffe begrenzt sind. In allen Bereichen des täglichen Lebens finden wir Produkte auf fossiler Basis. Um unsere Ressourcen zu schonen, ist es notwendig, Produkte fossiler Herkunft wieder auf der Basis *Nachwachsender Rohstoffe* herzustellen.

Ein wichtiger und großer Absatzmarkt von Naturfasern als Ersatz für Kunstfasern ist die Automobilbranche. Hierfür kommen unter den Klimabedingungen Deutschlands Faserhanf, Faser- und Industrielein sowie Nessel als einheimische Faserpflanzen für die Landwirtschaft in Betracht (VON FRANCKEN-WELZ 2003), wobei Faserhanf das größte Potential für Nordrhein-Westfalen aufweist. Die heimische Landwirtschaft könnte die Industrie mit Fasern beliefern und sich dank kurzer Transportwege und somit verminderter Kosten bei gleich bleibender Qualität neue Einkommensalternativen sichern. Um den Rohstoff Hanf wieder zu etablieren, bedarf es besonderer Kenntnisse der Ursachen für Ertrags- und Qualitätsdifferenzen. Diese sind Voraussetzung für die Optimierung des Anbaus und die Erweiterung der Produktion von qualitativ hochwertigen Naturfasern. Unerklärlich ist, dass die Kenntnisse über den Anbau einer der ältesten und vielseitigsten Kulturpflanzen der Menschheit nahezu verloren gingen. Durch die Entwicklung der Mechanisierung der Baumwollspinnerei im 18. Jahrhundert wurden die einheimischen Fasern vom Markt verdrängt (Bócsa ET AL. 2000). In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts wurde die Hanffaser durch Jute, Sisal und Manila ersetzt. Durch Preisdruck billigerer Hanfimporte aus Russland ging der Hanfanbau von 1910 mit 30.000 ha auf heute 600 ha zurück. Ähnliche Anbaurückläufe entwickelten sich in Frankreich. In den beiden Weltkriegen erlebte der Hanfanbau einen kurzzeitigen Aufschwung. Das ist darin begründet, dass es ein Streben nach autarker Faserversorgung gab und die Zufuhr der Fasern von außen abgeschnitten war. Ein erneuter Rückgang des Hanfanbaus wurde durch Baumwollimporte nach dem Krieg und die Änderung des Betäubungsmittelgesetzes 1982, in dem der Hanfanbau in Deutschland generell verboten wurde, noch beschleunigt. In anderen Ländern wie z.B. USA war Hanfanbau zuerst durch das Marihuanagesetz 1937 erschwert und ab 1970 verboten. Kanada und Australien schlossen sich diesem Verbot an. In Frankreich wurde die Hanfindustrie weiter betrieben. Dies jedoch nur auf kleinen Flächen für die Produktion hochwertiger Spezialzellstoffe wie Zigarettenpapier. Seit 1996 ist in Deutschland der Hanfanbau unter bestimmten Auflagen wieder erlaubt. 1998 zog Kanada nach und erlaubt seitdem den Anbau von Hanfsorten mit unter 10 mg Tetrahydrocannabinol (THC) je kg Pflanzenmasse. In Mittel- und Osteuropa waren die politischen Rahmenbedingen und der Markt so gut, dass bis zum Zusammenbruch des

sowjetischen Marktes 1991 der Hanfanbau auf hohem Niveau blieb. Danach ging der Anbau in Ungarn und Rumänien auf unter 1000 ha zurück, stieg dann aber durch die weltweite Wiederentdeckung des Hanfes wieder an.

Die Tatsache, dass das Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen der Universität Bonn im Jahr 2002 ein Forschungsvorhaben bezüglich Naturfasern in Auftrag gab, zeigt, wie hoch der Stellenwert von Naturfasern in jüngerer Zeit eingeschätzt wird. Innerhalb dieses Forschungsprojekts sollte die Bedeutung der umweltbedingten Variabilität für die Ertrags- und Qualitätsbildung untersucht werden. Anfangs war auch ein Automobilzulieferer involviert. Dieser zog sich jedoch aufgrund der hohen Produktionskosten frühzeitig aus dem Projekt zurück. Dieses Beispiel zeigt, wie schwierig es in Deutschland ist, wirtschaftlich mit Naturfasern zu arbeiten bzw. sie herzustellen. Nichts desto trotz war dadurch die Motivation größer, zu erforschen, ob es nicht doch möglich ist, Naturfasern und ihre Nebenprodukte wirtschaftlich anzubauen und gleichzeitig eine hohe Qualität zu gewährleisten.

2.1 Wirtschaftliche Aspekte des Bastfaseranbaus

RICHTER beleuchtete 2007 die Naturfaserwirtschaft und führte den Rückgang der einheimischen Naturfasern auf den wirtschaftlichen Nachteil gegenüber der technisch-industriellen Baumwollverarbeitung und der Entwicklung synthetischer und industrieller Fasergewinnungstechniken zurück. Durch den Nachfragerückgang kam es bei Flachs in Westdeutschland Ende der 60er Jahre und in Ostdeutschland Anfang der 70er Jahre zur Anbaueinstellung. Der Anbau von Hanf kam durch das Anbauverbot aufgrund der THC-Problematik 1982 zum Erliegen. Doch Anfang der 90er Jahre fanden Bastfasern in so genannten „technischen Produkten“ neue Einsatzbereiche. Trotz der günstigen Ressourcenbilanz und der Leichtbaufähigkeit von Verbundwerkstoffen mit Naturfasern gegenüber Glasfasern ist die ungleichmäßige Qualität und zu geringe Reproduzierbarkeit ein großer Nachteil (BECKMANN & KLEINHOLZ 1999). Durch preisliche Vorteile und Kundenpräferenzen haben sich nach RICHTER (2007) die großen Automobilzulieferer auf den Naturfasereinsatz hin orientiert. Das NOVA-Institut u.a. (2006) erwartet einen steigenden Anteil an nachwachsenden Rohstoffen in Automobilteilen. HANF (1996) sieht jedoch aufgrund struktureller Bedingungen und der Verhandlungspositionen der Automobilindustrie Schwierigkeiten der eigenständigen landwirtschaftlichen oder im Faseraufschluss angesiedelten Unternehmeraktivität und bezweifelt somit den erwarteten Schub für die heimische Faserproduktion. Weitere

Autoren beschreiben eine dauerhaft unzuverlässige und unkontinuierliche Rohstoffversorgung aufgrund von Qualitäts- und Preisschwankungen im Bereich der technischen Fasern aus insbesondere baltischen Ländern (DAVID ET AL. 1999). Aus diesem Grund wurden in den letzten Jahren mit steigender Tendenz im französischen und belgischen Markt Flachskurzfaser aus der Produktion für Papier- und Zellstoffindustrie entnommen, die Ende der neunziger Jahre noch ca. 90 % dieser Fasern verarbeitete. Hanftextilien werden beinahe vollständig aus Osteuropa und China importiert. Die Hanfkurzfaser aus dem EU-Anbau werden zum überwiegenden Teil in der Zellstoffindustrie verarbeitet.

Ein in jüngerer Zeit stetig steigender Trend in der Abnahme von Bastfasern zeigt sich in der Automobilindustrie (RICHTER 2007). Hier werden zunehmend Glasfasern als Trägerfasern in Verbundwerkstoffen ausgetauscht. Als Substitut kommen hierfür Sisal, Jute, Ramie, Flachs, Hanf und Kenaf als Gewebe sowie Filze und Vliese in Betracht. DUPONT veröffentlichte 1999, dass 1998 von 13 Mio. Fahrzeugen 10 % mit Naturfasern verstärkten Bauteilen ausgestattet waren. Die dabei durchschnittlich pro Fahrzeug verbaute Masse an Naturfasern belief sich auf 0,5 kg. Bis zum Jahre 2005 hat sich der Verbrauch an Naturfasern im Fahrzeugbau erheblich gesteigert. So gibt das NOVA-INSTITUT 2006 an, dass sich zum Beispiel in einem Oberklassewagen der Daimler-Chrysler AG bereits 27 Bauteile mit Naturfasern befinden und dass sich das Gewicht der darin enthaltenen Fasern auf 42,7 kg beläuft. Dies entspricht einer Steigerung zum Vorgängermodell von 73 %. Als Einsatzbereiche für die Verwendung von Bastfasern kommen Komponenten wie Türinnenverkleidungen, Instrumententafeln, Hutablagen, Kofferraumauskleidungen, Sitze und weiteres in Betracht. Jedoch ist bei den oben genannten Zahlen zu berücksichtigen, dass im Automobilbau Gemische aus Naturfasern verwendet werden, in denen sich neben den Bastfasern auch Holzfasern und Reißbaumwolle befinden. Nach RUDOLPH (2006) und KARUS/ORTMANN/VOGT (2004) setzt sich der in deutschen Autos verbaute Faseranteil wie folgt zusammen:

Tab. 2.1: Im Fahrzeugbau 2004 verwendete Naturfasermassen, nach RUDOLPH 2006 und KARUS/ORTMANN/VOGT 2004

<i>Faserart</i>	<i>Verbaute Menge in t</i>
Flachs, Hanf, Jute, Kenaf, Sisal	24.750
Holzfaser	19.800
Reißbaumwolle	43.450
Summe	88.000

Wie bereits erwähnt, werden in den Verbundwerkstoffen die Naturfasern als Vlies verarbeitet. Die Anforderungen an die zu verarbeitenden Fasern stellt RICHTER (2007) nach Angaben von Sachsen Leinen im Jahr 2005 unter Qualitätsaspekten wie folgt dar:

- durchschnittliche Faserbündellänge: 70 mm (Toleranz +/- 25 mm)
- Anteil Faserbündel kürzer 20 mm: unter 5 %
- Anteil Faserbündel an über 100 mm: maximal 15 %
- Anteil Faserbündel länger 120 mm: 0 %
- Anteil an Schäben und Staub: maximal 5 %

Trotz der beschriebenen Vorzüge der Bastfasern und des Marktpotentials zeigt die geringe Zahl der von der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) zugelassenen Bastfaseraufschlussanlagen, wie schwierig es ist, wirtschaftlich mit Naturfasern in Deutschland zu arbeiten. Im Jahr 2005 gab es 14 zugelassene Unternehmen, 2008 waren es lediglich nur noch 7 Unternehmen.

In den folgenden Kapiteln wird ein Überblick über die Botanik der Hanfpflanze, die bisherigen Anbau- und Verarbeitungsmethoden gegeben und die entsprechenden Grundlagen für die Ansätze der durchgeführten Versuche erläutert.

2.2 Botanik des Hanfes

2.2.1 Herkunft und Morphologie

Hanf gehört neben dem Hopfen zu der Familie der Cannabinaceae, die mit den Brennesselgewächsen eng verwandt ist. Der wissenschaftliche Name setzt sich aus der Gattung, der Art und dem Entdecker zusammen. So lautet die wissenschaftliche

Bezeichnung von Hanf *Cannabis sativa* L. (L. = Linné). Der Nutzhanf wurde seit den fünfziger Jahren auf einen niedrigeren Rauschmittelgehalt gezüchtet. Bei dem Rauschmittel handelt es sich um Tetrahydrocannabinol. Die nutzbaren Pflanzenteile sind die ölhaltigen Samen, die Bastfasern und die Schäben. Die Fasern befinden sich in der Rinde der aufrechten, eckigen Sprossachse. Diese verholzt mit zunehmendem Alter. Aus dem Holzteil der Sprossachse entstehen durch Brechen des Stängels die Schäben. Die Blätter sind gestielt und setzen sich i.d.R. aus fünf bis neun spitz zulaufenden, grob gezahnten Blattfingern zusammen. Das mittlere Blatt fällt dabei größer aus (NOVA-INSTITUT 2003).

Die Hanfpflanze ist einjährig und geht als Kurztagspflanze beim Wechsel zu den kürzeren Tagen von der vegetativen in die generative Phase über. Naturstandorte des Hanfes sind nach HOLZNER & GLAUNGER (2005) Schuttflächen an Gebirgsflüssen und Schutt- bzw. Erdrutschflächen am Fuß von Himalaya-Felswänden in Zentralasien. Es gibt männliche und weibliche Pflanzen, wobei die Pollenübertragung durch den Wind geschieht. Die männlichen Pflanzen sterben nach der Pollenabgabe ab, was zu einer inhomogenen Abreife des Bestandes führt. Um dies zu vermeiden, wurden einhäusige Formen gezüchtet (SCHEER-TRIEBEL ET AL. 2000, WASKOW 1995). Die weiblichen Pflanzen sind stärker verzweigt und reifen etwa 2 bis 5 Wochen später ab. Während die unscheinbaren grünen Blüten zu zweit in den Achseln kleiner Laubblätter zu Scheinähren vereinigt sind, werden die Pollen in endständigen lockeren Rispen getragen (FRANKE 1989). Die Samen der Hanfpflanze werden als Nüsse bezeichnet. Sie bestehen aus einer einsamigen, oberständigen, rundlich gestielten Schließfrucht und besitzen eine Länge von 2 bis 6 mm und einen Durchmesser von 2 bis 4 mm. Die Tausendkornmasse ist sortenabhängig und reicht von 17 bis 23 g (Bócsa ET AL. 2000). Man unterscheidet bei Hanf die so genannte Faserreife und die Samenreife. Die Faserreife ist erreicht, wenn mehr als die Hälfte der männlichen Blüten verwelkt ist und die ersten Früchte zu reifen beginnen (HÖPPNER UND MENGE-HARTMANN 1994; Bócsa ET AL. 2000). Die Samenreife ist erreicht, sobald die Samenschale verhärtet ist (Bócsa ET AL. 2000).

Nach WASKOW (1995) erreicht der Hanf Wuchshöhen von bis zu 4 m und nach HÖPPNER UND MENGE-HARTMANN (1994) sind die männlichen Pflanzen meist höher als die weiblichen. Bei eigenen Versuchen in Leimersheim erreichten die Pflanzen stellenweise eine Länge von mehr als 4 m. Die Stängeldurchmesser, die Bócsa ET AL. (2000) mit 4 bis 9 mm angeben, wurden in eigenen Versuchen bestätigt, wobei einzelne Pflanzen auch Stängeldurchmesser von bis zu 12 mm erreichten. Einzeln stehende

Pflanzen wurden sogar mit Stängeldurchmessern von mehr als 40 mm gemessen. In der folgenden Abbildung 2.1 ist der Stängelquerschnitt schematisch dargestellt.

2.2.2 Stängelaufbau

Das Markparenchym ist das Ursprungsgewebe, aus dem später das Teilungsgewebe entsteht. Das Teilungsgewebe wird als Kambium bezeichnet und ist bei dikotylen (zweikeimblättrigen) Pflanzen ringförmig angelegt. Es bildet nach innen das Xylem, den so genannten Holzkörper, und nach außen das Phloem, den so genannten Bast bzw. Rindenschicht. Im Xylem erfolgt der Wassertransport von der Wurzel zu den Blättern. Im Phloem werden die Assimilate transportiert. Bei den Bastfaserpflanzen sind, wie der Name es bezeichnet, die Fasern im Phloem lokalisiert.

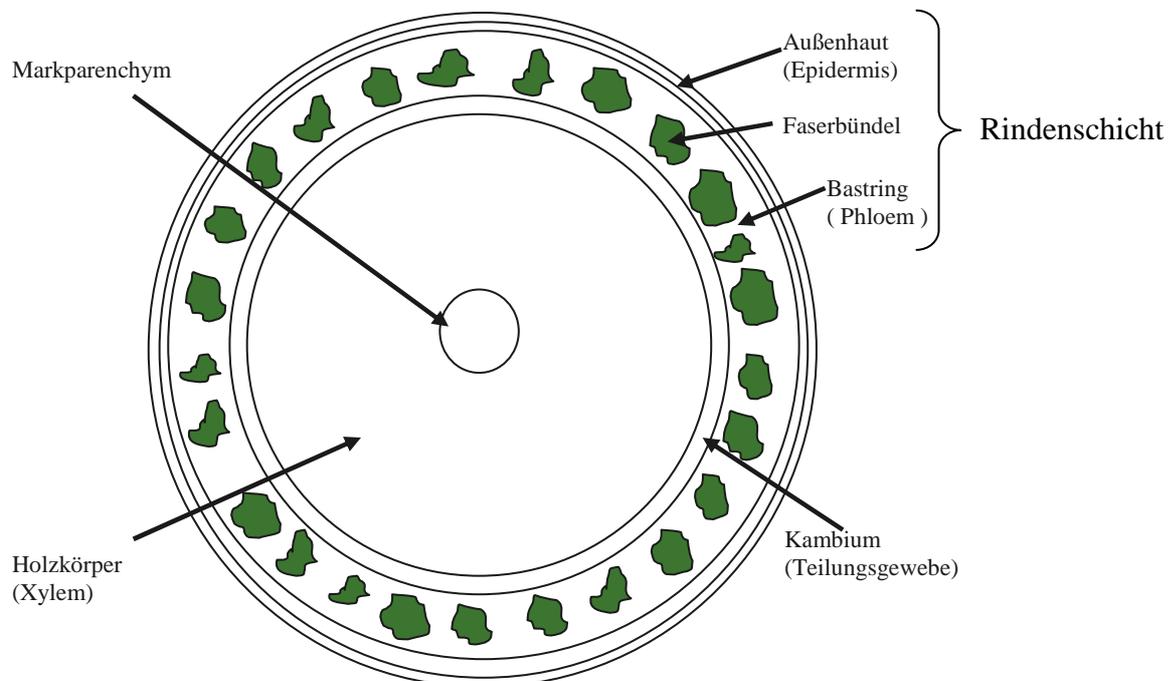


Abb. 2.1: Schematischer Querschnitt des Stängels einer Bastfaserpflanze

Die Fasern bestehen überwiegend aus Zellulose. Ihre Zellen sind durch Mittellamellen miteinander verbunden, welche sich durch das ganze Gewebe ziehen. Die Mittellamelle besteht vorwiegend aus Interzellulsubstanz, dem Pektin. Mit fortschreitender Pflanzenentwicklung verholzt diese Substanz (HEUSER 1927). Die Bastfasern bestehen aus durch Lignine und Pektine zu Bastfaserbündeln verbundenen Elementarfasern (SCHENEK 2000). In der Rindenschicht befinden sich ringsum ca. 20 bis 50

Bastfaserbündel. Ein Bastfaserbündel besteht jeweils aus 10 bis 50 Elementarfasern. Die Elementarfasern erreichen Längen von bis zu 20 mm (DRIELING 1999).

Die Faserbildung erfolgt ständig mit zunehmender vegetativer Entwicklung der Pflanze. Gegen Ende der Entwicklungsphase werden jedoch eher so genannte Sekundärfasern gebildet, die deutlich kürzer und weniger reißfest sind als die Primärfasern (CHRISTEN & SCHULZ 1997).

2.3 Produktion

2.3.1 Standort

Hanf wird in der Literatur auch als Pionierpflanze bezeichnet, die ohne große Ansprüche wachsen kann. Dennoch benötigt er für eine ertragreiche Ernte und die Erzeugung einer hervorragenden Faserqualität einen nährstoffreichen Standort (JAHN-DEESBACH 1965, BASSETTI et al. 1998, BÓCSA ET AL. 2000).

KÖRBER-GROHNE (1987) und BÓCSA ET AL. (2000) geben für einen erfolgreichen Hanfanbau tiefgründige humose Böden mit einer ausreichenden Wasserversorgung als Voraussetzungen an. Bei eigenen Versuchen war sehr deutlich zu beobachten, dass Pflanzen an verdichteten Stellen des Feldes, wie zum Beispiel dem Vorgewende, ihr Längenwachstum früher einstellen als der restliche Bestand, was SCHEEL schon 1937 beschrieb. Nach ihm hat der Anbau von Hanf auf tiefgründigen Böden von mindestens mittlerer Güte zu erfolgen. Dabei sollen schwer zu bearbeitende nasse Lehm- und Tonböden gemieden werden. Ferner sollte der Grundwasserspiegel aufgrund der Empfindlichkeit des Hanfes gegenüber Staunässe nicht höher als 0,5 m unter der Oberfläche liegen. Aufgrund des hohen Wasserbedarfes sind auch kiesige und sandige Böden zu meiden (SCHEEL 1937). In der landwirtschaftlichen Praxis sieht es jedoch so aus, dass die ökonomisch vorzüglicheren Kulturarten wie Weizen und Rüben auf den vorteilhafteren Mineralböden angebaut werden und der Hanf auf den für ihn suboptimalen Böden. Versuche in Sachsen-Anhalt (DEBRUCK & REICHARDT 2002) und der Oberlausitz (RÖHRICHT & SCHULZ 2003) haben gezeigt, dass bei ausreichender Wasserversorgung und entsprechender Düngung auch leichte Böden geeignet sind. Hanf reagiert stark auf Bodenunterschiede, was sich deutlich in Bestandesinhomogenitäten zeigt (ZÖPHEL ET AL. 2001). In Österreich wurde Hanf laut HOLZNER & GLAUNGER (2005) einige Jahre im Anbau gefördert. Dort ist nun zu beobachten, dass sich aus dem Kulturhanf der Wildhanf als Unkraut im Marchfeld und nördlichen Burgenland massenhaft etabliert hat.

Laut BÓCSA ET AL. (2000) soll der pH-Wert des Bodens über 5,8 liegen. CHRISTEN & SCHULZE (1995) empfehlen bei Mineralböden einen pH-Wert zwischen 7,0 und 7,4. KAHNT UND EUSTERSCHULTE beschreiben 1996, dass der Standortfaktor Boden und dessen fruchtfolgeabhängige N-Dynamik für die Ertrags- und Qualitätsbildung entscheidend sind. Hanf kann demnach die Nährstoffe N-reicher Böden nutzen und in Ertrag umsetzen (RÖHRICHT ET AL. 1997, MASTEL ET AL. 1998, LOHMEYER 1999), was bei der anderen einheimischen Bastfaserpflanze Lein zu Lagerbestand und gar zum Totalausfall der Ernte führen kann (KÄMMERLING 1990).

Die in Mittel- und Südosteuropa angebauten Hanfformen benötigen vom Auflaufen bis zur technischen Faserreife (bei etwa 110 bis 115 Tagen) eine Wärmesumme von 1.900 bis 2.000°C. Frühreife Sorten benötigen ca. 300°C weniger in der Wärmesumme. Bis zur Samenreife wird eine höhere Wärmesumme von 2.700 bis 3.000°C benötigt. Aus diesem Grund hat sich die Erzeugung von Saatgut in die wärmeren südlichen Länder verlagert BÓCSA ET AL. (2000).

An den Lichtbedarf stellt Hanf keine großen Ansprüche. Beim Anbau ist lediglich darauf zu achten, dass Hanf eine Kurztagspflanze ist, die bei einsetzend kürzer werdenden Tagen ihr Längenwachstum und damit auch den Strohertragszuwachs einstellt (FRANKE 1989, BÓCSA ET AL. 2000). Das pflanzenverfügbare Wasser im Boden ist für das Wachstum der Pflanze ein stark wachstumsbegrenzender Faktor. Hierbei spielen neben der Speicherkapazität des Bodens sowohl die Summe als auch die Häufigkeit und Verteilung der Niederschlagsereignisse eine entscheidende Rolle. Eine ausreichende Wasserversorgung während der Vegetationszeit ist für die Ausschöpfung des Ertragspotenzials bei Hanf sehr wichtig (DAMBROTH & SEEHUBER 1988, KRÜGER 2000). Versuche von HÖPPNER UND MENGE-HARTMANN zeigten 1994, dass die Sorte Kompolti in einem feuchten Jahr im Gegensatz zu einem vergleichsweise trockenen Jahr den Biomassertrag fast verdoppeln konnte. Der Transpirationskoeffizient des Hanfes liegt bei 300 bis 500 l kg⁻¹ Trockenmasse (TM) BÓCSA ET AL 2000. Mit diesem Wert liegt er über dem der Zuckerrübe mit 300 bis 400 l kg⁻¹ TM und unter dem des Winterweizens mit 500 bis 600 l kg⁻¹ TM. Ertragsrelevant sind vor allem die Niederschläge im Juni und Juli (NOVA-INSTITUT 2003). Hanf ist in der Lage, Wasser aus tieferen Bodenschichten von 2 bis 3 m aufzunehmen und bedeckt bei geschlossenem Bestand die Erde sehr stark, so dass sich die Erde und die Zone unter den Blättern nur langsam erwärmen. Dadurch wird die Evaporation bei geringen Windbewegungen stark verringert. Dies bewirkt, dass der Hanf mit den gefallen Niederschlägen besser haushalten kann als andere Kulturpflanzen. Aufgrund dieses Sachverhalts ist eine Beregnung bzw.

Bewässerung von Hanf nicht sinnvoll und unter Umständen sogar schädlich. BÓCSA ET AL 2000.

In der Literatur (HÖPPNER & MENGE-HARTMANN 1999, 2000, VETTER & GRAF 1999, KRÜGER 2000 STRUIK ET AL. 2000) werden die Erträge von Hanf mit einer Spanne von rund 70 bis 180 dt Trockenmasse je Hektar angegeben. Die höheren Erträge werden dabei von spätreiferen Sorten erzielt.

2.3.2 Aussaat

Hanf gilt als eine der wenigen selbstverträglichen Kulturfrüchte im Ackerbau (SCHEEL 1937). Er kann enge Getreidefruchtfolgen auflockern, was zu Ertragssteigerungen beim in der Regel nachfolgenden Winterweizen führt (BÓCSA ET AL 2000.) In Polen wird Hanf meist nach Zuckerrüben oder Kartoffeln angebaut (KOZŁOWSKI ET AL. 1995). Hanf fördert zudem eine schnelle Zersetzung von Wiesenumbbruchgrasnarben. Daher gilt er zum einen als gute Nachfrucht nach Wiesenumbbruch, zum anderen - aufgrund seiner starken Konkurrenzkraft und Unterdrückung von Unkraut - als hervorragende Vorfrucht zu Grünlandneuansaat (SCHEEL 1937 HANDBUCH 1995). Anfang des 20. Jahrhunderts wurde Hanf auch als Zwischenfrucht nach Futtergetreide angebaut. Dabei lag der Aussaatzeitpunkt Mitte Juni, was zu ertragsschwächeren Beständen führte (SCHEEL 1937). In der heutigen Zeit wird dies aufgrund des hohen Saatgutpreises und der gesetzlichen Verordnungen im Hanfanbau nicht mehr praktiziert.

Das Saatbett sollte aufgrund der Saatgutgröße feinkrümelig sein, um eine gleichmäßige Bedeckung des Saatgutes und einen guten Anschluss an den Boden zu erzielen (BÓCSA et al. 2000). Aufgrund der Empfindlichkeit des Hanfes gegenüber Verdichtungen ist der Anbau mit Pflugfurche dem der Minimalbodenbearbeitung in Bezug auf Stängel- und Faserertrag zu bevorzugen (RÖHRICHT & SCHULZ 2003). Die Aussaat erfolgt in Deutschland von Mitte April bis Mitte Mai bei Bodentemperaturen von mindestens 8°C bis 10°C. Diese gewährleisten die Voraussetzungen für eine gleichmäßige Keimung und eine gute Jungpflanzenentwicklung. Eine spätere Aussaat d.h. nach Ende Mai führt zu Ertragseinbußen (BÓCSA et al. 2000), u. a. weil Hanf eine Kurztagspflanze ist und somit beim Übergang von längeren zu kürzeren Tagen mit einsetzender Blüte (MASTEL et al. 1998) reagiert und infolge dessen das Längenwachstum einstellt (MEDIIVILLA et al. 1998).

Die Auswahl der Saatstärke ist von Faktoren wie der Bodenbeschaffenheit, der Sorte, dem Unkrautdruck und der Verwendungsrichtung abhängig. LOHMEYER (1997) geht bei

der Anbauempfehlung für NRW von einer Aussaatmenge von 40 kg ha⁻¹ zur Fasernutzung aus. Eine Erhöhung der Saatstärke von 100 auf 300 keimfähige Körner je Quadratmeter führte in Untersuchungen von KRÜGER (2000) nicht zur Ertragssteigerung. Auch bei MÜNZER (1999) wurden keine ansteigenden Erträge erzielt. Jedoch hat die Saatstärke einen Einfluss auf die Stängeldurchmesser der Hanfpflanzen. Mit Zunahme der Bestandesdichte werden Stängel mit einem geringeren Durchmesser ausgebildet (KRÜGER 2000, LISSON & MENDHAM 2000). Als vorzüglich gelten Stängel - den industriellen Anforderungen entsprechend - mit einem Durchmesser ≤ 10 mm (KARUS ET AL. 2000). Um den Stängeldurchmesser dementsprechend zu gewährleisten, gab der Erstverarbeiter NafiTech (NRW) die Empfehlung für eine Saatmenge von 35 – 40 kg ha⁻¹ an die Landwirte aus. Die Aussaatmenge von 40 kg ha⁻¹ entspricht bei der Sorte Fedora 17 einer Saatstärke von 216 kK m⁻². Andere Empfehlungen zur Aussaatstärke aus der Literatur belaufen sich auf 30 bis 60 kg Samen je Hektar (MEDIIVILLA et al. 1998) und 125 keimfähige Samen je m² (RÖHRICHT & SCHULZ 2003 S. 21).

Hanf prägt das Phänomen der *Selbstaussdünnung* (engl.: Self-thinning) sehr stark aus und bedeutet, dass es bei steigender Bestandesdichte zu einer Reduktion der Pflanzenanzahl im Laufe der Vegetationsperiode kommt (VAN DER WERF 1994, MEIJER 1995, LISSON & MENDHAM 2000). Bei der Wahl der Aussaatstärke muss die Selbstaussdünnung berücksichtigt werden. Um dünnere Stängel zu bekommen, ist die Verwendung einer höheren Saatstärke notwendig, was jedoch durch die Selbstaussdünnung zu keiner höheren Pflanzenzahl je Fläche bei der Ernte führt. Untersuchungen von MEDIIVILLA ET AL. (1998) ergaben einen Rückgang der Pflanzen um bis zu 60 %, was durch die Arbeiten von VON FRANKEN-WELZ (2003) bestätigt wurde. Neben der Saatstärke scheint auch eine erhöhte Stickstoffdüngung die Selbstaussdünnung zu verstärken (MEDIIVILLA et al. 1998, STRUIK ET AL. 2000).

2.3.3 Düngung

Wie bei allen Pflanzen mit einer hohen Produktion an Pflanzenmasse übt das Nährstoffangebot einen wesentlichen Einfluss auf das vegetative Wachstum aus. Infolge der kurzen Vegetationsdauer werden schnell große Mengen an Biomasse gebildet, so dass alle notwendigen Nährstoffe, im Besonderen Stickstoff und Kalium, ausreichend vorliegen müssen. In Untersuchungen von RÖHRICHT ET AL. (1997) stellte sich eine Erhöhung der Stickstoff-Düngung von 60 auf 120 kg ha⁻¹ als ertragswirksam heraus. Auf leichten Sandstandorten lohnt sich eine Steigerung der Stickstoffgabe auf 160 kg ha⁻¹ (MASTEL ET AL. 1998).

In der nachfolgenden Tabelle 2.2 ist der durchschnittliche Nährstoffbedarf von Hanf dargestellt (BÓCSA ET AL. 2000).

Tab 2.2: Durchschnittlicher Nährstoffbedarf von Hanf in kg je t Trockenmasse

<i>Nährstoff</i>	<i>kg Entzug je t TM Hanf</i>
Stickstoff	15 – 20
Phosphat	4 – 5
Kaliumoxid	15 - 20

Hanf hat die Eigenschaft, den Stickstoff bis kurz vor der Reife zu verwerten (BÓCSA et al. 2000). Durch das Angebot des Nährstoffes Stickstoff wird die Blattmasse und somit die mögliche Assimilationsrate bestimmt. Das Wachstum infolge einer Stängeldicken- und Größenzunahme spielt eine bedeutende Rolle in Bezug auf den Ertrag und die Qualität von Hanf (VAN DER WERF 1994 und JAHN-DEESBACH 1965). Ein zu geringes Stickstoffangebot leitet einen rascheren Übergang in die generative Phase ein mit einem daraus resultierenden geringeren Ertrag. Ein zu hohes Stickstoffangebot reduziert die Stängelzahl in Kombination mit größerem Stängeldurchmesser (HÖPPNER & MENGEHARTMANN 1994, MEDIAVILLA ET AL. 1998), die Vegetationszeit verlängert sich und es ist mit Qualitätseinbußen bei der Faser zu rechnen.

In vorhergehenden Kapiteln wurden Grundlagen zum Aufbau der Hanfpflanze und Düngung aufgezeigt. Der Einfluss der Höhe der Stickstoffdüngung und der Zeitdauer der Stickstoffaufnahme wurde von mehreren (im vorherigen Abschnitt erwähnten) Autoren untersucht. Die Untersuchungen bezogen sich auf mineralische und organische Düngung. Bei der mineralischen Düngung ist allerdings bisher nur auf die seit langem etablierte so genannte Kopfdüngung eingegangen worden.

Bei der Betrachtung der Wirk- und Verlagerungsmechanismen verschiedener Stickstoffformen in der Pflanze erscheint die Ernährung der Pflanze mit Stickstoff in Form der „CULTAN“-Düngung im Bezug auf Faserertrag und –eigenschaften als vielversprechend.

Um zu erläutern, warum das „CULTAN“-Düngesystem einen Einfluss auf den Fasergehalt und die Fasereigenschaften haben kann, wird in den folgenden Abschnitten in einem eigenen Kapitel auf die physiologischen und chemischen Vorgänge in der Pflanze und das „CULTAN“-Düngesystem eingegangen.

„CULTAN“-Düngung

„CULTAN“ ist wie eingangs erwähnt die die Abkürzung für Controlled Uptake Long Term Ammonium Nutrition und in „kontrolliert dauerhafte Pflanzenernährung durch Ammonium“ übersetzbar. Im Gegensatz zu den in den meisten landwirtschaftlichen Kulturen eingesetzten Düngungsformen ist hierbei die dominierende Stickstoffform das Ammonium.

In der Regel werden landwirtschaftliche Kulturen breitflächig mit Wirtschafts- und N-Mineraldüngern versorgt. Die Ammonium- und Harnstoffanteile werden nach MARSCHNER (1995) unter normalen Bedingungen rasch nitrifiziert und liegen als Nitrat in der Bodenlösung vor. Die überwiegende Stickstoffform bei dieser Düngung besteht demzufolge aus Nitrat. Es wird davon ausgegangen, dass die Pflanzen nicht in der Lage sind, bei freiem Stickstoffangebot die N-Aufnahme für ein optimales Wachstum zu regulieren bzw. dass sie vom Wachstumsstadium bedingt einen unterschiedlichen Stickstoffbedarf haben. Aus diesem Grund wird bei Pflanzen mit einem länger anhaltenden Stickstoffbedarf die Stickstoffdüngung gesplittet (FINCK 1992, SOMMER 2005).

Nitrat ist im gesamten Bodenprofil leicht beweglich und erreicht aufgrund seiner Wasserlöslichkeit den gesamten Wurzelraum der Pflanzen.

Bei einer breitflächig aus Nitrat- und Ammoniumhaltigen, wie z.B. Kalkammonsalpeter, ausgebrachten Kopfdüngung, (Applikation auf die Bodenoberfläche) wird das Ammonium durch Bodenlebewesen (aerober Bakterien) zu Nitrat umgewandelt. Vereinfacht ausgedrückt wird unter Zuhilfenahme von Enzymen als Katalysatoren zunächst das Ammonium durch Nitrosomas zu Nitrit oxidiert. Im anschließenden Schritt wird das Nitrit durch Nitrobacter zu Nitrat oxidiert.

In der Abbildung 2.2 ist ein typisches Wurzelbild von Mais dargestellt, welches aufgrund einer Kopfdüngung aus Kalkammonsalpeter entstanden ist dargestellt. In der Bodenlösung ist hauptsächlich Nitrat vorhanden und das Ammonium ist vor seiner Umwandlung zu Nitrat überwiegend an Tonteilchen gebunden.

In Abbildung 2.3 ist zum Vergleich das Wurzelbild der Ammoniumdepotdüngung dargestellt.

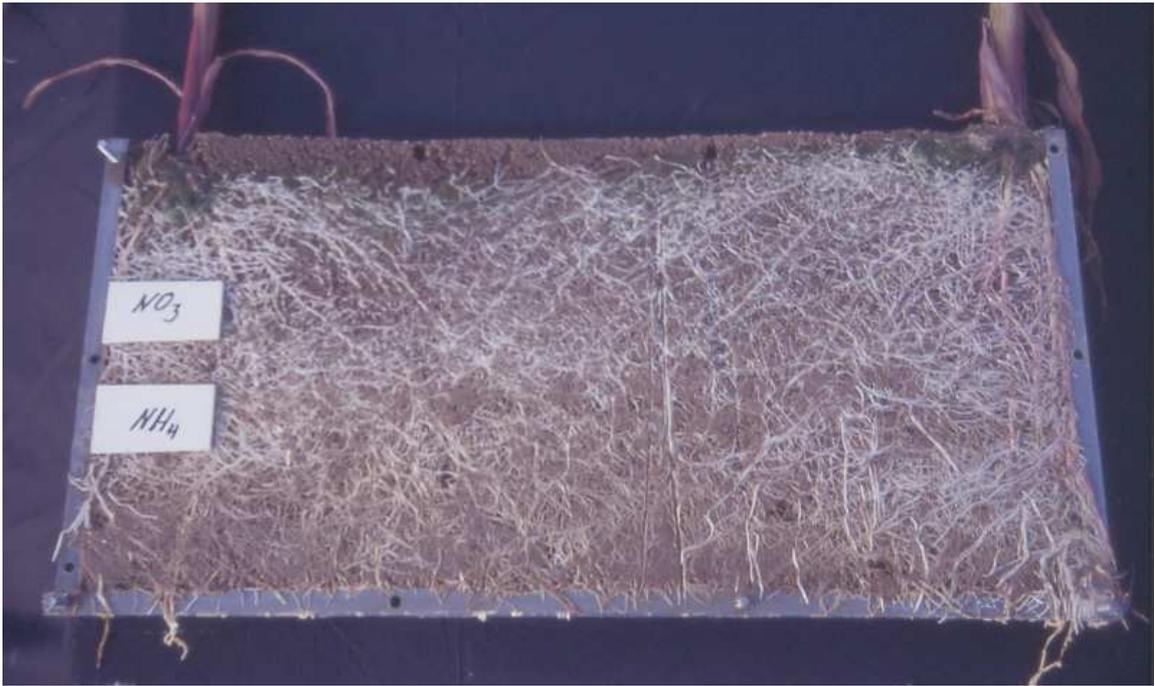


Abb. 2.2: Wurzelbild einer mit überwiegend NO_3^- versorgten Maispflanzen
Quelle: K. Sommer

Dabei besteht durch hohe Niederschlagsereignisse die Gefahr der Verlagerung in tiefere Bodenschichten, die von den Pflanzenwurzeln schlechter oder nicht erreicht werden können und damit die Gefahr der Auswaschung ins Grund- und damit Trinkwasser (SCHILLING 2000). Nitrat stellt somit eine instabile N-Quelle dar.

Nitrat ist die vorherrschende anorganische Stickstoffform im Boden und gelangt mit dem Wasserstrom vermehrt in die älteren stärker transpirierenden Blätter. Dort kommt es zu einer Anreicherung des Nitrats, da durch die Nitratreduktase eine unkontrollierte Reduktion des Nitrats (NO_3^-) zu Ammonium (NH_4^+) verhindert wird. Das angereicherte Nitrat kann in den Zellvakuolen gespeichert werden. Neben dem Nitrat wird ebenfalls Stickstoff als Harnstoff ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) mit dem Transpirationsstrom durch das Xylem in den Spross und vorwiegend in die ausgewachsenen Blätter transportiert. Harnstoff wird im Gegensatz zum Nitrat unkontrolliert (bzw. zwangsweise zur Vermeidung von Toxizitäten) in den Blättern zu Ammonium umgewandelt. Das Ammonium wird dann in den Blättern in den Proteinstoffwechsel übernommen und von dort als Amide oder Amino-Verbindungen in die wachsenden Teile des Sprosses verlagert. Bei übermäßig hoher Harnstoffaufnahme kann es bei Überlastung des Proteinstoffwechsels aufgrund eines zu hohen Ammoniumgehaltes in den Pflanzen zu Toxizitäten kommen (SOMMER 2005).

Die Verlagerung der Amide und Aminosäuren von den älteren in die jüngeren Pflanzenteile bewirkt eine schnellere Alterung der ausgewachsenen Pflanzenteile. Bezüglich des Proteinstoffwechsels dominieren Nitrat und Harnstoff die physiologischen

Aktivitäten. Aus diesem Grund werden diese Stickstoffformen als „sprossdominant“ bezeichnet, wobei Harnstoff dominanter wirkt als Nitrat.

Im Gegensatz zu Nitrat- und Harnstoffdüngern, die breitflächig ausgebracht werden, wird bei der „CULTAN“-Düngung ein ammoniumdominanter Dünger in hoher Konzentration punkt- oder linienförmig in den Boden eingebracht. Bei breitflächiger Ausbringung von Ammoniumdünger kann dieser bei einem Überangebot wie bei Harnstoff zu Toxizitäten in Form von Nekrosen führen (SOMMER 2005). Um dies zu verhindern, werden beim „CULTAN“-Verfahren Depots mit einer sehr hohen Konzentration an Ammonium-N angelegt. Hier kann das Ammonium nur in den Grenzbereichen des Depots von den Wurzelspitzen aufgenommen werden. Aufgrund seiner hohen Phytotoxizität des Ammoniumdepots kann nach SOMMER (2005) das Ammonium nur im Gleichgewicht mit der Synthese von Kohlenhydraten in den Blättern aufgenommen werden, denn in den Wurzelspitzen muss das Ammonium direkt in den Stoffwechsel organischer N-Verbindungen übernommen werden. Voraussetzung hierfür ist die ausreichende Versorgung der Wurzelspitzen mit Assimilaten aus den Blättern. Da die Wurzelspitzen bei der Ammoniumaufnahme ständig Kohlenhydrate verbrauchen, dreht sich ihr „Source-Sink“-Verhalten (source= Nährstoffquelle; sink=Nährstoffsenke) um. Die Wurzelspitzen werden zum Sink, zu dem ständig Assimilate transportiert werden müssen. Demzufolge wird bei wüchsigerem Wetter mehr Stickstoff aufgenommen als bei weniger wüchsigerem Wetter. Das bedeutet, dass sich die Pflanze nur bedarfsgerecht ernährt und keine Überversorgung erfährt.

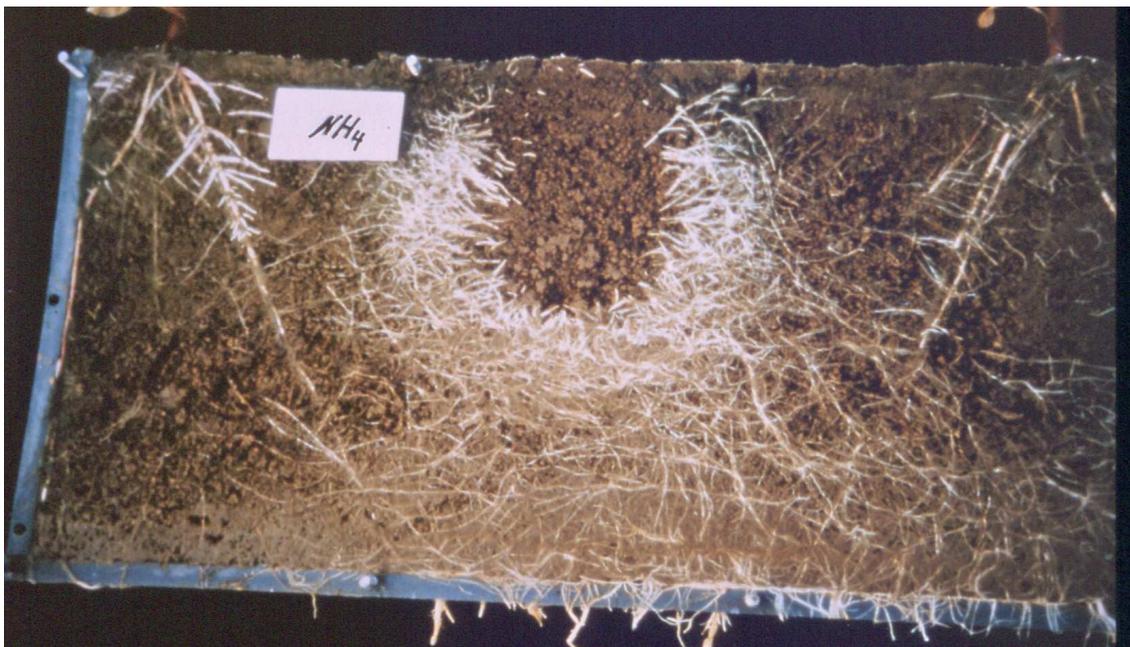


Abb. 2.3: Wurzelbild NH_4^+ versorgter Maispflanzen

Quelle: K. Sommer

Aufgrund der Attraktionswirkung der Wurzeln für Kohlenhydrate bei der „CULTAN“-Ernährung wird dieses Verfahren auch als wurzeldominant bezeichnet.

Nach der Bindung des Ammoniums als Amide und Aminosäuren werden diese im Phloem wieder zu anderen Sinks transportiert. Dabei handelt es sich zunächst um die anderen wachsenden Wurzelbereiche. Wenn diese zur Genüge versorgt sind, wird der Rest zu den jüngeren wachsenden Pflanzenteilen transportiert. Laut SOMMER (2005) ist dabei der zentrale Phloemstrom mit organischen N-Verbindungen ausgelastet. Dies ist der Grund dafür, dass auch ältere Blätter länger assimilatorisch tätig sind, weil kein Sink-Gefälle von den älteren Blättern zur Wurzel besteht.

Durch das stärkere Wurzelwachstum bei der „CULTAN“-Düngung wird der Hormonhaushalt der Pflanzen ebenfalls harmonisiert. In der Wurzel werden hauptsächlich Kinetine gebildet, die die Zellteilung begünstigen. Im Spross werden hauptsächlich Auxine und Gibberelline synthetisiert. Diese regulieren die Zellstreckung (MICHAEL & BERINGER 1980, ROPERIA & SOMMER 1996, ROPERIA 1998).

Aufgrund der Tatsache, dass bei der Ammonium-Depot-Düngung zur Aufnahme des Stickstoffs zuerst Assimilate durch den faserhaltigen Bast zur Wurzel transportiert werden müssen, um dann wieder in diesen Bahnen zu den Blättern zu gelangen, ist zu erwarten, dass dadurch der Fasergehalt und die Faserqualität beeinflusst werden.

Durch die beschriebene Auslastung des zentralen und faserhaltigen Phloemstromes und der Harmonisierung der Phytohormone zwischen Zellteilung und Zellstreckung liegt es nahe, dass die „CULTAN“-Düngung einen Einfluss auf den Fasergehalt und die Faserqualität hat.

2.3.4 Pflanzenschutz

Beim Anbau von Faserhanf kann auf Herbizide verzichtet werden, da der Hanf schon nach kurzer Zeit den Bestand so stark schließt, dass sich kaum Unkräuter entwickeln, die Schaden anrichten könnten (BÓCSA ET AL. 2000, HESCH ET AL. 1996, MEDIAVILLA ET AL. 1998, WITTRÖCK ET AL. 1995). Dies setzt jedoch voraus, dass eine ausreichende Aussaatstärke - laut BÓCSA ET AL. (2000) 40 kg je Hektar - verwendet wird. Beim Anbau von Hanf zur Gewinnung seiner Samen kann eine Herbizidmaßnahme notwendig werden, da in diesem Fall größere Reihenweiten verwendet werden. In Deutschland wird jedoch kaum Hanf zur Samengewinnung angebaut, da in der Regel die entsprechende Temperatursumme nicht erreicht wird.

Als tierische Schädlinge im Hanf sind der Hanferdfloh (*Psylliodes attenuata*) und die Kleine Hanfmotte (*Grapholita delineana*) zu erwähnen. Als Pilze treten am Hanf Grauschimmel (*Botrytis cinerea*) und der Hanfrost (*Melampsora cannabina*) auf. Ein vermehrtes Auftreten der Krankheiten ist in den letzten Jahren jedoch nicht zu beobachten und aufgrund des zurzeit verschwindend geringen Hanfanteils an Feldfrüchten nicht zu befürchten (BÓCSA ET AL. 2000, WITTRÖCK ET AL. 1995).

Laut ZÖPHEL ET AL. (2001) gilt der Hanfanbau als sehr umweltschonend. Es kann auf Fungizide und Herbizide verzichtet werden. Außerdem sind in Deutschland zurzeit keine Pflanzenschutzmittel für Hanf zugelassen. Wie weiter schon aufgeführt hilft Hanf zudem, Unkraut in Nachfolgefruchtarten zu unterdrücken. Auch ist die Ernte von Hanf nicht an schwere Landmaschinen gebunden, wie im nachfolgenden Kapitel beschrieben wird.

2.3.5 Ernte

Durch die Gesetzgebung bedingt erfolgt die Hanfernte in Deutschland ausschließlich in einer Trockengutkette. Für den Erhalt der Genehmigung zum Anbau von Faserhanf ist es notwendig, dass zuerst mit einem offiziell anerkannten Weiterverarbeiter ein Abnahmevertrag abgeschlossen wird. Diese Betriebe gibt es lediglich im Bereich des Trockenaufschlusses. In Deutschland ist der Absatz von Bastfasern als Bekleidungstextilien sehr gering. Abnehmer finden sich vorwiegend im Bereich außerhalb der Bekleidungsindustrie wie bei Produzenten von Geotextilien, Faserverbundwerk- und Dämmstoffen (HAMPICKE ET AL. 2007, GRAF ET AL. 2002). Aus diesem Grund soll im folgenden Teil auf die Beschreibung der Langfaserlinie verzichtet und nur auf die Wirrfaserlinie für Industriezwecke bei der Hanfernte eingegangen werden.

Für den Trockenaufschluss ist nach PAULITZ & GUSOVIUS (2007) unumstritten, dass beim Mähen des Hanfes eine gleichzeitige Einkürzung der Hanfstängel vorgenommen werden muss. Die Autoren stellen folgende agrotechnische Anforderungen an die Hanfstroh- und Hanfkörnerernte:

- schnelle und gleichmäßige Trocknung sowie Röste während der Feldliegezeit
- geringe Anfälligkeit bei bestehenden Wetterrisiken durch Regenperioden oder schlechte Abtrocknung etc.
- störungsfreie Schwadbearbeitung (z.B. Wenden des Schwads) einschließlich Schwadaufnahme beim Strohbergen unter Gewährung geringer Faser- und Schäbenverluste
- Sicherung von prozessförderlichen Stoffparametern (z.B. Unversehrtheit der Stängelteile) in den anschließenden Verfahrensstufen der Nachernte: Transport, Umschlag, Zwischenlagerung und Aufbereitung

In den folgenden Abschnitten werden verschiedene Verfahren der Hanfmahd und Stängелеinkürzung erläutert. Als Entscheidungsgrundlage für die Anwendung der verschiedenen Ernteverfahren werden meist die anfallenden Verfahrenskosten herangezogen. Diese setzen sich aus den Maschinenkosten, dem Arbeitsaufwand sowie dem Energiebedarf zusammen (GUSOVIUS 2002). Allerdings gibt es nach verschiedenen Literaturquellen eine Abhängigkeit der Qualitätskennwerte wie Röstgrad, Faserfeinheit sowie Feinheitsfestigkeiten von der Mahdart wie auch unterschiedliche Faserausbeuten und Schäbengehalte je nach Art des Mähens, dem Grad der Einkürzung und der Schwadgestaltung. Diese Faktoren beeinflussen auch die Feldaufbereitung und das Ausmaß der Feldliegezeiten (PALLESEN 1996; MARTENS & MÜSSIG 2000; STOLZENBURG 2000; GUSOVIUS 2002).

2.3.5.1 Mehrebenenschnitt

Das Prinzip des Mehrebenenschnittes besteht darin, dass der stehende Bestand in mehreren Höhen horizontal durchtrennt wird. Nachfolgend werden für dieses Verfahren das Messerbalken- sowie das Blüchersystem vorgestellt.

Messerbalkensystem

Um möglichst schon vorhandene und praxisbewährte Technik zu verwenden und somit auf die aufwändige Konstruktion von Spezialmaschinen zu verzichten, entstand ein Konzept mit einfachen Doppelmesserbalkenmähdwerken (EHLERT ET AL. 1997). Das System zeichnet sich durch ein günstiges Preis-Leistungsverhältnis aus (PAULITZ & GUSOVIVUS 2007).

Am Institut für Landtechnik Bonn wurde dieses System getestet. Es besteht aus mehreren Doppelmesserbalken, die in verschiedenen Höhen angeordnet sind. In der folgenden Abbildung 2.4 ist die Einkürzung der Pflanzen um die Hälfte zu sehen.



Abb. 2.4: Mehrebenenschnittsystem Messerbalken mit 2 Schnittebenen

Je nach Verwendungszweck und Aufbereitung können die Schnittlängen durch weitere Schnittebenen, wie z.B. am Frontlader variiert werden. Zur Ernte der Hanfkörner ist

hierbei auch das Sammeln der Fruchtstände in einem Auffangbehälter oder ein Überladen in ein nebenher fahrendes Fahrzeug denkbar.

Ernteverfahren mit Zwei- bis Vierfach-Schnittebenen sind in Deutschland (Bayern, Sachsen-Anhalt, Sachsen und Thüringen) sowie in Ungarn und Tschechien im Einsatz (PAULITZ & GUSOVIVUS 2007). Als Schwachpunkte gelten jedoch die niedrige Arbeitsgeschwindigkeit und die geringe Arbeitsbreite. Die Schnittlänge ist außerdem von der Höhe des Bestandes abhängig. Je nach Verwendungszweck (mit oder ohne Röste) ist hierbei durch die breite Ablage der Arbeitsschritt des Schwadens notwendig.

System *Blücher*

Von der Firma Kranemann Gartenbaumaschinen wurde ein anderes Verfahren patentiert, das aus zwei bzw. vier vertikal stehenden Trommeln, die den stehenden Bestand erfassen, besteht. Unter den Trommeln wird der Bestand mittels zweier Schneidscheiben abgeschnitten. Zwischen den Trommeln wird der Bestand eingekürzt und die Pflanzenteile in einem hohen lockeren Schwad abgelegt. Das viertrommelige Gerät ist in der Lage, die Fruchtstände in einem getrennten Schwad abzulegen, so dass dieser von einem Drescher mit Pick-up-Aufnahme geerntet werden können.

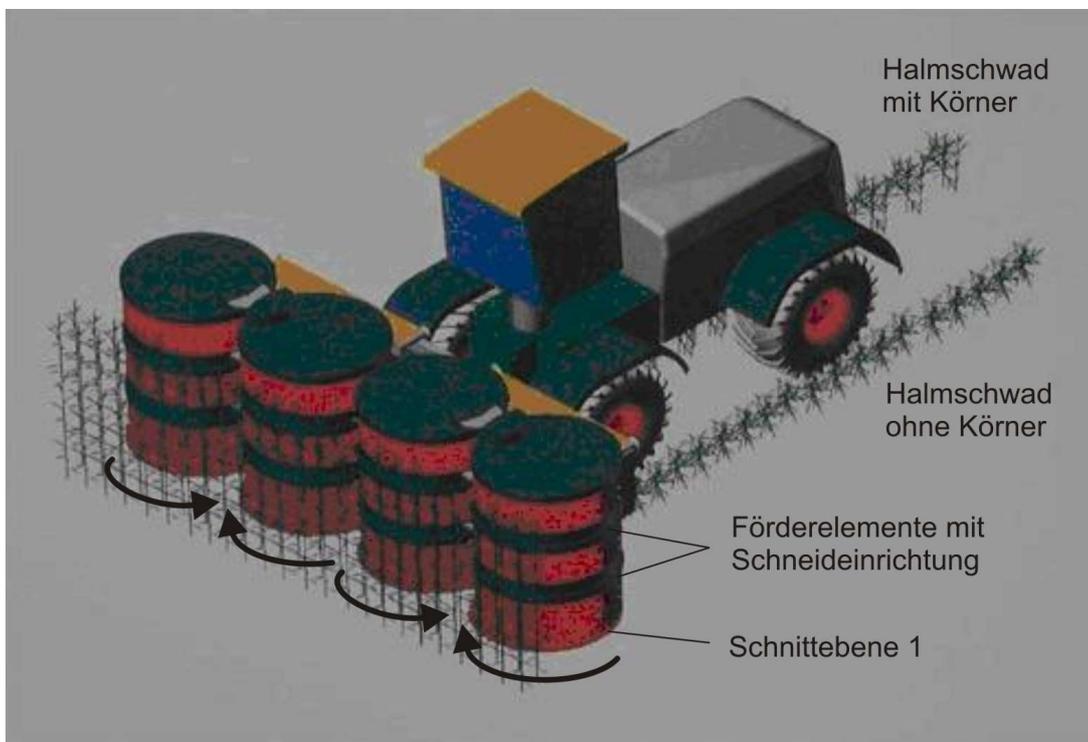


Abb. 2.5: Mehrebenenschnittsystem *Blücher 4*

(Quelle: Kranemann)

PAULITZ & GUSOVIUS (2007) favorisieren das Grundprinzip des Stufenmähens mittels Messerbalken, da es in diesem Bereich seit 2005 leistungsfähigere Lösungen gibt als bisher. Dazu tragen die Ergebnisse von GUSOVIUS (2002) bei, der folgende Vorteile des Stufenmähens hervorhebt:

- optimale Bedingungen zur Trocknung und Feldröste durch Breitschwad
- Funktionssicherheit bei extremen Einsatzbedingungen (z.B. feuchte Witterung)
- eine hohe Flächenleistung von bis zu 5 ha h⁻¹ bei Schnittbreiten von bis zu 6 m
- um 35 – 40 % geringere Verfahrenskosten als bei den anderen vorgestellten Einkürzungssystemen

2.3.5.2 Gutstromeinkürzung

Bei diesem System (auch System Hempcut genannt) wird der Bestand mit einem Feldhäcksler mittels reihenunabhängigen Maisschneidwerks gemäht und einer modifizierten Häckseltrommel zugeführt, die die Stängel auf ca. 60 cm einkürzt. Die Modifikation der Häckseltrommel besteht darin, dass die Messerzahl auf eines reduziert ist. Um eine Unwucht zu vermeiden, verfügt die Trommel über ein Gegengewicht für das Messer. Da die Fasern die Eigenschaft besitzen, sich um drehende Teile zu wickeln, müssen rotierende Teile neben den schon vorhandenen Abdeckungen zusätzlich besonders geschützt werden. Statt den Gutstrom dem Überladekrümmer zuzuführen, ist das Gehäuse der Häckseltrommel hinten geöffnet, so dass der Gutstrom in Schwaden auf den Boden abgelegt wird.



Abb.2.6: Gutstromeinkürzung bei Hanf mittels System *Hemptcut*

Das System *Hemptcut* ist sowohl als Variante für den Traktoranbau mit Rückfahreinrichtung als auch als selbstfahrende Arbeitsmaschine durch Umbau eines Feldhäckslers oder als Spezialträgerfahrzeug erhältlich.

2.3.5.3 Hanfdrusch

Die Hanfkörnerernte erfolgt durch Drusch. Um das Dreschwerk durch die i.d.R. über 2 m langen Pflanzen nicht zu stark zu beanspruchen, wird beim Mähdrusch das Schneidwerk so hoch wie möglich eingestellt (HAMPICKE ET AL. 2007). Dadurch wird verhindert, dass das gesamte Pflanzenmaterial durch den Drescher muss. Da Hanf um ein Vielfaches höher wird als Getreide, hat sich beim Hanfdrusch die Verwendung von Mähdreschern mit Hangausgleich durchgesetzt. Durch das Drehen beider Achsschenkel kann das Schneidwerk weiter oben an den Pflanzen angesetzt werden, so dass lediglich der Samenstand aufgenommen wird. Anschließend wird dann in einem zweiten Arbeitsschritt die Restpflanze gemäht und getrocknet.

2.3.5.4 Hanfvollernter

Um beide Arbeitsschritte zu vereinen, wurde in einem von der „Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe“ geförderten Projekt unter Mitarbeit verschiedener Firmen ein Prototyp eines Hanfvollernters entwickelt, der auf einem handelsüblichen Mähdrescher basiert. Hierbei wird mittels eines modifizierten reihenunabhängigen Mähwerkes der Bestand aufgenommen und die Hanfstängel auf 60 cm eingekürzt. Anschließend wird der Gutstrom durch den Mähdrescher geführt, der nach herkömmlichem Tangentialdruschsystem die Körner ausdrischt. Dies hat zur Folge, dass das gesamte Pflanzenmaterial durch das Dreschwerk geführt wird und dieses stark beansprucht. Weiterhin wurden auch stärkere Verletzungen der Hanfstängel und somit höhere Strohverluste beim Vergleich des Vollernters mit dem Hempcut-System festgestellt (MASTEL 2002). Der Strohverlust wurde mit 9 % ($0,8 \text{ t ha}^{-1}$) quantifiziert. Gleichzeitig wurde jedoch eine zusätzliche Wertschöpfung von ca. 1000 kg gereinigter Hanfkörner erzielt.

2.3.5.5 Weitere Verfahrensschritte

Um eine homogene Trocknung des Erntegutes zu gewährleisten und den Trocknungsprozess zu beschleunigen, werden bei allen beschriebenen Systemen die Schwaden mit einem handelsüblichen Schwader ein- oder auch mehrmals gewendet.

Die Bergung des Hanfstrohs kann mit einem Restfeuchtegehalt von 16 bis 18 % erfolgen. In den Anfangszeiten des Wiederaanbaus von Hanf in Deutschland (und vorher schon in Traditionsanbaugebieten Frankreichs) wurden hierfür aufgrund der einfachen Technik und des geringen Anpassungsbedarfes an die Pflanze überwiegend Rundballenpressen eingesetzt (TUBACH & NEBEL 1997). Vorteilig ist ebenfalls noch die Möglichkeit, Naturfasern als Bindematerial zu verwenden, was die Auflösung der Ballen vereinfacht. Nachteilig an Rundballen ist der im Bezug auf die Raumausnutzung ineffektive Transport und Lagerraumbedarf. Durch weitere Mechanisierungsmittel wie Spezialtransportfahrzeuge und Verladegeräte sowie Adaption der Quaderballenpressen hat sich der Trend zur Bergung von Hanfstroh in Richtung Quaderballen entwickelt (PAULITZ & GUSOVIVUS 2007). Dabei ist eine weitere Auslastung dieser Geräte außerhalb der Getreidestrohernte und der Heuwerbung möglich.

Um die arbeits- und kostenintensive Strohbergung zu umgehen und das Wetterrisiko bei der Ernte zu minimieren, wurden Überlegungen in Richtung Feuchtkonservierung von Hanf angestellt. Die Faserqualität wird bei der Feuchtkonservierung nach bisherigem

Kenntnisstand gemindert. In wie weit sich dies auf die Verwendbarkeit der Fasern und Schäben auswirkt, war Gegenstand der Untersuchungen von GUSOVIUS (2002). Im Bezug auf das Qualitätsmanagement im Naturfaseranbau ist dieser Punkt in Gebieten mit hoher Niederschlagserwartung während der Ernteperiode ebenfalls von großem Interesse. Am ATB in Potsdam wurde weiterhin die Eignung von Hanf zur Silierung untersucht (FÜRL 2006). PACENKA stellte 2005 eine deutliche Reduktion der Faserfestigkeit durch die Feuchtkonservierung mittels organischer Säuren fest.

2.3.6 Faseraufbereitung

Bei der Faseraufbereitung muss die in Kap. 2.2 beschriebene Mittellamelle aufgelöst werden. Dies kann auf biologische, chemische, physikalische und mechanische Weise erfolgen. Das wesentliche biologische Verfahren ist die so genannte Röste. Hier wird zwischen Feld- (bzw. Tau-) und Wasserröste unterschieden. Bei der Feldröste verbleibt das Material nach dem Schneiden breitflächig oder im Schwad auf dem Feld. Bei feuchtwarmen Umweltbedingungen werden die Mittellamellen, Pektine und Lignine zwischen den Fasern durch Bakterien- und Pilzenzyme aufgeschlossen. Bei der Wasserröste werden die Pflanzenteile in Wasserbecken behandelt. Dies kann unter verschiedenen Bedingungen geschehen. Dabei können Temperaturen und Belüftungsbedingungen (aerob, anaerob) variiert werden. Teilweise kommt es auch zum Einsatz von Bakterienkulturen oder Chemikalien, was dann eine Abwasseraufbereitung vonnöten macht (HESCH ET AL. 1996, TUBACH & NEBEL 1997, HEUSER 1927). In Deutschland hat die Wasserröste keine Bedeutung. Je nach Bergezeitpunkt und Witterung röstet das Hanfstroh auf dem Feld und wird dann in Faseraufschlussanlagen weiteren Verarbeitungsprozessen nach verschiedenen Konzepten ausgesetzt.

Diese Konzepte beinhalten:

- den Primäraufschluss durch Brechen des Stängelmaterials (PAULITZ & GUSOVIUS 2007)
- das Prallprinzip, wobei der Verbund von Faser und Holz durch direkte oder indirekte Einwirkung mechanischer Energie durch Prall aufgelöst wird (PAULITZ & GUSOVIUS 2007)
- ein physikalisches Verfahren mittels Dampfdruck oder Ultraschall. Bei diesem Verfahren können die Fasern bis auf die Elementarfasern aufgelöst werden, was als „Cotonisierung“ bezeichnet wird (van DAM 1995). Die physikalischen Methoden werden z.T. auch mit enzymatischen oder chemischen Verfahren kombiniert.

2.3.7 Qualitätseigenschaften der Hanfernteprodukte

Neben der Ertragsleistung ist für einen erfolgreichen Anbau von Faserpflanzen die Erzielung bestimmter Qualitätseigenschaften von entscheidender Bedeutung. So stellen für eine Verstärkung von Faserverbundwerkstoffen die Faserfestigkeit und die Wasserdampfaufnahme wichtige Kriterien dar. Die Faserfestigkeit soll hoch und die Wasserdampfaufnahme niedrig sein (KEIJZER & METZ 1994; MIECK ET AL. 1994). Innerhalb der Hanffaserproduktion gibt es unterschiedliche Auffassungen, ob durch die Sortenwahl die mechanischen Eigenschaften beeinflusst werden können. HÖPPNER & MENGE-HARTMANN (2000) stellten Sortendifferenzen fest, wohingegen MÜNZER (1999) der Sortenwahl eine geringere Bedeutung beimisst und den Standortsunterschieden den größten Einfluss auf die Fasereigenschaften zuspricht.

Im Gegensatz zum Lein, bei dem eine Erhöhung der N-Gabe eine Verschlechterung der Faserqualität hervorruft (RÖHRICHT 1997), herrschen über die Beeinflussung der Hanffaserqualität durch eine quantitative Änderung der Stickstoffverabreichung unterschiedliche Meinungen. MENGE-HARTMANN & HÖPPNER (1995) ermittelten eine Verschlechterung der Höchstzugkraft mit zunehmender N-Gabe, RÖHRICHT ET AL. (1997) dagegen eine Verbesserung.

3 Material und Methoden

In Bezug auf die Beeinflussung der Qualität der Wert gebenden Hanfpflanzenteile, wurden zwei Ansätze verfolgt und somit zwei verschiedene Versuchsfragen bearbeitet. Zum einen wurden im Bereich der Schäbenherstellung Häckselversuche zur Grünentholzung der Hanfpflanzen in Großparzellen bzw. in Praxisschlägen von Landwirten durchgeführt. Zum anderen wurden im Bereich der Fasererzeugung Exaktversuche mit Kleinparzellen angelegt. Untersuchungsparameter war hierbei die Stickstoffdüngung, insbesondere die im Literaturteil beschriebene „CULTAN“-Düngung.

3.1 Grünentholzung

Eine erhöhte Nachfrage durch Verwendung von Schäben als Dämmstoffe und einen starken Rückgang der Verfügbarkeit in Deutschland wirft die Frage auf, ob es nicht möglich ist, den Primärproduzenten, also den Landwirten, den ersten Veredelungsschritt zu überlassen, um den Anbau von Hanf in Deutschland wieder finanziell lukrativ zu machen. Um dieser Fragestellung nachzugehen, wurden Untersuchungen geplant. Auf die Schäbenproduktion und -qualität wurde bisher nicht eingegangen. Mit steigender Wertschöpfung der Schäben und immer stärker eingeschränkter Verfügbarkeit derselben ist die Fragestellung interessant, wie sich Schäben möglichst preiswert erzeugen lassen. Es ist aus wirtschaftlicher Sicht nicht möglich, Schäben zu produzieren, ohne die Nebenprodukte (in diesem Fall der Fasern) zu kostendeckenden Preisen abzusetzen (s. Kap. 2.1). Wie sich die Qualität der Fasern beim Verarbeitungsprozess in ungetrocknetem Zustand verhält und die Trennung der Schäben und Fasern sich realisieren lassen, stand im Focus der nachfolgend beschriebenen Versuche.

Wie beim Stand des Wissens schon erläutert wurde, ist der übliche Weg, Hanf in der Trockenkette zu ernten, ihn mit einem modifizierten Häcksler zu mähen und gleichzeitig auf ca. 60 cm einzukürzen. Anschließend werden die Fasern und der Holzteil in der Aufschlussanlage überwiegend durch physikalische Methoden wie Brechen oder das Prallsystem getrennt (PAULITZ & GUSOVIVUS, 2007). In getrocknetem Zustand wird dabei mehr Energie benötigt als in frischem, jedoch leidet die Faserqualität nach GUSOVIVUS (2002) nicht so stark wie bei der so genannten Grünentholzung. Bei seinen Versuchen stellte er durch die Aufarbeitung auf dem Feld schon zu Beginn der Feldliegezeit eine Minderung der Kollektivfestigkeit der Fasern fest, wobei die Varianten ohne Aufbereitung auf dem Feld keine signifikanten Unterschiede über die gesamte Feldliegezeit aufwiesen.

Die Versuchsidee bestand darin, den Hanf mittels eines handelsüblichen Feldhäckslers mit reihenunabhängigem Maisschneidwerk zu mähen, ihn dann in der an der Messerzahl reduzierten Häckseltrommel zu zerkleinern und die Fasern vom Holzteil zu trennen. Das Prinzip beruht darauf, dass die noch vorhandenen Messer die Fasern einkürzen, zusätzlich aber ein Teil der Fasern zwischen Gegenschneide und Messer ohne geschnitten zu werden, hindurch gezogen werden und so vom Holzteil entfernt wird.

Da für die Schäbenproduktion der Holzteil zerkleinert werden muss, sind im Gegensatz zur modifizierten Häckseltrommel des Systems Hempcut die Messerträger in der Trommel verblieben. Diese sollten das Holz zerschlagen.

Die Versuche zur Grünentholzung fanden in zwei aufeinander folgenden Jahren statt. Da sie mit handelsüblichen Feldhäckslern durchgeführt wurden, werden diese Versuche in den folgenden Abschnitten als Häckselversuche bezeichnet. Als Versuchsorte wurden Flächen von landwirtschaftlichen Betrieben in der Nähe von Schifferstadt gewählt, da dort ein Dämmstoffhersteller ansässig ist, der Hanfschäben zu Trittschalldämmstoffen veredelt. Dieser Schäbenverarbeiter besitzt entsprechende Technik, Schäben in verschiedene Fraktionen zu trennen. Ebenfalls ist an dem Betrieb ein Sieb vorhanden, mit dem für die Versuche die Schäben und die Fasern voneinander getrennt werden sollten.

Versuchsjahr 2003

Im Jahr 2003 befand sich die Versuchsfläche in Leimersheim. Auf der Fläche wurden die Sorten Futura und Felina ausgesät. Die Ernte fand im August mit einem Feldhäcksler, der mit einer Doppelmessertrommel ausgestattet war, statt. Die Messertrommel besaß 12 Doppelmesser und gewährleistete somit, dass sie durch die Variation der Messerzahl so modifiziert werden konnte, dass jedes zweite oder jedes dritte Messer in der Maschine verbleiben konnte, um gleichmäßige Schnittlängen zu realisieren.

Da die Erntemaschine modifiziert wurde, konnten die nötigen Einstellungen für den Häcksler anhand von Berechnungen zum Teil nur theoretisch bestimmt werden. Aufgrund dieser Tatsache wurden zunächst verschiedene Einstellungen gewählt, um später nach dem Ausschlussprinzip die für die Versuche notwendigen Einstellungen herauszufiltern.

Der Häcksler war mit einem handelsüblichen reihenunabhängigen Maisschneidwerk von 6 m Arbeitsbreite ausgerüstet.



Abb. 3.1: Reihenunabhängiger Erntevorsatz für Feldhäcksler, der für die Hanfernte eingesetzt wurde

Um die Länge der Fasern zu beeinflussen, wurden drei verschiedene Häcksellängen verwendet. Dafür wurde aus den zur Verfügung stehenden theoretischen Häcksellängen die Varianten 9 mm, 14 mm und 17 mm gewählt.

Da diese Häcksellängen für die Verwendung der Fasern zu kurz sind, wurden jeweils zwei hintereinander liegende Messer entfernt und das dritte Messer belassen. Die entfernten Messer wurden zum Schutz der Messerträger durch so genannte Blindmesser ersetzt. Zusätzlich führte dies zu einer stärkeren Schlagkraft auf die zugeführten Pflanzen. Die unterschiedlichen Schnittlängen wurden durch entsprechende Getriebeeinstellungen der Einzugstrommel erzielt. In der folgenden Abbildung 3.2 ist die Anordnung der Messer dargestellt.

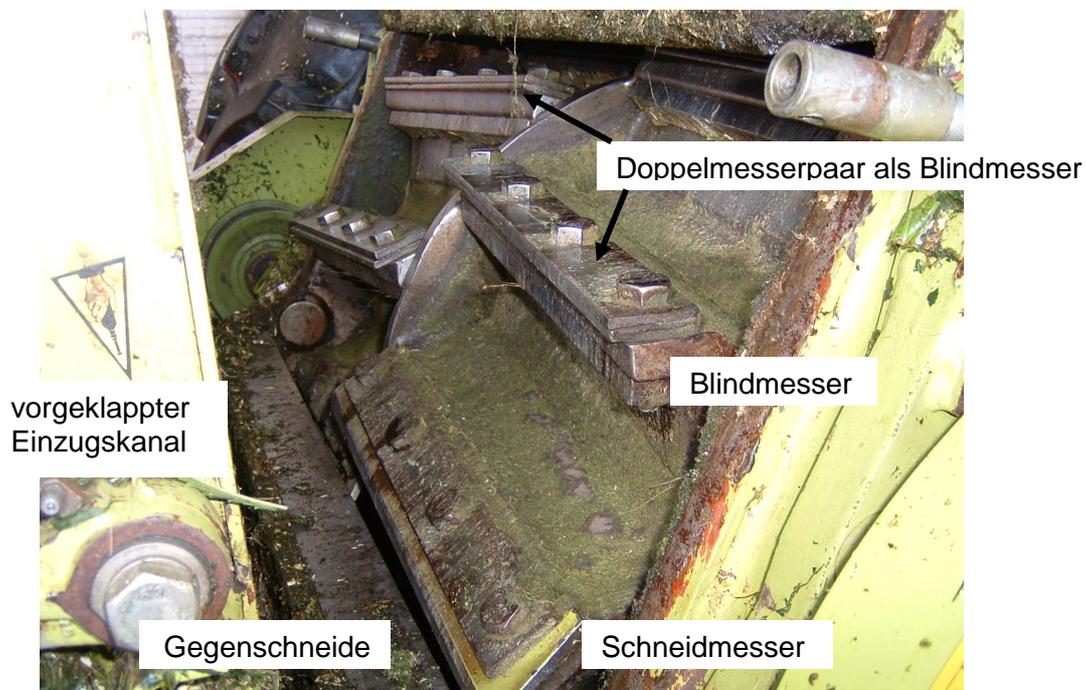


Abb. 3.2: Feldhäckslermessertrommel mit 12 Doppelmessern; hier mit Austausch von Messern mit „Blindmessern“

Durch die Entfernung der Messer vergrößerte sich die theoretische Häcksellänge auf 27 mm, 42 mm und 51 mm. Im Folgenden wird die Variante mit der theoretischen Häcksellänge von 51 mm mit „lang“, die mit 42 mm mit „mittel“ und die mit 27 mm mit „kurz“ bezeichnet.

Um längere Fasern zu erzielen und um weniger Beschädigungen zu verursachen, wurde eine zusätzliche Versuchsvariante gewählt, bei der die Gegenschneide statt 0 mm (Gegenschneide geschlossen) mit 3 mm Abstand (Gegenschneide offen) vom Messer eingestellt wurde.

In Abbildungen 3.3 ist das Schnittgut bei mittlerer Häcksellänge und geschlossener Gegenschneide dargestellt und Abbildung 3.4 bei geöffneter Gegenschneide. Es sind deutlich die Unterschiede des Schnittgutes bei geschlossener und geöffneter Gegenschneide anhand der Faserlängen zu unterscheiden.

Als Referenzmaterial wurden Hanfstängel von Hand geerntet, getrocknet und die entsprechenden Fraktionen mit einer Laborentholzungsmaschine voneinander getrennt. Weiterhin wurde Stängeln bereits auf dem Feld in frischem Zustand der Bast abgezogen und getrocknet.

Um die Schäbengröße zu beeinflussen, wurde eine Variante mit zugeschaltetem Corncracker gewählt.

Nach etwa der Hälfte des Hanfbestandes wurde die Ernte unterbrochen, um zu einem späteren Zeitpunkt Stängel ohne Blätter und in fortgeschrittener Reife untersuchen zu können. Die Versuche wurden Anfang November mit einer vergleichbaren Maschine fortgesetzt.

Das gehäckselte Material wurde jeweils mittels Taumelsieb fraktioniert. Das Taumelsieb bestand aus 3 Sieben. Das obere Sieb war eine Langlochausführung, mit der Fasern und grobe Partikel entfernt wurden. Das Mittlere Sieb besaß eine Lochung von 6 mm und das untere Sieb eine Lochung von 2 mm. Die Schäben mit der Größenklasse von 2 bis 6 mm gingen in die Produktion. Die Fraktion über 6 mm Größe durchlief eine Mühle und gelangte wieder zurück auf das Sieb. Die Fraktion unter 2 mm Größe wurde als Abfall anderen Verwertungszwecken (wie z.B. der thermischen Verwertung) zugeführt.

Um die Qualität der Fasern zu bestimmen, wurden an mehreren Stellen des aufgefangenen Materials Proben entnommen. Um Schimmelbildung oder eine Gärung des Materials zu vermeiden, ist es in luftdurchlässigen Papiertüten zum Institut für Landtechnik nach Bonn transportiert und dort über mehrere Tage luftgetrocknet worden. Durch das Abpacken der Proben in kleineren Partien war es möglich, diese repräsentativ vom gesamten Bestand zu entnehmen. Zur Prüfung der Fasern wurden

die Proben aus dem gesamten Materialgemisch ebenfalls randomisiert aus verschiedenen Baststrängen entnommen. Die Qualitätsprüfung wird später in diesem Kapitel beschrieben.



Abb. 3.3: Häckselgut bei mittlerer Häcksellängeneinstellung und geschlossener Gegenschneide



Abb. 3.4: Häckselgut bei geöffneter Gegenschneide

Versuchsjahr 2004

Im **Jahr 2004** wurde Hanf am Stadtrand von Speyer angebaut. Bei der verwendeten Hanfsorte handelte es sich um Fedora 17, die auch in den Düngungsversuchen in Köln-Wesseling verwendet wurde. Die Häcksellängen wurden entsprechend dem Jahr 2003 gewählt.



Abb. 3.5: Hanfswaden Speyer 2004



Abb. 3.6: Manuelle Zuführung des Hanfes in den Häcksler

Auf die Variante mit Abstand zwischen Gegenschneide und Messer wurde 2004 verzichtet. Um einen Schaden am Schneidwerk zu vermeiden, wurde der Hanfbestand mit einem Messerbalken gemäht und von Hand dem Feldhäcksler zugeführt. Aus sicherheitstechnischen Gründen wurde das Pflanzenmaterial erst auf einen Tisch gelegt und anschließend vom Feldhäcksler eingezogen.

Das Häckselgut wurde wie im Vorjahr mit einem Taumelsieb in seine Fraktionen getrennt. Als Referenzmaterial dienten in diesem Versuchsjahr entnommene ganze Stängel, die mit der Labormaschine entholzt wurden.

Versuchsjahr 2005

Im dritten Versuchsjahr 2005 wurden die Untersuchungen in Bonn in reduziertem Umfang durchgeführt. Dazu wurden Pflanzen aus der Versuchsanstellung des im folgenden Teil dargestellten „CULTAN“-Versuchs entnommen und mit dem am Institut für Landtechnik vorhandenen Probenhäcksler behandelt.

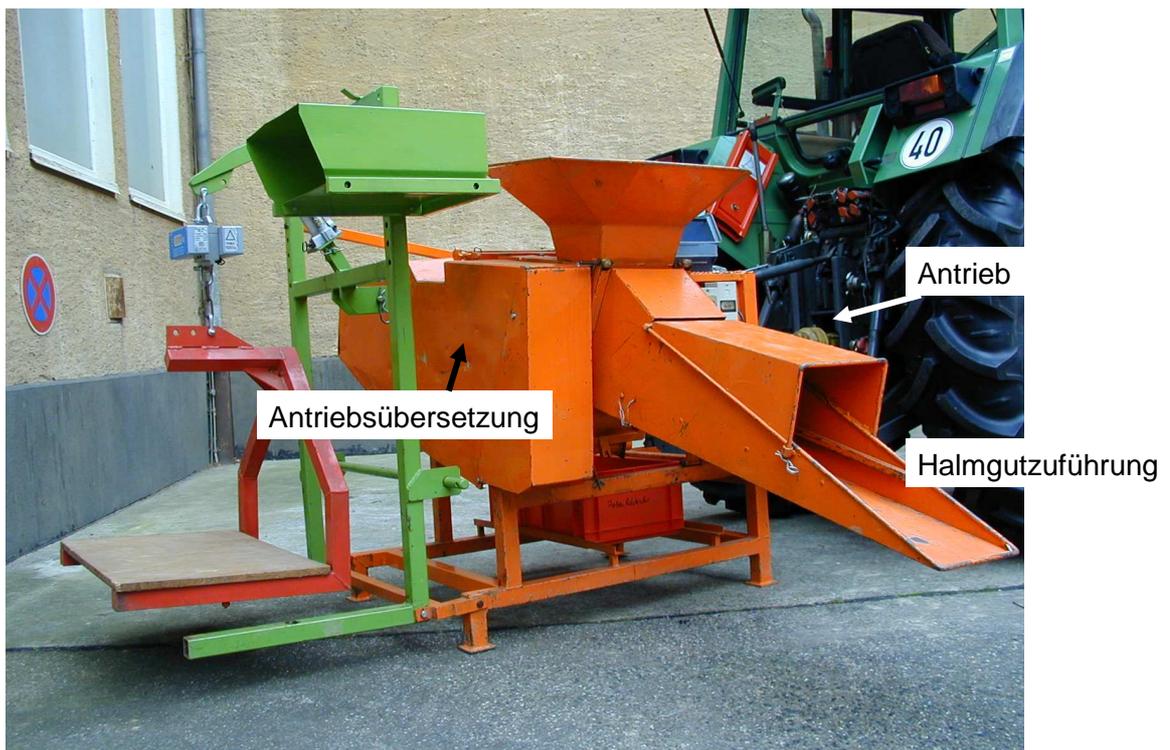


Abb. 3.7: Probenhäcksler des Instituts für Landtechnik Bonn; Zuführseite

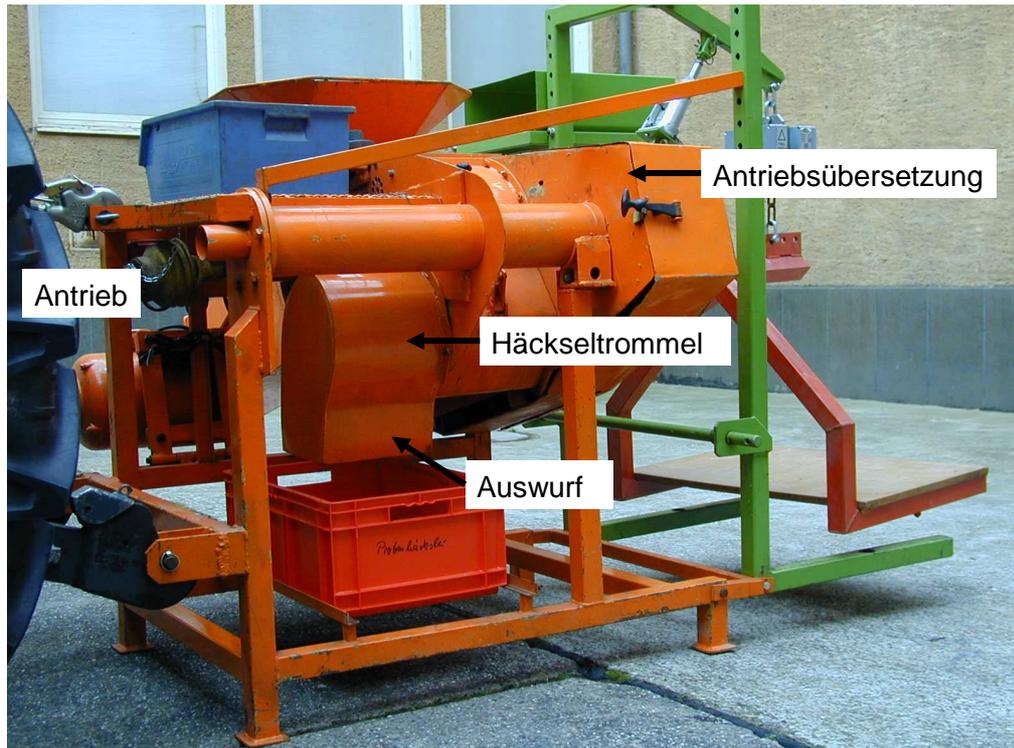


Abb. 3.8: Probenhäcksler des Instituts für Landtechnik Bonn; Seitenansicht der Häckseltrommel mit Auffangbehälter

Die Häcksellänge konnte bei dieser Maschine nicht verändert werden. Durch Demontage jedes zweiten Messers wurde eine theoretische Häcksellänge von 46 mm erreicht. Bei diesem Versuch war es möglich, auf die Materialfeuchte einzugehen. So wurden die Pflanzen in frischem Zustand mit 33 % Trockenmasse, angetrocknet mit 60 % Trockenmasse und getrocknet mit 88 % Trockenmasse durch den Häcksler geführt. Anschließend wurde das Material auf einen einheitlichen Trockenmasseanteil von 88 % getrocknet.

3.2 „CULTAN“-Düngungsversuche

Die „CULTAN“-Düngeversuche wurden als Blockversuche angelegt und in drei aufeinander folgenden Jahren durchgeführt. THOMAS (2006) weist darauf hin, dass innerhalb des Blocks grundsätzlich darauf zu achten ist, dass die Wachstumsbedingungen weitgehend homogen sind und gegebene Bodenunterschiede durch die Blöcke erfasst werden. Er empfiehlt die Anlage der Blöcke hintereinander, wodurch die Anlage sehr kompakt wird. Die Versuchsflächen auf dem Dikopshof wurden so ausgewählt, dass es keine bekannten Bodenunterschiede zu berücksichtigen gab. Aufgrund der vorhandenen räumlichen Bedingungen war es nicht möglich, vollständige Blöcke zu bilden. Aufgrund der homogenen Versuchsbedingungen waren jedoch keinen Einflüsse auf die Versuchsauswertung zu erwarten.

Versuchsparameter waren die Stickstoffdüngung und Saatstärke.

Bei der Saatstärke handelte es sich um die praxisübliche Höhe von 200 keimfähigen Körnern je Quadratmeter und um eine reduzierte Zahl von 100 keimfähigen Körnern je Quadratmeter. Als mittelfrühe Hanfsorte wurde Fedora 17 gewählt. Unter Berücksichtigung der Keimfähigkeit und des Feldaufgangs wurden dementsprechend 216 und 108 Körner je m² ausgebracht. Zur Vereinfachung werden in den nachfolgenden Ausführungen die reduzierte Saatstärke mit S216 und die praxisübliche Saatstärke mit S108 bezeichnet.

Bei den Düngungsversuchen wurden die Varianten mit 60 kg und 120 kg Reinstickstoff je Hektar als Depotdüngung (CULTAN 60; CULTAN 120) und die praxisübliche Düngung je zur Hälfte als Ammonium und Nitrat in Form von Kalkammonsalpeter mit der Gabe von 120 kg Reinstickstoff pro Hektar (KAS 120) ausgewählt. Zur Kontrolle wurde eine Variante ohne Stickstoffdüngung angelegt (N0). Die Ammoniumdepotdüngung wurde flüssig verabreicht, Kalkammonsalpeter in granulierter Form.

Kalkammonsalpeter besitzt einen Stickstoffgehalt von 27 %, wobei die Hälfte des Stickstoffs als Nitrat und die andere Hälfte als Ammoniumstickstoff vorliegt. Um 120 kg Reinstickstoff je Hektar auszubringen, mussten demnach 444,44 kg Kalkammonsalpeter appliziert werden. Bei einer Parzellengröße von 10,5 m² entspricht dies einer Masse von 465 g. In den Versuchen wurde die entsprechende Menge je Fläche mit einem Kastenstreuer nach Auflauf der Pflanzen verabreicht.

Wie in Abbildung 3.9 für das Versuchsjahr 2005 beispielhaft dargestellt, betragen die Maße der Parzellen 3 x 4 m. Seitlich wurden Parzellen angelegt, um Randeffekte

auszuschließen. Die Randparzellen wurden praxisüblich angelegt, so dass jede Kombination der unterschiedlichen Saatstärken nebeneinander zustande kam.

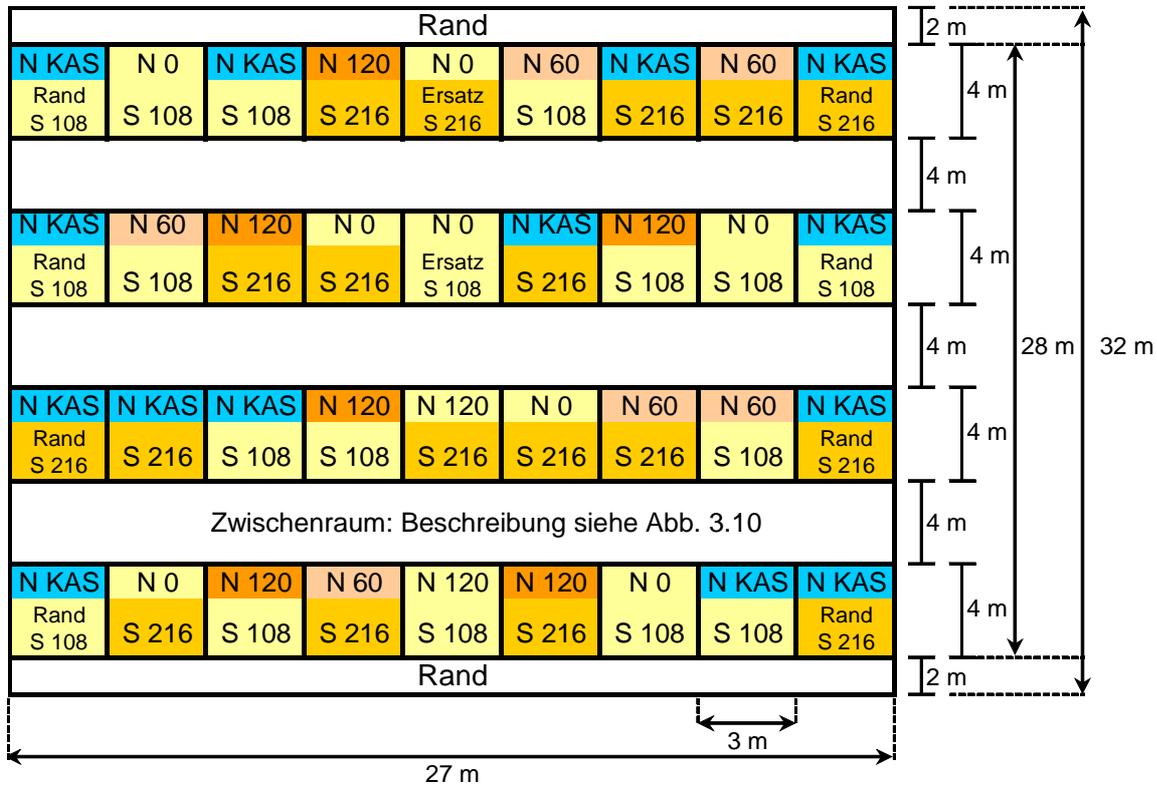


Abb. 3.9: Versuchsanlage des „CULTAN“-Düngungsversuches auf der Lehr- und Forschungsstation Dikopshof, Parzellengröße 10,5 m²

In Abbildung 3.10 ist der Zwischenraum der hintereinander gelegenen Parzellen dargestellt. Dieser Zwischenraum wurde so gestaltet, dass Platz zum Begehen der einzelnen Parzellen zur Verfügung stand und keine Randeinflüsse zustande kamen.

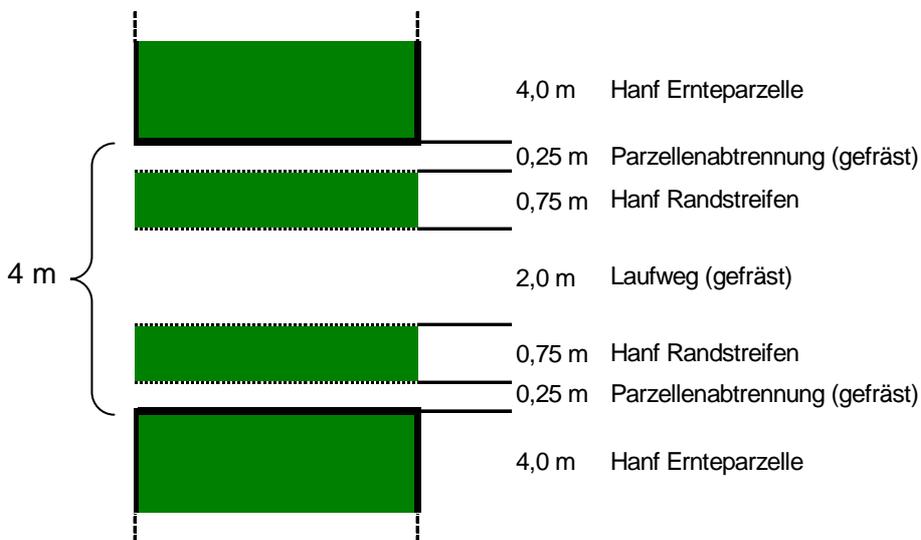


Abb. 3.10: Beschreibung der Zwischenräume zwischen den Nettoparzellen

Die Versuche wurden mittels einer Parzellendrillmaschine mit 24 Säreihen und einem Reihenabstand von 10,9 cm angelegt. Der Abstand von Radmitte zur Säreihe betrug 25 cm. Aus dem Produkt von Reihenzahl, Reihenabstand und Parzellenlänge kommt die oben erwähnte Parzellengröße von rund 10,5 m² zustande.

Wie im Kapitel Stand des Wissens dargelegt, muss das Ammoniumdepot in der Nähe der Wurzeln appliziert werden. Um den flüssigen Depotdünger richtig zu platzieren, wurden in jeder zweiten Reihe im Abstand von 11 cm Löcher mit einem angespitzten Rundstab vorgeformt (Abb. 3.11).

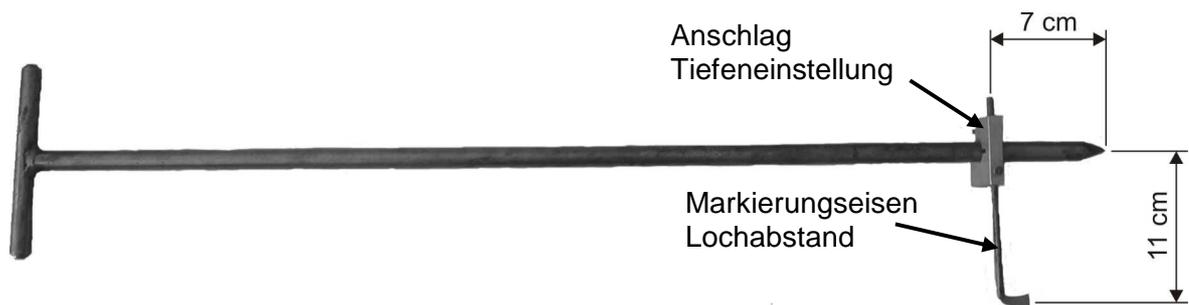


Abb. 3.11: Gerät zur Formung der Vertiefungen für die Platzierung der Ammoniaklösung

Die Tiefe der Löcher betrug 7 cm. Die Abstände wurden mittels eines Anschlags eingestellt, an dem sich ein Markierungseisen befindet, mit dem die entsprechende Distanz zwischen den zu erzeugenden Löchern eingehalten werden kann.

Durch die Applikation in jeder zweiten Reihe war gewährleistet, dass die Wurzeln jeder Pflanze an ein Depot reichen konnten und die Konzentration des Ammoniumstickstoffs hoch genug war, um die entsprechende Toxizität für die abbauenden Mikroorganismen aufzuweisen.

Als Stammlösung für den Dünger wurde 25-prozentige Ammoniaklösung verwendet. Eine Reinstickstoffmenge von 120 kg Reinstickstoff je Hektar entspricht bei der verwendeten Lösung einem Volumen von 0,504 Liter pro Parzelle. Die Lösung wurde mittels einer mit einem Aluminiumrohr verlängerten Drenchpistole (s. Abb. 3.12) appliziert.



Abb. 3.12: Drenchpistole zur Applizierung der Ammoniaklösung

Um die entsprechende Stickstoffmenge mit der vorhandenen Technik ausbringen zu können, wurde die Ammoniaklösung 10fach verdünnt, so dass je Parzelle 5,04 l Düngelösung verwendet werden musste. Dieses Volumen musste auf 12 Reihen (jeweils jeden zweiten Reihenzwischenraum) mit jeweils einer Länge von 4 m verteilt werden. Dies entsprach einem Volumen von 11,5 ml je Düngedepot in 11 cm Entfernung. Um die reduzierte Stickstoffgabe zu applizieren, wurde die Stammlösung 20fach verdünnt.

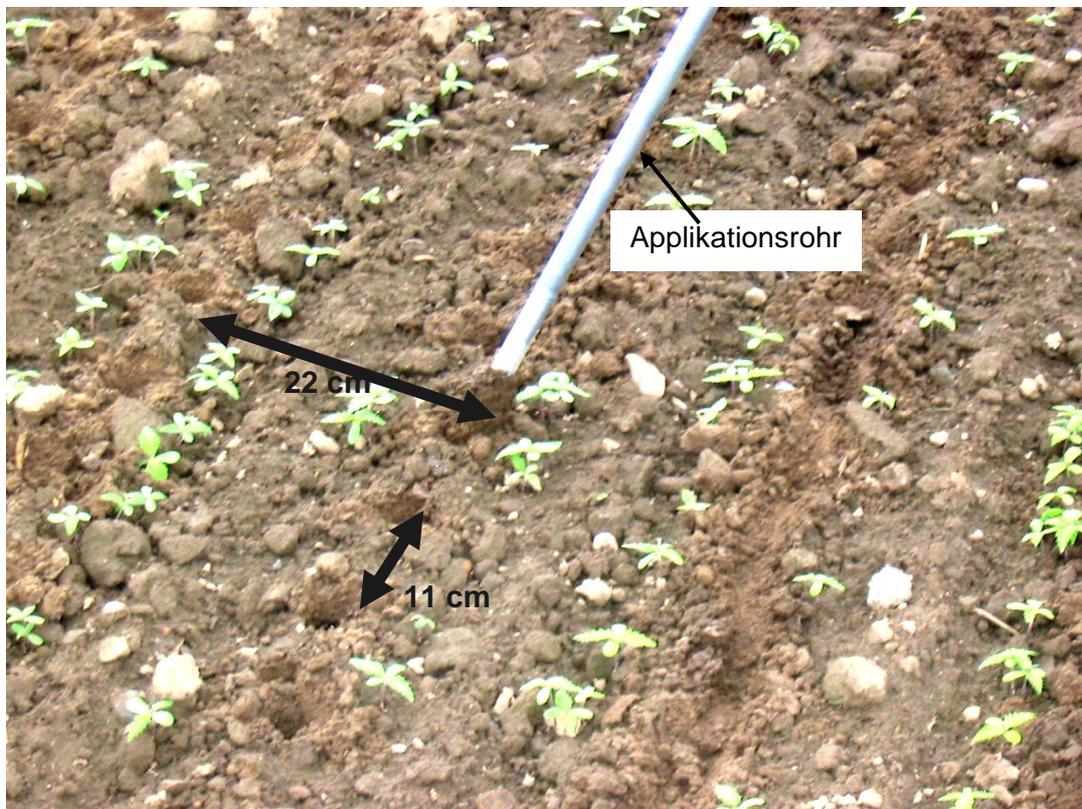


Abb.4.13: Applikation der Ammonium-Depots nach Auflauf der Hanfpflanzen

3.3 Ertragsuntersuchung

Um den Ertrag der einzelnen Versuchsvarianten zu ermitteln, wurde in der Versuchsparzelle eine Fläche von 1 m² mit Seitenlängen von je 1 m abgesteckt. In dieser markierten Fläche wurden die aufgelaufenen Pflanzen gezählt und jeweils 10 Pflanzen markiert. Die Markierung erfolgte, um den Längen- und Dickenzuwachs der Stängel zu dokumentieren. Die Pflanzenlänge wurde mittels eines Zentimetermaßes und der Durchmesser mittels eines elektronischen Messschiebers an verschiedenen Terminen im Abstand von ca. 6 Wochen gemessen.

Der Stängeldurchmesser wurde jeweils in der Mitte der Pflanzenlänge gemessen. Da der Stängel nicht gleichmäßig rund ist, wurde der Durchmesser in der radialen Ebene an mehreren Stellen gemessen und der Mittelwert gebildet. Die Anzahl der Pflanzen wurde festgestellt, um den natürlichen Ausdünnungseffekt des Bestandes zu dokumentieren. Daraus lassen sich Rückschlüsse auf die Ertragsbildung ziehen.

Die Ermittlung der morphologischen Daten erfolgte an folgenden Terminen:

2003	24.06.2003
	05.08.2003
2004	13.07.2004
	10.08.2004
2005	28.06.2005
	18.07.2005
	10.08.2005

Der Ertrag der Parzellen wurde bestimmt, indem die Pflanzen der markierten Fläche (1m²) handbreit über dem Boden abgeschnitten und zusammen gewogen wurden. Anschließend wurde eine repräsentative Stängelprobe aus diesen Pflanzen entnommen und luftdicht verpackt. Diese Probe wurde im Trockenschrank bis zur Gewichtskonstanz bei 105°C getrocknet, um den Trockensubstanzgehalt zu bestimmen. Mit Hilfe des Trockensubstanzgehaltes wurde der Flächenertrag berechnet.

Im Zuge der nachfolgend beschriebenen Qualitätsbestimmung müssen die Fasern vom Holzteil getrennt werden. Anschließend wird die Masse der Schäben und Fasern getrennt voneinander bestimmt, um den Faserertrag und den Schäbenertrag zu ermitteln. Das Produkt des prozentualen Anteils der einzelnen Fraktionen und dem Gesamtertrag ergibt dann die jeweiligen Erträge von Schäben und Fasern. Die Angaben beziehen sich auf einen Feuchtegehalt von 12 %.

3.4 Qualitätsuntersuchung

Durch die „CULTAN“-Düngung sollen der Masseertrag und qualitative Eigenschaften der Bastfasern beeinflusst werden. Nach DIN 55 350 (1989) bzw. ISO 8402 (1994) wird Qualität definiert als die Gesamtheit der Merkmale und Merkmalswerte einer Einheit bezüglich ihrer Eignung, festgelegte und vorausgesetzte Erfordernisse zu erfüllen. Die Beziehung zwischen realisierter Beschaffenheit und Einzelanforderungen steht also stets im Mittelpunkt der Qualitätsbetrachtung.

Bei der industriellen Hanffaserveredelung steigen die Anforderungen an das Produkt, deren Erfüllung über entsprechende Tests abzuprüfen ist. Charakteristisch für Bastfasern ist die hohe Variabilität ihrer inneren und äußeren Beschaffenheit, was die Qualitätskontrolle erheblich erschwert. Aus diesem Grunde können keine so genannten High Volume Instruments (HVI) wie in der Baumwolluntersuchung eingesetzt werden.

Da Bastfasern aufgrund ihrer Eigenschaften zunehmend für industrielle Zwecke verwendet werden, stellen sich hier andere Qualitätsanforderungen an die Fasern als in der Bekleidungsindustrie.

So müssen z.B. die Fasern zur textilen Nutzung vornehmlich sehr fein und lang sein, damit sie mit Spinnereimaschinen verarbeitet werden können. Für den Verbundwerkstoffsektor müssen sie, da sie nicht mehr chemisch behandelt werden, frei von Gerüchen, trocken und reißfest und zudem geeignet für eine gute Faser-Matrix-Haftung sein.

Folgende Eigenschaften sind von der Ernte bis hin zur Verarbeitung in allen Anwendungsgebieten gleich:

- Feuchtegehalt des Hanfstrohs
- Röstgrad des Hanfstrohs
- Fasergehalt des Hanfstrohs
- Feinheit der Fasern, Faserbündel
- Festigkeit (Höchstzugkraft, Bruchkraft, Bruchdehnung, E-Modul)

Im Folgenden werden die gängigen und allgemein anerkannten Mess- und Prüfmethode für den mechanischen Trockenaufschluss vorgestellt, die bei den Untersuchungen für die vorliegende Arbeit und somit die Problematik einer Chargen-Untersuchung aufgezeigt werden.

3.4.1 Der Feuchtegehalt des Hanfstrohs

Bei den bisherigen in Deutschland bevorzugten Ernteverfahren zur Industriefasernutzung wird das Stroh unaufgeschlossen geborgen. Um einen gleichmäßigen Aufschluss in der Anlage zu gewährleisten und das Material zwischenlagern zu können ist es wichtig, dass das Material eine Feuchte von 14 – 18 % besitzt. Der Feuchtegehalt des Strohs wird bei Anlieferung in der Regel über die elektrische Leitfähigkeit ermittelt. Diese einfache Methode erlaubt eine Chargenuntersuchung (z.B. LKW-Ladung) ohne Probleme durchzuführen.

Bei den durchgeführten Versuchen war eine Feuchtigkeitsbestimmung zur Ermittlung der Lagerfähigkeit nicht notwendig, da das Versuchsmaterial unter Dach in ungespresstem Zustand getrocknet wurde. Bei den Versuchen im Jahr 2005 wurde der Feuchtegehalt, wie schon detailliert beschrieben, mittels Trockenschrank ermittelt.

3.4.2 Röstgrad des Hanfstrohs

Unter Röste von Hanfstroh wird der biologische und z.T. chemische Abbau der die Elementarfasern verkittenden Substanzen verstanden. Sie bestehen zum überwiegenden Teil aus Pektinen und Ligninen. Mit der Röste geht eine Farbveränderung des Stängels einher. Je nach Röstgrad variiert die Farbe von hellbeige bis zu dunkelbraun (schwarzbraun). Die Beurteilung des Röstgrades wurde bisher bei Hanf lediglich visuell subjektiv vorgenommen. Dazu sind Bonitierungskarten erhältlich, anhand derer die Farbe des Strohs bestimmt werden kann. Da diese Methode sehr von der subjektiven Einschätzung der durchführenden Person abhängt und das menschliche Auge von der Sonneneinstrahlung beeinflusst wird, entwarf QUINT (1996) eine reproduzierbare Messmethode zur Bestimmung des Röstgrades von Flachs. BLUHM UND MÜSSIG (1999) entwickelten Ansätze, die Messmethode von QUINT (1996) auf Hanf zu übertragen. Die Messung basiert auf einer spektroskopischen Untersuchung im nahen infraroten Bereich.

Bei den durchgeführten Versuchen war aufgrund der Trocknung unter Dach keine Röstgradmessung notwendig. Aufgrund der guten Witterung in den Jahren 2002 und 2003 konnte der Hanf in den Praxis schlägen auch ohne einsetzende Röste gepresst werden.

3.4.3 Fasergehalt des Hanfstrohs

Bei der Fasergehaltsuntersuchung wird das Prinzip des mechanischen Aufschlusses angewandt. Hierzu werden die Stängel stark geknickt, so dass sich der Holzteil der Stängel von den Fasern löst. HEYLAND & KROMER (1995) sowie BECKMANN (1998) entwickelten am Institut für Landtechnik Bonn eine Methode zur Bestimmung der technisch verwertbaren Fasern von Flachs.

Diese Methode wurde auf Hanfstroh angewendet. Bei den ersten beiden Durchläufen durch die Laborentholungsmaschine wurden jedoch die Hanfstängel hauptsächlich nur flachgedrückt und nicht gebrochen. Um die geeigneten Versuchsparameter für Hanfstängel zu ermitteln, wurden Vorversuche durchgeführt. Im folgenden Kapitel wird beschrieben, wie diese durchgeführt wurden und die Methode der Fasergehaltsermittlung erläutert.

Die Hanfstängel werden mit Hilfe von vier gezahnten Walzenpaaren geknickt. Die Walzen besitzen eine Zahnhöhe zwischen 4,5 und 10 mm. Die Federkraft, die auf die Walzen einwirkt, beträgt 40 N, die von jeweils 2 Federn pro Walzenpaar ausgeübt wird.



Obere Zahnwalzen
(Kunststoff)

Untere Zahnwalzen
(Metall)

Abb. 3.14: Frontansicht des Flachsbrechers

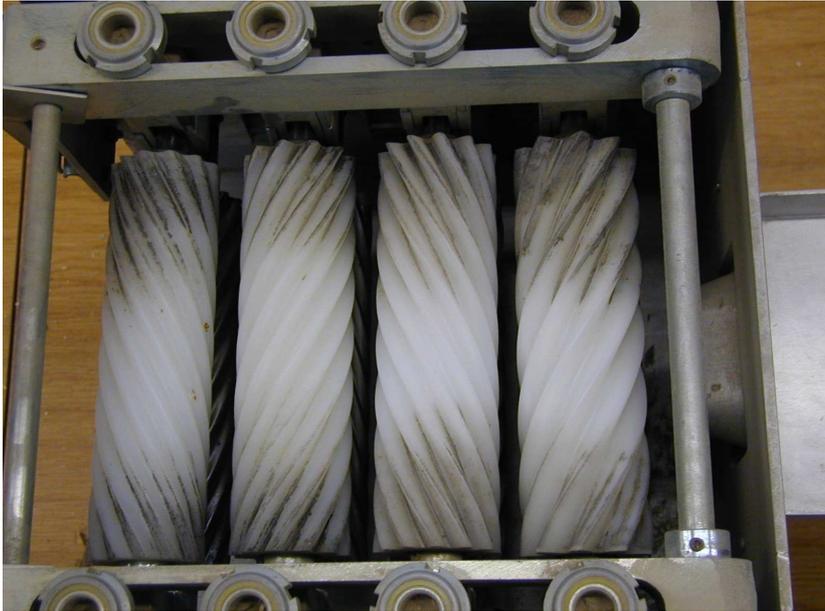


Abb.3.15:: Draufsicht Flachsbrecher

Die Drehfrequenz nimmt von der ersten bis zur vierten Walze zu, so dass ein gleichmäßiger Durchzug der Stängel durch die Maschine gewährleistet ist. Das standardisierte Verfahren sieht vor, dass für Lein die Stängel zunächst dreimal durch den Flachsbrecher (Bahmer, Typ: „Flaksy“) geführt und ein Zwischenergebnis durch Bezug auf das Ausgangsgewicht erzeugt wird. Anschließend werden weitere sieben Durchgänge ausgeführt, so dass schließlich zehn Entholzungsvorgänge vorgenommen werden. Das Gewicht der Fasern wird dann ebenfalls auf das Ausgangsgewicht bezogen.

Tab. 3.1: Technische Daten der Laborentholzungsmaschine „Flaksy“

Anzahl der Walzenpaare	4			
Walzenpaar	1	2	3	4
Zähnezahl der Antriebsritzeln	18	18	15	13
Walzendrehfrequenz n_{\max} [1 min^{-1}]	80	80	96	110
Zähnezahl der Walzen	9	12	11	12
Walzenaußendurchmesser [mm]	57	55	52,5	51
Zahnhöhe [mm]	10	8	6,5	4,5
Federkraft F_{Fe} [N] (2 Federn pro Walzenpaar)	40	40	40	40

Am Institut für Landtechnik Bonn wurden nach dieser Methode Untersuchungen zur mechanischen Entholzung von Hanf durchgeführt. Bei den Vorversuchen konnte festgestellt werden, dass die Laborentholzungsmaschine für eine Entholzung des Hanfstrohs nur bei höchster Drehzahl der Brechwalzen die Hanfstängel durchzieht.

Der Anteil der technisch nutzbaren Faser wird berechnet nach:

$$w_{mF} = \frac{m_{4 \times 10}}{m_E} \cdot 100 [\%] \quad (1)$$

m_E = Masse der Einwaage

$m_{4 \times 10}$ = Masse nach Entholzung nach 10 Durchläufen mit 4 Walzenpaaren

Die Freilegbarkeit wird nach Formel 2 berechnet und ist definiert als das Maß für die mechanische Entholzbarkeit, da erwünscht ist, die Fasern möglichst schnell freizulegen. Damit ist die Freilegbarkeit der technisch nutzbaren Fasern ein wesentlicher Qualitätsparameter auch zur Selektion in der Sortenzüchtung. Je mehr Schäben bereits bis zum dritten Durchlauf in Bezug auf die Gesamtschäbenmasse nach dem zehnten Durchlauf abfallen, desto besser ist die Freilegbarkeit der technisch nutzbaren Fasern (bei konstantem Trockenmasseanteil der unterschiedlichen Proben) nach HEYLAND & KROMER (1995).

$$\eta_{tnF} = \frac{m_E - m_{4 \times 3}}{m_E - m_{4 \times 10}} \cdot 100 \quad (2)$$

$m_{4 \times 3}$ = Masse nach 3 Durchläufen

$m_{4 \times 10}$ = Masse nach 10 Durchläufen Flachsbrecher mit 4 Walzenpaaren

tnF = technisch nutzbare Faser

Da die Methode für kürzere Leinpflanzen entwickelt wurde, war es notwendig, die Hanfpflanzen einzukürzen. Die Stängel wurden in drei Abschnitte geteilt. Zuerst wurde der Blütenstand abgeschnitten und entholt. Der Blütenstand enthält nur minderwertige Fasern. Anschließend wurde der Rest des Stängels in der Mitte geteilt und ebenfalls entholt. Bei dieser Methode wird der technisch nutzbare Faseranteil bezogen auf die trockene Ausgangsmasse ermittelt. Unter technisch nutzbarem Faseranteil wird der Teil der technisch nutzbaren Kurzfasern verstanden, die noch Verunreinigungen wie z.B.

Schäben enthalten, die für viele technische Anwendungen keine negativen Auswirkungen haben (BECKMANN 1998).

MÜSSIG (2001) beschreibt, dass es ausreicht, nach zwei und sechs Durchgängen das Fasermaterial rückzuwiegen, um eine Aussage über die Entholzbarkeit zu machen. Anhand der Vorversuche sollte ermittelt werden, ob die Freilegbarkeitsmethode für Lein auf den stärkeren Halm von Hanf in der vereinfachten Form nach MÜSSIG (2001) ausreicht.

3.4.4 Vorversuche zur Bestimmung der Freilegbarkeit von Hanffasern

Aus Versuchen des Instituts für Pflanzenbau in den Jahren 2001, 2002 und 2003 wurden Hanfstängel entholzt, um die Freilegbarkeit nach dem System des Faserinstituts Bremen (FIBRE) und des *Methodenbuch Industriefaserlein* HEYLAND & KROMER (1995) zu vergleichen. Bei der Auswahl des Probenmaterials wurde darauf geachtet, dass aus jeder Probe jeweils dickere und dünnere Stängel zur Untersuchung herangezogen wurden. Diese wurden getrennt entholzt. Um eine Aussage über die Freilegbarkeit in Abhängigkeit von der Stängeldicke treffen zu können, wurden die Stängel in Dickenfraktionen unterteilt. Diese wurden zuerst in zwei Größenklassen bis 6,5 mm und über 6,5 mm Durchmesser eingeteilt. Um eine exaktere Aussage treffen zu können, wurden die Untersuchungen mit drei Größenklassen (kleiner 5,8 mm, ab 5,8 bis 7,2 mm und über 7,2 mm) wiederholt. Bei jeder Probe wurden je Entholzungsdurchgang drei Stängel durch die Maschine geführt und der Mittelwert der Stängeldurchmesser den jeweiligen Größenklassen zugeordnet. Um eine Aussage über den erreichbaren Entholzbarkeit machen zu können, wurden bei jeder Probe die noch anhaftenden Restschäben von Hand entfernt, ihr Gewicht ermittelt und auf den Gesamtschäbenmasse bezogen.

3.4.5 Feinheit der Fasern, Faserbündel

Die Feinheit einer Faser oder eines Faserbündels ist der Quotient aus der Masse und der Länge der zu prüfenden Faser oder Faserbündel.

Definition: „Die Feinheit ist eine längenbezogene Masse. Die Einheit ist „*tex*“ und steht für 1 g pro 1000 m. Die Masse m lässt sich in Volumen (= Querschnittsfläche A_0 x Länge l) mal Dichte zerlegen, woraus sich der zweite Teil der Gleichung 3 ergibt“

$$\text{Feinheit} \quad T_t = \frac{m_{Fb}}{l_{Fb}} = A_0 \times \rho_{Fb} \quad \left[1 \text{ tex} = \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ m}} \right] \quad (3)$$

m_{Fb} : Masse Faserabschnitt [g]

l_{Fb} : Länge Faserabschnitt [m]

A_0 : Querschnittsfläche [m²]

ρ_{Fb} : Dichte von Faserbündel [kg m⁻³]

Quelle: HEYLAND & KROMER (1995)

Bei der Bestimmung der Feinheit wird von einer gleich bleibenden Dichte ausgegangen. Die Feinheit kann durch mehrere Messmethoden ermittelt werden.

Beim gravimetrischen Verfahren wird das Gewicht der Fasern ermittelt und auf deren Länge bezogen. Für Elementarfasern ist diese Methode aufgrund ihrer geringen Größe kaum anwendbar. Bei Festigkeitsuntersuchungen mittels Zugversuch wird für jedes zu reißende Faserbündel die Feinheit bestimmt HEYLAND & KROMER (1995), da je nach Feinheit andere Werte beim Zugversuch zustande kommen. Dieser Sachverhalt wird in Kapitel 3.4.6 näher erläutert. Aufgrund der inhomogenen Faseraufbereitung von Hand ist es sinnvoll, die unten beschriebene feinheitsbezogene Zugkraft als Maß zu verwenden. Für Anwendungen (wie z.B. in der Spinnerei) bei denen die Faserfeinheit eine große Rolle spielt, ist es sinnvoll mehrere Faserbündel bekannter Länge gleichzeitig zu wiegen, um den Wägefehler zu minimieren MÜSSIG (2001).

Das Airflow-Verfahren ist eine indirekte Methode. Dabei macht man sich den Zusammenhang zwischen der Feinheit der Fasern und dem Widerstand der durch die Faserprobe durchströmenden Luftmenge zunutze. Bei der Durchströmung einer Kammer mit einer definierten Menge an Fasern wird ein konstanter dynamischer Luftdruck eingestellt. Der Strömungswiderstand der Fasern bewirkt einen Druckabfall. Aus dem Differenzdruck zwischen Eintritt in die Kammer und Austritt wird die Faseroberfläche bestimmt, die mit dem Querschnitt der Fasern korreliert.

Weitere Methoden zur Feinheitsbestimmung beruhen auf der Vermessung von Fasern und Faserbündeln mittels optischer Verfahren. Dazu wurden sehr zeitaufwändige lichtmikroskopische Projektionen eingesetzt MÜSSIG (2001). Durch automatisierte Bildanalyseverfahren, welche aus dem Bereich der Diamantenanalyse stammen, konnte der zeitliche Aufwand stark reduziert werden. Diese Technik beruht auf einem

hochauflösenden Scanner und einer Software für die Bildanalyse SCHMID & MÜSSIG (2002).

Die Feinheit ist in den meisten Verarbeitungsprozessen ein Qualität beeinflussender Faktor. Ebenso dient die Feinheit dazu, die Festigkeit der Fasern auf einen vergleichbaren Bezugspunkt zu bringen. Für die am Institut für Landtechnik erfolgten Prüfungen zur Feinheit und Festigkeit wurden aus allen Versuchspartikeln die Faserbündel von Hand auf ein Längenmaß von 100 mm und einen Durchmesser von 0,1 mm bis 0,05 mm konditioniert. Der Durchmesser unterliegt der oben beschriebenen Schwankung, da er bei der Aufarbeitung nur geschätzt werden konnte. Bei der Aufbereitung der Faserbündelstränge zu dem zu testenden Faserbündel werden die Faserstränge so lange zwischen zwei Fingern hindurch gezogen und vereinzelt, bis das Faserbündel den gewünschten Durchmesser besitzt. Die Entscheidung, ob der gewünschte Durchmesser erzielt ist, kann nur aufgrund einer Schätzung mittels menschlichem Auge erfolgen. Durch leichtes Krümmen des Faserbündels lassen sich mechanische Verletzungen in der Art erkennen, dass beim Biegen statt einer Rundung ein Knick entsteht. Auf unter 0,05 mm konditionierte Faserbündel fielen aus der Prüfung heraus, da sie von dem im folgenden Kapitel beschriebenen Laserdiameter nicht erfasst werden konnten. Zur Ermittlung der Masse wurden die konditionierten Faserbündel entsprechend dem *Methodenbuch Industriefaserlein* mittels einer Exaktwaage mit einer Genauigkeit auf 10 µg gewogen.

3.4.6 Festigkeit der Faserbündel

Die mechanischen Eigenschaften von Fasern können in unterschiedlicher Weise angegeben werden. Die Zugfestigkeit ist definiert als die maximale Kraft bezogen auf die Ausgangsquerschnittsfläche.

$$\text{Zugfestigkeit} \quad \sigma_H = \frac{F_{\max}}{A_0} \quad [\text{MPa}] = [\text{N mm}^{-2}] \quad (4)$$

F_{\max} [N] Höchstzugkraft

A_0 [mm²] Ausgangsquerschnittsfläche

Bei der feinheitsbezogenen Höchstzugkraft wird die Kraft auf die Feinheit der Stängel bzw. Faserbündel bezogen.

$$\text{Feinheitsbezogene Höchstzugkraft} \quad R_H = \frac{F_{\max}}{T_t} = \frac{F_{\max}}{m_{Fb}} \times l_{Fb} \quad [\text{cN tex}^{-1}] \quad (5)$$

Eine weitere Festigkeitsgröße ist die Dehnung bei Höchstzugkraft. Sie beschreibt die prozentuale Längenänderung der Probe bei maximaler Kraft.

$$\text{Höchstzugkraft-Dehnung} \quad \varepsilon_H = \frac{l_H - l_0}{l_0} \cdot 100 = \frac{\Delta l_H}{l_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (6)$$

l_0 [mm] Einspannlänge der Probe

l_H [mm] Länge der Probe bei F_{\max}

Da sich die Fasern bei Auftreten von Zugspannungen dehnen, kann der Elastizitäts-Modul als Kennwert für das Dehnungsverhalten herangezogen werden. Der Elastizitäts-Modul (E-Modul; Young's Modulus) ist ein Materialkennwert für den Zusammenhang zwischen Spannung und Verformung bei der mechanischen Beanspruchung eines festen Körpers. Der Zahlenwert ist umso größer, je mehr Widerstand ein Material seiner Verformung entgegensetzt. Ein Material mit hohem E-Modul ist also als steif zu bezeichnen und ein Material mit tiefem E-Modul als weich.

Der E-Modul für Naturfasern aus Flachs ist als Steigung des Graphen im Spannungs-Dehnungs-Diagramm innerhalb des Elastizitätsbereichs zwischen dem Schnittpunkt bei 40 % von σ (F_{\max}) und ε (Dehnung) und dem Schnittpunkt bei 60 % (von σ und ε) mit der Einheit MPa definiert HEYLAND & KROMER (1995). Der idealisierte Verlauf eines Spannungs-Dehnungs-Diagramms ist in Abbildung 3.16 dargestellt.

Um den E-Modul zu berechnen, ist jedoch ein ausreichend linearer Abschnitt des Anstieges im Spannungs-Dehnungsdiagramm notwendig.

$$\text{E-Modul} \quad E_{40/60} = \frac{\sigma_{60} - \sigma_{40}}{\varepsilon(\sigma_{60}) - \varepsilon(\sigma_{40})} \quad [\text{Mpa}] \quad (7)$$

σ_{60} [MPa] Spannung bei 60 % der Zugfestigkeit

σ_{40} [MPa] Spannung bei 40 % der Zugfestigkeit

$\varepsilon(\sigma_{60})$ [%] Dehnung bei σ_{60}

$\varepsilon(\sigma_{40})$ [%] Dehnung bei σ_{40}

In den durchgeführten Zugversuchen wurde der E-Modul aus dem Spannungs-Dehnungsdiagramm automatisch von der Software der Zugprüfmaschine ermittelt.

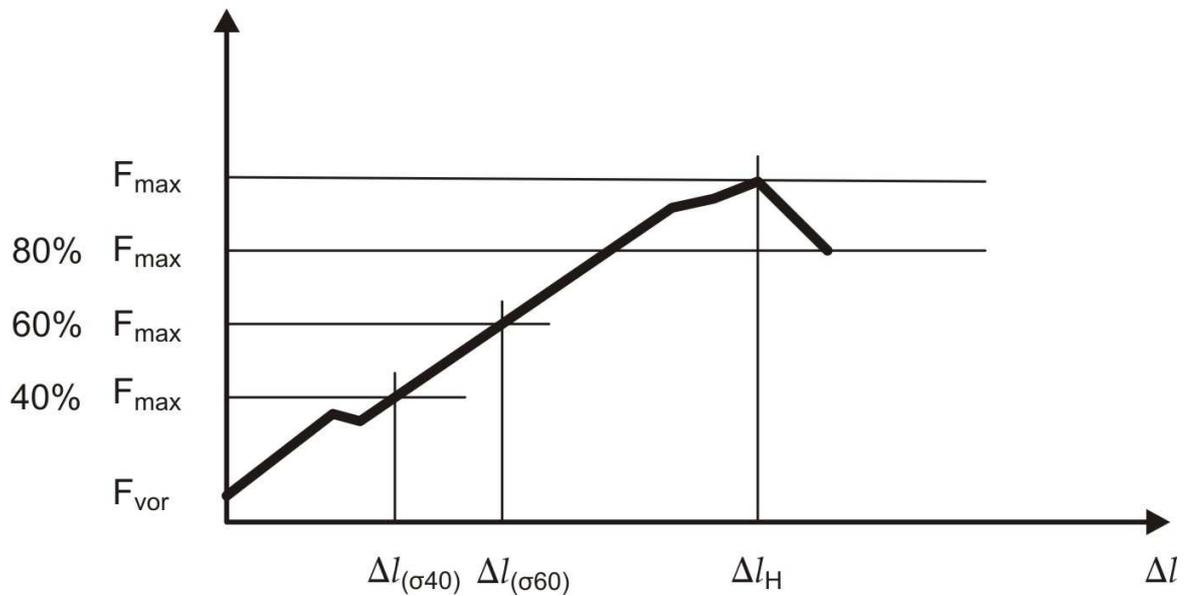


Abb. 3.16: Kraft-Längenänderungs-Diagramm; idealisierter Kurvenverlauf für ein Hanffaserbündel mit Angabe der zugehörigen Längenänderung

Für die Untersuchung der Faserfestigkeitswerte eine Universal Zug- und Druckprüfmaschine der Firma Zwick mit dem in Abbildung 3.17 dargestellten Probenaufnehmer verwendet. In den Tabellen 3.2 und 3.3 sind die Spezifikationen der Zug- und Druckprüfmaschine und des Probenaufnehmers dargestellt.

Zur Untersuchung der Festigkeit wird das Faserbündel mit einem Gewicht von 2 g versehen und anschließend in das obere Klemmbackenpaar (siehe Abb. 3.17) mittels Druckluft eingespannt. Das am Faserbündel befestigte Gewicht dient der konstanten Vorspannung des Bündels, damit es nicht locker zwischen den beiden Klemmbackenpaaren hängt.

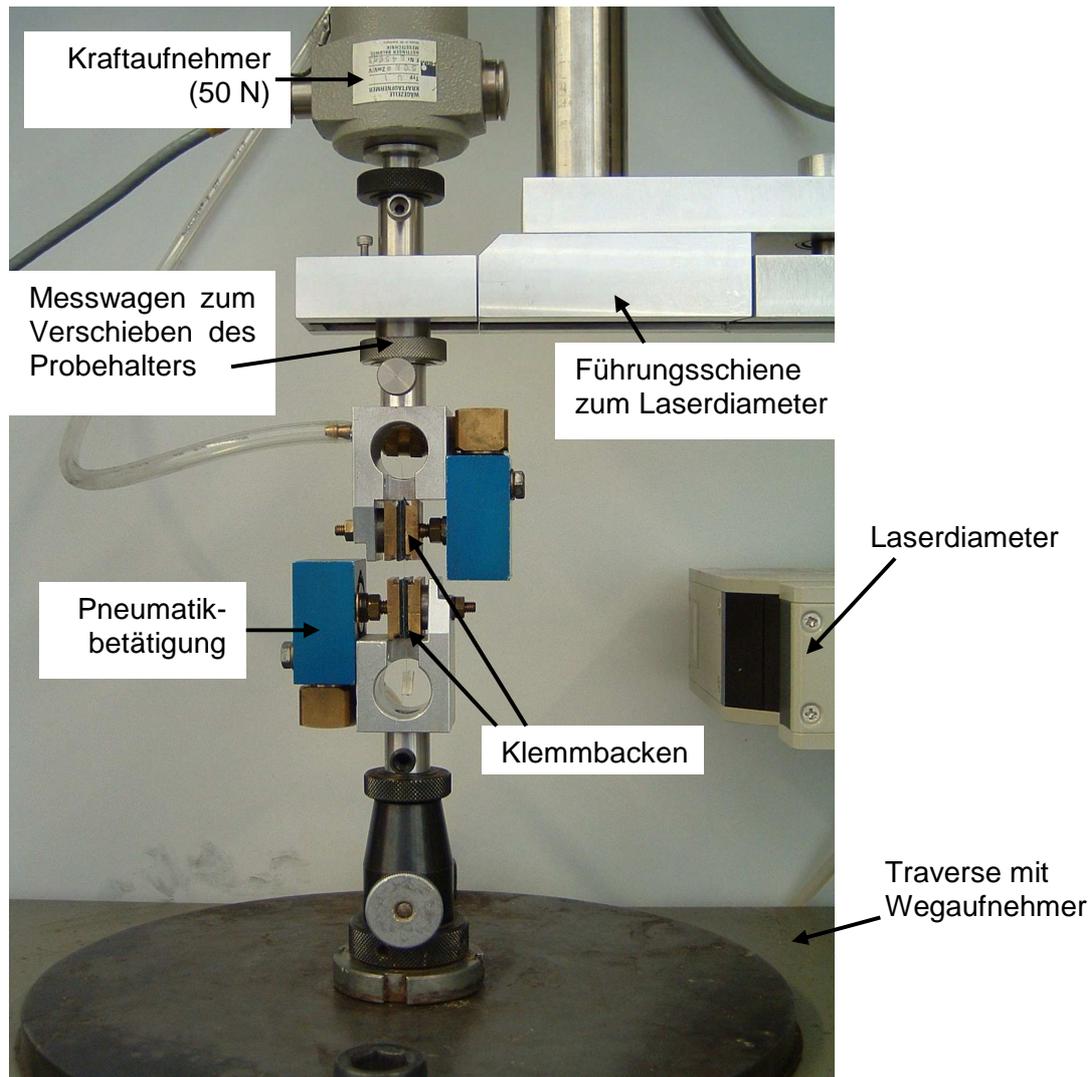


Abb. 3.17: Zugprüfungseinrichtung für Faserbündelmessung

Tab. 3.2: Spezifikationen der Probehalter der Materialprüfmaschine zur Testung von Naturfaserbündeln

Parameter	Eigenschaften und Abmessungen
Art der Kraftaufbringung	pneumatisch
Klemmschließdruck p	6 bar
Klemmenlänge x -breite	20 x 20 mm
Klemmenbackenmaterial	Polyurethan (Dicke 1 mm) mit aufgeklebtem Schleifpapier (Körnung 1200)

Nach der Einspannung des Faserbündels in dem oberen Klemmbackenpaar wird der Durchmesser mit einem Laserdiameter im Abstand von 30° in der radialen Ebene bestimmt (s. Abb. 3.18). Aus dem Mittelwert der 6 Einzelwerte wird die theoretische Querschnittsfläche des Bündels berechnet und vor der Festigkeitsprüfung in der Prüfmatrix hinterlegt. Anschließend wird das Faserbündel in dem unteren Klemmbackenpaar eingespannt und das Gewicht entfernt.

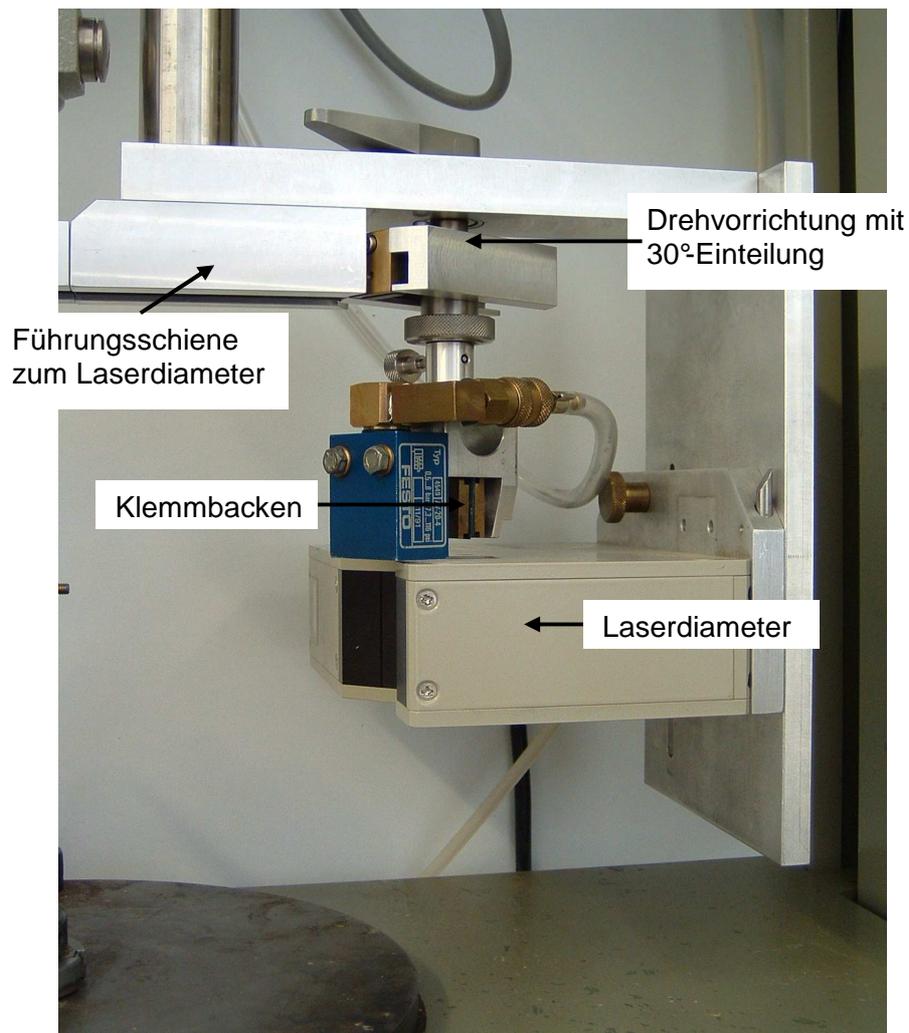


Abb. 3.18: Laserdiameter zur Querschnittsmessung der Faserbündel

In Tabelle 3.3 sind die Spezifikationen und einzelnen Versuchsparameter zusammengestellt. Unter der Einspannlänge wird der Abstand zwischen den beiden Klemmbackenpaaren verstanden. Um zu verhindern, dass im unteren Kraftmessbereich schon ein zwanzigprozentiger Spannungsverlust zum Abbruch der Messung führt, wird die Prüfvorkraft von 0,05 N angelegt.

Tab. 3.3: Spezifikationen Materialprüfmaschine zur Zugprüfung von Naturfaserbündeln

Parameter	Eigenschaften und Abmessungen
Messung der Längenänderung	über Traverse
Messfehler	< 1 %
Anfangsmesslänge l_0	Wie Einspannlänge
Einspannlänge l_E	10 mm
Probenlänge l_P	100 mm
Prüfgeschwindigkeit v_P	3 mm min ⁻¹
Prüfvorkraft F_{vor}	0,05 N
Messbereich Zugkraft F	1 bis 50 N
Messfehler Kraftaufnehmer	< 0,2 %
Berechnung E-Modul	Steigung zwischen 40 und 60% von F_{max}
Bruchabschaltswelle	Kraftabfall auf 80 % von F_{max}

Nach MÜSSIG (2001) ist die Einzelfaserfestigkeit größer als die der Faserkollektive. Die Einzelfaser selbst kann allerdings nur sehr schwierig auf ihre Festigkeit überprüft werden. In der Textilindustrie werden Elementarfasern nach chemischem Aufschluss zu Garn versponnen und anschließend geprüft. Bastfasern werden in der Regel nach einer möglichst feinen Auflösung im Faserbündel auf die Zugfestigkeit geprüft. Auch bei sehr feiner „Vereinzelung“ können in Zugversuchen nur Einzelfaserbündel getestet werden. MÜSSIG (2001) bezeichnet diese Faserbündel als Einzelfaserelement. Er grenzt mit diesem Begriff die einzelnen Methoden der Festigkeitsuntersuchung voneinander ab. In Deutschland werden zwei Arten der Festigkeitsüberprüfung angewandt: die Einzelfaserelementprüfung und die Kollektivprüfung. Bei der Kollektivprüfung werden mehrere Einzelfaserelemente bzw. Faserbündel gleichzeitig auf ihre Kollektivfestigkeit geprüft. Bei der Faserbündelprüfung besteht ein erheblicher Aufwand in der Faserbündelvorbereitung. Diese Vorbereitung besteht darin, dass die Faserbündelkollektive von Hand auf einen Durchmesser von ca. 0,1 bis 0,05 mm und eine Länge von 100 mm gebracht werden. Dabei müssen Brüche der Faserbündel vermieden werden. Um eine statistisch vertrauenswürdige Aussage zu erhalten, muss nach FUNDER (1973) eine erhebliche Anzahl an Messungen durchgeführt werden. Um diese Anzahl an Messungen zu quantifizieren, wurden am Institut für Landtechnik

Versuche durchgeführt und ein (bereits mehrmals erwähntes) *Methodenbuch Industriefaserlein* entwickelt. Pro Probe müssen nach dem *Methodenbuch Industriefaserlein* 24 auswertbare Einzeluntersuchungen verfügbar sein. Das entspricht einem Testaufwand von ca. 50 Einzeluntersuchungen.

Der hohe Probenaufwand kommt dadurch zu Stande, dass bestimmte Zugversuche verworfen werden müssen. Dazu zählen

1. Glatte Brüche, die auf eine vorherige mechanische Verletzung zurückzuführen sind.
2. Brüche, die direkt an den Klemmbacken auftreten. Sie werden verworfen, damit ein Einfluss der Klemmbacken ausgeschlossen werden kann.
3. Zugversuche, bei denen das Bündel durch die Klemmbacken rutscht.

Es bleiben zur Auswertung die Zugversuche, die beim Bruch aufspließen.

Um diesen Aufwand zu umgehen, kann mit dem für Baumwoll-Fasern entwickelten Strength-Elongation-Meter (Stelometer) ein Faserbündelkollektiv geprüft werden. Aufgrund unterschiedlicher Festigkeitswerte je nach Messmethode muss bei veröffentlichten Werten darauf geachtet werden, mit welcher Methode geprüft wurde, da die unterschiedlichen Methoden jeweils ein anderes Niveau für die Festigkeitswerte liefern.

Bei allen Untersuchungen sind die Raumbedingungen, unter denen geprüft wird von großer Bedeutung. Die Proben müssen vor der Untersuchung 12 Stunden bei einer Raumtemperatur von 23°C und einer relativen Luftfeuchte von 50 % gelagert werden (HEYLAND & KROMER 1995 und MÜSSIG 2001). Demnach sind die Untersuchungen ebenfalls in einem klimatisierten Raum mit den oben angegebenen Werten durchzuführen.

3.5 Datenerfassung mit Verarbeitung und statistische Auswerteverfahren

Die auf dem Feld erfassten Daten wurden mittels des Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft® Office Excel 2003 digitalisiert. Mit Hilfe dieses Tabellenkalkulationsprogrammes wurden einfache Berechnungen durchgeführt sowie Mittelwerte gebildet und in graphischer Form als Balkendiagramme mit Fehlerindikatoren wiedergegeben.

Die automatisch in digitaler Form ermittelten Daten der Materialprüfmaschine wurden mit Excel 2003 für die Übernahme in das Programm für die statistische Auswertung vorbereitet.

Die statistische Auswertung der Daten erfolgte mit SPSS 14.0 und SPSS 17.0 Für die Auswertung wurden folgende Testverfahren durchgeführt:

Bei den erhobenen Messwerten handelt es sich um metrische Daten einer Stichprobe. Voraussetzung für die so genannten parametrischen Tests ist die Normalverteilung und die Varianzgleichheit. Die Prüfung auf Normalverteilung erfolgte über den „K-S-Test bei einer Stichprobe“. Die Prüfung der Varianzgleichheit erfolgte mittels Levene-Test. Bei den Tests werden die Messwerte als abhängige Variable und die zu untersuchenden (die beeinflussbaren) Faktoren als unabhängige Variable bezeichnet.

In der überwiegenden Anzahl der Messergebnisse waren die Voraussetzungen für parametrische Tests gegeben, so dass die Messwerte der Untersuchungen mit einer unabhängigen Variablen (Häckselversuche) mittels einer einfaktoriellen ANOVA (auch einfaktorielle Varianzanalyse genannt) miteinander verglichen wurden und die Untersuchungen mit zwei unabhängigen Variablen (Düngung x Saatstärke) mit der univariaten Varianzanalyse. Die Varianzanalyse gehört zu den Mittelwertvergleichen und wird für mehr als zwei Gruppen von unabhängigen Variablen (für zwei Gruppen wird der T-Test herangezogen) verwendet. Bei den durchgeführten Versuchen wurden jedoch immer mehr als zwei Gruppen mit einander verglichen. Für parametrische Tests mit mehreren Gruppen, für die die genannten Voraussetzungen nicht zutreffen, kann der Kruskal-Wallis-H-Test herangezogen werden. Darauf wurde jedoch in der vorliegenden Arbeit verzichtet, da in den gegebenen Fällen der Stichprobenumfang zu gering war, um gesicherte Aussagen machen zu können. Als Ersatz dafür wurden Balkendiagramme mit den entsprechenden Fehlerindikatoren dargestellt. Die jeweiligen Berechnungen sind im Kapitel „Ergebnisse“ jeweils aufgeführt.

Bei der statistischen Auswertung wurde in der Weise vorgegangen, dass zuerst die Voraussetzungen für die parametrischen Tests überprüft und anschließend die entsprechenden Mittelwertvergleiche durchgeführt wurden.

Der Mittelwertvergleich zeigt jeweils, ob es statistisch abgesicherte Unterschiede zwischen den Mittelwerten der untersuchten Faktoren gibt. Standardmäßig wird auf eine Signifikanz von 0,05 geprüft. Wird dieser Wert unterschritten, wird von einem signifikanten Unterschied zwischen den Mittelwerten gesprochen. Wird ein Signifikanzwert von unter 0,01 ermittelt, wird von hochsignifikanten und bei einem Signifikanzwert von unter 0,001 von einem höchstsignifikanten Unterschied ausgegangen. Wird bei der einfaktoriellen ANOVA ein Signifikanzwert von unter 0,05 ermittelt, kann mit dem „Post-Hoc“-Test festgestellt werden, welche Faktoren sich im Mittelwert unterscheiden. Dazu werden von diesem Test so genannte Untergruppen gebildet, innerhalb derer die jeweiligen Ergebnisse der Faktoren, die sich nicht unterscheiden, dargestellt werden. Diese Untergruppen werden in den Ergebnistabellen jeweils mit hochgestellten Buchstaben hinter dem Mittelwert angegeben.

Bei der univariaten Varianzanalyse wird zusätzlich noch auf Wechselwirkungen zwischen den Behandlungen (Faktoren) geprüft. Treten solche Wechselwirkungen auf, können die durchgeführten Vergleiche zu keiner Aussage herangezogen werden.

4 Ergebnisse

4.1 Grünentholzung

Im folgenden Kapitel werden die Einflüsse des mechanischen Eingriffs auf die ungetrocknete Hanfpflanze aufgezeigt. Die Parameter wurden im Kapitel „Material und Methoden“ erläutert. Bei den Versuchsergebnissen werden zum Vergleich der Daten getrocknete Pflanzen herangezogen. Die Ergebnisse folgender Versuchsfragen werden in der angegebenen Reihenfolge dargestellt:

- Der Einfluss der Schlagintensität (mechanische Belastung) der Schneid- und Blindmesser durch die Variation der Häcksellänge mit zusätzlichem Vergleich zu den Fasern aus frisch von Hand entferntem Bast.
- Die Variation der Gegenschneide zur Häckseltrommel und der Einsatz des Corncrackers aus dem Versuchsjahr 2003.
- Der Einfluss der Faserreife bzw. des Faseralters.
- Der Einfluss des Trockensubstanzgehaltes während der mechanischen Belastung.

4.1.1 Einfluss der Häcksellänge auf die Faserqualität

Bei der Verwendung von Fasern in Verbundwerkstoffen oder Vliesen stehen als Eigenschaften die Dehnung und die Höchstzugkraft im Vordergrund. Aus diesem Grund wird in den folgenden Ausführungen auf diese beiden Parameter und ihre Kombination in Form des E-Moduls als Steigung zwischen Dehnung und Höchstzugkraft eingegangen.

Laut *Methodenbuch Industriefaserlein* ist ein Stichprobenumfang von mindestens 24 Spleißern je Probe für eine statistisch abgesicherte Aussage erforderlich. Der Probenumfang der nachfolgenden Ausführungen beläuft sich auf jeweils 70 bis 130 Spleißer je Probe. Die im Vergleich zu dem geforderten Umfang hohe Anzahl an ermittelten Spleißern ging aus dem Produkt der über die Versuchsfläche randomisiert entnommenen Proben und den geforderten 24 Spleißern je Probe hervor. Zudem war diese hohe Anzahl an verwertbaren Messungen notwendig, um *normalverteilte* Probenergebnisse zu erzielen.

In den nachfolgenden Tabellen 4.1 bis 4.3 sind die arithmetischen Mittelwerte der oben genannten Parameter dargestellt. Die Varianzanalyse hat höchstsignifikante Unterschiede zwischen den abhängigen Variablen in den Jahren 2003 und 2004 aufgezeigt.

Die mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,05 statistisch abgesicherten Unterschiede sind mit den hochgestellten Buchstaben hinter den Mittelwerten kenntlich gemacht.

Im Versuchsjahr 2005 unterschieden sich die untersuchten Parameter nicht voneinander. Zu diesem Zeitpunkt stand das Versuchsziel des Trockensubstanzeinflusses auf die Faserqualität im Vordergrund, weshalb die Varianten mit der mittleren und längeren Häcksellänge nicht ermittelt werden konnten.

Tab. 4.1: Ergebnisse der Varianzanalyse der Faserbruchdehnung in %

Häckselvariante	Dehnung [%]		
	2003	2004	2005
kurz	3,15 ^b	3,33 ^a	4,09 ^a
mittel	2,92 ^{ab}	4,24 ^b	-
lang	2,67 ^a	3,93 ^b	-
Trockenaufschluss	4,65 ^c	3,38 ^a	3,64 ^a
Frischfasern aus Bast	3,14 ^{ab}	-	-

Es kann kein Zusammenhang zwischen der Behandlung und der Dehnung in Bezug auf die Höchstzugkraft hergeleitet werden. Im Versuchsjahr 2003 zeigte der herkömmliche Trockenaufschluss die höchste Dehnung. 2004 wurde der Maximalwert von der mittleren Häcksellänge erreicht und im letzten Versuchsjahr zeigten sich keine statistisch absicherbaren Unterschiede zwischen Trockenaufschluss und Häckselbehandlung.

Tab. 4.2: Ergebnisse der Varianzanalyse des E-Moduls in GPa

Häckselvariante	E-Modul [GPa]		
	2003	2004	2005
kurz	10,62 ^a	8,89 ^a	6,50 ^a
mittel	14,23 ^b	8,79 ^a	-
lang	13,09 ^b	10,36 ^a	-
Trockenaufschluss	13,56 ^b	15,35 ^b	9,29 ^a
Frischfasern aus Bast	12,87 ^a	-	-

Der E-Modul erbrachte bei der Varianzanalyse 2003 hochsignifikante, 2004 höchstsignifikante und 2005 nicht signifikante Unterschiede. Bei den Unterschieden kann wie bei der Dehnung kein Zusammenhang zwischen der Behandlung und dem untersuchten Parameter festgestellt werden.

Im Versuchsjahr 2003 lag der Trockenaufschluss zwischen der langen und mittleren Häckselfraktion, wogegen die kurze Variante und der Bast in einer gemeinsamen weiteren Gruppe lagen. 2004 war der E-Modul des Trockenaufschlusses statistisch abgesichert höher als bei den Häckselfraktionen. Im Jahr 2005 waren keine statistisch abgesicherten Unterschiede nachzuweisen.

Bei der feinheitsbezogenen Höchstzugkraft traten in den ersten beiden Versuchsjahren höchstsignifikante und im dritten Versuchsjahr hochsignifikante Unterschiede zwischen den Häckselvarianten, dem Trockenaufschluss und den manuell entnommenen Frischfasern aus dem komplett entfernten Bast auf.

Tab. 4.3: Ergebnisse der Varianzanalyse der feinheitsbezogenen Höchstzugkraft

Häckselvariante	Feinheitsbezogene Höchstzugkraft [cN tex ⁻¹]		
	2003	2004	2005
kurz	33,09 ^a	35,09 ^a	34,40 ^a
mittel	40,57 ^a	35,02 ^a	-
lang	36,00 ^a	38,54 ^a	-
Trockenaufschluss	75,11 ^c	59,08 ^b	50,42 ^b
Frischfasern aus Bast	51,08 ^b	-	-

Die am wenigsten mechanisch beanspruchten Fasern wiesen die größte feinheitsbezogene Höchstzugkraft auf. Der im Jahr 2003 entnommene Bastteil lag in Bezug auf die Höchstzugkraft zwischen der getrockneten und der in frischem Zustand behandelten Variante.

In den nachfolgenden Graphiken (Abb. 4.1 bis 4.3) sind die Ergebnisse als Boxplots visualisiert. Ein Boxplot ist so aufgebaut, dass der horizontale Strich innerhalb des Kästchens den Median wiedergibt. Nach oben und unten ist das Kästchen durch die beiden inneren Quartile begrenzt. Die Striche nach oben und unten geben den maximalen und minimalen Wert wieder. Ausreißerwerte werden mittels Kreis und Extremwerte mittels Sternchen dargestellt.

Die Darstellung des Median's innerhalb der Boxplots zeigt - bis auf einige wenige Ausnahmen - die gleichen Ergebnisse wie die Mittelwerte der Varianzanalyse.

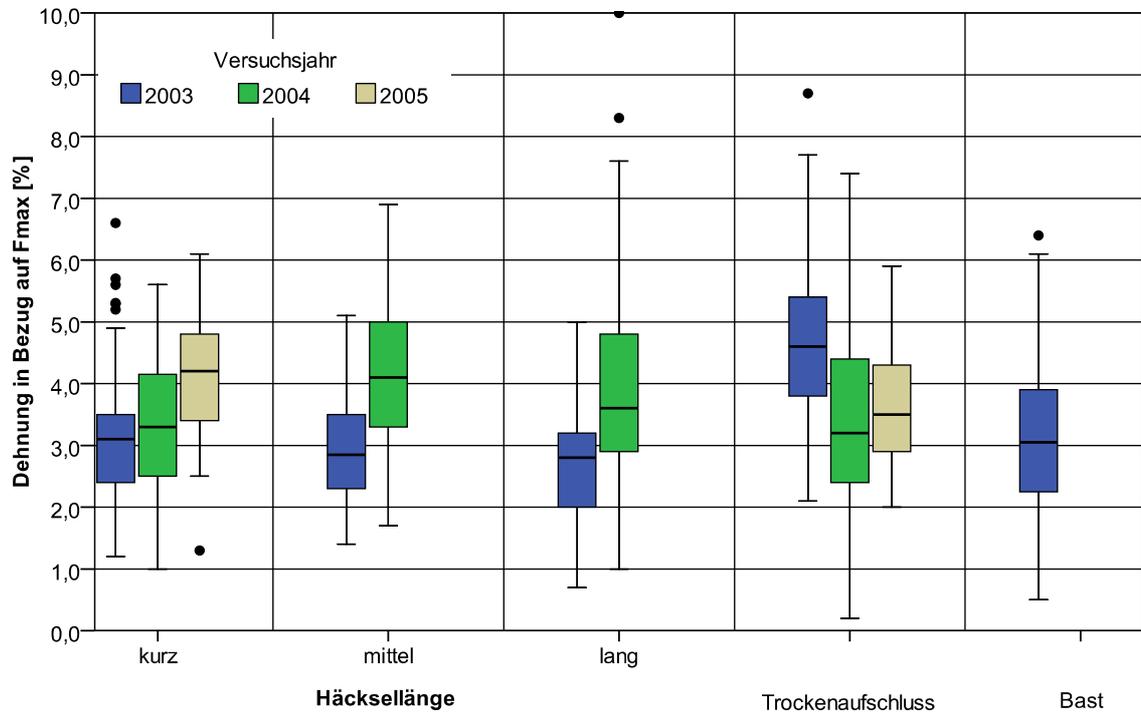


Abb. 4.1: Verteilung der Messwerte für die Faserbruchdehnung in Abhängigkeit von der Häcksellänge als Boxplots

Im Jahr 2003 sind die beiden Innerquartile des Trockenaufschlusses in Bezug auf die Dehnung deutlich höher als die in frischem Zustand mechanisch beanspruchten Proben und als der Bastteil. Auffällig ist in der Häckselfraktion „kurz“ der hohe Anteil an Ausreißern. Im Versuchsjahr 2004 überlappt sich in jeder Behandlung mindestens eines der Innerquartile. Im Gegensatz zur Varianzanalyse gibt es hierbei keinen deutlichen Unterschied zwischen zwei Untergruppen. Im letzten Versuchsjahr ist, wie bei der Varianzanalyse, kein Unterschied der untersuchten Parameter zu erkennen.

Bei Betrachtung der feinheitsbezogenen Höchstzugkraft zeigen die Boxplots die gleichen Verhältnisse wie die Varianzanalyse. Beim Trockenaufschluss und in der Häckselfraktion „lang“ sind im Jahr 2004 extreme Ausreißer zu erkennen.

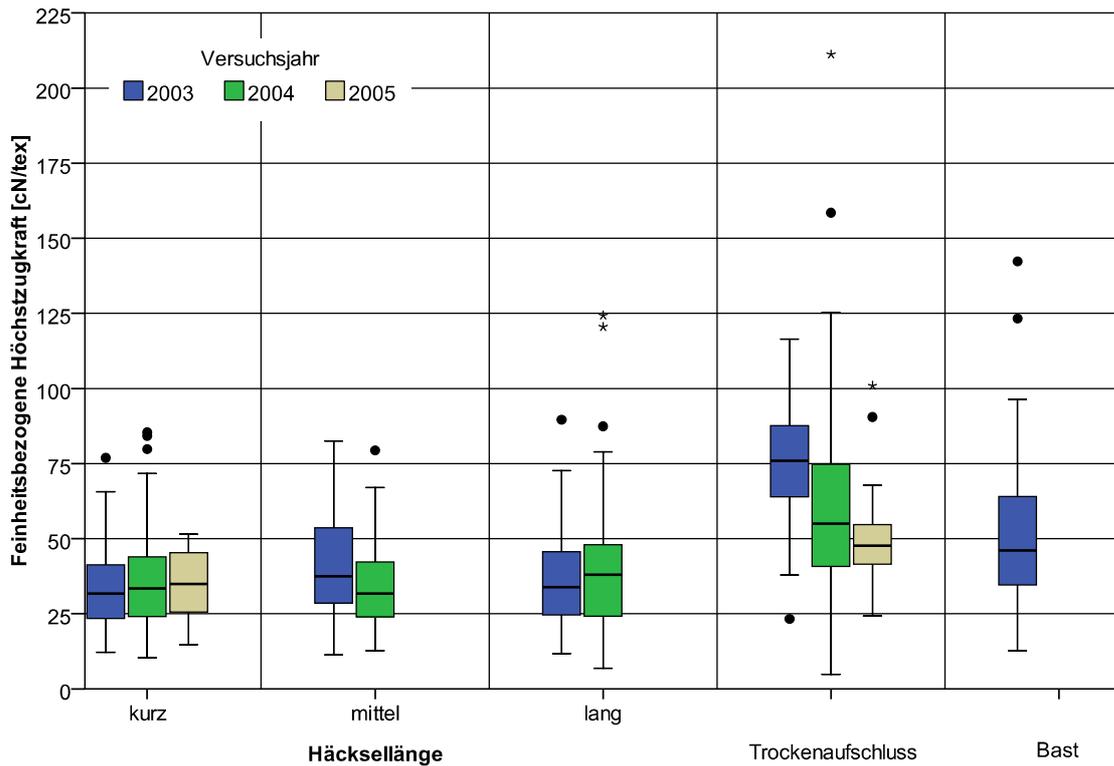


Abb. 4.2: Verteilung der Messwerte für die feinheitsbezogene Höchstzugkraft in Abhängigkeit von der Häcksellänge als Boxplots

Der E-Modul zeigt überproportional viele Ausreißer auf.

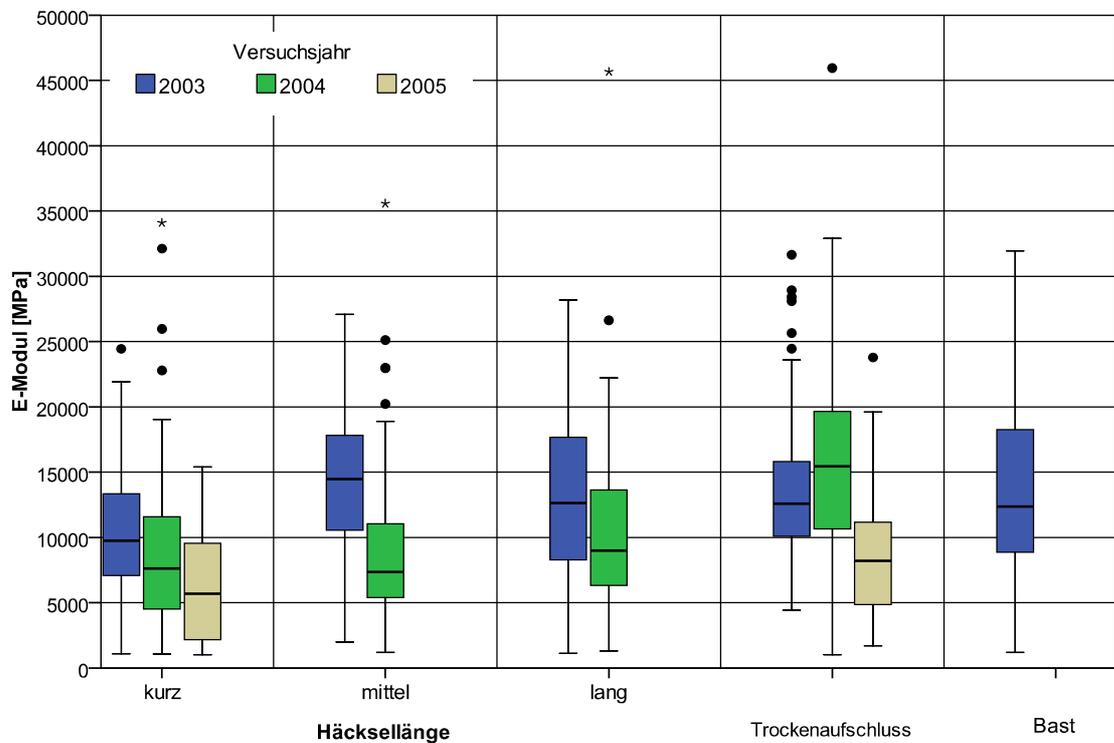


Abb. 4.3: Verteilung der Messwerte für den E-Modul in Abhängigkeit von der Häcksellänge als Boxplots

4.1.2 Einfluss des Abstandes zwischen Gegenschneide und Häckseltrommel und der Wirkung des Corncrackers auf die Faserqualität

In den folgenden Ausführungen wird beschrieben, wie sich die Faserqualität in Bezug auf Dehnung, E-Modul und feinheitsbezogene Höchstzugkraft verändert, wenn die Gegenschneide von der Trommel um 3 mm entfernt wird und der Corncracker zusätzlich das Pflanzenmaterial bearbeitet.

Die Auswertung erfolgte mittels einfaktorieller Varianzanalyse. In der folgenden Tabelle 4.4 sind die Mittelwerte mit der Kennzeichnung der signifikanten Unterschiede dargestellt.

Tab. 4.4: Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalyse der Häckselversuche

Häckselart	Dehnung [%]	E-Modul [MPa]	Feinheitsbezogene Höchstzugkraft [cN tex ⁻¹]
lang	2,67 ^a	13090 ^a	36,00 ^a
lang ohne Gegenschneide	2,94 ^a	18550 ^b	48,47 ^b
lang mit Gegenschneide und Corncracker	2,72 ^a	14100 ^a	36,95 ^a
lang ohne Gegenschneide mit Corncracker	3,65 ^b	12970 ^a	44,66 ^{ab}
Trockenaufschluss	4,65 ^c	13560 ^a	75,11 ^c

In Bezug auf die Dehnung kann kein Unterschied zwischen den Varianten langer Häcksellänge mit geschlossener Gegenschneide und offener Gegenschneide festgestellt werden. Beide Werte liegen innerhalb einer Untergruppe des „Post Hoc“-Tests.

Ein negativer Einfluss des Corncrackers kann nicht festgestellt werden. Die Zuschaltung des Corncrackers weist keinen Unterschied zu der langen Häcksellänge auf. Bei offener Gegenschneide unterscheidet sich die Variante mit zugeschaltetem Corncracker positiv

gegenüber den Varianten der langen Häcksellänge, mit offener Gegenschneide ohne Corncracker sowie mit Gegenschneide und Corncracker.

Der Trockenaufschluss unterscheidet sich bezüglich der Dehnung der Fasern positiv gegenüber allen anderen Einstellungen.

Betrachtet man in Abbildung 4.4 die Verteilung der Messergebnisse in Form von Boxplots, so spiegelt sich das über den Mittelwert beschriebene Ergebnis wider.

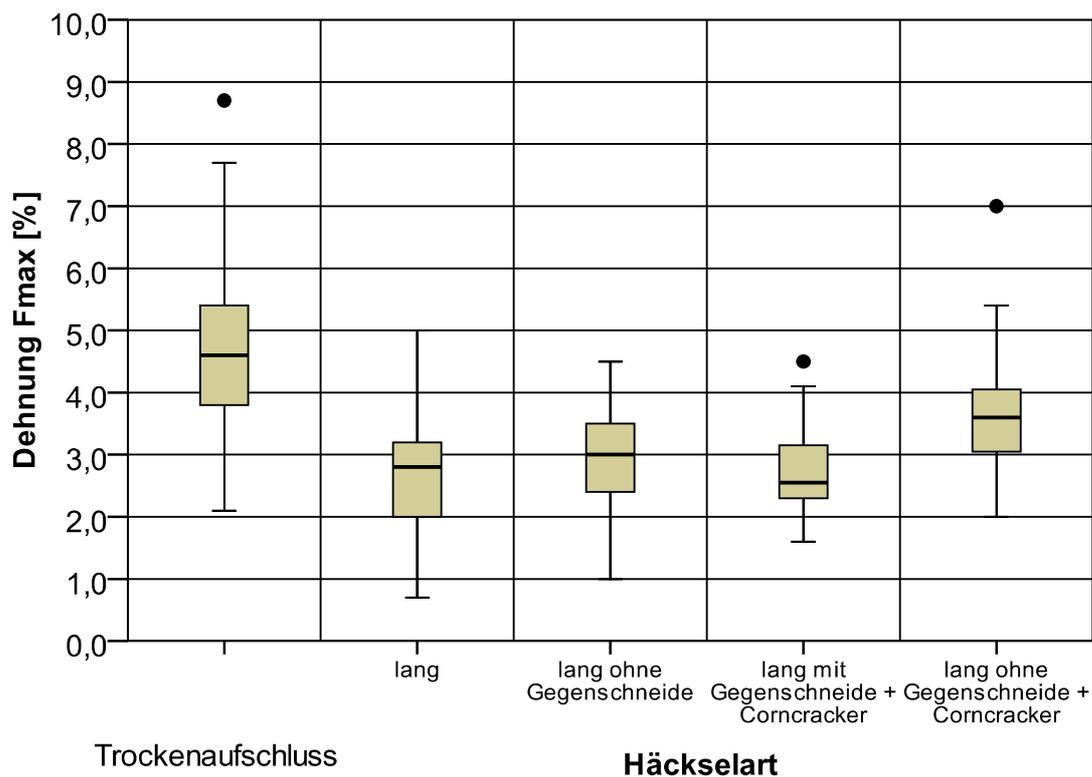


Abb. 4.4: Verteilung der Messwerte der Faserbruchdehnung in Abhängigkeit von der Bearbeitungsintensität als Boxplots

Im Hinblick auf den E-Modul kann festgehalten werden, dass sich die Variante mit offener Gegenschneide ohne Corncracker signifikant von den übrigen Varianten unterscheidet. Dadurch, dass mehrere Einstellungen mit und ohne Corncracker, mit offener und geschlossener Gegenschneide und auch der Trockenaufschluss innerhalb einer Untergruppe des „Post Hoc“-Tests liegen, kann kein Einfluss der Gegenschneide und des Corncrackers auf den E-Modul festgestellt werden.

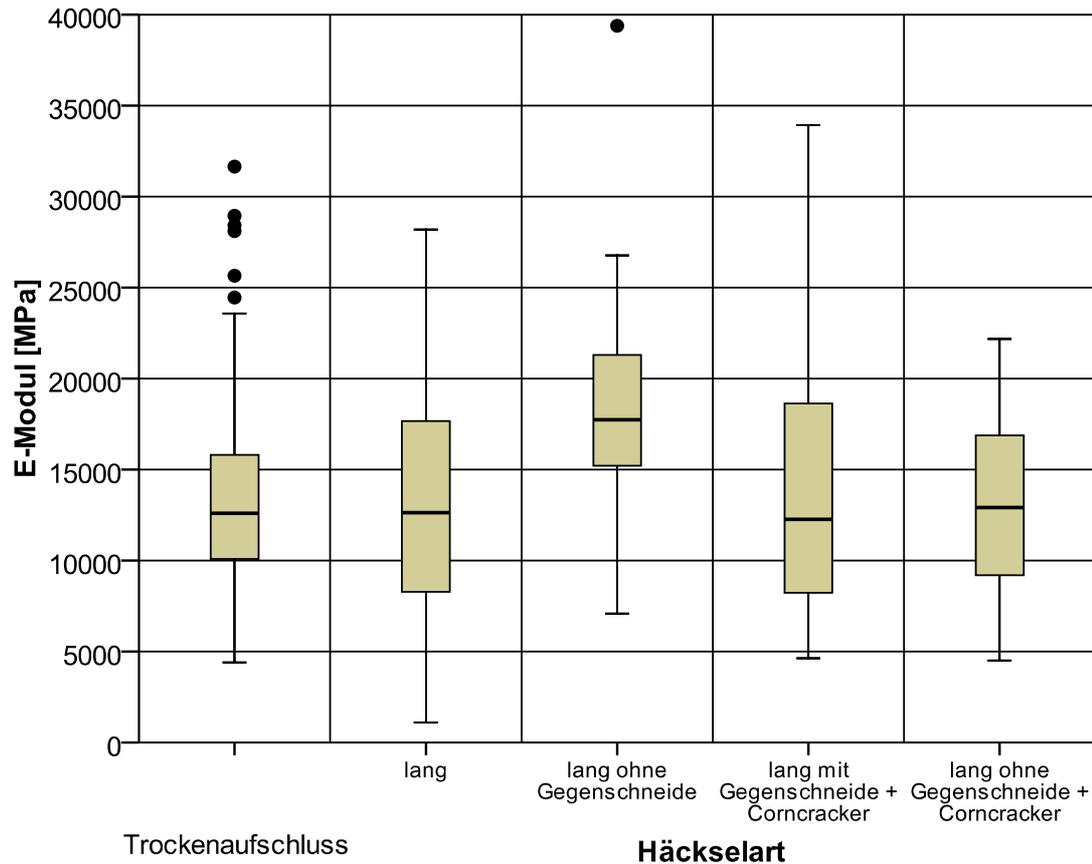


Abb. 4.5: Verteilung der Messwerte des E-Moduls in Abhängigkeit von der Bearbeitungsintensität als Boxplots

Bei Betrachtung des Medians im Hinblick auf den E-Modul zeigt sich bei der langen Häcksellänge - wie dies auch beim arithmetischen Mittel der Fall ist - ein höherer Wert. Der Median wird allerdings von den beiden oberen Quartilen der Häckselvariante mit geschlossener Gegenschneide ohne und mit Corncracker übertroffen. Dies deutet auf einen geringeren Unterschied zu den übrigen Varianten hin als beim Mittelwert berechnet.

Der Corncracker hat keinen Einfluss auf die feinheitsbezogene Höchstzugkraft der Fasern. Beim „Post Hoc“-Test liegen die beiden Varianten mit zugeschaltetem Corncracker in der gleichen Untergruppe wie die lange Häcksellänge ohne Corncracker. Genauso liegt bei offener Gegenschneide jeweils eine Variante mit und ohne Corncracker in der gleichen Untergruppe.

Der Trockenaufschluss weist eine signifikant höhere feinheitsbezogene Höchstzugkraft der Fasern gegenüber allen anderen Varianten auf.

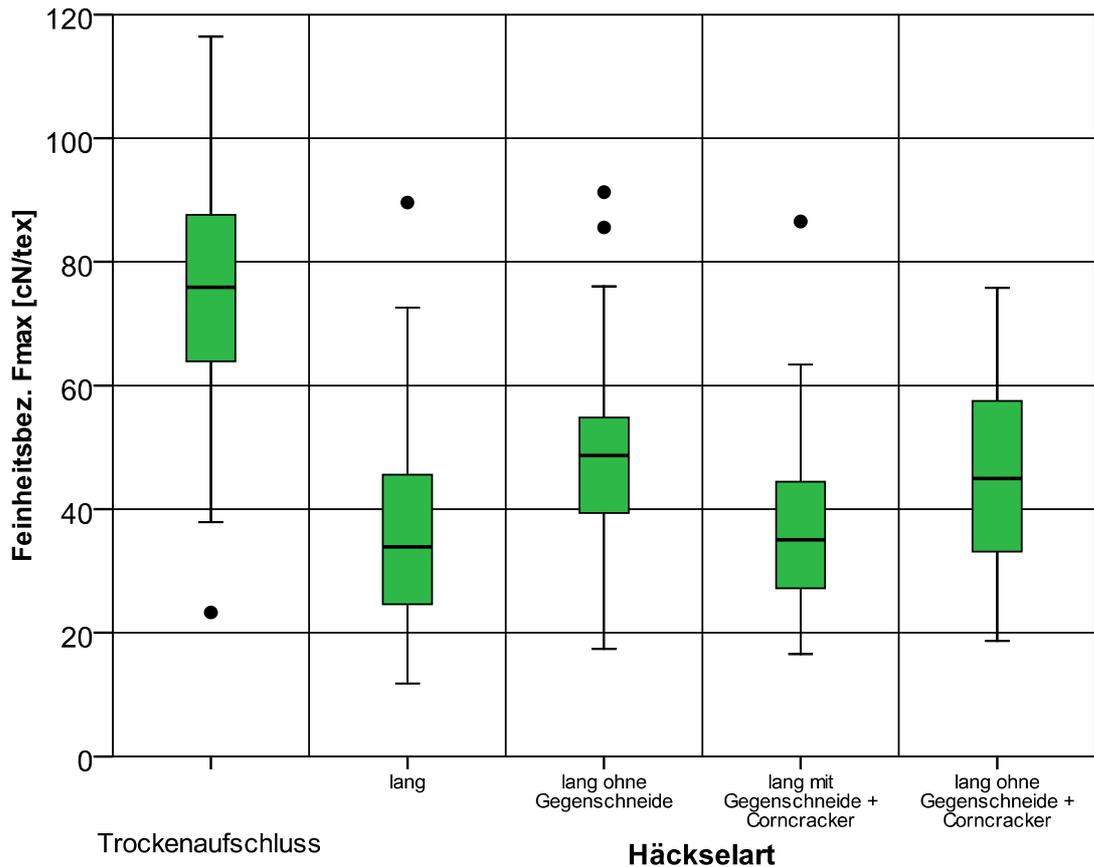


Abb. 4.6: Verteilung der Messwerte der feinheitsbezogenen Höchstzugkraft in Abhängigkeit von der Bearbeitungsintensität als Boxplots

Die bei der Mittelwertanalyse beschriebenen Ergebnisse werden durch die Darstellung als Boxplots bestätigt.

4.1.3 Einfluss des Schnittzeitpunktes auf die Faserqualität

Im vorangegangenen Kapitel wurde davon ausgegangen, dass sich die Faserqualität bei mechanischer Belastung in frischem Zustand verschlechtert. Im Umkehrschluss wurde bei der Anlage des in diesem Kapitel beschriebenen Versuches davon ausgegangen, dass reifere Fasern, in diesem Fall nach dem Blattabwurf der Pflanzen im November geerntet, bei mechanischer Beanspruchung nicht so stark leiden wie jüngere und somit weniger lignifizierte Fasern.

In der Tabelle 4.5 werden die arithmetischen Mittel der Dehnung in Bezug auf die Höchstzugkraft, des E-Moduls und der feinheitsbezogenen Höchstzugkraft für den frühen Erntetermin und der späte Erntetermin verglichen.

Tab. 4.5: Mittelwerte der Faserbruchdehnung, des E-Moduls und der feinheitsbezogenen Höchstzugkraft den frühen und späten Erntetermins; Signifikanzniveau 0,05

Häckselart	Dehnung [%]	E-Modul [MPa]	Feinheitsbezogene Höchstzugkraft [cN tex ⁻¹]
kurz, früh	3,15 ^{ab}	10.620 ^a	33,1 ^a
kurz, spät	3,17 ^{ab}	10.740 ^a	32,9 ^a
lang, früh	2,67 ^a	13.090 ^{ab}	36,0 ^a
lang, spät	2,87 ^{ab}	14.270 ^b	37,9 ^a
Trockenaufschluss, früh	4,65 ^c	13.560 ^b	75,1 ^c
Trockenaufschluss, spät	4,65 ^c	13.740 ^b	76,8 ^c
Bast, früh	3,14 ^{ab}	12.870 ^{ab}	51,1 ^b
Bast,spät	3,21 ^b	13.750 ^b	52,0 ^b

Bei der kurzen Häcksellänge konnte weder bei der Dehnung, beim E-Modul noch bei der feinheitsbezogenen Höchstzugkraft ein signifikanter Unterschied zwischen dem frühen und späten Erntetermin festgestellt werden. Ebenso liegen die Ergebnisse der langen Häcksellänge, die des Bastes und des Trockenaufschlusses jeweils in einer Untergruppe des „Post Hoc“-Tests.

Bei der Darstellung des Medians in einem Boxplot-Diagramm wird dieser Zusammenhang visuell sehr deutlich. Der Median ist jeweils beim frühen und späten Erntetermin auf gleichem Niveau und die Innerquartile weichen sehr wenig voneinander ab.

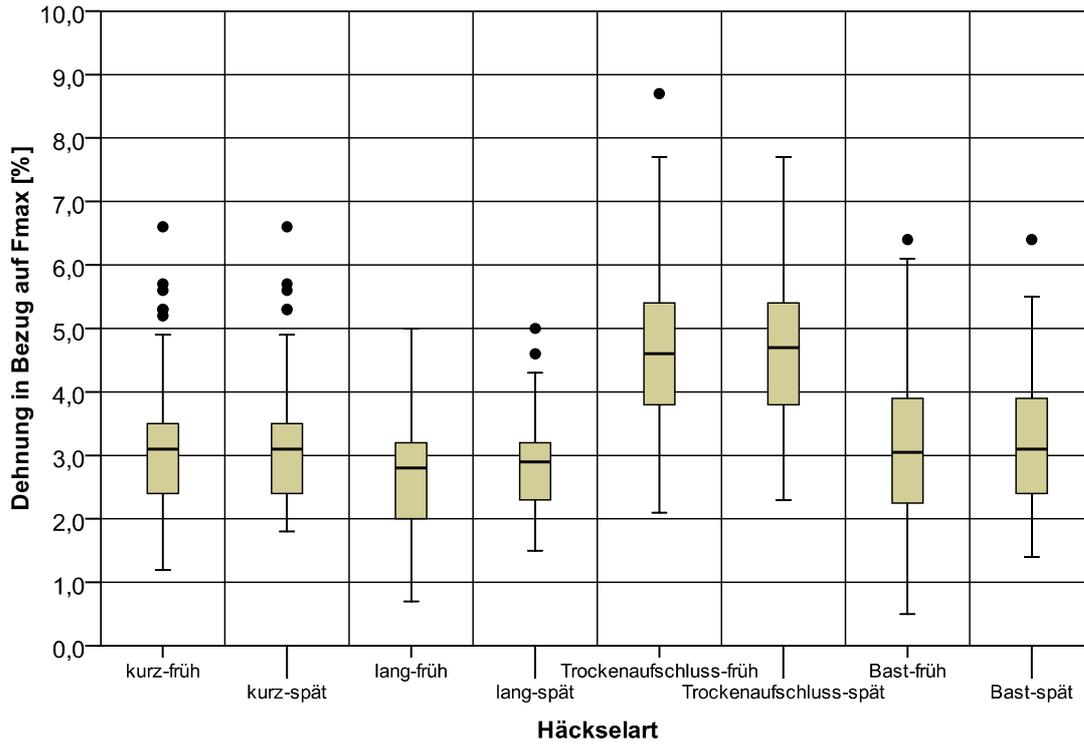


Abb. 4.7: Verteilung der Messwerte der Faserbruchdehnung in Abhängigkeit vom Erntezeitpunkt

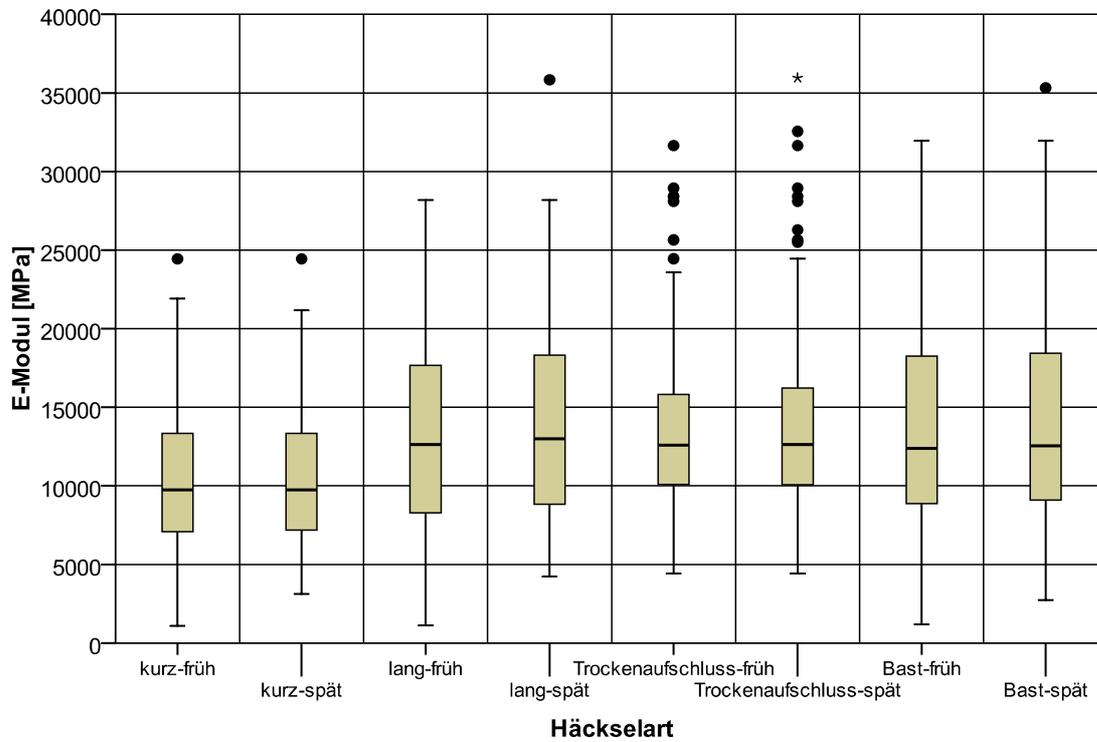


Abb. 4.8: Verteilung Messwerte des E-Moduls in Abhängigkeit vom Erntezeitpunkt

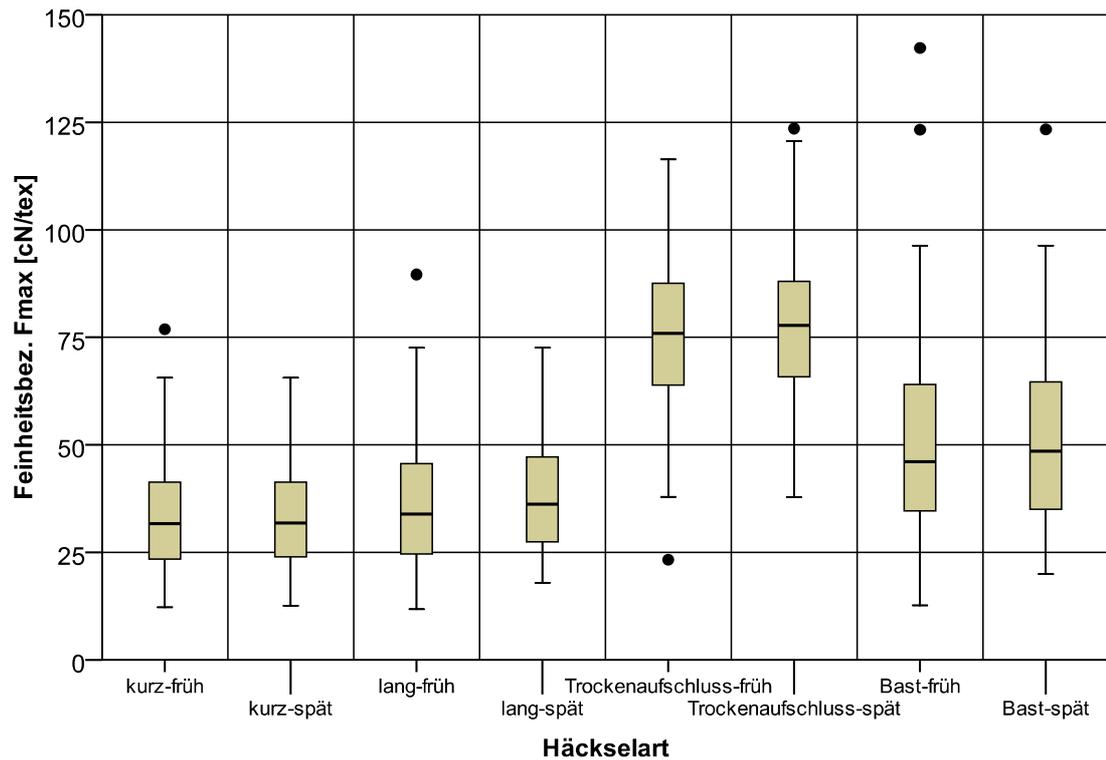


Abb. 4.9: Verteilung der Messwerte der feinheitsbezogenen Höchstzugkraft in Abhängigkeit vom Erntezeitpunkt

Zusammenfassend kann durch die Mittelwertanalyse und die Darstellung der Werte als Boxplots festgehalten werden, dass die Herausögerung des Erntetermins keinen Einfluss auf die Qualitätsfaktoren Bruchdehnung, E-Modul und Höchstzugkraft hat.

4.1.4 Einfluss des Trockensubstanzgehaltes des Pflanzenmaterials beim Häckselaufschluss auf die Fasereigenschaften

In Tabelle 4.6 sind die Ergebnisse der Qualitätsparameter für die unterschiedlichen Materialfeuchtegehalte und Aufschleißarten aufgelistet.

Bei einem Signifikanzniveau von 0,05 ergeben sich für die Dehnung und den E-Modul keine Unterschiede. Es ist lediglich eine Tendenz zu erkennen, dass mit zunehmendem Trockensubstanzgehalt der Wert für den E-Modul zunimmt. Die feinheitsbezogene Höchstzugkraft zeigt einen signifikanten Unterschied des trockenen Häckselmaterials sowie des Trockenaufschlusses mittels Bahmer Entholzungsmaschine zu dem frischen und angetrockneten Material.

Tab. 4.6: Ergebnisse der Varianzanalyse der Qualitätsparameter in Abhängigkeit des Trockensubstanzgehaltes des zu häckselnden Pflanzenmaterials

	Dehnung [%]	E-Modul [MPa]	Feinheitsbezogene Höchstzugkraft [cN tex ⁻¹]
Frisches Material 33 % TM	4,10 ^a	6.470 ^a	34,4 ^a
Angetrocknetes Material 60 % TM	3,62 ^a	6.630 ^a	35,5 ^a
Trockenes Häcksel- material 88 % TM	4,44 ^a	7.180 ^a	47,4 ^b
Trockenaufschluss Flacksy 88 % TM	3,64 ^a	9.290 ^a	50,4 ^b

In den Abbildungen 4.10 bis 4.12 ist jeweils die Verteilung der Messwerte mittels Boxplots visualisiert.

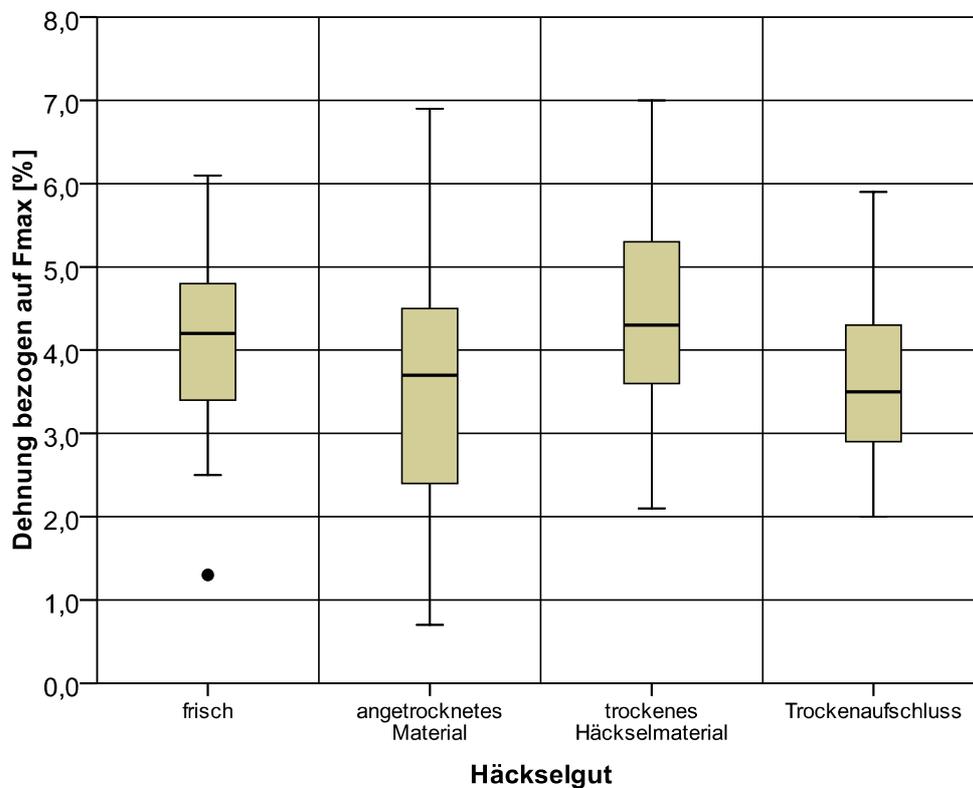


Abb. 4.10: Verteilung der Messwerte der Faserbruchdehnung in Abhängigkeit des Feuchtegehaltes des zu häckselnden Pflanzenmaterials als Boxplots

Der Median spiegelt in den dargestellten Fällen den Sachverhalt wider, der durch die Mittelwertanalyse beschrieben wurde. Bei Betrachtung der Boxplots wird deutlich, warum sich bei steigendem Wert des E-Moduls keine signifikanten Unterschiede ergeben. Die Innerquartile überlappen sich sehr stark.

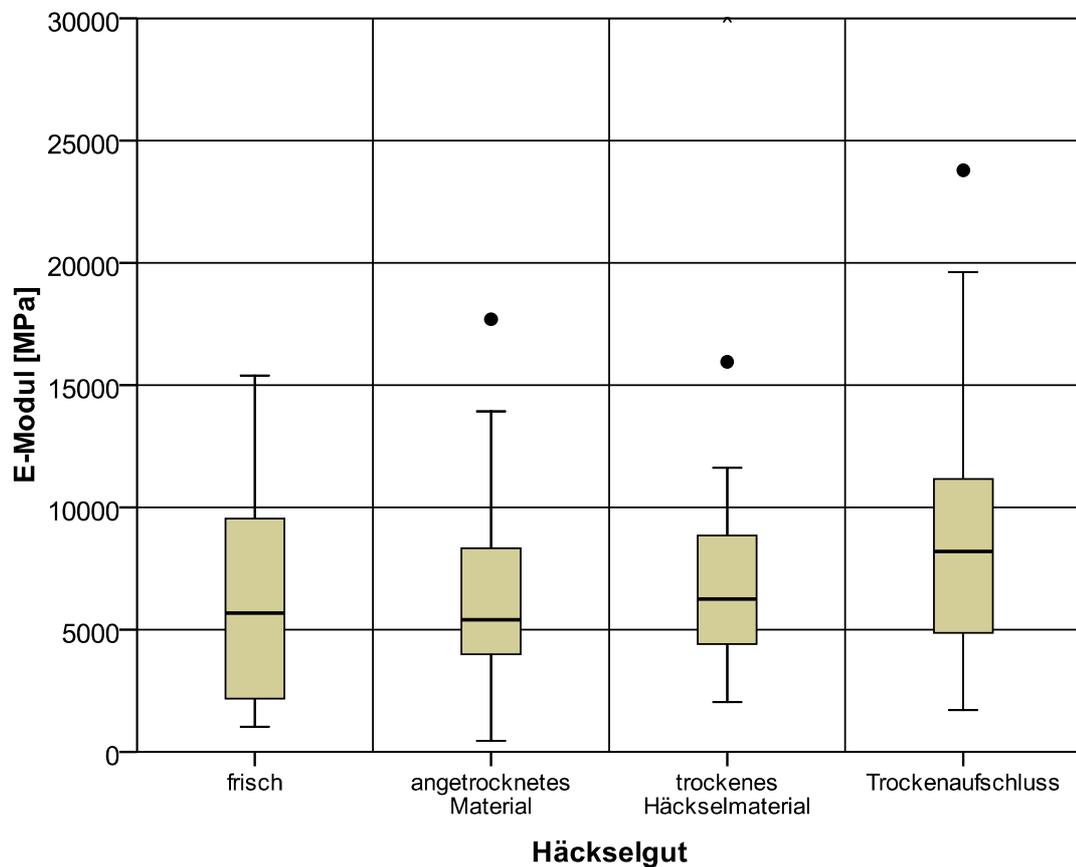


Abb. 4.11: Verteilung der Messwerte des E-Moduls in Abhängigkeit des Trockensubstanzgehaltes des zu häckselnden Pflanzenmaterials

Bei der Betrachtung der Boxplots der feinheitsbezogenen Höchstzugkraft wird deutlich, dass die signifikanten Unterschiede zwischen dem trockenen Pflanzenmaterial und dem frischen bzw. angetrockneten Material nicht so deutlich zum Vorschein kommen. Hierbei ist ebenfalls eine Überlappung der oberen Innerquartile bis über den Median des trockenen Materials zu beobachten.

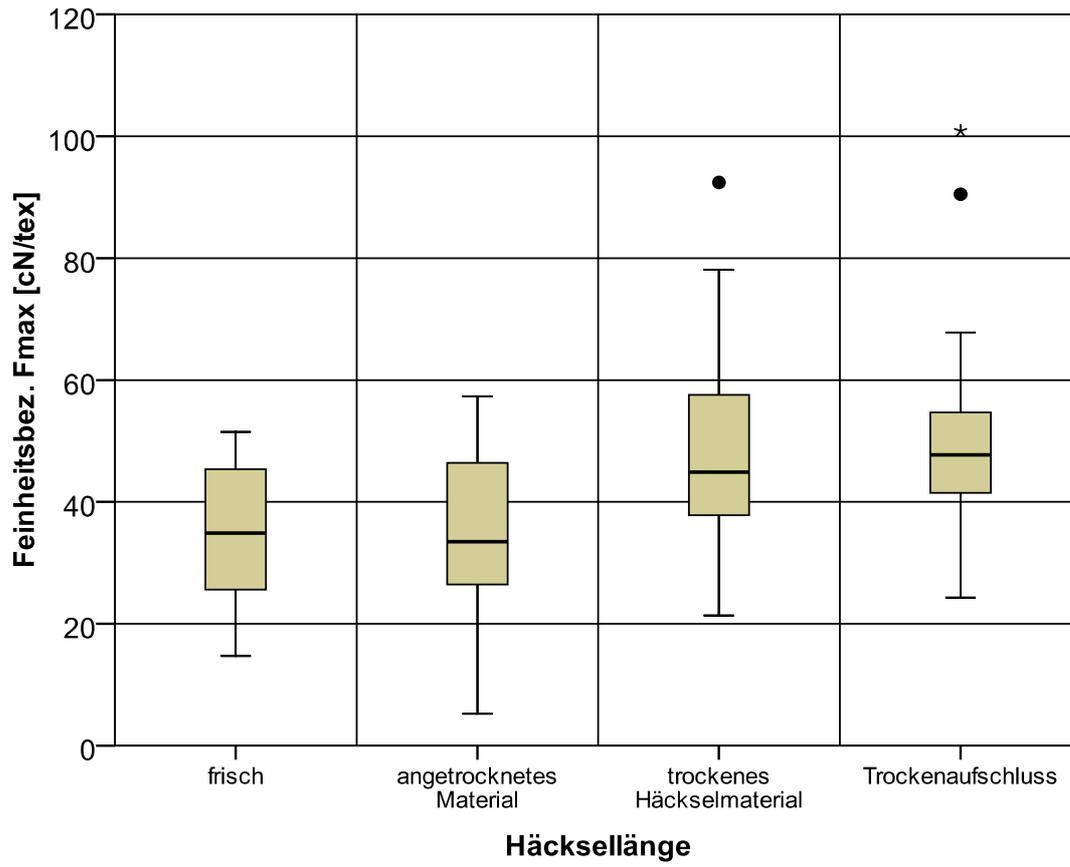


Abb. 4.12: Verteilung der Messwerte der feinheitsbezogenen Höchstzugkraft in Abhängigkeit des Trockensubstanzgehaltes des zu häckselnden Pflanzenmaterials

4.2 „CULTAN“-Versuche

Wie im Kapitel „Stand des Wissens“ schon detaillierter erläutert wurde, ist das Pflanzenwachstum von vielen biotischen und abiotischen Faktoren abhängig. Zu diesen Faktoren gehören u.a. der Niederschlag und die Temperatur. Auf der Lehr-Forschungsstation Dikopshof werden aus diesem Grund Wetterdaten aufgezeichnet. In der nachfolgenden Tabelle sind die monatsbezogenen Temperaturen und Niederschläge während der Wachstumsperiode des Hanfes dargestellt. Diese sind für die Interpretation der nachfolgenden Ergebnisse von Interesse.

Tab. 4.7: Monatsbezogene Niederschlags- und Temperatursummen in der Vegetationszeit des Hanfes auf der Lehr- und Forschungsstation Dikopshof von 2003 bis 2005

Jahr		Niederschlag [mm]	Temperatur [°C]
2003	April	34,7	10,1
	Mai	66,2	14,6
	Juni	65,7	19,7
	Juli	49,6	19,8
	Summe	216,2	64,2
2004	April	56,0	10,6
	Mai	50,4	12,4
	Juni	59,9	16,1
	Juli	76,4	17,5
	Summe	242,7	56,6
2005	April	77,1	10,6
	Mai	72,7	14,2
	Juni	76,9	17,9
	Juli	71,0	18,4
	Summe	297,7	61,1

Ferner spielt der im Boden vorhandene pflanzenverfügbare Stickstoff eine Rolle. Dieser Wert ist eine Momentaufnahme zu Beginn der Versuchsanlage, der sich jedoch stündlich ändern kann und somit diskussionswürdig erscheint. In der nachfolgenden Tabelle sind die Werte für Nitrat und Ammonium zu Beginn der Vegetation des Hanfes dargestellt.

Tab. 4.8: Nitrat- und Ammoniumstickstoffgehalte in kg ha⁻¹ im Boden der Versuchsfläche zu Beginn der Vegetationsperiode des Hanfes auf der Lehr- und Forschungsstation Dikopshof von 2003 bis 2005

Versuchsjahr	Stickstoffform	Entnahmetiefe			Summe	Total
		0 – 30 cm	30 – 60 cm	60 – 90 cm		
2003	NO ₃ -N	8,4	18,3	21,9	48,6	
	NH ₄ -N	13,1	10,1	7,8	31,1	79,7
2004	NO ₃ -N	2,8	10	16,2	29	
	NH ₄ -N	3,6	3,4	2,5	9,5	38,5
2005	NO ₃ -N	4,6	8,9	13,2	26,7	
	NH ₄ -N	3,1	3,7	3,2	10	36,7

4.2.1 Ausdünnungseffekt

Hanf reagiert auf zu hohe Bestandesdichten oder andere ungünstige Faktoren mit einer Selbstausdünnung. Bei den „CULTAN“-Düngungsversuchen wurde die Selbstausdünnung des Bestandes miterfasst, um Rückschlüsse auf Saatguteinsparungen und die Qualität der Fasern zu ziehen. In Tabelle 4.9 sind die mittleren Ausdünnungsgeraten in Bezug auf den aufgelaufenen Ausgangsbestand dargestellt. Auf eine Unterscheidung der unterschiedlichen Düngungsstufen muss dabei nicht eingegangen werden, da diese keinen Einfluss auf die Keimung und den Auflauf der Keimlinge haben.

Tab. 4.9: Ausdünnungsraten in Bezug auf den aufgelaufenen Bestand

Versuchsjahr	S108		S216	
	Auflauf [%]	Ausdünnung [%]	Auflauf [%]	Ausdünnung [%]
2003	80,4	8,9	76,3	23,2
2004	95,5	14,9	90,3	18,4
2005	79,1	5,3	73,9	5,6

Der Auflauf der ausgesäten Samen lag in den Jahren 2003 und 2005 zwischen ca. 74 und 80 %. Im Jahr 2004 betrug der Anteil der aufgelaufenen Samen zwischen 90 % und 95 %. Dabei hebt er sich um einen um rund 15 % höheren Anteil bezüglich des Auflaufes hervor. Auffällig ist, dass bei der höheren Saatstärke in allen Versuchsjahren der Anteil der aufgelaufenen Samen ca. 5 % niedriger war.

Bei der statistischen Betrachtung der Daten stellt sich heraus, dass lediglich im Versuchsjahr 2003 die Verteilung der Ausdünnungswerte zwischen den Parzellen eine Normalverteilung aufweist. Im Anbaujahr 2003 sind wie erwartet bei der praxisüblichen Saatkichte mehr Pflanzen unterdrückt worden als bei der reduzierten Saatkichte. Die Werte können den Tabellen 4.10 bis 4.12 entnommen werden.

Da davon auszugehen ist, dass die Düngung als Wachstumsfaktor einen Einfluss auf die Ausdünnung hat, wurde der Einfluss der Düngung mit in die statistische Auswertung einbezogen. Die durchgeführte Varianzanalyse zeigte, dass die Düngung und die Saatstärke hoch signifikante Einflüsse auf die Selbstausdünnung hatten. Jedoch konnten Wechselwirkungen zwischen der Saatstärke und der Düngung festgestellt werden. Resultierend daraus können keine Aussagen über die Abhängigkeit der Ausdünnung von der Düngung gemacht werden.

Tab. 4.10: Homogene Untergruppen des Tukey-HSD-Tests zur Ausdünnung 2003 als Mittelwerte in %

Düngung	N	Untergruppe		
		1	2	3
Kontrolle (N0)	7	4,7		
CULTAN 60 (N60)	5		14,0	
CULTAN 120 (N120)	7		20,9	20,9
KAS 120	6			26,5
Signifikanz		1,000	0,186	0,328

Da die Mittelwerte nicht aussagekräftig sind, ist in Abbildung 4.13 die Streuung der Daten dargestellt. Die Streuungswerte für die nachfolgend erläuterten Versuchsjahre sind dort ebenfalls abgetragen.

Tab. 4.11: Homogene Untergruppen des Tukey-HSD-Tests zur Ausdünnung 2004 als Mittelwerte in %

Düngung	N	Untergruppe	
		1	2
Kontrolle (N0)	8	5,3	
CULTAN 60 (N60)	6	11,7	
CULTAN 120 (N120)	6	18,7	18,7
KAS 120	6		34,7
Signifikanz		0,146	0,066

Im Versuchsjahr 2004 konnte ein hochsignifikanter Einfluss der Düngung auf die Ausdünnung mittels Varianzanalyse festgestellt werden. Ein signifikanter Einfluss der Saatstärke konnte 2004 nicht festgestellt werden. Wechselwirkungen sind nicht ermittelt worden.

Die Kontrollvariante und die reduzierte „CULTAN“-Variante hatten eine statistisch abgesichert geringere Ausdünnung gegenüber der KAS-Variante. Zu der „CULTAN“-Variante konnten keine abgesicherten Unterschiede festgestellt werden. Die beiden Varianten mit der hohen Stickstoffgabe unterschieden sich nicht signifikant voneinander.

2005 waren Unterschiede in Ausdünnungsrate zwischen den Parzellen kaum erkennbar. Zusätzlich wurde beim Test auf Varianzgleichheit festgestellt, dass sich signifikante Unterschiede in den Varianzen ergeben haben und somit die Ergebnisse aus der Stichprobe nicht auf die Grundgesamtheit übertragen werden können.

Tab. 4.12: Homogene Untergruppen des Tukey-HSD-Tests zur Ausdünnung 2005 als Mittelwerte in %

Düngung	Untergruppe	
	N	1
Kontrolle (N0)	6	3,0
KAS 120	6	3,3
CULTAN 60 (N60)	6	3,9
CULTAN 120 (N120)	8	10,0
Signifikanz		0,358

Zusammenfassend ist festzustellen, dass über die drei Versuchsjahre keine Unterschiede im Einfluss der Düngung und der Saatstärke auf die Ausdünnung erkannt werden konnten. In den beiden ersten Versuchsjahren war eine Tendenz zu erkennen, dass mit zunehmender Düngungsstufe der Anteil der Ausdünnung steigt. Als Maß, wie stark die Ausdünnung über die unabhängigen Variablen (hier die Stickstoffdüngung) beschrieben werden kann, dient der „korrigierte R-Quadrat“-Wert aus dem Test der Zwischensubjekteffekte. Dieser nimmt über die untersuchten Jahre von 0,832 über 0,483 bis auf 0,066 ab. Bei separater Berechnung der vorgenannten Werte für die praxisübliche und die reduzierte Saatstärke spiegelt sich das Ergebnis in gleicher Weise für beide Saatstärken wider.

Um die Auswirkung der Düngung und Saatstärke auf den Ausdünnungseffekt deutlicher zu zeigen, ist in der Abbildung 4.13 die Streuung der Werte in Boxplots dargestellt, aus denen auch Extremwerte bzw. Ausreißer entnommen werden können.

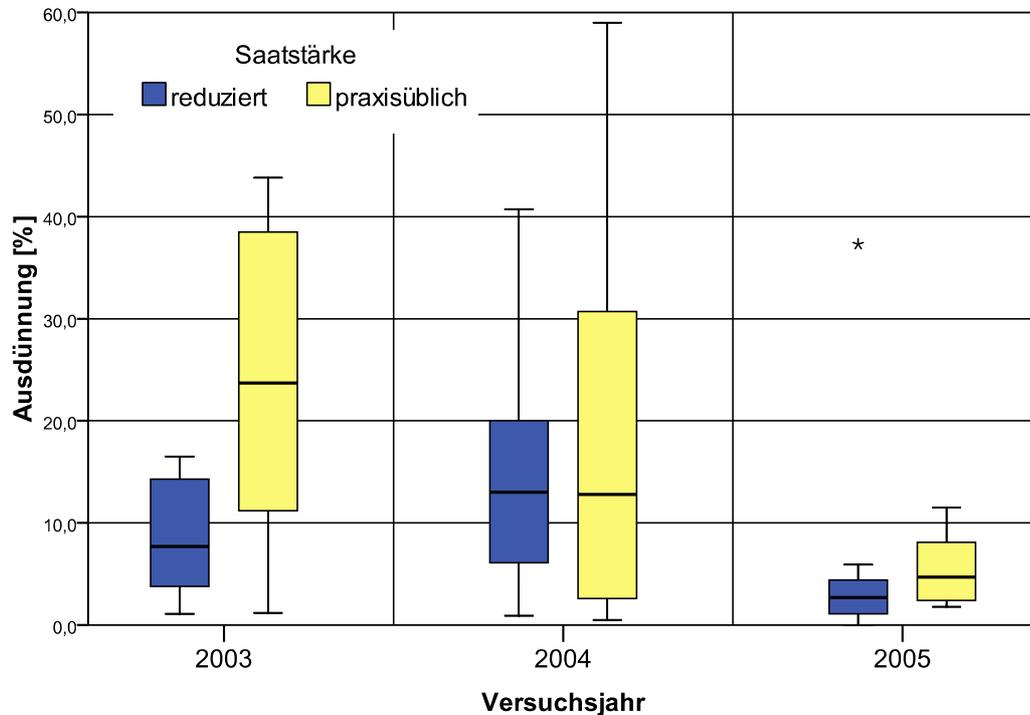


Abb. 4.13: Ausdünnungseffekte bei den Düngungsversuchen 2003 bis 2005 als Boxplots

Die Darstellung der Ausdünnung mittels Boxplot zeigt in etwa die gleiche Tendenz wie die Auswertung der Daten über den Mittelwert. Im Jahr 2003 liegen die Werte der Mediane etwas weiter auseinander als die Mittelwerte. 2004 zeigt der Median der Ausdünnung (anders als beim Mittelwert) in der praxisüblichen Saatstärke einen niedrigeren Wert als der der reduzierten Saatstärke. Im Jahr 2005 liegen die Mediane etwas weiter auseinander als die Mittelwerte. Bei der reduzierten Saatstärke tritt jedoch ein Extremwert auf.

4.2.2 Wuchsentwicklung

Bei der Untersuchung der Zunahme des Durchmessers von jeweils 10 markierten Pflanzen je Parzelle stellten sich bei der statistischen Auswertung keine signifikanten Unterschiede heraus. Die Zunahme lag bedingt durch das Messsystem teilweise im negativen Bereich. Dies wird durch die im Kapitel „Material und Methoden“ beschriebene Messweise und im Kapitel „Diskussion“ interpretierten Sachverhalt erklärt. Teilweise wurden in verschiedenen Jahren Wechselwirkungen festgestellt, so dass kein

Rückschluss auf die einzelnen Faktoren gezogen werden kann. Es kann behauptet werden, dass an den gemessenen Stellen über den systematischen Messfehler keine Durchmesserzunahme festgestellt werden kann.

Tab.4.13: Mittelwerte der Stängeldurchmesser in der Mitte des Stängels

Saatstärke	Düngung	Stängeldurchmesser [mm]		
		2003	2004	2005
Reduziert	Kontrolle	7,2	5,4	7,0
	"CULTAN" 60	8,4	5,7	7,6
	"CULTAN" 120	8,1	6,3	7,6
	KAS 120	9,3	6,6	7,4
	Gesamt	8,2	5,9	7,4
Praxisüblich	Kontrolle	6,2	4,8	6,5
	"CULTAN" 60	7,0	5,1	6,0
	"CULTAN" 120	7,4	5,3	6,6
	KAS 120	7,9	5,6	6,7
	Gesamt	7,0	5,2	6,5
Gesamt	Kontrolle	6,6	5,1	6,8
	"CULTAN" 60	7,7	5,4	6,8
	"CULTAN" 120	7,8	5,8	7,1
	KAS 120	8,6	6,1	7,1
	Gesamt	7,6	5,6	6,9

Bei der statistischen Auswertung des Einflusses der Faktoren auf den Stängeldurchmesser der Pflanzen konnten signifikante Unterschiede bezüglich der Saatstärke sowie der Düngung festgestellt werden. Lediglich im letzten Versuchsjahr war kein signifikanter Unterschied bezüglich der Düngungsstufen nachweisbar. Wie in der oben dargestellten Tabelle 4.13 nimmt der Durchmesser mit zunehmender Stickstoffgabe zu. Dies wurde, wie bereits beschrieben, mit Ausnahme des Versuchsjahres 2005 durch eine Varianzanalyse belegt. Es ist zu erkennen, dass bei reduzierter Anzahl an Pflanzen je Fläche der Stängeldurchmesser größer ist als bei einer höheren Zahl an Pflanzen. In Bezug auf die „CULTAN“-Düngung kann kein signifikanter Unterschied zur herkömmlichen KAS-Düngung belegt werden. Bei der Betrachtung der einzelnen Versuchsjahre lag das Jahr 2004 im Durchmesser der

Stängel rund 1,5 bis 2 mm niedriger als die anderen beiden Jahre. Dies ist durchgängig für alle Varianten der Saatstärke zu erkennen. Wie sich der geringere Stängeldurchmesser auf den Strohertrag auswirkt, wird im Kapitel 4.2.3 dargelegt.

Im Bezug auf die Längenzunahme der Pflanzen konnten in den beiden ersten Versuchsjahren signifikante Unterschiede festgestellt werden. Die Wuchslängenzunahme war signifikant von der Stickstoffdüngung abhängig. Die Saatstärke hatte keinen signifikanten Einfluss auf die Wuchslängenzunahme. Im Jahr 2005 traten Wechselwirkungen zwischen den unabhängigen Faktoren auf. Deshalb wird auf eine tabellarische Darstellung der Werte verzichtet. Um den Einfluss der Düngung und Saatstärke zu verdeutlichen, sind die Verteilungen der Messergebnisse in den Abbildungen 4.14 bis 4.16 als Boxplots dargestellt.

Bei der Wuchshöhe konnten im ersten Versuchsjahr signifikante Unterschiede zwischen den gedüngten und nicht gedüngten Parzellen (Kontrolle) nachgewiesen werden. Zwischen den gedüngten Varianten selbst wurden keine signifikanten Unterschiede festgestellt.

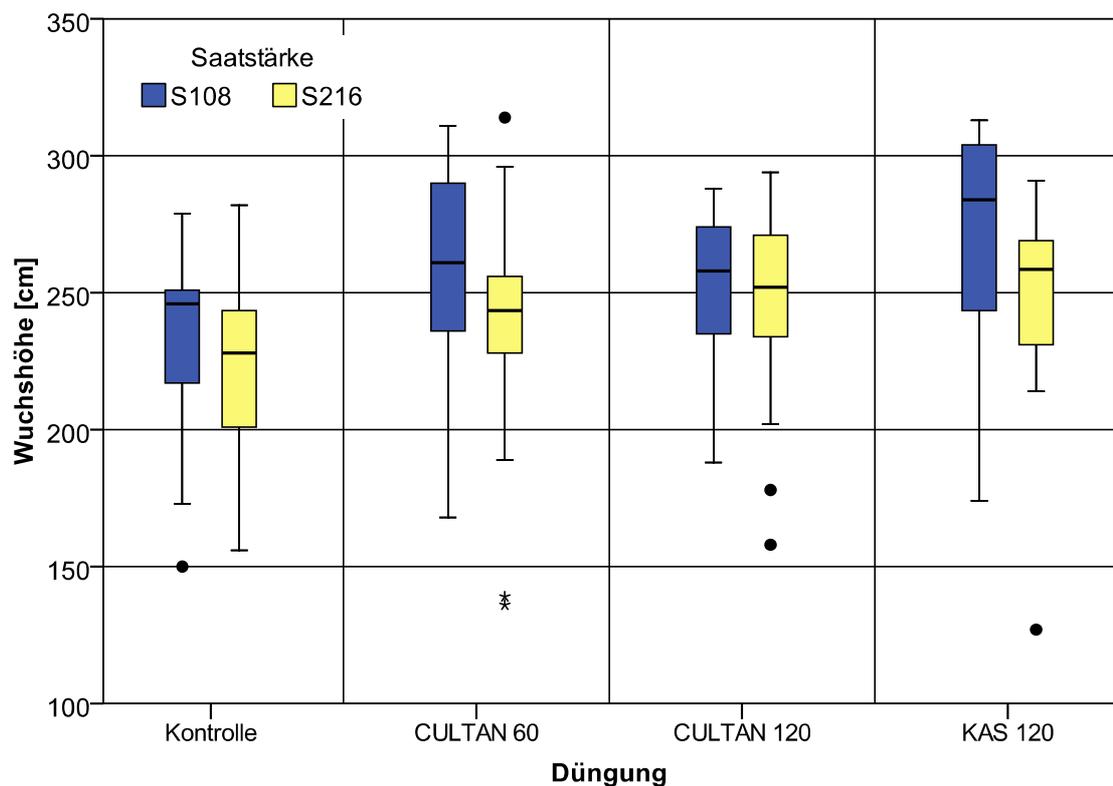


Abb. 4.14: Verteilung der Messwerte für die Wuchshöhen im Versuchsjahr 2003 als Boxplots

In Abbildung. 4.14 ist zu erkennen, dass die Wuchshöhe in Bezug auf den Median bei der reduzierten Aussaatstärke höher liegt als bei der praxisüblichen Saatstärke. Ebenfalls ist zu erkennen, dass das Niveau der Wuchshöhen bei den gedüngten Varianten höher ist als bei den ungedüngten.

Die nachfolgende Abbildung. 4.15 zeigt für das Versuchsjahr 2004 in Bezug auf die Aussaatstärke die gleichen Ergebnisse wie Abbildung 4.14 für 2003. Das Wuchshöhenniveau von 2003 konnte im Jahr 2004 nicht erreicht werden. Bei der praxisüblichen Saatstärke unterscheiden sich die Wuchshöhen in allen Düngungsstufen kaum voneinander.

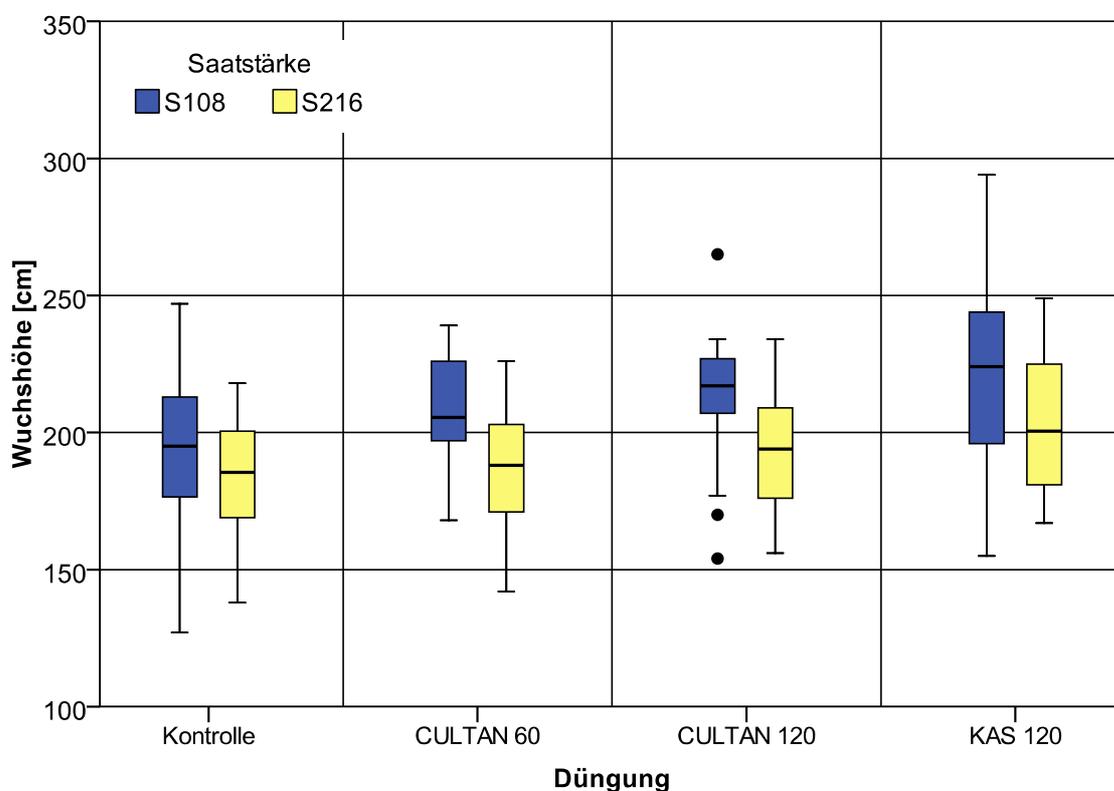


Abb. 4.15: Verteilung der Messwerte für die Wuchshöhen im Versuchsjahr 2004 als Boxplots

Die Wuchshöhen unterscheiden sich im Versuchsjahr 2005 wieder von denen der vorherigen Jahre. Die „CULTAN“ gedüngten Varianten unterscheiden sich nicht von der Kontrolle. Bei der „CULTAN 60“-Variante schnitt die praxisübliche Saatstärke schlechter ab als die Kontrolle, während bei der KAS-Variante die reduzierte Saatstärke im Vergleich zur Kontrolle schlechter abschnitt.

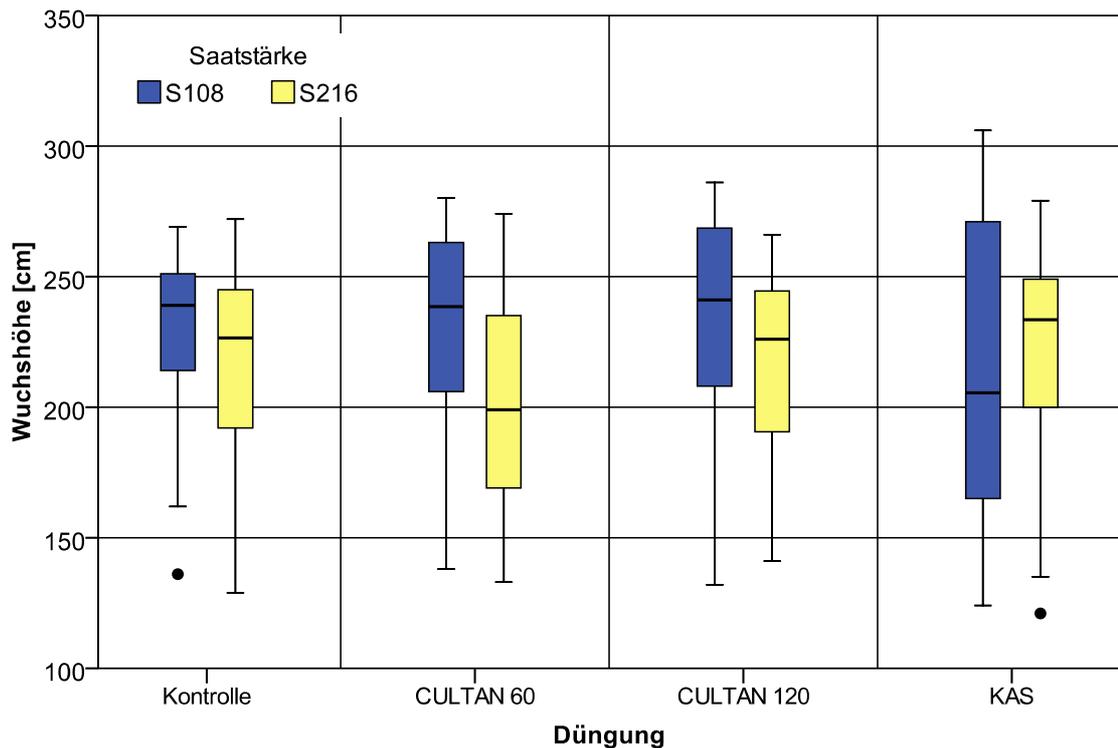


Abb. 4.16: Verteilung der Messwerte für die Wuchshöhen im Versuchsjahr 2005 als Boxplots

4.2.3 Strohtrockenmasseertrag des Hanfstrohs

Bei der statistischen Auswertung der Strohtrockenmasseerträge ergaben sich für alle Versuchsjahre beim Levene-Test auf Varianzhomogenität signifikante Unterschiede zwischen den abhängigen Variablen. Aus diesem Grund werden in den folgenden Abbildungen die Mittelwerte der Erträge mit der jeweiligen Abweichung der Messwerte nach oben und nach unten dargestellt.

In Abbildung 4.17 ist zu erkennen, dass es einen deutlichen Jahreseinfluss auf den Strohtrockenmasseertrag des Hanfes gab. Hierbei sticht das Jahr 2003 hervor. Mit einem durchschnittlichen Ertragsniveau von über 14 t Trockenmasse lag der Strohrtrag über den in der Literatur erwähnten Angaben. Die Fehlerbalken in den Diagrammen 4.17 bis 4.20 geben die Minimum- und Maximumwerte an.

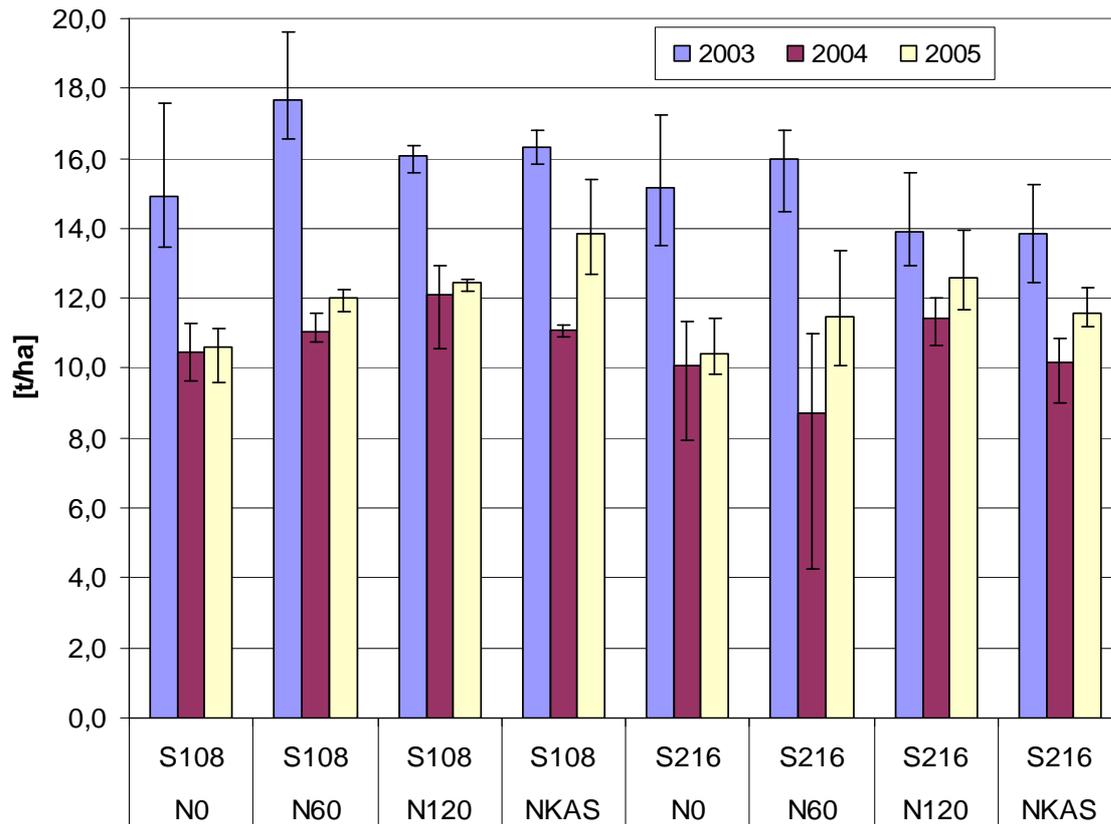


Abb. 4.17: Trockenmasseertrag von Hanfstroh in den Düngungsversuchen mit reduzierter und praxisüblicher Saatstärke

Bei der geringeren Saatstärke ist im Jahr 2003 der Ertrag in jeder Behandlung höher als in den beiden darauf folgenden Jahren. Lediglich die KAS-Variante überlappt (durch Minimum und Maximumbalken dargestellt) im Jahr 2005 die Kontrollvariante im beschriebenen Jahr 2003. In den Jahren 2004 und 2005 konnten bei der niedrigen Saatstärke keine Unterschiede im Ertrag festgestellt werden. Wie erwartet stieg der Ertrag tendenziell mit steigender Stickstoffdüngung an. Hierbei bildet jedoch die KAS-Variante im Jahr 2004 eine Ausnahme. Der Ertragszuwachs im Vergleich zur Kontrollparzelle lag lediglich in der Höhe der N60-Variante der „CULTAN“-Düngung.

Bei der praxisüblichen Saatstärke war der Strohertrag im Jahr 2003 im Durchschnitt höher als in den Folgejahren, jedoch wurde dieser Ertrag durch die Streuung in den beiden Varianten mit 120 kg N-Gabe überlappt. Dabei sind die beiden Varianten mit der höheren Stickstoffdüngung im Schnitt niedriger als die Kontroll- und N60-Variante, was durch die große Streuung der Messwerte insgesamt aber nicht statistisch belegt werden kann. Im Jahr 2004 unterlag der Strohertrag einer sehr großen Schwankung sowohl zwischen den verschiedenen Behandlungen als auch innerhalb der einzelnen. Hier kann keinerlei Aussage über den Einfluss der Behandlungen gemacht werden.

4.2.4 Fasergehalt und –ertrag des Hanfstrohs

Bei der Prüfung der abhängigen Variable Fasergehalt auf ihre Homogenitätsgleichheit erwiesen sich für das Versuchsjahr 2003 signifikante Unterschiede, so dass die Variablen statistisch nicht korrekt abgesichert miteinander verglichen werden können. In den beiden darauf folgenden Jahren war die Homogenität gegeben, doch konnten, mit Ausnahme des Düngungseffektes im Jahr 2005, bei der Varianzanalyse keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Aufgrund des geringen Stichprobenumfanges ist die Absicherung des Düngungseffektes ebenfalls kritisch zu betrachten. Aus diesen Gründen werden die Ergebnisse in den folgenden Abbildungen (Abb. 4.18 bis 4.20) als Balkendiagramme mit der entsprechenden Abweichung der Werte nach oben und unten dargestellt.

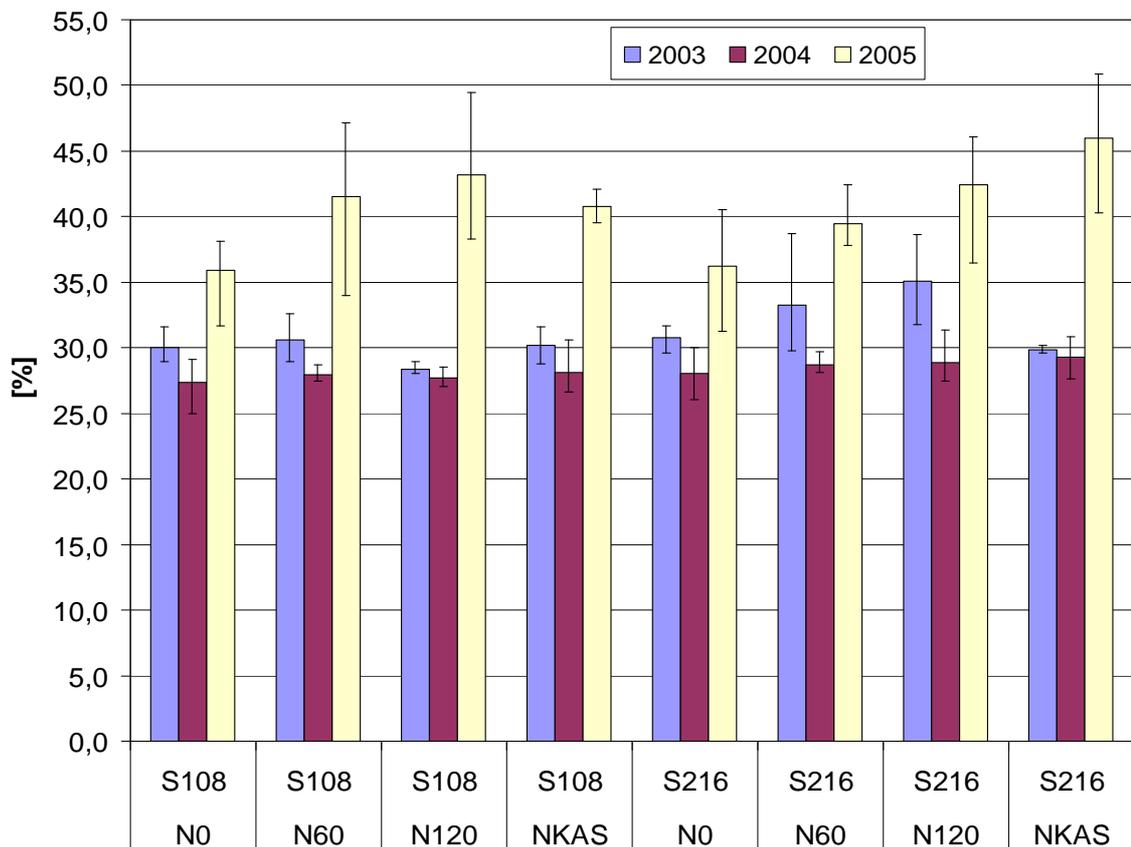


Abb. 4.18: Fasergehalt des Hanfstrohs in den Düngungsversuchen

Der Gehalt an Fasern schwankt um den Bereich 40 %. Die Fasergehalte der anderen untersuchten Varianten schwanken um den in der Literatur üblich angegebenen Wert von ca. 30 %.

Bei der Streuung des Fasergehaltes und auch im Fasergehalt selbst weichen im Jahr 2003 die beiden „CULTAN“-Varianten der betriebsüblichen Saatstärke von den übrigen Werten in den Jahren 2003 und 2004 ab.

Beim Fasergehalt der Pflanzen innerhalb des Düngungsversuches überragen die Varianten des Jahres 2005 die anderen beiden Jahre, was in Abbildung 4.18 visualisiert ist. Dort ist zu erkennen, dass die ermittelten Werte des Fasergehaltes im beschriebenen Jahr stärker schwanken als bei den anderen untersuchten Varianten.

Wie sich der Fasergehalt in Bezug auf den Faserertrag auswirkt, ist in Abbildung 4.19 dargestellt. Auffällig zeigt sich hierbei das Jahr 2004. Alle Versuchsvarianten bildeten einen geringeren Faserertrag aus als die Varianten der anderen beiden Versuchsjahre. Lediglich die Streuungen der Kontrollvarianten aus dem Jahr 2005 mit den Fasererträgen aus dem Jahr 2004 überlappen sich.

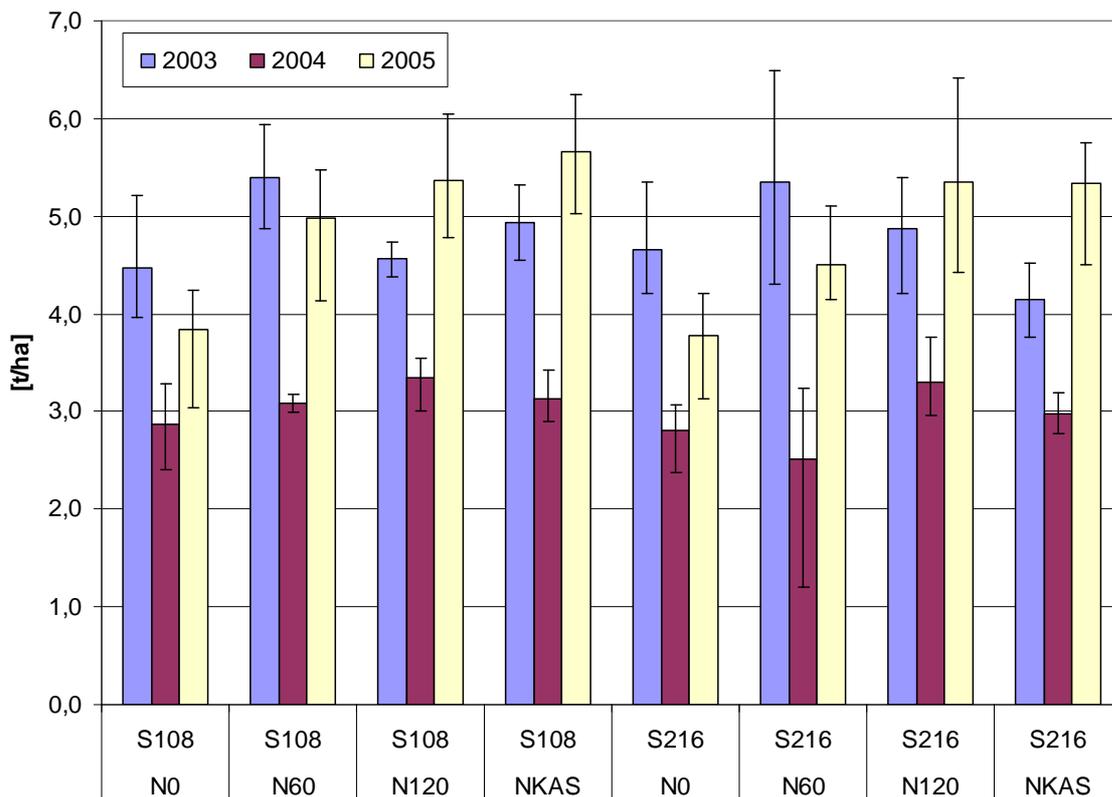


Abb. 4.19: Faserertrag in den Düngungsversuchen

Durch den hohen Strohertrag im Jahr 2003 gleichen sich die Fasererträge auf die Fläche bezogen aus den Versuchsjahren 2003 und 2005 an. Die Versuchsvarianten aus dem Jahr 2005 zeigen mit zunehmender Stickstoffdüngung eine Zuwachstendenz an ausbeutbaren Fasern im Bezug auf die Fläche. Die Streuung der ermittelten Werte ist

jedoch so groß, dass lediglich von einer Tendenz gesprochen werden kann. Der Faserertrag je Hektar beläuft sich bei den beiden näher beschriebenen Jahren auf etwa 5 t. Ein Effekt der Ammoniumdepotdüngung kann aufgrund der dargestellten Zahlen nicht festgestellt werden. Im Jahr 2005 ergab sich bei der praxisüblichen Saatstärke kein Unterschied. In den anderen Jahren war bei der praxisüblichen Saatstärke ein tendenziell höherer Faserertrag bei der „CULTAN“-Düngung festzustellen. Bei der um die Hälfte reduzierten Saatstärke zeigt sich ein umgekehrtes Bild. Dort war die herkömmliche Düngevariante mit einer schnell und langsam wirkenden Stickstoffform tendenziell im Faserertrag höher.

4.2.5 Schäbenertrag

Der Schäbenertrag ist komplementär zum Faserertrag zu betrachten. Aus diesem Grund werden die Daten in reduziertem Umfang dargestellt. Die Problematik der Varianzhomogenität ist bei diesen Daten ebenso gegeben wie beim Fasergehalt und –ertrag.

Beim Schäbenertrag überragte das Jahr 2003 mit seinen Werten die beiden anderen Versuchsjahre. Dies resultierte aus dem hohen Ertrag in Verbindung mit dem niedrigen Fasergehalt und damit höheren Schäbengehalt.

Bei der betriebsüblichen Saatstärke fällt auf, dass die Varianten der hohen Stickstoffdüngung im Jahr 2003 einen tendenziell geringen Schäbenertrag erbracht haben. Dies ist bei der reduzierten Saatstärke nicht ausgeprägt. Dabei sticht die Variante mit der reduzierten „CULTAN“-Düngung etwas hervor. Anzumerken ist noch die große Streuung der Kontrollvariante, die die Werte der mit Stickstoff versorgten Parzellen überragt.

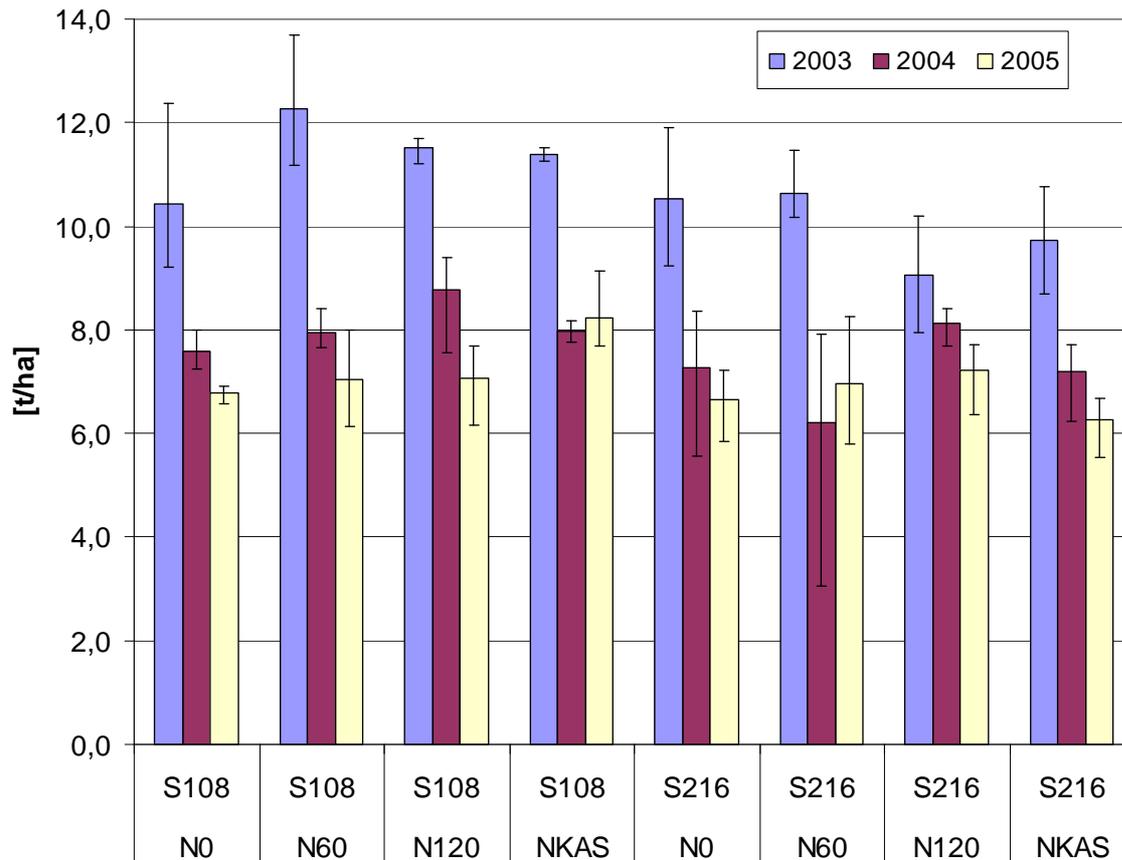


Abb. 4.20: Schäbenertrag in den Düngungsversuchen

Bei der betriebsüblichen Saatstärke unterschieden sich die Versuchsjahre 2004 und 2005 kaum voneinander. Der Schäbenertrag schwankte hier um Werte von 7 t je Hektar. Bei der reduzierten Saatstärke war im Jahr 2004 gegenüber 2005 bei der Kontrollvariante und der „CULTAN“-Düngung ein tendenziell höherer Schäbenertrag feststellbar. Bei der mit Nitrat versorgten Variante waren die Werte gleich hoch anzusiedeln. Der Schäbenertrag schwankte bei der reduzierten Saatstärke mit Ausnahme im Jahr 2003 um 8 t je Hektar.

4.2.6 Einfluss der Düngung auf die Qualität der Fasern

Wie eingangs der Arbeit erläutert wurde, liegen die Fasern der Hanfpflanze im Bast. Hier geschieht der Transport der Assimilate. Um den Stickstoff aus dem Ammonium-Depot aufnehmen zu können, müssen zuerst vermehrt Assimilate in die Wurzel transportiert werden. Danach wird der an die Assimilate gebundene Stickstoff wieder durch den Bast nach oben zu den Blättern transportiert. Aufgrund dieser Tatsachen wurde davon ausgegangen, dass der Stofftransport im Bast und dessen Abhängigkeit von der Düngungsform einen Einfluss auf die Faserqualität haben kann. Nachfolgend

werden die Ergebnisse des Einflusses der Düngung auf die Dehnung der Fasern, den E-Modul und die feinheitsbezogene Höchstzugkraft dargestellt.

Um die Unterschiede in den oben genannten Qualitätsparametern herauszufiltern, wurde für jedes Jahr und jeden Qualitätsparameter eine einfaktorielle Varianzanalyse durchgeführt. In den Tabellen 4.14 bis 4.16 sind die Ergebnisse zusammengefasst. Die mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,05 statistisch abgesicherten Unterschiede sind mit den hochgestellten Buchstaben hinter den Mittelwerten kenntlich gemacht.

Tab. 4.14: Ergebnis der einfaktoriellen ANOVA der Faserbruchdehnung in % bei den „CULTAN“-Düngungsversuchen

Jahr	2003		2004		2005	
	S108	S216	S108	S216	S108	S216
Kontrolle	3,09 ^{ab}	2,9 ^a	3,3 ^b	3,4 ^b	4,0 ^b	3,7 ^b
CULTAN60	3,15 ^{ab}	3,0 ^a	2,7 ^a	3,1 ^{ab}	3,2 ^a	3,7 ^b
CULTAN120	3,28 ^b	3,0 ^a	2,7 ^a	3,0 ^{ab}	3,5 ^a	3,3 ^{ab}
KAS120	2,79 ^a	3,0 ^a	2,7 ^a	2,9 ^a	3,5 ^a	3,1 ^a

Bei der Betrachtung der Bruchdehnung der Fasern kann festgestellt werden, dass die Kontrollvariante überwiegend die größten Mittelwerte bildet. Lediglich weist dabei der Mittelwert der Dehnung im Jahr 2003 bei der praxisüblichen Saatstärke keinen Unterschied zu den üblichen Werten auf. Bei den übrigen Werten kann kein Zusammenhang zwischen der Düngungsvariante und der Dehnung der Fasern festgestellt werden. Weiterhin wird deutlich, dass die Variante mit der Kalkammonsalpetergabe von 120 kg N je ha in allen Jahren und allen Saatstärken zu der schwächeren Untergruppe gehört. Es kann weder ein positiver noch ein negativer Effekt der „CULTAN“-Düngung auf die Bruchdehnung der Fasern festgestellt werden. Diese Varianten gehören je nach Jahr und Saatstärke mal zur stärkeren und mal zur schwächeren Untergruppe der „Post Hoc“-Tests.

Die *Univariate Varianzanalyse* zeigte keinen Einfluss der Saatstärke auf die Bruchdehnung der Faserbündel.

Werden statt des arithmetischen Mittels der Median und die Innerquartile der Verteilung der Einzelwerte als Boxplot ohne Berücksichtigung der Saatstärke betrachtet, so fällt auf, dass das Niveau der Werte 2005 etwas höher ist als das der beiden vorherigen Versuchsjahre. Dieser Effekt kann ebenfalls aus der Mittelwertanalyse aus Tabelle 4.14 abgelesen werden. Bei den gedüngten Varianten ist das Muster der Boxplots in Bezug auf die Jahre gleich. Die Werte aus dem Jahr 2003 liegen zwischen denen der Jahre

2004 und 2005, wobei das Niveau aus dem Jahr 2005 höher ist. Bei der Kontrolle spiegelt sich dieses Muster nicht wider. Hierbei liegen die Mediane der Bruchdehnung der einzelnen Jahre zwischen 3 % und ca. 3,8 %, bei den gedüngten Varianten zwischen 2,5 % und 3,2 %. Die Mediane der Bruchdehnung schwankten im Jahr 2005 nicht so stark wie die des arithmetischen Mittels.

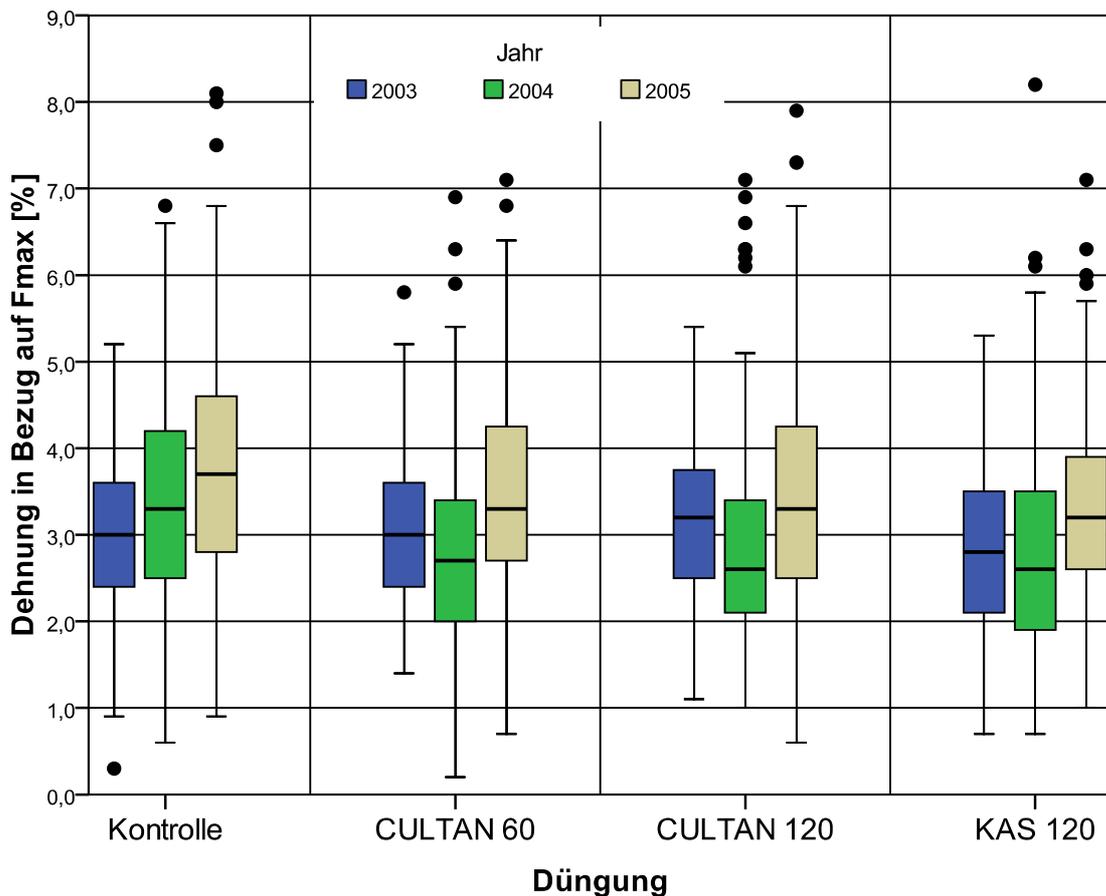


Abb. 4.21: Verteilung der Messwerte der Faserbruchdehnung in Abhängigkeit von der Düngungsart als Boxplots

Die Abbildung 4.21 veranschaulicht, dass die Düngungsart keinen Einfluss auf die Bruchdehnung der Fasern hatte.

Ebenso wie bei der Bruchdehnung zeigt der E-Modul in der folgenden Tabelle 4.15, dass die Kalkammonsalpetervariante durchweg zu den schwächeren Gruppen der „Post Hoc“-Tests gehört. Im Gegensatz zur Bruchdehnung gehört beim E-Modul die Kontrollvariante überwiegend auch diesen Untergruppen an. Generell kann festgehalten werden, dass sich beim Mittelwertvergleich im Bezug auf den E-Modul sehr wenige statistische Unterschiede ergeben haben. Insofern konnte kein Einfluss der Düngungsart auf den E-Modul festgestellt werden.

Tab. 4.15: Ergebnis der einfaktoriellen ANOVA des E-Moduls in GPa aus den Düngungsversuchen

Jahr	2003		2004		2005	
	S108	S216	S108	S216	S108	S216
Kontrolle	22,28 ^{ab}	20,85 ^a	13,99 ^a	12,27 ^a	14,57 ^a	16,32 ^b
CULTAN60	24,46 ^b	20,78 ^a	12,03 ^a	14,24 ^a	13,92 ^a	13,57 ^a
CULTAN120	24,55 ^b	22,88 ^a	12,84 ^a	13,63 ^a	14,34 ^a	14,65 ^{ab}
KAS120	19,88 ^a	20,48 ^a	13,71 ^a	14,63 ^a	13,76 ^a	13,21 ^a

Wie auch bei der Dehnung ist die Saatdichte bei der Betrachtung des Einflusses der Düngungsart auf den E-Modul zu vernachlässigen, da die *Univariate Varianzanalyse* keinen signifikanten Unterschied zwischen den Saatdichten feststellen konnte. Aus diesem Grund enthält Abbildung 4.22 keine Unterschiede in der Saatdichte.

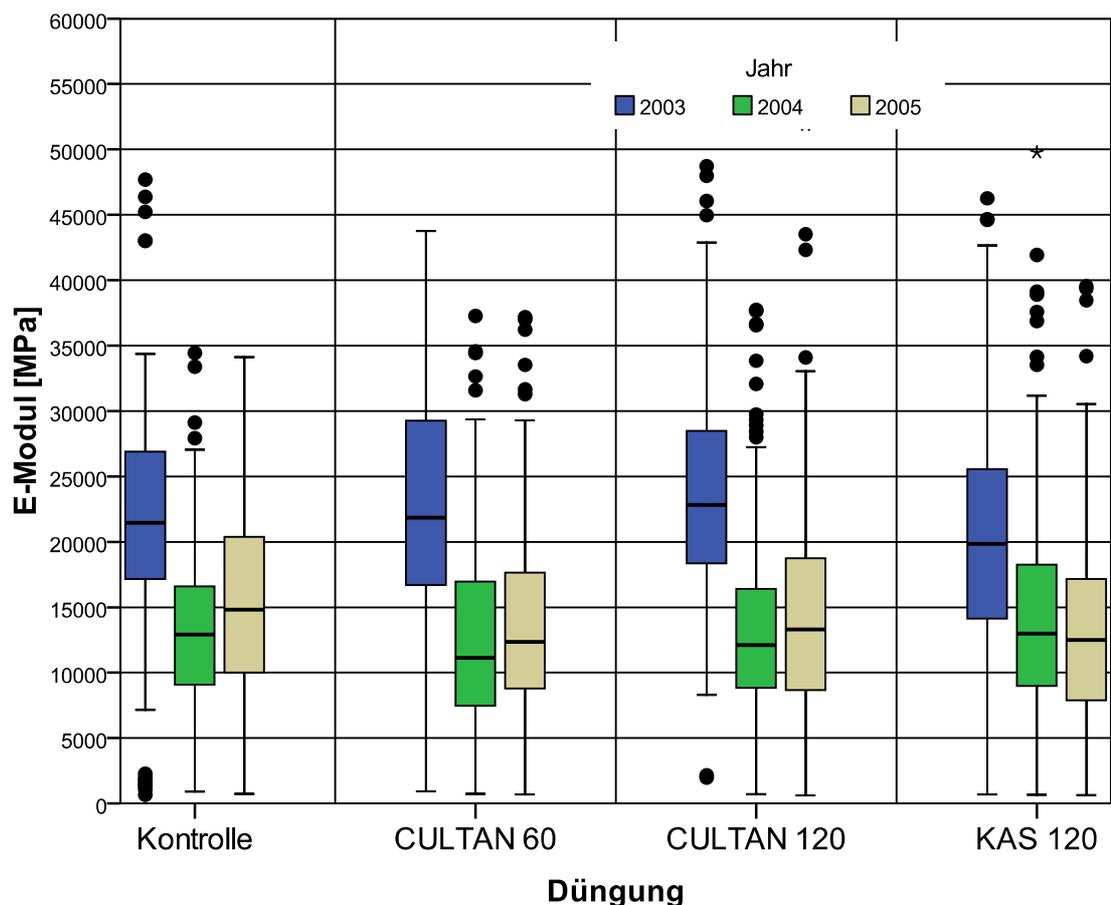


Abb. 4.22: Verteilung der Messwerte des E-Moduls in Abhängigkeit von der Düngung als Boxplots

Die Mediane weichen in allen Versuchsjahren kaum vom arithmetischen Mittel ab. Insofern veranschaulicht die Abbildung 4.22 die in Tabelle 4.15 angegebenen Werte. Es besteht in den Versuchsjahren über alle Varianten eine sehr große Überlappung. Daraus ist zu schließen, dass die Verteilung der Messwerte als Boxplots die in der Mittelwertanalyse dargestellten Signifikanzen nicht wiedergeben. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die zusammengeschlossenen Saaddichten die Effekte aufheben.

Die Mittelwertanalyse der feinheitsbezogenen Höchstzugkraft ergibt, wie Tabelle 4.16 zeigt, deutlichere Unterschiede als beim E-Modul und der Bruchdehnung der Fasern. Es kann hierbei allerdings auch kein Einfluss der Düngungsart auf die Zugkraft der Fasern festgestellt werden. Bei der reduzierten Saatstärke schneidet die „CULTAN“-Düngung besser ab als die KAS- und Kontrollvariante. 2005 liegt sie zwischen der abgeschlagenen KAS-Variante und der deutlich besseren Kontrollvariante. In den anderen untersuchten Varianten in den verschiedenen Jahren sind keine Unterschiede festzustellen bzw. die Untergruppen der „Post Hoc“-Tests überschneiden sich.

Tab. 4.16: Ergebnis der einfaktoriellen ANOVA der feinheitsbezogenen Höchstzugkraft in cN tex^{-1} aus den Düngungsversuchen

Jahr	2003		2004		2005	
	S108	S216	S108	S216	S108	S216
Kontrolle	70,4 ^{ab}	65,8 ^a	55,4 ^b	51,1 ^a	63,7 ^b	66,8 ^c
CULTAN60	74,3 ^b	66,3 ^a	45,6 ^a	46,7 ^a	51,5 ^a	60,2 ^b
CULTAN120	77,8 ^b	68,1 ^a	47,2 ^{ab}	46,6 ^a	59,7 ^{ab}	57,9 ^b
KAS120	63,5 ^a	66,0 ^a	45,5 ^a	49,9 ^a	62,0 ^b	46,4 ^a

Weiterhin bleibt festzuhalten, dass im Jahr 2003 bei der üblichen Saatstärke im Bezug auf alle drei Qualitätsparameter keine statistischen Unterschiede herausgefiltert werden konnten. Lediglich zeigte im Jahr 2003 die Variante mit der reduzierten Saatstärke die erwarteten Werte. Alle anderen Varianten verhielten sich unterschiedlich zu den Erwartungen.

Fasst man den Einfluss der Saaddichte auf die feinheitsbezogenen Höchstzugkraft zusammen, so ergibt sich wieder ein typisches Muster zwischen den einzelnen Versuchsjahren. Wie beim E-Modul liegt das Jahr 2004 mit den Medianen zwischen den beiden anderen Jahren, wobei in diesem Fall das Jahr 2003 besser abschneidet als 2005.

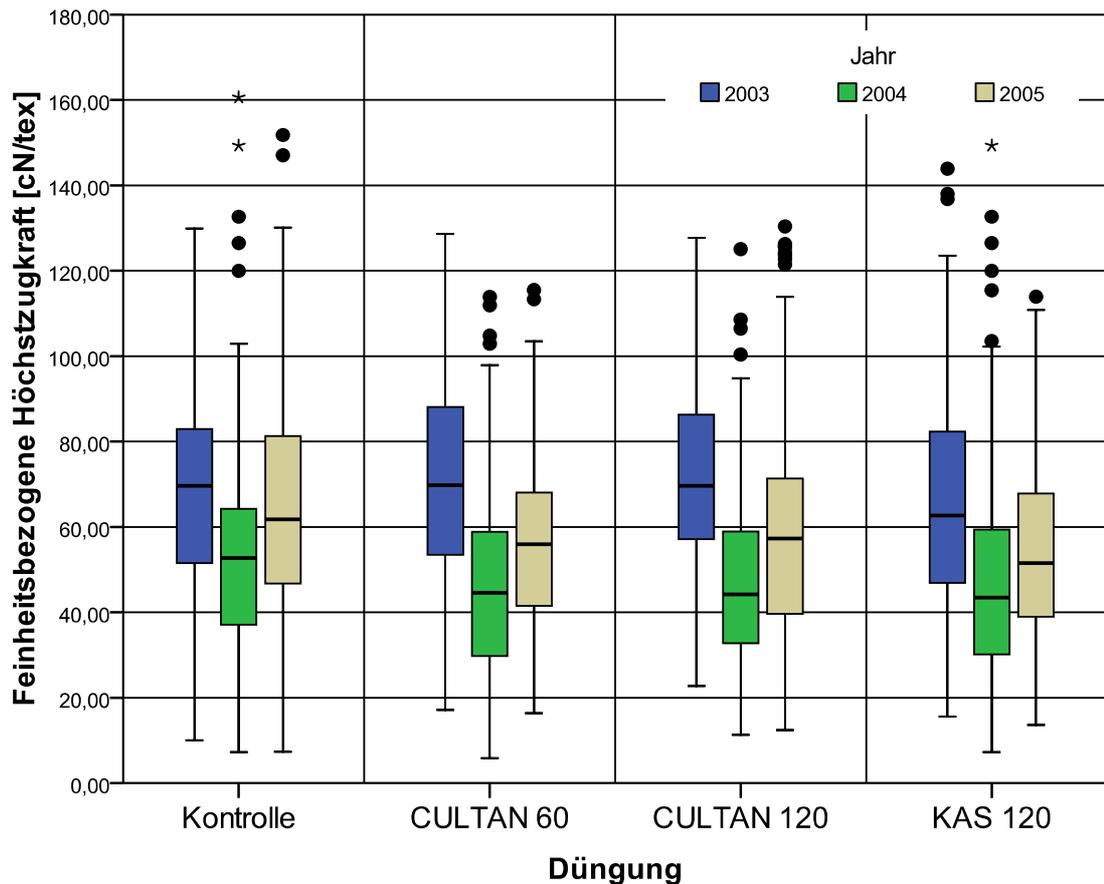


Abb.4.23: Verteilung der Messwerte der feinheitsbezogenen Höchstzugkraft in Abhängigkeit von der Düngung als Boxplots

Auch im Bezug auf die feinheitsbezogene Höchstzugkraft egalisiert die Zusammenfassung der Saatedichten die statistischen Unterschiede der einfaktoriellen Varianzanalyse. Die Aussage wird dabei nicht verändert, da auch beim Mittelwertvergleich kein Zusammenhang zwischen Düngungsart und Zugkraft festgestellt werden konnte.

Zusammenfassend über alle Qualitätsparameter kann festgestellt werden, dass der Stofftransport im Phloem keinen Einfluss auf die Bruchdehnung der Fasern, den E-Modul und die feinheitsbezogene Höchstzugkraft hat.

5 Diskussion

5.1 Grünentholzung

Der Hauptmotivationsgrund dafür, den Hanf grün zu entholzen, lag darin, dass der Hanfanbau durch die Verlagerung des ersten Aufbereitungsschrittes in die Landwirtschaft lukrativer werden soll. Nachdem ab 1996 Hanf wieder angebaut werden durfte, erlebte der Faserhanfanbau eine Renaissance. Durch die Einführung des *Erneuerbare Energien Gesetzes* und damit einer besseren Vergütung von Energiepflanzen reichte der Deckungsbeitrag bei Hanf nicht mehr für einen wirtschaftlichen Anbau. Um den Deckungsbeitrag einer Kulturart zu verbessern, gibt es zwei Möglichkeiten: Die variablen Kosten zu senken und/oder den Erlös zu erhöhen. Die variablen Kosten in der Hanfproduktion zu senken ist unrealistisch, da die Energiekosten voraussichtlich nicht sinken werden. Das Anheben des Verkaufspreises ist ebenfalls unrealistisch, denn die Importe aus anderen Ländern bestimmen den Preis mit. So war schließlich die Überlegung, den ersten industriellen Verarbeitungsschritt der Strohauflösung in den landwirtschaftlichen Betrieb zu verlagern, um dadurch den Erlös zu steigern. Hinzu kam die Forderung eines Hanfschäben verarbeitenden Betriebes, die Hanfproduktion in Deutschland aufgrund der geringen Transportwürdigkeit der Schäben wieder zu etablieren. Nach Rücksprache mit einem Hanfstroh verarbeitenden Betrieb schien es aufgrund der hohen Nachfrage nach Naturfasern realistisch, auch minderwertigere Fasern zu verarbeiten, wobei abzuklären war, wie die Qualität der Fasern der schon auf dem Feld in grünem Zustand aufgeschlossenen Pflanzen unter der mechanischen Belastung leidet. Als qualitätsbestimmende Faktoren wurden für die Verwendung der Fasern in Verbundwerkstoffen und Vliesen die Dehnung der Fasern in Bezug auf die Höchstzugkraft (die so genannte Bruchdehnung) und in diesem Zusammenhang der teils davon abhängige E-Modul und die feinheitsbezogene Höchstzugkraft ermittelt. Diese spielen bei der Werkstoffstabilität eine große Rolle. Die Pflanzen sollten aus Kostengründen mit einem herkömmlichen landwirtschaftlichen Gerät und nicht mit einer weiteren Spezialmaschine geerntet und aufbereitet werden. Hierzu wurde der Feldhäcksler für geeignet befunden. Durch den Einsatz im Hanf kann die Maschine besser ausgelastet werden. Mit der Maisernte war kaum eine Terminkollision zu erwarten. Lediglich das Silieren von Gras könnte im Sommer zu Einsatzengpässen führen. Aber aufgrund der hohen Besatzdichte an Feldhäckslern und der noch geringen Hanffläche ist davon auszugehen, dass dies kein Problem darstellt.

Der Einsatz des Feldhäckslers zur Hanfernte bietet aufgrund des Verfahrens mehrere unterschiedliche Möglichkeiten, das Erntegut in unterschiedlichen Intensitäten

mechanisch zu belasten. Wie im Kapitel „Material und Methoden“ beschrieben, wurde die Häcksellänge und die Entfernung der Gegenschneide zur Messertrommel variiert und der Einfluss des Corncrackers auf die Fasern untersucht.

Ohne Veränderungen an der Erntemaschine vornehmen zu müssen, ist es möglich, den Bearbeitungseffekt auf das Erntegut durch die Maschine mittels der Wahl des Feuchtegehaltes der Pflanzen und den Erntetermin zu beeinflussen. Im Rückschluss darauf, dass die Qualität der Fasern bei mechanischer Beanspruchung in frischem Zustand leidet, ist es interessant zu wissen, wie sich der Verlauf der Qualitätsänderung in Abhängigkeit vom Trocknungszustand des Pflanzenmaterials gestaltet. Dies ist zum einen durch die Verlagerung des Erntetermins nach hinten und somit zu einem „reiferen“ Stängel hin möglich. Des weiteren lässt sich dies durch Mähen und teilweises Trocknen des Erntegutes auf dem Feld erreichen.

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse dieser Faktoren zusammengefasst und bewertet.

5.1.1 Einfluss der Häcksellänge auf die Faserqualität

Die Häcksellänge ist von der Einzugsgeschwindigkeit und der Drehzahl der Häckseltrommel, sowie der Anzahl der Messer abhängig. Die Häcksellänge nimmt mit geringer werdender Einzugsgeschwindigkeit und zunehmender Häckseltrommelfrequenz ab. Je kürzer die Häcksellänge eingestellt ist, desto höher ist damit die Schnitffrequenz. Dies bedeutet für den Versuch im Hanfbestand, dass ebenfalls die Schlagfrequenz der Blindmesser auf das Pflanzenmaterial erhöht wird.

In den beschriebenen Versuchen wurde auf die Dehnung bei Höchstzugkraft, den E-Modul und die feinheitsbezogene Höchstzugkraft als Qualitätsparameter eingegangen. Beim Vergleich der Dehnung traten 2003 und 2005 signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten auf. Jedoch können keine Zusammenhänge zwischen der Behandlungsmethode und der Dehnung festgestellt werden. Erklärbar ist dies wahrscheinlich anhand der Zusammensetzung des getesteten Materials. Wie schon im Kapitel „Stand des Wissens“ erläutert, besteht das Testmaterial aus Elementarfasern, Pektinen und Ligninen. Diese unterliegen, im Gegensatz zu synthetischen Fasern, größeren natürlichen Schwankungen in ihrer Zusammensetzung. So ist es denkbar, dass es bei der Vordehnung des Faserbündels mittels des 2 g schweren Gewichtes durch die Lage der Elementarfasern und die Menge an Verkittungssubstanz zu unterschiedlichen Vorspannungen innerhalb des Faserbündels gekommen ist. Dieses Phänomen haben HARIG ET AL. 1994 beim Vergleich von Cotton-Elementarfasern mit Faserkollektiven untersucht. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass durch die Variabilität der

einzelnen Elementarfasern nicht jede Faser den gleichen Anteil an der Kollektiv-Festigkeit und -dehnung hat, da bei einer bestimmten Dehnung schon ein Teil der Elementarfasern im Kollektiv gerissen waren und ein anderer Teil nicht. MÜSSIG (2001) stellt ebenfalls heraus, dass die Elementarfasern mit höherer Bruchdehnung nicht zur maximalen Kollektivkraft beitragen können. Ebenso ist unklar, wie das Verhältnis zwischen Kittsubstanz und Elementarfasern innerhalb des einzelnen Faserbündels war. Die Zusammensetzung dieser Stoffe und ihre Akkumulation haben sicherlich einen Einfluss auf die Ausrichtung der einzelnen Elementarfasern im Bündel. Ein Indiz dafür, dass die Ausrichtung der Fasern in dem Faserbündel einen Einfluss auf die Dehnung hat, ist der ermittelte Wert für die Bruchdehnung des in frischem Zustand des Stängels abgezogenen Bastes. Seine Bruchdehnung konnte nicht eindeutig von denen der gehäckselten Varianten unterschieden werden. Der abgelöste Bast hatte sich jedoch durch den Trocknungsprozess zusammengekräuselt. Dies spricht für eine Verlagerung der Elementarfasern innerhalb der Bündel und somit für unterschiedliche Vorspannungen innerhalb der Faserbündel. Dass die Dehnung beim Trockenaufschluss zunimmt, lässt sich aus den oben gezogenen Schlüssen derart herleiten, dass durch den trockenen Zustand der Faserbündel ein Teil der Kittsubstanzen mechanisch zerstört werden und die Fasern nicht mehr so stark zusammenhalten.

Weiterhin ist unbekannt, an welchen Stellen die Messer und die Blindmesser auf das Testmaterial aufgetroffen sind und in welcher Form sich dadurch das Holz vom Bastteil gelöst hat. Inwieweit diese Stellen zufällig zwischen oder innerhalb der Klemmbacken der Zugprüfmaschine lagen, könnte es einen Einfluss auf das Testergebnis haben. Dieser Zufall sollte jedoch durch den hohen Probenumfang (das Drei- bis Fünffache des von HEYLAND & KROMER (1995) geforderten Stichprobenumfangs) ausgeschlossen werden können.

Der E-Modul erbrachte bei der Mittelwertanalyse 2003 hochsignifikante und 2004 höchstsignifikante Unterschiede in Abhängigkeit der Behandlungsintensität. Jedoch ergaben sich 2003 schon innerhalb der Häckselvarianten statistisch abgesicherte Unterschiede. Die mittlere und die lange Häcksellänge wiesen signifikant höhere E-Moduli auf als die kurze Häcksellänge. Im Jahr 2004 hingegen konnten statistisch abgesicherte Unterschiede nur zwischen dem gehäckselten Material und dem Trockenaufschluss festgestellt werden. Als Erklärung hierfür kann, wie bereits bei der Dehnung, die Lage und der Gehalt der Elementarfasern herangezogen werden. Der E-Modul ist die Steigung aus Zugwiderstand und zurückgelegtem Weg und somit abhängig von der Dehnung des Materials. Wie weiter oben geschildert, kann die Dehnung stark von der Zusammensetzung und der Konstellation der einzelnen Faserbündel-Fractionen abhängig sein. Da die Zugkraft in den E-Modul eingeht, ist die

Kombination der geschilderten Zusammenhänge der Dehnung mit der Abhängigkeit der Zugkraft von diesen Faktoren zu betrachten. Nach HARIG ET AL. (1994) und MÜSSIG (2001) ist die summierte Festigkeit der Elementarfasern höher als die eines Kollektivs. Dieser Sachverhalt müsste sich aufgrund der Faserfestigkeit dann beim E-Modul in einer steileren Kurve und somit höheren Werten widerspiegeln. Aus der Mittelwertanalyse des E-Moduls und der feinheitsbezogenen Höchstzugkraft in Kombination mit der Aussage von HARIG ET AL. (1994) und MÜSSIG (2001) lässt sich schließen, dass 2003 der Anteil der Elementarfasern in einem Faserbündel höher war als 2004. Damit ließe sich erklären, dass der Mittelwert der Faserfestigkeit im Jahr 2003 höher lag als 2004. Im Vergleich der jeweiligen Mittelwerte der Höchstzugkraft und des E-Moduls kann mit Ausnahme des Trockenaufschlusses 2003 ein stärkerer Zusammenhang festgestellt werden als beim Vergleich der Werte der Dehnung mit denen des E-Moduls. Wie in Abbildung 3.16 im Kapitel „Material und Methoden“ zu erkennen ist, müsste bei größerer Dehnung (unter gleicher Zugkraft) der E-Modul kleiner sein. Dieser Zusammenhang wird offensichtlich von der Abhängigkeit des E-Moduls von der Zugkraft überlagert. Denn mit zunehmender Zugkraft wird der E-Modul (bei gleich bleibender Dehnung) ebenfalls größer.

Die Ergebnisse des Jahres 2005 wurden in den bisherigen Ausführungen kaum berücksichtigt. Dies liegt daran, dass es sich um einen abgewandelten Versuch handelte und lediglich zwei Varianten in Betracht kommen. Diese zeigten bezüglich des E-Moduls und der Dehnung keine signifikanten Unterschiede, bei der Analyse der feinheitsbezogenen Höchstzugkraft dagegen schon. Die Auflistung der Ergebnisse diente hierbei der Vervollständigung der erhobenen und berechneten Daten. Sie konnten jedoch zu Interpretationszwecken in diesem Fall nicht herangezogen werden.

Wird von der Aussage ausgegangen, dass die Lage der Elementarfasern im Faserbündel und die Zusammensetzung sowie der Gehalt an den Kittsubstanzen Pektin und Lignin den E-Modul und die Dehnung beeinflussen, ist es möglich, dass diese durch die Lage und Akkumulation der Einzelelemente des Faserbündels bei der Trocknung beeinflusst werden können. Dies könnte durch Folgeversuche geprüft werden, bei denen einzelne Faserstränge beim Trocknen einer definierten Zugspannung ausgesetzt werden. Allerdings dient diese Fragestellung eher der Gewinnung grundlegender Kenntnisse. Für den Praxisanbau ist die Vorstellung, gehäckseltes Material unter Zugspannung zu trocknen, irrelevant.

Steht die Zugfestigkeit bei der Produktion von Fasern als Qualitätsmerkmal im Vordergrund, kann eindeutig behauptet werden, dass die Fasern aus in frischem Zustand gehäckseltem Hanfstroh nicht geeignet sind. Jedoch könnte es Einsatzmöglichkeiten in der Wärmedämmung oder evtl. anderen Bereichen geben, bei

denen die Zugfestigkeit eine untergeordnete Rolle spielt und bei denen eine kostengünstige Beschaffung des Rohmaterials im Vordergrund steht.

5.1.2 Einfluss des Abstandes zwischen Gegenschneide und Häckseltrommel und der Wirkung des Corncrackers auf die Faserqualität

Primäres Ziel der Versuchsvarianten mit Gegenschneidenvariation und Corncracker war herauszufinden, ob die Intensität der Quetschungen des grünen Materials einen Einfluss auf die Faserqualität hat. Hierbei kam als Extremvariante mit möglichst wenigen Quetschungen ein stärkeres Messerspiel (Vergrößerung des Abstandes zwischen rotierenden Messern und feststehender Gegenschneide) und als Variante mit möglichst hohem Quetschanteil die Zuschaltung des Corncrackers in Frage. Beim Corncracker muss das gesamte Pflanzenmaterial einen wenige Millimeter reichenden Spalt zwischen zwei geriffelten Walzen passieren, die sich mit unterschiedlicher Geschwindigkeit drehen. Der normale Einsatzzweck dieser Walzen ist das Zerdrücken bzw. Beschädigen der Maiskörner zur Verbesserung der Verdaulichkeit bei Rindvieh.

Bei der statistischen Auswertung wurde festgestellt, dass das Versetzen der Gegenschneide um 3 mm nach vorne keine signifikante Verbesserung der Dehnung zur Folge hatte. Beim E-Modul und der feinheitbezogenen Höchstzugkraft konnte dagegen eine signifikante Verbesserung der Werte festgestellt werden. Da das Dehnverhalten der Faserbündel durch diese Maßnahme nicht verbessert wurde ist zu vermuten, dass sich das Lösen der Holzteilchen vom Bast in frischem Zustand für die einzelnen Faserbündelelemente wenig unterscheidet. Die Variante mit versetzter Gegenschneide und zugeschaltetem Corncracker zeigt eine signifikant höhere Bruchdehnung des Materials. Ein Erklärungsansatz hierfür ist wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben, dass durch das Reiben des Pflanzenmaterials die Verbände im Faserbündel gelöst werden und so eine stärkere Dehnung der Faserbündel aufgrund der sich zunächst gleichmäßig ausrichtenden Elementarfasern zustande kommt. Dieser Effekt konnte bei geschlossener Gegenschneide und zugeschaltetem Corncracker nicht bestätigt werden. Eine Erklärung hierfür könnte sein, dass beim Schnitt mit geschlossener Gegenschneide das Fasermaterial gleichmäßiger durch die Maschine geführt wird und so durch weniger Reibung und Schläge auch weniger beansprucht wird. Der Grund dafür, dass hier der Corncracker keinen Einfluss hatte, ist möglicherweise aus der Konstruktion dieses Aufbereiters zu erklären. Er ist für einen deutlich höheren Durchsatz konzipiert, als es beim Hanf der Fall ist. Bei der Maisernte wird ca. das Zwanzigfache an Material durch

den Corncracker transportiert, was zu einem höheren Anpressdruck zwischen den Crackerwalzen führt.

Warum beim E-Modul die Variante ohne Gegenschneide einen so hohen Wert aufweist, ist kaum zu deuten. Bei der Betrachtung der Innerquartile und des Medians relativiert sich der hohe Wert des E-Moduls, da der Median von den beiden dritten Quartilen der Variante „lang“ und „lang mit Gegenschneide und Corncracker“ überragt wird und die Maxima dieser beiden Varianten ebenfalls höher sind als der der Variante „lang ohne Gegenschneide“. Dass keine signifikanten Unterschiede beim E-Modul festgestellt werden konnten, liegt wahrscheinlich an Wechselwirkungen zwischen der Dehnung und der feinheitsbezogenen Höchstzugkraft. Somit stellen sich die Steigungen im Kraft-Dehnungsdiagramm entsprechend einheitlich dar.

Bei der Datenanalyse der feinheitsbezogenen Höchstzugkraft fällt auf, dass die Varianten mit geschlossener Gegenschneide die geringsten Mittelwerte (sowohl arithmetisches Mittel als auch Median) aufweisen. Dies deutet auf das hohe Potenzial der mechanischen Verletzung zwischen Gegenschneide und Messer bzw. Blindmesser hin. Der Corncracker hat keinen statistisch nachgewiesenen Einfluss auf die Zugkraft der Fasern. Eine mögliche Erklärung wurde schon weiter oben gegeben.

5.1.3 Einfluss des Schnittzeitpunktes auf die Faserqualität

In den vorangegangenen Unterkapiteln der Diskussion wurde mehrmals der Einfluss der Zusammensetzung der Faser auf die Qualität angesprochen. Durch die Verlagerung des Schnittzeitpunktes in ein Stadium der fortgeschritteneren Reife war zu erwarten, dass sich der im Absterben befindende Stängel in Bezug auf die Qualitätsparameter anders verhält. In der Auswertung wurde jeweils der frühe Erntetermin im August mit dem späten Termin im November verglichen. Bei der Mittelwertanalyse konnten keine signifikanten Unterschiede der Qualitätsparameter zwischen dem frühen und späten Erntetermin festgestellt werden. Die ermittelten Werte (arithmetisches Mittel und Median) liegen für die jeweiligen Varianten sehr nahe beieinander. Hierbei gibt es für alle drei untersuchten Qualitätsparameter keinerlei Ausnahmen. Dieser Sachverhalt spricht dafür, dass der Hanfstängel seine inneren Strukturen bereits im August unter normalen Bedingungen aufgebaut hat und sich die Zusammensetzung zumindest bis in den November hinein nicht mehr verändert.

Die Verlagerung der Ernte des Hanfes in den November hatte den Vorteil, dass der Bestand seine Blätter vollständig abgeworfen hatte. Dadurch war die Trennung von Fasern und Schäben einfacher durchzuführen. Ein Nachteil dabei ist jedoch, dass der gesamte Samenertrag auf dem Feld als Unkrautpotenzial im Boden verbleibt. Zudem ist

es aus drogenpolitischer Sicht rechtlich nicht erlaubt, den Hanfbestand so lange auf dem Feld zu belassen. In wie weit diese Bestimmungen gelockert werden können, ist an dieser Stelle nicht vorauszusehen.

5.1.4 Einfluss des Trockensubstanzgehaltes des Pflanzenmaterials beim Häckselaufschluss auf die Fasereigenschaften

In der vorangegangenen Diskussion wurde mehrmals der Sachverhalt angesprochen, dass die Faserqualität bei mechanischer Beanspruchung der frischen Hanfstängel negativ beeinflusst wird. Um herauszufinden, ab welchem Zustand dies der Fall ist, wurde eine Versuchsserie mit Feuchtegehalten des Hanfstrohs von 33 %, 60 % und 88 % durchgeführt. Als Referenz diente wiederum die Entholzung mittels Bahmer Laborentholzungsmaschine.

Bei den untersuchten Varianten stellten sich keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf die Dehnung und den E-Modul heraus. Dies widerspricht den Interpretationen der bereits diskutierten Versuchsergebnisse. In diesem Fall ist die Bruchdehnung des frischen Materials genau so hoch wie die der getrockneten Varianten. Für den E-Modul bestätigen sich wiederum die vorangegangenen Interpretationen.

Bezüglich der feinheitsbezogenen Höchstzugkraft erbrachte das Antrocknen des zu häckselnden Pflanzenmaterials keine Verbesserung der Höchstzugkraft. Diese Variante unterscheidet sich nicht von der des frischen Materials. Die beiden Varianten mit dem bis zur Gleichgewichtskonstante getrockneten Pflanzenmaterial unterscheiden sich nicht voneinander. Dieser Sachverhalt wird in Abb. 4.10 bis 4.12 recht deutlich als Boxplots visualisiert. In diesem Fall kann behauptet werden, dass der Probenhäcksler zum Aufschluss für größere Mengen an Faserpflanzen für Versuchszwecke geeignet ist. Jedoch kann damit im Gegensatz zur Laborentholzungsmaschine die Freilegbarkeit der Fasern nicht untersucht werden.

Die Tatsache, dass bei diesen Versuchsergebnissen keine deutlicheren Unterschiede zustande kamen, kann durchaus mit der nicht so aggressiven Verfahrensweise des Probenhäckslers zusammenhängen. Dieser behandelt das Pflanzenmaterial schonender als ein herkömmlicher Feldhäcksler. Durch eine geringere Geschwindigkeit der Häckseltrommel ist die Aufprallenergie der Messer auf das zu häckselnde Material nicht so hoch. Zusätzlich fehlt der Beschleuniger im Auswurfkrümmer. Beim Probenhäcksler wird das Häckselgut lediglich nach unten abgeleitet und in Wannen aufgefangen. Insofern wäre zu überdenken, wenn ein konkretes Interesse für die Daten für spezielle Anwendungen besteht, den Versuch mit einem herkömmlichen Feldhäcksler zu wiederholen.

5.2 „CULTAN“-Versuche

5.2.1 Ausdünnungseffekt

Die für die Auswertung des Ausdünnungseffektes ermittelten Werte des Anteils aufgelaufener Pflanzen in Bezug auf die ausgesäten Körner waren in zwei Jahren annähernd gleich. Im mittleren der drei Versuchsjahre ergab sich eine bessere Auflaufsituation. Wie im Kapitel „Material und Methoden“ beschrieben, wurde bei der Anlage des Versuches entschieden, sich nach einer im Vertragsanbau praktizierten Aussaatstärkenempfehlung zu richten. Diese betragen von 40 kg je Hektar umgerechnete 200 keimfähige Körner je Quadratmeter. Bei Hanf kann (was durch Keimfähigkeitstests am Institut für Landtechnik vor der Aussaat kontrolliert wurde) von einer Keimfähigkeit von 90 bis 95 % ausgegangen werden. Daraus resultierend wurden für eine Keimfähigkeit von 92,5 % die Anzahl von 216 Körnern je Quadratmeter ausgesät. Demnach muss davon ausgegangen werden, dass die Unterschiede des anfänglichen Bestandes durch den Feldzustand und die Witterung stark beeinflusst wurden. Weiterhin kann als ein Erklärungsgrund für den schlechteren Auflauf der Jahre 2003 und 2005 angenommen werden, dass Vögel einen Teil der Keimlinge gefressen haben, denn in diesen beiden Jahren wurde der Hanfversuch zum Sichtschutz in ein Sonnenblumenfeld integriert. Sonnenblumen ziehen vor allem Tauben an. Da die Untersuchung des Auflaufes nicht im Vordergrund des Versuches stand, wurden die Auflauf bedingenden Faktoren nicht gesondert ermittelt. Es kann festgehalten werden, dass im Jahr 2004 bessere Auflaufbedingungen für die Hanfkeimlinge bestanden als in den beiden anderen Versuchsjahren. Aber auch wenn der Auflauf 2003 und 2005 geringer als im Jahr 2004 war, lagen die Anfangsbestände im Rahmen der in der landwirtschaftlichen Praxis üblichen Bedingungen und Größen.

Das Phänomen der Selbstausdünnung wurde von verschiedenen Autoren auf die Zunahme der Bestandesdichte zurückgeführt (van DER WERF 1994, MEIJER 1995, Lisson & Mendham 2000). Es wurden von MEDIAVILLA ET AL. (1998) Rückgänge bis zu 60 % ermittelt. Dieser starke Rückgang konnte bei den durchgeführten Versuchen nicht festgestellt werden. Bei den Versuchen in 2005 erreichte eine Messwiederholung den in Abbildung 4.13 dargestellten Ausreißerwert von knapp 40 % vom Ausgangsbestand. Wie schon im Kapitel „Ergebnisse“ betont, können auch andere Wachstumsfaktoren einen Einfluss auf die Ausdünnung haben. Auch MEDIAVILLA ET AL. (1998) und STRUIK ET AL. (2000) untersuchten den Zusammenhang der Selbstausdünnung mit dem Stickstoffangebot. Sie fanden heraus, dass ein steigendes Stickstoffangebot die Selbstausdünnung fördert. Dies konnte in den durchgeführten Versuchen ebenfalls

tendenziell aber nicht statistisch abgesichert festgestellt werden. Im Focus der durchgeführten Versuche stand neben der Stickstoffhöhe die Stickstoffart, insbesondere als Ammonium-Depot-Düngung, die andere physiologische Vorgänge in der Pflanze auslöst, als die hauptsächlich mit dem Wasserstrom in die Pflanze gelangende Stickstoffform des Nitrates.

Betrachtet man die homogenen Untergruppen des Tukey-HSD-Testes in den Tabellen 4.10 bis 4.12, so ist im Jahr 2003 und 2004 zu erkennen, dass die beiden hohen Stickstoffvarianten in einer Untergruppe zu finden sind und dabei die höheren Bestandsrückgangsbeträge aufweisen. Tendenziell ist die Nitratform stärker vom Bestandsrückgang betroffen als die Ammonium-Variante. Dies lässt den Rückschluss zu, dass die Ammoniumaufnahme den Selbstausdünnungseffekt geringfügig hemmt. Dies könnte mit der Verschiebung des Phytohormonhaushaltes in der Pflanze zusammenhängen. Weiterhin ist zu bemerken, dass sich in den Jahren 2003 und 2004 die Nitrat-Variante statistisch von den Varianten der Kontrolle und der verminderten Ammonium-Variante unterschied. Die Variante mit 120 kg Ammonium unterschied sich statistisch dagegen nicht von den übrigen Varianten.

In dem Versuchsjahr 2005 hoben sich die ermittelten Werte völlig von den Ergebnissen der Vorjahre ab. Zum einen lag die Selbstausdünnung weit unter den Werten aus den beiden vorherigen Jahren und zum anderen waren die Mittelwerte der Selbstausdünnung bezogen auf die Stickstoffdüngung in der Hierarchie anders geordnet. Hier lagen die Ausdünnungswerte, bis auf die hohe „CULTAN“-Variante mit ca. 10 %, bei rund 3 %.

Festzuhalten bleibt, dass es bei den untersuchten Faktoren Düngung und Aussaatstärke zu keinen statistisch abgesicherten Auswirkungen auf die Ausdünnung kam. Im Jahr 2003 konnten einzelne statistische Unterschiede festgestellt werden, die jedoch von Wechselwirkungen zwischen Düngung und Saatstärke überlagert wurden, so dass diese Ergebnisse nicht korrekt interpretiert werden konnten. Im Jahr 2004 gab es keine Wechselwirkungen zwischen den unabhängigen Variablen, jedoch konnten auch keine signifikanten Unterschiede innerhalb der unabhängigen Variablen festgestellt werden. Die im Versuchsjahr 2005 ermittelten Werte sollten aufgrund ihrer untypischen Verteilung und Höhe nicht interpretiert werden. Ob diese Werte auf optimale Wuchsbedingungen oder Messfehler zurückzuführen sind, kann an dieser Stelle nicht beantwortet werden. Wie stark die ermittelten Werte einen Einfluss auf die Ausdünnung haben, beschreibt der „korrigierte R-Quadrat“-Wert des Tests der Zwischensubjekteffekte. Dieser ist 2005 sehr gering und schwer zu interpretieren.

5.2.2 Wuchsentwicklung

Um Aussagen über die Wuchsentwicklung der Hanfpflanzen machen zu können, wurden der Durchmesser und die Wuchshöhe randomisiert ausgewählter Pflanzen ermittelt. Wie erwartet hat das durch die Saatstärke beeinflusste Raumangebot für die Pflanzen einen signifikanten Einfluss auf den Stängeldurchmesser. Durch eine geringere Konkurrenz der Pflanzen untereinander war es ihnen möglich, sich im Raum besser zu entfalten, also einen verstärkten Stängel auszubilden. Das Argument, dass durch eine reduzierte Pflanzenanzahl das Nährstoffangebot den Haupteffekt auf den Durchmesser bildet, wird dadurch entkräftet. Selbst in der Kontrollvariante waren bei reduzierter Aussaatstärke die Durchmesser der Pflanzenstängel größer als die der reduzierten „CULTAN“-Variante. Auch überstieg die Stängeldicke der reduzierten Kontrollvariante zum Teil die der nicht reduzierten „CULTAN“-Variante oder war zumindest vergleichbar mit dieser.

Was die Wuchshöhe betrifft, so konnte statistisch abgesichert festgestellt werden, dass die Düngung einen positiven Effekt für das Pflanzenwachstum mit sich bringt. Es zeigten sich deutliche Unterschiede zwischen ungedüngten und gedüngten Varianten. Interessant ist, dass bereits eine geringe Stickstoffdüngung einen Einfluss auf die Länge der Hanfpflanzen hat. Durch eine Verdoppelung der Stickstoffgabe ist jedoch der Mehrertrag zu gering, um statistisch abgesichert festgestellt zu werden. Das bedeutet, dass ein abnehmender Grenzertrag vorherrschte. Der geringere Ausfall der Werte im Jahr 2004 als im Jahr 2003 könnte damit zusammen hängen, dass während der Hauptwachstumszeit des Hanfes im Mai und Juni 2003 die Niederschlagsmenge und Temperatur höher waren als im darauf folgenden Jahr. Im Versuchsjahr 2005 wichen die Wachstumswerte vermutlich aus dem selben Grund von den beiden anderen Jahren ab. Hier fielen von Beginn der Vegetationszeit an höhere Niederschlagsmengen und die Temperatur stieg stetig an. Alle anderen Parameter wichen nicht von denen der anderen Versuche ab.

Dass der N_{\min} -Gehalt des Bodens zu Anfang einen Einfluss auf die Versuchsergebnisse hat, ist meines Erachtens auszuschließen. Wie bereits oben erwähnt ist die Ermittlung des N_{\min} -Wertes eine Momentaufnahme, die durch verschiedene Faktoren wie Niederschlag, Temperatur, organische Masse und Mikroben im Boden beeinflusst wird. Obwohl im Versuchsjahr 2003 die N_{\min} -Werte anfangs höher waren als die der beiden nachfolgenden Jahre, kann davon ausgegangen werden, dass dieser Stickstoff von den sich noch im Keimblattstadium befindlichen Pflanzen nicht aufgenommen werden kann. Aufgrund der punktuell gesetzten Ammonium-Depots war eine spätere N_{\min} -

Probenentnahme problematisch, da zwischen den Depots theoretisch ein Stickstoffgefälle herrschen musste. Zudem wird dieser Stickstoff durch die „CULTAN“-Düngung von den Wurzeln weniger aufgenommen. Die Begründung ist im Kapitel „Stand des Wissens“ nachzulesen. Im Ammonium-Depot selbst oder in dessen Nähe würde eine Probenentnahme zu verfälschten Werten führen. Aus diesen Gründen wurde eine weitere N_{\min} -Beprobung unterlassen und der Stickstoffvorrat im Boden vernachlässigt. Eine intensive versuchsbegleitende Beprobung auf N_{\min} hätte den gesamten Versuchsaufwand enorm vergrößert.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten: Die „CULTAN“-Düngung zeigte im Vergleich zur herkömmlichen Düngung mit gleichem Niveau des Stickstoffangebotes weder einen positiven noch einen negativen Effekt auf die Morphologie der Hanfpflanzen. Hier muss auch noch darauf hingewiesen werden, dass die Ermittlung des Durchmessers der Hanfstängel von der messenden Person nicht unabhängig ist und mit dem Turgordruck der Zellen zusammenhängt. Wenn mit dem Messschieber Druck ungleichmäßig auf den Stängel ausgeübt wird, können daraus stark unterschiedliche Messwerte bei ein und derselben Pflanze resultieren.

In wie weit der vermehrte Nährstofftransport im Phloem einen Einfluss auf die Qualität und Menge der Fasern hat, wird in den folgenden Kapiteln erläutert.

5.2.3 Trockenmasseertrag des Hanfstrohs

Wie im Ergebnisteil erläutert wurde, zeigten sich beim Test auf Varianzhomogenität signifikante Unterschiede zwischen den abhängigen Variablen. Dies ist sicherlich auch darauf zurück zu führen, dass der Stichprobenumfang gering war. Tendenziell kann bei Betrachtung der Ergebnisdiagramme (Abb. 4.17 bis 4.20) erkannt werden, dass der Ertrag mit steigender Stickstoffdüngung zunimmt. Eine Ausnahme bildet hierbei das Versuchsjahr 2003. In jenem Jahr erzielte die reduzierte Stickstoffdüngung als „CULTAN“ einen höheren Ertrag als die restlichen Varianten. Die Kontrollvariante war in diesem Jahr im Bezug auf den Strohtrockenmasseertrag mit den Varianten vergleichbar, bei denen die Parzellen mit 120 kg Stickstoff versorgt waren. Dies lässt sich wiederum auf den Witterungsverlauf zurückführen. Günstige Temperaturen und eine gute Niederschlagsverteilung sind sehr stark ertragswirksame Faktoren, die den Aufbau von Pflanzenmasse kompensieren. Theoretisch müsste der Strohertrag sich aus dem spezifischen Gewicht, der Wuchshöhe der Pflanzen, dem Durchmesser und der Anzahl der Pflanzen zusammensetzen. Dies zeigt sich sehr deutlich im Versuchsjahr 2003. Die Pflanzen wiesen einen deutlich größeren Durchmesser und größere Wuchshöhe auf.

Trotz der etwa doppelt so hohen Pflanzendichte konnten die Varianten mit der praxisüblichen Saatedichte den niedrigeren Durchmesser über die Pflanzenzahl im Bezug auf den Ertrag kompensieren. Dies deutet darauf hin, dass auch der mit Luft gefüllte Markparenchymteil in der Mitte des Stängels größer war. Um diese Aussage statistisch abzusichern, müssten weitere Versuche durchgeführt werden. Außerdem kann die Form des Stängels hierbei ebenfalls eine Rolle spielen. Je konischer er nach oben zusammenläuft, desto leichter müsste er werden. Diese Sachverhalte spiegeln sich in ähnlicher Weise in den Jahren 2004 und 2005 wider.

Im Hauptaugenmerk auf die Wirkung der „CULTAN“-Düngung auf den Strohertrag kann abschließend bestätigt werden, was auch bei der Interpretation der Morphologie der Pflanzen beschrieben wurde. Die „CULTAN“-Düngung hat im Vergleich zur herkömmlichen Kopfdüngung mit KAS keine positiven Effekte auf den Strohertrag ergeben. Es gab aber auch keine Ertragseinbußen durch dieses Düngeverfahren.

5.2.4 Fasergehalt und –ertrag des Hanfstrohs

Betrachtet man den Fasergehalt, so ragen die Ergebnisse aus dem Versuchsjahr 2005 positiv hervor. Der Fasergehalt schwankt in diesem Versuchsjahr um ca. 40 %. Die beiden anderen Jahre bringen bei den Ergebnissen Werte von um die 30 % hervor, die auch in der Literatur üblicherweise angegeben werden. Auffällig ist, dass die Schwankungen im Jahr 2005 stärker ausfielen als in den übrigen Versuchsjahren. Normalerweise könnte angenommen werden, dass mit zunehmender Wuchshöhe mehr stabilisierende Fasern im Stängel vorhanden sein müssen, um das Blätterdach zu stützen. Die Wuchshöhe betreffend lagen die Pflanzenlängen im Jahr 2005 jedoch zwischen den beiden anderen Jahren. Dies lässt darauf schließen, dass noch andere Faktoren im Bezug auf den Fasergehalt eine Rolle spielen. Ziel der Versuche war es, den Einfluss des erhöhten Stofftransportes durch das Phloem zu untersuchen. Bei der praxisüblichen Saatedichte im Jahr 2003 und der reduzierten Saatedichte im Jahr 2005 zeigte sich die Tendenz, dass die „CULTAN“-Düngung einen positiven Effekt auf den Fasergehalt hat. Jedoch sind die Schwankungen bei den gemessenen Werten sehr hoch. Im Jahr 2004 waren zwischen allen Varianten keinerlei Unterschiede bezüglich des Fasergehaltes festzustellen und 2003 innerhalb der Varianten mit reduzierter Saatedichte. Letztendlich ist jedoch nicht der Fasergehalt alleine für den wirtschaftlichen Anbau von Hanf ausschlaggebend. Aus wirtschaftlichem Interesse des Anbauers steht vielmehr der Ertrag an Wert gebenden Pflanzenteilen im Vordergrund. Im Fall des Faserertrages ist dies das Produkt aus Pflanzenzahl, Fasergehalt und Wuchshöhe. Hier bleibt der Ertrag des Versuchsjahres 2004 weit hinter den anderen Versuchsjahren

zurück. Da die Ausdünnung in 2004 zwischen den der anderen Jahre liegt und auch der Fasergehalt sich kaum vom Jahr 2003 unterscheidet, muss dieser Minderertrag auf die Wuchshöhe zurückgeführt werden. Im Jahr 2003 gleicht sich der Faserertrag durch die größere Wuchshöhe bei durchschnittlichem Fasergehalt aus. Die Ursachen für diese Unterschiede sind nur spekulativ zu erklären. Bei Betrachtung der Abbildung 4.19 kann man tendenziell Wechselwirkungen im Faserertrag zwischen den Jahren 2003 und 2005 erkennen. In beiden Jahren nimmt der Faserertrag mit steigender Stickstoffdüngung zu. Ein positiver Einfluss durch die „CULTAN“-Düngung kann hier ebenfalls nicht nachgewiesen werden.

5.2.5 Schäbenertrag

Entsprechend der Wuchshöhe und in Bezug auf den Schäbengehalt weist das Versuchsjahr 2003 einen herausragenden Schäbenertrag auf. Die Variante mit der reduzierten Saattiefe liegt tendenziell etwas vor der praxisüblichen Variante. Bei der Variante mit der reduzierten Saattiefe wurden die höchsten Durchmesser ermittelt. Dies lässt darauf schließen, dass der Stängel in Kombination mit dem nicht übermäßigen Fasergehalt seinen Hauptanteil durch das Xylem gebildet hat. Obwohl das Xylem der Wasser führende Pflanzenteil ist, kann der überproportionale Anteil des Xylems nicht auf die Niederschläge zurückgeführt werden. Diese waren im Jahr 2003 am geringsten. Jedoch herrschte in diesem Jahr während der Wachstumsphase eine höhere Temperatur vor. Dies lässt darauf schließen, dass die Pflanzen stärker transpiriert haben und somit mehr Wasser durch den Stängel geführt werden musste. Der Schäbenertrag hatte in den Jahren 2004 und 2005 einen parallelen Verlauf, wobei das Ertragsniveau 2004 etwas höher war als 2005. Dies ist offensichtlich nicht erklärbar und somit wahrscheinlich Zufall.

5.2.6 Einfluss der Düngung auf die Qualität der Fasern

Im Kapitel „Stand des Wissens“ wurden die Wirkungsweise und die Aufnahmemechanismen der verschiedenen Stickstoffformen erläutert. Aufgrund der unterschiedlichen Aufnahmemechanismen wurde davon ausgegangen, dass durch den erhöhten Stofftransport im Bastteil der Pflanzen die Qualität der Fasern beeinflusst wird. Als Qualitätskriterien dienen hierbei wiederum die Bruchdehnung der Fasern, ihr E-Modul und die feinheitbezogene Höchstzugkraft.

Die Mittelwertanalyse der Dehnung zeigte, dass die Bruchdehnung in der Kontrollvariante bis auf eine Ausnahme höher war als die in der Variante mit

Nitratversorgung. In Kapitel 5.1 wurde davon ausgegangen, dass der Elementarfaserverbund einen Einfluss auf die Bruchdehnung der Faserbündel hat. Dass die Kontrollvariante ein besseres Dehnverhalten aufweist als die mit Nitrat versorgte Variante ist ebenfalls ein Indiz dafür. Erklärbar scheint dieses in der Form, dass das durch „Stickstoffüberangebot“ beschleunigte Wachstum ein kompakteres Faserbündel erzeugt. Die Faserbündel im Bastring dienen der Stabilisierung des Stängels. Bei schnellerem Wachstum bzw. bei höheren Pflanzen muss dieses Stabilisierungsgerüst fester sein, damit die Pflanze nicht umknickt.

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass auch bei der „CULTAN“-Düngung zum Teil die Faserbruchdehnung signifikant schlechter ist als bei der Kontrollvariante. Das ist aber nicht in dem Ausmaß festzustellen wie bei der Nitrat-Variante. Werden die Ergebnisse des Wuchsverlaufes der Pflanzen mit in die These einbezogen, dass die Wuchsgeschwindigkeit bzw. die Wuchshöhe einen Einfluss auf die Faserbündel haben, so bestätigt sich, dass die Variante mit Nitrat-Versorgung längere Pflanzen aufweist als die der „CULTAN“-Düngung und der Kontrollvariante.

Um diese Zusammenhänge zu untermauern, wäre es sinnvoll, die Zusammensetzung des Fasermaterials auf seine verhältnismäßigen chemischen Bestandteile oder mittels Mikroskops auf die räumliche Zusammensetzung zu untersuchen. Diese Untersuchungen waren jedoch am Institut für Landtechnik nicht möglich. Allerdings sind diese Ansätze in der oben angesprochenen Form Gegenstand einer wissenschaftlichen Arbeit am Institut für Pflanzenbau der Universität Bonn.

Betrachtet man die Streuung der Werte, so bestätigt sich, dass die mit Nitrat gedüngte Variante geringere Bruchdehnungswerte aufweist als die Kontrolle. Allerdings zeigen die Mediane im Jahr 2003, dass die Kontrollvariante und die „CULTAN“60 Variante gleich sind. Die Variante mit 120 kg Stickstoff in Ammoniumform wies sogar ein besseres Dehnungsverhalten auf als die Kontrollvariante. In den beiden nachfolgenden Jahren lagen die Mediane der gedüngten Varianten niedriger als die der Kontrolle. Somit lässt sich kein spezieller Einfluss der „CULTAN“-Düngung auf die Bruchdehnung der Fasern nachweisen.

Die Analyse des E-Moduls verhält sich gleich denen der vorangegangenen Analysen der Häckselversuche. Es gibt wenige signifikante Unterschiede zwischen den Varianten. Dagegen ist ein deutlicher Jahreseinfluss zu erkennen. Die Daten weisen im Jahr 2003 um zum Teil mehr als 50 % höhere Werte auf. Dies resultiert wahrscheinlich aus den in 2003 ebenfalls höheren Werten bei der feinheitsbezogenen Höchstzugkraft. Dieser Sachverhalt lässt sich wiederum damit erklären, dass die Pflanzen im Jahr 2003 eine längere Wuchshöhe erzielten als in den beiden nachfolgenden Jahren. Beim Vergleich

der Boxplotdarstellungen von Wuchshöhen und feinheitsbezogener Höchstzugkraft spiegelt sich das Muster der Wuchshöhenverteilung auf das der Zugkraft der Fasern wider. Die Varianzanalyse zeigte zwar signifikante Unterschiede im Zugkraftverhalten der Fasern im „CULTAN“-Düngungsversuch, jedoch lässt sich kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Behandlung und Ergebnis herleiten. Auch hier erscheinen die Boxplots aussagekräftiger als die einzelnen Varianzanalysen. Möglicherweise macht die Zusammenfassung der unterschiedlichen Saatstärken einen kontroversen Eindruck. Aber die Ermittlung der einzelnen Werte des Bestandes zeigten teilweise ähnliche oder nur unwesentlich voneinander abweichende Bestandesdichten auf. Es ist auch im Praxisanbau von Hanf so, dass bei höheren Saatstärken Bestandesdichten auf schlechten Standorten denen der reduzierten Bestandesdichte auf guten Standorten ähneln. Da sich bei der Prüfung der Daten auf Varianzgleichheit bei den beschriebenen Qualitätsparametern keine signifikanten Unterschiede ergaben, ist es möglich, die Qualitätsparameter unabhängig von der Saatstärke zu betrachten. Diese Ergebnisse wurden anhand der Boxplots dargestellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Möglichkeit der Qualitätsregulierung über die Düngung unzureichend gegeben ist. Wirtschaftlich betrachtet bleibt dem Landwirt eher die Möglichkeit, über eine Kombination von Standortauswahl und Düngung den Ertrag zu beeinflussen.

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Motivation für die Forschungsarbeiten war die Verbesserung der Wertschöpfung des Faserhanfanbaus. Ansatzpunkte waren dabei zum einen, die erste industrielle Verarbeitungsstufe in Form der Grünentholzung mittels Feldhäcksler in den landwirtschaftlichen Betrieb zu verlagern. Zum anderen sollte der Ertrag und die Qualität der Fasern verbessert werden. Hierfür wurde die „CULTAN“-Düngung ausgewählt, die bei anderen Kulturen auch ein Einsparpotenzial bei der Düngung mit sich bringt.

Untersucht wurden die Einflüsse der verschiedenen Häckselintensitäten auf die Qualitätsparameter Bruchdehnung, E-Modul und Faserdehnung im Vergleich zum Trockenaufschluss mittels einer Laborentholzungsmaschine. Weiterhin wurde der Einfluss des Trockensubstanzgehaltes bei der mechanischen Belastung des Pflanzenmaterials auf die oben genannten Parameter untersucht. Ein weiterer Parameter war der Schnittzeitpunkt des Erntegutes.

Bei der „CULTAN“-Düngung wurde neben der praxisüblichen Saatstärke diese um die Hälfte reduziert. Bei den Dünge­stufen handelte es sich um eine Kontrollvariante ohne Düngung, eine Variante mit der praxisüblichen Stickstoffgabe von 120 kg Stickstoff in Form von Kalkammonsalpeter und um 120 kg Stickstoff als „CULTAN“ in Form von Ammoniaklösung. Zusätzlich wurde eine Variante mit halber Stickstoffmenge als Ammoniaklösung gewählt.

Die Bruchdehnung und der E-Modul wurden durch die Intensität, das heißt die eingestellte Häcksellänge und die Zuschaltung eines Corncrackers, oder durch Versetzen der Gegenschneide nicht beeinflusst. Es traten signifikante Unterschiede zwischen Häckselvariante und herkömmlichem Trockenaufschluss auf. Die Werte der feinheit­bezogenen Höchstzugkraft lagen im Bereich von 50 % bis 60 % von denen des Trockenaufschlusses. Daraus kann geschlossen werden, dass die Fasern aus der Grünentholzung in Verbundwerkstoffen eingesetzt werden können, die keiner zu hohen Druck- oder Zugbelastung ausgesetzt werden und gleichzeitig eine ausreichende Elastizität aufweisen sollen. Eine weitere zu behandelnde Fragestellung innerhalb dieser Thematik liegt demnach zu folgern in der Untersuchung der Faser-Matrix-Haftung der mittels Grünentholzung aufgeschlossenen Fasern. Durch eine rauere Oberfläche der Fasern durch die Verletzungen bei der Ernte kann bei der Faser-Matrix-Haftung ein positiver Effekt erwartet werden.

Ein späterer Schnittzeitpunkt bewirkte keine Beeinflussung der Qualität des Fasermaterials. Auch das Antrocknen des zu häckselnden Materials brachte keine

Qualitätsverbesserung oder -verschlechterung mit sich. Bei Gesetzesänderungen bezüglich der Erntebestimmungen von Faserhanf wäre demnach eine Verlagerung der Ernte in den Herbst denkbar. Dadurch fiel der Einfluss der Blätter bei der Grünernte des Hanfes weg.

Durch die Anwendung des „CULTAN“-Düngeverfahrens wurden keine statistisch abgesicherten Unterschiede bezüglich Ertrag und Qualität nachgewiesen. Durch dieses Düngeverfahren kam es weder zu einer Verbesserung der Werte noch zu einer Verschlechterung. Mit steigender Stickstoffdüngungsintensität dünnte sich der Bestand stärker aus. Ein Unterschied zwischen Ammoniumdüngung und Nitratdüngung konnte dabei nicht festgestellt werden. Die Wuchshöhe stieg durch die Stickstoffdüngung an, es konnten jedoch keine Unterschiede zwischen den gedüngten Varianten festgestellt werden. Die gewonnenen Daten belegen also, dass im Hanf eine Ammonium-Depot-Düngung unter Umständen eingesetzt werden kann, ohne Ertrags- oder Qualitätsverluste hinnehmen zu müssen.

Die Witterung hat einen stärkeren Einfluss auf den Ertrag und die Qualität als die durchgeführten Düngungsmaßnahmen. Dies zeigt, dass der Einfluss des Anbaustandortes den größten Einfluss auf die Ertrags- und Qualitätssicherung hat. Ohne Zweifel muss die Bestandesführung an den Standort angepasst werden. Vor allem wird bei den beeinflussbaren Wachstumsfaktoren dem Stickstoff die größte Relevanz zugesprochen.

7 Literaturverzeichnis

- BASSETTI, P., MEDIAVILLA, V., SPIESS, E., AMMANN, H., STRASSER, H., MOSIMANN, E. (1998): Hanfanbau in der Schweiz – Geschichte, aktuelle Situation, Sorten, Anbau- und Erntetechnik, wirtschaftliche Aspekte und Perspektiven. FAT-Berichte Nr. 516. Eidg. Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (Hrsg.)
- BECKMANN, A. (1998): Methoden zur Messung physikalischer Eigenschaften von Industrie-faser-Lein (Flachs) und damit verstärkten Kunststoffen; Diss. RWTH Aachen
- BECKMANN, A., KLEINHOLZ, R. (1999), Chancen und Risiken von Naturfasern für PKW-Innenraumteile, in 2. Internationales Symposium „Werkstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen“, 1. und 2. September 1999, GMM Tagungsband, Erfurt
- BLUHM, C., MÜSSIG J. (1999): „Ansätze zur reproduzierbaren Röstgradmessung mit dem Ziel der Bereitstellung einheitlicher Hanffasern.“ Themenkonferenz Ermittlung von Qualifizierungsbedarf für den Hanfanbau (Haus Düsse)
- BÓCSA, I., KARUS M., LOHMEYER, D. (2000): Der Hanfanbau: Botanik, Sorten, Anbau und Ernte, Märkte und Produktlinien. Landwirtschaftsverlag Münster, 2. Auflage
- CHRISTEN, O., SCHULZE, B. (1997): Produktionstechnik der Hanferzeugung I – Beitrag des Pflanzenbaus. In: Hanf, C.-H. 1997. Anbau, Ernte und Aufbereitung sowie Verwendung von Hanf. Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe, Band 7, Teil 2, Landwirtschaftsverlag GmbH Münster, S. 179-250
- DAMBROTH, M., SEEHUBER, R. (1988): Flachs – Züchtung, Anbau und Verarbeitung. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart
- DAM VAN, J.E.G. (1995): Potentials of Hemp as industrial fibre crop” – Symposium Bioresource Hemp, Frankfurt March 2-5
- DAVID, T., KARUS, M., KAUP, M. (1999): Volumina und Strukturen der europäischen Hanf- und Flachsmärkte, in 2. Internationales Symposium „Werkstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen“, 1. und 2. September 1999, GMM Tagungsband, Erfurt
- DEBRUCK, J., REICHARDT, I. (2002): Neue Ergebnisse zur Anbautechnik von Hanf. UFOP-Schriften 20, S. 229-237
- DIEPENBROCK, W., FISCHBECK, G., HEYLAND, K.-U., KNAUBER, N. (1999): Spezieller Pflanzenbau. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, UTB für Wissenschaft. 3. Auflage, S. 297-302

- DIN 55 350, (1989): Qualität; Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik. Berlin, Köln: Beuth-Verlag GmbH
- DRIELING, A. (1999): Probleme bei der Charakterisierung von Festigkeit, Feinheit und Länge von Bastfasern. Abschlussbericht Forschungsvorhaben FK Textil e.V./AiF 11083, Faserinstitut Bremen e.V.
- EHLERT, D.; IDLER, CH.; ACKERMANN I. (1997): Hanfernte '96 in Brandenburg. In: Erzeugung, Aufbereitung und Verarbeitung von Naturfasern für nichttextile Zwecke, VDI-MEG-Kolloquium Agrartechnik, Heft 22, Bonn, S. 80-91
- FINCK, A. (1992): Dünger und Düngung. Grundlagen und Anleitung zur Düngung der Kulturpflanzen, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim
- FRANKE, W. (1989): Nutzpflanzenkunde; 4. Auflage, Stuttgart, New York: Georg Thieme Verlag
- FRANKEN-WELZ VON, 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. Schriftenreihe des Institutes für Pflanzenbau, Diss. Universität Bonn
- FUNDER, A. (1973): Die Qualitätsbeurteilung von Bastfasern mittels Bündelfestigkeitsprüfung. Textil Praxis International
- FÜRLI, C. (2006): Naturfaserproduktion. In: ATB Potsdam (2006): Jahresbericht des ATB 2005, S. 49-53
- GRAF, T., RUDEL, H., VETTER, A. (2002): Ergebnisse Thüringer Anbauversuche zu Faserpflanzen, insbesondere Hanf. UFOP-Schriften 20, S. 289-293
- GUSOVIVUS, H.-J. (2002): Stoffwandlungen und Umwelteinflüsse in Verfahrensketten für Faserhanf; Dissertation Cuvillier Verlag Göttingen
- HAMPICKE, U. ET AL. (2007): Anbau der heimischen Faserpflanzen. In: Regionale Wertschöpfungssysteme von Flachs und Hanf. Verlag Metropolis, ISBN 978-3-89518-641-7
- HANDBUCH DES GENOSSENSCHAFTSBAUERN (1955): Band II Pflanzliche Produktion, Erster Teil, Hrsg. Von K. Viehweg & O. Rosenkranz, 2. Auflage, Deutscher Bauernverlag, Berlin, 528 S.
- HANF, C.-H. (1996/1997) Wissenschaftliche Untersuchungen zum Thema „Anbau, Ernte und Aufbereitung sowie Verwendung von Hanf“. Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe, Band 7 Teile 1 und 2, Münster

- HARIG, H., BÄUMER, R., GERARDI, H. (1994): „Wie zuverlässig lässt sich die Bündelfestigkeit von Rohbaumwolle bestimmen?“ Melliand Textilberichte, (ISSN 0025-8989) 12/1994, S. 966 – 970
- HESCH, R., MEYER, A., BECKMANN, F., HESCH, K. (1996): Hanf, Perspektiven für eine ökologische Zukunft, Taoasis Lemgo, 256 S
- HEUSER, O. (1927): Hanf und Hartfasern. Verlag von Julius Springer, Berlin
- HEYLAND K.-U., KROMER K.-H. (1995): Methodenbuch Industriefaser Lein; Arbeiten aus dem Institut für Landtechnik der Rheinischen Friedrich-Wilhelms Universität Bonn, Heft 18, S. 13 - 25
- HOLZNER, W., GLAUNINGER, J. (2005): Ackerunkräuter. Bestimmung, Biologie, Landwirtschaftliche Bedeutung. Leopold Stocker Verlag Graz, Stuttgart, 264 S.
- HÖPPNER, F., MENGE-HARTMANN, U. (1994): Anbauversuche zur Stickstoffdüngung und Bestandesdichte von Faserhanf. Landbauforschung Völkenrode 44, S. 314-324
- HÖPPNER, F., MENGE HARTMANN, U. (1999): Einfluss der Bestandesführung auf Erträge und Qualität von Hanf. Arbeiten aus dem Institut für Landtechnik der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität 28, S. 6-12
- HÖPPNER, F., MENGE HARTMANN, U. (2000): Cultivation strategies of hemp for sue of fibres and oil. Online Proceedings, Biorohstoff Hanf, Wolfsburg, 13.-16.09.2000
- HÜTTL, R. F. (2001): Rekultivierung im Braunkohletagebau – Fallbeispiel Niederlausitzer Bergbaufolgelandschaften. Akademie-Journal 1, Alpha, Lampertsheim
- ISO 8402 (1994): Quality management and quality assurance; Vocabulary. Internationale Organization for Standardization, Switzerland
- JAHN-DEESBACH, W. (1965): Die Düngung des Hanfes. In: Handbuch der Pflanzenernährung und Düngung. Axel Springer Verlag
- KÄMMERLING, B. (1990): Die Bedeutung von Anbau- und Ernteverfahren sowie der Sorte für die Nutzung eines zur Kurzfasergewinnung geeigneten Leins. Dissertation Bonn
- KAHNT, G., EUSTERSCHULTE, B. (1996): Ackerbauliche und ökologische Aspekte des Anbaus von Faserpflanzen. Forum – Pflanzenfasern – ein moderner nachwachsender Industrierohstoff. 13.02.1996, Stuttgart. S. 1- 6
- KARUS, M., KAUP, M., LOHMEYER, D. (2000): Studie zur Markt- und Preissituation bei Naturfasern (Deutschland und EU). Gülzower Fachgespräche (Studie für die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.), Gülzow März 2000

- KARUS, M., KUPFER, M. 2003: Das kleine Hanf-Lexikon. 2. Aufl.; Herausgeber nova-Institut; Werkstatt-Verlag ISBN 3-89533-271-2
- KARUS, M., ORTMANN, S., VOGT, D. (2004), Naturfasereinsatz in Verbundwerkstoffen und in der deutschen Automobil-Produktion 1996 bis 2003. Köln
- KEIJZER, P., METZ, P. (1994): Breeding of flax for fibre production in Western Europe. In: Sharma, H.S.S und C.F. van Sumere: The Biolog and Processing of Flax. M.Publications, Belfast, S. 33-36
- KÖRBER-GROHNE, U. (1987): Nutzpflanzen in Deutschland – Kulturgeschichte und Biologie. Konrad-Theiss Verlag
- KOZLOWSKI, R., BARANIECKI, P., GRABOWSKA, L., MANKOWSKI, J. (1995): Recultivation of degraded areas through cultivation of hemp. In: Nova-Institut für politische und Ökologische Innovation (Hrsg.): Biorohstoff Hanf. Tagungsband zum Symposium, Frankfurt/Main, 2. Aufl. S. 259-267
- KRÜGER, K., (2000): Mehrjährige Untersuchungen zum Hanfanbau in Brandenburg. Online Proceedings, Biorohstoff Hanf, Wolfsburg, 13.-16.09.2000
- LÉON, J., SCHULZE LAMMERS, P., HAVERKAMP, M., ROLLER, O. (2004): Faserqualität einheimischer Faserpflanzen, die Bedeutung umweltbedingter Variabilität für die Ertrags- und Qualitätsbildung einheimischer Faserpflanzen, sowie die Methodenentwicklung zur Qualitätsprüfung. Forschungsbericht 120, Lehr- und Forschungsschwerpunkt „Umweltverträgliche und Standortgerechte Landwirtschaft“ Landwirtschaftliche Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
- LISSE, S. N. & MENDHAM, N. J. (2000): Cultivar, sowing date and plant density studies of fibre hemp (*Cannabis sativa* L.) in Tasmania. Australian Journal of Experimental Agriculture 40, 975-989
- LOHMEYER, D. (1997): Hanf im ökologischen Anbau. Online-Proceedings des 2. Biorohstoff Hanf (www.biorohstoff-hanf.de). Nova-Institut (Hrsg.)
- MARTENS, R. MÜSSIG, J. (2000): Qualitative Produktion von Hanffasern; in: Proceedings zum 3. Internationalen Symposium Biorohstoff Hanf & andere Faserpflanzen, Wolfsburg 13.-16.09.2000
- MARSCHNER, H. (1995): Mineral nutrition of higher plants. 4th Ed. Academic Press, Harcourt Brace Jonanovich Publishers, London
- MASTEL, K., Stolzenburg, K., Seith, B. (1998): Informationen für die Pflanzenproduktion – Untersuchungen zu pflanzenbaulichen, erntetechnischen und ökonomischen Fragen des Anbaus von Faser- und Körnerhanf. Heft 7/1998. Landesanstalt für Pflanzenbau, Forchheim (Hrsg.)

- MASTEL, K. (2002): Prüfung des Prototyps einer Maschine zur Ernte von Hanfstroh und Hanfkörnern. In: Informationen für die Pflanzenproduktion – Sonderheft 2/2002, LAP Forchheim
- MEDIAVILLA, V., BASSETTI, P., KONERMANN, M., SCHMID-SELMBROUCK, I. (1998): Optimierung der Stickstoffdüngung und Saatmenge im Hanfanbau. Agrarforschung 5(5), S. 241-244
- MEDIAVILLA, V., BASSETTI, P. UND LEUPIN, M. (1999): Agronomische Eigenschaften von Hanfsorten. Agrarforschung 6(10), 393-396
- MEIJER, W. J. M., VAN DER WERF, H. M. G., MATHEJSSSEN, E. W. J. M., VAN DEN BRINK, P. W. M. (1995): Constraints to dry matter production in fibre hemp (*Cannabis sativa* L.). European Journal of Agronomy 4, 109-117
- MICHAEL, G., BERINGER, H. (1980): The role of hormones in yield formation. In: "Physiological aspects of Crop Productivity", International Potash Institute, Proceedings of the 15th Colloquium of the IPI in Wageningen / The Netherlands, 85-116
- MIECK, K.P., NECHWATAL, A., KNOBELSDORF, C. (1994): Anwendungsmöglichkeiten von Naturfaserstoffen bei Verbundmaterial. Melliand Textilberichte, (ISSN 0025-8989), 11/1994, S. 892-898
- Münzer, W., (1999): Zusammenfassende Ergebnisse aus Forschungsvorhaben mit ausgewählten Rohstoffpflanzen. 7. Symposium, Im Kreislauf der Natur – Naturstoffe für die moderne Gesellschaft. Würzburg, 21.-22.06.21999, S. 95-113
- MÜSSIG, J. (2001): Untersuchung heimischer Pflanzenfasern für die Herstellung von naturfaserverstärkten Duroplasten –vom Anbau zum Verbundwerkstoff- Bremen Fortschritt-Berichte VDI Reihe 5 Nr. 630
- NOVA-INSTITUT (2003): Das kleine Hanflexikon, 2. Auflage ISBN 3-89533-271-2 Verlag Die Werkstatt
- NOVA-INSTITUT U. A. (2006): nova-Institut GmbH, M-Base-Engineering+Software, Faserinstitut Bremen, Scheben Scheuerer und Partner: Naturfaserverstärkte Kunststoffe, Hürth, www.nova-institut.de
- PACENKA ET. AL. (2005): Preparation and processing of preserved natural fibres In: ATB Potsdam (2006): Jahresbericht des ATB 2005, S. 49-53
- PALLESEN, B.E. (1996): The quality of combine-harvested fibre flax for industrial purposes depends on the degree of retting; in : Industrial Crops and Products Vol. 5 (1) 1996, S. 65-78
- PAULITZ, J., GUSOVIUS, H.-J. (2007): Faserernte- und Faseraufschlusstechnologien. In: Regionale Wertschöpfungssysteme von Flachs und Hanf. Verlag Metropolis, ISBN 978-3-89518-641-7

- QUINT, B. (1996): Information zur Qualifizierung von Röste; IAF Reutlingen
- RICHTER, U. ET AL. (2007): Naturfaserwirtschaft heute. In: Regionale Wertschöpfungssysteme von Flachs und Hanf. Verlag Metropolis, ISBN 978-3-89518-641-7
- 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, Aufarbeitung und Verarbeitung von Naturfasern für nichttextile Zwecke, Bonn, ISSN 0939-3048. S. 166-182
- RÖHRICHT, CH., SCHULZ, J. (2003): Hanf – Abschlussbericht. Erprobung vereinfachter Anbau-, Ernte- und Verarbeitungstechnologien von Hanf für technische Einsatzgebiete. Hrsg. Von der sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Dresden, Leipzig, 76 S., 3 Anlagen
- ROPERIA, S.-S., SOMMER, K. (1996): Phytohormone bei Winterweizen bei einer N-Versorgung nach dem "CULTAN"-Verfahren, VDLUFA-Kongressband, 717-720
- ROPERIA, S.-S. (1998): Wachstum, Entwicklung und Ertragsbildung bei Triticale und Weizen in Abhängigkeit von der Art der Versorgung mit Stickstoff und der Anwendung von Phytohormonen, Diss. Bonn
- RUDOLPH, F. (2006): Faserverbundwerkstoffe im Fahrzeugbau, Expertise im Rahmen des BMBF-Verbundvorhabens 07REG23B, Kassel/München/Berlin
- SCHEEL, R. (1937): Anbau von Flachs und Hanf. Deutsches Forschungsinstitut für Bastfasern, Sorau, 40 S.
- SCHEER-TRIEBEL, M. & LÉON, J. (2000): Industriefaser – Qualitätsbeschreibung und pflanzenbauliche Beeinflussungsmöglichkeiten bei Faserpflanzen: ein Literaturreview. Pflanzenbauwissenschaften 4(2), S. 91-102
- SCHENEK, A. (2000): Naturfaserlexikon, Deutscher Fachverlag, Frankfurt am Main
- SCHILLING, G. (2000): Pflanzenernährung und Düngung. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, ISBN: 3-8252-8189-2
- SHMID, H.G., MÜSSIG, J. (2002): Image Analysis by means of scanning technique for fast and cost characterization of bast fibres; "In Bornimer Agrartechnische Berichte" 10. und 11. September 2002 S. 34
- SOMMER, K. (2005): CULTAN-Düngung - physiologisch, ökologisch, ökonomisch optimiertes Düngungsverfahren für Ackerkulturen, Grünland, Gemüse, Zierpflanzen und Obstgehölze. AgroConcept GmbH Bonn; ISBN 3-7862-0151-X

- STRUIK, P. C., AMADUCCI, S., BULLARD, M. J., STUTTERHEIM, N. C., VENTURI, G., CROMACI, H. T. H. (2000): Agronomy of fibre hemp (*Cannabis sativa* L.). European Industrial Crops and Products 11, S. 107-118
- THOMAS, E. (2006): Feldversuchswesen, Verlag Eugen Ulmer Stuttgart ISBN 3-82528319-4 (UTB)
- 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 Bd. 7, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster, S. 301-492
- VETTER, A. & GRAF, T. (1999): Ausgangssituation, Markt und Innovationspotential pflanzlicher Inhaltsstoffe für die Landwirtschaft und die Industrie. Tagungsband 2. Internationales Symposium: Werkstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen, Erfurt
- WASKOW, F. (1995) Hanf & Co. Die Renaissance der heimischen Faserpflanzen. HRSg. Vom Katalyse-Institut für angewandte Umweltforschung. Göttingen, Verlag Die Werkstatt 224 S.
- WERF VAN DER, H. M. G. (1994): Crop physiology of fiber hemp (*Cannabis sativa* L.). Diss. Univ. Wageningen (NL)
- WITTROCK, A.F., HOFFMANN, G.M., VERREET (Bearb.) (1995): Produktionstechnik der Hanferzeugung II. Krankheiten, Schädlinge und Unkräuter im Hanf und deren Bekämpfung. In: HANF, C.-H. 1997. Anbau, Ernte und Aufbereitung sowie Verwendung von Hanf. Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe, Band 7, Teil 2, Landwirtschaftsverlag GmbH Münster, S. 253-299
- ZÖPHEL, B., KREUTER, TH., MÄNOCKE, ST., SCHULZ, J. (2001): Nachwachsende Rohstoffe (Hanf, Flachs, Salbei und Kamille) – Anbau und Bedeutung für den Lebensraum Acker. Hrsg. Vom Sächsischen Landesamt für Umwelt und Geologie